



HAL
open science

Ville, transports et environnement. Contributions relatives des paramètres du trafic routier affectant la pollution sonore et atmosphérique en milieu urbain

Jean-Pierre Nicolas

► **To cite this version:**

Jean-Pierre Nicolas. Ville, transports et environnement. Contributions relatives des paramètres du trafic routier affectant la pollution sonore et atmosphérique en milieu urbain. Sciences de l'Homme et Société. Université Lumière - Lyon II, 1996. Français. NNT: . tel-00267185

HAL Id: tel-00267185

<https://theses.hal.science/tel-00267185>

Submitted on 26 Mar 2008

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

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

UNIVERSITE LUMIERE - LYON 2
FACULTE DE SCIENCES ECONOMIQUES ET DE GESTION

VILLE, TRANSPORTS ET ENVIRONNEMENT

*Contributions relatives des paramètres du trafic routier affectant
la pollution sonore et atmosphérique en milieu urbain*

*Thèse pour le Doctorat de Sciences Economiques
présentée et soutenue publiquement par Jean-Pierre NICOLAS
le 12 septembre 1996*

Jury : Alain BONNAFOUS (directeur de thèse), Professeur à l'Université
LUMIERE LYON 2
Yves CROZET, Professeur à l'Université LUMIERE LYON 2
Jean DELSEY (rapporteur), Directeur de recherche à l'INRETS
Jean-Charles HOURCADE (rapporteur), Directeur de recherche au CNRS
Jean LATERRASSE, Directeur de recherche au CNRS

L'Université Lumière - LYON 2 n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

Remerciements,

à Eric Tabourin, Gérard Claisse et Gérard Santi pour leurs critiques et leurs conseils, ainsi qu'au CETE de Lyon et au Centre Informatique Recherche de l'INRETS pour avoir mis à notre disposition les informations et les outils nécessaires à ce travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 1

ECOLOGIE ET ECONOMIE : DES INTERETS CONTRADICTOIRES ?

1. L'approche traditionnelle : économie du Bien-Être et externalités
2. L'élargissement du cadre de réflexion pour mieux prendre en compte les rapports entre économie et écologie
3. Transition : écologie, économie, transports routiers urbains

CHAPITRE 2

LES NUISANCES DES TRANSPORTS ROUTIERS URBAINS : LA MESURE DES ENJEUX A TRAVERS LES EVALUATIONS ECONOMIQUES

1. Présentation des phénomènes de pollutions atmosphériques et sonores dans lesquels interviennent les transports
2. La référence au marché et la mesure des courbes de préférence individuelles
3. Les évaluations macroéconomiques
4. Synthèse
5. Conclusion

CHAPITRE 3

CONSTRUCTION D'UN OUTIL D'EVALUATION DES EMISSIONS POLLUANTES ET SONORES DU TRAFIC ROUTIER

1. Présentation de la méthode de calcul retenue pour estimer les émissions polluantes et sonores du trafic routier
2. De la méthode à l'interprétation des résultats obtenus
3. Conclusion

CHAPITRE 4

CONGESTION URBAINE, ENVIRONNEMENT ET CADRE DE VIE

1. Le thème de la congestion routière en économie : un effet externe difficile à internaliser
2. L'impact de la congestion sur les émissions sonores et atmosphériques au niveau du réseau d'une agglomération
3. Conclusion

CHAPITRE 5**EVOLUTION DE LA MOBILITE *VERSUS* PROGRES TECHNOLOGIQUE**

1. L'évolution de la mobilité
2. L'évolution et la diversification technologique du parc automobile
3. L'impact relatif des évolutions de la mobilité et des technologies sur les émissions atmosphériques et sonores de l'automobile en milieu urbain
4. Conclusion

CONCLUSION GENERALE**ANNEXES****BIBLIOGRAPHIE****TABLE DES MATIERES**

INTRODUCTION GENERALE

Ce travail, ancré dans le domaine des transports, se situe également à la croisée de deux thèmes privilégiés de ce dernier quart du 20^{ème} siècle, avec d'un côté la montée des préoccupations environnementales et de l'autre la spectaculaire croissance démographique des villes et de vastes conurbations, souvent rassemblés sous le terme "d'écologie 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 de 2/3 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.

Le fait urbain

Les statistiques générales sur le taux d'urbanisation sont à prendre avec précaution du fait des divergences de définitions suivant les pays. Si l'on reprend malgré tout les chiffres annuels de l'ONU, les deux tiers environ de l'humanité habitait en ville à la fin des années 80. Pour prendre toute sa force ce chiffre doit être resitué dans une dynamique de long terme : les habitants des bourgs du Haut Moyen-Age représentaient moins de 10% de la population ; en 1900, les urbains ne dépassait guère les 15% de la population mondiale et l'explosion urbaine de ce siècle conduit les statisticiens de l'ONU à estimer ce chiffre à plus de 70% pour la période 1995-2000¹.

Ce mouvement très fort et extrêmement rapide à l'échelle de l'histoire de l'humanité peut être placé sous le signe de la disparité :

- Dans certains pays où le mouvement d'urbanisation est ancien, 90% de la population vit en ville comme aux Pays-Bas par exemple ; par contre la Chine ou l'ensemble de l'Afrique Noire n'en comptent respectivement que 40 et 30%. Ces chiffres ne doivent pas conduire trop rapidement à une opposition entre dynamiques des pays occidentaux et des pays en voie de développement : en 2000, Sao Paulo et Mexico constitueront les 2 plus grandes agglomérations du globe.
- Ce dynamisme urbain a aussi ses laissées pour compte, toutes les agglomérations ne connaissent pas la même expansion. En France les villes de certains bassins industriels ou miniers sinistrés, comme Valenciennes ou Saint-Etienne, se

¹ Les données chiffrées sur lesquelles repose notre présentation ont été reprises dans deux ouvrages : PELLETIER J., DELFANTE Ch., *Villes et urbanisme dans le monde*. Paris : Masson, 1989. 200 p. pp. 11-12.
PIGEON Patrick, *Ville et environnement*. Paris : Nathan, Coll. Géographie d'aujourd'hui, 1994. 192 p. p. 11.

trouvent emportées dans la crise de leur région et voient leur population décroître. Le mouvement d'urbanisation, s'il est très fort, ne se répartit pas de manière homogène dans l'espace et ne s'ancre pas sur tous les noyaux préexistants. Ce point est important car dans notre travail, nos réflexions font implicitement référence à la tendance dominante ; elles auraient du prendre en compte des préoccupations fort différentes si elles avaient intégré les problèmes spécifiques des agglomérations touchées de plein fouet par les restructurations économiques.

- Enfin l'expansion urbaine a jusqu'à maintenant beaucoup plus reposé sur solde positif des mouvements migratoires que sur une dynamique démographique interne. La croissance de la ville s'est réalisée grâce à l'exode rural, ou à l'immigration dans les pays occidentaux aujourd'hui. On assiste ainsi à un ample mouvement de concentration des hommes dans l'espace avec, en contrepoint, la désertification de vastes zones rurales. Cette tendance peut s'observer en France, même si elle s'est fortement ralentie : la proportion de la population habitant la moitié la moins dense du territoire était de 7,5% en 1975, 7% en 1982 et 6% en 1990².

D'un point de vue environnemental, un tel mouvement n'est pas neutre, que ce soit au niveau local bien sûr, mais aussi à des échelles régionales et globales. Au début du XXI^{ème} siècle, 30 villes auront dépassé chacune les 30 millions d'habitants. Pour reprendre un mot de Michel Serres, "sur la Planète-Terre interviennent désormais moins l'homme comme individu et sujet (...) que, massivement, des plaques humaines et denses"³. Et ces mégalo-poles, consistantes par leur emprise sur de vastes territoires et fortement solidarisées les unes aux autres par les réseaux économiques et sociaux qui les relient, modifient leur environnement tant par leur seule présence qui affecte les conditions climatologiques de la région où elles s'insèrent, que par les flux et les échanges qu'elles connaissent ainsi que les prélèvements et les déchets qu'elles génèrent sur l'ensemble du globe.

Les questions environnementales et l'exigence de développement durable

Cette forte poussée de l'urbanisation contribue et dépend tout à la fois d'une dynamique plus large de l'évolution économique, démographique et sociale de l'humanité au cours du XX^{ème} siècle. Ce mouvement de nos sociétés humaines est de plus en plus perçu 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. Son succès est certain puisqu'elle fait aujourd'hui partie des thèmes qu'il est politiquement correct d'évoquer dans toute réunion publique, avec les avantages mais aussi les excès que cela entraîne parfois.

² LE BRAS Hervé, *La concentration de la population française*. Paris : Classeur DATAR - Prospective et Territoire, 1991.

³ pp. 34-35 de SERRES Michel, *Le contrat naturel*. Paris : Flammarion, coll. Champs, 1990. 191 p.
On peut compléter cette affirmation par l'image suivante : "Visible la nuit par satellite comme la plus grosse galaxie de lumière du globe, en tout plus peuplée que les Etats-Unis, la mégalo-pole Europe part de Milan, franchit les Alpes par la Suisse, longe le Rhin par l'Allemagne et le Benelux, prend l'Angleterre en écharpe après avoir traversé la mer du Nord et finit à Dublin, passé le canal Saint Georges. Ensemble social comparable aux Grands Lacs, ou à l'islandis du Groenland par sa taille, l'homogénéité de son tissu et son emprise sur le monde, cette plaque bouleverse depuis longtemps l'albédo, la circulation des eaux, la chaleur moyenne et la formation des nuages et des vents, pour tout dire les éléments, plus le nombre et l'évolution des espèces vivantes, dans, sur et sous son territoire." *Ibidem*.

Cette notion de développement durable trouve ses racines dans la prise de conscience provoquée en 1972 par les travaux du club de Rome et le rapport Meadows sur les contradictions entre une croissance toujours plus forte des populations et des niveaux de vie alors que les ressources naturelles ne sont disponibles qu'en quantité limitée. Cependant les incitations à une limitation de la croissance - la fameuse "croissance zéro" - sur lesquelles débouche ce rapport ont conduit à une série de critiques que l'on a tenté de dépasser au début des années 80 en proposant la notion de développement durable : pourquoi ne pas accepter l'idée de croissance si les progrès techniques et les évolutions structurelles de l'économie qui l'accompagnent évitent un renforcement de la pression des activités humaines sur l'environnement ? C'est cette idée qui a été reprise par le rapport 1987 de la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement et qui a connu le succès que l'on sait⁴.

Essentiellement cadrée par l'idée d'une contrainte de solidarité intergénérationnelle, cette notion est restée très ouverte et a donné lieu à des développements très différents. Une approche très néoclassique consiste à rechercher les conditions d'une allocation optimale intertemporelle du bien-être collectif en supposant les ressources naturelles et le capital manufacturé comme parfaitement substituables. De nombreux auteurs, regroupés au sein de "l'Ecole de Londres", contestent cette assimilation et considèrent que le capital naturel joue un rôle et assure des fonctions que le capital manufacturé ne peut assumer : sa destruction conduit bien souvent à des pertes irréversibles dont on ne mesure pas forcément sur l'instant le manque qu'il représentera dans l'avenir. Enfin d'autres courants insistent sur la nécessité d'une équité intragénérationnelle, entre Nord et Sud par exemple, pour que les bases d'un développement durable et d'une équité intergénérationnelle puissent être réellement posées.

Héritière de la prise de conscience des problèmes écologiques posés à l'échelle planétaire, la (les) problématique du développement durable reste souvent attachée à ce niveau global : effet de serre, couche d'ozone, pluies acides, biodiversité ou redéfinition des relations Nord-Sud sont des thèmes qui s'ancrent bien sûr sur des réalités locales mais dont la pleine mesure ne peut être prise que sur des échelles très larges.

Nous l'avons vu, certaines des agglomérations humaines, aujourd'hui mégalo-poles, se situent directement à une échelle globale, modifiant l'environnement et les conditions météorologiques sur d'énormes surfaces. Des analyses plus sectorielles permettent également de faire ressortir le lien entre ce niveau et les activités urbaines : pour prendre l'exemple du trafic routier que nous développerons plus spécifiquement par la suite, il contribue à l'effet de serre et joue un rôle majeur dans les phénomènes de pluies acides. Cependant cette vision globale et de long terme ne doit pas masquer les problèmes locaux qui restent fondamentaux en milieu urbain, caractérisé par la proximité et le nombre de personnes concernées. Ainsi, même si les pollutions et les altérations du microclimat n'ont pas de répercussion aussi vaste pour une agglomération isolée que pour une mégalo-pole, leurs effets sur les résidents ne sont pas à négliger pour autant. Il en est de même pour les nuisances de proximité comme les émissions de monoxyde de carbone (CO) du trafic routier ou les émissions sonores.

⁴ Sur ces deux thèmes de la croissance zéro et du développement durable voir par exemple et respectivement MEADOWS D.L., MEADOWS D.H., BEHRENS D.H., NAILL R.F., *Dynamique de la croissance dans un monde fini*. Paris : Economica, 1977. 622 p.
The World Commission on Environment and Development, *Our Common Future*. Oxford, New-York : Oxford University Press, 1987. xv + 383 p.

Ainsi la ville, par la masse des activités humaines qu'elle abrite, se situe à la croisée des échelles de représentation de notre environnement, du local au global. C'est donc entre ces deux pôles plus complémentaires qu'antagoniques des préoccupations environnementales que nous allons nous situer, avec d'une part la prise en considération des nuisances de proximité, ressenties de manière immédiate et d'autre part une réflexion plus large et de plus long terme.

Les transports routiers

C'est dans ce contexte, à la croisée du phénomène urbain et des préoccupations environnementales que se situe ce travail. Notre champ d'investigation reste cependant plus modeste et se trouve circonscrit d'une part à une dynamique urbaine de type occidental, dont le mouvement amorcé au cours du XIX^{ème} siècle n'a jamais eu la vigueur constatée aujourd'hui dans certains pays en voie de développement, et d'autre part au secteur particulier des transports routiers qui représentent à l'heure actuelle un des principaux vecteurs des nuisances urbaines.

Le choix du trafic routier en agglomération dans les pays développés a été guidé tant par les enjeux qu'il couvre que par le champ de nos compétences propres. Le cas lyonnais a été retenu pour des raisons pratiques de connaissance du terrain et de facilités d'accès aux données.

Toutefois, avant de présenter les grands traits de la problématique retenue et la logique de la méthode proposée pour y répondre, il est nécessaire de se pencher rapidement sur le contexte du trafic routier urbain et sur ses répercussions en terme d'environnement et de cadre de vie.

Depuis une trentaine d'années la pollution atmosphérique et sonore a nettement diminué dans les zones urbanisées. Cette amélioration résulte de la conjugaison de plusieurs causes, dont notamment les changements de localisation des activités (les industries s'éloignent des centres ville, remplacées par des activités de service), l'usage de technologies plus propres et moins bruyantes (par exemple, le gaz naturel et l'électricité nucléaire se sont développés au détriment du fuel et du charbon) et le traitement plus efficace des déchets polluants.

Cependant une ombre s'accroche toujours au tableau. Le trafic routier mécanisé, automobiles et poids lourds confondus, continue de croître, et avec lui les nuisances qu'il génère : occupation de l'espace et éviction d'autres activités ou d'autres types de mobilité, insécurité, congestion ainsi que nuisances sonores et émissions de polluants atmosphériques. Entre 1980 et 1994, le trafic routier a augmenté de moitié sur le réseau français, passant de 320 à 487 milliards de véhicules x kilomètres en 15 ans. La part urbaine de ce trafic est restée stable, représentant 27 à 28% du total⁵. Plusieurs facteurs sont souvent évoqués pour expliquer cette croissance continue :

- La croissance économique, en diminuant les coûts relatifs de l'automobile, développe son accession et son usage. En France en 1994, 78,5% des ménages étaient motorisés ; la proportion de ménages multi-équipés est passée de 23% en 1988 à 28% en 1994, soit une progression de 20% en 6 ans. De plus le prix relatif

⁵ Ces chiffres sont fournis tous véhicules routiers confondus. Cf. pp. 19-20 et p. 99 de : *Les transports en 1994 - 32ème rapport de la commission des comptes*. Paris : INSEE-OEST, juin 1995. 166 p.

des carburants par rapport à l'ensemble de la consommation des ménages était en 1994 de 15% inférieure à celle de 1980⁶.

- Les évolutions sociales et démographiques poussent également au développement de l'usage de l'automobile. A 20 ans, 4 jeunes sur 5 possèdent déjà leur permis et seule leur dépendance financière freine leur usage de la voiture. La progression du taux d'activité féminin devrait se poursuivre au cours des 10 prochaines années, contribuant à la bi-motorisation des ménages. Enfin la mobilité automobile progresse chez les personnes âgées, plus familiarisées à ce mode qu'auparavant. Cet effet de génération devrait se poursuivre au moins jusqu'en 2010 avec l'arrivée de femmes habituées à conduire au sein des classes âgées⁷.
- On constate que l'ensemble des investissements routiers destinés à améliorer les conditions de circulation sont moins utilisés pour économiser du temps de déplacement que pour s'ouvrir un champ d'action plus vaste - cette tendance se retrouve d'ailleurs pour tous les modes à travers par exemple l'essor de l'aérien et le succès du TGV. Ainsi entre 1970 et 1990 les distances parcourues ont augmenté d'environ 75% alors que le temps quotidien consacré à se déplacer est resté inchangé⁸.
- Ce phénomène est bien sûr fortement lié à la logique moderne du double mouvement d'agglomération des hommes et des activités d'une part et d'étalement de la ville d'autre part⁹. On peut rajouter qu'il repose sur une logique exclusive qui tend encore à renforcer l'automobile. Par exemple l'habitat diffus du périurbain ou l'installation des centres commerciaux en périphérie profitent et participent de l'adaptation de la ville à la voiture. Par contre ils excluent la marche à pied et rendent difficile toute desserte en transport collectif.

Ces différents facteurs sont étroitement imbriqués les uns aux autres et favorisent largement le développement de la mobilité automobile en agglomération, notamment dans les zones périphérique où elle s'étend et se densifie. Le renforcement continu des normes d'émissions polluantes et sonores des véhicules a permis d'éviter une croissance parallèle des nuisances du trafic. Cependant, comme le montre la série de graphiques ci-dessous représentant l'évolution de certaines émissions de polluants atmosphériques entre 1980 et 1990, elles ont jusqu'à présent été insuffisantes pour compenser complètement l'effet de la hausse du trafic qui a été de 36% sur cette période :

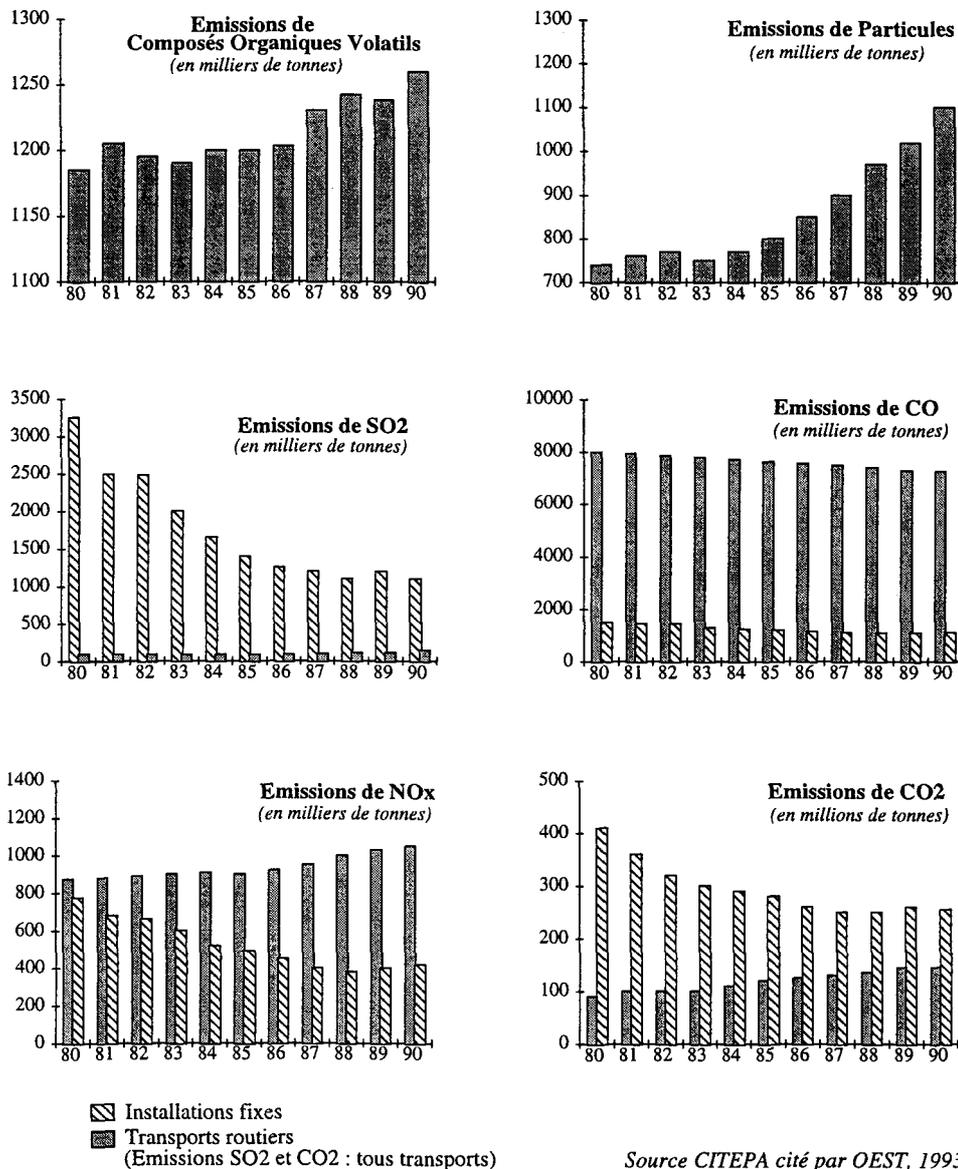
⁶ *Idem* pp. 41-46.

⁷ BIEBER Alain, MASSOT Marie-Hélène, ORFEUIL Jean-Pierre, *Questions vives pour une prospective de la mobilité quotidienne*. Arcueil : Synthèse INRETS n°19, janvier 1993. 76 p. Sur le thème de l'évolution de la mobilité des personnes âgées, voir également POCHET Pascal, *Mobilité quotidienne des personnes âgées en milieu urbain : évolutions récentes et perspectives*. Lyon : Université Lumière Lyon 2, thèse de doctorat de sciences économiques, 15 juin 1995. 313 p.

⁸ BIEBER Alain, MASSOT Marie-Hélène, ORFEUIL Jean-Pierre, *Questions vives pour une prospective de la mobilité quotidienne*. Op. Cit. Pour les chiffres utilisés, voir notamment pp. 29-32.

⁹ Ainsi René Bussière constate que la dynamique de son modèle urbain de localisation résidentielle ne devient pertinente qu'à partir de 1911, lorsque "se produit l'introduction massive de moyens mécaniques de transports tant collectifs qu'individuels, en site propre aussi bien qu'utilisant la voirie publique". Cf. p 67 de BUSSIERE René, *Modèle urbain de localisation résidentielle*. Paris : Centre de Recherche d'Urbanisme. 1972. 163 p.

Graphique 1 : Evolutions des émissions de polluants atmosphériques par les transports routiers¹⁰



Source CITEPA cité par OEST, 1993.

Même si l'on évite de se laisser abuser par l'impression de très fortes hausses des deux premières séries pour lesquelles l'axe des ordonnées ne part pas de l'origine, le bilan environnemental du trafic routier apparaît largement négatif, surtout comparé aux progrès enregistrés dans les autres secteurs. On peut cependant supposer que le mouvement actuel de renforcement des normes devrait permettre de rompre cette tendance : depuis janvier 1993, la directive européenne "91/441/CE" impose des limites d'émissions sur les NOx, le CO et les composés organiques volatils contraignant de fait les véhicules à essence à être équipés d'un pot catalytique ; en 1996 la teneur en soufre du gazole devrait être divisée par 6, passant de 0,3 à 0,05 g/l, réduisant d'autant les émissions de ce polluant ; en octobre de cette même année la directive 91/542/CE, dite "camion propre", devrait fortement limiter les émissions de particules des nouveaux véhicules de plus de 3,5 t ; de même les normes

¹⁰Cf. p. 77 de *Les transports en 1992 - 30ème rapport de la commission des comptes*. Paris : INSEE-OEST, juin 1993. 171 p.

sur les émissions sonores des véhicules routiers évoluent régulièrement depuis 25 ans et ont été encore renforcées en 1995 ; etc.

Ainsi des travaux menés à l'Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS) soulignent que beaucoup d'émissions du trafic routier ont commencé à baisser depuis 1990 et devraient chuter d'ici 2010. Ils montrent aussi que certaines d'entre elles pourraient continuer de croître, notamment les particules émises par les véhicules diesel et les émissions de CO₂ directement liées à la consommation énergétique des véhicules à moteur thermique¹¹.

Problématique et méthodologie du travail

L'objectif de cette thèse est de mieux se rendre compte d'une part du poids relatifs des émissions polluantes et sonores du trafic routier sur l'environnement et le cadre de vie urbain et d'autre part du poids relatif des caractéristiques du trafic routier dans ses émissions. Trois principaux paramètres du trafic été retenus pour décrire son évolution et comprendre son impact sur le niveau des émissions polluantes et sonores :

- le volume global de ce trafic, mesuré en terme de véhicules.kilomètres au sein d'une zone et d'une période de référence ;
- les caractéristiques technologiques des véhicules composant le trafic permettent d'avoir une idée des niveaux d'émissions pour un véhicule moyen en circulation ;
- les conditions générales de circulation enfin, étant entendu que la baisse des vitesses moyennes liée aux problèmes de congestion affecte les niveaux d'émissions polluantes et sonores.

Notons qu'un tel bilan ne peut être dressé de manière absolue. Trop de modes de représentation existent sans qu'il soit possible de passer facilement de l'un à l'autre : on trouve par exemple des mesures physiques du niveau des nuisances, des résultats de campagnes épidémiologiques sur leur conséquences en terme de santé publique, des évaluations d'ordre économique, etc. Il est également souvent difficile d'enfermer ces bilans dans une analyse sectorielle et de les rattacher à telle ou telle activité précise. Enfin, même si leur diversité peut être utilisée pour fournir une image kaléidoscopique d'une certaine réalité et fournir une indication sur les enjeux liés aux nuisances envisagées, ils ne permettent pas de réfléchir sur les dynamiques à l'oeuvre derrière le constat d'émissions.

Une partie de notre travail a donc été consacrée à la mise en évidence de ces dynamiques et de leur poids relatif dans la genèse des émissions polluantes et sonores du trafic routier : quel est l'impact de la composition du parc et des technologies utilisées sur chaque type de véhicule, comment et dans quelle mesure l'évolution de la mobilité joue sur les émissions, quel est l'effet de la congestion sur la répartition du trafic sur le réseau, sur le développement urbain, sur les émissions supplémentaires des véhicules ?

Nous n'avons pas la prétention de répondre de manière définitive à ces questions, nous les indiquons plutôt pour fournir le cadre de cette réflexion. De manière générale le nombre et la longueur des déplacements tendent à augmenter ; les investissements routiers et autoroutiers ainsi que les progrès de l'ingénierie du trafic ont permis de maintenir, voire

¹¹Cf. p. 34 de JOUMARD Robert, LAMBERT Jacques, *Evolution des émissions de polluants par les transports en France de 1970 à 2010*. Bron : INRETS, rapport INRETS n°143, juillet 1991. 66 p.

d'améliorer les vitesses moyennes par déplacement ; enfin, pour éviter que la question de l'environnement ne mette l'automobile face à ses contradictions, les technologies évoluent en suivant diverses logiques, du pot catalytique qui traite les polluants atmosphériques à la source à l'enrobé drainant qui absorbe les sons, du développement des biocarburants à celui de la voiture électrique...

D'un point de vue méthodologique, deux démarches ont été privilégiées. D'une part une réflexion générale autour de chacun des sujets traités a permis de mieux situer le contexte économique et social, mais aussi technique et scientifique dans lequel il s'inscrit. Le travail a alors consisté en une synthèse de résultats déjà existants. Il en est ainsi du premier bilan statique permettant de donner une idée des enjeux actuels liés aux émissions polluantes et sonores du trafic routier en milieu urbain. Chacun des facteurs considéré comme affectant les émissions du trafic a également fait l'objet de ce type d'investigation.

D'autre part un outil spécifique a du être développé pour mettre en évidence les liens existants entre les paramètres descriptifs du trafic et ses émissions polluantes et sonores. Nous avons utilisé un modèle d'affectation du trafic, DAVIS, aimablement mis à notre disposition par l'INRETS. Le CETE de Lyon nous a fourni les éléments nécessaires pour appliquer ce modèle à l'agglomération lyonnaise, notamment les fichiers décrivant les déplacements routiers et l'état du réseau de voirie sur le périmètre de la Communauté Urbaine de LYon en heure de pointe du soir en 1990, 1994, 2000 et 2010. Les résultats d'affectation obtenus ont permis d'établir des indicateurs de niveaux de pollution liée à la route, compte tenu d'hypothèses sur les relations entre les conditions de circulation et les émissions ainsi que sur la composition du trafic.

Notre but n'étant pas de mesurer la part de la route dans les pollutions atmosphériques et sonores au sein de l'agglomération lyonnaise en 1990 ou en 2010, les niveaux d'émissions obtenus ne nous ont peu intéressés en tant que tels. Nous avons par contre beaucoup travaillé par simulations en modifiant à la marge le corps des hypothèses de calculs, seule la valeur d'un paramètre étant affectée et toutes autres choses étant supposées égales par ailleurs. La comparaison des résultats des différents scénarios ainsi envisagés a alors permis de guider la réflexion sur l'impact relatif de chacun des paramètres sur les émissions ainsi que sur leurs interactions.

Ce travail de simulation ne se déroule qu'au cours des trois derniers chapitres car il est auparavant nécessaire d'en mieux cadrer le sens et les enjeux :

- Le *premier chapitre* est consacré à une discussion d'ordre général sur les différences entre approche écologique et économique. Compte tenu de leur objet respectif, rien ne permet de penser à des convergences *a priori*. En fait ce n'est que par une hiérarchisation des priorités que l'on peut arriver à les envisager ensemble. En présentant ce débat, dans lequel s'insère ce travail d'évaluation appliqué aux transports routiers urbains, ce chapitre permet d'en mieux situer l'intérêt.
- Le *second chapitre* s'attache à fixer le niveau des enjeux liés aux nuisances atmosphériques et sonores en milieu urbain. La mesure en est économique et la précision, sommaire. En effet les phénomènes évalués sont souvent mal connus d'un point de vue physique. De plus leur importance est souvent susceptible d'évoluer dans un sens ou dans l'autre, suivant l'évolution même du processus, mais aussi des connaissances, des besoins ou des représentations collectives. Les résultats permettront cependant de fixer des ordres de grandeurs, représentatifs à la fois des phénomènes et d'une époque.

- Le *troisième chapitre*, d'ordre méthodologique, est centré sur l'élaboration d'un modèle d'évaluation des émissions polluantes et sonores permettant, dans la suite du travail, de tester la sensibilité relative des résultats aux variations des valeurs des paramètres descriptifs de la circulation sur un réseau routier (niveau global du trafic, caractéristiques technologiques et conditions de circulation). Il présente les hypothèses retenues et la logique des calculs effectués. Il est également l'occasion de tester la robustesse et la fiabilité des résultats.
- Le *quatrième chapitre* est spécifiquement consacré aux relations complexes et paradoxales entretenues entre la congestion et les nuisances de la route. En effet, on dénonce souvent les pollutions supplémentaires engendrées par une dégradation des conditions de circulation. On peut cependant établir un bilan beaucoup plus mitigé. A court terme, il faut autant s'interroger sur la diffusion des flux provoquée par la congestion que sur les surémissions qu'elle peut induire. A long terme, elle peut éviter à la ville de trop s'étaler et permettre à des modes alternatifs comme les transports collectifs ou la marche à pied de rester compétitifs ; à l'inverse, les investissements en nouvelles infrastructures destinés à la combattre augmentent les émissions en induisant des déplacements nouveaux et en allongeant les distances parcourues. Cette réflexion est menée en deux temps avec tout d'abord une simulation d'une hausse progressive du nombre de déplacements, toutes choses égales par ailleurs, et ensuite une analyse des répercussions des évolutions envisagées du réseau routier lyonnais aux horizons 2000 et 2010.
- Le *cinquième chapitre* est l'occasion de réfléchir sur l'impact des autres paramètres à travers une prospective sur les années 2010. D'un côté de nombreux facteurs poussent à une augmentation continue de la mobilité automobile et le poids de ces tendances ne permet pas d'envisager une stabilisation dans les 15 ans qui viennent. De l'autre, la recomposition du parc et les améliorations technologiques des véhicules vont modifier sensiblement le niveau et la nature des émissions liées au trafic.

CHAPITRE 1 :
ECOLOGIE ET ECONOMIE :
DES INTERETS CONTRADICTOIRES ?

"*Oikos* : le logis, la demeure ; par extension, le milieu environnant ;
Logie : le discours, l'étude, la science ;
Nomie : la loi, la règle"¹.

Économie, écologie : avec de telles racines communes les deux approches ne sont-elles pas faites, *a priori*, pour être complémentaires ? Mais il ne faut pas trop jouer sur l'origine des mots : la différence entre les deux disciplines ne se joue pas tant entre *logie* et *nomie*, entre la science et la loi, que sur ce que l'une et l'autre considère comme *oikos*. Et les règles d'une gestion rationnelle des ressources dans le monde des hommes ne sont pas forcément compatibles avec les mécanismes du milieu naturel.

En économie comme dans beaucoup d'autres disciplines, le thème de l'environnement et des nuisances que les activités humaines font peser sur elles-mêmes est aujourd'hui un thème parmi les plus porteurs. C'est aussi un thème qui abrite la diversité. De la conscience aiguë et immédiate d'une gêne directe provoquée par une personne sur son voisin à une connaissance incertaine et toute théorique d'une boucle homme-terre-homme où l'une peut menacer l'autre s'il la fragilise trop, il existe toute une gamme de nuisances humaines dont les conséquences, la prise en compte et l'éventuelle correction économiques peuvent être de natures très différentes.

Dans ce domaine les transports ont des conséquences à tous les niveaux possibles de nuisances, allant du local immédiat (bruit, odeurs désagréables par exemple) au global de long terme (émissions de CO₂ et effet de serre), même si un travail spécifiquement restreint aux déplacements urbains conduit implicitement à privilégier les aspects locaux et régionaux du fait de l'importance des populations directement concernées. Avant de nous pencher plus précisément sur la question des transports routiers urbains, il est donc nécessaire de se consacrer à une première réflexion générale sur les relations entretenues entre des termes comme nuisance, environnement et économie.

D'une façon synthétique le discours qui va être tenu présente la logique qui suit.

En économie, le courant de pensée dominant a été bâti sur une image au pouvoir évocateur puissant : celle d'une Main Invisible qui, compte tenu des ressources limitées qui sont à notre disposition, permettrait de réaliser la meilleure des sociétés possibles à partir de la dynamique sociale induite par les actions individuelles et égoïstes de chacun. Reformulée de manière rigoureuse à la fin du 19^{ème} siècle, on peut montrer que cette dynamique est d'autant plus efficace qu'elle s'exprime dans le cadre d'un marché qui respecte des règles de concurrence pure et parfaite strictement définies. La mise en lumière

¹ Cette référence au grec a été empruntée à STOFFAES Christian, "Economistes et écologistes : pour une éco-nomie", pp. 5-11 in Commissariat Général du Plan (sous la direction de Christian STOFFAES), *L'économie face à l'écologie*. Paris : La Découverte / La Documentation Française, 1993. 275 p.

des hypothèses nécessaires au modèle ainsi élaboré a justifié l'idée d'une intervention de l'Etat pour remplacer certains mécanismes du marché lorsqu'ils sont défaillants.

Dans ce cadre, les questions d'environnement sont abordées à travers la notion d'externalité, c'est-à-dire de liens entre agents économiques qui s'établissent hors du contexte normal de l'échange marchand mais qui ont une incidence économique.

Il peut exister ici une divergence de point de vue entre une approche écologique, qui "examine les rapports des espèces avec le reste de la nature" et une logique économique qui se préoccupe "des rapports entre les individus de l'espèce"². De même au cours des années soixante-dix, René Passet a pu soutenir la thèse d'une déconnexion progressive des préoccupations de l'économie par rapport à l'environnement naturel de la société humaine, partant de l'école physiocratique du 18^{ème} siècle pour déboucher sur une problématique néo-classique qui serait uniquement préoccupée des rapports marchands³.

Et cette divergence mérite d'être considérée depuis que l'idée selon laquelle l'homme a acquis le pouvoir de détruire son monde a pris corps, nucléaire, ressources non renouvelables et pollutions globales aidant. Lorsqu'une partie des enjeux dépasse le niveau local et doit être posée à une échelle régionale à planétaire, souvent sur des échéances à long terme, il devient alors nécessaire d'ouvrir la "demeure", le champ de l'économie pour permettre une prise en compte plus juste de l'environnement des activités économiques des hommes. Se retrouvent ici tous les débats qui tournent autour du thème du développement durable et qui ont émergé à la fin des années quatre-vingt.

On peut par exemple doter les agents économiques d'une capacité d'anticipation qui leur confère un pouvoir de décision basé sur une connaissance plus large que la simple information des prix du marché. La valeur des choses ne s'exprime alors plus simplement à travers les échanges des hommes. Elle doit aussi tenir compte du fait que les "objets", pris globalement, peuvent nous détruire si nous les détruisons : usés par et pour l'homme, ils prennent une valeur en soi pour une âme prudente et précautionneuse du lendemain.

Ce chapitre part donc d'une question prétexte : comment la théorie néoclassique, à travers l'économie du Bien-Être, s'est donnée les moyens de répondre aux questions de nuisances locales puis de risques globaux et comment les débats qui portent et ont porté sur ces thèmes réinterrogent le modèle proposé ? Le but de notre travail étant de rendre compte de la contribution relative des différents paramètres du trafic routier qui affectent les niveaux de pollution atmosphérique et sonore en zones urbaines, la conduite de la réponse à cette question ne prétend pas produire une synthèse fouillée des dernières avancées théoriques sur ce thème. Par contre elle doit fournir un discours général qui fixe le cadre théorique d'ensemble au sein duquel se déroulera la suite de la réflexion.

² Pour ces deux citations, Cf. pp. 56-57 de de JOUVENEL Bertrand, *La civilisation de puissance*. Paris : Fayard, 1976. 206 p.

³ PASSET René, *L'économie et le vivant*. Paris : Petite Bibliothèque Payot, 1979. 287 p.

1. L'approche traditionnelle : économie du Bien-Être et externalités

La tendance prédominante que l'on retrouve dans le domaine de l'économie appliquée aux questions d'environnement, que ce soit dans les grands organismes internationaux ou au niveau des instances de décision nationales, est très largement inspirée du modèle néoclassique de l'économie du Bien-Etre.

Dans ce cadre, les problèmes d'environnement, locaux ou globaux, sont pour la plupart d'entre eux considérés comme des coûts externes c'est-à-dire comme relevant d'une interaction humaine non médiatisée par le marché et, de ce fait, conduisant à une situation sous-optimale de l'activité économique et du bien-être général de la collectivité humaine. La solution idéale est alors de trouver un moyen pour que les acteurs en présence prennent en compte financièrement le poids économique de leurs actions et de leurs conséquences : c'est en les responsabilisant de cette façon que l'on peut combiner de façon efficiente les intérêts de chacun avec l'intérêt de tous.

1.1. L'économie du Bien-Être : du marché concurrentiel et à l'intervention de l'Etat

Au 18^{ème} siècle, A. Smith inventait la main invisible pour donner une image du paradoxe selon lequel la poursuite des intérêts particuliers permet de satisfaire à l'intérêt général. C'est cette image qui lui a permis de prôner le développement du libéralisme. Depuis, cet aspect de la pensée de A. Smith a été repris par le courant néoclassique au sein duquel de nombreux auteurs se sont attachés à en mieux préciser le contenu et à mettre en lumière ses tenants et aboutissants. Le modèle mathématique qui a été construit pour rendre compte de ce paradoxe s'est progressivement constitué depuis les bases posées à la fin du 19^{ème} siècle par les tenants de l'école marginaliste (Jevons, Walras et Menger) jusqu'à son axiomatisation complète en 1950 (travaux de Arrow et Debreu).

Notre objectif est de montrer comment les questions d'environnement ont été et sont prises en compte dans ce courant de pensée à travers le concept d'externalité. Nous ne chercherons donc pas à faire une description détaillée du modèle de référence. Au fil de ces pages, l'intérieur du modèle restera une boîte noire même si une présentation synthétique peut être faite des principales hypothèses, posant ainsi les bases d'ancrage du modèle, ainsi que de ses conclusions, qui permettent d'en comprendre l'intérêt⁴.

1.1.1. Conditions de concurrence pure et parfaite et équilibre général

Les hypothèses considérées comme nécessaires et suffisantes pour aboutir à une maximisation du bien-être collectif touchent de nombreux thèmes différents. Elles

⁴ Nous renvoyons ici aux auteurs suivants, qui nous ont fourni les bases pour écrire cette partie :
LAFFONT Jean-Jacques, *Fondements de l'Economie Publique. Vol. 1. Cours de théorie microéconomique*. Paris : Economica, Coll. Economie et Statistiques Avancées, 1988. 281 p. ;
BENARD Jean, *Economie Publique*. Paris : Economica, 1985. 414 p. ;
GUERRIEN Bernard, *La théorie néo-classique. Bilan et perspectives du modèle d'équilibre général*. Paris : Economica, 3^{ème} éd., 1989. 495 p. ;
CROZET Yves, *Analyse économique de l'Etat*. Paris : Armand Colin, Coll. Coursus, 1991. 192 p.

concernent l'environnement du modèle, les caractéristiques des biens et services qui sont échangés, les comportements des agents économiques comme la description des marchés où ces derniers se rencontrent. Sans être exhaustifs, les points suivants peuvent déjà en donner une idée générale :

- *L'environnement du modèle d'abord* : les ressources nécessaires à l'activité économique ne sont disponibles qu'en quantité limitée. Cela se traduit notamment par le fait que les consommateurs ne disposent que d'un revenu limité qu'ils se procurent en prenant du temps sur leur temps de loisirs ; de même pour les producteurs ce contexte de rareté se traduit par un coût unitaire croissant de la production : plus on veut produire d'un bien ou service, plus ce qui est nécessaire à sa production se renchérit. C'est ce contexte de rareté par rapport aux besoins ressentis qui donne naissance à l'acte économique.
- *Les comportements des acteurs économiques*, producteurs ou consommateurs, insatiables - même si la satisfaction qu'ils retirent d'un bien ou service va en décroissant avec la quantité dont ils disposent déjà -, et rationnels - calculant au mieux pour retirer soit le plus de satisfaction possible de ce qu'ils peuvent se procurer compte tenu de leur revenu (consommateurs), soit le profit maximum des biens ou services qu'ils offrent compte tenu des contraintes de production (producteurs).
- *Chaque bien ou service* est divisible en quantité infinitésimale. Ils peuvent tous être substitués les uns aux autres par les agents économiques. C'est cette grande souplesse des produits échangés ou combinés dans l'acte de production qui permet de lisser toute fonction de consommation et de production et d'obtenir, sans accroc, l'optimum.
- *L'unique endroit où les agents économiques se rencontrent est le marché*. Lieu de socialisation, c'est là que s'échangent biens et services contre une monnaie qui sert de numéraire et c'est là que les prix se forment, informations agrégées des besoins et ressources de chacun. Ce marché doit respecter les règles de la concurrence pure et parfaite, c'est-à-dire information parfaite, libre des personnes et des biens sur les différents marchés, homogénéité parfaite des produits sur chaque marché, atomicité et multiplicité des agents : (1) personne ne peut jouer sur les prix qui sont dès lors considérés comme donnés pour les agents économiques et (2) les prix servent de repères non seulement pour les échanges en cours mais aussi pour les actions qui vont être menées sans considération des éventuels problèmes de rationnement ou de surproduction à venir.
C'est l'acte de socialisation par ce type de marché qui permet de transformer la somme des égoïsmes particuliers en bien-être collectif.
- Enfin, dernière hypothèse importante, *il existe un système complet de marchés*. Chaque type de bien et service dispose d'un marché, et est donc doté d'un prix. Cela est vrai pour les biens et services actuels, cela l'est aussi pour ceux à venir : chaque agent peut acheter ou vendre des biens ou services qui seront produits dans le futur. L'implication la plus importante de cette hypothèse est l'éradication de toute incertitude pour les agents économiques. Nous aurons l'occasion de revenir ultérieurement sur cette question.

Compte tenu de ces hypothèses, on peut montrer que les contraintes et les besoins des différents acteurs économiques vont conduire à une situation d'équilibre général sur l'ensemble des marchés. L'ensemble des prix fixés pour chaque bien ou service fournit aux acteurs une information suffisante pour qu'ils puissent établir leur plan de consommation

ou de production compte tenu de leur dotation initiale en budget ou en facteurs de production.

On peut illustrer le mécanisme à l'oeuvre sur un exemple limité à un consommateur et deux biens x et y . Sachant que son revenu est limité et qu'il ne peut par conséquent se procurer de tout en quantité infinie, il va chercher à maximiser sa satisfaction globale en optimisant la satisfaction qu'il retire de chaque bien. Celle-ci peut être mesurée par la différence qui existe entre l'utilité qu'il retire d'une unité supplémentaire d'un bien x et le prix qu'il la paye : tant que le rapport entre les deux, U_{mx}/P_x , est supérieur à un, le consommateur peut avoir intérêt à se la procurer. Cependant, comme il s'attache également à la satisfaction qu'il peut retirer des autres biens, il va chercher à égaliser ce rapport entre tous les biens. Soit, avec x et y , $U_{mx}/P_x = U_{my}/P_y$: si par exemple U_{mx}/P_x se révélait supérieur à U_{my}/P_y , cela signifierait que notre consommateur a intérêt à substituer une part de y à une part de x . Un tel résultat signifie également que chaque consommateur va optimiser son plan de consommation de telle manière que les taux marginaux de substitution des biens correspondent à leurs prix relatifs : $U_{mx}/U_{my} = P_x/P_y$.

De la même manière on peut montrer que les producteurs vont développer leur plan de production en combinant leurs facteurs de production de telle façon que les rapports entre leur rendement marginal et leur coût (*ie* leur prix sur le marché) soient égaux. On retrouve donc ici aussi, pour chaque producteur, une égalité entre les prix relatif des facteurs de production et les taux marginaux de substitution technique.

Enfin le niveau global de la production peut être défini à partir du comportement des producteurs. Ils vont en effet développer leur production tant que le coût de la dernière unité produite est inférieur au prix du bien concerné - puisque la différence entre le prix et le coût marginal permet de dégager un profit supplémentaire. Soit, pour un bien x , $P_x = C_{mx}$. Or comme cette relation est valable pour tous les types de biens, on peut écrire que pour deux biens x et y quelconques, $P_x/P_y = C_{mx}/C_{my}$.

Ces différentes égalités mettent en rapport le système des prix qui s'établit sur un marché concurrentiel avec les coûts marginaux et surtout les taux marginaux de substitution entre les biens de consommation et les facteurs de production. Elles sont caractéristiques d'une situation d'équilibre général dans le sens où le respect des conditions d'un marché de concurrence pure et parfaite conduit à la convergence des différents taux.

En quoi ces résultats présentent-ils un quelconque intérêt par rapport à l'économie du bien-être ? Pour répondre à cette question, il faut maintenant revenir sur la notion d'optimum telle qu'elle a pu être formulée par Vilfredo Pareto.

1.1.2. L'équilibre général et l'optimum de Pareto

Nous allons maintenant voir en quoi la recherche par chacun de ses propres intérêts conduit à une situation d'équilibre général collectivement optimale. A cet état d'équilibre l'offre de biens et services est adaptée au mieux pour satisfaire les besoins des consommateurs compte tenu du contexte de rareté des ressources, et d'autre part que ces ressources disponibles sont utilisées de manière optimale, au moindre coût, pour satisfaire cette demande.

Nous nous arrêterons d'abord quelques instants sur la définition d'une situation optimale au sens de l'économie du bien-être avant de montrer en quoi le modèle du marché de concurrence pure et parfaite permet d'aboutir à l'optimalité.

Le critère permettant de définir l'optimalité d'une situation économique a été proposé en 1927 par Vilfredo Pareto : une allocation des ressources est préférable à toute autre si elle permet d'améliorer la situation d'un individu sans détériorer celle d'un autre. De plus, lorsqu'on parvient à une situation où l'on ne peut plus augmenter le niveau de satisfaction d'une personne sans diminuer celle d'une autre on se situe en état optimal d'allocation des ressources.

Notons qu'un tel critère ne s'interroge pas sur la manière dont le niveau global du bien-être est réparti entre les individus. Entre une situation au sein de laquelle seuls quelques privilégiés retirent un maximum de satisfaction et une situation complètement égalitaire, le critère ne tranche pas car il se refuse à toute comparaison interpersonnelle d'utilité. D'autres critères sont souvent rajoutés dans un souci de répartition équitable des ressources, conduisant à définir des fonctions de bien-être social prenant en compte les situations relatives des individus les uns par rapport aux autres : le niveau de satisfaction d'un individu n'est donc plus considéré comme indépendant de celui des autres. Notre propos étant d'évoquer comment les mécanismes de la concurrence pure et parfaite permettent de déboucher sur un équilibre général qui correspond à une situation économiquement optimale, nous en resterons essentiellement au critère de Pareto - même si, comme ceci sera évoqué plus loin, le cadre de l'économie du bien-être n'empêche pas de se poser la question de l'équité et d'une éventuelle intervention de l'Etat pour corriger certains écarts estimés trop flagrants.

Dans une économie d'échange, le processus qui conduit à cet état optimal au sens de Pareto peut être décrit de manière relativement simple à l'aide du diagramme d'Edgeworth, exposé dans l'encadré ci-dessous. La même illustration peut être reprise également dans le cadre de la répartition des facteurs de production entre les acteurs économiques. De plus l'exemple utilisé, qui ne prend en compte que deux personnes et deux biens, peut être généralisé à un nombre quelconque de personnes, de biens de consommation et de facteurs de production - même si une formalisation plus abstraite que celle utilisée doit être retenue.

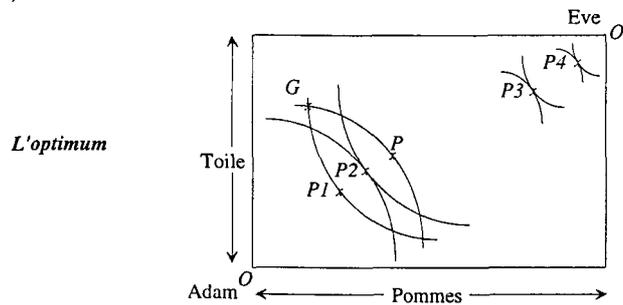
Le résultat important de ce raisonnement est qu'en situation optimale il n'existe plus aucune possibilité d'échange pour laquelle les acteurs en présence parviendraient à dégager un avantage réciproque le plus infime soit-il. Repris en termes économiques, ceci signifie que dans cette situation les taux marginaux de substitution sont égaux entre tous les biens et pour tous les individus : substituer une part d'un bien à celle d'un autre bien, aussi petites que peuvent être les quantités échangées, conduirait à léser au moins une des personnes concernées par l'échange.

Ce résultat devient fondamental lorsque l'on s'interroge sur les mécanismes d'affectation des ressources qui permettent de maximiser le bien-être social au sens de Pareto. Il permet en effet de retrouver les caractéristiques de l'équilibre général établi à partir d'un marché concurrentiel : l'information fournie par les prix relatifs permet aux acteurs économiques d'égaliser leurs taux marginaux de substitution, aussi bien entre les facteurs de production qu'entre les biens de consommation. Cette correspondance renvoie à ce que l'on nomme communément le premier théorème de l'économie du bien-être : *tout équilibre concurrentiel est un optimum de Pareto*.

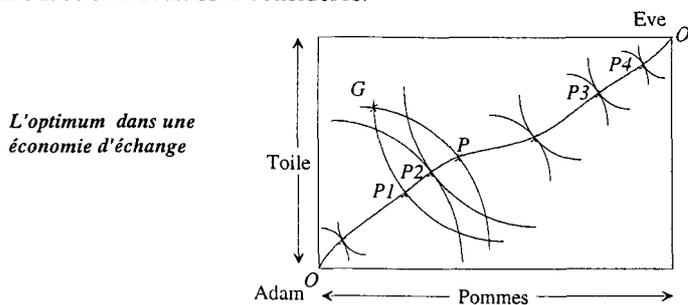
Encadré 1 : Le processus d'allocation des ressources dans une économie d'échange.

Considérons deux personnes qui vont se répartir deux biens à partir d'un stock donné de ressources. On supposera que ces deux personnes sont Adam et Eve et que les deux biens possibles à se répartir sont constitués par des pommes et de la toile. On part d'un diagramme dit d'Edgeworth où les possibilités de consommation des deux individus sont emboîtées, de telle sorte que l'abscisse est égale à la somme des consommations de pommes comme à leur production totale (puisqu'ils ne sont que deux) et que l'ordonnée est égale à la somme de consommation de toile et donc à sa production totale.

Chaque point situé dans ce diagramme constitue donc une allocation possible des deux biens entre les deux individus qui constituent cette collectivité. Ajoutons-y maintenant les courbes d'indifférence ou les fonctions d'utilité des deux agents. Supposons que nous soyons situés au point G par lequel il est possible de faire passer deux courbes d'indifférence pour Adam et Eve. Il est possible, en se dirigeant vers le centre du diagramme, d'augmenter à la fois les satisfactions d'Adam et d'Eve : les allocations auxquelles on arrive ainsi, chaque fois que ce mouvement reste possible, sont dites optimales au sens de Pareto par rapport à l'allocation de départ G. On aurait pu faire ce mouvement en restant sur la courbe d'indifférence d'Adam en A ou en se déplaçant dessus en permettant à Eve d'augmenter sa satisfaction, ou inversement. Dans le premier cas on arrivera en P1, dans le second en P.



Aussitôt arrivé au point de tangence de deux courbes d'indifférence (P2), ce mouvement n'est plus possible. C'est aussi le moment où les pentes des courbes d'indifférence se confondent et sont donc égales, cette pente étant par définition le taux marginal de substitution entre les pommes et la toile pour chacun des agents considérés. Cela peut s'expliquer de manière économique et pas seulement graphique : le pente de la courbe d'indifférence ou le taux marginal de substitution est égal à l'effort qu'est prêt à consentir un agent en cédant du bien dont il dispose pour acquérir l'autre bien. Si un agent perd moins d'utilité en cédant une pomme qu'il ne reçoit d'utilité en bénéficiant d'une unité de toile alors qu'un autre agent préfère céder plus de toile pour acquérir une unité de pomme, ils pourront augmenter chacun leur satisfaction en passant à une nouvelle allocation des pommes et de la toile. Et le bien-être de la collectivité se sera élevé puisqu'on aura pu augmenter la satisfaction d'au moins un agent sans diminuer celle de l'autre agent. Mais ils ne pourront plus augmenter leur satisfaction si leurs dispositions à l'effort se compensent, a fortiori si elles divergent. Le point P2, optimum au sens de Pareto, est donc caractérisé par l'égalité des taux marginaux de substitution des différents agents face aux deux biens considérés.



Il existe en fait une infinité de points de ce type compte tenu de l'infinité des positions de départ, et ils dessinent un sentier, la frontière OO', ou lieu des optima de Pareto défini ci-dessus. Si on se déplace sur ce sentier OO' à partir de P2, on augmentera la satisfaction d'un agent au détriment de celle d'un autre agent : l'optimum de Pareto ne permet plus de trancher et de dire alors quelle est sur ce sentier la meilleure des solutions possibles. L'essentiel est de situer sur la frontière de Pareto car elle indique que le maximum de satisfaction des agents a été réalisé sans qu'il soit nécessaire de procéder à des comparaisons interpersonnelles d'utilité.

Extrait de Xavier Greffe, Economie des politiques publiques. Paris : Dalloz. 1994. pp. 53-54.

C'est en ce sens que le respect des conditions nécessaires à la mise en oeuvre d'un marché de concurrence pure et parfaite devient important dans l'optique de l'économie du bien-être : il permet de mettre en oeuvre des mécanismes d'affectation des ressources qui conduisent à leur usage optimal compte tenu de leur rareté et du niveau global de satisfaction qui peut en être retiré.

Soulignons également l'existence d'un second théorème selon lequel *tout optimum de Pareto peut être établi par un équilibre concurrentiel*. Ceci signifie que si, pour des raisons de justice sociale par exemple, on estime qu'un optimum est trop inégalitaire, il est alors possible d'envisager un nouvel optimum tout en respectant les règles du marché de concurrence pure et parfaite. Pour qu'une telle action puisse être menée, la collectivité doit avant tout disposer d'un critère supplémentaire qui lui permette de choisir entre plusieurs optima parétiens. On la suppose donc dotée d'une "fonction d'utilité collective" qui agrège l'ensemble des utilités individuelles des acteurs qui la composent. Deux grandes possibilités peuvent être évoquées pour passer d'un optimum à un autre :

- soit en modifiant le poids attribué à chaque individu lors de l'agrégation de leur utilité au sein de la fonction d'utilité collective - en décidant par exemple d'être collectivement plus satisfait de l'amélioration de la situation de certaines personnes par rapport à d'autres et en préférant donc tel cheminement vers la courbe des optima plutôt que tel autre ;
- soit on modifie les dotations initiales des acteurs économiques par le biais de transferts forfaitaires et on laisse aux mécanismes du marché le soin de déterminer l'optimum.

Les conditions permettant de se déplacer d'un optimum à un autre sont relativement strictes mais avec ce second théorème, on voit qu'il est tout à fait possible de justifier la présence et l'intervention de l'Etat dans le cadre concurrentiel de l'économie du bien-être.

1.1.3. Le respect des hypothèses comme justification de l'intervention de l'Etat

En plus de cette possibilité de l'intervention d'un Etat représentant une préférence collective pour un minimum d'équité dans la répartition optimale des ressources, le recours à cet acteur particulier peut être également invoqué pour faire respecter les règles de la concurrence et pour pallier aux déficiences du marché.

En effet la formalisation mathématique qui a succédé à l'image de la main invisible proposée par A. Smith a permis de mettre en lumière les hypothèses nécessaires à la réalisation d'un optimum collectif à travers des actions individuelles et égoïstes. Or la faible probabilité, voire l'impossibilité, pour que certaines de ces hypothèses soient respectées ne permet pas d'avancer l'idée d'une tendance naturelle de la société à parvenir à un état d'équilibre général pareto-optimal.

Deux principales défaillances peuvent être évoquées, à travers l'existence de biens collectifs et d'effets externes.

Une des hypothèses du modèle est que les biens et services doivent être privés, c'est à dire qu'une quantité acquise par un individu n'est plus disponible pour les autres. C'est en effet cette appropriation exclusive qui conduit à fixer un prix aux choses. Or

certains biens ne respectent pas cette caractéristique, ce qui nécessite parfois leur prise en charge par la collectivité :

- Il est parfois impossible de contrôler l'accès à leur consommation (radio, TV, mais aussi services de sécurité rendu par l'armée ou la police), ce qui peut poser des problèmes au producteur pour faire payer son service. Si la production de ce bien ou service présente un intérêt pour la collectivité, l'Etat peut alors prendre en charge sa production ; il aura recours à l'impôt et à la redevance pour couvrir ses dépenses.
- Dans d'autres cas, la production a un coût marginal décroissant, c'est à dire que l'accès au bien ou service par un consommateur supplémentaire est de moins en moins cher à fournir, voire gratuit (exemple des infrastructures routières et des infrastructures de mise en réseau en général). Ceci signifie que le coût marginal de production est toujours inférieur au coût moyen, ce qui pose des problèmes de tarification puisque le prix d'un bien ou service, nous l'avons vu, devrait s'établir à son coût marginal de production pour que l'on se situe à l'optimum. Sur un marché concurrentiel, les entreprises privées ne pouvant contrôler leur prix ne pourraient produire ces biens qu'à perte et renonceraient donc à leur production. Dans un tel contexte de rendements croissants où seule une situation de monopole peut permettre d'envisager une production, on peut alors estimer que c'est à l'Etat de prendre en charge la mise à disposition de ces biens.

La seconde hypothèse souvent remise en cause correspond à l'existence d'externalités, c'est à dire d'interdépendances entre les choix des acteurs économiques en dehors du lieu d'échange privilégié que constitue le marché. Ce point sera repris de manière plus détaillée dans la partie suivante.

Ce qu'il est important de souligner, c'est que ces situations qui remettent en cause les conditions d'équilibre d'un marché de concurrence pure et parfaite ne suffisent cependant pas à rendre la pensée néoclassique nulle et non avenue.

En effet, le résultat auquel le modèle aboutit reste malgré tout socialement désirable : une économie du bonheur au sein de laquelle les forces productives en oeuvre ne sont que les moyens de réaliser le bien-être collectif le plus élevé possible compte tenu des contraintes de rareté. Puisque cet objectif est bon, si les conditions pour l'atteindre ne sont pas réalisées, l'Etat apparaît alors comme un acteur régulateur primordial. C'est à lui qu'incombe la responsabilité de la mise en place des règles permettant de retrouver les conditions de concurrence, d'intervenir dans, voire de gérer, les domaines où les hypothèses du modèle ne peuvent être respectées. Le rôle de l'Etat est donc de pallier les défaillances du marché avec comme objectif l'obtention de résultats *comme si* toutes les hypothèses du modèle avaient été mises en oeuvre.

Le champ de l'économie néoclassique ne se contente donc pas de la représentation des comportements humains dans leur lutte contre la rareté⁵, il englobe aussi la mise en

⁵ "L'économie est la science qui étudie le comportement humain en tant que relation entre des fins et des moyens rares à usages alternatifs". ROBBINS Lionel, *Essai sur la nature et la signification de la science économique*. Paris : Librairie Médicis, 1947. Cité p. 20 par SILEM Ahmed, *Introduction à l'analyse économique*. Paris : Armand Colin, 2^{de} éd., 1989. 190 p.

oeuvre d'une science de la gestion des ressources dans un contexte de rareté⁶. Le modèle construit passe alors du statut de réponse à la question posée à celui d'outils permettant à la fois de définir les hypothèses à respecter et d'établir les moyens les plus efficaces pour les retrouver si elles ne sont pas remplies. Le but est ainsi de retrouver l'optimum collectif grâce au pouvoir de régulation de l'Etat.

1.2. Des externalités à leur internalisation

1.2.1. Externalité : définition

Externalité : "liaison physique directe entre fonctions d'utilité individuelles, fonctions de production ou entre les unes et les autres. Cette liaison est <<directe>> en ce qu'elle ne passe pas par le marché ni par les prix.

Cas classique : nuisances"⁷.

Cette définition correspond bien à l'acception habituelle de la notion. Même sous son habillage technique, l'hypothèse non respectée alors qu'elle est nécessaire au bon fonctionnement du modèle de référence est bien mise en évidence : il y a "externalité" lorsque des agents économiques ont une liaison entre eux en dehors du lieu adéquat, le

⁶ "L'économie politique est la science de l'administration des ressources rares dans une société humaine : elle étudie les formes que prennent les comportements humains et les conduites sociales dans l'aménagement onéreux du monde extérieur et les actes qui se proposent de réduire la tension qui existe entre les désirs illimités et les moyens limités des sujets économiques". Cf. p. 12 de BARRE Raymond, *Economie Politique, tome 1*. Paris : PUF, Thémis, Coll. Sciences Economiques, 1987. 888 p.

⁷ BENARD Jean, *Economie Publique. Op. Cit.* p. 109.
 Cette définition est la plus communément acceptée. On la retrouve par exemple chez LAFFONT Jean-Jacques, *Fondements de l'Economie Publique, Op. Cit.* p. 13 : "Nous partirons d'une définition classique d'*effet externe*, à savoir, tout effet indirect d'une activité de production ou d'une activité de consommation sur une fonction d'utilité, un ensemble de consommation ou un ensemble de production. Par indirect, il faut entendre d'une part que l'effet est créé par un autre agent économique que celui qui est affecté et d'autre part que l'effet n'agit pas par l'intermédiaire d'un système de prix".
 On peut noter l'ambiguïté des termes "direct" et "indirect", utilisés dans un sens opposé par ces deux auteurs alors que leurs définitions sont identiques. Tout est question de référence : soit la mise en relation à travers le marché représente un "détour" dans l'acte de socialisation, soit le marché est le lieu naturel de l'échange interpersonnel et toute mise en relation en dehors de ce cadre est présentée comme "indirecte". La première conception nous semble plus correcte mais cela ne change rien à la définition du terme "externalité".

marché, et que cette liaison a un impact sur le niveau de satisfaction ou le taux de profit des uns ou des autres⁸.

De cette liaison hors marché découle une des principales sources de dysfonctionnement par rapport au modèle. En effet, comme toutes les interactions entre agents ne sont pas régulées par le marché, l'équilibre général ne s'établit pas sur la base d'une optimisation de l'usage des ressources et d'une maximisation des satisfactions. Et ces interactions sont nombreuses au sein même des activités économiques : lorsque les émanations polluantes d'une entreprise nuisent à la production d'une autre ou gênent la population environnante, lorsqu'un commerce bénéficie de la proximité d'une infrastructure de transport...

C'est donc cette notion d'externalité, c'est à dire de liaison hors marché ayant un impact économique qui va être utilisée pour prendre en compte les phénomènes de nuisance. Si l'activité d'une entreprise génère un bien - ou plutôt un "mal" - en plus de sa production (bruit, pollution de l'air ou de l'eau...), si ce mal ne présente pas d'intérêt économique particulier pour cette entreprise et que rien ne la pousse à le prendre en considération, si, enfin, ce mal affecte la capacité de production des entreprises voisines ou la satisfaction générale d'habiter en ce lieu pour les populations locales, il y a alors externalité négative ou coût externe.

1.2.2. La recherche du niveau de coût externe optimal

Le coût externe conduit donc à un état sous-optimal. Pour le faire disparaître ou simplement supprimer sa composante négative, on va tenter de l'internaliser c'est à dire de ramener la liaison incriminée dans la droite ligne des règles du marché. Il faudra que d'une façon où d'une autre elle soit prise en compte et, surtout, qu'elle soit prise en compte à son juste coût.

⁸ Nous nous contentons ici d'un exposé de la notion d'externalité telle qu'elle est le plus souvent abordée dans le cadre de l'économie du Bien-Être.

D'autres façons d'aborder la notion existent, pour lesquelles l'idée d'une liaison "externe" est rattachée au fait que celui qui la génère ne la prend pas en compte ou celui qui la reçoit reste passif : l'externalité se définit d'abord par rapport aux agents et non simplement par rapport au marché (Cf. note 12, complémentaire de celle-ci).

Ces approches ont souvent été beaucoup plus dynamiques. Alfred MARSHALL s'en est par exemple servi pour montrer comment l'économie de marché n'aboutit pas forcément à une économie monopolistique. Dans les années 40 ROSENSTEIN-RODAN a proposé un modèle de développement économique construit à l'aide de la notion "d'externalité pécuniaire". Claude JESSUA, en 1968, a développé une analyse en terme de pouvoir et de pressions volontaires ou non entre les agents économiques. Maurice CATIN, à travers une recherche synthétique, tente une approche systémique de la notion en exploitant son pouvoir explicatif en terme de régulation du système étudié (marché ou systèmes de décision collective).

Une bonne synthèse de l'histoire de la notion d'externalité est fournie pp. 29-172 de CATIN Maurice, *Effets externes : marché et systèmes de décision collective*. Paris : Cujas, 1985. 455 p. On trouvera notamment une réflexion approfondie sur l'approche de Alfred Marshall sur cette question, pp. 31-97.

a) La mise en évidence théorique de ce coût externe optimal

Pour établir ce "juste coût", l'économiste va tout d'abord rechercher la solution qui permet à la collectivité dans son ensemble de se retrouver dans la situation la meilleure - ou plutôt la moins mauvaise, compte tenu des réserves qui ont été formulées précédemment.

Pour ce faire, il va comparer, pour une activité donnée, à un niveau de production précis, les bénéfices qu'elle génère et les coûts externes qu'elle fait supporter. En dehors de toute contrainte autre que celles imposées par un marché de concurrence pure et parfaite, tout entreprise va fixer son niveau de production de manière à maximiser son profit, compte tenu des prix du marché et de ses coûts de production. Si son activité génère en même temps un coût externe supporté par des tiers, on peut s'interroger sur l'opportunité de lui faire prendre ce coût en considération. Cependant, quelle que soit la modalité utilisée, taxe liée à l'externalité générée, quota de production, norme de pollution, dédommagement, etc., le niveau de profit de l'entreprise se trouve affecté.

Du point de vue de la collectivité, qui englobe celui de l'entreprise et ceux des récepteurs des nuisances, l'objectif est de parvenir à maximiser le bien-être général. En l'occurrence, il est de minimiser le total des pertes des uns et des autres, coûts externes supportés par les récepteurs d'un côté, profit non réalisé du fait des règles rajoutées à celles du marché concurrentiel pour que l'entreprise tienne compte des nuisances qu'elle génère de l'autre.

De façon plus formelle, si l'on désigne par $PNR(q)$ le profit non réalisé par l'entreprise du fait des contraintes supplémentaires qui lui sont imposées et par $CE(q)$ le niveau des coûts externes qu'elle génère, sachant que l'un et l'autre sont fonction des quantités q produites :

$$PNR(q) - CE(q) = \min.$$

Ce qui donne, lorsque l'on dérive B et CE par rapport aux quantités produites :

$$\begin{aligned} PNR'(q) - CE'(q) &= 0 \\ PNR'(q) &= CE'(q) \end{aligned}$$

La solution optimale du point de vue de la collectivité est donc de trouver le niveau de production pour lequel les bénéfices retirés de la dernière unité produite égalent les coûts externes que sa production entraîne.

Soulignons que dans le cadre des hypothèses du modèle traditionnel, il existe bien une solution à cette équation. D'une part les coûts externes générés par chaque unité produite supplémentaire sont supposés aller en augmentant. D'autre part le contexte de rareté se traduit par des coûts de production marginalement croissants : ceci signifie aussi que le profit réalisé par l'entreprise pour chaque unité produite et vendue, correspondant à la différence entre son coût de production et son prix de vente sur le marché, va en diminuant - pour descendre jusqu'à 0, valeur limite optimale pour l'entreprise à partir de laquelle il n'y a plus aucun intérêt à produire puisqu'aucun profit ne peut plus être réalisé. Le coût externe optimal correspond donc à la valeur pour laquelle les courbes des coûts

externes et des profits "non" réalisés⁹ par unité produite se croisent, la première étant croissante et partant de 0 pour une production nulle, la seconde étant décroissante et partant d'un maximum à la première unité¹⁰.

Ce raisonnement peut être schématisé de la façon exposée page suivante. Ce que l'on peut en retenir, c'est que :

- La présence d'une pollution physique ne signifie pas qu'il y ait nuisance (et encore moins coût externe, qui en est l'expression monétaire) ; de même, s'il y a coût externe, rien n'indique que la meilleure solution soit la suppression physique de la pollution : il peut très bien n'y avoir que compensation monétaire.
- La conclusion même de cette démonstration est que le niveau de coût externe optimal n'est pas nul : à partir du moment où une activité est à la fois source de richesse et de nuisance, il s'agit de retrouver l'équilibre entre un niveau minimum de nuisance et un gain en richesse malgré tout le plus élevé possible. L'exercice consiste donc à savoir "jusqu'où l'on peut accepter que se poursuive une activité génératrice de coûts sociaux qu'elle peut éventuellement compenser".¹¹

Deux grands courants de pensée ont apporté une réflexion constructive sur la conduite à tenir pour mener à bien le processus d'internalisation, c'est à dire sur les moyens permettant de retrouver le niveau optimal de production lorsqu'on est en présence d'externalités. Même si les principes de bases sur lesquels ils reposent sont les mêmes - ils viennent d'être présentés -, les débats qui les opposent sont parfois âpres : les conclusions sont en effet sensiblement différentes entre l'interventionnisme étatique de l'école de Arthur Cecil Pigou qui a débouché sur le principe pollueur-payeur adopté par l'OCDE et l'ultralibéralisme de certains qui poussent jusqu'à sa limite la logique des raisonnements de Ronald Coase.

⁹ La courbe du profit réalisé par unité produite et celle du profit non réalisé correspondent à une seule et même courbe lue différemment : pour la même unité produite, la valeur du profit qu'elle permet de réaliser si on la produit effectivement est bien strictement identique à la valeur du profit non réalisé si on ne la produit pas.

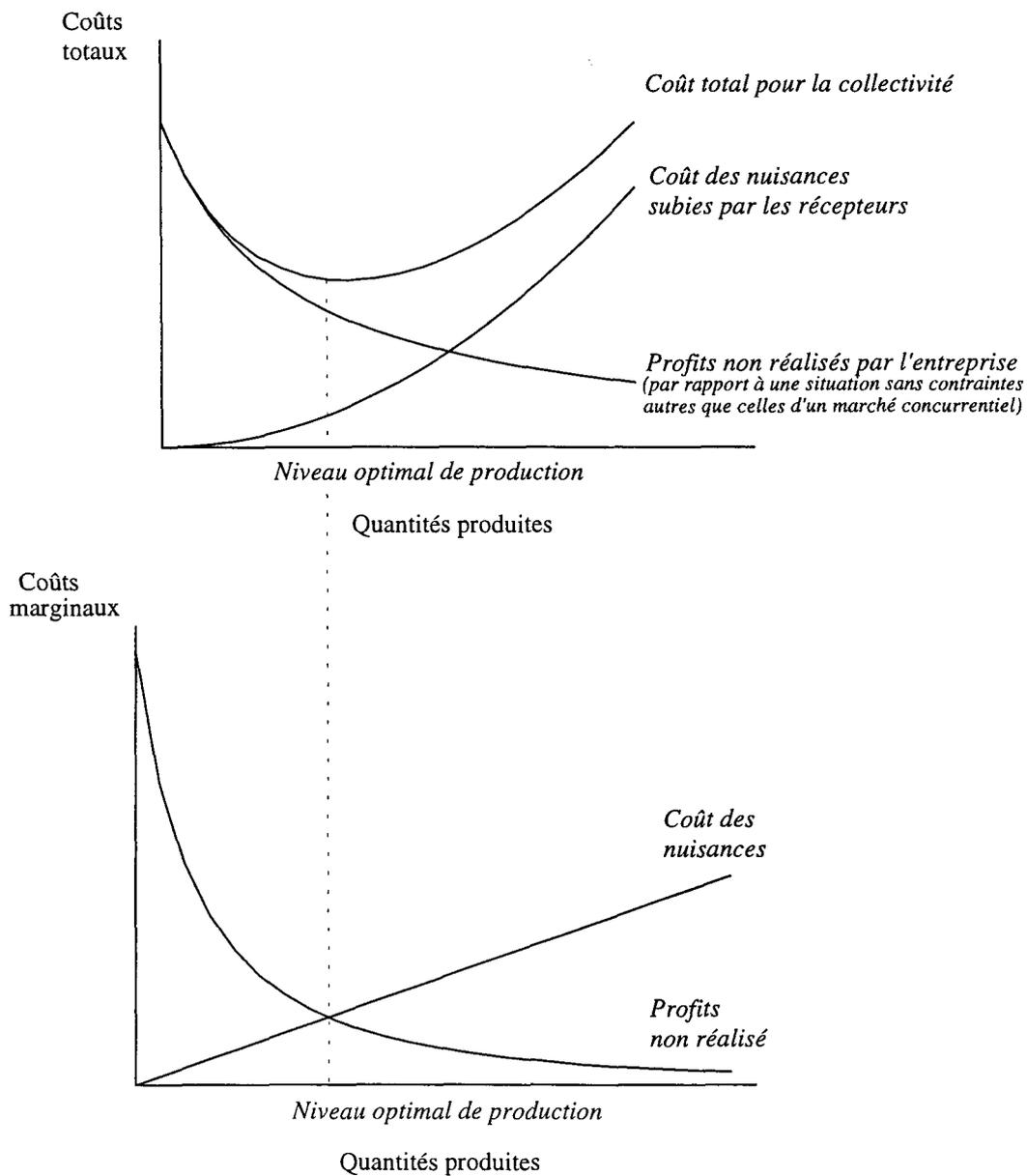
¹⁰ Deux cas de figure se présentent pour lesquels la solution à cette équation $PNR'(q) = CE'(q)$ peut sembler plus problématique.

Le premier cas est celui d'une courbe de profit par unité produite croissante, ce qui correspond aux économies d'échelle et aux rendements croissants. Externalités et profits allant dans le même sens, le croisement des deux courbes risque de ne se faire qu'à un niveau élevé, sinon de ne pas se réaliser. La réponse traditionnelle au problème des économies d'échelle consiste à observer le phénomène à un niveau plus élevé, en passant par exemple du niveau de l'unité de production à celui de l'entreprise ou à celui du secteur d'activité, ou du court au long terme, pour montrer qu'à ce niveau supérieur, la loi des rendements marginalement décroissants se vérifie. Lorsque le niveau d'observation semble trop élevé pour qu'une entreprise privée soit à même de s'y placer pour investir, comme par exemple dans le cas des infrastructures de transports ou du développement de réseaux de communication, le bien est considéré "bien public", susceptible d'être pris en charge par l'Etat.

Le second cas serait celui d'un coût externe marginalement décroissant à partir d'un certain niveau de production, du fait d'un changement technologique par exemple. Ce cas présente peu d'intérêt puisque dans le cas où les deux courbes ne se croisent pas, cela signifie que le coût externe généré par unité produite finit par s'annuler et le niveau de production économiquement optimal reste celui que l'entreprise choisira d'elle même avec les indications du marché.

¹¹ Cf. p. 16 de ARABEYRE Agnès, BOUF Dominique, CHAUSSE Alain, CROZET Yves (sous la direction de), NICOLAS Jean-Pierre, PEREZ Marc, TOILIER Florence, *La mobilité en milieu urbain : de la préférence pour la congestion à la préférence pour l'environnement ?* Rapport pour le compte de l'ADEME et du Ministère de l'Environnement, LET, Lyon, juin 1994, 304 p.

Graphique 1 : le niveau de coût externe optimal, mesure en termes de coûts totaux et marginaux



b) Arthur Cecil Pigou et l'intervention de l'Etat

En 1920, A.C. Pigou dans son "Economie du Bien-Être" proposait déjà une intervention correctrice de l'Etat destinée à retrouver le niveau de coût externe optimal.

Il considère en effet que l'existence d'un coût externe est liée au fait que celui qui le génère ne paye pas complètement le coût de son activité. Il supporte un certain coût privé qui correspond au coût des facteurs de production dont il a besoin. Par contre il génère des

coûts externes¹² supportés par d'autres et que lui n'a aucune raison de prendre en compte pour décider de son comportement économique. Il y a donc externalité lorsqu'il y a divergence entre le coût privé d'une activité et le coût total qu'elle représente pour la collectivité - son coût social. Le raisonnement symétrique peut être appliqué aux avantages externes¹³.

Là où le marché défaille et ne peut à lui seul permettre à chacun d'agir selon ses coûts et ses profits réels, l'intervention de l'Etat s'avère nécessaire. Ce sera à lui, en tant que représentant de la collectivité dans son ensemble, de repérer les différences entre coûts sociaux et coûts privés et de les faire prendre en compte par les agents concernés par quelque moyen que se soit, sachant que le système des taxes et des subventions lui semble le plus adéquat. "Il est possible pour l'Etat, s'il le veut, d'éliminer les divergences par des <<encouragements extraordinaires>> ou des <<contraintes extraordinaires>> (...) Les formes les plus évidentes d'encouragements et de contraintes que l'on peut imaginer sont les subventions et les impôts"¹⁴. Le niveau de la taxe - ou de la subvention - débouchant sur une action économiquement pertinente est alors celui qui comble l'écart entre le prix du marché et le coût marginal de production en situation de coût externe optimal.

¹² On peut remarquer ici une des ambiguïtés du terme externalité : nous l'avons justifié par le fait d'une liaison externe au marché ; il renvoie ici au fait que certains coûts soient externes à la sphère d'activité de ceux qui les génèrent. Alors, externe : par rapport au marché ou par rapport à celui qui génère ?

En fait, dans le cadre du modèle néoclassique, le problème a été résolu au profit de la première acception. Dans les années 20-30, l'idée d'externalité renvoyait plutôt à une action dont une partie des conséquences n'était pas prise en compte par l'agent qui l'exécutait. On distinguait alors externalité technologique (la relation s'exerce hors marché par le biais d'un bien ou service quelconque) et externalité pécuniaire (*simpliciter* pour Pigou ; la relation reste interne au marché : pour reprendre un exemple traditionnel, c'est le type d'externalité généré par un pêcheur qui va, par son activité, diminuer le stock de poissons et donc affecter les coûts de production de ses concurrents ; la relation entre pêcheurs reste cependant interne au marché car les fluctuations de la ressource "stock de poissons" se traduisent directement par des variations de prix sur le marché du poisson). Depuis les articles de MEADE J.E., "External Economies and Diseconomies in a Competitive Situation", *Economic Journal*, LXII, mars 1952, pp. 54-67 et de SCITOVSKY Tibor, "Two Concepts of External Economies", *Journal of Political Economy*, n°1, 1954 pp. 143-151, ce deuxième type d'externalités a peu à peu été délaissé dans le cadre de l'analyse statique classique car il a été admis qu'il respecte le jeu du marché et n'empêche pas d'atteindre l'optimum. Cf. par exemple CATIN Maurice, *Effets externes... Op. Cit.* p. 111.

La distinction externe par rapport au marché et externe par rapport à celui qui génère se trouve alors évacuée non pas parce qu'elle ne peut pas être faite mais parce qu'elle ne se révèle pas pertinente par rapport à l'objectif de maximisation du Bien-Être collectif. Ce point de vue qui a prévalu à partir des années 50 reste prédominant aujourd'hui.

¹³ Notons que Artur Cecil PIGOU mène cette analyse "par les marges" : il y a externalité à partir du moment où le coût de production d'une unité supplémentaire du bien concerné est différent de son coût social. C'est cette différence entre CMP (Coût Marginal Privé) et CMS (Coût Marginal Social) qu'il intitule externalité. C'est sur la base d'un montant équivalent à cette différence qu'il suggère ensuite d'appliquer une subvention ou une taxe par unité produite pour que les agents concernés prennent en compte toutes les conséquences économiques de leurs actions et permettent alors de retrouver le sentier de l'optimum.

¹⁴ p. 192 de PIGOU A.C., *The Economics of Welfare*, Mac Millan Ed., 4^{ème} édition, 1960, cité p. 15 de LAFFONT Jean-Jacques, *Effets externes et théorie économique*. Paris : Editions du CNRS, Coll. Monographies du séminaire d'économétrie, 1977, 200 p.

Une seconde conséquence de la logique de A.C. Pigou est le développement du principe pollueur-payeur (PPP) adopté notamment par l'OCDE¹⁵. Lorsqu'une activité s'avère source de nuisance, elle doit se voir imposer une taxe lui faisant prendre en compte non seulement ses coûts privés mais aussi ses coûts externes. Avec A.C.Pigou, il est donc admis que c'est au pollueur de payer. Remarquons cependant que cette taxe peut très bien être répercutée dans ses prix par l'entreprise : c'est alors le consommateur final qui paye les coûts externes.

c) *Ronald Coase ou le retour à plus de libéralisme*

Au début des années 60, R. Coase a remis en question cette approche à ces yeux à la fois trop interventionniste et trop partielle dans ses interventions pour parvenir à un optimum.

L'approche de Pigou est trop partielle. Elle implique que le pollueur soit le payeur alors que rien n'indique *a priori* que la décision optimale doive systématiquement léser ce dernier : il peut être tout à fait justifiable du point de vue de l'avantage collectif que ce soit au pollué de payer pour retrouver un niveau de satisfaction qui lui convienne.

En fait, pour R. Coase, la question initiale (comment empêcher l'émetteur de nuisance de porter préjudice aux autres) est mal posée car "le problème est un problème de nature réciproque". En effet, les nuisances sont source de profit ou de satisfaction pour celui qui les émet, autant qu'elles constituent une perte pour ceux qui les subissent. Dès lors, "la véritable question à laquelle on doit répondre est la suivante : doit-on laisser A porter préjudice à B ou doit-on laisser B porter préjudice à A. Le problème est de réduire le préjudice en général au minimum"¹⁶.

¹⁵ Conseil de l'OCDE, 26 mai 1972 :

"En matière d'environnement, les ressources sont généralement limitées et leur utilisation dans le cadre des activités de production et de consommation peut entraîner leur détérioration. Lorsque le coût de cette détérioration n'est pas pris en compte de manière adéquate dans le système des prix, le marché ne reflète pas la rareté de ces ressources au niveau national et international. Il est donc nécessaire que les pouvoirs publics prennent des mesures pour réduire la pollution et réaliser une meilleure allocation des ressources en faisant en sorte que les prix de ces biens dépendent de la qualité et/ou de la quantité des ressources d'environnement reflètent plus étroitement leur rareté relative et que les agents économiques en cause agissent en conséquence.

Dans bien des cas, pour assurer que l'environnement soit dans un état acceptable, il ne sera ni raisonnable ni nécessaire de dépasser un certain niveau dans l'élimination de la pollution, en raison des coûts que cette élimination entraînerait.

Le principe à appliquer pour l'imputation des coûts des mesures de prévention et de lutte contre la pollution, principe qui favorise l'emploi rationnel des ressources limitées de l'environnement, tout en évitant des distorsions dans le commerce et les échanges internationaux, est le principe dit "Pollueur-Payeur". Ce principe signifie que le pollueur devrait se voir imputer les dépenses relatives aux susdites mesures arrêtées par les pouvoirs publics pour que l'environnement soit dans un état acceptable. En d'autres termes, le coût de ces mesures devrait être répercuté dans le coût des biens et services qui sont à l'origine de la pollution du fait de leur production et/ou de leur consommation. D'une façon générale, de telles mesures ne devraient pas être accompagnées de subventions susceptibles d'engendrer des distorsions importantes dans le commerce et les investissements internationaux."

Repris pp. 10-11 de OCDE, *Le Principe Pollueur-Payeur. Définition, analyse, mise en oeuvre*. Paris : Publications de l'OCDE, 1975. 123 p.

¹⁶ p. 130 de COASE Ronald, "Le problème du coût social" pp. 129-168 in DORFMAN Robert, DORFMAN Nancy, *Economie de l'environnement*. Paris : Calmann-Lévy, 1975. 316 p. Article publié sous le titre "The problem of social cost", *The Journal of Law and Economics*, octobre 1960.

Ce qui importe donc pour Coase c'est la mise en balance de ce que perd l'émetteur à arrêter de nuire avec ce que perd le récepteur du fait des nuisances émises pour rechercher la solution la moins coûteuse d'un point de vue global. Si le revenu procuré grâce à la pollution est supérieur à la perte du ou des pollués, l'arrêt de l'activité polluante ne se justifie pas. Le pollueur a les moyens de dédommager les pollués puisque ses profits (liés aux nuisances) sont supérieurs à leurs pertes. A l'inverse, si les pertes des pollués sont supérieures aux gains que procure la pollution à l'émetteur, il sera collectivement plus avantageux que les victimes paient ou plutôt dédommagent cet émetteur du revenu dont elles le privent en lui demandant de renoncer à tout ou partie de son activité. Par contre le niveau de dédommagement reste déterminé par une analyse à la marge des fonctions d'utilité de chacun, en recherchant le niveau de production où le coût des nuisances émises par unité supplémentaire produite est équivalent à ce qu'elles permettent de dégager comme profit.

L'autre critique de Coase concerne l'aspect trop interventionniste dans lequel s'enferme la logique de Pigou. Il existe de nombreux cas où la négociation directe entre les différents acteurs en présence permettrait de trouver une solution satisfaisante. Cette négociation est d'autant plus facile que le nombre d'agents concernés est réduit car les coûts de la transaction (information des acteurs en présence, conduite de la négociation, mise au point du contrat, contrôle de son respect...) restent *a priori* raisonnables. Il s'agit en fait de mettre à chaque fois en balance les coûts de cette transaction avec les coûts d'implication de l'appareil administratif ainsi que les risques de manque d'efficacité des mesures qu'il va prendre¹⁷.

Un des développements pratiques originaux de la réflexion de R. Coase a été l'émergence des marchés de droit à polluer. L'idée de base est que l'Etat fixe un niveau global de pollution à ne pas dépasser. Cette quantité est divisée en petites unités auxquelles correspondent des "droits à polluer" attribués aux entreprises concernées puis échangeables entre elles en fonction de leur niveau d'activité et de leurs choix technologiques de production. Par la suite, l'Etat peut éventuellement racheter une partie de ces droits et les faire disparaître, diminuant ainsi le niveau global de pollution. Proposée dès 1968 par J.H. Dales¹⁸, cette idée a progressivement fait son chemin aux Etats-Unis pour déboucher en 1986, dans le cadre du Clean Air Act, sur un texte réglementant la pratique de permis de polluer négociables.

¹⁷ Ce raisonnement poussé à son extrême a pu conduire certains auteurs ultra-libéraux à nier tout phénomène d'externalité : "Tout ce qui risquerait d'échapper au marché est réintégré par principe à ce marché. En effet, toute activité susceptible d'être qualifiée d'externalité parce qu'elle gêne (ou avantage) un tiers peut ou ne peut pas être empêchée (ou favorisée) par ce tiers moyennant paiement approprié. Si elle le peut, c'est que par définition, il n'y a pas d'externalité ; si elle ne le peut pas, c'est que le coût de transaction (...) est trop élevé (...), de telle sorte qu'il n'y a là pas plus d'externalité que dans n'importe quel cas où un demandeur potentiel est détourné d'une transaction par le coût de production trop élevé de la marchandise désirée". Cf. p. 176 de LAGUEUX Maurice, "Externalités, marché et coûts de transaction" pp. 169-179 in *La méthodologie de l'économie théorique et appliquée aujourd'hui*. Actes du colloque annuel de l'Association Française de Science Economique, 17-18 septembre 1990. Paris : Nathan, 1990. 189 p.

¹⁸ DALES J.H., *Pollution, Property and Prices*, Toronto, University of Toronto Press, 1968.

d) *Internalisation, instruments réglementaires et économiques : confusions*

Cette présentation des approches de A.C. Pigou et de R. Coase ne doit cependant pas laisser croire que du point de vue de l'économie traditionnelle les seules mesures susceptibles de retrouver un niveau optimal de coût externe doivent faire directement référence à la logique du marché - même si cette référence est *a priori* supposée plus pertinente. En effet, allant de la réglementation pure et dure à la création de marchés de droits à polluer, ces mesures peuvent être d'une très grande diversité.

Elles sont assez couramment regroupées en deux classes opposées, "instruments réglementaires" d'un côté et "instruments économiques" de l'autre. Les premiers sont caractérisés par le fait que le pollueur "doit se conformer ou se voir infliger des sanctions à l'issue de procédures judiciaires ou administratives". Les seconds, beaucoup plus souples, "laissent aux acteurs la latitude de réagir à certains stimuli d'une manière qu'ils estiment eux-même être la plus profitable"¹⁹. Les auteurs du rapport d'où sont tirées ces deux définitions sont les premiers à reconnaître que la frontière qui les sépare est plutôt floue : dans de nombreux cas, les résultats des mesures "dépendent de considérations techniques et monétaires"; certaines redevances qui n'ont aucune prétention à modifier les comportements peuvent pourtant les affecter radicalement ; enfin il existe des programmes qui ne prévoient l'usage de mesures économiques que dans des situations précises, définies normativement sur des bases techniques²⁰.

On peut tout aussi bien concevoir comme économique toute démarche visant tout d'abord à retrouver l'équivalent monétaire des nuisances et, surtout, le point optimal égalisant à la marge coût externe et bénéfice puis, ensuite, "à mettre en oeuvre des mécanismes ou instruments permettant leur prise en compte effective dans le calcul économique (...), de faire en sorte que les agents économiques reçoivent le <<signal>> économique qui les oblige à internaliser (...)." Dès lors un grand nombre d'actions peut être mis en oeuvre : "les taxes et redevances de pollution, les primes et subventions, l'indemnisation des dommages, les permis de pollution négociables, enfin les différentes formes de normes et réglementations"²¹. Tout ou presque est envisageable parce que toute mesure a un impact sur le comportement des agents économiques. Les différentes mesures sont par contre jugées économiquement pertinentes ou non selon qu'elles permettent plus ou moins bien de se rapprocher de l'optimum perdu. Suivant les cas, suivant le contexte et les agents concernés, tel ou tel instrument apparaîtra préférable, sachant que la référence directe au marché de l'instrument en question est quand même moins suspecte d'inefficience.

On passe donc d'une définition qui cherche à rattacher directement l'instrument dit "économique" à la notion de marché à une définition qui se réfère d'abord et avant tout aux objectifs auxquels le marché serait sensé aboutir si les conditions du modèle de l'économie du bien-être étaient respectées.

¹⁹ Cf. p. 13 de OPSHOOR J.B., VOS Hans B., *Instruments économiques pour la protection de l'environnement*. Paris : OCDE, 1989. 150 p.

²⁰ *idem* p. 15.

²¹ Pour les deux citations, Cf. p. 56 de BARDE Jean-Philippe, *Economie et politique de l'environnement*. Paris : P.U.F., 2^{ème} édition, 1992. 383 p.

Encadré 2 : Fiscalité et marché de droits versus réglementation

Il est utile de rappeler les avantages que la tarification incitative ou l'établissement d'un marché de droits peuvent présenter par rapport à une approche purement réglementaire :

L'autorité tutélaire peut disposer d'informations moins précises ou incomplètes sur les coûts et les conditions de production des pollueurs.

L'effort de dépollution est réparti efficacement, au sens où l'objectif de qualité de l'environnement est atteint au moindre coût. En effet, les coûts marginaux de dépollution s'ajustent au niveau de la taxe dans le cas de la fiscalité, et au niveau du prix du droit dans le cas de permis d'émission. Dans les deux cas, les coûts marginaux de l'ensemble des agents sont égaux.

Il y a une incitation à aller au-delà de la norme, ou à faire mieux que l'existant, puisque réduire d'une unité la pollution permet d'économiser la redevance sur les effluents non déversés dans le cas de la fiscalité, et de revendre les permis non utilisés dans le cas d'un marché de droit.

La modulation de la politique de l'environnement est rendue possible, en fonction de l'arrivée d'informations scientifiques ou techniques complémentaires. Un renforcement peut être obtenu par une hausse du taux de la taxe dans le cas de la fiscalité (ce qui rend de nouvelles mesures de dépollution rentables) ou par une réduction du nombre de permis dans le cas d'un marché de droits.

Ils suscitent une incitation durable à l'innovation technologique en matière de procédés de production moins polluants et de techniques de dépollution.

La fiscalité est "un instrument-prix" puisqu'elle permet de majorer les coûts supportés par les pollueurs. Elle ne garantit cependant pas la qualité de l'environnement obtenue si des incertitudes subsistent sur les coûts de dépollution. En effet, dans ce cas, le taux de taxe ne permet pas d'anticiper avec précision le comportement des pollueurs, et donc les résultats de la lutte contre la pollution. Si un niveau prédéterminé de pollution doit être atteint, un processus de tâtonnement sur le taux s'avérera nécessaire.

Le marché de droits est un "instrument-quantité" qui permet d'anticiper exactement le résultat en matière de qualité de l'environnement. Ce sont les prix d'échange des droits (et donc les coûts supportés par les pollueurs) qui sont le plus difficiles à anticiper si des incertitudes subsistent sur les coûts de dépollution.

Extrait de X. Delache, S. Gastaldo : *Les instruments des politiques d'environnement*²².

Cette seconde approche correspond mieux aux canons de l'économie du Bien-Être, tels que nous les avons présentés. La conséquence est que les mesures économiques ne se caractérisent pas par leur forme mais par l'esprit qui anime leur mise en oeuvre. Un même instrument, quel qu'il soit, norme, taxe, redevance, marché de droit à polluer, etc., pourra tout à fait être "économique" dans un cas et "anti-économique" dans l'autre : tout n'est question que d'objectif en référence à l'optimum à atteindre, c'est à dire à la recherche d'une maximisation du bien-être collectif.

1.3. Quelques précisions sur les méthodes d'évaluation

La volonté de réduire l'impact des nuisances tout en ménageant au mieux les richesses apportées par les activités sources de la gêne passe par une évaluation correcte de ces nuisances. Le chapitre suivant est consacré à cette question de mesure, appliquée au domaine des transports. Nous pouvons toutefois présenter ici la démarche générale qui sous-tend les travaux d'évaluation des coûts externes.

²² Cf. p. 29 de DELACHE, Xavier, GASTALDO, Sylvie, "Les instruments des politiques d'environnement", *Economie et Statistique* n°258-259, octobre-novembre 1992. pp. 27-34.

Deux grandes voies sont principalement empruntées, l'une microéconomique consistant à mieux évaluer les biens et services qui ne s'échangent pas sur un marché, l'autre macroéconomique correspondant à la recherche d'une meilleure intégration dans les comptes nationaux des conséquences économiques des interactions entre les processus écologiques et les activités de production.

1.3.1. Des représentations sociales à la représentation économique de l'environnement

Le premier point touche à la mise en oeuvre des méthodes permettant de passer des représentations sociales de l'environnement à leur expression économique et monétaire.

Ces représentations varient fortement d'une culture à l'autre, même si elles se correspondent dans le temps et sont proches dans l'espace. Elles permettent de comprendre pourquoi la question écologique n'a pas la même résonance d'un pays à l'autre. La société occidentale est souvent mise à l'index sur ces questions. Depuis l'avènement du christianisme pour certains ("Remplissez la terre et soumettez-la", Gen. I, 28), Descartes pour d'autres, le respect de la nature s'est progressivement perdu. Cependant même au sein de cette société des différences non négligeables peuvent être notées²³. De même l'absence de prise en compte de la nature a pu exister dans d'autres civilisations²⁴. Enfin, la montée en force depuis une dizaine d'années de notions symboliques telles que celles de "générations futures", "développement durable", "patrimoine de l'humanité", etc., peut

²³ Par exemple, "dans le midi de la France, la conscience environnementale est fortement localisée, liée à ce qu'on voit à proximité de soi (bruit, odeurs, air vicié, routes, béton, qualité de nourriture) (...). La dégradation du cadre de vie apparaît en première approximation plus préoccupante que la dégradation ou l'asphyxie de la planète. Il n'en est pas de même semble-t-il en Alsace et en Allemagne, où la dégradation, ou la disparition de la nature en tant que telle apparaît au moins aussi importante que celle du cadre de vie". Cf. p. 5 de EIZNER Nicole, "Les représentations sociales de l'environnement en France, Allemagne et Italie" in Recueil des textes du colloque *Les fonctions sociales de la Nature*, Chantilly (Les Fontaines), 8-12 mars 1993. SO.R.I.S.TEC. (Groupe de Recherche Société et Risques Scientifiques et TECchniques).

²⁴ Ainsi peut-on évoquer avec J.P. DELEAGE les déforestations qui ont été effectuées bien avant l'avènement de nos sociétés industrielles à système économique libéral : "La dégradation de l'écosystème forestier et du cycle de l'eau aurait ruiné l'agriculture maya fondée sur le système *milpa* (culture de maïs sur brûlis avec jachère de quatre à huit ans). (...) La désorganisation de l'hydrologie a joué un rôle important dans l'affaiblissement des civilisations mésopotamiennes, en particulier l'érosion des sols consécutive au déboisement et au surpâturage des hauts bassins versants du Tigre et de l'Euphrate. (...) Dans le monde musulman, la pénurie de bois a représenté elle aussi une redoutable menace à partir du VIII^e siècle (...). [Cependant] la conclusion à laquelle aboutissent les trop rares enquêtes historiques disponibles est que la dégradation de l'environnement n'a joué qu'en interférence avec d'autres facteurs sociaux (économiques, techniques, culturels, etc.) et davantage comme limite globale que comme cause immédiate et directe. (...) Ce déclin ne s'accomplit le plus souvent que sur de très longues périodes et uniquement si la société n'est pas en mesure d'élaborer des mécanismes compensateurs de la crise écologique, tels que le développement des échanges à longue distance, ou d'inventer les moyens techniques et économiques d'une croissance différente.

Dans la plupart des cas historiques recensés, les représentations qu'ont les sociétés de leur relation à la nature semblent avoir joué un rôle important. Ces représentations favorisent ou au contraire exercent un effet limitant sur les prélèvements dévastateurs."

Cf. pp. 255-257 de DELEAGE Jean-Paul, *Histoire de l'écologie. Une science de l'homme et de la nature*. Paris : La Découverte, 1992. 330 p.

laisser penser que ces représentations évoluent aujourd'hui dans le sens d'une revalorisation de l'environnement et de sa pérennité²⁵.

Ce qui intéresse l'économiste, c'est que ces représentations vont permettre aux individus de situer l'importance relative des questions d'environnement par rapport à l'utilité qu'ils retirent de toute chose. En effet, dotés de ce système de valeurs les individus peuvent dès lors exprimer monétairement les avantages et inconvénients qu'ils retirent d'une pollution liée à une activité économique.

a) *Les méthodes d'évaluation monétaire des dommages*

Une partie du travail de l'économiste est de retrouver ces courbes de préférence lorsque le marché défaillant ne permet pas un ajustement direct à l'optimum. Deux grandes catégories de méthodes peuvent être distinguées suivant que l'on établisse cette courbe directement par enquête auprès de la population ou que l'on tente une évaluation à partir d'un marché existant sur lequel les individus ont pu, de manière indirecte, manifester leurs préférences.

La première méthode, dite "d'évaluation contingente", consiste à faire révéler directement par les agents économiques leur consentement à payer pour une amélioration plus ou moins importante d'une caractéristique de leur environnement. On reconstruit donc "*in vitro*" un marché d'un bien environnemental : l'offre de ce bien est artificiellement modifiée et on enregistre (entre autre) les réactions économiques des individus enquêtés. La mise au point de telles enquêtes doit faire l'objet d'une réflexion méthodologique et d'un suivi rigoureux pour éviter que le manque d'implication des enquêtés et que les informations qui leur sont fournies ne conduisent à des biais dans leurs réponses.

²⁵ Tout ouvrage consacré aux rapports entre homme et environnement se penche à un moment ou un autre sur cette nouvelle terminologie héritée des mouvements écologiques engagés des années 60-70. Nous nous contenterons de reprendre ici l'image développée p. 179 par Bertrand de JOUVENEL dans *La civilisation de puissance*. *Op. Cit.*

"<<Un octogénaire plantait>>

Des jeunes gens lui demandaient : <<Quel fruit de ce labeur pouvez-vous recueillir ?>>

Il leur répond : <<Mes arrières petits-neveux me devront cet ombrage.>>

Dans la fable de La Fontaine, je me permets d'en insérer une autre. De ces spectateurs, je fais des économistes qui disent au vieillard :

<<Si vous avez souci de votre postérité, c'est un bien mauvais calcul que de planter ce chêne qui n'aura atteint sa pleine maturité que lorsqu'il sera plus vieux que vous n'êtes, c'est-à-dire quand vos petits enfants aujourd'hui vivants auront eux-mêmes disparus. Si vous voulez planter, choisissez des peupliers que, dans vingt-cinq ans d'ici, vos enfants pourront débiter, formant ainsi à leurs enfants un capital qu'ils pourront réinvestir, et par réinvestissements successifs quel ne sera pas le capital qu'ils auront acquis d'ici un siècle !>>

Le vieillard répond simplement : <<Oui, mais quel ombrage y aurait-il alors pour ceux qui vivront en ces lieux dans cent ans et plus après nous ?>>

Ce souci de l'ombrage ménagé aux habitants futurs, quels qu'ils puissent être, c'est un bien autre esprit que celui de l'accumulation du capital, et je regrette fort que l'on applique le beau terme de patrimoine au capital hérité ; je voudrais que l'on entendît par patrimoine l'état du domaine de la vie humaine qui est laissé par les générations passées aux générations futures".

Les vœux sémantiques de B. de JOUVENEL sont en partie réalisés. Il faut cependant souligner qu'il existe malgré tout une différence de taille entre la symbolique des "générations futures" développée aujourd'hui, justifiant d'actions menées par les pouvoirs publics ou les instances internationales, et l'acte individuel du vieillard mis en avant par l'auteur. Si, entre les octogénaires d'hier et les jeunes d'aujourd'hui, l'idée de "génération future" reprend sens, cela ne signifie pas que l'Histoire se répète.

La seconde méthode consiste à rechercher sur d'autres marchés, dits "de substitution", la sensibilité des agents économiques aux variations d'offre d'un bien non marchand. On peut ainsi rechercher l'impact du bruit de la circulation sur le marché de l'immobilier : c'est la méthode "des prix hédonistes" qui repose sur l'idée que, toutes autres choses égales par ailleurs, la valeur d'un bien immobilier varie suivant le niveau de bruit ou de pollution. De même, on peut tenter d'établir le niveau des dépenses de protection contre le bruit en fonction du niveau sonore en façade. Enfin, la méthode dite "du coût du voyage" consiste à mesurer la valeur des lieux de loisirs en fonction des dépenses de déplacement consenties pour s'y rendre (en temps et en argent).

Chacune de ces méthodes présente ses avantages et ses inconvénients. Chacune d'entre elle et plus ou moins bien adaptée en fonction de ce que l'on cherche à évaluer et aucune n'apportera la même évaluation : l'ambition est rarement de retrouver le vrai prix des choses mais plus souvent de disposer d'un ordre de grandeur qui permette par la suite d'ajuster des politiques économiquement correctes.

D'autres approches existent qui, par souci d'éthique, par manque de confiance dans les jugements individuels ou simplement par souci de simplicité (etc.), ne cherchent pas directement cette courbe de demande d'un bien d'environnement. On peut estimer par exemple que l'Etat, notamment dans un système démocratique, est le meilleur représentant possible de la collectivité et que les biens ou services qui s'échangent hors marché sont sous sa tutelle. C'est alors lui qui va exprimer le consentement à payer de la collectivité, implicitement ou de façon volontaire. Une autre façon de procéder consiste à effectuer une mesure physique des dommages avant d'en évaluer le coût monétaire pour les éviter ou les réparer.

Cette évocation des méthodes d'évaluation de la courbe de consentement à payer pour un certain niveau d'offre d'un bien ou service d'environnement est pour le moins succincte. On en trouvera un exposé plus précis et détaillé dans le chapitre suivant. Ce qu'il est important de noter ici, c'est que dans le cadre de la théorie que nous présentons, les problèmes écologiques soulevés par les activités humaines ne sont pas considérés en tant que tels mais en ce qu'ils interagissent sur ces mêmes activités. Cette interaction est différente d'une personne ou d'une société à l'autre et dépend des rapports à l'environnement à un niveau individuel et culturel. Les méthodes d'évaluation présentées montrent comment l'on s'est donné les moyens, dans un cadre économique, d'en faire une mesure monétaire.

b) L'actualisation

Un autre phénomène important dans les rapports économie / écologie correspond à la perception du temps et de la durée par les hommes. Le problème posé renvoie à la fois à une question d'échelle et une question de contenu de ces durées économiques et écologiques.

L'échelle humaine se trouve coincée entre deux infinis par rapport aux temporalités des processus écologiques. Si les plus courts peuvent encore être pris en compte lorsqu'ils interfèrent directement avec les résultats des activités humaines, les autres n'ont *a priori* pas de raison d'être pris en considération, tant il est vrai qu'"il n'y a

guère de commune mesure entre [la temporalité historique de l'environnement] et celle de la vie individuelle, celle des générations, ni même celle de grandes civilisations"²⁶. A cette question d'échelle s'ajoute une question de contenu de la durée. En effet, les processus écologiques s'inscrivent dans le temps de manière cyclique alors que les activités humaines, empruntant un sentier d'expansion accélérée, suivent des logiques beaucoup plus linéaires.

Cette question de mesure du temps renvoie à la perception présente des évènements futurs et donc de l'importance que l'on prête à l'impact à venir des choix et non choix que l'on fait aujourd'hui (en supposant que l'on connaisse cet impact, ou tout au moins que l'on subodore les retombées positives ou négatives). En économie, elle est prise en compte par le calcul de l'actualisation : "on appelle prix actualisé d'un bien B à la date t, la quantité de bien N, choisi comme numéraire, qu'il faut fournir aujourd'hui en échange d'une unité de bien N disponible à la date t. (...) Avec P_t et P_{t+1} les prix actualisés en t et t+1 et a_t le taux d'actualisation on a alors :

$$\frac{P_{t+1}}{P_t} = (1 + a_t)^{-1}$$

(...) le taux d'actualisation est le taux d'intérêt réel qui réalise, pour chaque période, l'équilibre entre offre et demande de capitaux"²⁷.

Tout le problème, avec un tel outil, est de savoir quel taux d'actualisation est utilisé pour décider des actions économiques à mener. En effet, plus le taux d'actualisation est élevé, plus la rentabilité de l'investissement doit être élevée pour que celui-ci soit réalisé et plus cette rentabilité doit être immédiate. En effet, en $a_t=0$, on a $(1+a_t)^{-1}=1$ et donc $P_t=P_{t+1}$; lorsque a_t augmente, $(1+a_t)^{-1}$ tend à baisser sous la barre de 1 et donc P_t devient supérieur à P_{t+1} : les rendements de l'investissements doivent être supérieurs à son montant initial pour permettre de couvrir la dépréciation de l'argent au cours du temps. De même, sachant que lorsque la valeur de a_t s'élève, l'écart entre P_t et P_{t+1} s'agrandit, on imagine facilement que le retour d'investissement doit se faire rapidement car les rendements à venir vont avoir tendance à converger vers 0 : une valeur actuelle de 10 000 francs représente encore 9 053 francs au bout de 10 ans avec un taux d'actualisation a_t de 1%, elle tombe à 6 139 francs avec $a_t=5\%$ et 3 855 francs avec $a_t=10\%$... Ainsi, lorsque l'on se dote d'un taux d'actualisation élevé on privilégie, en fait, un rendement élevé *et* immédiat.

Pour conclure ce point, on peut remarquer que la conception de l'Economie du Bien-Être concernant les représentations sociales de la nature (les représentations sociales en général), reste essentiellement descriptive. L'important, pour elle, est de donner une traduction monétaire de ces représentations, qui permette ensuite de fixer un optimum économique, autrement dit l'objectif à atteindre. On ne s'interroge par contre pas outre mesure sur ces représentations elles-mêmes. L'économique est neutre à leur endroit, il entend répondre au bonheur des hommes tels qu'ils sont en se penchant sur l'organisation de leurs activités économiques telle qu'elle devrait être.

²⁶ Cf. p. 247, DELEAGE Jean-Paul, *Histoire de l'écologie... Op. Cit.*

²⁷ Rapport du Commissariat Général du Plan, "Les choix d'investissements publics décentralisés en période de croissance ralentie" sous la direction de E. MALINVAUD, mai 1981, cité p. 316 par BENARD, Jean, *Economie Publique, Op. Cit.*

1.3.2. Pour l'amélioration des outils macro économiques

Le second point que nous avons évoqué concerne la nécessaire adaptation des outils macroéconomiques dont dispose l'Etat pour que leur prise en compte des coûts externes permettent de mieux repérer l'optimum économique. Ce propos peut être illustré par la critique classique des déformations introduites par les comptes de la nation en matière d'environnement, critique qui a débouché, en France, à la mise en place de comptes satellites²⁸.

Le Produit Intérieur Brut en effet correspond à la valeur ajoutée de l'ensemble des activités économiques d'un pays pendant une année. Il comptabilise la valeur marchande totale de tous les biens et services destinés à une consommation finale par les ménages et les administrations²⁹.

A ce titre, tout emploi dont le coût est répercuté dans le prix d'un bien ou service final est compté comme enrichissement, "n'importe si cela est mal fait, n'importe si cela est fait à tort, n'importe si l'on s'en trouve embarrassé³⁰". Par exemple, la collecte des déchets organisée par les collectivités locales est considérée dans les comptes de la nation non comme un coût pour la société induit par ses activités mais comme une source de richesse. Il en est de même des dépenses de protection phonique des ménages résidant à proximité d'importantes infrastructures de transport. En fin de compte, toute nuisance se trouve soit ignorée soit comptabilisée positivement.

Cette critique reste bien ancrée dans le cadre de l'économie du Bien-Être. Elle correspond à un problème d'adéquation entre la théorie et les outils de mesure adoptés lorsque l'on sort d'une situation d'équilibre sur un marché de concurrence pure et parfaite. Elle revient à dire que ce qu'il faut optimiser ce n'est pas simplement la valeur totale apportée par les activités humaines, mais cette valeur déduite des nuisances que ces activités génèrent : c'est la logique qui a déjà été présentée à travers l'idée de niveau de coût externe optimal. La question est alors de savoir comment améliorer l'outil. Plusieurs réponses existent : on peut construire des "comptes satellites" aux comptes de la nation (Cf. encadré) ; on peut également proposer de ne plus comptabiliser les "dépenses défensives", telles que les dépenses de protection individuelle contre les nuisances, en consommations finales et donc en sources de richesses alors qu'elles témoignent d'une gêne³¹ ; etc.

²⁸ WEBER Jean-Luc, *Les comptes de patrimoine naturel*, Collections de l'INSEE Série C n°137-138, décembre 1986.

²⁹ Pour retrouver l'ensemble des éléments constitutifs du PIB, il faut également rajouter la Formation Brute de Capital Fixe, les variations de stocks, les exportations et retrancher les importations.

³⁰ Cf. de JOUVENEL Bertrand, *La civilisation de puissance. Op. Cit.* p. 129.

³¹ PEARCE David W., MARKANDYA Anil, BARBIER Edward, *Blueprint for a Green Economy*. Londres : Earthcan, 1989. Cités p. 141 par BARDE Jean-Philippe, *Economie et politique de l'environnement. Op. Cit.*

Encadré 3 : Les comptes du patrimoine naturel

Elaborés en France depuis la fin des années 70, les comptes du patrimoine naturel retracent de manière comptable la situation et l'évolution des ressources naturelles analysées dans leurs différentes fonctions. Les comptes du patrimoine naturel comprennent à la fois des données physiques et des données monétaires. Le système de compte est organisé autour de trois pôles qui sont :

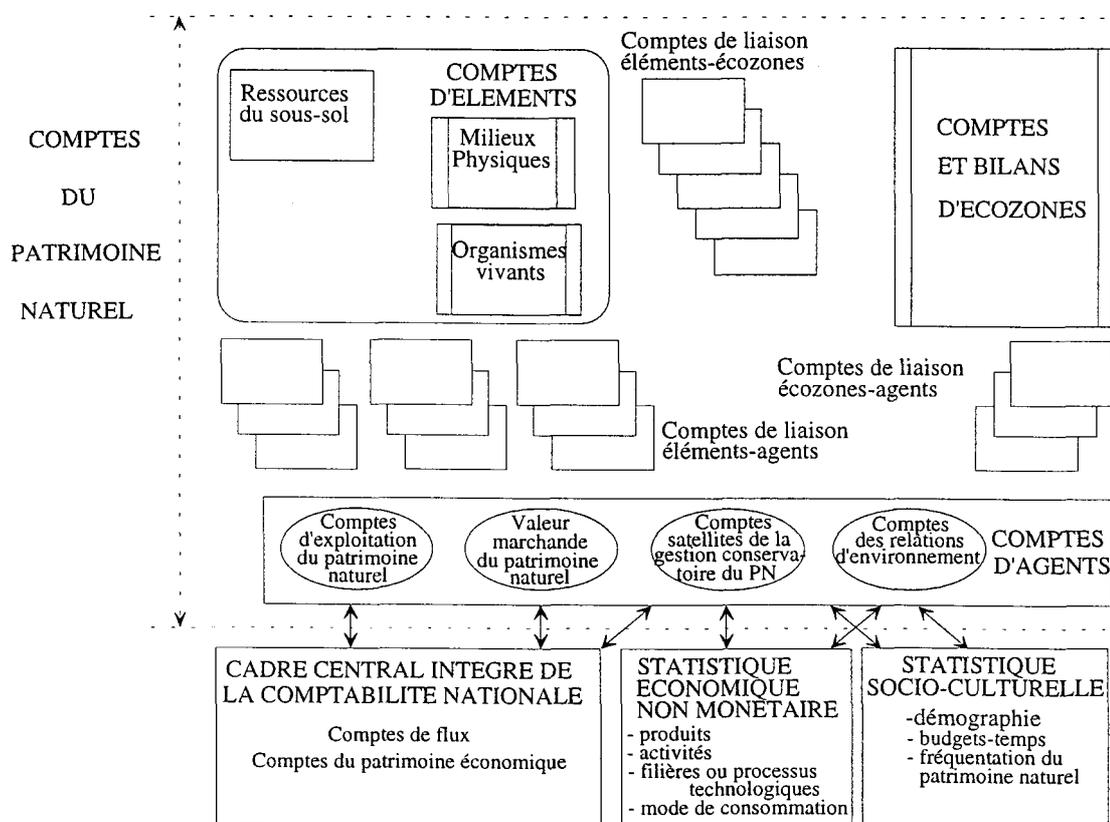
- Les **comptes d'éléments** établis pour les ressources du sous-sol, les eaux continentales, le sol, l'atmosphère (y compris l'énergie solaire), les eaux marines, la flore et la faune. Il s'agit de bilans matière/énergie élargis couvrant à la fois le système naturel et le système d'utilisation par l'homme. Ils présentent le passage entre un stock initial et un stock final à l'aide d'une nomenclature des flux naturels et des opérations liées aux activités humaines.

- Les **comptes d'écozones (écosystèmes)**, qui enregistrent les modifications de l'occupation de l'espace et les changements internes de l'état de santé des écosystèmes. L'établissement de ces comptes repose sur la photo-interprétation d'image-satellite qui fournit à la fois la description de l'occupation de l'espace et la base de sondage nécessaire à l'élaboration d'indicateurs de qualité généralisable.

- Les **comptes des agents**, qui sont l'homme et ses institutions, classés dans les catégories de la comptabilité nationale. Les opérations des agents sont décrites soit en termes physiques, soit en monnaie. Dans le premier cas, on distingue les opérations *in situ* de celles qui sont consécutives à un prélèvement. Les opérations en monnaie sont soit des opérations économiques sur les produits primaires et leur transformation, soit des opérations qui relèvent des comptes satellites de la comptabilité nationale, qui sont dans des domaines particuliers de préoccupation collective (ici, la gestion conservatoire des ressources naturelles et de l'environnement). Lorsque cela est possible, les stocks sont également évalués en monnaie.

Des liaisons sont également prévues entre les comptes du patrimoine naturel et la statistique socioculturelle (santé, fréquentation du patrimoine naturel...).

Le schéma suivant résume l'articulation du système de comptes de patrimoine naturel :



Source : Weber Jean-Luc : Les comptes du patrimoine naturel. Op. Cit.

1.4. Conclusion

Les externalités, définies comme liaisons hors marché entre agents économiques avec des répercussions sur leur niveau de satisfaction, relèvent de l'approche néoclassique et sont notamment utilisées en tant qu'outils conceptuel dans le cadre de l'économie du Bien-Être.

Les ambitions de ce courant reposent sur la capacité d'un marché de concurrence pure et parfaite à réaliser un équilibre général au sein duquel la répartition des ressources peut être considérée comme optimale : compte tenu des contraintes de rareté, le niveau global de satisfaction de l'ensemble des acteurs en présence est maximisé et l'on ne peut plus améliorer la situation de l'un sans affecter celle d'un autre.

Cependant le modèle théorique qui conduit à ce résultat comporte des hypothèses fortes qui ne sont pas toujours respectées dans la réalité. L'Etat prend alors un relief particulier et vient en renfort des marchés défaillants, aidé en cela par la théorie qui lui fournit objectifs et méthodes. C'est notamment dans ce cadre que A.C. Pigou élabore sa réflexion sur les externalités et prône l'intervention de l'Etat pour calculer et mettre en oeuvre taxes et subventions optimales au regard du Bien-Être général.

Nous allons évoquer maintenant les difficultés qu'un tel modèle rencontre pour rendre compte des liens entre activités économiques et environnement ainsi que des problèmes qui sont posés lorsque leur confrontation se joue à un niveau global.

2. L'élargissement du cadre de réflexion pour mieux prendre en compte les rapports entre économie et écologie

L'économie traditionnelle, nous venons de le voir, s'est dotée d'outils conceptuels pour aborder la question des rapports entre activité économique et environnement. Cependant, les critères qu'elle se donne, ne correspondent pas forcément à ceux que développent les écologistes. "Les définitions économiques et scientifiques de la pollution ont tendance à diverger. Pour l'économiste, la pollution est un coût externe et elle n'apparaît que lorsque un ou plusieurs individus subissent une perte de bien-être"³². A partir de là, autant il faut reconnaître que les économistes se préoccupent aussi d'environnement, autant il est difficile d'affirmer que la logique de l'économie, telle que nous l'avons présentée, est compatible avec celle de l'écologie.

L'opposition fondamentale qui existe entre ces deux logiques réside dans la valeur attribuée au monde qui nous entoure. Pour la première ce sont les hommes et les rapports qu'ils ont entre eux qui valorisent le monde. Pour la seconde, le monde a sa valeur en soi,

³² "Scientists tend to define pollution differently to economists. For the economist, pollution is an *external cost* and occurs only when one or more individuals suffer a *loss of welfare*". Cf. p. 67. de PEARCE David W., TURNER R. Kerry, *Economics of natural resources and the environment*. Londres : Harvester Wheatsheaf Ed., 1990. 377 p.

inaliénable aux passions humaines³³. Ces deux positions sont irréductibles l'une à l'autre et toute réflexion dans ce domaine nécessite de faire un choix : nous nous placerons ici dans une perspective humaniste.

Ceci étant posé, il n'empêche que le modèle économique proposé peut aboutir à des résultats catastrophiques s'il est appliqué tel quel. Compte tenu des réserves de puissance démographique, technologique et industrielle accumulées par l'homme depuis le 19^{ème} siècle, sensibles même au niveau planétaire, ce modèle demande à être ouvert pour prendre en compte certaines des dynamiques sociales et écologiques qui entrent en contradiction avec les processus d'ajustement qu'il propose.

Au cours de cette partie, nous présenterons tout d'abord la manière dont les logiques des modèles économiques et écologiques peuvent s'opposer à partir d'une formalisation proposée par David Pearce. Nous évoquerons ensuite certaines des tentatives élaborées pour dépasser cette opposition, situant beaucoup plus directement la réflexion au niveau des interactions entre les dynamiques économiques, sociales et écologiques. Cette présentation ne prétend pas à l'exhaustivité mais recherche une certaine cohérence en s'articulant autour de trois thèmes, complémentaires à nos yeux, concernant d'une part l'analyse et la connaissance de ces interactions et, au niveau pratique de l'action, les objectifs politiques affichés aujourd'hui à travers la notion de développement durable ainsi que les moyens proposés pour y parvenir.

2.1. Écologie et économie : des *optima* différents ?

Pour montrer comment les dynamiques écologiques et la logique du modèle économique traditionnel peuvent s'opposer, nous avons emprunté une formalisation de David Pearce, reprise notamment par Barde et Gerelli dans leur ouvrage sur l'économie et la politique de l'environnement³⁴. Cette opposition repose fondamentalement sur une prise en compte indirecte et décalée de l'écologique par l'économique. Elle conduit à des risques de catastrophe d'autant plus grave que les décisions et les actions humaines peuvent affecter des niveaux élevés à l'échelon planétaire.

³³ On trouvera dans Luc FERRY, pp. 131-180, une présentation critique - et trop généralisante, Luc FERRY fabrique du démon pour mieux se faire démonologue - de cette logique dite de la "*deep ecology*". Relevons simplement pour l'instant ces deux phrases sans équivoque qu'il tire de Arne NAESSE (cf. p. 144) : "Le bien-être et l'épanouissement de la vie humaine et non humaine sur la terre sont des valeurs en soi (synonymes : valeurs intrinsèques, valeurs inhérentes). Ces valeurs sont indépendantes de l'utilité du monde non humain pour les fins de l'homme".

FERRY Luc, *Le nouvel ordre écologique. L'arbre, l'animal et l'homme*. Paris : Grasset, 1992. 274 p.

³⁴ PEARCE David, *Environmental Economics*. Londres et New York : Longman, 1976. Repris par BARDE Jean-Philippe, GERELLI Emilio, *Economie et politique de l'environnement*. Paris : PUF, 1977. 210 p. Pour des références plus récentes, voir PEARCE David W., TURNER R. Kerry, *Economics of natural resources and the environment*, 1990, ainsi que BARDE Jean-Philippe, *Economie et politique de l'environnement*, 1992, *Op. Cit.*

2.1.1. La logique du modèle économique traditionnel en contradiction avec les dynamiques écologiques

Une manière d'aborder la question des divergences entre économie et écologie, tout à fait économique dans son esprit, consiste à observer que la situation optimale de la première ne se définit pas de la même façon pour la seconde :

- D'un côté la logique du modèle économique qui a été présenté pousse à rechercher un niveau d'activité tel que si on l'augmentait, les nouvelles richesses dégagées seraient aussitôt "perdues" du fait des nuisances supplémentaires engendrées ou, autrement dit, de la baisse du niveau de satisfaction de certains agents économiques. Un certain niveau de coût externe est maintenu, car il permet malgré tout de dégager des richesses pour la communauté humaine.
- De l'autre côté, la situation idéale est celle d'une absence totale de pollution. Cependant, on peut en accepter un certain niveau tant qu'il reste en deçà des limites d'assimilation du "milieu".

Ces deux positions mettent en balance bien-être humain maximal *versus* capacités d'assimilation du milieu. Le problème souligné par David Pearce réside dans le fait que la nuisance, et donc le coût externe, n'apparaît qu'à partir du moment où la capacité d'assimilation du milieu est dépassée. Pour reprendre l'exemple de Barde et Gerelli³⁵, tant qu'un cours d'eau est capable de recycler les déchets qui y sont déversés, l'eau reste pure et la faune et la flore aquatique ne sont pas affectées. Par contre, rejetés en quantité trop importante, ces déchets vont rompre l'équilibre écologique et c'est à partir de ce moment là qu'apparaissent les premiers coûts externes : l'eau devient impropre à la consommation, les rendements piscicoles diminuent, les activités de loisirs sont abandonnées.

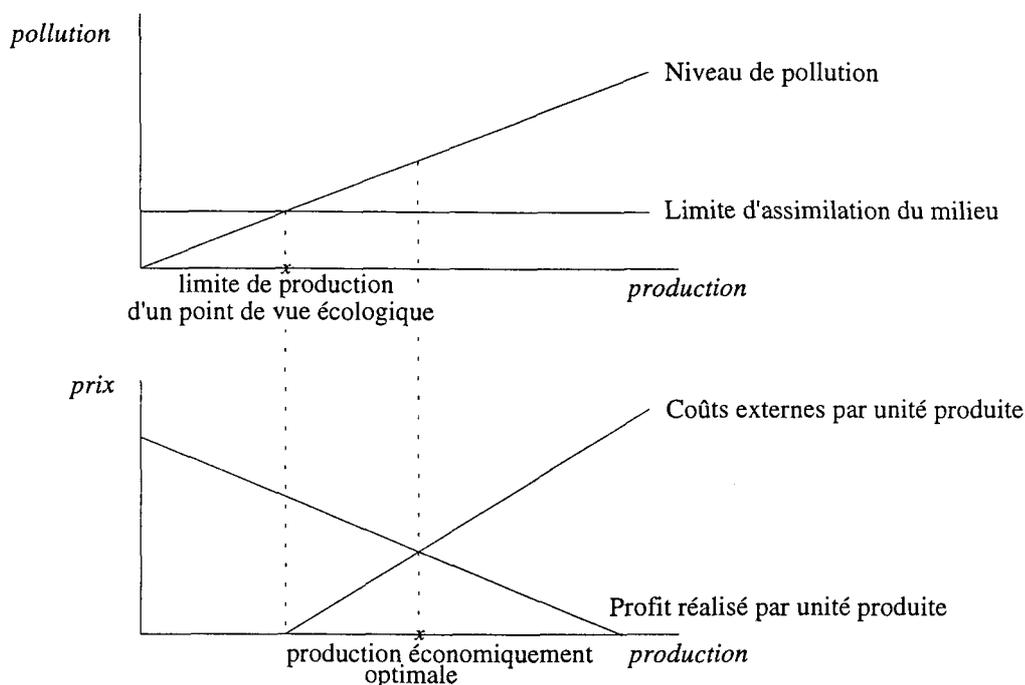
L'apparition d'un coût externe lié à une dégradation du milieu par une entreprise quelconque dépend en fait de trois paramètres principaux qui sont le niveau de production, la technologie utilisée pour produire et la limite d'assimilation par le milieu du type de déchets rejetés. Or si les deux premiers paramètres dépendent directement des besoins et des contraintes révélés par le marché, le troisième ne l'est qu'indirectement à travers le processus d'apparition de la nuisance et du coût externe. Dans le modèle économique traditionnel, rien n'empêche la logique du marché à pousser à polluer au dessus des capacités du milieu et l'action correctrice préconisée pour aboutir à un niveau de coût externe optimal se situera au delà de cette limite : de ce point de vue, la limite de capacité d'assimilation du milieu "représente un *plafond* en écologie, mais un *seuil* en économie"³⁶. Si le niveau de demande et les techniques de production sont tels que l'environnement en soit affecté, il n'y a aucune raison pour que la logique économique aboutisse à un équilibre écologique.

³⁵ Cf. pp. 120-121 BARDE Jean-Philippe, GERELLI Emilio, *Economie et politique de l'environnement. Op. Cit.*

³⁶ Cf. p. 237 de BARDE Jean-Philippe, *Economie et politique de l'environnement. Op. Cit.*
Une autre façon plus générale de présenter ce raisonnement : "Que si notre rationnel épousait le réel, et le réel notre rationnel, nos entreprises ne laisseraient pas de résidus ; or si l'ordure foisonne dans l'écart qui les sépare, c'est que celui-ci produit la pollution : elle comble la distance du rationnel au réel." pp 46-47 de SERRES Michel, *Le contrat naturel. Op. Cit.*

Cette analyse peut se représenter graphiquement de la façon exposée ci-dessous³⁷.

Graphique 2 : optimum économique et déséquilibre écologique



Une première remarque de forme peut être faite, selon laquelle le cas représenté ici correspond à celui d'une pollution générée par une activité de production ; la même représentation pourrait être maintenue pour une activité de consommation.

Quatre autres constatations qui s'enchaînent peuvent alors être tirées.

1. Il faut d'abord souligner que le niveau retenu pour la capacité d'assimilation du milieu ne joue sur les conclusions qu'en cas de capacité infinie : à part ce cas limite, le conflit existe, actualisé ou à l'état potentiel.

2. Lorsqu'une pollution dépassant les capacités d'assimilation du milieu apparaît, on peut invoquer le fait que le système de pensée économique est, en soi, neutre vis à vis de cette question : la situation économiquement optimale se définit par une agrégation des préférences de chacun ; si chaque individu se sent concerné par les questions d'environnement en général et/ou est très sensible à son cadre de vie en particulier, le niveau économiquement optimal est très bas et une politique économiquement bien menée permet alors de faire converger l'intérêt général vers l'intérêt écologique.

Un tel argumentaire revient en fait à renvoyer la question des rapports entre une société humaine et son environnement à un niveau culturel, déterminant du système de valeurs de cette société et, par voie de conséquence, des options économiques choisies ou à choisir. C'est aussi reconnaître implicitement l'indifférence de la logique économique pour le respect des logiques d'équilibres et de reproductions écologiques. L'économie se

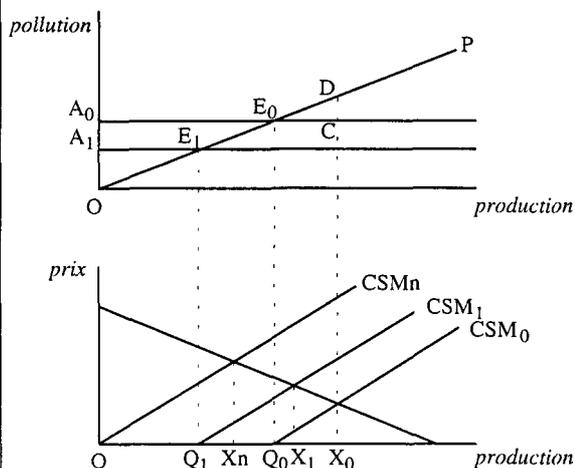
³⁷ Cette figure est reprise p. 121 de BARDE Jean-Philippe, GERELLI Emilio, *Economie et politique de l'environnement*, Op. Cit.

préoccupe des rapports des hommes entre eux. Si la médiation de l'environnement dans ces rapports prend de l'importance, les questions écologiques seront alors prises en considération dans une "juste mesure", sinon, elles n'auront aucun droit au chapitre.

3. Ainsi, le niveau d'activité économiquement optimal peut très bien être, *a priori*, en rupture avec une logique de respect de l'environnement alors qu'il correspond à la situation idéale du point de vue de l'économie du Bien-Être. En reprenant le modèle néoclassique et en supposant que ni négociation, ni intervention de l'Etat, n'aient motivé les agents économiques concernés à rechercher l'équilibre à ce niveau, une partie de leurs coûts n'aurait pas été prise en compte par les émetteurs de nuisances : leur niveau d'activité aurait été plus élevé et, avec lui, le niveau des nuisances. Le niveau d'activité économiquement optimal est donc la situation la moins pire, d'un point de vue écologique, que l'on puisse attendre d'une logique économique.

4. Enfin, l'écart enregistré entre le niveau de production respectant les limites d'assimilation de l'environnement et celui permettant de réaliser l'optimum économique correspond à une mesure instantanée à un instant t . Comme l'évoquent les courbes de D. Pearce rappelées en encart, à technologie et système de valeurs constant, cet écart évolue au fil du temps en fonction de la pollution résiduelle que le milieu n'a pu absorber au cours de la période précédente. Ceci peut alors conduire à une accumulation désastreuse : "au fur et à mesure que le temps passe et que la société "optimise" à court terme sa production, l'instabilité écologique s'accroît, l'échéance écologique fatale se rapproche"³⁸.

Encadré 4 : La dynamique du déséquilibre écologique lorsque les agents économiques sont incapables d'anticipation.



Extrait de Barde et Gerelli, *Op. Cit.*, pp 129-130.

Sur la partie supérieure du graphique, E_0 représente le point à partir duquel la capacité d'assimilation du milieu se trouve dépassée. C'est à partir de ce niveau que la pollution entraîne un coût social pour la collectivité. Le coût social commence donc de croître à partir du niveau d'activité Q_0 (droite CSM_0 sur la parité inférieure du graphique). L'optimum économique se situe alors au niveau de production OX_0 correspondant à l'égalité du coût social marginal et du profit marginal. On voit que cet optimum correspond à un niveau de production supérieur à celui correspondant au maximum de pollution supportable par le milieu ($OX_0 > OQ_0$) (...).

Si, au cours de la période initiale, le niveau de production OX_0 a été atteint, on aura déversé dans l'environnement une quantité de polluant égale à BD dont seule une portion égale à BC , aura été assimilée ; le reliquat non assimilé (CD) constitue alors un stock accumulé dans le milieu de sorte que la seconde période de production débute avec un stock initial $A_1A_0 = CD$. Au cours de cette seconde période, la capacité limite du milieu se trouve réduite et passe de OA_0 à OA_1 . L'équilibre écologique se situe alors en E_1 . Sur le plan économique, le coût social apparaîtra plus tôt (dès le niveau OQ_1) avec un optimum en OX_1 .

³⁸ Cf. p. 130 de BARDE Jean-Philippe, GERELLI Emilio, *Economie et politique de l'environnement. Op. Cit.*

Donc, quoiqu'on en dise, à moins d'une capacité d'assimilation infinie du milieu, il existe toujours un conflit possible entre économie et écologie du fait de l'indifférence de la première par rapport à la seconde.

Lorsqu'il apparaît, ce conflit est plus ou moins fort suivant d'une part le niveau de demande et la technologie de production, d'autre part la capacité d'assimilation du type de déchets rejetés par le milieu, et enfin la sensibilité collective vis-à-vis de la pollution générée et l'efficacité des politiques publiques pour permettre de trouver l'optimum économique qui en découle.

2.1.2. La nécessité d'un pouvoir d'anticipation pour les agents économiques

Dans ce contexte deux points fondamentaux apparaissent qui confèrent à la confrontation des deux logiques un caractère extrêmement instable : d'une part l'immense pouvoir accumulé aujourd'hui par l'homme vis-à-vis de la nature et d'autre part l'hypothèse du modèle économique traditionnel selon laquelle la société, agents individuels et Etat correcteur des défaillances du marché, ne réagissent qu'*a posteriori* aux conséquences des actions économiques avec, dans notre cas, comme seul indicateur les surcoûts provoqués par la détérioration de l'environnement.

Depuis une cinquantaine d'années maintenant la conscience du passage d'une action locale à un pouvoir global a émergé progressivement : la puissance militaire d'abord avec l'avènement du nucléaire puis ensuite, dans les années 60 et 70, le poids démographique de l'humanité et les répercussions écologiques des choix industriels et technologiques qui peuvent être faits ; aujourd'hui le relais est pris par les débats sur l'effet de serre ou la diminution de la couche d'ozone. Ainsi, "la puissance globale de nos nouveaux outils nous donne aujourd'hui la Terre comme partenaire, que nous informons sans cesse par nos mouvements et nos énergies, et qui nous informe, par énergies et mouvements, de son changement global en retour"³⁹.

Cette puissance de l'homme sur la nature doit, aujourd'hui qu'elle s'établit à l'échelle du globe, être prise en compte dans nos modèles de pensée pour être contrôlée. Or le modèle économique traditionnel tel que nous venons de le présenter, reste trop fermé sur les rapports des hommes entre eux et ne permet pas cette prise en considération. En effet, tel quel, il débouche sur une logique de l'auto-destruction puisque les agents concernés, même rationnels, se laissent guider par les seules informations de prix relevant du simple jeu d'un marché avec externalités, ou liés aux stimulations d'un Etat correcteur bien intentionné mais aussi aveugle qu'eux en ce qui concerne les interactions existant en dehors de la sphère marchande. Il n'existe pas de conscience à long terme des conséquences environnementales des actions humaines. Compte tenu du cadre évoqué ici d'un équilibre économique qui n'a aucune raison de respecter l'équilibre écologique ainsi que du niveau planétaire des actions humaines, l'apparition d'une catastrophe apparaît à terme comme inévitable.

Pour dépasser cette approche il faut conférer aux agents économiques le pouvoir d'anticiper les conséquences de leurs actes. Il serait surprenant que ces agents agissent comme dans le modèle ci-dessus si ils prennent conscience des risques écologiques qu'ils

³⁹ Cf. p. 170 de SERRES Michel, *Le contrat naturel*. Op. Cit.

encourent et que, d'une manière ou d'une autre, cette connaissance puisse être traduite en action (par exemple intervention correctrice de l'Etat prenant en compte le nouveau système de préférences induit, mais aussi préférence des consommateurs pour tel ou tel bien ou service qui, toutes choses égales par ailleurs, affecterait moins l'environnement que d'autres, etc.). Pour reprendre un mot d'Edgar Morin, "l'accroissement du danger favorise une prise de conscience qui permet de provoquer les actions nécessaires"⁴⁰. On retrouve ici toute la volonté inscrite derrière de nombreuses réflexions actuelles : ce peut être l'idée d'un "contrat naturel", du titre du livre de Michel Serre que nous avons déjà évoqué, mais ce sont aussi tous les travaux autour de la notion de développement durable, qui sont développées aujourd'hui en économie et que nous reprendrons un peu plus loin.

Mais il faut souligner que l'idée d'anticipation recouvre au moins trois notions différentes. Elle signifie tout à la fois (i) connaissance et prise de conscience de la possibilité plus ou moins forte d'un évènement à venir, (ii) existence d'un objectif à réaliser et (iii) pouvoir de contrôle et de réaction - diagnostic et administration préventive d'un remède dans un but précis.

1. Le thème de la connaissance de ce qui va arriver touche autant à une meilleure compréhension des processus écologiques et de la manière dont les activités humaines viennent les perturber qu'à la prospective socio-économique permettant de mettre en évidence les grandes tendances d'évolution de nos sociétés. C'est le croisement de ces deux aspects qui fonde la mesure d'un risque écologique. Par exemple s'il y a débat sur l'effet de serre, ce n'est pas seulement qu'il existe un risque pour que les émissions humaines de gaz à effet de serre renforcent le pouvoir de réfraction des rayons infra-rouges par l'atmosphère, c'est aussi parce que, compte tenu du développement démographique, économique et technologique des différentes parties du globe, les modèles prospectifs montrent que ces émissions devraient continuer à croître⁴¹ : non seulement un risque ne peut être écarté compte tenu de nos connaissances et ignorances actuelles, mais ce risque s'avère croissant du fait des grandes évolutions socio-économiques prévues.

2. La prise de conscience qui peut découler d'une telle connaissance ne présente d'intérêt à un niveau collectif que s'il existe un objectif permettant d'orienter la réaction de la société humaine. Dans le modèle économique classique, un impératif de survie individuelle est déjà sous-jacent aux hypothèses de comportement de l'*homo oeconomicus* classique. Cependant l'idée d'une maximisation pour soi de sa propre utilité présente et future peut conduire à définir une attitude de type "après moi, le déluge". Ceci ne permet guère de dépasser les risques évoqués précédemment. Pour garder un peu d'espoir nous doterons nos agents d'une volonté de reproduction individuelle (l'avenir de leurs enfants les concerne) qui se traduise au niveau collectif par une recherche de reproduction sociale. L'optimum collectif calculé par un Etat correcteur des défaillances du marché ne prend plus simplement en compte l'intérêt des agents économiques présents, il intègre également celui

⁴⁰ Cf. p. 15 des propos de Edgar Morin, recueillis par Jean-Marie Colombani, pp. 13-15 in "Les grands entretiens du Monde", tome 2, n° spécial de *Dossiers et Documents du Monde*, mai 1994. Edgar Morin se réfère directement aux idées de Höderlin pour lequel "là où croît le péril, croît aussi ce qui sauve". *Ibidem*.

⁴¹ Voir par exemple p. 57 de l'article de BURNIAUX Jean-Marc, OLIVERA-MARTINS Joaquim, "Effet de serre et relations Nord-Sud", *Economie et Statistique* n°258-259, octobre-novembre 1992, pp. 55-68 où sont présentées les prévisions pour le siècle à venir en matière d'émissions de carbone d'origines humaines par les modèles GREEN de l'OCDE, ERM (Modèle Edmonds et Reilly), CRTM (Carbon Rights Trade Model) et MR (Modèle de Manne et Richels). Pour une base 100 en 1990, les augmentations prévues pour 2050 varient entre 200 et 400.

des agents économiques à venir. Or il existe aujourd'hui un consensus minimal autour de l'idée de "développement durable", même si suivant les approches théoriques et les intérêts défendus, les notions qu'elle recouvre peuvent être très différentes. Nous reprendrons donc ici ce thème du "développement durable".

3. Une fois l'objectif à peu près fixé⁴², il reste ensuite à s'interroger sur les moyens et les sentiers qui permettent de l'atteindre, sachant que suivant les choix retenus les efforts ne sont pas supportés par les mêmes "agents" (pays, secteurs industriels, firmes, personnes...) et que les outils utilisés peuvent avoir des résultats tout à fait différents selon le contexte dans lequel ils sont appliqués. On navigue donc entre un principe d'équité et la loi du plus fort d'une part et entre une certaine finesse politique et une approche mécaniste parfois stéréotypée d'autre part.

Au cours des trois parties suivantes, chacun de ces points va être développé : connaissance de l'impact des activités humaines sur les processus écologiques et impacts en retour sur les activités humaines, développement durable comme fonction objectif pour la collectivité et moyens à mettre en oeuvre pour atteindre cet objectif.

Avant de développer cette présentation, il faut souligner ce que leur distinction a d'artificiel dans le sens où aucun d'entre eux n'est indépendant des deux autres. Par exemple, un approfondissement des réflexions et des connaissances sur les dynamiques à l'oeuvre dans les relations entre les hommes entre eux, entre les hommes et leur environnement ainsi que dans certains processus naturels, a conduit de l'idée de croissance zéro à celle de développement durable ; de même les limites du pouvoir d'action et de contrôle des différents acteurs à des niveaux qui s'enchevêtrent, blocs, pays, firmes, etc., n'étant jamais précises, il n'existe pas de règles claires permettant de définir une "réelle" notion d'intérêt général et l'on pourra toujours soupçonner une instance établissant fins et/ou moyens d'être à la fois juge et parti ; les intérêts de certains acteurs économiques ont pu diriger des efforts de connaissances sur certains points ou, au contraire, éluder certains autres ; etc. Les reprendre séparément comme nous allons le faire maintenant ou privilégier l'un d'entre eux comme cela sera fait dans la suite du travail ne doit cependant jamais faire perdre de vue leurs interrelations.

2.2. Interactions entre activités humaines et processus écologiques

Le premier effort porte donc sur une meilleure connaissance des liens qui existent entre les activités économiques et leur environnement naturel. Il signifie d'une part un travail approfondi sur la mise en évidence des limites d'assimilation du milieu et d'autre part une réflexion socio-économique permettant de mieux définir, au sein de la dynamique des activités humaines, les sources de tensions présentes et à venir entre économique et environnement.

⁴² L'imprécision du "à peu près fixé" renvoie au fait que certains auteurs ont pu recenser jusqu'à 60 définitions différentes de la croissance ou du développement durable. PEZZEY John, "Economic Analysis of Sustainable Growth and Sustainable Development", *World Bank, Environment Department Working Paper n°15*, Washington, mars 1989. Cité par BARDE Jean-Philippe, *Economie et politique de l'environnement. Op. Cit.* p. 37.

2.2.1. Activités humaines et limites d'assimilation du milieu

Nous nous référerons ici à René Passet qui, dans son ouvrage "*l'économique et le vivant*", distingue quatre effets qui rendent compte du résultat des actions des activités humaines sur les processus écologiques⁴³.

Effet de synergie, "lorsque plusieurs effluents émis chacun dans des quantités compatibles avec les normes de sécurité, se combinent de façon à donner un produit hautement nocif". Ainsi en est-il, dans certaines grandes villes, des poussières émises par l'automobile et les produits de combustion (chauffage au charbon et activités industrielles) : elles vont servir de noyau de fixation pour l'humidité et divers gaz émis par les activités humaines et vont être alors génératrices de brouillards toxiques. Pour exemples, cela explique la formation du smog londonien, qui a disparu avec la fin du chauffage au charbon, et des brouillards photo-chimiques de Los Angeles, Athènes ou Mexico, qui persistent du fait des émissions automobiles⁴⁴.

Effets de seuil, "lorsque le franchissement d'un point critique compromet brutalement l'exercice d'une fonction naturelle, met en cause la survie d'un écosystème ou dépasse les limites de tolérance de l'organisme". Ce phénomène est utilisé dans le modèle de Pearce, présenté dans les pages précédentes, lorsqu'il est dit que le déséquilibre écologique ne se produit qu'à partir du moment où les limites d'assimilation du milieu sont dépassées. Une illustration classique est la brusque accélération du processus d'eutrophisation d'un lac du fait d'activités humaines : lorsque les rejets en matières organiques (déchets urbains notamment) et d'engrais azotés ou phosphorés deviennent trop importants, les algues prolifèrent ; en mourant et en se décomposant, elles provoquent une baisse du taux d'oxygène de l'eau au fond du lac qui peut aller jusqu'à son asphyxie complète. Ce phénomène peut être très étendu puisqu'il touche aujourd'hui des mers quasi-fermées comme la Méditerranée et les Baltiques⁴⁵.

Effet d'amplification, "lorsqu'un produit émis dans des proportions apparemment tolérables au sein d'un écosystème se retrouve à des taux de concentration dangereusement toxiques en fin de chaîne alimentaire". Les cas d'empoisonnement au mercure par des pêcheurs japonais, dans les années 50, en fournit une triste illustration. Les rejets d'une usine chimique dans la baie de Minamata se transformaient en un dérivé toxique du mercure, le méthylmercure, que les métabolismes vivants n'assimilent pas et conservent dans leurs tissus. Alors que sa présence est restée relativement faible dans l'eau de mer, ce produit, de phyto en zoo plancton, puis de poissons microphages à carnassiers, s'est retrouvé de plus en plus concentré le long de la chaîne alimentaire. On a pu ainsi retrouver des poissons dont la teneur en méthylmercure était 500 000 fois plus élevée que l'eau. dans laquelle ils vivaient⁴⁶

⁴³ PASSET René, *L'économique et le vivant*. Op. Cit. La description entre guillemets de chacun de ces 4 effets est tirée de cet ouvrage, p. 53.

⁴⁴ Exemple emprunté p. 175 de ALLEGRE Claude, *Ecologie des villes, écologie des champs*. Paris : Fayard, 1993. 233 p.

⁴⁵ Exemple tiré pp. 352-365 de RAMADE François, *Eléments d'écologie appliquée. Action de l'homme sur la biosphère*. Paris : MacGraw-Hill Inc., Coll. Ediscience, 1978. 576 p.

⁴⁶ Exemple tiré pp. 378-386 de RAMADE François, *Eléments d'écologie appliquée*. Op. Cit.

Effet d'irréversibilité, "lorsque le temps de dissipation d'un produit répandu dans le milieu se révèle supérieur aux temps courants de la gestion économique, ou lorsqu'un équilibre détruit ne peut se reconstituer parce que les conditions initiales de sa formation ont disparu". La notion d'irréversibilité se rattache normalement à tout phénomène dès lors que l'on sort d'un cadre mécaniste ou tout peut être isolé, produit et reproduit à l'identique. En écologie comme ailleurs, même la mise en évidence des cycles de reproduction n'empêche pas à chaque processus d'être irréversible - sinon les théories de l'évolution ne présenteraient guère d'intérêt. "L'effet d'irréversibilité" n'a donc de pertinence ici que si l'on souligne bien le fait qu'il y ait eu perturbation du fait d'une intervention humaine, que sa ou ses conséquences sont nettement perceptibles pour l'homme et que, par contre, son éventuelle résorption se joue sur une échelle temporelle qui lui échappe. La déforestation de la Grèce Antique, de la France au Moyen-Age ou de l'Ecosse au XVIII^e siècle fournissent un exemple de ces effets d'irréversibilité, de même que les craintes manifestées par le Club de Rome sur la raréfaction des ressources naturelles, reconduites aujourd'hui pour la forêt amazonienne et la disparition des espèces.

Il existe sans doute d'autres processus écologiques plus ou moins difficiles à identifier et à prendre en compte lors de la mise en oeuvre d'activités économiques. Ces quatre principaux exemples ont été pris pour témoigner du besoin de connaissance et d'expertise pour déterminer d'une façon opérationnelle la (les) limite(s) d'assimilation du milieu, ce plafond écologique qui ne devrait pas simplement constituer un seuil en économie.

2.2.2. Mesure humaine des risques environnementaux

Cet effort de connaissance sur les processus et les limites d'assimilation du milieu doit être relayé en amont et en aval par une réflexion socio-économique qui permette de prendre une mesure humaine des enjeux environnementaux. Trois points fondamentaux nous semblent devoir être mis en exergue : prise en considération en amont, au sein de la dynamique des activités humaines, des principaux facteurs de déstabilisation du milieu ; mesure économique, en aval, du coût des dommages causés à l'environnement ; exercice prospectif, enfin, permettant de déceler parmi les facteurs déstabilisants ceux dont les effets risquent de s'amplifier et de prendre des proportions inquiétantes.

a) Les facteurs humains de déstabilisation du milieu

Il semble logique de chercher à repérer les agents économiques pollueurs pour leur imputer les coûts qu'ils font supporter à d'autres qu'eux-mêmes. C'est par exemple la base du principe pollueur-payeur adopté par l'OCDE en matière environnementale. Ce principe a déjà été évoqué (Cf. *Supra*, 1.2.2. b)) et discuté (1.2.2. c)) et repose sur une recherche du ou des individus responsables. De façon complémentaire, on peut également s'interroger sur les facteurs de la dynamique socio-économique qui poussent le plus à la détérioration de l'environnement.

Tableau 1 : Pourcentage annuel de l'accroissement de la production (et consommation) de différents produits aux Etats-Unis (1947-1970)⁴⁷

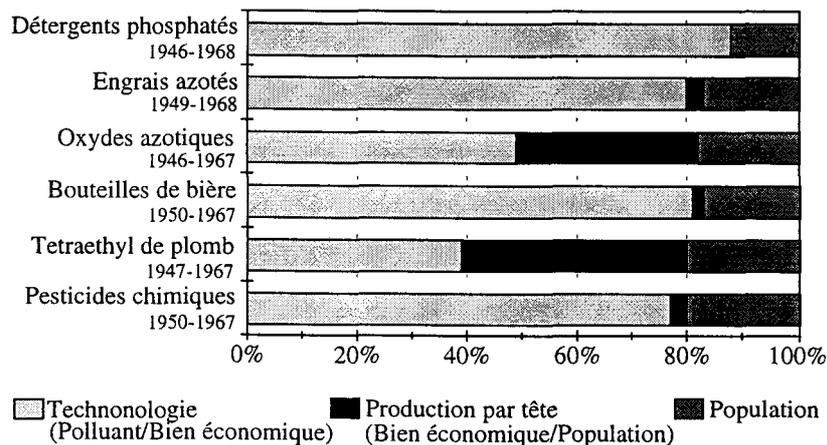
Articles	Accroissement annuel (%)
Mercuré pour produits chlorés*	15,9
Bouteilles de bières non consignées*	14,8
Engrais azotés*	10,2
Détergents	10,0
Produits chlorés	8,1
Aluminium	7,9
Fibres synthétiques	7,1
Pesticides chimiques	6,6
Transports routiers (Plomb et NOx)	4,8
Carburant automobile	4,3
Acier	2,1
Cuivre	2,0
Brique	1,8
Population	1,6
Transport ferroviaire	0,6
Bois de construction	-0,1
Fibres de coton	-0,3
Bouteilles de bière consignables*	-1,8
Fibres de laine*	-2,2
Puissance énergétique du travail animal	-7,8

* Consommation - Autres chiffres : production

Les articles en italiques sont en relation directe avec les indices d'impact sur l'environnement présentés ci-dessous.

Source : Barry Commoner, 1975.

Graphique 3 : Participation des différents facteurs à l'évolution de quelques indices d'impact sur l'environnement⁴⁸



Source : Barry Commoner, 1975.

⁴⁷ Ces chiffres sont extraits d'un tableau présentés p. 226 de COMMONER Barry, "Les coûts de la croissance sur l'environnement" in DORFMAN & DORFMAN, *Economie de l'environnement*, Op. Cit. pp. 215-246. Texte écrit à l'occasion d'une conférence intitulée *Energie, croissance économique et environnement*, Washington D.C., avril 1971.

⁴⁸ *Idem* p.241.

On peut citer ici les travaux de l'écologiste Barry Commoner qui s'est battu pour montrer que dans les années 50-60 aux Etats-Unis, la forte hausse des pollutions était beaucoup plus liée aux évolutions technologiques contenues dans les produits et leur processus de fabrication qu'à d'autres facteurs souvent pointés du doigt, comme l'évolution démographique ou l'élévation du niveau de vie et de la consommation⁴⁹.

Ces résultats sont attachés à un mode de croissance particulier, celui des Etats Unis durant les "trente glorieuses". Ils ne doivent donc pas être repris et généralisés tels quels. L'intérêt qu'ils présentent à nos yeux est surtout de montrer que derrière un problème de croissance d'une pollution, plusieurs facteurs sont en jeu au sein de la dynamique des activités humaines et que, suivant le contexte, les solutions à préconiser ne sont pas les mêmes. Ainsi dans les années 60-70, les travaux de Barry Commoner ont-ils pu souligner que la question de la croissance était à poser sous un angle qualitatif (quelle croissance ?) avant d'être abordée de manière quantitative (à l'époque, "croissance zéro"). C'est une idée que l'on retrouve aujourd'hui de façon courante derrière la notion de "développement durable" (Cf. *Infra*) ; de même c'est ce qui autorise certains à se féliciter de l'expansion des services dans nos économies⁵⁰.

b) Les effets en retour des dégradations : évaluations physiques et mesures économiques

La mise en évidence des agents ou des facteurs responsables de la dégradation de l'environnement et des nuisances en retour sur les activités humaines n'est pas suffisante en elle-même. Elle ne prend vraiment sens que dans le cadre d'un exercice d'évaluation des dommages subis et des risques encourus.

Cette évaluation peut se faire en termes physiques. Dans ce cadre, une démarche du type des comptes du patrimoine naturel établis par l'INSEE permet de suivre de manière systématique l'évolution de l'environnement au fil des ans (Cf. partie précédente).

En plus de ces bilans en termes physiques, il est bien sûr nécessaire d'établir des évaluations économiques et monétaires. Soulignons que si l'esprit de ces évaluations est simplement de retrouver le prix "réel" de biens ou services en l'absence de marchés les concernant, elles évacuent toute question éthique et philosophique sur les valeurs humaines et, dans un tel cas, n'empêchent en rien la logique économique d'ignorer les questions écologiques, tel que cela a été présenté à partir des graphiques de D. Pearce.

⁴⁹ Voir notamment COMMONER Barry, *L'encerclement, Problèmes de survie en milieu terrestre*. Paris : Editions du Seuil, Coll. Science ouverte, 1972. 301 p. Le chapitre IX pp. 141-177, intitulé "Le faux pas technologique", est plus particulièrement rattaché à ce thème.

⁵⁰ Cf. par exemple p. 407 de René PASSET, "Le copilote du développement économique et de la biosphère" *Revue Tiers Monde*, t. XXXIII, n° 130, Avril-Juin 1992. pp. 396-416. "Concernant l'environnement, le développement, dans le passé récent, d'activités lourdes, à base énergétique et matérielle, organisées sur le mode de la centralisation, a eu des effets catastrophiques pour la biosphère. On peut se demander aujourd'hui si la relève par l'immatériel comme moteur de la croissance n'est pas de nature à modifier cette situation. Il y a là en tout cas une piste à explorer."

Les évaluations doivent donc plus être établies en vue de guider la sphère économique que l'inverse. On peut, avec Pearce et Turner⁵¹, distinguer plusieurs fonctions à ces évaluations, plus ou moins pertinentes selon leur niveau d'application :

Tableau 2 : Fonctions et niveaux d'utilisation des évaluations économiques coûts-avantages

Fonction/ Niveau	Stimuler la prise de conscience	Influencer les décisions (rationalité éco.)	Identifier les décisions (fixer un choix)	Justifier les décisions
Politique globale	Oui	Possible	Improbable	Improbable
Réglementation	Oui	Probable	Possible	Possible
Projet	Non	Oui	Probable	Probable

Source : Pearce et Turner, OCDE, 1992

Dans le cadre de ce travail, c'est surtout la première fonction de prise de conscience qui va être privilégiée à travers une monétarisation de différents enjeux environnementaux liés aux déplacements routiers urbains. C'est sur cette assise économique que reposera la suite de l'analyse sur les différents facteurs (caractéristiques technologiques des véhicules, nombre moyen de déplacements par véhicule et par jour, distances moyennes parcourues - liées tant à l'éclatement des activités dans l'espace urbain qu'aux caractéristiques du réseau routier...) ainsi que leurs évolutions possibles, permettant ainsi de mieux discerner les problèmes les plus importants, actuels et à venir, et de révéler éventuellement les leviers les plus efficaces pour y remédier dans le cadre d'une politique de déplacements urbains cherchant à mieux prendre en compte les questions environnementales.

2.3. Le développement durable comme fonction objectif

Anticiper ne signifie pas seulement se doter d'une certaine compréhension des conséquences à venir de la confrontation des processus naturels et de la logique de développement qualitatif et/ou quantitatif de certains phénomènes socio-économiques. Il faut également avoir un but fixé *a priori* pour guider la manière de réagir. L'idée du développement durable, c'est à dire l'idée "d'un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre au leur"⁵², semble aujourd'hui correspondre à ce but.

En fait, on peut écrire avec Bertrand Zuindeau, que "le D.D. [développement durable] est plus affaire de *durée* que de *sens*. Que le développement dure, pour notre génération comme pour les suivantes, telle semble être la seule exigence formulée par l'approche du D.D. : une approche dès lors marquée fondamentalement par

⁵¹ Cf. p.20 de PEARCE David, TURNER Kerry, *Evaluation des avantages et prise de décision dans le domaine de l'environnement*. Paris : OCDE, 1992. 61 p.

⁵² Cf. p. 51 de The World Commission on Environment and Development, *Our Common Future*. Oxford, New-York : Oxford University Press, 1987. xv + 383 p.

l'incomplétude."⁵³ Pour reprendre cet auteur on peut quand même retrouver un ensemble minimum de thèmes qui relie les différentes approches du développement durable :

- une dimension temporelle de long à très long terme,
- l'idée d'une nécessaire équité entre les hommes, inter et intra générationnelle,
- une préoccupation environnementale qui sous-tend en permanence la réflexion.

A partir de ce plus petit commun dénominateur, les approches peuvent être déclinées le long d'un axe opposant une vision exclusivement centrée sur les rapports économiques à des préoccupations prenant en considération les questions écologiques de manière beaucoup plus directe.

A un extrême se situe la logique néoclassique qui va rechercher les conditions d'une allocation optimale intertemporelle de Bien-Être. La réponse se trouve essentiellement dans la règle dite "d'Hartwick" selon laquelle les profits tirés de l'exploitation de ressources non renouvelables doivent être réinvestis dans du capital reproductible, permettant ainsi de continuer à produire de la richesse malgré la disparition des premières : "une société qui investit dans du capital reproductible les rentes compétitives obtenues de l'extraction courante de ses ressources épuisables, bénéficiera d'un flux de consommation constant dans le temps (...) Ce résultat peut être interprété comme le maintien intact d'un stock de capital, défini de façon appropriée ; la consommation peut ainsi être interprétée comme l'intérêt de ce patrimoine"⁵⁴. La condition nécessaire pour mettre en oeuvre cette règle est la substituabilité parfaite entre ressources naturelles et capital manufacturé. Elle peut de plus être renforcée par le progrès technique qui permet d'obtenir une production équivalente en usant d'une moindre quantité de capital - naturel ou manufacturé.

Les tenants de "l'école de Londres" se démarquent de cette approche du développement soutenable basée sur la substituabilité des facteurs de production :

- D'une part le terme "capital" ne doit pas conduire à assimiler le naturel au manufacturé. Le second dépend du premier pour son élaboration. De plus, le capital naturel remplit des fonctions que le capital manufacturé ne peut pas assurer : qualité des paysages, écosystèmes... mais aussi par exemple, d'un point de vue économique immédiat, les énergies nucléaires et solaires ne sont pas encore suffisamment maîtrisées pour remplacer le bois et les énergies fossiles. Ensuite, les produits manufacturés peuvent voire leurs quantités augmenter ou diminuer ; à l'inverse, la disparition de certains biens environnementaux est irréversible.
- D'autre part il faut conserver la biodiversité car l'avenir est trop incertain pour que l'on se prive d'options dont on ne connaît pas l'utilité potentielle future. On retrouve l'idée de l'équité intergénérationnelle, mais au lieu de la mesurer en

⁵³ Cf. p. 15 de ZUINDEAU Bertrand, "A propos de la problématique du développement durable : quelques réflexions". Intervention dans le cadre du séminaire de recherche *Analyse et évaluation des politiques de transport*. Paris, INRETS, 22 juin 1994. 17 p.

⁵⁴ SOLOW Robert M., "On the Intergenerational Allocation of Natural Resources", *Scandinavian Journal of Economics*, n°88 (1). Cité par BARDE Jean-Philippe, *Economie et politique de l'environnement*. Op. Cit. p. 39.

simples termes de constance du capital total elle pose la nécessité minimale d'une constance des options socio-économiques potentielles au cours du temps.

Ainsi, le capital manufacturé ne peut pas être substitué au capital naturel de façon aussi évidente que le laisse penser la première logique évoquée. En effet la valeur du capital naturel ne repose pas simplement sur sa valeur d'usage réelle, elle doit tenir également compte d'une valeur d'usage potentiel, actuelle (valeur d'option) et future (valeur de leg). Et étant donné notre incapacité à fixer ces valeurs, une simple logique de précaution conduit à maintenir constante la quantité de capital naturel⁵⁵.

D'autres approches enfin reprochent aux économistes de rester en général trop prisonniers de la mesure monétaire des phénomènes économiques. Elles prônent la nécessité d'une analyse "éco-énergétique", susceptible de donner une mesure de l'efficacité énergétique des activités humaines et tout à fait adaptée pour rendre compte de la production des processus écologiques⁵⁶. Cette compatibilité de l'unité de mesure permet alors de mieux cerner les contraintes écologiques que les activités humaines doivent respecter. De manière parallèle d'autres ont également insisté sur les problèmes de justice sociale dans les question "d'écodéveloppement". La satisfaction des besoins fondamentaux des plus démunis est tout autant à prendre en compte que les contraintes spécifiques de chaque "écozone"⁵⁷. Par contre, le respect de ces contraintes éthiques et écologiques n'empêche pas de considérer que "l'efficacité économique garde toute son importance malgré le fait que son caractère doive rester instrumental"⁵⁸.

On peut classer ces différentes approches du développement durable, "néo-classique", "école de Londres", "éco-énergétique", le long d'un axe opposant sensibilités anthropo/éco centrées. Le passage des unes aux autres n'est sans doute pas à envisager au sein d'un simple continuum : il existe un saut logique important entre l'idée d'une substituabilité totale des ressources et celle d'une nécessaire distinction entre capital naturel et capital manufacturé ; il en va de même lorsque l'on introduit la nécessité d'une prise en compte d'indicateurs énergétiques, non monétaires, dont les informations sont considérées comme prioritaires à celles fournies par le marché.

⁵⁵ Cf. par exemple pp. 43-58 de PEARCE D.W., TURNER R.K., *Economics of natural resources and the environment*. Op. Cit. ainsi que BARDE Jean-Philippe, *Economie et politique de l'environnement*. Op. Cit. pp. 17-46 et pp. 71-75

⁵⁶ Cf. par exemple pp. 409-410 de PASSET René, "Le copilotage du développement économique et de la biosphère" Op. Cit. "La prise en compte et le respect des lois de reproduction du milieu font partie intégrante de la politique et de la science économique. Par delà le marché, celle-ci a pour objet la gestion d'un patrimoine énergétique en vue d'en assurer la reproduction dans le temps, la structuration, grâce au travail, de l'énergie par de l'information afin de satisfaire au moindre coût les besoins individuels et collectifs des hommes. L'économie doit se doter pour cela d'instruments adaptés (approche systémique, unités de mesures énergétiques, etc.) lui permettant de dépasser le cadre des simples calculs en valeur et prix à l'intérieur du marché."

Sur cette question on peut lire l'ouvrage de PASSET René, *L'économie et le vivant*, Op. Cit., ainsi que celui de PILLET Gonzague, *Economie écologique*. Genève : Georg Ed., 1993. 223 p. Les travaux de l'écologiste H.T. ODUM servent de référence à leur réflexion en matière d'analyse éco-énergétique : Cf. ODUM H.T., *Systems Ecology - An Introduction*. New-York : Wiley-Interscience, 1983. 354 p.

⁵⁷ Voir par exemple SACHS Ignacy, *Stratégies de l'écodéveloppement*. Paris : Economie et Humanisme, Édition Ouvrière, 1980. 140 p.

⁵⁸ Cf. p 102 de SACHS Ignacy, "Le Sud et la conférence de Rio de Janeiro", *Les Cahiers Français* n°250, Environnement et gestion de la planète, mars-avril 1991. pp. 102-105.

Il faut cependant souligner que ces approches sont animées d'une préoccupation commune, à savoir un développement de la société humaine qui se fasse de la manière la plus équitable possible et qui ne se menace pas lui-même en exploitant les ressources naturelles. En cela, elles restent toutes anthropocentrées et s'opposent aux mouvements écologiques radicaux. C'est surtout le niveau d'inquiétude par rapport aux risques écologiques et à notre capacité à l'évaluer qui varie, se traduisant dans les unités de mesure utilisées : simples prix fixés sur le marché par des agents économiques rationnels anticipant correctement les évolutions des substitutions entre ressources non renouvelables et capital manufacturé ; introduction de valeurs d'usage potentiel et nécessité de conserver le stock de capital naturel ; obligation d'une mesure autre qu'économique pour rendre compte des rapports entre activité économique et processus écologiques. De même l'efficacité du marché n'est pas remise en question.

Ce sont les finalités et les contraintes cadrant l'activité économique qui ne sont pas les mêmes selon les approches, allant de la fusion entre les moyens et les fins (marché = optimum économique = optimum social) à une distinction nette qui ramène le marché au rang d'instrument parmi d'autres.

2.4. Les politiques à mettre en oeuvre

Une fois posé le développement durable comme objectif, il reste ensuite à s'interroger sur les moyens d'y parvenir. Or, à part le cas des raisonnements s'inscrivant dans le cadre d'une approche néo-classique extrême, la nécessité d'une intervention de l'Etat est patente pour permettre de dépasser les problèmes posés par l'incertitude à venir. Nous avons tout au long de ce chapitre évoqué le recours au marché comme moyen privilégié pour parvenir aux objectifs fixés en matière d'environnement. Nous ne reviendrons pas sur le système de taxes et redevances optimales imaginé par A.C. Pigou ou les marchés des droits à polluer mis en oeuvre après R. Coase.

Il nous semble par contre nécessaire de nuancer des positions trop caricaturales en faveur de ces outils. Appliquées dans un domaine où règne l'incertitude, nous avons déjà vu qu'elles ne peuvent prétendre poursuivre une logique d'optimisation. Les questions d'environnement pouvant raviver des conflits d'intérêts latents, leur mise en oeuvre peut avorter du fait des stratégies des différents acteurs. De même lors de leur application elles s'insèrent dans des contextes culturels précis qui peuvent conduire à leur rejet.

a) Rationalité substantielle, rationalité procédurale

Tout d'abord il faut souligner que dans un contexte incertain, le processus de décision ne peut plus reposer sur la recherche de la solution optimale. Selon l'expression de Simon, la "rationalité substantielle" doit être remplacée par une vision plus pragmatique reposant sur une "rationalité procédurale". On passe dès lors de la recherche d'une solution optimale à celle d'une solution satisfaisante avec, comme principe de précaution essentiel le ménagement de portes de sortie, de possibilités de changer d'option.

En effet, "nous ne pouvons pas, compte tenu des limitations pratiques de nos moyens de calcul, générer toutes les actions admissibles et comparer leurs mérites respectifs. Nous ne pouvons pas non plus reconnaître la meilleure action (...). Nous obtenons *satisfait* en recherchant parmi les actions celles que nous pourrions généralement

tenir pour acceptables après une enquête d'une durée modérée"⁵⁹. Pour aider au choix de ces actions, on peut de plus se référer à un critère de précaution consistant à "éviter l'engagement prématuré dans des options technologiques ou institutionnelles trop rigides qui pourraient compromettre la possibilité de bénéficier de connaissances nouvelles"⁶⁰. C'est l'idée que l'on retrouve par exemple chez les représentants de l'école de Londres lorsqu'ils parlent de valeur d'option et de valeur de leg du capital naturel.

b) Lorsque le thème des externalités n'est qu'un prétexte

De cette incertitude va ensuite résulter une tension entre les différents intérêts en présence. On peut souligner ici que le marché n'existe pas *a priori* mais qu'il est mis en oeuvre par des acteurs humains. Ils en sont constitutifs et en fixent les règles⁶¹. Tout point d'achoppement susceptible de conduire à une modification de ces règles et, en même temps, de menacer le pouvoir de certains et d'en avantager d'autres devient source potentielle ou actualisée d'un litige dans lequel le sujet de discorde - en l'occurrence ici l'environnement - devient prétexte. Des tensions plus profondes existent dans les relations directes ou indirectes tissées entre les acteurs en présence⁶².

On peut alors aboutir à une perception "inversée" des risques selon laquelle le problème de chacun n'est plus la menace environnementale mise en avant mais bien l'usage qu'en font ou peuvent en faire les autres acteurs. Un exemple peut être fourni par l'industrie automobile des années 80 et les débats européens autour du pot catalytique dans le cadre de la lutte contre le problème des pluies acides. En effet, ayant concentré leurs efforts sur d'autres méthodes, les constructeurs français n'étaient pas du tout préparés à cette technologie. Le risque pour eux n'était dès lors plus le risque environnemental pourtant à la source des diverses réactions mais celui de se voir imposer une production qu'ils ne

⁵⁹ Cf. p. 84 de SIMON Herbert Alexander, *La science des systèmes, science de l'artificiel*. Paris : Epi, 1974. 155 p. La seconde édition de cet ouvrage, enrichie de quelques chapitres et au titre légèrement modifié, propose une version économique de cette idée d'impossibilité d'optimisation : "La micro-économie normative, en montrant que l'optimisation du monde réel est impossible, démontre que l'homme économique est en fait un <<adéquateur>> (satisfer), une personne qui accepte des solutions <<assez bonnes>> plutôt qu'un <<optimisateur>> : non pas parce qu'il préfère le moins au plus, mais parce qu'il ne peut pas trouver la <<meilleure>>. Même s'il le veut, il n'a pas le choix". p. 32 de SIMON Herbert Alexander, *Sciences des systèmes, sciences de l'artificiel*. Paris : Dunod, Coll. AFCET Systèmes. 1991. 229 p.

⁶⁰ Cf. p. 14 de HOURCADE J.C., SALLES J.M., "Environnement : les difficultés d'un accord international" *Problèmes Economiques* n°2.328, 2 juin 1993. pp. 13-17. Article paru sous le titre "Vers une régulation négociée des enjeux énergétiques des menaces sur l'environnement global", *Revue de l'économie méridionale*, n°160, Vol. 40, 4^{ème} trimestre 1992.

⁶¹ Cf. p. 272 de PERROUX François, "L'équilibre des unités passives et l'équilibration des unités actives". *Economie Appliquée* n°3-4, 1978. pp 271-291. "Si loin qu'on remonte dans le temps et quels que soient les schémas d'interprétation (plus ou moins conventionnels, ils le sont tous), avant les choses mises en ordres par le marché, on trouve les activités des hommes et l'organisation de ces activités qui font le marché. Si perfectionné qu'il soit, il est bon pour le comprendre de savoir quels agents, plus ou moins actifs, y interviennent et comment ils peuvent, plus ou moins, le déformer à leur avantage propre".

⁶² Cf. pp. 5-6 de GODARD Olivier, "Des taxes sur le carbone pour la prévention du risque de changement climatique ? Instruments économiques et politiques publiques en univers controversé", *Revue politiques et management public*, Vol. 10, n°4, déc. 1992. pp. 1-26. "La logique de l'externalisation ne correspond pas seulement à une défaillance technique des droits de propriété ; elle est aussi celle d'une stratégie d'anéantissement des questions perturbatrices pouvant menacer l'entrelacs des intérêts, des valeurs et des "visions du monde" qui sous-tendent l'ordre institué."

maîtrisaient pas. La commission européenne en matière d'environnement a quant à elle très bien assumé ce renversement des logiques. D'une exigence initiale de respect de l'environnement dont la transcription réglementaire présentait des enjeux économiques importants en matière de techniques de production, elle a retenu la nécessité d'imposer des normes très sévères sous prétexte d'obliger l'industrie automobile européenne à se renforcer dans un domaine appelé à se développer dans la concurrence internationale : l'économique est devenu la justification pour renforcer les règles environnementales⁶³.

Dans ce cadre l'incertitude peut même devenir une nécessité stratégique, recherchée en tant que telle. "En d'autres termes, l'extinction des controverses et incertitudes sur la scène sociale dépend peut-être moins de la progression de la science que du désir des acteurs intéressés à stabiliser à un moment donné les règles d'organisation d'un champ et à négocier un compromis à cette fin."⁶⁴

Dans le domaine de l'environnement, cette lutte d'influence sous couvert de risque écologique est omniprésente à tous les niveaux : entre Nord et Sud, pour définir des règles de diminution des émissions de gaz à effets de serre ; entre firmes nationales avec l'exemple précédemment évoqué de la bataille que s'étaient livrés les constructeurs automobiles français et allemands par l'intermédiaire de leurs Etats respectifs pour que la CEE favorise plutôt les carburants "verts" ou plutôt les pots catalytiques à travers sa réglementation ; entre associations de riverains et SNCF lors de la mise en place du TGV Méditerranée, etc.

L'internalisation des effets externes n'est plus seulement une simple formalité pour réparer des atteintes à la satisfaction de certains agents économiquement injustifiées, elle devient aussi une occasion privilégiée pour redéfinir le pouvoir de chacun à travers les nouvelles règles qui vont être fixées. La bataille sera plus ou moins âpre suivant l'importance relative des intérêts en jeu et suivant le pouvoir respectif des acteurs en présence. Notons enfin que dans de nombreux cas l'Etat est trop impliqué ou insuffisamment informé pour pouvoir jouer le rôle d'une instance supérieure, impartiale et souveraine, correctrice des défaillances du marché.

c) L'instrument économique comme élément au sein d'une politique correctrice

Nous venons de considérer que les agents économiques ne sont pas seulement constituants mais aussi constitutifs du marché, ce sont eux qui en fixent les règles avant d'en jouer. Ceci signifie aussi qu'il ne suffit pas que l'Etat dispose des moyens législatifs pour imposer un principe et un mode d'internalisation pour que leur mise en oeuvre soit un succès.

Par exemple une taxe peut être plus ou moins bien ressentie lorsqu'elle est perçue comme une charge supplémentaire. Pour la rendre politiquement acceptable il devient dès lors nécessaire de justifier son intérêt auprès des acteurs touchés et d'en réaffecter le produit de façon claire. Un exemple peut être fourni à travers la question d'une mise à péage de l'accès des centres ville. Les objectifs d'une telle taxe peuvent être très divers, faire payer

⁶³ Sur cet exemple des pluies acides et la notion de "risque inversé", ROQUEPLO Philippe, *Pluies acides : menaces pour l'Europe*. Paris : Economica, 1988. 357 p. Voir notamment pp. 43-49.

⁶⁴ *Idem* p. 5.

leur véritable coût aux transports, réguler la congestion, diminuer les pollutions, améliorer le système des transports urbains dans son ensemble ou financer une offre viaire urbaine et souterraine.... Les modalités d'application peuvent elles même prendre des formes très différentes. Cependant derrière cette diversité⁶⁵, la majorité des points de vue se retrouve devant la nécessité d'affecter le produit de cette taxe de façon claire de manière à montrer son intérêt à ceux qui la paie : payer l'infrastructure, développer les Transports Collectifs, etc. Le péage n'est plus conçu que comme un élément (certes essentiel) d'un "package", d'une politique globale, où son rôle d'affichage d'une volonté politique et de moyen de financement peut parfois faire oublier l'idée d'une égalisation du coût et du prix du déplacement automobile.

La taxe ne devient donc qu'un élément dans une politique d'ensemble qui ne respecte pas forcément les préceptes de la gestion économique au sens strict. D'une part il est nécessaire d'adjoindre de l'information autre que celle du prix : l'affichage des objectifs et des moyens mis en oeuvre jouent dans l'acceptabilité. D'autre part l'affectation précise des produits ne permet pas un système de taxes économiquement efficace⁶⁶ : reste à savoir si, comme cela a été dit précédemment, on recherche un résultat optimal ou plus simplement un résultat satisfaisant.

3. Transition : écologie, économie, transports routiers urbains

Entre ce présent chapitre et les suivants, nous allons passer d'un discours général sur les liens entre écologie et économie à un travail appliqué aux nuisances de la route en milieu urbain. Les conclusions du premier vont servir de cadre général aux suivants.

Nous avons cherché à montrer ici que le modèle proposé par l'économie du Bien-Etre est sans doute suffisant pour traiter des problèmes de nuisances locales à partir de la notion d'externalité présentée en première partie. Par contre l'ensemble des questions soulevées par les répercussions planétaires des activités humaines nécessitent d'ouvrir ce modèle, comme l'y invitent les débats autour de l'idée de développement durable. Ce deuxième point a également été l'occasion de mener une réflexion dans un cadre large se préoccupant tant du devenir à long terme de notre société que des interactions entre les activités humaines et les processus écologiques ainsi que des liens sociaux et rapports de force qui sous-tendent l'économique.

⁶⁵ Yves GEFFRIN a pu ainsi s'amuser à dénombrer 162 catégories de péages différents suivant les objectifs, les responsabilités, les modalités de mise en oeuvre et l'affectation du produit récolté. Cf. p. 342 de GEFFRIN Yves, "Péages urbains, doux rêves, dures réalité", pp. 341-347 in RAUX Charles, LEE-GOSSELIN Martin, *La mobilité urbaine : de la paralysie au péage ?* Lyon : Programme Rhône-Alpes Recherches en Sciences Humaines, 1991, 363 p.

⁶⁶ "Il est économiquement plus efficace de ne pas préjuger de leur utilisation. Tout d'abord, l'utilisation du produit de ces taxes doit répondre aux critères généraux d'efficacité des dépenses publiques. (...) Ensuite, l'affectation peut avoir des effets pervers limitant considérablement l'effet incitatif des mesures fiscales. Si les recettes de la taxe sont redistribuées au secteur pollueur, elles accroissent artificiellement son revenu. De nouveaux producteurs sont ainsi encouragés à y entrer. Ils contribuent à augmenter la pollution." Cf. p. 31 de DELACHE Xavier, GASTALDO Sylviane, "Les instruments des politiques d'environnement". *Op. Cit.*

Notre ambition, au cours de cette thèse, n'est pas d'embrasser l'ensemble de ces thèmes. Nous nous contenterons, plus modestement, d'aborder avec une méthode particulière cette zone frontière entre économique, social et environnement que nous avons appelée "Mesure humaine des risques environnementaux". De cette mesure, par contre, les deux facettes seront conservées, avec d'une part une évaluation économique des dommages des transports routiers urbains et d'autre part une interrogation sur les facteurs propres aux transports concourant à ces dommages.

Le prochain chapitre, centré sur la question de l'évaluation et notamment l'évaluation économique, permettra ainsi d'apporter un certain éclairage sur l'importance des enjeux liés aux nuisances des transports routiers urbains, compte tenu des connaissances actuelles sur la question. Les trois chapitres suivants se consacreront plus particulièrement à cerner le poids des principaux facteurs concourant à ces nuisances. Barry Commoner s'était attaché aux technologies, à la consommation moyenne par individu et à la démographie. Nous parlerons ici de technologies, de mobilité - en termes de nombre moyen de déplacements par personne et de distance moyenne par déplacement -, de démographie et des questions liées au phénomène de la congestion.

A travers ces quatre chapitres, c'est sans doute une vision localisée des problèmes posés par les pollutions atmosphériques et sonores du trafic routier qui est privilégiée, ne serait-ce que du fait de l'importance des nuisances de proximité lorsque l'on travaille sur un cadre urbain. D'un point de vue économique, c'est donc à la notion traditionnelle de coût externe auquel il est le plus souvent fait référence ici. Les thèmes de l'avenir et du "développement durable par les transports" restent cependant omniprésents de façon implicite ou explicite (Cf. chapitre 5, "Evolution de la mobilité *versus* progrès technologique").

Par contre nous ne tournerons que très peu notre réflexion en direction des politiques à mettre en oeuvre, des conflits potentiels ou actualisés à gérer, et des manières d'appliquer de façon efficace les grands principes économiques abordés en première section. Le but de ce travail ne peut donc être considéré que comme un premier pas en ingénierie des transports appliqué aux questions d'environnement, qui ne prend sens qu'inséré au sein d'une approche et d'un projet plus larges.

CHAPITRE 2 :

LES NUISANCES DES TRANSPORTS ROUTIERS URBAINS :

LA MESURE DES ENJEUX

A TRAVERS LES EVALUATIONS ECONOMIQUES

Ce chapitre est destiné à fournir une image statique des enjeux liés aux pollutions sonores et atmosphériques des transports routiers urbains. Alors que les chapitres suivants poussent la réflexion sur les relations entretenues entre les facteurs de la mobilité routière et les pollutions qu'elle génère, celui-ci est plus spécifiquement attaché à dresser le bilan actuel des conséquences de ces relations. En plus de son intérêt propre, son rôle est donc de justifier la suite du travail.

Un tel bilan peut être établi à au moins trois niveaux : physique, en présentant les phénomènes de pollutions atmosphériques et sonores en milieu urbain ainsi que la part croissante des transports dans ces phénomènes ; social, en s'interrogeant sur les catégories de personnes les plus affectées ainsi que sur les conflits et les jeux d'acteurs qui se développent autour de ces questions ; économique, au sens restreint du terme, en cherchant à établir la hauteur des "coûts externes" liés à ces nuisances. Une première section s'attache à une présentation physique des pollutions et de leurs conséquences ainsi qu'à une évocation rapide des enjeux sociaux qu'elles recouvrent. Cependant c'est le dernier point, économique, qui a été privilégié ici pour aborder la question des enjeux liés à ces pollutions car il donne une mesure de l'effort à consentir pour éviter les nuisances qu'elles engendrent.

Dans la logique économique traditionnelle, on considère souvent qu'il existe un "marché" de l'évitement ou, s'il n'existe pas, on tente de le créer de manière fictive. Cette logique croise le coût des dommages avec les dépenses nécessaires pour les éviter, l'objectif étant de minimiser l'ensemble de ces coûts. Les méthodes présentées peuvent être reprises à travers cette grille : elles essaient de retrouver une expression monétaire de la tension qui s'installe entre une demande d'évitement (équivalente aux dommages ressentis du fait d'une pollution quelconque, traduite au niveau des individus ou de la collectivité) et une offre d'évitement (qu'elle soit tangible, comme des double vitrages de protection phonique, ou monétaire dans le cas d'une compensation financière). Suivant les cas, l'évaluation économique se préoccupe plus de la courbe des dommages ou plus de celle de l'évitement de ces dommages.

Cependant, derrière cette simplicité du raisonnement distinguant dommages et évitement, les mises en oeuvre pratiques ont conduit à une très grande diversité de méthodes et de résultats d'évaluations. Pour rendre compte de manière synthétique de ce foisonnement, nous avons repris le partage assez traditionnel entre approches micro et macroéconomiques :

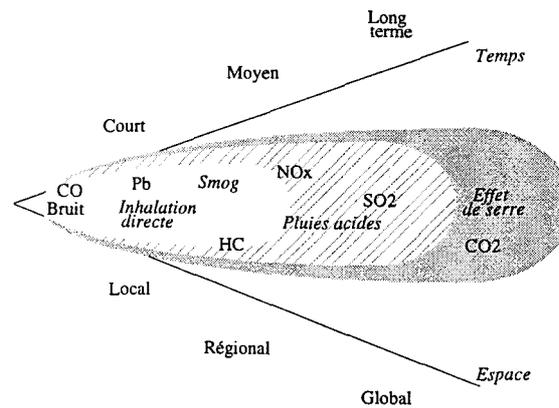
- Il existe des approches purement économiques qui cherchent à retrouver ou à créer artificiellement un marché sur lequel chacun révélerait ses préférences. Elles se fondent sur la démarche microéconomique classique et l'effort méthodologique repose essentiellement sur les moyens de valoriser monétairement ces préférences. Leur présentation fait l'objet de la section 2.

- Les autres méthodes existantes (section 3) font moins directement référence au marché et se positionnent à un niveau macroéconomique en mettant en évidence les coûts implicitement ou explicitement retenus au niveau collectif. Du point de vue économique, elles justifient souvent le passage micro/macro en expliquant que le processus démocratique permet l'émergence d'une préférence collective cohérente avec les préférences individuelles : le marché politique comble les carences du marché économique. Nous verrons qu'une telle approche peut ouvrir une très large possibilité de dialogue avec des logiques non économiques.

On peut d'ores et déjà souligner qu'entre la description à volonté objective des phénomènes de pollutions et la perception subjective des nuisances qu'ils entraînent, l'espace est suffisamment large pour que les transcriptions monétaires varient facilement de 1 à 10. Face à de telles divergences des résultats, il est souvent fait état des difficultés matérielles d'appréhension des "effets externes" et des incertitudes statistiques et techniques qu'elles engendrent. A l'évidence ces difficultés ne peuvent pas être niées. Mais il est également certain que les problématiques à l'oeuvre derrière les méthodes ne permettent pas d'obtenir des résultats identiques. Ici comme ailleurs il n'existe pas un objet intitulé "effet externe négatif", "bruit des transports" ou "pollution atmosphérique" qu'il suffit de regarder avec neutralité, d'une manière détaillée ou avec du recul, pour pouvoir en rendre toute la réalité. Le regard posé et la problématique plus vaste à l'intérieur de laquelle on raisonne vont construire l'objet d'étude et conduire, dans la pratique, à des résultats significativement différents - alors même que le cadre économique classique retenu ici semble suffisamment cohérent pour les faire converger.

1. Présentation des phénomènes de pollutions atmosphériques et sonores dans lesquels interviennent les transports

En plus des gênes parfois importantes liées au bruit, les transports routiers émettent des polluants variés : poussières, hydrocarbures (HC), oxydes de soufre (SO₂) de carbone (CO) et d'azote (NO_x), plomb (Pb) en voie de disparition, gaz carbonique (CO₂), sans compter divers esters. Leurs conséquences s'étalent sur une échelle temporelle et spatiale très large. Pratiquement toutes ces pollutions sont sources de nuisance immédiate ou à très court terme. Les polluants atmosphériques ont de plus une part de responsabilité dans la formation et la toxicité des smogs urbains ; certains (SO₂ et NO_x notamment) jouent un rôle important dans l'acidification de l'atmosphère (phénomènes de pluies acides...) ; enfin les émissions de CO₂ contribuent à l'effet de serre.

Graphique 1 : pollutions atmosphériques et sonores auxquelles sont liées les transports

Le problème de cette hétérogénéité des nuisances est que les niveaux écologiques concernés, donc les enjeux et les acteurs sociaux impliqués, sont diversifiés. Cette diversité peut conduire à des politiques contradictoires au regard d'un objectif apparemment simple de réduction de la pollution atmosphérique. De plus les mécanismes à l'oeuvre dans les phénomènes globaux comme les pluies acides ou l'effet de serre sont encore loin d'être bien compris et expliqués. Ceci tend à diluer les responsabilités et à laisser libre champ aux jeux d'acteurs qui reprennent les problèmes d'environnement en fonction de leurs intérêts propres : les prises de décisions résultent alors plus du rapport des forces en présence que d'une évaluation "scientifique et rationnelle" des risques écologiques, sociaux et économiques en jeu.

Cette première section a pour vocation de décrire les effets des pollutions atmosphériques et sonores liées de près ou de loin aux transports routiers en milieu urbain. Son objectif est de rendre plus tangible des phénomènes dont l'approche économique traditionnelle que nous allons reprendre par la suite ne laisse apparaître *in fine* qu'une valorisation monétaire abstraite de leurs conséquences.

1.1. Au niveau local

Au niveau local, urbain pour ce qui nous concerne ici, les nuisances auxquelles participent les transports routiers sont diverses. Leur responsabilité est également très inégale et est susceptible de varier compte tenu des évolutions des modes de vie et des technologies utilisées dans les différents secteurs d'activités économiques. Globalement on constate une amélioration des ambiances sonores et de l'atmosphère urbaine, même si les transports routiers restent à la traîne du fait de la hausse continue de leur usage.

Avant de présenter les conséquences de la pollution atmosphérique et de décrire rapidement les effets des principaux polluants que l'on retrouve en ville, nous nous attacherons à décrire les spécificités du climat urbain. En effet, celles-ci contribuent à éviter la dispersion rapide des polluants et à renforcer leurs effets. Enfin, dans un troisième point, nous nous pencherons sur cette nuisance locale que peut être le bruit.

1.1.1. Remarques climatiques et particularités du milieu urbain¹

D'une ville à l'autre l'atmosphère urbaine peut être très différente, suivant la latitude, la configuration du site d'implantation, l'ampleur des activités humaines abritées, les types d'énergie utilisés, etc. Il n'empêche : si toutes les grandes villes ne connaissent pas les problèmes de Mexico, Athènes ou Los Angeles, il est quand même banal de constater que l'air que l'on y respire est plus pollué que dans les campagnes environnantes.

Ce que nous voudrions souligner dans les lignes qui suivent c'est que cette pollution plus forte n'est pas simplement liée à la quantité d'émissions plus importantes ici qu'ailleurs. Le site urbain comporte ses particularités propres qui font qu'il génère aussi un micro-climat spécifique. L'inversion du gradient des températures, d'origine naturelle, favorise la concentration des polluants et se trouve parfois renforcé par les polluants eux-mêmes. De plus l'immense bloc de béton et d'asphalte que constitue la ville provoque l'apparition d'un dôme d'air chaud au sein duquel s'enferme la pollution.

a) Le phénomène d'inversion

L'inversion des températures n'est pas exceptionnelle. Elle se produit fréquemment par temps calme en hiver, elle est également courante dans les cuvettes, entre les montagnes, où l'air a parfois plus de mal à se renouveler.

En temps normal, la terre réfléchissant les rayons du soleil, l'air est plus chaud au niveau du sol et les températures décroissent avec l'altitude. Il se crée alors une circulation verticale de l'air car les couches situées aux voisinages du sol, plus légères, ont tendance à monter. Avec l'altitude elles se refroidissent, tandis qu'en dessous elles sont remplacées par des masses plus froides qui à leur tour se réchauffent au contact du sol.

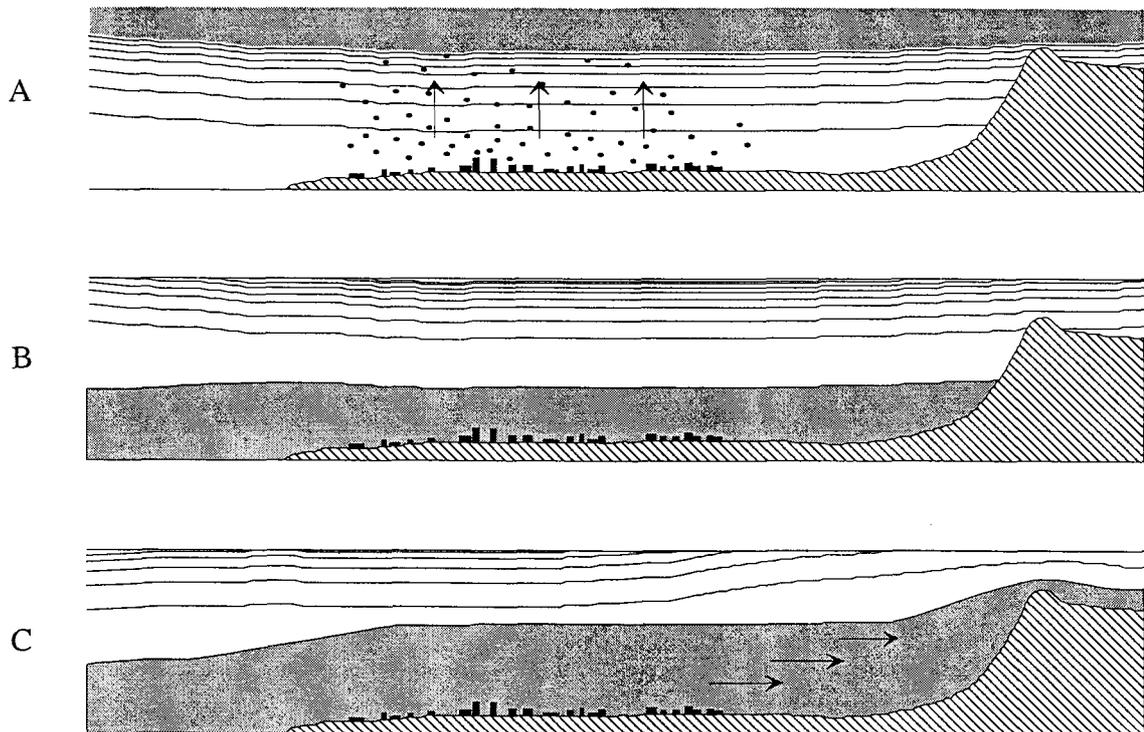
Dans certains cas cependant il peut arriver qu'une nappe d'air froid se retrouve au niveau du sol : lors des mouvements des grandes masses d'air, une couche d'air froid peut être coincée au fond d'une cuvette ; une langue d'air froid peut également se glisser sous une couche plus chaude ; certaines nuits d'hiver, par temps calme et clair, le sol peut se refroidir plus vite que l'air ambiant. Lorsque les masses d'air se stabilisent dans une telle situation, on constate alors un phénomène d'inversion des températures, qui s'élève avec l'altitude jusqu'à un plafond situé en général autour de 200 ou 300 mètres au dessus du sol. Plus haut on retrouve le phénomène classique de refroidissement de l'air avec l'altitude. Lorsque l'atmosphère est stable, ce phénomène peut durer plusieurs jours voir plusieurs semaines consécutives.

En situation normale les gaz émis par les activités humaines sont pris dans les courants d'air chauds ascendants et s'éloignent ainsi du centre qui les a générés. En situation d'inversion, ils commencent par monter jusqu'à rencontrer une couche d'air de température équivalente à la leur. Leur ascension se trouve alors bloquée, ils stagnent et s'accumulent sous le plafond d'inversion.

¹ Cette partie sur les méso-climats urbains doit beaucoup aux pp. 238-244 de RAMADE François, *Éléments d'écologie appliquée, Op. Cit.* Voir également pp. 217-226 de MARTIN Jean, MAYSTRE Lucien-Yves, *Santé et pollution de l'air*. Lausanne : Presses Polytechniques Romandes, Coll. Gérer l'environnement, 1988. 250 p.

Encart 1 : l'inversion des températures illustrée par le cas de Los Angeles

L'inversion des températures joue un rôle prédominant dans la formation des smogs. Ici est figurée l'évolution de ce phénomène dans le bassin de Los Angeles où il s'observe pendant plus de 100 jours par an. Dans les conditions normales (A), la température de l'air décroît avec l'altitude - l'intensité du grisé sur le schéma est proportionnelle à la faiblesse des températures - aussi, les masses d'air chaud s'élèvent et dispersent les polluants émis au sol. Quand l'inversion s'établit (B), une langue d'air froid s'enfonce en coin au-dessous d'une masse d'air chaud venant des déserts californiens. Dans ce cas, le gradient de température est inversé et les substances polluantes gazeuses ou particulaires s'accumulent dans la couche d'inversion. Celle-ci persiste jusqu'à ce que changent les conditions météorologiques. L'apparition de vent par exemple (C) provoque le départ de l'air froid et du smog.



Source : d'après F. Ramade, 1978. p. 240

Parfois la température de l'air est suffisamment basse pour que l'humidité se condense et forme un brouillard épais au sein duquel se concentrent les différentes émissions polluantes coincées sous la couche d'inversion. Les nombreuses poussières émises par les activités humaines favorisent cette formation de brouillard en jouant le rôle de noyau sur lequel peut se condenser la vapeur d'eau. Le smog va ensuite lui-même contribuer à entretenir le phénomène d'inversion des températures car il réfléchit les rayons du soleil qui ne peuvent plus atteindre et réchauffer le sol.

Enfin, suivant la latitude ou la saison, ce brouillard peut avoir des caractéristiques différentes : dans les zones à forte insolation il se produit des réactions photochimiques mettant notamment en jeu ozone, hydrocarbures, oxydes d'azote et vapeur d'eau et favorisant un smog oxydant ; dans les zones plus froides, les smogs sont souvent acides car l'humidité, plus forte, provoque une transformation des oxydes de soufre en acide sulfurique.

b) Le dôme de pollution

L'observation laisse apparaître que la température moyenne d'une ville est supérieure à celle de sa périphérie. En effet, par temps calme et en l'absence d'inversion des températures, il se développe un îlot de chaleur urbain à l'intérieur duquel l'air a tendance à circuler en milieu fermé. Les émissions polluantes se dispersent moins bien et forment un dôme jaunâtre au dessus de l'agglomération, nettement perceptible de l'extérieur.

Plusieurs facteurs contribuent à la formation de cet îlot d'air chaud qui enveloppe la ville. Il existe d'une part une forte concentration des sources de chaleur, chauffage et moteurs thermiques notamment. Les grands immeubles réfléchissent et concentrent les rayons du soleil vers le sol au lieu de les renvoyer vers le ciel. Les matériaux de construction, bitume, pierre et béton, accumulent la chaleur et ne la restituent que le soir, ce qui retarde d'autant le rafraîchissement de l'air. Enfin les réseaux d'évacuation empêchent la rétention d'eau, coupant court au phénomène d'évaporation qui est un gros consommateur d'énergie. De ce fait, l'air est plus sec et plus chaud.

Par temps calme il se forme une masse d'air chaud et pollué qui s'élève progressivement avec, à l'intérieur, d'importants échanges avec les couches plus froides des zones périphériques. Lorsque les courants ascendants ont suffisamment élevé l'altitude du dôme de pollution, l'humidité qu'il contient se condense et retombe parfois sous forme de précipitations. Les diverses poussières de pollution contenues dans le dôme contribuent fortement à cette condensation. De plus elles opacifient l'atmosphère créant ainsi un déficit d'insolation des villes, avec notamment une absorption sensible du rayonnement ultra violet.

Ainsi, même si la latitude et les spécificités du site des agglomérations restent prédominants pour déterminer leurs caractéristiques météorologiques, la structure urbaine et les activités qu'elles abritent génèrent des conditions atmosphériques particulières où la pollution de l'air joue un rôle important. Comme le montre le tableau suivant, ceci se traduit par une température moyenne plus élevée que dans les régions avoisinantes, des précipitations plus fréquentes, une formation plus importante de brouillards, avec comme corollaire une visibilité plus réduite et la réduction des radiations ultra violettes.

Tableau 1 : Modifications du mésoclimat urbain par la pollution atmosphérique

<i>Facteurs météorologiques</i>	<i>Comparaison de la valeur de ces facteurs en milieu urbain et en zone rurale adjacente</i>
Opacité atmosphérique	
Brouillards (smogs)	
Hiver	100 % de plus
Eté	30 % de plus
Nébulosité	de 5 à 10 % de plus
Particules	de 10 à 20 % de plus
Rayonnements U.V.	10 % de moins
Eté	40 % de moins
Précipitations	de 5 à 10 % de plus
Température moyenne annuelle	0,5 à 1°C de plus
Température moyenne hivernale	1 à 2°C de plus
Vitesse du vent moyenne annuelle	20 à 30 % plus faible
Tempêtes	10 à 20 % plus faible

Source : F. Ramade, 1978. p. 239

1.1.2. Atteintes diverses de la pollution atmosphérique et contribution de l'automobile :

Les différents polluants que l'on retrouve dans l'atmosphère urbaine ont des actions diverses sur les êtres vivants - santé humaine, flore et faune. Ils affectent également les matières inertes, métaux et roches, ce qui se révèle préoccupant pour les bâtiments en général et certains monuments historiques en particulier. Ils sont souvent regroupés en deux grandes catégories suivant leur état solide (poussières) ou gazeux.

a) les polluants gazeux

Parmi les polluants présents à l'état de gaz, on recense essentiellement les oxydes d'azote (NO et NO₂ regroupés sous le sigle NO_x), le dioxyde de soufre (SO₂), le monoxyde de carbone (CO), l'ozone (O₃). On peut également évoquer le méthane et divers corps organiques moins souvent cités mais dont les émissions pourraient se développer ou dont les méfaits sont aujourd'hui de plus en plus soupçonnés. Le tétraéthyl de plomb représente un enjeu qui décline avec le développement des carburants verts. Enfin le cas du gaz carbonique (CO₂), autour duquel tournent les débats sur l'effet de serre, ne sera abordé que plus loin car il n'a aucune répercussion directe au niveau local.

Le monoxyde de carbone est un gaz qui réagit fortement avec les molécules d'oxygène. De ce fait il se transforme rapidement à l'air libre et correspond à un polluant de proximité. Par contre il est extrêmement toxique pour les êtres vivants qu'il menace d'asphyxie en fixant l'oxygène du sang. Il peut être à l'origine de symptômes comme les céphalées, les vertiges, l'asthénie, des troubles de la vue, de l'audition ou de l'odorat. Ce gaz est principalement lié au trafic automobile et se rencontre aux abords des rues à fort débit et/ou très encaissées entre les immeubles.

Les oxydes d'azote sont liés à des combustions à haute température et proviennent, là encore, essentiellement des transports routiers. Parmi ceux-ci le NO₂ est un gaz irritant pour les bronches et affecte principalement les personnes asthmatiques et les jeunes enfants. Les NO_x réagissent avec la vapeur d'eau pour se transformer en acide nitrique (NO₃H). De plus, sous l'action des rayons du soleil, par un jeu complexe avec l'eau et certains composés organiques volatils présents notamment dans les carburants, ils produisent de l'ozone. Ce dernier, qui préoccupe de plus en plus les spécialistes depuis la fin des années 80, provoque des irritations oculaires, de la toux et une altération des fonctions pulmonaires.

Le dioxyde de soufre est également un irritant des voies respiratoires et il réagit à l'humidité de l'air pour donner de l'acide sulfurique. Un cas extrême de pollution de ce type a été celui de Londres dans les années 50 où un brouillard contenant un taux très élevé de dioxyde de soufre s'est installé de manière prolongée et s'est vu attribué la responsabilité de la mort de plus de 4 000 personnes². Il provient de la combustion des fiouls, des gazoles et des charbons, liée au chauffage et aux activités industrielles. L'utilisation de filtres ou le recours à d'autres types d'énergie fait que cette pollution a fortement décru dans les villes occidentales. Cependant la croissance des véhicules diesels tend aujourd'hui à stopper cette amélioration.

Acides nitrique et sulfurique corrodent les pierres des bâtiments et endommagent de manière irréversible certains monuments considérés comme patrimoine historique. De plus le SO₂ ainsi que les NO_x sont impliqués dans les phénomènes de pluies acides que nous évoquerons plus loin.

Les hydrocarbures jouent un rôle important dans la transformation des NO_x en ozone. Certains d'entre eux comme l'acétylène, l'éthylène ou le méthane sont réputés inoffensifs pour l'organisme de manière directe. Par contre le benzène et d'autres hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ont des effets cancérigènes et mutagènes importants. Ils peuvent provoquer des maladies du sang et de la moelle ainsi que des leucémies.

Enfin, le plomb affecte le système nerveux central et périphérique, les reins, les systèmes reproductifs et cardio-vasculaires. A faibles doses il provoque des troubles nerveux et mentaux chez les jeunes enfants ; à doses élevées il conduit au saturnisme et au décès, même pour l'adulte.

Ces deux derniers types de polluants gazeux, hydrocarbures et plomb sous forme de tétraéthyl, sont l'un et l'autre quasi exclusivement liés aux transports routiers. Il faut cependant souligner que depuis le milieu des années 80 la teneur en plomb de l'atmosphère s'est considérablement réduite avec le remplacement progressif des essences classiques par les essences sans plomb. A terme, cette teneur devrait devenir à peu près nulle.

² Exemple cité par RAMADE François, *Eléments d'écologie appliquée*, Op. Cit. p. 241 et ALLEGRE Claude, *Ecologie des villes...* Op. Cit. p. 171. Voir également p. 51 de MARTIN Jean, MAYSTRE Lucien-Yves, *Santé et pollution de l'air*. Op. Cit.

b) Les poussières³

Les poussières jouent un rôle actif à plusieurs niveaux dans la pollution atmosphérique, de manière directe par inhalation, en transportant d'autres polluants et en contribuant à la formation des smogs urbains. Elles sont émises par l'ensemble des activités humaines, habitat, industrie et transports. Ces derniers contribuent à ce type de pollution du fait d'une part des différents contacts et frottements liés au fonctionnement des véhicules (freins, frottements entre chaussée et pneus...), d'autre part de la combustion des carburants avec un mauvais point pour les moteurs diesel qui émettent une poussière fine véhiculant des hydrocarbures non brûlés.

Tout d'abord lorsqu'elles sont inhalées, les poussières les plus fines ($\varnothing < 10\mu\text{m}$) peuvent franchir les filtres naturels de l'organisme tels que le nez et la trachée-artère. Elles pénètrent alors profondément dans l'appareil respiratoire et peuvent provoquer des dommages soit par effet mécanique direct, en bouchant des bronchioles ou en irritant des parois, soit indirectement du fait des agents pathogènes qu'elles transportent. Ce type de poussières est d'autant plus préoccupant que les filtres artificiels actuels ne sont pas suffisants pour les supprimer au niveau de leur source d'émission.

Les poussières constituent également des noyaux sur lesquels viennent se fixer les gaz et l'eau. Lorsqu'elles sont inhalées elles jouent alors un rôle de vecteur des polluants qui pénètrent ainsi dans l'organisme. Pour la même raison, elles contribuent de manière importante à la formation de brouillards en condensant l'humidité de l'air. Au sein de ces brouillards se trouvent aussi concentrés les différents gaz polluants déjà évoqués, ainsi que leurs dérivés acides. On retrouve ici le thème du type de climat engendré par les spécificités urbaines.

Enfin les poussières constituent un type de pollution directement perceptible sous la forme des fumées noires émises par l'industrie et par les véhicules diesel. Un autre effet bien visible est celui des salissures et de l'encrassement des bâtiments.

c) Bilans : la liaison entre pollution et santé publique, le rôle des transports routiers

La liste des polluants qui vient d'être faite, couplée à une rapide présentation de leurs effets et de leurs émetteurs, ne doit cependant pas conduire à une lecture monocausale des relations émetteurs-polluants-santé et autres dommages. D'une part ils s'insèrent dans un ensemble de facteurs de risque tels que, dans le domaine de la santé par exemple, les conditions météorologiques, les épidémies (grippe ou autres), les périodes de pollinisations, etc. Les terrains rencontrés peuvent également être plus ou moins sensibles aux pollutions : les populations les plus touchées sont toujours les personnes âgées, les asthmatiques et les jeunes enfants. D'autre part ce n'est bien souvent pas l'agression d'un polluant caractéristique qui est en cause mais un ensemble de facteurs, le symptôme propre à un polluant n'étant que le révélateur d'une fragilisation plus générale.

³ Voir par exemple Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, *Particules en suspension dans l'atmosphère : effets sur la santé et proposition pour une révision des valeurs limites*. Paris : Ministère des Affaires Sociales, de la Santé et de la Ville, juillet 1993. 82 p.

Pour rendre malgré tout plus tangibles les liens entre pollution et santé publique, on peut présenter certains des chiffres fournis dans un récent rapport sur la question qui conclue que "si [ses] résultats sont réellement attribuables à la pollution, cela signifie qu'il existe des effets sanitaires de la pollution atmosphérique pour des niveaux inférieurs aux normes actuellement en vigueur. Cela signifie également que la relation entre la pollution atmosphérique et la santé est une relation sans seuil : à tout niveau de pollution correspond un excès de risque sanitaire pour la population"⁴.

Tableau 2 : Augmentation du nombre journalier de décès et variations des niveaux de polluants

% d'augmentation du nombre journalier de décès par rapport à un niveau de pollution non dépassé pendant les 18 jours les moins pollués de l'année - chiffres fournis : intervalles de confiance à 95% - :

	Particules	dt $\varnothing < 13 \mu\text{m}^*$	SO ₂	NO ₂	O ₃	
Pollution moyenne Niveau atteint 50% des jours de l'année	1,0 à 3,0 %	1,3 - 4,6	0,6 - 1,5	0,2 - 1,3	0,1 - 1,9	
Pollution élevée niveau supérieur à 95% des jours de l'année	2,1 - 6,8	2,3 - 8,5	2,7 - 6,9	0,7 - 5,0	0,5 - 9,0	
Pollution très forte + 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport au niveau de base	2,6 - 8,2	2,7 - 9,8	3,9 - 10,0	nc	0,6 - 11,7	
	décalage	1 jour	0 - 1 jour	1 jour	1 jour	0 - 3 jours

* Avec réserve

A partir du rapport "Erpurs", 1994.

A cette relation établie entre polluants et santé publique, on peut rajouter que les transports contribuent de façon importante aux émissions totales. Les chiffres du graphique ci-dessous concernant la part des transports dans la pollution atmosphérique de plusieurs grandes villes montrent qu'en matière de CO, hydrocarbures, et NO_x, leur responsabilité dépasse systématiquement les 50% (plus de 90% pour le CO)⁵. Une étude menée sur l'agglomération lyonnaise en 1990 confirme cette tendance en imputant respectivement 96, 84 et 87% des émissions de CO, hydrocarbures non méthaniques et NO_x aux transports⁶. Enfin d'autres études consacrées aux émissions des transports en général (sans distinguer les transports urbains) leur attribuent, pour la France en 1991 :

- 12% des oxydes de soufre (SO₂),
- 71% des oxydes d'azote (NO_x),
- 87% du monoxyde de carbone (CO),

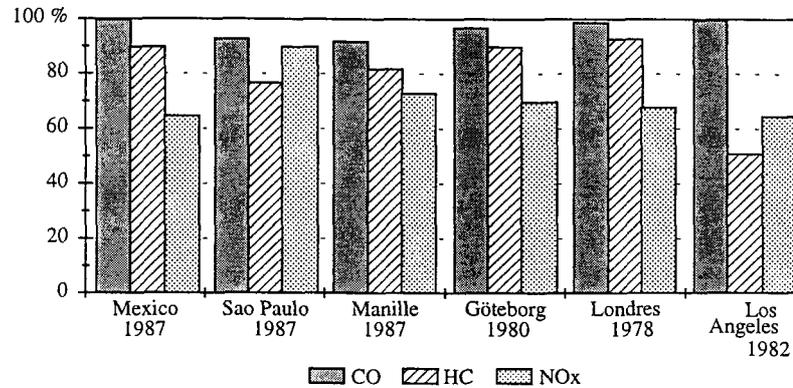
⁴ Le projet ERPURS (Evaluation des Risques de la Pollution URbaine pour la Santé), monté en décembre 1990, a pour objectifs de mesurer le lien entre pollution atmosphérique urbaine et santé publique en Ile de France ainsi que d'évaluer la pertinence d'un système de surveillance de santé en parallèle du système de surveillance de la qualité de l'air existant. La citation et les chiffres fournis ici sont respectivement tirés des p. 98 et 68 d'une première analyse épidémiologique : Observatoire Régional de Santé d'Ile de France, *Evaluation de l'impact de la pollution atmosphérique urbaine sur la santé en Ile de France - 1987-1992*. Novembre 1994. 104 p.

⁵ Faiz ASIF et alii, *Air pollution and from motor vehicles*. Washington : World Bank & UNEP. Avril 1992. Document cité par LAMURE Claude, "Transport et environnement dans les grandes villes du monde", *TEC* n° 123, mars-avril 1994. pp. 2-14.

⁶ EUROPLAN, *POLYEN, analyse des émissions de pollution liées à l'énergie dans l'agglomération lyonnaise. Volumes I, II et III*. Etude pour le compte de la COURLY, la Commission des Communautés Européennes (DG VII) et Rhônealénergie. Lyon, Mars 1992.

- 33% des particules,
- 35% des composés organiques volatils⁷.

Graphique 2 : Contribution des transports à la pollution de l'air dans certaines grandes villes



Source : Faiz Asif, cité par C. Lamure, 1993.

1.1.3. Les nuisances liées au bruit

En plus des questions de pollution atmosphérique, l'ambiance urbaine est caractérisée par un autre type de nuisance de proximité, le bruit. La dernière enquête sur ce thème menée par l'INRETS en 1986 montre que pour l'ensemble des personnes estimant subir des nuisances à domicile, le bruit constitue la gêne principale, et la circulation routière est la source de bruit la plus souvent incriminée⁸. Les dommages créés par ce type de nuisance peuvent être très graves. Cependant, hormis les niveaux extrêmes, ce n'est pas le bruit en lui-même qui constitue la nuisance mais la gêne qu'il procure pour effectuer certaines activités. De ce fait le bruit contient en général une composante subjective beaucoup plus forte que la pollution atmosphérique même si, en moyenne, il semble qu'il existe un seuil situé autour de 60-62 dB(A) à partir duquel le bruit routier constitue une gêne pour la population.

⁷ Chiffres de la CITEPA cités p. 77 dans *Les transports en 1992 - 30ème rapport de la commission des comptes*. Paris : INSEE-OEST, juin 1993. 171 p.

⁸ Personnes constatant des nuisances à domicile : 34,2% ; nuisance la plus souvent évoquée : le bruit, dans 60,7% des cas ; les voies routière comme source de nuisance sont dénoncées dans 52,4% des cas. Les bruits provenant des voies routières représentent 30,9% des nuisances citées. Ces chiffres sont tirés de MAURIN M., LAMBERT J., ALAUZET A., *Enquête Nationale sur le bruit des transports en France*. Bron : Rapport INRETS n°71, juillet 1988. 132 p.

Encart 2 : A propos de la mesure du bruit

L'oreille humaine n'est sensible qu'aux bruits dont la *fréquence* se situe entre 20 et 16 000 cycles par seconde (ou hertz, Hz), selon que le son est grave ou aigu. Par ailleurs *l'intensité* du bruit dépend de l'amplitude de ces cycles : pour un son de fréquence moyenne (3 700 Hz) et un auditeur normal, le *seuil d'audition* s'établit à une puissance acoustique de 10^{-12} W (watts) et celui de *douleur* à 1 W. Cette énorme dynamique de la plage auditive fut une des raisons d'adopter une échelle de mesure logarithmique dont le zéro absolu a été placé au seuil d'audition. Le bel constitue l'unité de cette échelle. En pratique, on utilise les dixièmes de bel, ou décibels (dB) car ils correspondent grossièrement à la variation nécessaire pour percevoir une intensité différente. Les niveaux audibles s'échelonnent de 0 à 120 dB environ et *la puissance sonore double* lorsque l'intensité augmente de *3 dB*.

Le bruit a un caractère subjectif : la *sonie* repose sur la sensation de bruit ressentie par les individus. Elle varie en fonction de la fréquence et de l'intensité. Pour une fréquence de 1 000 Hz, la *sonie double* lorsque l'intensité croît de *10 dB*.

Les récepteurs de l'oreille ne réagissent pas de la même manière suivant qu'un son est grave ou aigu. Notre système auditif parvient cependant à intégrer des sons de fréquences différentes. Pour reproduire ce phénomène, les appareils de mesure (ou sonomètres) recourent à différents réseaux pondérateurs. On utilise les dénominations dB(A), dB(B) ou dB(C) selon la pondération utilisée. Les dB(A) constituent la mesure la plus répandue.

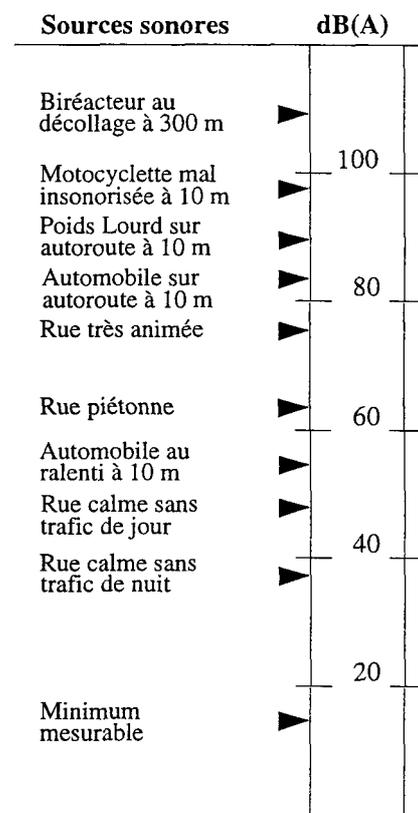
La durée d'exposition au bruit influence sa nocivité. En tenir compte ne pose pas de problème lorsque le niveau reste constant. Ceci correspond rarement à la réalité : les émissions sonores du trafic routier varient fortement selon les heures. On détermine la dose globale de bruit supportée (énergie acoustique) sur la base du temps d'exposition aux différents niveaux sonores. Puis on calcule le volume en dB(A) d'un son dont le niveau serait stable et qui aurait la même énergie acoustique totale que le bruit fluctuant mesuré. Il s'agit du *niveau acoustique continu équivalent, Leq*.

extrait de Soguel, 1994⁹.

⁹ Cf. p. 32 de SOGUEL Nils, *Evaluation monétaire des atteintes à l'environnement*. Neuchâtel : EDES Neuchâtel, Institut de Recherches Economiques et Régionales, 1994. 181 p.

Les effets du bruit se font sentir à travers plusieurs mécanismes physiologiques et psychologiques distincts. Tout d'abord un niveau sonore trop élevé (supérieur à 75-80 dB) peut entraîner une presbyacousie temporaire à irréversible selon la durée et l'intensité de l'exposition. Cependant, c'est surtout par ses effets indirects que le bruit pose des problèmes importants. D'une part il perturbe le repos en diminuant les temps de sommeil paradoxal et en augmentant le nombre et la durée des éveils en cours de nuit. On peut montrer que ces troubles du sommeil s'atténuent au cours des premiers mois mais qu'ils subsistent encore après plusieurs années d'exposition. D'autre part le bruit, par l'effet de masque qu'il produit, entraîne des problèmes de communication orale et provoque une baisse de la concentration. Le développement psychologique de l'enfant, l'apprentissage en milieu scolaire, la vie sociale en générale et les performances dans le travail peuvent se trouver affectés. Enfin la situation de stress que le bruit provoque du fait des efforts d'adaptation qu'il demande peut être à la source de comportements asociaux et constitue un facteur aggravant dans les maladies cardio-vasculaires.

Graphique 3 :
Illustration des niveaux de bruit



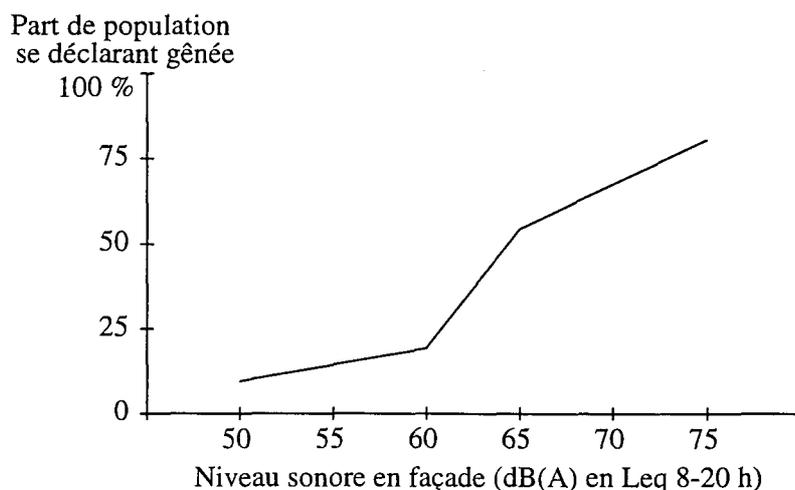
Source : Vallet et alii, 1983¹⁰

Depuis les années 60, l'INRETS a travaillé sur plusieurs séries d'enquête qui sont spécifiquement attachées à la gêne provoquée par les bruits de la circulation routière. Elles montrent toutes qu'il existe un seuil à partir duquel il existe une croissance rapide du pourcentage de personnes se déclarant gênées ou très gênées par le niveau donné d'exposition au bruit de leur logement. D'une enquête à l'autre, ce seuil varie entre 59 et 63 dB(A) en Leq 8h-20h. Compte tenu de la précision des évaluations, compte tenu également des fluctuations de la population liées à diverses campagnes de sensibilisation, il semble que l'on puisse en conclure à une bonne stabilité au cours du temps de la sensation de gêne provoquée par la circulation routière¹¹. La courbe de gêne en fonction de l'exposition du domicile serait à peu près la suivante, avec un seuil à 60-62 dB(A) :

¹⁰ Cf. p 12 de VALLET Michel, et alii, *Effets du bruit de circulation automobile - Données psychologiques, physiologiques et économiques*. Paris : Note d'information IRT n°28, décembre 1983. 114 p.

¹¹ VALLET Michel, "L'évolution des exigences humaines en matière de bruit routier". *TEC* n°93, mars avril 1989. pp. 34-36.

Les enquêtes évoquées ont été menées en 1964, 1973, 1979 et 1986. Michel VALLET cite respectivement : BARCELON M., LAMURE C., *La gêne due au bruit de circulation automobile, une enquête auprès des riverains d'autoroute*. Paris : Cahiers du CSTB n°88, 1967. VALLET et alii,

Graphique 4 : Bruit routier et gêne ressentie par les populations riveraines

Source : Michel VALLET, 1989.

Cependant cette première description des effets du bruit sur les hommes est à relativiser. Tout d'abord, hormis pour les niveaux extrêmes, la nuisance n'est pas le bruit en soi mais l'effet de masque qu'il peut provoquer lorsque plusieurs activités rentrent en concurrence sonore. De plus le bruit comporte une composante subjective très forte, sans doute plus importante que pour la pollution atmosphérique. A lui seul un niveau sonore ne suffit pas pour constituer un indice de gêne, tout dépend du sens qui lui est attribué. En effet certains sons peuvent très bien être considérés comme caractéristiques d'un quartier et être recherchés en tant que tels par les résidents qui y retrouvent une identité. Par exemple les habitants du Boulevard Saint Germain à Paris connaissent nuit et jour un niveau sonore équivalent à celui d'une autoroute et ne s'en plaignent pas. Le bruit ne doit donc pas être simplement perçu comme une nuisance à faire disparaître, il doit aussi être pensé comme élément à insérer dans une politique de requalification des espaces urbains, en partenariat avec les personnes qui y vivent.

Avec un tel point de vue, le bruit routier n'est plus considéré simplement en lui-même, il doit être resitué dans un contexte plus large que celui des nuisances des transports au sens strict. D'une part, l'environnement de la route ou de la rue a son importance. Par exemple si une bordure d'arbres le long d'une voie très chargée n'absorbe pas les sons, elle les rend par contre plus supportables en camouflant leur source. De même on peut constater que la voiture protège parfois de la voiture : supprimer le stationnement dans certaines rues étroites entraîne tout à la fois la suppression des "pièges à son" constitués des véhicules à l'arrêt et un accroissement des flux et des vitesses (et donc des émissions sonores). D'autre part une politique de protection ou de réduction des nuisances sonores peut avoir des conséquences imprévues. Par exemple, concevoir un habitat replié sur des cours intérieures pour le protéger du bruit automobile conduit parfois à générer des activités bruyantes dans les cours elles-mêmes ; de même la circulation automobile peut jouer un rôle de masque qui, une fois disparu, va révéler d'autres types de bruits à l'origine de nouvelles tensions. Enfin,

"Annoyance from habitation to road traffic noise from urban expressways" *Journal of Sound and Vibration*. 1978 (60), pp. 423-440. LAMBERT J. et alii, "Patterns of behaviour in dwellings exposed to road traffic noise". *Journal of Sound and Vibration*. 1984 (2), pp. 571-582. MAURIN et alii, *Enquête Nationale sur le bruit des transports en France*. Op. Cit.

tant qu'il n'est pas trop élevé et qu'il n'a pas tendance à évincer toute activité non protégée derrière une façade antibruit, le bruit des véhicules routiers peut lui aussi s'intégrer dans l'ambiance sonore d'un site : le problème n'est pas simplement le niveau sonore émis par la route mais la signification de ce bruit particulier dans le contexte du lieu et la manière dont il se transforme au cours de sa propagation¹².

1.2. Niveaux régional et global

Outre leurs effets à un niveau local les émissions humaines de polluants atmosphériques, on le découvre depuis une quinzaine d'années, peuvent avoir des répercussions sur des échelles plus vastes, régionales voire globales. Trois phénomènes caractéristiques des pollutions atmosphériques globales sont souvent mis à l'index : couche d'ozone, pluies acides et effet de serre. Cependant les transports ne contribuent de manière plus ou moins importante qu'aux deux derniers et c'est donc sur ceux-ci que nous nous arrêterons un moment¹³.

1.2.1. Pluies acides...

Le terme de "pluies acides" désigne l'acidification de l'atmosphère du fait de l'augmentation des émissions humaines de SO₂ et de NO_x. L'ampleur de ses effets est suffisamment préoccupante pour considérer ce phénomène comme global : Europe du nord-est, une large part de l'est des Etats Unis et du Canada, le Mexique, le nord des Andes, plusieurs zones forestières en Afrique sub-saharienne, une grande part du sous-continent indien et une partie de la Chine. Cependant, derrière ce sigle générique, on distingue aujourd'hui deux phénomènes particuliers qui se traduisent de manière différente au niveau de leurs effets : l'acidification des lacs du fait des émissions soufrées de certaines industries et la "mort des forêts" plus liée semble-t-il aux émissions de NO_x et à leur transformation en ozone.

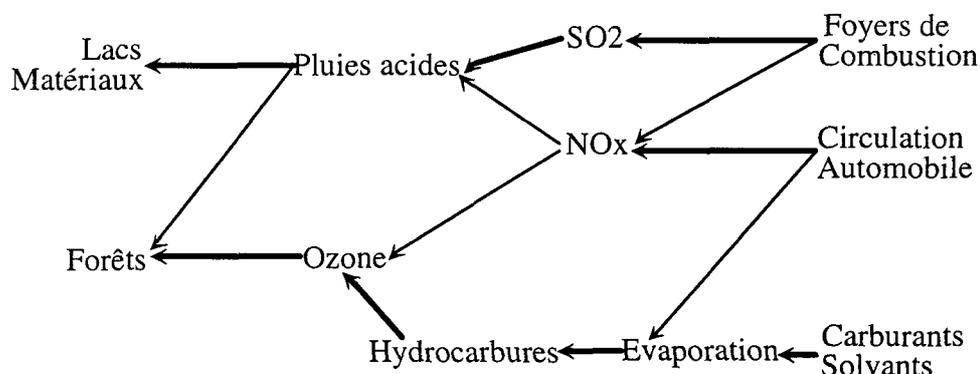
Nous avons déjà évoqué la transformation du SO₂ et des NO_x en acides sulfurique (H₂SO₄) et nitrique (HNO₃) lorsqu'ils réagissent avec l'humidité de l'air. Ces acides ont bien évidemment un impact local lorsqu'ils sont concentrés dans les smogs urbains. Ils peuvent également être transportés sur de grandes distances par des nuages ayant survolé des atmosphères polluées. Ils ont alors des conséquences lointaines : en 1968, le suédois S. Oden a pu montrer que l'acidification des lacs de son pays, déjà bien repérée à cette époque (dans les pays scandinaves, les premiers systèmes de mesures sont posés dès les années 40), était liée aux émissions de régions industrielles situées en Grande Bretagne et en Europe Centrale.

¹² Les exemples de ce paragraphe sont repris de KIS Martine, "Dossier : Concevoir une politique du bruit dans la ville", *Le Courrier des Maires*, 4 février 1994, pp. 22-27.

¹³ Cette partie reprend des éléments de FAUCHEUX Sylvie, NOEL Jean-François, *Les menaces globales sur l'environnement*. Paris : La Découverte, Coll. Repères, 1990. 123 p.
Le point sur les pluies acides doit aussi à ROQUEPLO Philippe, *Pluies acides : menaces pour l'Europe*. *Op. Cit.*, celui sur l'effet de serre au numéro spécial de *La Recherche* : "L'effet de serre". n°243, Vol. 23, mai 1992. pp. 515-674.

Le second phénomène a trait au problème du *Waldsterben*, autrement dit de la "mort des forêts". Ce phénomène a été perçu de façon très vive en Allemagne à partir du début des années 80. Sa progression est alors apparue comme extrêmement rapide : dans le Bade-Wurtemberg alors que 6% des épicéas étaient malades en 1981, on en recensait 94% en 1983. Au début, l'acidification de l'atmosphère s'est trouvée directement en cause, la controverse entre scientifiques portant plus sur le mode d'action des dépôts acides, en appauvrissant le sol ou directement par le contact entre les feuilles et l'air pollué. Ce n'est qu'en 1985 qu'une nouvelle hypothèse est venue supplanter la première, selon laquelle l'ozone dérivé d'une réaction photochimique entre NOx, hydrocarbures et rayonnements solaires aurait une action nécrasante sur les feuillages. L'automobile devient dès lors l'ennemi public n°1, en lieu et place des divers foyers de combustion et notamment des industries lourdes attachées au charbon.

Graphique 5 : Les causes de la mort des forêts



Source : S. Faucheux, J.F. Noël, 1990. p. 14.

Comme le montre ce schéma, depuis la conception originelle d'une relation simple entre émissions de soufre et dommages sur les milieux naturels, le schéma des liens entre activités humaines et environnement s'est déjà bien complexifié. Les responsabilités se sont dissoutent d'autant, surtout lorsqu'on souligne que derrière le terme "circulation automobile", c'est le mode de vie de tout un chacun qui est concerné et non plus simplement quelques industries particulières. De plus on se rend compte aujourd'hui que des phénomènes naturels sont également à l'oeuvre et que les dégâts constatés sont symptomatiques d'un nombre élevé de facteurs. Concernant l'acidification des lacs, les dégâts sont parfois moins importants que prévus, non seulement parce qu'il existe des régulations naturelles, mais aussi du fait que même sans activité humaine certains lacs connaissent un processus d'acidification. Pour les forêts, la pauvreté de certains sols ainsi que plusieurs années consécutives de sécheresse ont également contribué à l'affaiblissement des arbres, conduisant "à considérer la pollution comme facteur aggravant mais non déclencheur de la maladie des forêts"¹⁴.

¹⁴ Conclusions de recherches menées dans le cadre du programme DEFORPA (1988), citées p. 16 de FAUCHEUX Sylvie, NOEL Jean-François, *Les menaces globales sur l'environnement. Op. Cit.*

1.2.2. ... et accroissement de l'effet de serre

L'effet de serre est un phénomène physique naturel lié d'une part à la transformation de l'énergie solaire entre le moment où elle est reçue puis renvoyée par la terre et d'autre part aux propriétés d'absorption de certains gaz. Des rayonnements du soleil qui parviennent à la terre, une partie est réfléchié telle quelle, par les nuages, les particules de l'atmosphère ou la surface du globe elle-même. Par contre environ 70% sont absorbés puis réémis par le sol sous forme de rayons infra-rouges. Or la vapeur d'eau ainsi que des gaz présents à l'état de trace dans l'atmosphère comme le CO₂, le méthane, les CFC et l'ozone troposphérique, réfléchissent et renvoient à nouveau vers le sol ce type de rayonnement qui se trouve donc piégé. On estime que la température moyenne de la terre est supérieur de 33° à ce qu'elle devrait être si ce phénomène de transformation puis conservation de l'énergie solaire n'existait pas.

Le débat, dans toute sa virulence, ne tourne pas autour de ce mécanisme naturel de l'effet de serre. Il s'attache surtout à l'élément perturbateur introduit par les activités humaines et les émissions artificielles induites de gaz carbonique, méthane et CFC : leur production par l'homme ne risque t-elle pas d'accroître l'effet de serre et donc de relever la température moyenne du globe ?

La hausse de la teneur en CO₂, qui est passée de 275 parties par million avant la révolution industrielle à 345 aujourd'hui, pousse à répondre par l'affirmative. D'ici la fin du siècle prochain, si ce phénomène devait continuer, certains scientifiques pensent que la température du globe pourrait s'accroître de 4 à 5 degrés. Même avec un réchauffement moindre, la conséquence en serait une augmentation de la variabilité du climat, avec une fréquence élevée d'évènements extrêmes tels que les cyclones ou les ouragans. Un relèvement du niveau des mers serait également probable, avec une hausse d'une vingtaine de centimètres pour 2030, d'une cinquantaine pour 2070¹⁵.

Le problème est que si on a pu montrer une liaison entre teneur en CO₂ de l'atmosphère et changements climatiques (les périodes glaciaires sont celles pour lesquelles les taux de gaz carbonique sont le plus bas et inversement), rien ne permet de déterminer le sens de la relation de cause à effet. Selon les premiers schémas de la théorie sur l'accroissement de l'effet de serre, les émissions humaines de CO₂ auraient déjà du faire ressentir leurs effets de manière sensible. Or les variations climatiques que l'on a connu depuis un siècle, à la hausse mais aussi à la baisse dans les années 60, sont insuffisantes pour établir une véritable corrélation avec la hausse des émissions anthropiques de CO₂. En fait les mécanismes en jeu sont extrêmement complexes et il est souvent difficile de déterminer l'impact des contre-effets régulateurs : par exemple la hausse des températures, en augmentant l'évaporation, accroît la masse nuageuse et contribue ainsi à diminuer les rayonnements parvenant au sol ; les courants marins, en ramenant des masses d'eaux froides provenant des profondeurs, peuvent également jouer un rôle qui reste à mieux déterminer... Il existe de plus de nombreux autres facteurs que l'effet de serre qui contribuent à expliquer le climat, comme les variations de l'activité solaire ou la position et l'inclinaison de la terre par rapport au soleil.

¹⁵ Chiffres tirés pp. 36-37 de FAUCHEUX Sylvie, NOEL Jean-François, *Les menaces globales sur l'environnement. Op. Cit.*

Les opposants à la thèse de l'accroissement de l'effet de serre ont dès lors beau jeu de crier au montage médiatique, au détournement de fonds de recherche au détriment d'autres thèmes scientifiques tout aussi intéressants, à la remise en cause injustifiée du mode de fonctionnement socio-économique actuel, etc¹⁶.

Concernant les pollutions régionales et globales que constituent les pluies acides et l'effet de serre, les mécanismes en oeuvre restent donc encore entachés d'incertitude. Le travail des scientifiques a surtout permis de se rendre compte de la complexité des interrelations entre les différents phénomènes mis en cause. Derrière la notion de "politique du moindre regret" prônée dans les instances internationales, les acteurs économiques se sont dès lors employés à récupérer les arguments environnementaux qui peuvent jouer en leur faveur et les choix se font ou risquent de se faire plus en fonction des rapports de force en présence que des seuls critères écologiques.

2. La référence au marché et la mesure des courbes de préférence individuelles

Une fois exposés les mécanismes et les conséquences des différentes pollutions atmosphériques et sonores générées, entre autre, par les transports routiers, un problème d'ordre méthodologique se pose en matière d'économie appliquée pour laquelle on doit disposer de quantifications monétaires pour travailler. En effet les liaisons non marchandes dont ces pollutions sont les vecteurs ne permettent pas de disposer d'une valorisation immédiate des enjeux économiques qu'elles représentent.

La méthode d'évaluation la plus orthodoxe en regard de la théorie de l'économie du Bien-Etre consiste à rechercher les courbes de préférence des acteurs économiques pour les biens non échangés sur un marché. Autrement dit on va tenter de déterminer ce qu'ils sont prêts à sacrifier pour continuer à disposer de ces biens, la mesure de ce sacrifice étant établie de préférence de façon monétaire pour permettre des comparaisons plus aisées par la suite. Cette détermination peut se faire de deux manières différentes :

- soit en tentant de retrouver des marchés existants sur lesquels, d'une façon ou d'une autre, ces préférences se trouvent reflétées.
- soit en créant de toute pièce un marché fictif sur lequel on va demander aux agents de se positionner, comme si il existait réellement.

Le champ terminologique utilisé pour désigner ces méthodes est relativement vaste mais il présente la particularité de toujours fonctionner par oppositions. On parle d'évaluations à partir de marchés de substitution, existants, et d'évaluations à partir de marchés contingents ou fictifs. Il est également courant d'opposer méthodes de préférences

¹⁶ Voir par exemple ALLEGRE Claude, *Ecologie des villes,...* Op. Cit. ; LENOIR Yves, *La vérité sur l'effet de serre*. Paris : La Découverte, 1992. TAZIEFF Haroun, *La terre va-t-elle cesser de tourner ?* Paris : Seghers, 1992. 191 p. pp 91-103.

révélées et méthodes de préférences déclarées¹⁷, de révélations implicites ou *a posteriori* et de révélations explicites ou *a priori*...

Cette famille de méthodes d'évaluation fait l'objet d'une série de critiques concernant d'une part la connaissance limitée des individus sur les effets des biens ou services non marchands évalués, et d'autre part les problèmes posés par l'agrégation des courbes d'utilité individuelles pour obtenir une utilité collective. Ces points seront abordés après la présentation des différentes méthodes et de l'exposé de leurs résultats en matière de transports.

2.1. Evaluation à partir de marchés de substitution

Pour retrouver la valeur attribuée aux biens ou services qui s'échangent hors marché, la première solution consiste à en rechercher un reflet à travers des indicateurs économiques.

Certains comportements marchands peuvent parfois avoir directement comme objectif d'obtenir un bien ou un service non marchand. C'est le cas des dépenses de protection phonique des ménages pour parvenir à un certain niveau de calme à domicile. C'est également le cas des dépenses que l'on peut être prêt à consentir pour se rendre en un lieu donné et bénéficier ainsi des opportunités de loisirs qu'il offre.

Dans d'autres cas la valeur du bien ou service non marchand n'a qu'une influence limitée, une multitude d'autres facteurs entrant en compte. C'est par exemple le cas dans l'immobilier où le prix d'un logement est fonction de ses caractéristiques propres, de sa localisation et aussi de la qualité de son environnement sonore et atmosphérique. Pour parvenir à déterminer l'impact d'un facteur particulier on passe alors par des méthodes statistiques de calcul de régression multiple.

On peut d'ores et déjà souligner que la famille de méthodes d'évaluation issues de cette logique peut donner des résultats très hétérogène suivant la relation entre le bien considéré et le marché de substitution choisi.

2.1.1. Les dépenses consenties pour obtenir un bien ou service non marchand

L'exemple classique de ce type d'évaluation concerne les dépenses d'isolement phonique par les ménages résidents à proximité d'une voie à fort trafic. Cette méthode a de fait été mise au point pour évaluer le coût du bruit à proximité d'un aéroport¹⁸.

¹⁷ Notons que les "préférences révélées" font en fait référence à un champ plus vaste en touchant également les biens ou services échangeables sur un marché, pour lesquels leur prix a obligé les consommateurs à faire un choix, à acheter telle ou telle quantité d'un bien au détriment d'autres, et à révéler ainsi leurs préférences. Par extension, tout recueil de données concernant des comportements existants (<< dans telle situation que faites vous ?>>, ou mieux << qu'avez vous fait ?>>) a droit au titre de "préférences révélées" par opposition à des enquêtes sur des déclarations d'intention (<< dans telle situation que feriez vous ?>>) qualifiées de "préférences déclarées".

¹⁸ Cf. STARKIE D.N.M., JOHNSON D.M., *The Economic Value of Peace and Quiet*. Lexington : Saxon House, 1975.

Le principe repose sur un raisonnement simple. Dans le cas du bruit par exemple, le "bien" que l'on cherche à évaluer est le niveau de calme à domicile. Les dépenses totales engagées par une personne pour réduire le niveau sonore provenant de l'extérieur reflètent dès lors la valeur qu'elle attache à ce bien, sachant qu'elle va avoir tendance à continuer à se protéger jusqu'à ce qu'une dépense supplémentaire ne lui apporte pas un surcroît de calme suffisant. En évaluant le montant des protections phoniques en liaison avec la variation induite du niveau sonore au domicile, on obtient une estimation de la valeur du calme (ou du coût du bruit) pour cette personne.

La méthode va donc consister à établir des niveaux moyens de dépense en fonction des niveaux d'exposition au bruit pour permettre d'extrapoler, ensuite, le coût induit pour la collectivité par le trafic d'un axe routier, un aéroport, etc.

Un autre exemple illustrant cette logique d'évaluation concerne la méthode dite "des voyages" mise au point aux Etats-Unis pour évaluer l'attrait de certains sites naturels de loisirs¹⁹. Elle consiste à établir pour chaque individu les dépenses qu'il consent pour se rendre, rester et jouir du site : coût du déplacement, temps total consacré, achats de matériel (équipement de pêche, de randonnée, etc.), frais sur place. Si une caractéristique du site est ensuite modifiée, on peut observer des variations de comportement dont la traduction monétaire en terme de dépenses correspond à la valeur attachée à cette caractéristique. Ainsi la baisse d'attractivité d'un lieu liée à une hausse de la pollution se traduit, en termes économiques, par la baisse des dépenses de chaque individu pour s'y rendre et s'y détendre.

Si ce type d'évaluation est apparemment simple dans son principe, il faut bien préciser qu'il pose des problèmes méthodologiques importants lors de sa mise en oeuvre et que "cette simplicité se fait toutefois au prix d'un manque d'exactitude"²⁰. Il suppose en effet que ce qui est mesuré représente le pendant marchand exact, ni plus ni moins, du bien ou service non marchand que l'on veut évaluer :

- La définition des dépenses mesurées doit permettre de retrouver en creux le bien ou service non marchand que l'on veut évaluer. Ainsi les dépenses de protection phoniques ne donnent qu'une évaluation du consentement à payer pour le calme à domicile et ne représentent pas l'ensemble des dommages liés au bruit, à l'extérieur, au bureau, à l'école...
- Les dépenses mesurées doivent être exclusivement destinées à obtenir le bien ou service que l'on veut évaluer. Dans le cas de la méthode des voyages par exemple, il ne faut pas que le déplacement soit l'occasion de réaliser une autre activité que celle liée au site de destination. De même les mesures d'isolation phonique (survitrage, double vitrage, double fenêtre...) ont également un impact important en matière d'isolation thermique. Il devient alors très vite difficile de faire la part des choses et de déterminer le poids des différents facteurs jouant sur les dépenses consenties.
- Les dépenses mesurées doivent également couvrir la totalité des dépenses possibles liées à l'obtention du bien ou service non marchand. Oublier l'une

¹⁹ Cf. CLAWSON M., KNETCH J.L., *Economics of Outdoor Recreation*. Washington D.C. : Resources for the Future Inc., 1966.

²⁰ Cf. p. 80 de BARDE Jean-Philippe, *Economie et politique de l'environnement*. Op. Cit.

d'entre elles peut fausser les résultats, notamment si elle correspond à un poste important et n'évolue pas de la même façon que les autres.

Quelques imprécisions n'empêchent pas de fixer des ordres de grandeur. Cependant les contraintes implicitement posées par cette méthode d'évaluation peut obliger à un cumul d'approximations qui rendent ensuite les résultats très imparfaits. Par exemple dans le cas du bruit du trafic routier pour lequel cette méthode a été utilisée, l'objet d'étude (le niveau de calme recherché à domicile) ne reprend qu'un aspect de ce qui intéresse (les dommages liés au bruit du trafic en général, à domicile comme au bureau, à l'école ou à l'extérieur), ses contours sont flous car il est souvent difficile de le dissocier d'autres facteurs (les protections sont phoniques *et* thermiques) et les ménages ont parfois la possibilité de le rechercher par d'autres moyens que ceux qui sont sensés représenter la valeur qu'ils y attachent (ils peuvent avoir la possibilité de déménager ou de dédier l'usage des pièces en fonction du besoin de calme nécessaire aux différentes activités à domicile).

Du fait de ces problèmes il n'existe pas à notre connaissance de travail récent qui reprenne ces types de méthodes en matière de pollution atmosphérique ou sonore du trafic routier. On peut simplement évoquer les résultats de l'enquête nationale sur le bruit routier menée par l'INRETS en 1986. Ils montrent que parmi les ménages dont le logement est équipé de protections phoniques, 57% d'entre eux ont personnellement assumé ces dépenses pour un montant moyen de 11 600 F86. Cependant les auteurs du rapport constatent immédiatement qu'il est difficile d'attribuer ces dépenses à la gêne sonore : "les résultats (...) laissent penser que [même en zone urbaine] ce sont également des motivations d'économie d'énergie qui expliquent ce type de comportement. En fait la réglementation relative à l'isolation thermique dans l'habitat nouveau ainsi que les avantages fiscaux accordés aux dépenses d'isolation thermique sur l'habitat ancien apparaissent comme bien plus explicatives que les niveaux sonores auxquels sont soumises les populations".²¹

2.2.2. La méthode des prix hédonistes

La seconde méthode d'évaluation consiste à se pencher directement sur un marché existant et à retrouver parmi les différents facteurs pouvant jouer sur le prix du bien ou service considéré l'influence du bien ou service non marchand que l'on veut évaluer. Le marché de l'immobilier sert souvent de référence pour ce type de travail.

La valeur des biens immobiliers ne dépend pas seulement de leurs caractéristiques propres, elle varie aussi en fonction de "biens ou services joints", présents dans leur environnement : des services à proximité, de l'accessibilité aux centres d'activité, de la tranquillité du site, de l'état de la pollution atmosphérique, etc. Le principe de la méthode d'évaluation par les "prix hédonistes" est alors de parvenir à isoler l'impact spécifique d'un facteur parmi l'ensemble des facteurs qui jouent un rôle dans la constitution des prix des biens immobiliers. Le marché du foncier et, par extension, ceux de l'immobilier ou du logement, sont donc utilisés comme substituts aux marchés inexistantes de certains biens ou services dont la qualité ou la quantité varient dans l'espace.

²¹ Cf pp. 84-85 de MAURIN M., LAMBERT J., ALAUZET A., *Enquête nationale sur le bruit des transports en France. Op. Cit.*

De manière plus formelle, cette méthode consiste tout d'abord à définir un ensemble d'attributs quantifiables supposés caractériser un type de bien immobilier - soit $A_1, \dots, A_i, \dots, A_n$ ces attributs. Si l'on dispose d'un échantillon suffisamment important de biens de ce type, chacun d'entre eux étant caractérisé par son prix P et par une valeur précise pour chaque attribut A_i , on peut alors calculer la corrélation entre le prix et les attributs. On obtient un espace de régression de type :

$$P = a_1 A_1 + \dots + a_i A_i + \dots + a_n A_n$$

où chaque coefficient a_i peut être interprété comme le prix unitaire de l'attribut A_i ou "prix hédoniste" de cet attribut. Pour retrouver la valeur monétaire d'un bien ou service non marchand, il suffit donc de le définir comme attribut d'un bien immobilier. Si la valeur physique de ce bien ou service non marchand varie entre les observations - *i.e.* il n'est pas réparti de façon homogène sur le territoire étudié - le coefficient a_i obtenu est non nul et représente son prix unitaire, c'est à dire la somme qu'en moyenne chaque individu est prêt à payer pour en disposer d'une unité supplémentaire.

Une des principales difficultés rencontrées dans la mise en oeuvre de cette méthode repose sur la définition des attributs et les relations qui existent entre eux. Tout d'abord, il est nécessaire que la définition des attributs n'évince pas de facteurs explicatifs importants, évitant ainsi des raisonnements "toutes choses égales par ailleurs" trop hasardeux. Par exemple, ne prendre en compte que le niveau de bruit comme service joint aux biens immobiliers ne permettra pas d'expliquer d'éventuels prix faibles lorsque le fond sonore est réduit, témoignant plus d'une absence d'activités aux alentours que des avantages liés au calme. Ce même exemple illustre aussi les problèmes de liaisons entre variables explicatives, obligeant à un grand nombre d'observations pour pouvoir déterminer de manière statistiquement pertinente le poids de chaque attribut.

Cette méthode est couramment utilisée pour établir des évaluations monétaires des nuisances engendrées par le bruit du trafic routier. Les résultats ont considérablement évolués depuis ses débuts, tant du fait de progrès méthodologiques que de la croissance du trafic : les taux de dépréciation de l'immobilier liés au bruit du trafic routier étaient voisins de 0 dans les années 60, très dispersés suivant les études, entre 0,3 et 0,8% par dB supplémentaire, dans les années 70 et convergents autour de 1% par dB depuis la fin des années 80²². Reprises par E. Quinet et ramenées en pourcentage du PNB du pays correspondant, les diverses études utilisant cette méthodes donnent le résultats suivants²³ :

²² Cf. pp. 60-61 de LAMURE Claude, LAMBERT Jacques, *Impact des transports terrestres sur l'environnement - Méthodes d'évaluation et coûts sociaux*. Bron : Synthèse INRETS n°23, septembre 1993. 101 p.

²³ QUINET Emile, "Les coûts sociaux des transports : évaluation et liens avec les politiques d'internalisation des effets externes". *Document de travail n°1 du séminaire conjoint OCDE/CEMT sur l'internalisation des coûts externes des transports*. Paris, 30 Septembre - 1^{er} Octobre 1993. 51 p.

Nous avons rectifié deux sources bibliographiques par rapport au tableau initial en citant Tichy à la place de Hansson et Markham ainsi que Soguel pour Jeanrenaud (même si ces derniers ont en fait largement travaillé ensemble) :

TICHY G., *Die Volkswirtschaftlichen Kosten von Schiene und Strasse*. Cité par HANSSON L., MARCKHAM J., *Internalization of External Effects in Transportation*. Paris : UIC-C6 strategic planning committee, Février 1992. 111 p.

SOGUEL Nils, *Evaluation monétaire des atteintes à l'environnement*. *Op. Cit.*

Tableau 3 : évaluations du coût du bruit par la méthode des prix hédonistes dans l'immobilier

Pays	Source	Année d'estimation	Résultat en % du PNB
Pays-Bas	Opschoor	1986	0,02
France	Lambert	1986	0,08
Autriche	Tichy	?	0,1
Norvège	Nielsen	1987	0,3
Suisse	Soguel	1991	0,3
Suède	Hansson et Markham	1992	0,4

Source : Quinet, 1993.

2.2. Evaluation à partir de marchés fictifs

La seconde manière de retrouver la valeur attribuée aux biens ou services qui s'échangent hors marché est de créer de toute pièce un marché fictif concernant le bien à évaluer. Ceci se traduit par la mise en oeuvre d'une enquête au cours de laquelle on demande aux individus d'évaluer ce qu'ils consentent à payer pour recevoir un avantage ou éviter une perte. Le plus souvent, ces enquêtes sont basées sur un processus cumulatif avec une augmentation progressive de l'effort à fournir par l'enquêté, permettant ainsi de repérer le moment où il estime que le rapport entre coût et avantages du bien à évaluer n'est plus intéressant pour lui. Une autre possibilité est de faire classer différentes combinaisons payantes de biens ou services non marchands en fonction des préférences, l'objectif étant toujours de retrouver les dispositions à payer ou à accepter de chacun.

Cette méthode consiste donc à élaborer une procédure expérimentale permettant de simuler quelque chose qui n'existe pas (un lieu d'échange marchand pour un bien ou service non marchand) de manière suffisamment vraisemblable pour que les personnes interrogées participent réellement au jeu et suffisamment rigoureuse pour que les biais propres à ce type d'enquête soient correctement maîtrisés, tant au niveau de la formulation des questions que du jeu propre des enquêtés et de l'exploitation statistique des résultats²⁴.

De plus la formulation des questions peut également conduire à quatre éclairages différents du bien à évaluer, d'une part suivant que l'on teste une amélioration ou une dégradation et d'autre part selon que l'enquêté doit révéler sa disposition à payer ou sa disposition à accepter un dédommagement. On peut mesurer :

²⁴ "Les biais éventuels découlent de la *nature hypothétique* de la méthode. Lors de la conception du questionnaire déjà, il faut être attentif à un double problème : d'abord comment amener l'enquêté à associer une valeur à l'atteinte considérée, ensuite obtenir qu'il révèle cette valeur sans la biaiser. Les principaux biais qui en découlent sont *informationnel* et *hypothétique* (le manque de renseignements ou leur mauvaise qualité ne permettent pas à l'individu d'effectuer un choix cohérent), *instrumental* et *d'initialisation* (le processus d'enchère ou l'instrument de paiement faussent l'estimation), *stratégique* (l'enquêté tente d'influencer en sa faveur les résultats par des réponses mensongères).

L'exploitation des informations pose également problème. Un mauvais *échantillonnage*, des *incitations malvenues* de l'enquêteur, des *non-réponses* mal distribuées parmi les groupes interrogés, une inférence hasardeuse risquent de biaiser le calcul de la valeur collective pour une population plus large que celle interrogée."

Cf. p. 84 de SOGUEL Nils, *Evaluation monétaire des atteintes à l'environnement*. Op. Cit.

- le consentement à payer pour obtenir une amélioration,
- le consentement à payer pour éviter une dégradation,
- le consentement à accepter un dédommagement pour renoncer à une amélioration,
- le consentement à accepter un dédommagement pour subir une dégradation.

Dans les faits on se rend compte que ces quatre types de question peuvent faire apparaître des divergences très importantes, donnant des mesures variant en moyenne d'un facteur 3 à 5 pour un même bien ou service non marchand²⁵. On s'aperçoit notamment que les mesures effectuées sur la base d'un consentement à payer ont systématiquement tendance à sous estimer les évaluations alors qu'à l'inverse le consentement à accepter tend à leur surestimation.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces écarts. Implicitement ou explicitement, le consentement à accepter un dédommagement confère aux personnes enquêtées un "droit de propriété", pouvoir qu'elles peuvent considérer comme inaliénable et donc refuser de rétrocéder même à un prix élevé ("cela n'a pas de prix !"). On peut également expliquer ces différences par une recherche délibérée d'un risque minimal - un tient vaut mieux que deux tu l'auras -, conduisant là encore à préférer conserver ce dont on dispose même contre un fort dédommagement que payer pour une amélioration ou une dégradation évitée à venir et donc incertaines. On peut aussi noter qu'il existe une "dissonance cognitive" entre ce que l'on dispose et ce que l'on pourrait avoir : le dédommagement pour une perte devra être plus élevé que la valeur ressentie pour un gain de grandeur *a priori* équivalente. Enfin ceci peut être encore renforcé s'il n'existe pas de bien ou service de substitution pour le bien ou service évalué (par quoi remplacer la tranquillité ?) : il est alors très difficile d'accepter de le voir diminuer²⁶.

Utilisées dans le domaine du bruit routier, ces méthodes donnent des valeurs très différentes selon le type de question posée. L'enquête INRETS de 1986 indique que les automobilistes seraient prêts à payer en moyenne 1,5% plus cher leur véhicule pour une réduction de ses émissions sonores ce qui, rapporté au total annuel des ventes d'automobiles représente 3 milliards de francs, soit 0,06% du PNB de l'époque. A l'inverse, le consentement à payer pour que baisse le niveau de bruit lié au trafic automobile a pu être estimé à 1,4% du PNB 1990 de l'Allemagne réunifiée²⁷. Entre les deux résultats se trouve posée la question de qui dépense...

On a pu également appliquer ces méthodes à la pollution de l'air pour calculer un consentement à payer pour un air plus pur et en déduire la part du trafic routier au prorata de sa contribution dans les niveaux d'émissions. Une étude réalisée à Berlin de 1983 à 1985 et extrapolée à l'ensemble de la RFA fournit un consentement à payer de 48 milliards de

²⁵ Chiffre établi sur la base d'une quinzaine d'études listées par CUMMINGS RG, BROOKSHIRE DS, SCHULTZE WD (eds), *An Assessment of the Contingent Valuation Method*. New Jersey : Rowman & Allanheld, 1986. Cité p. 92 par SOGUEL Nils, *Evaluation monétaire des atteintes à l'environnement*, Op. Cit.

²⁶ *idem* pp. 91-94

²⁷ WILLEKE R., WEINBERGER M., THOMASSEN G., *Coût du bruit en RFA*. Berlin : 1992, projet de recherche 101 03 110/05 pour le compte de l'Office Fédéral de l'Environnement.

DM85 dont 12 imputables aux transports, soit 0,66% du PNB 1985 de la RFA²⁸. En 1990 PLANCO Consulting estimait ce consentement à 50 milliard de DM dont 23 imputables aux transports, soit environ 1% du PNB 1990²⁹.

2.3. Critiques de la méthode

Les différentes méthodes d'évaluation qui viennent d'être évoquées sont les plus orthodoxes au regard de la théorie économique du Bien-Etre. Leur résultat final, c'est-à-dire la définition du prix d'un bien ou service non marchand, devrait permettre la mise en oeuvre de politiques susceptibles de se rapprocher d'une situation économique optimale. Cependant l'exposé systématique des problèmes méthodologiques rencontrés montre pourquoi les évaluations obtenues restent approximatives et divergentes. De plus la diversité de ces problèmes est liée aussi au fait que d'une méthode à l'autre la nature de ce qui est évalué change : résoudre les questions d'approximation ne ferait guère converger les résultats. Ce constat, qui sera récurrent par la suite, doit être souligné pour bien comprendre qu'en matière d'effets externes c'est à dire liés à des variations quantitatives ou qualitatives des biens ou services non marchands, il n'existe pas *une* définition correcte et que la recherche de l'optimum se trouve donc sujette à caution.

En plus des difficultés déjà énoncées, il est également nécessaire d'évoquer quelques problèmes d'ordre généraux auxquels ces méthodes se trouvent confrontées.

Le premier concerne les hypothèses permettant de définir un marché dans le cadre de la théorie du bien-être. Pour établir des évaluations correctes, les agents économiques doivent disposer d'une connaissance parfaite des coûts et des avantages liés aux biens ou services concernés. Or il est certain par exemple que les individus n'ont pas une conscience immédiate et totale des conséquences du bruit et de la pollution. Le prix déclaré ou révélé qu'ils attachent à l'air pur et à la tranquillité s'en trouve diminué d'autant. De même le marché doit être complètement fluide, permettant ainsi à chacun de révéler ses préférences dans les mêmes conditions : par exemple la possibilité plus ou moins aisée de déménager (du fait de contraintes financières sociales ou culturelles différentes) fait que les évaluations du bruit par la méthode des dépenses de protection ou les prix hédonistes ne prennent pas en compte chaque individu (et ses caractéristiques socio économiques, âge, sexe, revenu, niveau de scolarité, culture, etc.) avec la même intensité.

Le second concerne l'agrégation des courbes d'utilité individuelles pour obtenir la courbe d'utilité collective nécessaire pour définir une situation économiquement optimale.

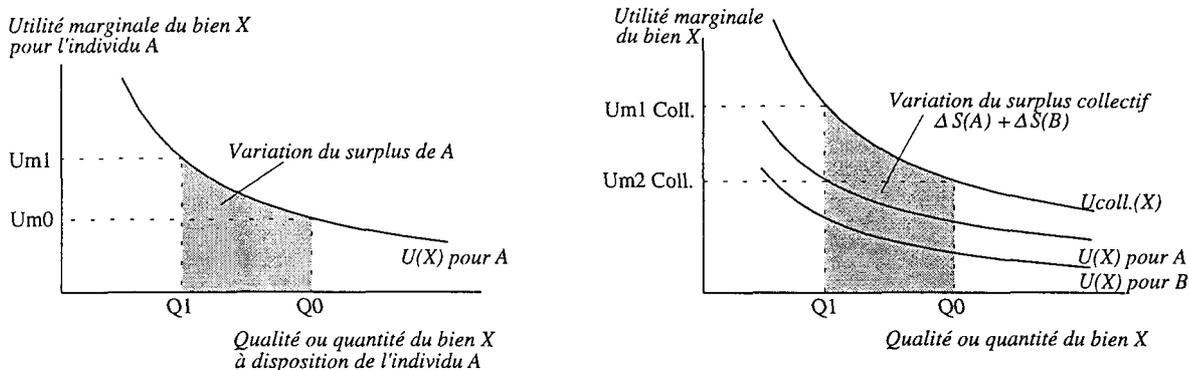
²⁸ SHULTZ W., *Bessere Luft, was ist uns wert ? Eine Gesellschaftliche Bedarfs-Analyse auf der Basis Individueller Zahlungs-Bereitschaft*. Berlin : Université Technique de Berlin, 1986.

Ce travail est assez souvent cité (Barde 1991, Lamure et Lambert 1993) car, entre autres, il souligne les fortes divergences de consentement à payer en fonction du degré d'information des personnes enquêtées (+70% pour une personne "informée" de l'état et des risques de la pollution par rapport à une personne "non informée").

²⁹ PLANCO Consulting, *Externe Kosten des Verkehrs : Shierre, Strasse, Binenschiffart*. Rapport pour le compte de la DB, Essen, 1990. Rapport cité par ARABEYRE Agnès, CROZET Yves (sous la direction de), GUIHERY Laurent, NICOLAS Jean-Pierre, PEREZ Marc, SANTI Gérard, *Les effets externes en milieu urbain : de la valorisation à l'internalisation*. Recherche pour le compte de la SNCF, Direction de la stratégie et du plan. Lyon : LET, novembre 1993. 171 p.

Cette agrégation se fait par simple addition, comme dans l'exemple ci-dessous reprenant le cas simple de deux individus A et B.

Graphique 6 : l'agrégation des courbes d'utilité individuelles et le calcul du surplus collectif



D'une part une telle agrégation revient à supposer qu'une même variation du niveau de satisfaction ou d'insatisfaction doit pouvoir être traduite par un consentement à payer ou à accepter identique pour tous les individus enquêtés. Ceci signifie que l'on suppose que chacun attribue la même valeur à l'argent quel que soit, entre autre, son niveau de revenu.

D'autre part la courbe d'utilité collective obtenue est le résultat de courbes d'utilité individuelles qui peuvent être très différentes. Dans les faits, une variation donnée du niveau du bien non marchand considéré peut très bien entraîner un variation de satisfaction très forte pour l'un, beaucoup plus faible pour l'autre, ce qui n'apparaît pas sur la courbe finale. A la limite, la seule considération de cette courbe pourrait conduire à une mesure qui bénéficie énormément à quelques uns tout en étant source d'une légère insatisfaction pour tous les autres. Sans pousser à cet extrême souvent source immédiate de conflits, il est indéniable que raisonner sur une courbe d'utilité collective ne répond en rien à la question de la répartition des surplus dégagés et des écarts relatifs qui peuvent se creuser au sein de la population.

Ces deux réserves peuvent être faites pour l'ensemble des méthodes d'évaluation déjà évoquées, même si elles se posent de manière différente suivant les cas. Que l'agrégation soit opérée par l'analyste (évaluations sur marché fictif ou par les dépenses consenties sur des marchés existants) ou par le marché lui-même (la méthode des prix hédonistes donne un résultat directement agrégé), les questions de la valeur de l'argent et de la répartition des surplus restent posées. Cela ne signifie pas que les méthodes d'évaluation des biens non marchands basées sur la révélation des préférences sont à rejeter. Elles peuvent tout à fait constituer un outils appréciable à condition de les situer dans un contexte plus large, où l'on reste conscient que "le choix d'un optimum particulier dépend de jugements de valeur concernant la répartition des richesses, eux même fondés sur une certaine conception de la justice [sociale]"³⁰.

³⁰ Cf. p. 70 de CROZET Yves, *Analyse économique de l'Etat*. Paris : Armand Colin, Coll. Cursus, 1991. 189 p.

3. Les évaluations macroéconomiques

Plutôt que de rester attachées à la référence au marché et de tenter de retrouver des prix sur des marchés connexes ou fictifs, d'autres méthodes d'évaluation vont établir des coûts globaux légitimant le rôle tutélaire de l'Etat - ou reconnaissant simplement son pouvoir.

Dans le cadre de choix budgétaires rationnels on peut présenter une démarche volontaire et explicite de l'Etat où les dépenses engagées sont mises en regard d'objectifs affichés. Par la mise en lumière des hypothèses de calcul qu'il implique, un tel processus de décision rejoint la logique de l'évaluation par les préférences déclarées. Simplement, au lieu de recueillir par enquête les points de vue des individus, c'est l'Etat représentant de la collectivité qui explicite directement ses choix.

A l'inverse on peut faire des évaluations *a posteriori* des préférences collectives que la puissance publique révèle à travers les mesures qu'elle prend. Nous verrons alors que la volonté de cohérence affichée dans le cas précédent ne se retrouve pas forcément.

3.1. Les démarches explicites

De nombreuses évaluations se font sans référence directe aux préférences individuelles. Lorsqu'elles relèvent d'une volonté d'estimation *a priori* des coûts à un niveau global et collectif, elles sont souvent l'occasion d'ouvrir un dialogue entre l'économie et d'autres disciplines. Schématiquement il existe deux grandes façons de procéder :

- un recensement le plus complet possible des dommages causés par une pollution est effectué par divers spécialistes avant que "l'économiste" n'intervienne pour établir leurs coûts ;
- une confrontation d'experts de différentes disciplines conduit à définir des objectifs de réduction des pollutions et, dans un deuxième temps, à estimer le coût des mesures à prendre pour atteindre ces objectifs compte tenu de la disponibilité des technologies existantes.

Entre ces deux méthodes, on passe d'une évaluation du coût des dommages à une évaluation du coût pour les éviter. On passe également d'une prévalence de l'économie à la recherche d'un consensus large entre différentes disciplines. Ajoutons que pour éviter à ces méthodes de déboucher sur des dynamiques trop éloignées de celles de la société civile, on leur adjoint la nécessité d'une validation politique, transformant ainsi les coûts en valeurs tutélaires légitimées par les représentants élus de la collectivité.

3.1.1. L'évaluation du coût des dommages

a) L'usage fréquent d'une relation physique initiale entre émissions et dommages

L'évaluation du coût des dommages fait souvent appel, dans un premier temps, à l'établissement d'une relation physique entre une émissions et les dommages qu'elle

provoque. L'objectif est tout d'abord d'obtenir un schéma explicatif cohérent et relativement complet des liens qui existent entre une pollution et ses effets. Il est aussi de calculer des relations de type "dose-effet", c'est-à-dire de mesurer la liaison entre l'intensité de cette pollution et son niveau d'impact sur la santé, les matériaux, les végétations, les milieux naturels, etc. Ce type de travail fait appel à de nombreux spécialistes de différentes disciplines, statisticiens, épidémiologistes, écologues, etc.

Les évaluations monétaires qui sont ensuite établies sont souvent qualifiées de "indirectes" car les dommages ne sont pas évalués en faisant directement référence à des prix, qu'ils soient fictifs ou réels. Par contre l'avantage de ce détour tient à une prise en compte beaucoup plus complète des divers effets, les perceptions individuelles sur lesquelles sont basées les évaluations précédentes reposant souvent sur une connaissance incomplète des phénomènes. En matière de bruit par exemple on a pu estimer après monétarisation des divers effets recensés que le coût de la gêne non perçue est 1,5 fois supérieure à celle de la gêne perçue³¹.

Les valorisations monétaires qui suivent (parfois) ces relations dose-effet peuvent être de toutes natures. Elles se réfèrent le plus souvent à des évaluations comptables en terme de perte de valeur ajoutée ou à l'estimation des coûts d'évitement. Rien n'empêche cependant de reprendre certaines évaluations basées sur les préférences individuelles pour certains effets spécifiques, comme les pertes touristiques liées à une dégradation de l'environnement³².

b) Valeur ajoutée non réalisée, dépenses en "bout de ligne", pretium doloris

L'évaluation des dommages s'effectue souvent en terme de valeur ajoutée non réalisée. Lorsque c'est la productivité du capital foncier qui est affectée (par exemple pertes dues à une pollution dans le domaine agricole), cette valeur ajoutée perdue est estimée équivalente à la production perdue pondérée par sa valeur sur le marché. Des corrections sont parfois apportées, tenant compte de l'impact qu'aurait eu cette production supplémentaire sur les prix du marché et des biais introduits par des subventions éventuelles de l'Etat.

Lorsque c'est la productivité humaine qui est concernée, la mesure se fait sur la base du revenu du travail. Par exemple les effets sur la santé vont se traduire en heures de travail perdues, pondérées de leur taux de salaire horaire. Une telle méthode ne va pas sans soulever des questions d'ordre éthique lorsqu'il s'agit, par exemple, d'évaluer le coût de l'insécurité routière et de prendre en compte les décès des personnes : établir ce calcul sur la base de la perte de production actualisée résultant d'un décès, suscite obligatoirement un débat qui ne peut être dépassé que lorsqu'on admet que même si la vie n'a pas de prix, il faut définir les dépenses que l'Etat peut affecter à la sécurité, qu'il ne pourra pas mettre

³¹ Cf. p. 44 de LAMURE Claude, LAMBERT Jacques, *Impact des transports terrestres sur l'environnement. Méthodes d'évaluation et coûts sociaux*. Bron : Synthèse INRETS n°23, Septembre 1993. 101 p.

³² Un rapide aperçu de ces évaluations peut être trouvé pp. 94-98 de BARDE Jean-Philippe, *Economie et politique de l'environnement. Op. Cit.*

ailleurs³³. On passe ainsi d'une notion de "valeur de la vie" à l'idée d'un consentement collectif à payer pour diminuer des risques.

Dans le domaine de la santé publique, les relations "dose-effet" établies sur la base d'études épidémiologiques débouchent également souvent sur l'évaluation des coûts sanitaires de la morbidité. Les dommages liés à la pollution ou à l'insécurité se mesurent alors en "bout de ligne", à partir du coût total des soins.

Enfin en matière de risques (insécurité routière, risques professionnels...), les évaluations reprennent souvent la notion de *pretium doloris* utilisée par les tribunaux pour prendre en compte la douleur éprouvée par la victime en cas d'accident grave, par ses proches en cas de décès.

Ces trois mesures sont de natures très différentes, comme le laissent entrevoir leurs positions respectives dans le bilan de la comptabilité nationale : les coûts de réparation en bout de ligne figurent en positif dans le Produit Intérieur Brut, la valeur ajoutée non réalisée correspond à une valeur qui aurait dû apparaître s'il n'y avait pas eu de dommage tandis que le *pretium doloris*, par nature, n'a pas vocation à être présent dans les comptes de la nation qui assimilent richesse et valeur ajoutée des emplois d'un pays. Elles restent cependant complémentaires et c'est leur combinaison qui permet bien souvent d'établir une évaluation du coût des dommages.

Dans le domaine des transports routiers les évaluations prenant en compte ces types de coûts (coût des réparations + valeur ajoutée non réalisée + *pretium doloris*) sont caractéristiques des questions d'insécurité abordées au travers de données d'assurances, de données macroéconomiques et des jugements des tribunaux, notamment en France et en Allemagne. Par contre cette méthode est peu reprise telle quelle pour évaluer les dommages liés au bruit et sert plutôt à enrichir d'autres travaux. Par exemple l'étude de Weinberger³⁴ la reprend en partie pour prendre en compte dans ses évaluations de consentement à payer les problèmes de santé non perçus par les enquêtés (pour rappel, les dommages totaux sont évalués à 1,4% du PNB90 allemand). De même Wicke complète ses évaluations en matière de pertes de valeurs immobilières par les pertes de productivité induites par le bruit et obtient une estimation des dommages équivalents à 2% du PNB87 de l'ex-RFA³⁵. Ces deux estimations du coût du bruit sont, de loin, les plus élevées parmi toutes celles qui sont évoquées dans ce chapitre. En matière de pollution atmosphérique ce type d'évaluation est souvent utilisé pour les dommages liés à un domaine précis, santé, dégradation des matériaux ou de la végétation. Comme dans le cas du consentement à payer, les coûts imputables aux transports sont ensuite calculés au prorata de leurs émissions. Sur ce point,

³³ C'est cette logique qui est suivie en France pour prendre en compte la sécurité dans l'évaluation des projets routiers : une valeur du prix de la vie humaine est fixée à partir de calculs fondés sur la méthode du "capital humain compensé" (perte de production moyenne liée à un décès), justifiée par la nécessité de la prise en compte de la sécurité dans les évaluations. Ce mode de calcul est retenu par défaut en arguant (paradoxalement) des difficultés pratiques et théoriques de mise en oeuvre des méthodes économiques traditionnelles de révélation des préférences et de la concordance des résultats observés par ailleurs. La valeur retenue est de 3,6 millions de francs pour une personne tuée (370 000 francs pour un blessé grave, 200 000 pour un blessé moyen, 79 000 pour un blessé léger). Cf. pp. 40-42 de Commissariat Général du Plan (Groupe présidé par Marcel BOITEUX), *Transports : pour un meilleur choix des investissements*. Paris : La Documentation Française, novembre 1994. 131 p.

³⁴ WILLEKE R., WEINBERGER M., THOMASSEN G., *Coût du bruit en RFA*. Op. Cit.

³⁵ L'étude "WICKE" est citée p. 13 par QUINET Emile, "Les coûts sociaux des transports : ..." Op. Cit.

la synthèse de Quinet³⁶ permet d'obtenir le tableau suivant (seules les études établissant un coût total sont reprises ici) :

Tableau 4 : coûts de la pollution atmosphérique locale et régionale liée aux transports

Etude	Pays	Année	Santé	Dégâts matériels	Végétation	Total % du PNB
Gunnarson et Leeksell	Suède	1986	0,02-0,06	0,00-0,03	0,00-0,02	0,03-0,11
Bouladon	UK	1991				0,15-0,35
Planco	Allemagne	1990	0,07-0,18	0,05-0,09	0,13-0,21	0,25-0,48
Grupp	Allemagne	1986	0,11-0,42	0,05-0,06	0,03-0,15	0,19-0,63
EcoPlan	Suisse	1992	0,14	0,13	0,15	0,42
Infras	Suisse	1992	0,01-0,03	0,07-0,16	0,16-0,45	0,24-0,64
Himanen et <i>alii</i>	Finlande	1989				0,23-0,7
Deakin	USA	1990				0,48
VROM	Pays-Bas	1985	0,16-0,29	0,08-0,13	0,14-0,18	0,38-0,6
Pillet	Suisse	1988	0,02-0,06	0,21	0,18-0,41	0,41-0,68
Mautynen	Finlande	1988				0,2-1,2
UPI	Allemagne	1991	0,59	0,07	0,26-0,41	0,92-1,05

Source : Quinet, 1993.

3.1.3. Contraintes non économiques et coûts d'évitement.

La mesure des coûts d'évitement correspond à la recherche des moyens de protection existants face à un dommage donné et au calcul des coûts de leur mise en oeuvre. Suivant les cas, on calculera le coût de mise en place de nouvelles technologies réduisant une pollution à sa source (surcoûts liés aux pôts catalytiques) ou le coût d'installation d'infrastructures de protection collectives ou individualisées (murs anti-bruit le long d'un axe routier ou fenêtres avec double-vitrages). Deux arguments sont parfois utilisés pour rejeter une évaluation économique par les coûts des dommages au profit d'une mesure de l'évitement :

- lorsqu'un tel calcul est très difficile à établir du fait de problèmes d'ordre méthodologique, on peut s'interroger sur la pertinence des résultats obtenus ;
- on peut estimer que certains problèmes ne relèvent pas de l'économie - même si celle-ci est appelée à en mesurer monétairement les contraintes qui en découlent.

On a alors recours aux coûts d'évitement des dommages en lieu et place des coûts des dommages, même si la nature de l'évaluation est radicalement différente entre les deux cas. Considérer que les coûts des dommages ne peuvent être que trop approximatifs conduit à se contenter du calcul des coûts d'évitement comme un pis-aller. Un seuil de

³⁶ *idem* p. 17.

dommages à ne pas dépasser est alors fixé parce qu'il est nécessaire à la détermination de l'intensité des mesures de protection³⁷.

L'autre démarche consiste à définir a priori des objectifs de réduction des dommages et à ne prendre en compte qu'ensuite les conséquences économiques de la mise en oeuvre des mesures permettant de les atteindre. Les contraintes sont donc considérées en dehors du champs de l'économie et l'évaluation monétaire des dommages correspond alors à leurs coûts d'évitement.

Sans fixer de prix aux biens ou services concernés, cette manière de procéder permet d'intégrer dans le calcul économique les contraintes liées à ce que certains économistes ont appelé leur "valeur d'existence"³⁸. Elle conduit également à ouvrir un espace de dialogue entre l'économie et d'autres disciplines, le politique servant d'arbitre et décidant en dernière instance des choix à opérer. Des objectifs écologiques peuvent être fixés, des questions éthiques peuvent être résolues, là où le calcul économique aurait conclu au laisser-faire ou à une action de moindre envergure. La décision politique entérine ensuite les choix, permettant ainsi à l'Etat d'exercer son droit de tutelle. Ceci ne signifie pas que les contraintes économiques disparaissent mais que la situation optimale n'est plus fixée sur la seule base des indicateurs économiques déjà évoqués, d'autres points de vue étant également pris en considération.

L'exemple de la politique suédoise en matière d'émissions de polluants atmosphériques (SO₂, NO_x, CO₂ et hydrocarbures) correspond exactement à ce processus. Après confrontation des points de vue entre divers scientifiques, un objectif de réduction des émissions d'environ de moitié a été retenu comme pertinent. Le calcul des coûts d'évitement permettant de réaliser ces objectifs ont alors pu être établis. Les conclusions ont ensuite été débattues puis votées au niveau du parlement, conduisant à fixer des niveaux de taxes correspondant à leur coût marginal d'évitement pour chacun des polluants incriminés³⁹.

³⁷ Exemple d'évaluation basée sur ce principe : "L'évaluation du coût social de la pollution due aux transports de voyageurs a été réalisée ici par recours à la méthode d'évitement qui se fonde sur les dépenses à engager pour les émissions au moyen des techniques citées [pôts catalytiques, filtres à particules, canister essence sans plomb, désulfuration du gasoil, carburants de substitution, véhicule électrique]. Ce choix s'oppose à la solution de l'évaluation du coût des dommages, très difficile à réaliser en raison de la difficulté de cerner les effets de la pollution, de les mesurer dans l'immédiat et de les apprécier sur de longues périodes." Cf. p. 16 de RATP, Département du Développement, *La pollution liée aux transports de voyageurs en Ile de France*. Paris, août 1992. 24 p.

³⁸ Cette idée de valeur d'existence conduit à reconnaître "une valeur en soi à un patrimoine ou une ressource en dehors de toute possibilité de jouissance directe ou indirecte, présente ou future". Cf. p. 73 de BARDE Jean-Philippe, *Economie et politique de l'environnement. Op. Cit.* De ce fait, elle constitue un pont entre l'économie traditionnelle et les mouvements écologistes radicaux. Elle se justifie, du point de vue économique, par le fait que cette discipline étant totalement transparente par rapport aux systèmes de valeurs des hommes, le seul fait que certains d'entre eux en expriment la nécessité suffit pour qu'elle soit à prendre en compte : "we see no inconsistency in taking account of existence value - whatever its basis - because the values in question are of people and because social policy typically does reflect both wants and rights". Cf. pp. 136-137 de PEARCE David W., TURNER R. Kerry, *Economics of Natural Ressources and the Environment. Op. Cit.*

³⁹ Voir notamment HANSSON Lars, "Air pollution fees and taxes in Sweden". *Transport Research Board's 70th Annual Meeting*, Washington D.C, 13-17 janvier 1991. Cette méthode d'évaluation s'est inscrite dans une démarche plus large conduisant également à adopter un système de taxes sur les polluants et à remanier en profondeur le système fiscal du pays. Non seulement les objectifs ont été fixés a priori mais les mesures d'évitement n'ont pas été prises de manière directe ou par l'édiction de normes de la part de

Cette méthode d'évaluation par les coûts d'évitement est aujourd'hui largement utilisée dans le domaine des transports routiers, notamment en matière de pollution sonore. Les principaux résultats obtenus recensés par Emile Quinet sont les suivants :

Tableau 5 : évaluations du coût du bruit par la méthode du coût d'évitement⁴⁰

Source	Pays	Année d'estimation	Résultat en % du PNB	Objectif affirmé
Planco	Allemagne	1990	0,15	protection à 55 dB(A)
NRTC	Australie	1992	0,15	
Mackenzie et alii	USA	1992	0,2	
Dickman	Allemagne	1990	0,2	
Himanen et alii	Finlande	1989	0,3	
Jeanrenaud	Suisse	1993	0,3	
Cetur-Sofretu-Systra	France	1990	0,36	protection à 65 dB(A)
Min. des Transports	Finlande	1992	0,42	
Planco	Allemagne	1990	0,9	protection à 45 dB(A)
Merlin	France	1989	1,5	

Source : Quinet, 1993.

En ce qui concerne les coûts d'évitement des pollutions atmosphériques l'essentiel des évaluations se base soit simplement sur le coût des technologies existantes moins polluantes, soit sur la recherche d'un objectif de réduction des émissions défini a priori. Le premier cas correspond à l'approche développée par la RATP qui calcule un coût global d'équipement en pôts catalytiques plus une surconsommation de carburant équivalent à 0,26% du PIB90 de la région Ile de France⁴¹. Le second renvoie à l'approche suédoise.

l'Etat : les pouvoirs publics ont préféré faire confiance au marché guidé par le signal-prix émis par les taxes.

⁴⁰ Ce tableau fournit peu d'indications sur les niveaux de protection recherchés. On peut cependant préciser qu'en Allemagne et dans les pays nordiques, la norme officielle recherchée correspond à un niveau sonore inférieur à 55 dB(A). L'étude suisse fait également référence à cette norme (Cf. JEANRENAUD Claude, SOGUEL Nils, GROSCLAUDE Pascal, STRITT Marc-Alain, *Coûts sociaux du trafic urbain - Une évaluation monétaire pour la ville de Neuchâtel*. Zurich : Rapport n°42 du PNR "Ville et transport" établi par l'IRER-Université de Neuchâtel, mars 1993. XVII + 97 p.)

En France ce niveau est fixé à 65 dB(A) - Cf. étude "Cetur-Sofretu-Systra" ou, pour un document facilement accessible correspondant à ce travail, AUZANNET Pascal, BELLALOUM Adeline, "Le coût des transports pour la collectivité", *Revue générale des Chemins de Fer*, mars 1993. pp. 15-21.

L'évaluation de Mackenzie et alii fait plus une synthèse de plusieurs évaluations basées sur diverses méthodes qu'une véritable estimation de coût d'évitement (Cf. pp. 20-21 de MACKENZIE James J., DOWER Roger C., CHEN Donald D.T., *The going rate : what it really costs to drive*. Washington : World Resources Institute, juin 1992. 32 p.)

Par contre nous n'avons pas d'indication sur les bornes retenues par l'étude australienne et celles retenues par Pierre Merlin restent très floues (Voir MERLIN Pierre, "Prendre en compte des coûts sociaux dans les transports", *Transport Public*, juillet-août 1992. pp. 36-45).

⁴¹ CETUR-SOFRETU, *Analyse des coûts de déplacements : élaboration d'une méthodologie dans le cadre d'un Compte Transports de Voyageurs*. Février 1994. 77 p. + Annexes. Ce rapport correspond à la continuation de travaux déjà cités. Cf. RATP, Département du Développement, *La pollution liée aux*

Avec un objectif affiché de réduction à court terme de 30% des NOx, 50% des HC, 65% du SO2 et 20% du CO2, on peut ainsi estimer que le coût des émissions des transports dans la CEE correspond à 0,69% de son PNB⁴².

3.2. Mesures *a posteriori*

Dans les démarches de valorisation explicite, la mise en lumière des hypothèses de calcul est censée ouvrir le champ aux débats, permettant ainsi de parvenir progressivement et démocratiquement à l'expression de la préférence collective du moment. Cependant cette manière de procéder est loin d'être générale, la puissance publique pouvant très bien décider des moyens de lutte contre telle ou telle nuisance, sans s'interroger outre mesure des conséquences économiques de son action. Dans un tel contexte il est alors possible de reprendre *a posteriori* les politiques mises en oeuvre et d'en mesurer les coûts d'application et les répercussions économiques. Les valeurs obtenues peuvent ensuite être interprétées de diverses manières, soit en supposant qu'elles représentent ce que la collectivité consent à dépenser pour éviter cette nuisance, soit en les comparant à des valeurs obtenues par ailleurs en vue de corriger les écarts existants.

Remarquons que ce type de démarche révèle bien souvent des valeurs collectives divergentes pour des biens ou services *a priori* identiques mais situés dans des domaines différents, à l'inverse des approches explicites qui manifestent une volonté d'unification des modes de calcul et permettent ensuite de dégager une cohérence globale dans la logique des affectations budgétaires de l'Etat. D'autres facteurs de décision entrent en jeu, que ces dernières ont du mal à prendre en compte. En matière d'insécurité par exemple, les accidents dans les transports collectifs sont souvent spectaculaires même si les risques, mesurés en terme de voyageurs x kilomètres, sont beaucoup moins importants que pour la voiture particulière. Les chocs médiatiques qu'ils provoquent, ainsi que le sentiment plus fort de responsabilité des pouvoirs publics, entraînent des investissements qui correspondent implicitement à un consentement à payer pour la sécurité beaucoup plus élevé dans ce domaine particulier.

A travers nos recherches bibliographiques, nous n'avons guère trouvé trace de ce type d'évaluation, tout au moins dans le domaine particulier des pollutions sonores et atmosphériques liées aux transports routiers. Elles ne seront donc pas détaillées plus avant. Nous tenions cependant à les évoquer du fait du double intérêt qu'elles présentent, tant dans le cadre d'une analyse descriptive tentant de révéler à l'aide d'outils économiques les effets d'images et les rapports de forces inclus dans les décisions collectives, que pour une démarche normative dénonçant les écarts mis à jour et proposant une vision plus unifiée.

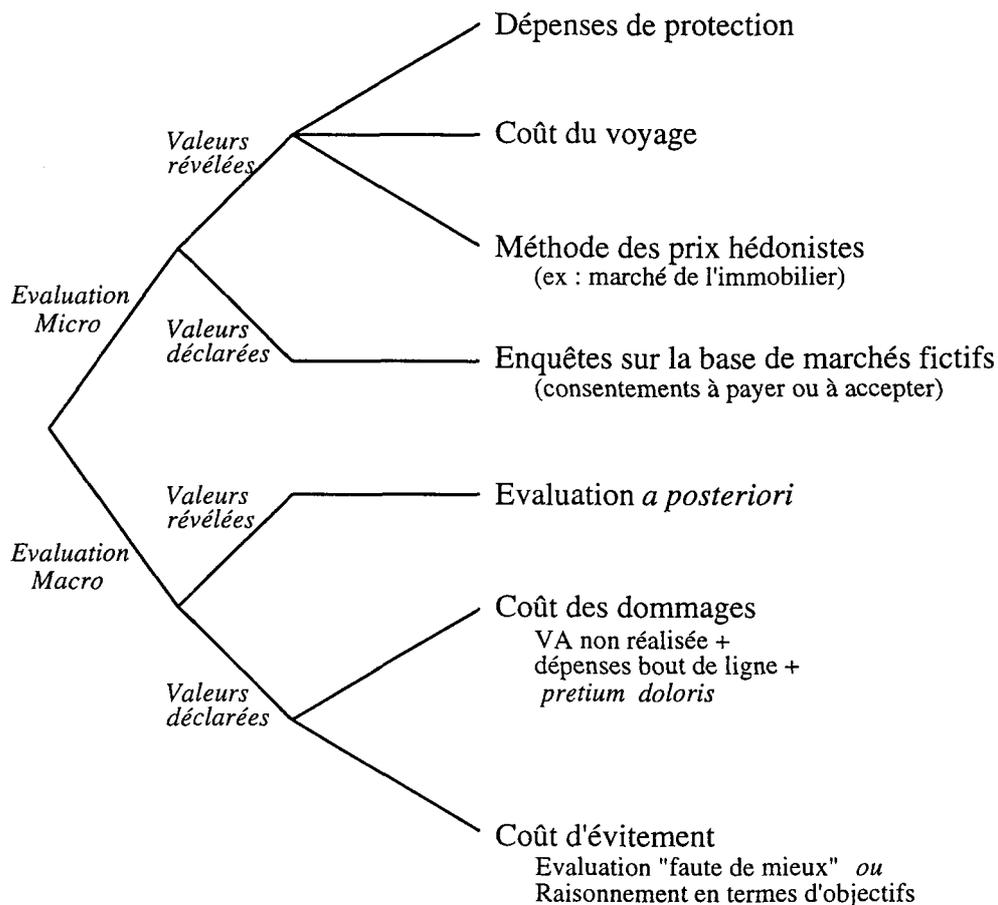
transports de voyageurs en Ile de France. Op. Cit. ainsi que AUZANNET Pascal, BELLALOUM Adeline, "Le coût des transports pour la collectivité" *Op. Cit.*

⁴² Cf. pp. 60-62 de HANSSON L., MARCKHAM J., *Internalization of External Effects in Transportation. Op. Cit.* Ces auteurs remarquent également qu'une élimination complète des émissions de CO2, NOx, SO2 et HC, tous secteurs d'activité confondus, ne dépasserait pas 2,1% du PNB de la communauté européenne.

4. Synthèse

Les différentes méthodes qui viennent d'être présentées reprennent les principales logiques d'évaluation des coûts externes qui sous-tendent les travaux dans ce domaine. Elles peuvent être synthétisées dans le graphique ci-dessous, qui distingue l'aspect micro ou macroéconomique de l'évaluation ainsi que le mode de mise à jour des comportements, explicites-déclarés ou implicites-révélés.

Graphique 7 : synthèse des différentes méthodes d'évaluation économique des dommages



Les méthodes d'évaluation qui font directement référence au marché présentent l'avantage de prendre en considération les préférences de chacun (compte tenu des biais éventuels introduits lors du recueil des données). Cependant la pondération de ces préférences reste autant attachée à la valeur attribuée à l'argent qu'aux utilités et désutilités ressenties. De même les questions de répartition des coûts et des avantages ne sont pas considérées et les problèmes qu'elles soulèvent restent en suspens. Les évaluations des coûts établies à un niveau collectif se targuent quant à elles d'être basées sur une meilleure connaissance de l'ensemble des dommages subis. Elles restent par contre le reflet des préoccupations d'une communauté scientifique et technique restreinte.

Pour éviter à ces différentes méthodes de tomber dans les pièges qui les guettent - économisme pour les unes, technocratie pour les autres -, il est nécessaire de les asseoir

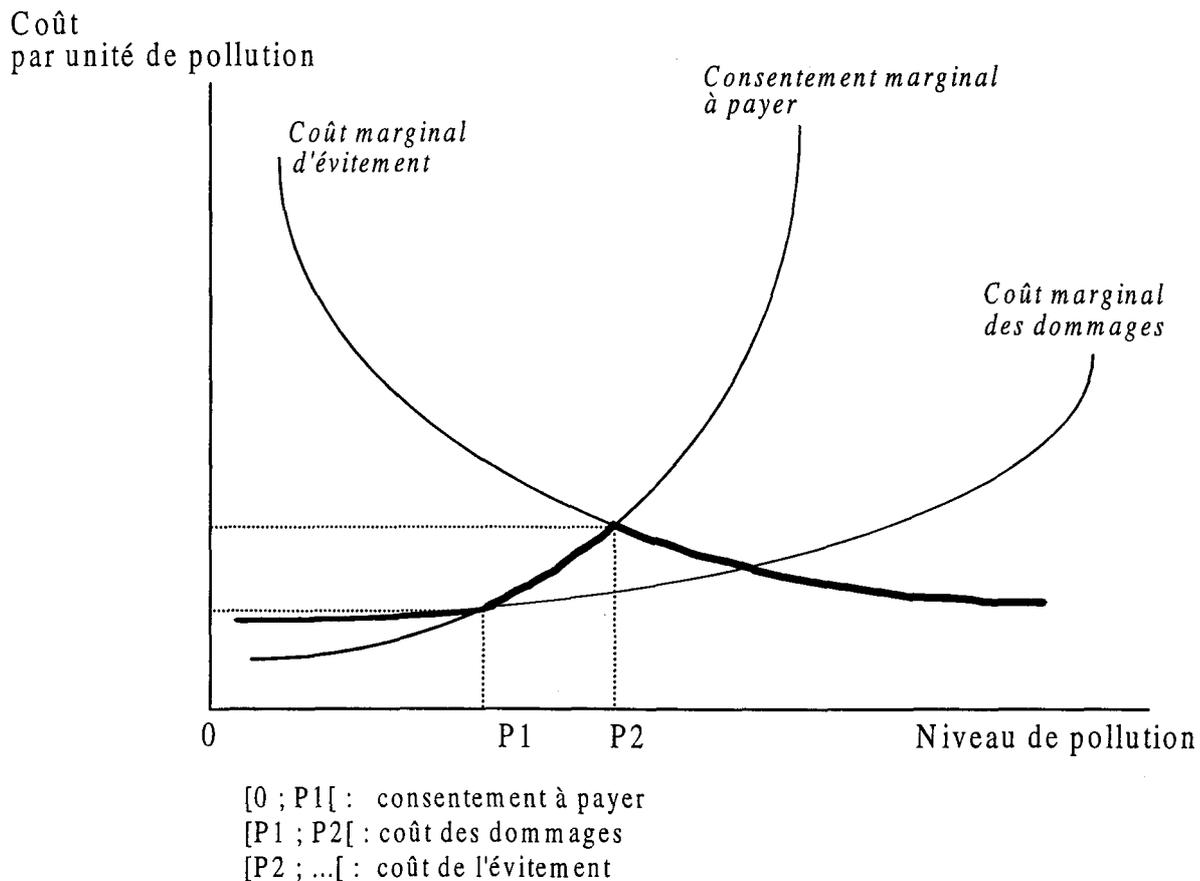
sur un discours qui laisse la responsabilité aux instances politiques dans les choix déterminants, rendant ainsi indirectement la parole à chaque électeur : la légitimité de ces évaluations n'existe que par l'acceptation collective, explicite ou implicite, des mesures qu'elles impliquent. Ceci signifie aussi qu'elles ne constituent que des aides à la décision, d'autres logiques pouvant participer à l'élaboration de cette dernière.

Les différences existant entre ces diverses méthodes peuvent être illustrées par une représentation synthétique des courbes des coûts marginaux qu'elles sont sensées permettre d'établir, comme le fait le graphique ci-dessous repris d'un récent rapport établi pour le compte de l'Union Internationale des Chemins de Fer (UIC)⁴³. On peut discuter sur la position des courbes : suivant l'état des sensibilités au sein de la population et des connaissances scientifiques concernant la pollution considérée, la courbe des dommages peut très bien augmenter plus ou moins vite que celle du consentement à payer ; cette dernière courbe, qui synthétise ici l'ensemble des méthodes d'évaluation des préférences individuelles devrait être en fait démultipliée car, nous l'avons vu, elles ne mesurent pas toutes la même chose... Malgré tout une telle présentation reste complémentaire de l'arbre formalisé précédemment.

Un autre avantage de ce schéma est de montrer que ces méthodes, loin de s'opposer, peuvent conduire à la définition d'une "enveloppe de coût minimal" économiquement pertinente, correspondant à l'aire située entre l'axe des abscisses et les courbes de coût les plus basses, bornée par l'origine et le niveau de pollution en cause. Les auteurs du rapport précisent cependant que tant que la courbe de l'évitement n'est pas atteinte, il est plus juste de se référer à la courbe du consentement à payer si elle est supérieure à celle des dommages pour respecter la souveraineté des individus. Dans le cas contraire, c'est cette dernière qu'il faut utiliser car cela signifie que la population est mal informée de toutes les conséquences de la pollution incriminée. L'enveloppe de coût minimum pertinente se situe dès lors en deçà du trait renforcé en gras du schéma.

⁴³ Sous la direction de MAUCH Samuel P. et ROTHENGATTER Werner , *External Effects of Transport*. Zürich-Karlsruhe : IWW, INFRAS AG, rapport pour le compte de l'UIC Paris, novembre 1994. xiii + S14 + 345 p. Cf. notamment pp. 41-44.

Graphique 8 : Les méthodes d'évaluation et l'enveloppe de coût minimum pertinente



D'un point de vue appliqué les évaluations restent cependant encore trop divergentes pour qu'une telle enveloppe de coût minimal puisse toujours être mise en oeuvre. Par exemple, sur la base de la plupart des chiffres qui ont été cités dans cette section (plus quelques autres), Emile Quinet se contente de reprendre les valeurs médianes, sans trop s'arrêter sur les méthodologies utilisées, pour proposer des niveaux de coûts en % du PNB. Concernant le bruit et la pollution atmosphérique locale à régionale, il retient les valeurs suivantes⁴⁴ :

- 0,3% pour le bruit,
- 0,4% pour la pollution atmosphérique locale, hors risques globaux.

Pour situer ces chiffres, on peut remarquer que les autres coûts traditionnellement repris dans les estimations des coûts externes des transports, à savoir l'insécurité routière et la congestion, sont tous deux estimés par E. Quinet équivalents à 2% du PNB. Les coûts liés à la pollution globale varient quant à eux de 1 à 10% du PNB, les transports contribuant à environ 20% du total.

⁴⁴ Cf. p. 44 de QUINET Emile, "Les coûts sociaux des transports :..." *Op. Cit.*

C'est à partir de ces indications que le Commissariat Général du Plan a déterminé ses clés de calcul pour prendre en compte les questions d'environnement dans l'évaluation des projets. Cf. pp.105-121 de Commissariat Général du Plan, *Transports : pour un meilleur choix des investissements.. Op. Cit.*

L'essentiel de ces coûts est attribué aux transports routiers, sachant que le rail et l'aérien concernent des trafics beaucoup moins importants et que leur coût par unité transportée, voyageur ou tonne.kilomètre, est estimée 10 fois plus faible⁴⁵. On peut dès lors rapporter ces pourcentages au total des dépenses en transports routiers de la collectivité (usagers et gestionnaires d'infrastructures) qui s'élèvent à 1 054 milliards de francs en 1992, soit l'équivalent de 15% du PNB⁴⁶. Les surcoûts liés au bruit et à la pollution atmosphérique sont dès lors loin d'être négligeables.

Une autre précision peut être apportée en distinguant trafic routier urbain et interurbain. Les chiffres fournis par l'OEST indiquent qu'un peu plus du quart de ce trafic, tous véhicules confondus, est effectué en agglomération⁴⁷. Les nuisances des transports sont beaucoup plus élevées en zones urbanisées car elles touchent une population beaucoup plus importante. La quasi totalité des nuisances liées au bruit peuvent être attribuées au trafic urbain. En terme de pollution atmosphérique, le Commissariat Général au Plan retient un différentiel de 33% entre le coût d'un kilomètre effectué en rase campagne et celui effectué en milieu urbain. Ramenée en voyageur.kilomètre, cette différence est même de l'ordre de 1 à 2 du fait d'un taux de remplissage des véhicules plus faible en agglomération⁴⁸.

Ces chiffres ne sont pas, bien sûr, à prendre comme définitifs. Ils témoignent par contre de la prise en considération au niveau politique des questions de nuisance des transports et de la volonté de discerner l'ampleur de leurs effets suivant leur nature, les modes et les localisations. Ils représentent aujourd'hui un minimum considéré comme raisonnable dans le cas français. On peut remarquer cependant que l'application telle quelle des mesures retenues en Suède, où la sensibilité à l'environnement est très forte, feraient passer l'évaluation du coût moyen des émissions atmosphériques d'un peu plus de 8 à 32 centimes par kilomètre parcouru⁴⁹. De même l'exigence d'un seuil de niveau sonore passant de 65 à 55 dB aurait des conséquences importantes en matière d'évaluation des coûts...

⁴⁵ "On peut avancer les fourchettes et ordres de grandeur suivants : un voyageur.kilomètre présente un coût social à peu près égal à celui d'une tonne.kilomètre ; le coût par la route (automobile ou camion) est à peu près de 0,02 ECU par unité.kilomètre [soit 10 centimes, compte tenu des arrondis de présentation] ; le coût par le rail est à peu près 10 fois plus faible, et du même ordre de grandeur que le coût par avion". *Ibidem*.

⁴⁶ Cf. pp. 67-70, Dossier "Le coût du transport routier pour la collectivité" in INSEE-OEST, *Les transports en 1992... Op. Cit.*

⁴⁷ OEST, *Les transports en 1994. Premiers résultats*. mars 1995. 16 p.
OEST, *Les transports en 1993. Premiers résultats*. mars 1994. 15 p.
Les chiffres fournis permettent de calculer une part oscillant autour de 27% pour le trafic en agglomération en 1992, 93 et 94.

⁴⁸ "Le coût de pollution du véhicule.kilomètre en trafic interurbain sera de 0,075 F, ou encore, avec 2 passagers par voiture, de 0,0375 F/voy.km, arrondi à 0,038. Celui du véhicule.kilomètre en trafic urbain sera de 0,10 F, ou encore, avec 1,2 passager par voiture, de 0,08 F/voy.km."
Cf. p. 119 de Commissariat Général du Plan, *Transports : pour un meilleur choix des investissements.. Op. Cit.*

D'autres estimations existent (voir par exemple les travaux de l'équipe de Pascal Auzannet au sein de la RATP). Nous reprenons ces chiffres car ils restent en cohérence avec le travail de Emile Quinet qui a servi de fil directeur dans l'exposé des résultats d'évaluations monétaires de ce chapitre.

⁴⁹ Pour les calculs, voir pp. 52-68 de ARABEYRE Agnès, CROZET Yves (sous la direction de), GUIHERY Laurent, NICOLAS Jean-Pierre, PEREZ Marc, SANTI Gérard, *Les effets externes en milieu urbain : de la valorisation à l'internalisation. Op. Cit.*

5. Conclusion

La diversité des évaluations qui ont été présentées dans ce chapitre souligne combien s'arrêter sur un chiffre s'avère hasardeux. Les méthodes d'évaluation ainsi que les problèmes pratiques de leur mise en oeuvre expliquent en grande partie ces différences. Les chiffres provenant de plusieurs pays (essentiellement européens), il ne faut sans doute pas non plus négliger les spécificités nationales, tant au niveau économique que des taux d'urbanisation et de la sensibilité des populations aux questions d'environnement et de cadre de vie. Il faudrait sans doute s'intéresser également aux intérêts directs ou indirects des évaluateurs, de leurs commanditaires ou de ceux qui promeuvent leurs résultats⁵⁰.

Dans le cadre de ce travail, nous ne nous sommes ni donné les moyens de développer ce type d'analyse en terme d'enjeux sociaux et de jeux d'acteurs, présents ou à venir, ni préoccupé de se doter d'une mesure objective des coûts environnementaux des transports routiers. L'objet a plus été d'établir des ordres de grandeur pour montrer que les questions de pollutions sonores et atmosphériques liées aux transports routiers en milieu urbain ne sont pas à négliger, ce qui a été fait à travers une présentation des phénomènes physiques en jeu, quelques (rares) remarques sur les conflits qu'ils entraînent et, surtout, un exposé des méthodes d'évaluations monétaires qui existent et des résultats qu'elles fournissent.

Cependant ce chapitre reste éminemment statique dans le bilan qu'il fournit. Les résultats rendent compte d'un état des faits en un lieu et à une date spécifique, mesurés par un acteur donné. Lorsque l'on se penche sur les évolutions passées, on se rend alors compte que la part des transports dans le domaine des pollutions atmosphériques et sonores est croissante, tant en valeur relative qu'absolue. Comme nous avons pu le voir lors de l'introduction générale, alors que les activités industrielles et le secteur de l'énergie ont fait de nombreux progrès, les transports routiers ont tendance à voir leurs nuisances augmenter du fait d'une croissance continue de la mobilité et de la concentration urbaine qui multiplie les situations d'exposition aux nuisances.

Ces évolutions sont difficiles à percevoir à travers les évaluations monétaires, aux résultats trop éparses et indiquant simplement qu'il existe des enjeux économiques non négligeables. Pour poursuivre notre investigation sur les pollutions des transports routiers urbains, nous allons passer maintenant à une analyse des dynamiques à l'oeuvre derrière ces évolutions. Les outils utilisés seront empruntés à l'ingénierie des transports, même si les motivations qui sous tendent la réflexion restent d'ordre socioéconomique, avec comme principale interrogation le rôle joué par les principaux facteurs intervenant dans ces nuisances, tant directement comme la mobilité, les technologies ou les conditions de

⁵⁰ Un exemple extrême peut être donné à travers le cas d'une activité minière aux USA, le plaignant (l'Etat du Colorado) reprochant à la société exploitante de rejeter diverses substances dangereuses dans la rivière Eagle et sur le domaine public la bordant. Le plaignant et le défendeur ont chacun présenté leur propre évaluation des dommages, parvenant à une différence d'estimation de l'ordre de 1 à 200 soit 243 et 112 900 milliers de dollars ! Cf. p. 16 de POINT Patrick, "Les services rendus par le patrimoine naturel : une évaluation fondée sur des principes économiques", *Economie et Statistique* n°258-259, octobre-novembre 1992. pp. 11-18.

Sans aboutir forcément à des différences aussi caricaturales, il est certain par exemple que les évaluations établies ou défendues par les lobbies routiers ne convergent pas avec celles des exploitants de réseaux de transports collectifs.

circulation que de manière plus profonde comme l'organisation spatiale de nos activités et de notre système de transports.

CHAPITRE 3 :
CONSTRUCTION D'UN OUTIL D'EVALUATION
DES EMISSIONS POLLUANTES ET SONORES
DU TRAFIC ROUTIER

Le chapitre précédent a permis de se rendre compte que même si les évaluations monétaires apparaissent très dispersées, les nuisances du trafic routier urbain semblent importantes. Cependant ces évaluations restent par nature statiques, attachées à un lieu et à une époque donnés. De plus elles ne permettent guère de se rendre compte des dynamiques à l'oeuvre au sein du trafic routier et qui expliquent les nuisances qu'il génère.

C'est essentiellement à ce dernier point que nous allons consacrer les trois chapitres qui viennent. De plus, dans la mesure du possible, nous essaierons également de détacher nos conclusions du contexte lyonnais qui a été retenu comme cadre de travail pour établir les calculs.

Deux types de nuisances spécifiques ont été considérés avec d'une part le niveau sonore généré par la circulation routière et d'autre part la pollution atmosphérique, définie par les principaux polluants évoqués au cours du chapitre précédent (anhydride sulfureux (SO₂), oxydes d'azote (NO_x), monoxyde de carbone (CO) gaz carbonique (CO₂), poussières et hydrocarbures non méthaniques). Par ailleurs trois variables clés ont été retenues pour comprendre la génération de ces deux types de nuisances :

- *Le niveau général du trafic*, mesuré en véhicules x kilomètres, est caractérisé principalement par le nombre total de déplacements ainsi que leur longueur moyenne. C'est notamment toute la question de la mobilité automobile et de son évolution qui se trouve posée derrière cet indicateur.
- *Les conditions de circulation* résultent de la confrontation entre le niveau du trafic et la capacité du réseau : le thème de la congestion et des surémissions qu'elle provoque relève bien sûr de ce point mais nous verrons aussi l'importance de cette variable pour comprendre la dispersion du trafic et donc des émissions à travers le réseau et l'agglomération qu'il dessert.
- *La composition du trafic* enfin, recouvre tout à la fois la proportion de chacun des principaux types de véhicules retenus et les caractéristiques technologiques de ces véhicules, qui permettent de comprendre leurs émissions. Sur le long terme les enjeux liés à cette composition du trafic sont très importants car c'est en grande partie sur les progrès technologiques que l'on compte à l'heure actuelle pour éviter tout dérapage malgré les fortes croissances prévues de la mobilité automobile.

Avant de nous pencher plus précisément sur le poids relatif et sur l'impact à court et long terme de ces principales caractéristiques du trafic sur ses propres émissions polluantes et sonores, nous allons consacrer ce chapitre à la présentation de l'outil développé pour permettre ces analyses.

Il n'existe pas à notre connaissance de synthèse sur l'ensemble des travaux menés dans le domaine de la modélisation des émissions polluantes et sonores du trafic routier à partir des résultats d'affectation de modèles de trafic. Cependant certains de ces modèles disposent d'un module intégré permettant ces types de calculs, tels que TRANPLAN ou

POLYDROM¹. De plus de nombreux travaux ont permis l'élaboration de méthodes d'évaluation dans des contextes plus ou moins particuliers². Nous nous sommes inspirés de l'un d'entre eux développé dans le cadre lyonnais sur la base des sorties du modèle DAVIS, pour mettre au point notre méthode de calcul, compte tenu de nos exigences et de nos objectifs propres³.

Cette partie méthodologique ne se cantonne toutefois pas à la simple présentation des hypothèses et des calculs mis en oeuvre pour établir nos résultats. Elle est également l'occasion de s'interroger sur la signification des chiffres obtenus, les analyses qu'ils permettent et les interprétations à éviter, leur fiabilité et les points sur lesquels ils restent entachés d'incertitude. Compte tenu de la relative similitude de l'ensemble des méthodes d'évaluation évoquées précédemment, les conclusions qui sont établies ici présentent une portée générale qui dépasse le simple cadre de notre propre travail. Elles seront donc analysées dans cette double optique de test de l'outil développé dans le cadre particulier de cette thèse et de réflexion plus large sur l'intérêt et les limites des extensions environnementales des modèles d'affectation du trafic.

La première section de ce chapitre expose la manière dont la description de l'état de la circulation par un modèle statique d'affectation du trafic, DAVIS, est reprise pour calculer des niveaux d'émissions atmosphériques et sonores. Le modèle DAVIS a aimablement été mis à notre disposition par l'INRETS. De plus, grâce au CETE de Lyon, ce modèle a pu être appliqué au contexte lyonnais et, plus précisément, au réseau viaire et aux déplacements routiers correspondant à la Communauté Urbaine de LYon en heure de pointe du soir en 1990.

¹ Concernant ces modèles TRANPLAN et POLYDROM d'affectation du trafic, voir par exemple et respectivement :

SCHATTANEK Guido, SODEN Joel, KAHNG June, "Evaluation de la pollution d'origine automobile dans les grandes agglomérations", *RTS* n°32, décembre 1991. pp. 96-100.

de RHAM Casimir, DESPOT Fabienne, *Polydrom, offre et demande de transport intermodal ; Polytox, émissions et immissions de polluants atmosphériques*. Vevey, Suisse : Société d'Etude de l'Environnement, 1994. non paginé.

² Un exemple peut être fourni à travers le développement et l'usage du modèle SATURNE : voir FESTA Demetrio, NUZZOLO Agostino, "A system of models for the evaluation of traffic pollution in urban areas", *6^{ème} Conférence Mondiale sur la Recherche dans les Transports*, Lyon, France, 29 juin - 3 juillet 1992. 12 p.

Certains travaux menés à l'INRETS vont également dans ce sens. Ils ont débouché sur l'élaboration d'un modèle de calcul des émissions de polluants atmosphériques, POLLEN, à partir duquel des projections à l'horizon 2010 ont été établies : JOUMARD Robert, LAMBERT Jacques, *Evolution des émissions de polluants par les transports en France de 1970 à 2010*. Bron : INRETS, rapport INRETS n°143, juillet 1991. 66 p.

Enfin, au niveau européen et concernant les émissions de polluants atmosphériques comme les émissions sonores, voir : HASSEL Dieter, HICKMAN John, JOUMARD Robert, NEMERLIN Jean, *Modelling of emissions and consumption in urban areas*. Bron : INRETS, projet DRIVE V1053, juin 1992. 54 p.

³ EUROPLAN, POLYEN, *analyse des émissions de pollution liées à l'énergie dans l'agglomération lyonnaise. Volumes I, II et III*. Etude pour le compte de la COURLY, la Commission des Communautés Européennes (DG VII) et Rhônalénergie. Lyon, mars 1992.

Ce modèle généraliste qui s'attache à l'ensemble des activités de l'agglomération lyonnaise dispose d'un module "trafic" exploitant les sorties de DAVIS pour ses calculs propres. C'est sur la base de ce travail que nous avons mis au point notre propre méthode d'évaluation, même si certaines hypothèses ont été modifiées, une composante émissions sonores a été rajoutée et les résultats ne sont pas exploités de la même façon.

La seconde section est plus spécifiquement consacrée au sens à donner aux résultats obtenus. Une large place est faite à la présentation d'une série de tests destinés à mieux localiser les éventuelles sources d'incertitude pouvant affecter les résultats. Cette partie s'attache également à montrer pourquoi les chiffres doivent être lus de façon relative et globale - relative, c'est à dire sans interpréter directement les résultats tels quels mais en comparant leurs variations lorsque les valeurs des paramètres de calcul évoluent ; globale, c'est à dire en préférant les évaluations établies au niveau de l'agglomération et en évitant de présenter des résultats trop finement localisés, au niveau d'une rue par exemple.

1. Présentation de la méthode de calcul retenue pour estimer les émissions polluantes et sonores du trafic routier

La méthode retenue pour calculer les niveaux d'émissions polluantes et sonore du trafic routier se déroule en deux grandes étapes. Dans un premier temps l'usage d'un modèle d'affectation du trafic permet de confronter une demande de déplacements routiers à une offre d'infrastructures viaires et de disposer, à la sortie, des indications nécessaires sur le niveau du trafic et les conditions de circulation pour l'ensemble du réseau. Dans un second temps ces informations peuvent être utilisées pour calculer des niveaux d'émissions grâce à des abaques et à des tables de conversion établies par ou à partir des travaux du CETUR et de l'INRETS.

Ce sont ces deux étapes qui vont être présentées successivement au cours de cette section.

1.1. Un premier bilan de l'état de la circulation sur le Grand Lyon

Nos évaluations ont été établies à partir du cas de l'agglomération lyonnaise, en raison d'une meilleure connaissance du terrain et de plus grandes facilités d'accès aux informations. C'est donc à partir des données fournies par le CETE de Lyon sur les déplacements routiers effectués dans cette zone et sur les caractéristiques du réseau viaire que les affectations du modèle DAVIS ont pu être menées.

Nous exposerons ici la logique d'affectation sous DAVIS avant de présenter rapidement les données utilisées.

1.1.1. L'usage d'un modèle d'affectation du trafic : DAVIS

DAVIS (Distribution, Affectation, VISualisation) est un modèle statique d'affectation du trafic routier développé par l'INRETS. De nombreux enrichissements ont été apportés depuis sa création en 1972 et la version utilisée ici, DAVIS-PLUS Version 2.3. TRIBUT Equilibre, date de 1991.

L'objectif d'un modèle tel que DAVIS est de répondre à un "besoin d'évaluation économique" des projets d'aménagement du réseau routier d'une agglomération (nouvelles infrastructures, plan de circulation, mise à péage...), que se soit à travers "le calcul de [leur] utilité collective globale", "les tests de cohérence entre le projet et l'ensemble du réseau"

ou, depuis quelques années, l'impact des "péages pour financer les infrastructures complémentaires"⁴ (projet LASER par exemple).

Pour répondre à ce type de besoin, une procédure d'affectation du trafic consistant à confronter une offre viaire et une demande de déplacements routiers a été développée : à partir d'une représentation simplifiée d'un réseau de voirie dont les arcs⁵ sont caractérisés essentiellement par leurs extrémités ("noeuds" ou "centroïdes"), leur direction, leur longueur et leur capacité ainsi que d'une matrice supposée contenir l'ensemble des déplacements effectués sur ce réseau à une période donnée et caractérisés par leur origine et leur destination, le modèle va rechercher les itinéraires utilisés pour fournir, en sortie, les flux par arc et les vitesses qui en découlent.

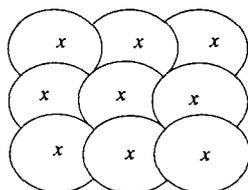
Les procédures de calculs permettant cette affectation reposent d'une part sur les contraintes physiques de capacité des voiries et d'autre part sur des hypothèses de comportement des automobilistes, supposés rationnels, omniscients (ils connaissent à tout moment parfaitement le réseau et les conditions de circulation qui le caractérise) et ayant pour objectif de minimiser leurs temps de déplacement.

⁴ Pour l'ensemble des citations de ce paragraphe, Cf. p. 1 de BARBIER SAINT HILAIRE F., *Réflexion sur la modélisation statique du trafic*. Note C.I.R. (INRETS), 17 décembre 1992. 9 p. + Ann.

⁵ Pour éviter toute confusion, nous désignerons un tronçon par la portion de voirie située entre deux carrefours, tous sens confondus. Un arc ne correspondra quant à lui qu'à un sens de circulation : on aura en général 2 arcs pour 1 tronçon, sauf dans le cas des sens uniques où ils seront confondus.

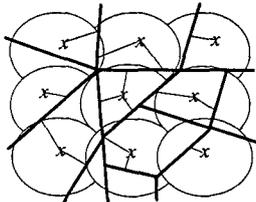
Graphique 1 : Le déroulement du processus d'affectation

Prédécoupage en zones du périmètre

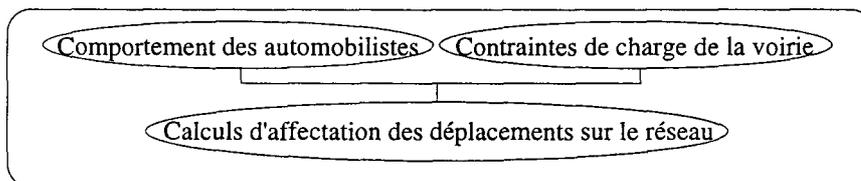


Puis :

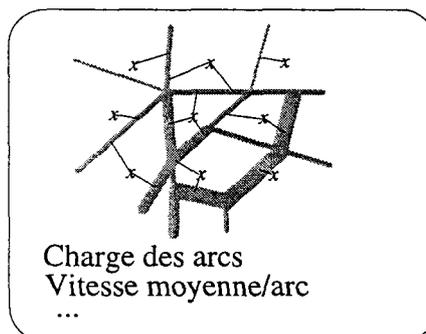
1. Entrées

<p>Schéma simplifié du réseau viaire</p> 	<p>Matrice des déplacements entre zones</p> <table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>																

2. Calculs



3. Sorties



Cette modélisation du trafic dans DAVIS a été développée de façon statique : plus qu'une réponse à une demande spécifique d'ingénierie du trafic pour une modélisation dynamique, on tente de donner une image de la moyenne que l'on obtiendrait si on faisait une série d'observations pendant plusieurs jours sur une même période. Les résultats obtenus ne sont donc pas pertinents à un niveau fin pour un instant précis. Ils ne rendent pas compte des répercussions d'épiphénomènes tels que des stationnements en double file ou des travaux temporaires. Par contre ils sont susceptibles de répondre à des calculs économiques d'évaluation globale de grands projets de modification du réseau.

En fait, le calcul de l'affectation repose sur la façon de représenter quatre grande familles de paramètres que sont la "demande" (les déplacements), l'offre (le réseau), le comportement des automobilistes et les interactions entre véhicules (contraintes de capacité et congestion). Ce sont les hypothèses sous-jacentes à la représentation de chacun de ces quatre paramètres qui vont conditionner la pertinence des résultats.

a) Une représentation figée des déplacements :

Les modèles de trafic, dits "à quatre étapes", calculent eux même la demande de déplacements. Ce calcul se fait à partir d'un découpage en zones de l'aire sur laquelle on travaille. Dans un premier temps, chaque zone se voit dotée des nombres de déplacements qu'elle va émettre et recevoir pendant une période de temps bien définie (en général une heure de pointe du soir), en fonction de ses caractéristiques démographiques et économiques (phase de génération). Ensuite, une attractivité des zones entre elles est calculée en fonction d'une part de ces caractéristiques démographiques et économiques et d'autre part des distances qui les séparent : les déplacements sont dès lors tous dotés d'une origine et d'une destination (phase de distribution). Certains de ces modèles ont une vocation multi-modale et répartissent cette demande suivant différents modes, le plus souvent entre automobile et transports collectifs (phase de répartition). Ce n'est qu'ensuite qu'apparaît la phase dite d'affectation qui consiste à affecter ces déplacements sur le réseau qui leur correspond (TC ou VP) permettant ainsi de rendre compte des trafics par axe.

DAVIS est un modèle qui s'est concentré sur cette dernière phase d'affectation. La demande n'est pas estimée par le modèle mais évaluée par enquêtes et correspond à une période de référence d'une durée d'une heure. Cette procédure d'alimentation du modèle par données d'enquêtes sur les déplacements présente l'avantage de disposer d'une information relativement fiable sur ces déplacements (même si les méthodes de recueil ne sont pas parfaites). Par contre l'image obtenue reste éminemment statique et ne préjuge en rien des trafics induits ou disparus du fait d'une modification quelconque de l'offre viaire ou de l'environnement socio-économique (croissance ou stagnation économique, localisations des activités, évolutions sociales et démographiques...). Le but de DAVIS est bien de simuler les réaffectations de trafic en cas d'une modification de l'offre de voirie en supposant toutes les autres choses égales par ailleurs.

Il convient enfin de souligner que les déplacements dont l'itinéraire est simulé lors de l'affectation ne représentent pas les déplacements effectués pendant l'heure de référence mais les déplacements qui ont commencé pendant cette heure. Ceci peut poser des problèmes de modélisation lorsque les niveaux de demande avant et après l'heure de référence sont très différents. Dans le cas de Lyon, l'heure de pointe du soir s'étalant sur environ deux heures, nous avons considéré que ce biais était peu important. Il faut simplement noter que les calculs effectués ne correspondent donc pas à des émissions d'une heure de trafic mais aux émissions des déplacements partis pendant l'heure de référence.

b) Une représentation géographique simplifiée des déplacements routiers et du réseau viaire :

Pour des raisons pratiques de calculs 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.

Le réseau sur lequel ces déplacements vont être affectés est un réseau simplifié : les rues ne permettant que des déplacements à l'intérieur d'une zone n'apparaissent pas. L'affectation va porter sur les déplacements entre les zones et non sur ceux effectués en leur sein. 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.

Cette simplification géographique fait que 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. De plus, la part des déplacements effectuée sur les liens fictifs n'a de sens qu'au niveau de la liaison entre les centroïdes et le réseau. Les longueurs, les temps de parcours et les trafics sur ces liens n'ont guère de signification en tant que tels. La part de trafic effectuée sur ces liens et fournie dans les résultats d'affectation de DAVIS n'a pas été retenue dans les simulations qui ont été faites au cours de ce travail.

Trafics intrazones non connus, trafics sur liens fictifs non pris en compte : les niveaux de trafics et donc de pollutions atmosphériques et sonores calculés sous-estiment par conséquent la réalité. L'esprit du travail a plus été de fournir des indicateurs de nuisance et de montrer leurs évolutions en fonction de la dynamique du trafic que de rechercher une représentation fidèle du réel.

Une autre simplification géographique touche au choix plus ou moins restreint d'itinéraires entre une origine et une destination données. En fait DAVIS possède deux grandes options pour affecter les trafics, par tout ou rien sur le plus court chemin ou par une recherche d'équilibre selon les principes dits de Wardrop.

La première option consiste simplement à rechercher parmi tous les itinéraires, celui dont le coût généralisé est le plus faible. On peut souligner que la prise en compte de l'effet des trafics sur les vitesses (Cf. *infra*) se fait par une affectation en plusieurs itérations. A chaque étape, seule une proportion restreinte des déplacements est affectée. Les trafics obtenus alors permettent ensuite d'établir les vitesses moyennes puis d'en déduire pour chaque arc le coût généralisé servant de base de calcul pour l'affectation à l'itération suivante. Le nombre d'itérations à effectuer est laissé au libre choix de l'utilisateur avec un minimum de 1 (on obtient les trajets idéals pour les automobilistes, s'il n'existait pas de contraintes de capacité) et un maximum de 18.

La seconde méthode d'affectation repose sur le premier principe de Wardrop selon lequel en cherchant individuellement à optimiser leur itinéraire, les automobilistes aboutissent à une situation selon laquelle tous les itinéraires employés entre une origine et une destination données ont un coût identique, inférieur aux coûts des autres itinéraires possibles. On aboutit à un état d'équilibre au sein duquel aucun automobiliste ne peut diminuer le coût de son déplacement en changeant d'itinéraire. Ce raisonnement permet donc de retenir éventuellement plusieurs trajets alternatifs. Il devient plus réaliste que l'affectation en tout ou rien lorsque des trafics importants conditionnent fortement les vitesses sur les arcs et conduisent certains automobilistes à rechercher des itinéraires alternatifs pour une même origine destination. C'est cette procédure d'affectation qui a été retenue lors de nos évaluations.

c) Contraintes de capacité de la voirie et prise en compte de la congestion :

DAVIS va traiter de façon différente cette question des interactions entre véhicules et voirie suivant que les flux calculés sur un tronçon correspondent à un débit supérieur ou inférieur aux capacités, autrement dit suivant que l'on soit en régime laminaire ou forcé⁶.

"En deçà du débit maximal (ou critique), la courbe vitesse-débit est une hyperbole :

$$C = C_0 \cdot (1,1 - CF \cdot t_x) / (1,1 - t_x)^7$$

avec t_x = taux de saturation (Débit calculé/Capacité)

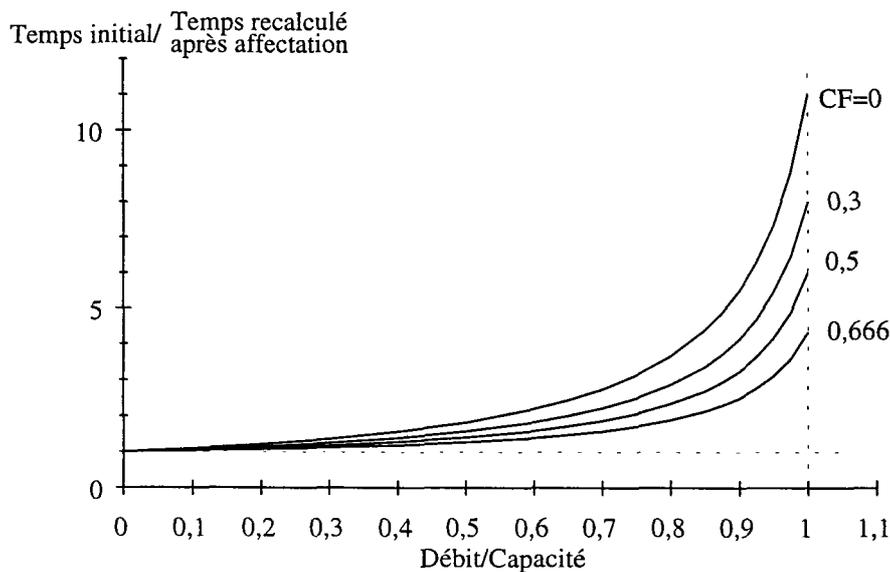
C_0 = temps à vide

CF = coefficient de fonction dont la valeur est établie en fonction de la classe de la route :

Classe de route	0	1	2	≥3
CF	0	0,3	0,5	0,666

Tant que le débit calculé sous DAVIS est inférieur à la capacité théorique du tronçon considéré, les courbes permettant d'établir la relation entre débit et vitesse sont donc les suivantes :

Graphique 2 : Courbes standard Coût-Débit sous DAVIS



Lorsque les débits calculés sont supérieurs à la capacité théorique de la voirie, plusieurs options de calcul sont possibles, allant de la prolongation grossière par une droite tangente à chaque courbe (cas où la congestion importe peu pour l'analyse ou reste

⁶ Nous reviendrons plus en détail sur ces termes de régime "laminaire" et "forcé" dans le chapitre consacré à la congestion.

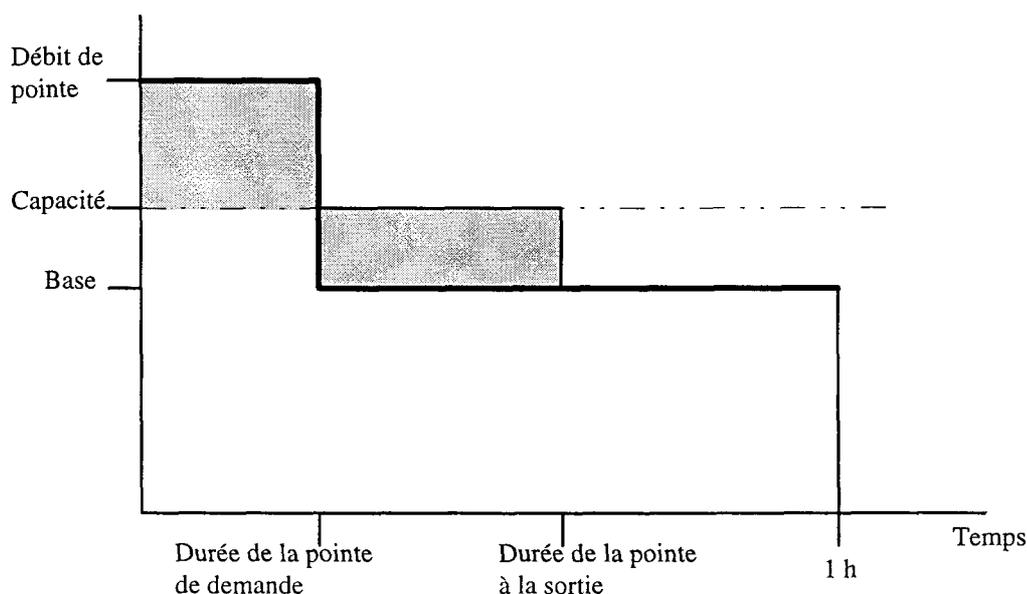
⁷ Cf. Partie VII, p. 13 de BARBIER SAINT HILAIRE F., *Manuel de référence, DAVIS-PLUS Equilibre et Tribut version 2.3*. Arcueil : INRETS, Centre Informatique Recherche (CIR), Septembre 1992.

marginal sur le réseau étudié) à la mise en oeuvre d'un modèle d'écoulement simplifié basé sur le principe de la "demande écrêtée". C'est cette dernière option qui a été utilisée pour nos calculs.

"Cette approche [par la demande écrêtée] découle d'une analyse de la signification du fonctionnement d'un tronçon au-delà de sa capacité. En analogie hydraulique, cela signifie qu'il rentre plus de véhicules en une heure qu'il n'en peut sortir. La capacité de l'arc est le débit maximal de sortie. Si la demande (débit d'entrée) est plus forte, il y a création d'une file d'attente. Mais la demande n'a pas de raison d'être uniforme sur toute l'heure. Pour effectuer des calculs très simplifiés, nous admettrons que la demande est maximale pendant une durée appelée temps de pointe (par défaut 50% de l'heure de pointe). Le niveau de base de la demande étant, par défaut, à 99% de l'heure de pointe.

Dans le cas où la saturation d'un tronçon est juste inférieure à 1, et où aucun écrêtement n'a lieu en amont, seule la pointe de trafic provoque une file d'attente qui se résorbe avant la fin de l'heure :

Graphique 3 : Ecrêtement simple de la pointe



On remarque :

- que la durée de pointe à la sortie a été allongée ;
- que l'aire de durée de pointe écrêtée est égale à l'aire d'allongement de la durée de pointe en sortie (longueur maximale de la file d'attente) ;
- que le moment d'inertie de ces aires par rapport à l'axe xy donne le temps total passé en file d'attente."⁸

A partir de ce premier cas de figure, d'autres situations plus sophistiquées peuvent être envisagées, notamment en cas de débordements horaires simples (lorsque le débit de pointe entraîne une file d'attente dont la résorption dure plus d'une heure) ou doubles

⁸ Cf. Manuel de référence, DAVIS... Op. Cit. Partie VII p. 12

(lorsque la demande de base est elle-même supérieure aux capacités de l'arc considéré). De même si les files d'attente sont très importantes, il est possible de les répercuter en amont et de provoquer ainsi une généralisation de la congestion à partir de points noirs localisés.

La logique de prise en compte de la congestion étant exposée, nous n'en détaillerons cependant pas les applications. Notons simplement que dans les options de calculs retenues pour les affectations sous DAVIS la base et le temps d'écrêtement ont été posés égaux à une heure. En effet la demande de pointe, à Lyon, s'étale sur plus d'une heure et la pointe de trafic correspondante dure encore plus longtemps : nous avons donc retenus les délais les plus longs possibles pour une affectation sous DAVIS.

d) A propos des hypothèses de comportement des automobilistes

"Tous les modèles d'affectation statique en milieu urbain prennent pour hypothèse que tous les usagers ont une connaissance relativement bonne des conditions de circulation qu'ils sont susceptibles de rencontrer sur l'ensemble des cheminement possibles."⁹ Cette hypothèse qui peut sembler très loin de la réalité est souvent tempérée par l'introduction de paramètres qui permettent de reproduire avec plus de vraisemblance le comportement des automobilistes. Ainsi sous DAVIS "l'introduction d'un temps généralisé pour le choix des itinéraires cherche à tenir compte du fait que, indépendamment de tout péage, d'autres facteurs que le temps de parcours "chronométré" conditionnent le comportement des usagers. (...) Il est en effet complètement absurde d'affirmer que chaque usager connaît parfaitement le réseau et devine les conditions exactes de circulation qu'il va rencontrer."¹⁰

En plus du temps de parcours, trois facteurs vont être pris en compte dans ce temps généralisé pour essayer de disposer d'une meilleure image du comportement des automobilistes que celle reposant sur leur rationalité, leur omniscience et un simple objectif de minimisation du temps de parcours :

- *pénalisation de la longueur du trajet* : un facteur distance, exprimé en équivalent minute par kilomètre, pénalise les itinéraires trop longs, même si la qualité des axes empruntés permet d'aller plus vite.
- *préférence pour les grands axes* : "la notion de lisibilité du réseau est aussi une notion fondamentale pour expliquer le choix de l'itinéraire de l'utilisateur. Aux heures de pointes, le trafic se concentre beaucoup plus sur les grands axes que ce que donnerait les seuls plus courts chemins, même si ces axes ont une qualité de service exécrable." Dans le modèle, les grands axes sont définis comme ceux sur lesquels la vitesse autorisée est supérieure à 100 km/h.
- *pénibilité de l'incertitude sur les temps de parcours* : "la variabilité du temps de parcours est un élément très ressenti dans le choix d'un itinéraire et se combine avec la perception très négative des encombrements. Elle n'est pas simple à prendre en compte. (...) Cependant, on peut utiliser une hypothèse simpliste qui dit que l'écart-type d'un trajet est proportionnel à la seule perte de temps due à la

⁹ Cf. *Réflexion sur la modélisation... Op. Cit.* p. 6

¹⁰ Cf. *Manuel de référence, DAVIS... Op. Cit.* Partie VII p. 16.

circulation, c'est-à-dire à la différence entre le temps de parcours moyen et le temps de parcours de base (à vide)."¹¹

Le calcul du temps généralisé est établi sur la base de ces trois paramètres plus le temps de parcours :

$$Tg = t_0 + [(t(x)-t_0) \cdot Cfi] + [(Fd - [Ba]) \cdot d]$$

avec : Tg = temps généralisé

t_0 = temps de base (à vide)

$t(x)$ = temps résultat du calcul par la loi vitesse-débit et de la file d'attente (demande écrêtée)

x = taux de saturation

Cfi = coefficient de fiabilité

Fd = facteur distance

[Ba] = bonus autoroutier si applicable au tronçon

d = longueur du tronçon

Le niveau de ces trois coefficients est fixé par l'utilisateur, sachant que les valeurs conseillées dans le manuel de référence sont de 0,40 équivalent minute par kilomètre pour le facteur distance, de 0,30 équivalent minute par kilomètre pour le bonus autoroutier et de 1,40 pour le coefficient de fiabilité¹².

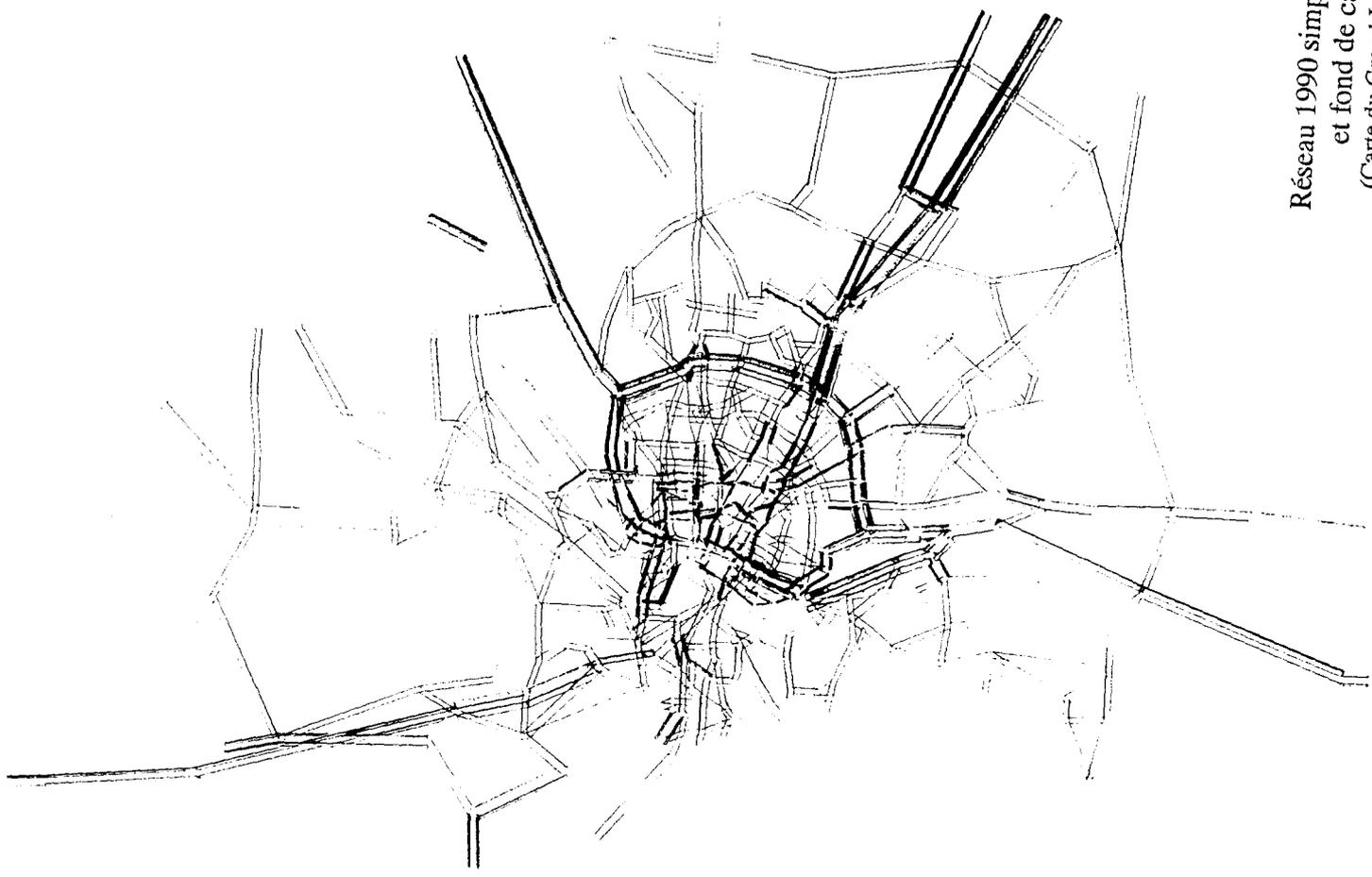
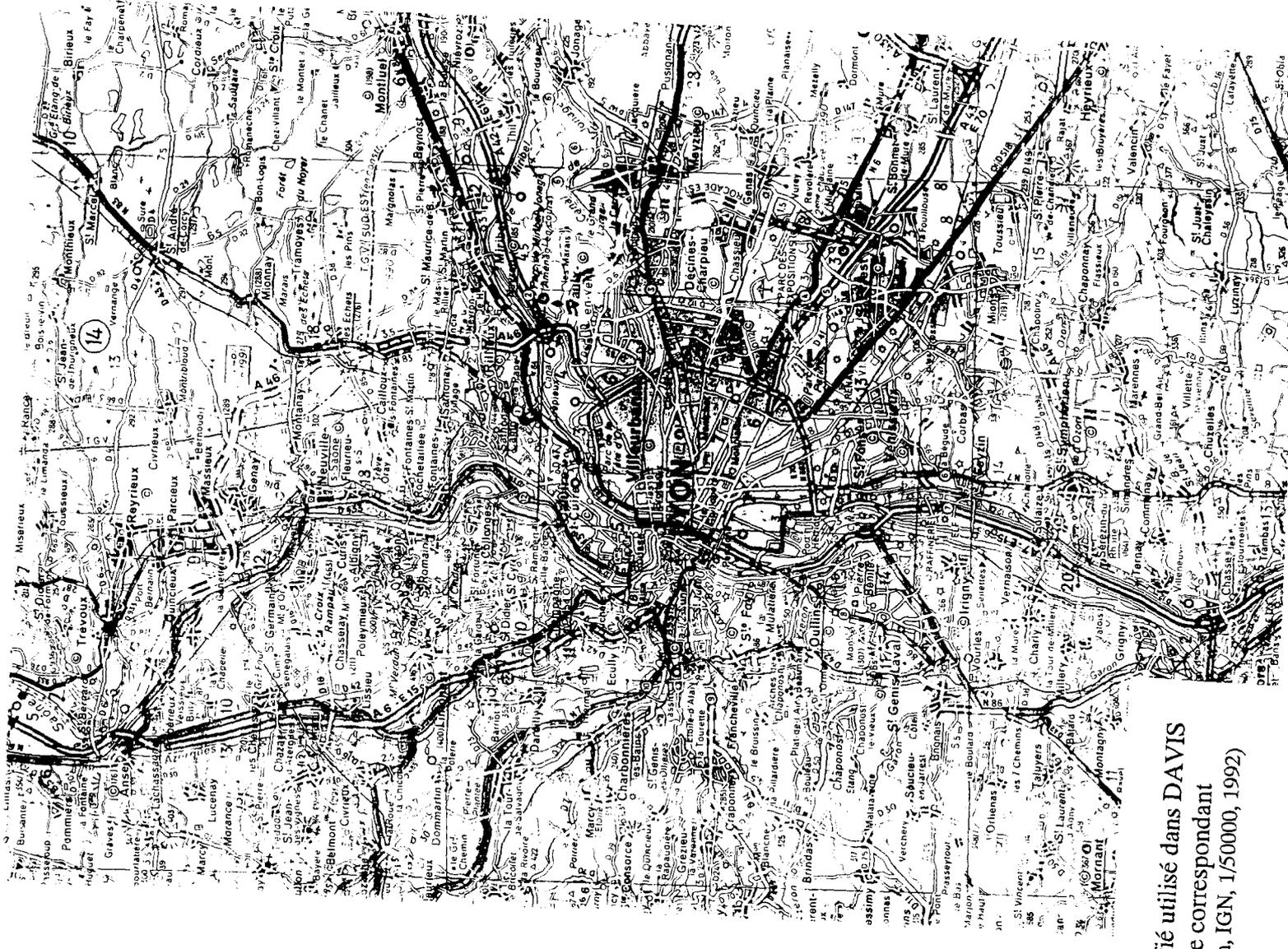
1.1.2. Les données utilisées : l'heure de pointe du soir sur le Grand Lyon en 1990

Pour effectuer son affectation, DAVIS nécessite donc 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. Les simulations qui ont été faites dans le cadre du présent exercice ont été réalisées à partir des données fournies par le CETE de Lyon concernant le réseau de l'agglomération lyonnaise en 1990 et les déplacements d'une heure de pointe du soir pour la même époque.

La page ci-contre donne une représentation cartographique de ce réseau. La matrice de demande a été composée à partir de 161 zones, il n'est donc pas question de l'insérer ici. Par contre un tableau regroupant ces zones en centre-ville (Lyon et Villeurbanne), première couronne, seconde couronne et extérieur peut être fourni à titre indicatif pour donner une image de la répartition des déplacements dans l'agglomération :

¹¹ Pour cette citation ainsi que la précédente, Cf. *Manuel de référence, DAVIS... Op. Cit.* Partie VII p. 16 et p. 17

¹² Pour ces valeurs des paramètres ainsi que pour la formule précédente, Cf. *Manuel de référence Op. Cit.* Partie VII pp. 16-17.



Réseau 1990 simplifié utilisé dans DAVIS
 et fond de carte correspondant
 (Carte du Grand Lyon, IGN, 1/50000, 1992)

Tableau 1 : Répartition des déplacements dans l'agglomération de Lyon une heure de pointe du soir en 1990 (à partir de la matrice origine-destination utilisée par le CETE de Lyon)

O/D	Centre	1 ^{ère} cour.	2 ^{de} cour.	Extérieur	Total : % et (effectifs)
Centre	23%	10%	6%	5%	45% (68 819)
1 ^{ère} couronne	8%	6%	6%	2%	23% (34 830)
2 ^{de} couronne	6%	6%	9%	3%	24% (36 919)
Extérieur	4%	2%	2%	1%	9% (13 945)
Total :	41%	25%	23%	11%	(154 513)
% et (effectifs)	(62 769)	(38 393)	(35 778)	(17 573)	

On peut rajouter que la matrice des déplacements synthétisée ici est constituée sur la base de deux sources différentes que sont les enquêtes ménages et les enquêtes cordon.

Les enquêtes ménages se font auprès de ménages résidant au sein d'une agglomération. Elles recensent tous les déplacements effectués en dehors du contexte professionnel la veille du jour d'enquête par chacune des personnes du ménage de plus de cinq ans. Elles permettent, entre autre, d'estimer le nombre de déplacements automobiles réalisés entre zones internes au périmètre d'enquête. Les enquêtes cordon s'intéressent quant à elles aux déplacements routiers qui sortent d'un périmètre, "cordon", déterminé. Elles donnent ainsi une image des flux d'échange et de transit qui vient compléter l'information tirée des enquêtes ménages.

Deux principales sources d'erreur peuvent venir entacher la précision des chiffres ainsi reconstitués. Elles concernent les questions de réajustement temporel des données et d'une image partielle des déplacements automobiles. Pour constituer la matrice de 1990 sur l'agglomération lyonnaise, la dernière enquête-ménage disponible était celle de 1986 : des hypothèses d'évolution de la mobilité interzones doivent être posées pour réactualisés les chiffres. L'enquête cordon, par contre, date de la même année. A ce problème de décalage temporel s'ajoute celui d'une connaissance incomplète des déplacements. D'une part les périmètres des deux enquêtes ne se recouvrent qu'approximativement, ce qui nécessite d'estimer les flux générés par les quelques portions de territoire non enquêtés. D'autre part et surtout l'enquête ménage ne se préoccupe ni des déplacements des personnes ne résidant pas de manière régulière dans le périmètre d'enquête, ni des déplacements à motif professionnel. Ces deux types de déplacements restent, par nature, non enquêtés lorsqu'ils sont réalisés à l'intérieur de l'agglomération et ne débordent pas des limites de l'enquête cordon.

Le CETE de Lyon évalue la zone d'ombre laissée par ces deux enquêtes à environ 10-15% des déplacements automobiles effectués dans l'agglomération. Cette estimation est déduite des données de comptage qui fournissent des données plus exhaustives mais sans les caractéristiques des déplacements et des individus qui les réalisent. Elle permet cependant de redresser partiellement les chiffres de la matrice origine destination constituée.

1.2. Calcul des indicateurs de nuisance

1.2.1. Définition des états de circulation : les cycles de conduite

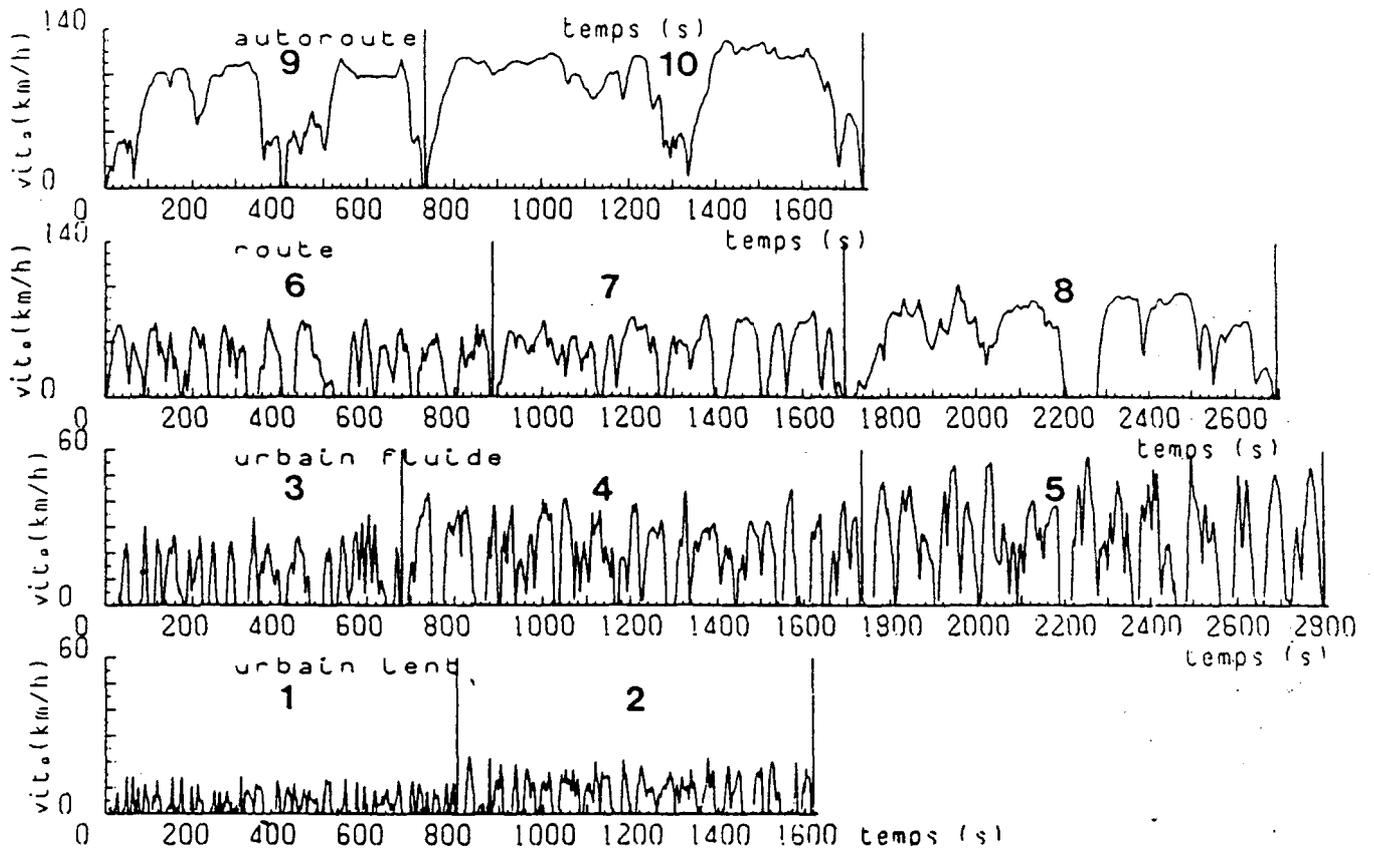
Que ce soit pour le bruit ou la pollution atmosphérique, l'état de la circulation à une répercussion importante sur les émissions unitaires des véhicules. En effet, le niveau sonore émis par un véhicule dépend, entre autre, de sa vitesse et de ses accélérations (d'autres facteurs, comme la pente de la route empruntée, ne sont pas pris en compte dans nos évaluations). De plus la consommation et les émissions au kilomètre d'un véhicule peuvent varier de façon très importante suivant le régime du moteur et donc de l'état de la circulation. Nous nous sommes inspirés des travaux de l'INRETS et des développements de la société EUROPLAN¹³ pour prendre en compte ce facteur essentiel jouant sur les émissions unitaires des véhicules.

A la suite d'une Enquête sur l'Utilisation Réelle des Véhicules (enquête EUREV), l'INRETS a pu définir un ensemble de 10 cycles de conduite aux caractéristiques cinématiques (vitesses, distances, accélérations...) différenciées¹⁴. Ces cycles semblant bien corrélés aux vitesses et aux types de voiries, ils ont reçu des dénominations de type "urbain lent", "urbain fluide", "route" et "autoroute". Projetés dans un plan temps-vitesse, ils peuvent être caractérisés par les représentations figurées page suivante.

¹³ EUROPLAN, POLYEN, *analyse des émissions de pollution liées à l'énergie dans l'agglomération lyonnaise. Op. Cit.*

¹⁴ JOURMARD Robert, ANDRE Michel, CRAUSER Jean-Pierre, BADIN François, PATUREL Laurent, *Méthodologie de mesure des émissions réelles du parc automobile. Bron : Rapport INRETS n°31, 1987. 81 p.*

Graphique 4 : Représentation des 10 cycles de conduite INRETS à partir des vitesses instantanées¹⁵



Utilisés lors d'une campagne de mesure sur banc d'essai des émissions unitaires de véhicules légers, ces cycles ont permis de retrouver des niveaux de consommation et d'émissions bien typés¹⁶. Reprenant la méthodologie d'évaluation d'EUROPLAN, nous avons reconstitué ces cycles de conduite à partir des sorties de DAVIS, en fonction des vitesses et des caractéristiques de la voirie. Ceci a permis de retrouver, ensuite, les niveaux d'émissions unitaires correspondants établis par l'INRETS. A chacun de ces cycles nous avons également attribué une caractéristique de circulation "fluide" ou "pulsée" (Cf. infra pour leur définition) permettant ainsi d'utiliser les abaques fournies dans le *Guide du bruit* édité par le CETUR¹⁷.

A partir des sorties de DAVIS, chaque arc du réseau s'est vu attribué un "cycle de conduite" en fonction de ses caractéristiques propres d'une part et de la vitesse moyenne des véhicules d'autre part :

¹⁵ *Idem* p. 20

¹⁶ JOURMARD R., PATUREL L., VIDON R., GUITTON J.P., SABER A.I., COMBET E., *Emissions unitaires de polluants des véhicules légers*. Bron : Rapport INRETS n°116, 1990. 119 p.

¹⁷ CETUR, *Guide du bruit des transports terrestres - Prédiction des niveaux sonores*. Bagnex : Ministère de l'environnement et du cadre de vie, Ministère des transports (Direction Générale des Transports Intérieurs), novembre 1980. 303 p.

Tableau 2 : La caractérisation des conditions de circulation

<i>Descriptifs des états de la circulation</i>		<i>Paramètres et valeurs utilisés pour déterminer ces états</i>	
Fluidité de la circulation	Cycles de conduite	Type de voirie	Vitesse comprise entre
Fluide	Autoroute 1	9	> 85 km/h
	Autoroute 2	4, 6 9	>70 km/h 60 et 85 km/h
	Route 1	9 4, 6 2, 3, 7, 8	0 et 60 km/h 55 et 70 km/h >55 km/h
	Route 2	2, 3, 4, 6, 7, 8	42 et 55 km/h
Pulsée	Route 3	2, 3, 4, 6, 7 8	33 et 42 km/h 0 et 42 km/h
	Urbain fluide 1	2, 3, 4, 6, 7 5	25 et 33 km/h > 25 km/h
	Urbain fluide 2	2 à 7	19 et 25 km/h
	Urbain fluide 3	2 à 7	12 et 19 km/h
	Urbain lent 1	2 à 7	7 et 12 km/h
	Urbain lent 2	2 à 7	0 et 7 km/h

Les 9 types de voirie définis pour le réseau de Lyon dans DAVIS sont les suivants, sachant que le "réseau de voirie intérieur" (type n°1) n'a pas été pris en compte car il correspond aux liens fictifs reliant les centroïdes de zones au réseau proprement dit :

- | | |
|----------------------------------|------------------|
| (1. Réseau secondaire intérieur) | 6. CD 300 |
| 2. Réseau secondaire | 7. Pénétrante |
| 3. Rocade | 8. Rase campagne |
| 4. Voie rapide urbaine | 9. Autoroute |
| 5. Centre Ville | |

1.2.2 Le calcul des émissions sonore

La logique du calcul se décompose en deux étapes :

1. Calcul des émissions unitaires suivant deux typex de véhicules (véhicules légers, poids-lourds) et deux états de fluidité de la circulation (fluide, pulsée)¹⁸ à partir des abaques du *Guide du bruit*.
2. Agrégation par arc puis par tronçon pour obtenir un indicateur d'émission sonore Leq(1 heure) en dB(A), sur l'isophone de référence

a) Calcul des émissions unitaires

Le *Guide du bruit* fournit les abaques reproduites à la page suivante qui permettent de déduire le niveau sonore Leq(1 heure) en dB(A) émis par un véhicule en fonction de différents critères : type de véhicule, type de circulation, pente du tronçon de voirie (montée ou descente suivant le sens), vitesse moyenne des véhicules, proximité d'un carrefour en aval (décélération) ou en amont (accélération). Ces abaques ont été mises au point par l'Institut de Recherche sur les Transports (IRT, aujourd'hui dénommé INRETS déjà cité) sur la base de mesures directes sur site. La première correspond à celle qui a été effectivement calculée, la seconde correspond à une linéarisation de la première permettant des calculs par procédure automatique plutôt que par lecture directe.

Notons tout de suite que ces abaques ne servent que de première étape dans le calcul des niveaux sonores. Il faut ensuite réagréger les émissions unitaires en fonction des flux constatés puis affiner les résultats suivant l'environnement de la voirie. En effet les résultats sont obtenus par Leq(1 heure) en dB(A) sur l'isophone de référence, c'est à dire "à 30 mètres du bord de voie, 10 mètres au dessus du plan de la chaussée dans le cas d'une voie rectiligne à bords dégagés, de même trafic, placée sur un sol très réfléchissant"¹⁹. D'autres abaques ont été établies pour prendre en compte les différentes natures d'obstacles au bruit situés autour de la voirie considérée et donner ainsi une image de la carte sonore en fonction des phénomènes d'absorptions et de réverbérations retenus.

¹⁸ Dans le *guide du bruit des transports terrestres*, Op. Cit., les écoulements fluides et pulsés sont définis p. 96 de la façon suivante :

"Ecoulement fluide continu : C'est un écoulement où les véhicules ont une vitesse sensiblement constante sur la section de route étudiée. Il est fluide, c'est-à-dire que sur une telle section, le débit des véhicules est stable dans le temps, sur des périodes de quelques dizaines de minutes, et dans l'espace. Il peut évoluer d'heure en heure au cours de la journée, mais sans connaître de variations brusques ou rythmées. De plus il n'est ni accéléré, ni décéléré, mais s'effectue à vitesse stabilisée. (...)

Ecoulement pulsé continu : Un écoulement pulsé sera caractérisé par une certaine turbulence, notion comparable pour ce qui nous concerne, à celle utilisée couramment en mécanique des fluides. Un écoulement turbulent voit circuler une part importante de véhicules en allure transitoire (accélération ou décélération). Son régime s'oppose à celui d'écoulement laminaire. Il n'est stable ni dans le temps (variation brusque des débits sur de courtes périodes de temps), ni dans l'espace (concentration irrégulière des véhicules sur la section étudiée, à un instant donné)."

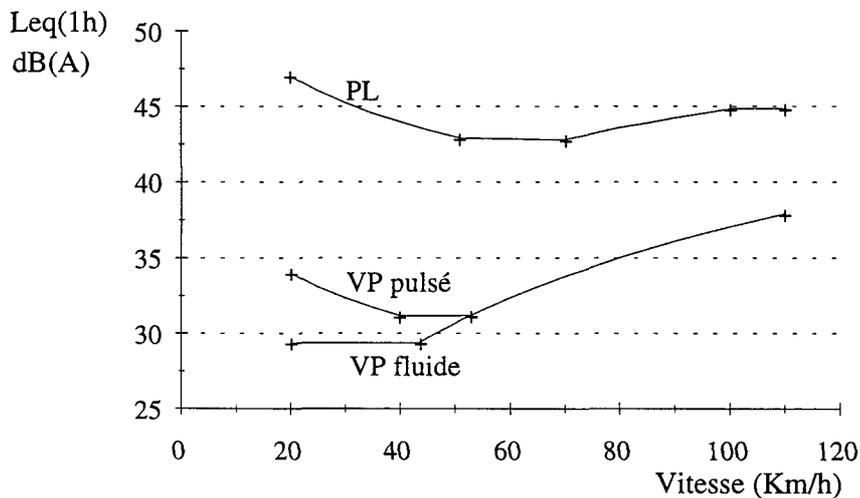
Notons que deux autres types d'écoulements pulsé, accéléré et décéléré, sont définis lorsqu'une part importante des véhicules sont en phase d'accélération ou de décélération, en aval ou en amont d'un carrefour par exemple. Ces distinctions n'ont pas été reprises dans la construction de l'indicateur d'émissions sonores présenté ici.

¹⁹ *Idem* p. 88.

Pour les calculs qui ont été faits ici, il n'était pas possible de relever systématiquement toutes les topographies autour du millier de tronçons retenus pour les simulations. L'objectif a donc été de construire un indicateur des puissances acoustiques émises compte non tenu des déformations liées à l'environnement. De même, toutes les caractéristiques de la voirie n'ont pas été retenues (notamment la pente et la proximité des carrefours). Les niveaux sonores obtenus ne peuvent donc pas avoir la prétention de représenter une quelconque réalité. Par contre, nous avons posé comme hypothèse qu'ils pouvaient donner une bonne base de comparaison entre les différentes simulations qui ont été faites : chaque niveau n'a en soit pas de grande signification mais il donne par contre une indication des tendances qui se dégagent lorsque les flux et les vitesses se modifient en fonction des simulations effectuées.

Les abaques qui ont été finalement retenues, après simplification de celles qui viennent d'être évoquées, sont les suivantes :

Graphique 5 : Emissions sonores d'un véhicule en conditions de circulation fluide ou pulsée



Ces trois abaques correspondent aux données analytiques suivantes permettant de relier vitesse et niveau sonore par véhicule ($Niveau\ Sonore = Coef. \times \log_{10}(Vit) + Cste$) :

Tableau 3 : Emissions sonores des véhicules légers :

en situation de circulation fluide

Vitesse (km/h)	Coef. de pente	Constante
[20,0 ; 43,5[	0	29,40
≥43,5	21,145	-5,25

en situation de circulation pulsée

Vitesse (km/h)	Coef. de pente	Constante
[20,0 ; 40,0[	-9,301	46,10
[40,0 ; 53,0[	0	31,20
≥53,0	21,145	-5,25

Tableau 4 : Emissions sonores des poids-lourds : (en situation de circulation fluide et pulsée)

Vitesse (km/h)	Coef. de pente	Constante
[20,0 ; 51,0[	-10,085	60,12
[51,0 ; 70,0[	-0,727	44,14
[70,0 ; 100,0[	12,911	18,98
≥100,0	0	44,80

Notons que dans les cas où la vitesse était inférieure à 20 km/h, le niveau sonore émis a été estimé équivalent à celui correspondant à une vitesse de 20 km/h. Il a de plus été considéré que même sur les arcs où la vitesse moyenne calculée est supérieure à 100 km/h, la vitesse moyenne des poids-lourds ne la dépasse pas et leur niveau d'émission sonore plafonne donc à 44,8 dB(A).

Pour pouvoir exploiter ces abaques, mêmes simplifiées, deux types d'informations non présents dans les sorties de DAVIS sont nécessaires : les parts respectives des PL et des VL ainsi que l'état de la circulation, fluide ou pulsée. La partie précédente a présenté comment ont été définis les états de circulation en fonction de la vitesse moyenne et du type de chaque arc. Pour ce qui concerne les parts respectives entre PL et VL, nous avons repris les données qu'EUROPLAN avait établies en concertation avec le CETE de Lyon²⁰ :

Tableau 5 : Part du trafic VL suivant les différents cycles de conduite

Cycles	Part VL
Urbains	0,94
Routes	0,93
Autoroute	0,90

b) Réagrégation par tronçon

Un indicateur du niveau sonore émis par véhicule n'a pas d'intérêt en soit : c'est l'indication du bruit généré par la circulation totale sur un axe donné qui peut donner une idée de la gêne provoquée par les transports routiers en cet endroit. Les émissions sonores unitaires ont donc été réagrégées par type de véhicule sur un arc d'abord, par arc ensuite et par tronçon enfin.

Pour un flux composé de p véhicules, on peut écrire²¹ :

$$Leq = 10 \cdot \log_{10}(10^{Leq1/10} + \dots + 10^{Leqp/10})$$

Ceci revient à écrire, si tous les véhicules au sein de ce flux sont considérés identiques :

$$Leq(p \text{ véhicules}) = Leq(1 \text{ véhicule}) + 10 \cdot \log_{10}(p)$$

²⁰ Cf. EUROPLAN, POLYEN, ... *Op. Cit.* p. 237 et p. 240.

²¹ Cf. par exemple p. 6 de FAVRE B., *Le bruit de trafic routier. Méthodes de prévision*. Arcueil : Synthèse INRETS n°8, 1987. 70 p.

Si l'on a m_1 VL et n_1 PL dans un sens ainsi que m_2 VL et n_2 PL dans l'autre, le niveau sonore global sur un tronçon peut être décomposé en 4 classes de bruit :

$$\text{Leq1} = \text{Leq}(1 \text{ VL}) + 10 \cdot \log_{10}(m_1)$$

$$\text{Leq2} = \text{Leq}(1 \text{ VL}) + 10 \cdot \log_{10}(m_2)$$

$$\text{Leq3} = \text{Leq}(1 \text{ PL}) + 10 \cdot \log_{10}(n_1)$$

$$\text{Leq4} = \text{Leq}(1 \text{ PL}) + 10 \cdot \log_{10}(n_2)$$

Soit un niveau sonore global :

$$\text{Leq} = 10 \cdot \log_{10}(10^{\text{Leq1}/10} + 10^{\text{Leq2}/10} + 10^{\text{Leq3}/10} + 10^{\text{Leq4}/10})$$

1.2.3. La pollution atmosphérique

La méthodologie d'évaluation de cette partie doit beaucoup aux travaux d'EUROPLAN déjà évoqués :

- les émissions unitaires (en g/veh.km) ont été déduites des cycles de conduite pour trois grands types de véhicules (VL essence, VL diesel, PL) ;
- un facteur de correction a été introduit pour prendre en compte les surémissions liées aux moteurs tournant à froid ; des parts de moteurs froids pour chaque cycle ont donc dues être estimées pour les VL (celles des PL étant considérées comme négligeables) ;
- enfin, la part respective de chaque type de véhicule à l'intérieur de chaque cycle a été estimée.

Le tableau résultant, qui représente les émissions moyennes en grammes d'un véhicule "moyen" roulant pendant 1 km à un cycle de conduite donné, est figuré ci-dessous. C'est ce tableau qui a servi de base aux évaluations des émissions polluantes des transports routiers. On trouvera en annexe I une présentation détaillée des hypothèses qui ont permis d'aboutir à ce tableau.

Tableau 6 : Emissions unitaires d'un véhicule moyen pour chaque cycle de conduite (en g/km) :

Cycles de conduite	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
Autoroute 1	0,3	3,5	0,15	16,5	248,5	1,5	0,006
Autoroute 2	0,3	3,4	0,15	15,4	247,7	1,8	0,006
Route 1	0,3	2,7	0,10	17,4	210,2	2,2	0,006
Route 2	0,3	2,6	0,10	20,7	227,5	3,1	0,006
Route 3	0,4	2,7	0,13	29,7	266,1	5,0	0,008
Urbain 1	0,3	2,4	0,11	28,0	251,1	4,7	0,008
Urbain 2	0,4	2,2	0,11	32,1	271,3	4,6	0,009
Urbain 3	0,5	2,3	0,14	47,8	374,9	7,1	0,013
Urbain Lent 1	0,5	2,1	0,14	52,8	424,6	8,2	0,014
Urbain Lent 2	0,8	2,4	0,18	100,5	660,1	13,6	0,024

Notons simplement ici que les données d'émissions (NO_x, CO, CO₂, hydrocarbures et poussières) sont issus des travaux de l'INRETS²². Les émissions de SO₂ et de plomb ont été calculées en fonction des teneurs en soufre et en plomb des carburants. Les surémissions liées aux moteurs circulant à froid ont été établies sur la base de ces mêmes travaux (Cf. annexe I, §2.2.).

Concernant les poids lourds, ces données d'émissions sont issues du rapport CORINAIR²³. Les différences de composition du trafic poids lourds suivant les cycles ont également été prises en compte à partir notamment d'évaluations établies lors de la dernière enquête cordon de Lyon²⁴ et de travaux de l'INRETS²⁵. On trouvera en annexe I, §2.1., une présentation plus détaillée de la méthode d'estimation des émissions moyenne des poids lourds par cycle de conduite.

²² On peut les retrouver en annexes de JOUMARD et alii, *Emissions unitaires... Op. Cit.* p. 86 et p. 94.

²³ Commission of the European Communities, *CORINAIR working group on emission factors for calculating 1990 emissions from road traffic. Volume 1 : Methodology and emissions factors*. Bruxelles-Luxembourg : ECSC-EEC-EAEC, 1993. 115 p.

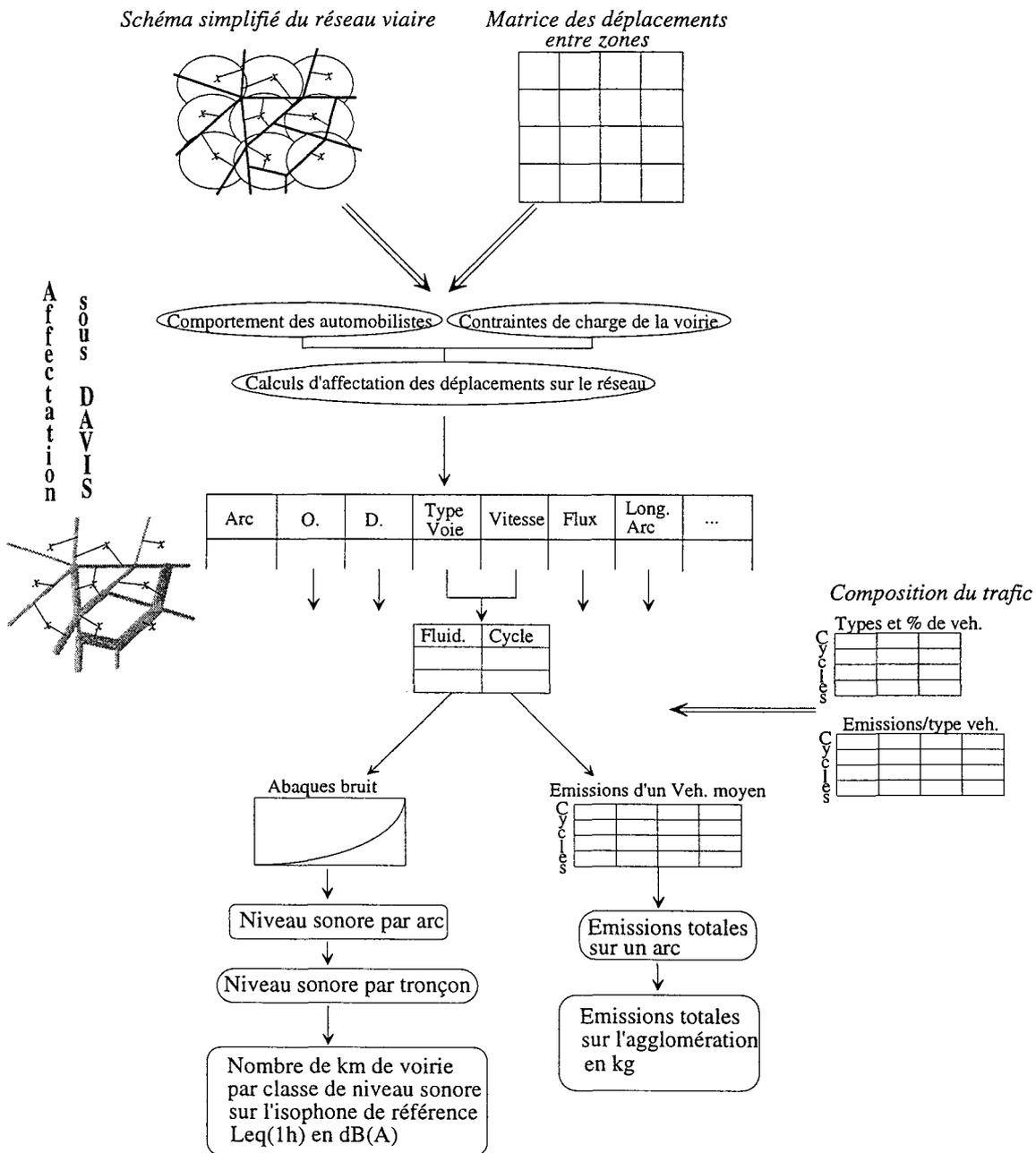
²⁴ DDE du Rhône, CETE de Lyon, *Enquête cordon de Lyon, les problèmes quotidiens de circulation : transit et échange avec l'extérieur de l'agglomération*. Lyon, 1992. 33 p.

²⁵ PILLOT Didier, "Analyse fine des trafics lourds". 3^{ème} colloque international *Transports et pollution de l'air*, Avignon, 6-10 Juin 1994. Préactes, Bron : INRETS éd. pp. 87-94.

1.3. Conclusion

C'est donc cette méthode relativement lourde qui a été utilisée pour effectuer les évaluations qui vont suivre dans les prochains chapitres. Avant de la mettre en oeuvre il convient de s'interroger sur sa pertinence ainsi que sur la signification et les limites des résultats ainsi obtenus : c'est ce à quoi va être consacrée la deuxième partie. Auparavant, un schéma synthétique peut aider à mieux visualiser les grandes opérations menées lors d'une évaluation :

Graphique 6 : Le déroulement de la méthode de calcul des émissions polluantes et sonores du trafic routier



2. De la méthode à l'interprétation des résultats obtenus

Comme le montre le schéma précédent, une telle méthode d'évaluation des pollutions atmosphériques et sonores repose sur un grand nombre d'hypothèses et de restrictions qu'il est nécessaire de mettre à jour pour mener à bien une réflexion autour des résultats.

Nous montrerons dans un premier temps en quoi les hypothèses de calcul d'affectation sous DAVIS et les contraintes liées aux données initiales conduisent à privilégier une lecture des résultats à un niveau géographique "global", correspondant à l'ensemble du périmètre modélisé, ainsi qu'à développer une approche en termes relatifs des résultats, en les comparant les uns aux autres et en s'interrogeant sur les variations des valeurs en fonction des hypothèses de simulation plutôt que sur les valeurs elles-mêmes.

Nous rechercherons ensuite, sinon à prendre mesure des incertitudes sur les résultats obtenus, du moins à en cerner les principales sources. Ceci nécessite une réflexion impliquant à la fois la fiabilité des hypothèses de calcul et la stabilité des résultats au regard de ces mêmes hypothèses : plus la valeur d'un paramètre est susceptible d'être remise en cause, moins les résultats doivent être sensibles à ses variations pour que leur fiabilité puisse être confirmée - et inversement moins la valeur d'un paramètre est susceptible d'être remise en cause, plus les résultats peuvent être sensibles à ses variations sans que leur fiabilité soient vraiment affectée. Les hypothèses les plus sujettes à caution seront donc testées avec plus d'attention.

2.1. Pour une lecture globale et relative des résultats

Les évaluations économiques menées dans le chapitre précédent ont permis d'obtenir une image, même grossière, des enjeux posés par les nuisances routières en agglomération. Dans ce contexte, l'usage d'un modèle d'affectation du trafic pour avoir une idée des pollutions sonores et atmosphériques des transports routiers urbains risque de se cantonner à un exercice de répétition sinon, au mieux, de permettre d'élargir des fourchettes d'estimation de coût.

L'apport de ce type de modèle doit dès lors être recherché dans d'autres directions, sachant que deux d'entre elles se dégagent *a priori* avec d'une part la mise en évidence des dynamiques propres au système de transport routier à l'oeuvre derrière le constat d'un coût externe et d'autre part le développement d'une réflexion spatialisée, absente des résultats présentés. Un modèle d'affectation du trafic peut être utilisé pour évaluer la sensibilité des mesures d'émissions aux variations des caractéristiques du système de transport routier (évolution de la mobilité, des conditions de circulation, du parc automobile, etc.) : c'est dans cette optique qu'il a toujours été présenté dans ce travail. On peut également concevoir de développer une approche spatialisée des nuisances et de rendre compte à un niveau local et surtout micro-local des problèmes posés par les transports routiers urbains. Ces deux approches sont d'ailleurs complémentaires, la seconde permettant d'affiner spatialement, à l'intérieur d'une agglomération, le bilan économique déjà dressé dans le chapitre précédent, la première débouchant sur une analyse plus dynamique et mettant plus en évidence les variables de contrôle stratégiques - pour cette question des nuisances - du système de transport.

Ces deux logiques d'usage des résultats du processus de calcul présenté dans la partie précédente s'inscrivent dans le cadre général d'une évaluation des nuisances des transports urbains et prolongent les estimations économiques du chapitre précédent. Cependant, la logique d'une évaluation spatialisée n'est évoquée que dans cette partie et ne sera pas reprise par la suite car elle résiste mal à une confrontation avec les hypothèses et contraintes posées au cours des calculs. Si nous l'évoquons ici malgré tout, c'est pour éviter tout dérapage dans ce sens lors de l'interprétation des résultats. Le test de cohérence entre l'outil et les objectifs auxquels il peut répondre va donc, en fin de compte, conduire à interpréter les résultats de calcul à un niveau global, non désagrégé spatialement, et à les utiliser de façon relative en les confrontant les uns aux autres.

2.1.1. Des données de départ contraignantes pour l'analyse des niveaux d'émissions calculés

Nous l'avons vu, l'ensemble des trafics routiers ne sont pas pris en compte. D'une part cette matrice des déplacements n'est constituée que sur la base d'une heure de pointe du soir car seuls les déplacements ayant commencé entre 17 et 18 heures sont pris en compte. D'autre part, le recueil des données n'est pas parfait. La conjonction des enquêtes ménages et cordon laisse un pan d'ombre concernant certains déplacements (motif professionnel et/ou des non-résidents de l'agglomération réalisés à l'intérieur du périmètre modélisé). Nous avons cependant pris le parti d'estimer que ces types de déplacements, évalués à 10-15% du trafic, étaient pris en compte à travers les redressements de la matrice origine-destination effectués par le CETE sur la base notamment des données de comptages routiers.

Cependant les résultats obtenus restent limités à une heure de pointe, sans que l'on puisse en inférer les émissions journalières moyennes. En effet les déplacements évoluent au fil des heures, non seulement en quantité mais également au niveau de leurs origines et destinations ce qui entraîne des variations en termes de trafic et de conditions de circulation que seule une modification adéquate de la structure de la matrice origine-destination permettrait de représenter. Telles quelles, nos évaluations ne peuvent donc pas prétendre donner une estimation de la pollution sonore et atmosphérique réelle émise par les transports routiers dans l'agglomération lyonnaise. Leur objectif, répétons le, est surtout de donner une indication de l'évolution des émissions lorsque des caractéristiques du système de transport routier sont modifiées.

Enfin la représentation du réseau routier est une représentation simplifiée. Par exemple la voirie secondaire qui irrigue l'intérieur de chaque zone est absente. Les arcs qui relient chaque centroïde de zone au réseau sont des "liens fictifs" dont les caractéristiques servent plus à donner une idée du coût moyen, en temps généralisé, nécessaire pour sortir de la zone qu'à décrire les conditions de circulation à l'intérieur. Nous n'avons de ce fait pris en compte que les trafics interzones, hors liens fictifs.

2.1.2. Les problèmes posés pour une évaluation géographiquement localisée

Cette base limitée sur laquelle reposent les données concernant le réseau et les déplacements rend difficile une interprétation trop finement spatialisée des résultats. Plusieurs problèmes se trouvent en fait posés :

- *la modélisation de l'intérieur des zones* : tenter, en l'état, de faire une interprétation localisée des résultats reviendrait à supposer que les trafics intrazonales ont un impact négligeable alors que l'intérieur de ces zones est autant, sinon plus, constitutif du cadre de vie urbain que la voirie représentée -et donc les trafics attenants.
- *une modélisation des processus de diffusion* : en plus des informations concernant les transports eux-mêmes, il faudrait aussi prendre en compte d'autres éléments tels que les conditions météorologiques et la physionomie des abords des voies pour disposer d'une image de la diffusion des émissions à travers le tissu urbain. Cette prise en compte devrait être d'autant plus précise que les nuisances sont à impact localisé : émissions sonores par exemple, ou concentration trop forte d'oxyde de carbone et de vapeurs d'hydrocarbure dans certaines rues étroites et non ventilées.
- *la recherche d'un cadre temporelle pertinent* : enfin on peut souligner que l'échelle temporelle idéale pour mettre en oeuvre des indicateurs de nuisance ne concerne certainement pas simplement une heure de pointe du soir mais plutôt l'ensemble de la journée : la période à représenter est sans doute plus le jour ouvrable banalisé que l'heure de pointe du soir.

L'esprit dans lequel ces évaluations vont être faites est donc bien, comme cela a été présenté en introduction, de permettre de travailler de façon relative et globale. Nous ne dirons jamais, à partir des résultats obtenus, que "les transports routiers urbains émettent tant d'unités de tel polluant" mais plutôt que "les émissions de tel polluant restent stables (ou varient fortement...) lorsque telle caractéristique des transports routiers urbains évolue". De même nous ne nous pencherons pas sur les pollutions atmosphériques et sonores le long de tel ou tel tronçon, encore moins à l'intérieur de telle ou telle zone, et les résultats resteront toujours présentés à un niveau global, où leur interprétation peut rester pertinente.

On peut souligner ici que, avec un tel type d'interprétation, le cas lyonnais utilisé comme support disparaît en tant qu'objet à décrire. L'objectif de représentation est beaucoup plus général, concernant la mise en évidence des grands mécanismes, internes au système de transport, mettant en rapport ce système et son environnement. Les données de l'agglomération lyonnaise permettent par contre de raccrocher la démarche à des logiques de déplacements routiers existants et lui évitent ainsi de tomber dans le simple exercice théorique.

2.2. Test de la méthode d'évaluation et robustesse des résultats

Une fois posé ce principe d'interprétation des résultats, il reste encore à s'interroger sur leur robustesse. Un test systématique de toutes les hypothèses de calcul relevant de la gageure, nous avons préféré retenir 3 variables clés pour les évaluations qui vont être faites et tester ces variables à travers les différentes étapes de la méthode de calcul.

Ces trois variables sont celles que l'on a évoqué en introduction, avec *le trafic total*, exprimé en nombre de kilomètres parcourus, *les conditions de circulation* qui jouent *a priori* également un rôle important et, enfin *la composition de ce trafic*, car les différents types de véhicules contribuent de façon très hétérogène aux résultats d'émissions atmosphériques et sonores :

- en jouant sur les options de calcul du modèle et notamment sur les procédures d'affectation et la fonction de coût généralisé, nous verrons dans quel mesure le nombre de kilomètres parcourus est susceptible de varier et d'affecter les évaluations d'émissions ;
- les vitesses constituent une variable clé dans la méthode utilisée pour représenter les conditions de circulation ; c'est donc essentiellement sur cette variable que nous avons joué pour tester la robustesse des résultats à ce facteur ;
- enfin, concernant le test des hypothèses de composition du trafic, nous avons simplement envisagé différentes proportions de chaque type de véhicule pour mesurer les variations dans les résultats.

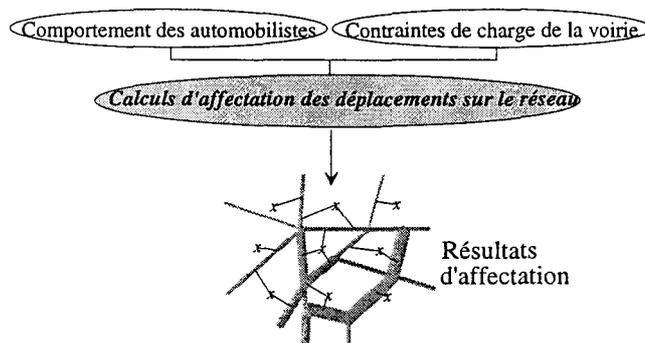
A chaque test une partie de l'illustration de synthèse fournie à la fin de la section précédente sera insérée dans la présentation pour aider à repérer plus facilement où les différents paramètres sur lesquels on travaille interviennent dans le cours de la procédure de calcul.

2.2.1. Sensibilité des résultats aux options de calcul du modèle

Au niveau des options de calcul du modèle, deux principaux points ont été testés. Le premier concerne le mode d'affectation retenu sachant que DAVIS propose deux grandes options de calcul avec les affectations en tout ou rien en une ou plusieurs itérations d'un côté et des calculs recherchant un équilibre général suivant le principe de Wardrop. Le second touche aux paramètres de calcul du temps généralisé qui détermine le choix des itinéraires des automobilistes.

Ces deux tests renvoient donc aux principales hypothèses situées en début de procédure de calcul :

Graphique 7 :
Situation des paramètres testés dans la procédure de calcul



a) Affectation par tout ou rien ou principe de Wardrop ?

Nous avons vu en début de chapitre que DAVIS propose deux grandes procédures d'affectation des déplacements sur le réseau :

- soit en plus court chemin, avec un unique itinéraire pour chaque origine-destination et un calcul itératif permettant de charger progressivement la matrice des déplacements sur le réseau et de prendre en compte les effets des trafics sur les vitesses ;

- soit par la recherche d'un état d'équilibre respectant le premier principe de Wardrop selon lequel la recherche individuelle d'un itinéraire optimal pour chaque automobiliste peut aboutir, entre chaque origine et destination, à l'établissement de plusieurs itinéraires au coût généralisé équivalent (et inférieur à ceux de tous les autres itinéraires possibles).

De plus la question de la saturation, lorsque les flux calculés sur un arc deviennent supérieurs à sa capacité, peuvent être traités de deux manière différentes :

- soit par simple prolongation des courbes vitesse-débit ;
- soit par écrêtement de la demande, création de files d'attente et éventuellement propagation en amont de la congestion.

Il est possible, en cas d'affectation au plus court chemin, de choisir entre 1 et 18 itérations et, en cas d'équilibre de Wardrop, de calculer de 1 à 18 itinéraires entre chaque origine destination. Lorsque l'on rajoute les possibilités de prendre en compte plus ou moins finement les questions de saturation, le nombre total d'options de calcul de l'affectation devient considérable. Pour tester l'éventuelle stabilité des résultats d'émissions polluantes et sonores, 7 options couvrant le champ des possibilités de calcul, de la plus grossière à la plus fine ont été retenues :

- affectation en *tout ou rien*, en une itération (**TTR1**) : tous les flux sont affectés en une seule fois, en ne prenant en compte que les vitesses *a priori* attribuées à chaque arc ;
- affectation en *tout ou rien*, en 6 itérations (**TTR6**) : les flux sont chargés progressivement sur le réseau et l'influence des trafics sur les vitesses intervient ;
- affectation en *tout ou rien*, en 18 itérations (**TTR18**) : idem que précédemment, avec un chargement du réseau encore plus progressif ;
- affectation en *tout ou rien*, en 6 itérations et avec écrêtement de la demande (**TTR6-DE**) : l'influence des trafics sur les vitesses intervient avec éventuellement création de files d'attente et débordements sur les arcs amont ;
- affectation en *tout ou rien*, en 18 itérations et avec écrêtement de la demande (**TTR18-DE**) : idem que précédemment, avec un chargement du réseau encore plus progressif ;
- affectation selon le principe d'équilibre de Wardrop, avec 6 itinéraires et écrêtement de la demande (**WP6-DE**) : la recherche d'optimisation va éventuellement jusqu'à 6 itinéraires possibles et égaux en temps généralisé entre une origine et une destination données ; c'est cette option qui a été retenue pour mener l'ensemble des évaluations et qui servira de référence pour comparer les différents résultats de ce test ;
- affectation selon le principe d'équilibre de Wardrop, avec 18 itinéraires et écrêtement de la demande (**WP18-DE**) : la recherche d'optimisation va éventuellement jusqu'à 18 itinéraires possibles et égaux en temps généralisé entre une origine et une destination données.

Au niveau des résultats globaux de la procédure d'affectation, on assiste à une convergence très rapide au fur et à mesure que les options s'affinent. Par rapport à **WP6-DE**, qui est l'option retenue pour les évaluations, l'option **TTR1** sous estime le trafic total de 21%, **TTR6** le surestime de 29%, puis les autres options fournissent un trafic équivalent, à 1

ou 2% près (*TTR18*, *TTR6-DE* et *TTR18-DE*). Les résultats d'affectation sont même identiques entre *WP6-DE* et *WP18-DE* : pour un réseau tel qu'il était représenté à Lyon en 1990, il n'existe pas suffisamment de choix d'itinéraires entre chaque O-D pour qu'un équilibre de Wardrop à plus de 6 itinéraires soit envisagé.

Cette convergence se confirme également au niveau plus fin des trafics calculés par arc, même si des écarts subsistent suivant les différentes options retenues. Pour se rendre compte des variations locales des trafics calculés, on a mesuré, pour chaque arc, le rapport entre le trafic résultant des hypothèses de l'option *WP6-DE* (servant de référence) et le trafic résultant des autres options d'affectation :

$$\Delta_i = \text{Flux}(\text{Option } WP6-DE) / \text{Flux}(\text{Option } Y) \text{ sur l'arc } n^o i$$

Le tableau ci-dessous fournit une mesure synthétique des valeurs prises par Δ_i suivant les options d'affectation retenues :

Tableau 7 : Les variations de trafic par arc entre l'option "Wardrop 6 itinéraires" et les autres options d'affectation :

Option d'affectation	Δ moyen	Coef. de Variation ($\sigma_{\Delta}/\Delta_{\text{moyen}}$)
Tout ou Rien 1 itération	0,83	0,49
Tout ou Rien 6 itérations	1,39	0,33
Tout ou Rien 18 itérations	0,98	0,12
Tout ou Rien 6 itérations, Demande Ecrêtée	0,99	0,11
Tout ou Rien 18 itérations, Demande Ecrêtée	0,98	0,12
Wardrop, 18 itinéraires, Demande Ecrêtée	1,00	0,00

A part pour les deux premiers cas, la moyenne des écarts entre les résultats obtenus sous *WP6-DE* et les différentes options d'affectation est très faible. On retrouve donc bien au niveau des trafics par arc la convergence constatée pour le trafic total. Par contre une variabilité de l'ordre de 10-12% subsiste entre les trafics obtenus avec les options d'affectation en tout ou rien et ceux calculés avec le principe d'équilibre de Wardrop. Même si la moyenne des écarts est peu importante, ces écarts existent bel et bien d'une option à l'autre.

Cette variabilité des trafics par arc a également des répercussions sur les conditions de circulation, que l'on retrouve atténuées au niveau de l'ensemble du réseau viaire de l'agglomération. On peut remarquer que l'affectation en tout ou rien sans demande écrêtée a tendance à détériorer les conditions de circulation : la prédominance des cycles urbains est caricaturale lorsque le calcul se fait en 6 itérations et reste sensible en 18 (*TTR6* et *TTR18* ; cette tendance est encore plus nette sur les cycles urbains lents - Cf. annexe II, §1.).

Tableau 8 : Les variations des conditions de circulation entre l'option "Wardrop 6 itinéraires" et les autres options d'affectation²⁶ :

Cycles de conduite et fluidité du trafic	WP6-DE (Km)	WP6-DE	TTR1	TTR6	TTR18	TTR6-DE	TTR18-DE
Autoroute	348 241	100,0	122,2	19,2	88,3	101,4	102,9
Route	571 921	100,0	114,6	107,5	94,3	95,6	94,4
Urbain	405 043	100,0	4,7	290,2	112,8	102,2	98,1
Fluide	717 643	100,0	147,9	62,5	89,8	97,5	95,1

Cependant cette variabilité des trafics et des conditions de circulation par arc n'affecte qu'assez peu les résultats d'émissions polluantes et sonores qui s'avèrent relativement stables, hormis les options les plus frustrées de calcul avec *TTR1* et *TTR6*. En ce qui concerne les polluants atmosphériques, dès l'option *TTR18* les écarts, variables suivant les polluants, ne dépassent pas 9% (Hydrocarbures et monoxyde de carbone) par rapport à l'option de référence ; ils ne dépassent pas l'ordre des 2% entre les options suivantes. Les émissions sonores restent un peu plus sensibles aux calculs d'affectation retenues, même si on constate là aussi une forte convergence lorsque les options s'affinent. On peut de plus remarquer que pour les classes de bruit élevé (≥ 65 dB(A)), les variations s'atténuent rapidement et ne dépassent pas 4% par rapport à l'option de référence.

Tableau 9 : Variations des émissions polluantes suivant les options d'affectation, base 100 WP6-DE

	WP6-DE	TTR1	TTR6	TTR18	TTR6-DE	TTR18-DE
NOx	100,0	90,0	126,0	96,9	99,1	97,9
Pous.	100,0	79,6	160,4	99,4	99,7	98,9
SO2	100,0	73,1	220,4	103,1	99,9	99,0
CO2	100,0	71,9	229,2	103,7	100,0	99,1
Plomb	100,0	64,9	271,5	106,4	100,3	99,4
HCNM	100,0	47,0	299,7	108,4	100,5	99,6
CO	100,0	56,6	314,2	108,9	100,5	99,7

Tableau 10 : Variations du nombre de km de tronçons de voirie exposés à un niveau sonore donné, mesuré sur l'isophone de référence en $L_{eq}(1h)$ dB(A), base 100 pour WP6-DE.

Classe de bruit	WP6-DE (Km)	WP6-DE	TTR1	TTR6	TTR18	TTR6-DE	TTR18-DE
$L < 60$	78,6	100,0	291,7	14,6	123,1	113,8	136,0
$60 \leq L < 65$	259,7	100,0	84,9	36,5	87,3	90,9	91,9
$65 \leq L < 70$	328,5	100,0	72,0	110,4	100,4	102,7	96,3
$L \geq 70$	131,4	100,0	85,0	250,5	110,2	103,1	103,8

A part le cas des méthodes de calcul les plus frustrées, le choix d'une option d'affectation plutôt qu'une autre n'a donc que des répercussions négligeables en ce qui

²⁶ Dans ce tableau comme dans les suivants les résultats obtenus avec l'option *WP18-DE* ne sont pas mentionnés car ils sont identiques à ceux obtenus avec l'option *WP6-DE* de référence.

concerne nos calculs d'émissions de polluants atmosphériques. L'impact sur les émissions sonores reste cependant plus sensible.

Ce constat ne signifie pas que les résultats de la procédure d'affectation sont identiques quelles que soient les options de calcul retenues. Suivant ces options, les choix d'itinéraires entre chaque O-D sont modifiés, ce qui se traduit systématiquement par des variations de trafic sur chaque arc et, éventuellement, une variation de la longueur des itinéraires. Mais il apparaît que, au niveau global où sont calculés les niveaux d'émissions, les variations locales sur chaque arc ont moins d'importance que celles des véhicules kilomètres totaux. Le nombre ainsi que les origines et destination des déplacements étant fixés, les baisses de trafics enregistrées sur un arc du fait d'un changement d'option de calcul se traduisent dès lors par une hausse sur d'autres arcs puisque les déplacements doivent de toute façon être réalisés. Globalement le trafic reste donc à peu près constant et les émissions polluantes et sonores sont relativement stables.

A la question "Tout ou rien ou équilibre de Wardrop ?", nous pouvons donc répondre que la procédure d'affectation importe peu ici, du fait du niveau global où se font les évaluations. Il importe surtout, en tout ou rien, d'opérer avec un nombre suffisant d'itérations pour que les résultats convergent et restent stables, quelle que soit la finesse supplémentaire apportée dans la procédure. La prise en compte plus précise de la congestion et des formations de file d'attente sur certains arcs du fait des contraintes de capacité de la voirie (option "demande écrêtée") semble apporter un gain de précision supplémentaire, allant de 0 à 20% suivant le type d'émission considéré. Une fois cette précision apportée, les résultats restent stables, en tout ou rien ou avec le principe de Wardrop. La procédure d'affectation utilisée pour les évaluations, à savoir un équilibre de Wardrop avec jusqu'à 6 itinéraires possibles entre chaque origine et chaque destination, a donc été considérée comme plus que suffisante pour assurer une bonne stabilité des résultats.

b) La fonction de temps généralisé

La fonction de temps généralisé permet de comparer les différents itinéraires possibles entre une origine et une destination données. En fait lors des calculs d'affectation, chaque arc se trouve affecté d'un temps généralisé et c'est la somme des temps généralisés de tous les arcs empruntés par l'itinéraire qui est utilisée pour les comparaisons.

Cette fonction de temps généralisé établie par arc repose d'abord sur le temps de parcours calculé par le modèle mais d'autres facteurs viennent la corriger. Tout d'abord un "coefficient de fiabilité", Cfi , vient pénaliser les arcs à fort taux d'encombrement : la différence entre temps à vide et temps calculé est multipliée par ce coefficient. De même la longueur de chaque arc intervient dans le calcul de ce temps généralisé pondérée d'un "facteur distance", Fd , établi en équivalent minute par kilomètre : ceci défavorise par la suite les itinéraires trop longs. Enfin un "bonus autoroutier", Ba , permet de tenir compte de l'*a priori* positif dont bénéficie l'autoroute du fait de sa meilleure lisibilité par rapport aux autres types de voies. Pour mémoire, si l'on nomme Tg le temps généralisé d'un arc, d sa longueur, t_0 et $t(x)$ les temps de parcours à vide et résultant des premiers calculs d'affectation, on a :

$$Tg = t_0 + [(t(x)-t_0) \cdot Cfi] + [(Fd - [Ba]) \cdot d]$$

Les valeurs retenues pour Cfi, Fd et Ba vont-elles avoir de fortes répercussions sur les résultats d'évaluation ? Pour répondre à cette question, 4 séries de tests ont été effectuées. Dans un premier temps, l'ensemble des paramètres ont été affectés en même temps puis les variations de chacun d'entre eux ont été testées séparément.

Chaque série de simulations a consisté à comparer les résultats des émissions atmosphériques et sonores entre une hypothèse médiane $S0$, *a priori* raisonnable (c'est à dire avec les valeurs conseillées par le concepteur), et deux autres hypothèses $S+I$ et $S-I$, haute et basse. Cet ensemble de quatre tests peut être présenté à travers le tableau suivant :

Tableau 11 : Valeurs des options de calcul du temps généralisé suivant les différentes simulations du test

Paramètre testé	Simulation 1 $S-I$	Simulation 2 $S0$	Simulation 3 $S+I$
1. Variation des 3 paramètres simultanément	$S0 - 50\%$ Cfi = 0,7 Fd = 0,2 Ba = 0,15	Valeurs conseillées Cfi = 1,40 Fd = 0,40 Ba = 0,30	$S0 + 50\%$ Cfi = 2,1 Fd = 0,6 Ba = 0,45
2. Coefficient de fiabilité (Fd=0,40, Ba=0,30)	$S0 - 25\%$ Cfi = 1,05	Valeur conseillée Cfi = 1,40	$S0 + 25\%$ Cfi = 1,75
3. Facteur distance (Cfi=1,40, Ba=0,30)	$S0 - 25\%$ Fd = 0,30	Valeur conseillée Fd = 0,40	$S0 + 25\%$ Fd = 0,50
4. Bonus autoroutier (Cfi=1,40, Fd=0,40)	$S0 - 25\%$ Ba = 0,225	Valeur conseillée Ba = 0,300	$S0 + 25\%$ Ba = 0,375

Le moins que l'on puisse dire des résultats obtenus, c'est qu'ils ne sont pas sensibles aux valeurs retenues par les paramètres de calcul du temps généralisé :

Tableau 12 : Variations des émissions de polluants atmosphériques en fonction des variations des paramètres de calcul du temps généralisé, base 100 pour S0 :

	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
<i>Base 100 S0</i>	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
<i>Tous paramètres</i>							
S-1	99,8	100,5	99,8	99,8	99,7	100,2	99,7
S+1	99,5	100,2	99,8	98,9	99,5	99,0	99,2
<i>Coef. de fiabilité</i>							
S-1	99,9	99,5	99,7	100,1	100,0	99,7	100,1
S+1	99,9	100,2	99,8	99,7	99,9	99,7	99,9
<i>Facteur distance</i>							
S-1	100,2	100,3	100,1	100,2	100,2	100,0	100,2
S+1	99,7	99,4	99,6	99,8	99,7	99,6	99,8
<i>Bonus autoroutier</i>							
S-1	99,7	99,6	99,6	99,8	99,7	99,7	99,7
S+1	99,8	99,9	99,7	100,0	99,9	99,7	99,9

Tableau 13 : Evolution du nombre de km de tronçons de voirie exposés à un niveau sonore donné, mesuré sur l'isophone de référence en Leq(1h) dB(A), base 100 pour S0.

	L<60	60≤L<65	65≤L<70	L≥70
<i>Répartition des kms sous S0</i>	10.4%	31.8%	41.0%	16.7%
<i>Base 100</i>	100.00	100.00	100.00	100.00
<i>Tous paramètres</i>				
S-1	106.33	93.71	104.24	97.67
S+1	98.08	103.39	100.17	94.26
<i>Coef. de fiabilité</i>				
S-1	110.64	92.96	102.07	101.67
S+1	94.25	102.33	101.85	94.68
<i>Facteur distance</i>				
S-1	108.15	95.54	102.71	96.71
S+1	101.92	97.52	102.00	98.68
<i>Bonus autoroutier</i>				
S-1	99.81	97.30	103.63	96.35
S+1	100.86	98.93	101.80	97.07

Concernant les polluants atmosphériques, les écarts de résultats suivant les valeurs de ces paramètres ne dépassent jamais les 1%. En fait cette apparente stabilité ne doit pas tromper. L'impact des variations des valeurs des paramètres de calcul du temps généralisé est important au niveau des arcs et des tronçons de voirie. Par contre ces variations locales se compensent entre elles et les résultats obtenus au niveau global de l'agglomération restent très stables. Pour avoir une idée de ces variations locales et des phénomènes de compensations qui s'opèrent entre elles, on peut mesurer, pour chaque arc, le rapport entre le trafic résultant des hypothèses de la simulation 1 et le trafic résultant des hypothèses de la simulation 3 :

$$\Delta_i = \text{Flux}(S1) / \text{Flux}(S3) \text{ sur l'arc } n^{\circ}i$$

Le tableau ci-dessous fournit une mesure synthétique des valeurs prises par Δ_i suivant les paramètres testés :

Tableau 14 : Les variations de trafic par arc suivant les valeurs du paramètre testé :

Paramètre testé	Δ moyen	Ecart-type de Δ
Variation des 3 paramètres	1,00	0,22
Coefficient de fiabilité	0,99	0,23
Facteur distance	1,00	0,16
Bonus autoroutier	0,99	0,18

Quel que soit le paramètre testé la moyenne de Δ reste très proche de 1 ce qui signifie qu'à un niveau global les flux sont restés stables entre les différentes simulations. Par contre le calcul de l'écart-type de Δ montre qu'à un niveau plus fin il existe des différences de résultats entre simulations. Lorsque l'on modifie les valeurs des paramètres de calcul du temps généralisé, les variations d'itinéraires entre chaque O-D provoquent des changements de trafic sensibles sur les arcs. Ces variations sont plus ou moins fortes suivant le paramètre testé (le coefficient de variation $\sigma_{\Delta}/\Delta_{\text{moyen}}$ va de 16% pour le facteur distance à 23% pour le coefficient de fiabilité) sans pour autant être spectaculaires lorsque l'on observe que les variations de C_{fi} , F_d et B_a sont de plus de 50% entre les simulations 1 et 3.

Ainsi, comme dans le test précédant concernant les options d'affectation, si les modifications des valeurs des paramètres de calcul du temps généralisé induisent des réaffectations d'itinéraires et donc une certaine variabilité des trafics et des nuisances afférentes, à un niveau global les résultats restent très stables.

Les modèles d'affectation traditionnels connaissent depuis quelques années de nombreux développements leur permettant d'établir des bilans sur les nuisances du trafic routier, notamment en matière de pollution atmosphérique. La conclusion que l'on peut tirer des résultats que nous obtenons, c'est que l'usage de ce type de modèles pour tirer des bilans spatialement localisés des nuisances routières, sans être à rejeter sous prétexte d'impossibilité majeure, nécessite de grandes précautions et une calibration très fine et fiable. Par contre, leur usage à un niveau géographique suffisamment large donne des résultats très stables, peu sensibles aux options de calcul retenues - si l'on suppose qu'au niveau général où se situe cette conclusion, les différences entre les différents modèles restent négligeables.

2.2.2. A propos des conditions de circulation

Un point important des évaluations est relatif aux liens posés entre niveaux d'émissions et conditions de circulation (cycles de conduite et état de fluidité du trafic). Ces liens seront considérés ici comme établis et ne seront pas discutés²⁷. Par contre la méthode de reconstitution des conditions de circulation est sans aucun doute assez grossière. En

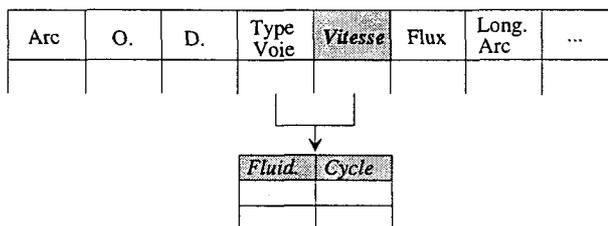
²⁷ Pour approfondir la validité et les limites de ces liaisons, on peut se référer aux ouvrages déjà cités, JOUMARD et alii, *Emissions unitaires de polluants des véhicules légers* ainsi que CETUR, *Guide du bruit des transports terrestres - Prévision des niveaux sonores*.

effet, elle repose simplement sur une estimation de la vitesse moyenne et du type de voirie : si la méthode donne certainement une indication des conditions réelles, on peut douter de sa précision. Il est donc nécessaire de s'interroger sur la plus ou moins bonne robustesse des résultats à une variation de l'estimation de ces conditions de circulation. C'est ce que nous avons fait en jouant sur le paramètre "vitesse" qui conditionne la détermination des cycles de conduite concernant les pollutions atmosphériques ainsi que la lecture des abaques permettant de déterminer les niveaux d'émissions sonores.

Une autre interrogation concerne l'indicateur de vitesse utilisé et la représentation des conditions de circulation qui en découle. En effet, les vitesses calculées par DAVIS sont des vitesses moyennes alors qu'il est évident que sur une même portion de voirie les vitesses peuvent très bien varier pendant le courant de la période modélisée voire être très différentes entre deux véhicules à un même moment. L'usage de vitesses moyennes, en ne rendant pas compte de la variabilité des conditions de circulation ne risque-t-il pas de fausser les résultats ? Cette question revient fondamentalement à s'interroger sur la pertinence d'utiliser un modèle d'affectation statique plutôt qu'un modèle dynamique.

Au niveau de la procédure de calcul, les deux points évoqués se situent directement à la sortie des résultats de DAVIS, l'un touchant à la pertinence même de l'usage de vitesses moyennes telles qu'elles sont fournies par des modèles statiques d'affectation, l'autre concernant la méthode mise en oeuvre pour traduire cette vitesse moyenne en "cycle de conduite".

Graphique 8 :
Situation des paramètres testés dans la procédure de calcul



a) Le lien entre vitesse et calcul des cycles de conduite

La première série de tests concernant les vitesses a été construite pour vérifier que la méthode de reconstitution plutôt grossière des conditions de circulation n'entache pas d'une trop grosse incertitude les résultats d'émissions.

Le croisement des différents types de voirie avec certains intervalles de vitesse a servi de base pour déterminer les cycles de conduite ainsi que l'état de fluidité du trafic (Cf. tableau 2). Pour donner une idée de l'impact d'une modification de ces règles, le test a consisté à décaler les classes de vitesses de $\pm 25\%$ autour des conditions initiales du scénario de référence. Trois simulations ont donc été faites avec cette seule modification dans la méthode de calcul, toutes autres choses égales par ailleurs :

- S-1 : classes de vitesses décalées de - 25% ;
- S0 : classes de vitesses initiales ;
- S+1 : classes de vitesses décalées de + 25%.

La procédure de calcul et d'affectation sous DAVIS reste la même pour les trois simulations. Les résultats issus de la première phase de l'évaluation sont donc identique

pour les trois scénarios : entre *S-1*, *S0* et *S+1* le trafic total ainsi que les trafics par arc restent constants. De même les vitesses moyennes par arc sont identiques. Ce n'est que dans la seconde phase que les définitions des cycles de conduite et de la fluidité de la circulation se trouvent modifiées et avec elles les trafics par cycle puis les calculs d'émissions qui en découlent. Notons que entre *S-1* et *S+1*, on a un écart de plus de 65% entre les vitesses limites définissant les états de circulation : $(v_0 - 25\% \cdot v_0) / (v_0 + 25\% \cdot v_0) = 1,667$ avec v_0 correspondant à la vitesse limite initiale que l'on retrouve sous *S0*.

Tableau 15 : Part des veh.km suivant les différentes conditions de circulation sous *S-1*, *S0* et *S+1* :

Cycles de conduite et fluidité du trafic	<i>S-1</i>	<i>S0</i>	<i>S+1</i>
Autoroute	33,12	26,54	8,31
Route	48,83	43,91	50,92
Urbain	18,05	29,55	40,77
Circulation fluide	69,97	53,66	38,40

Lorsqu'on augmente les classes de vitesse pour établir les cycles de conduite, on assiste à une redistribution en cascade des trafics entre les différents cycles de conduite. Ceux à caractéristique routière qui sont en position médiane restent stables avec à peu près la moitié du trafic dans les trois simulations. Ils bénéficient d'un côté des reports de trafic en cycles autoroutiers qui chutent rapidement -notamment entre *S0* et *S+1*- mais ces gains se font grignoter par le bas, du fait des cycles urbains qui progressent de façon continue. Concernant la représentation de la fluidité de la circulation, la part de trafic en état fluide baisse de façon régulière et sensible lorsque les conditions sur les vitesses se durcissent (-45% entre *S-1* et *S+1*).

Si l'on se penche maintenant sur les résultats en matière de pollution atmosphérique (Cf. annexe II, §3. et tableau 16), on se rend compte que les divers polluants ne se comportent pas tous de la même manière et sont donc plus ou moins sensibles aux changements dans les hypothèses de calcul. Ils peuvent être regroupés en plusieurs catégories suivant leur sensibilité aux variations d'hypothèses en *S-1* et *S+1* :

- le NOx qui baisse d'environ 10% entre *S-1* et *S+1* ;
- des polluants tels que les poussières qui restent relativement stables (-3%) ou le gaz carbonique et le soufre dont les variations n'excèdent pas 10% ;
- le plomb, l'oxyde de carbone et surtout les hydrocarbures qui se montrent assez sensibles à une redéfinition des cycles de conduite puisqu'ils connaissent respectivement des variations de l'ordre de 20, 30 et 40% pour une variation d'environ 65% des limites de classes de vitesse définissant les cycles.

Ces différences se retrouvent très bien lorsque l'on observe, pour chacun des polluants, le rapport entre les cycles de conduite où les émissions au kilomètre sont les plus faibles (les cycles autoroutiers) et ceux où elles sont les plus élevées (cycles urbains lents). Entre "autoroute 1" et "urbain lent 2", le rapport est de 9,2 pour les hydrocarbures, de 6,1 pour le CO et de 4,0 pour le plomb. Il est inférieur à 1 (0,67) pour le NOx et varie entre 1,2 et 2,9 pour les autres types de polluants. Lorsque l'on passe de *S-1* à *S0* puis *S+1*, on privilégie progressivement les cycles plus lents et plus polluants et on retrouve dès lors l'effet plus ou moins marqué des rapports ci-dessus dans les différents résultats d'émissions.

Tableau 16 : Evolution des émissions polluantes en fonction des variations des classes de vitesse définissant les cycles de conduite

	S-1 (Vit _{S0} -25%)	S0	S+1 (Vit _{S0} +25%)
NOx	104.3	100.0	94.0
Poussière	99.1	100.0	96.0
SO2	95.3	100.0	102.4
CO2	94.6	100.0	103.3
Plomb	91.0	100.0	108.1
CO	87.2	100.0	113.3
Hydrocarbures	81.5	100.0	115.0

En ce qui concerne les émissions sonores, les variations enregistrées sont beaucoup moins fortes et les différences les plus importantes à noter se jouent entre S-1 et S0. Bien que légère, il existe donc bien à ce niveau une certaine sensibilité de notre indicateur par rapport à une variation des hypothèses du seuil de vitesse définissant le caractère fluide ou pulsé de la circulation. Par contre entre S0 et S+1, les variations observées sont négligeables en terme de kilomètres de voirie concernés.

Tableau 17 : Evolution du nombre de km de tronçons de voirie exposés à un niveau sonore donné, mesuré sur l'isophone de référence en Leq(1h) dB(A), base 100 pour S-1.

Classe de bruit	S-1 (km)	S-1	S0	S+1
L<50	8.10	100.0	100.0	100.0
50≤L<55	12.20	117.4	100.0	100.0
55≤L<60	66.34	102.4	100.0	99.8
60≤L<65	260.40	102.6	100.0	98.4
65≤L<70	318.18	97.2	100.0	101.8
70≤L<75	121.26	93.6	100.0	98.7
L≥75	11.55	289.0	100.0	100.0

Pour comprendre comment ont évolué ces classes de niveaux sonores entre les 3 simulations, il faut reprendre les abaques de niveau de bruit en fonction des vitesses. On s'aperçoit alors que la distinction entre circulations fluide et pulsée permet de pointer des écarts de bruit importants pour des vitesses inférieures à 40 km/h. Pour les vitesses supérieures, d'autres facteurs que le simple bruit du moteur viennent s'ajouter (pneumatiques sur la chaussée, sifflement de l'air le long de la carrosserie) et les écarts relatifs entre les deux types de circulation s'en trouvent réduits d'autant : s'il y a 5 dB(A) d'écart entre 2 véhicules légers à 20 km/h suivant qu'ils soient en régime fluide ou pulsé, il n'en reste plus que 1,5 à 40 km/h et 0 à 53. Or, les arcs sur lesquels la vitesse calculée est inférieure à 40 km/h sont en bonne partie estimés en situation de circulation "pulsée" dès la première simulation S-1 (soit pour 58% de la longueur totale qu'ils représentent). Et dès S0, c'est 94% de la longueur totale de ces arcs à vitesse réduite qui se trouve définie en état une circulation pulsée. Entre S0 et S+1, le trafic en régime pulsé continue d'augmenter de façon sensible (+33% : Cf. tableau n°15) Mais l'essentiel du trafic concerné circule à des vitesses supérieures à 40 km/h, en des zones où la différence de bruit estimé entre régimes fluide et pulsé est nulle ou relativement peu importante.

Il n'y a donc pas symétrie de la sensibilité de notre indicateur aux variations de définition de la vitesse seuil entre circulation fluide et pulsée car la plupart du trafic dont la vitesse est calculée inférieure à 50 km/h est déjà définie comme circulant de façon pulsée. Lorsque ce seuil est augmenté (situation $SO/S+I$), rien ne se trouve vraiment changé car les trafics qui passent d'un état fluide à pulsé ne voient pas leur niveau d'émission sonore se modifier. Lorsqu'il est abaissé par contre (situation $SO/S-I$), une certaine partie du trafic passe de l'état pulsé à fluide avec une variation significative de ses émissions sonores, ce qui est tout à fait perceptible en terme de variation des kilomètres de tronçons de voirie par classe de niveau sonore.

Cette légère asymétrie des résultats des émissions sonores liée à la non continuité de certaines fonctions utilisées dans la méthode de calcul ne doit pas masquer le fait qu'ils sont peu affectés par la variation des vitesses seuils permettant de caractériser l'état de la circulation en termes de fluidité et de cycles de conduite. Par contre certains polluants émis par les véhicules à essence comme le plomb, le CO et surtout les hydrocarbures s'avèrent plus sensibles.

Comme nous pourrions le retrouver en synthèse finale, la définition des classes de vitesse permettant de caractériser les cycles de conduite joue un rôle non négligeable sur la qualité des résultats. Une révision des valeurs des bornes de ces classes affecte les chiffres obtenus de manière plus sensible que beaucoup des paramètres testés.

Cependant, les valeurs retenues reposent sur les vitesses moyennes fournies par l'INRETS pour définir leurs cycles de conduite, ces dernières ne pouvant pas être remises en cause puisque c'est sur leur base que les données d'émissions unitaires ont été établies. Nous avons donc estimé dans la suite du travail que les classes de vitesse retenues pour définir les cycles de conduite étaient suffisamment fiables pour ne pas remettre en cause les résultats (des révisions de l'ordre de $\pm 25\%$ des valeurs des bornes, comme dans le test, nous semblent en tout cas exclues).

b) Modélisation statique et vitesses moyennes : un outil suffisant

Nous venons de nous pencher sur la représentation des états de circulation à l'aide des seuils de vitesse retenus. Une seconde interrogation, complémentaire, concernant cette représentation touche à son caractère statique. En effet, les sorties de DAVIS ne fournissent qu'une estimation de vitesse moyenne par arc des véhicules partis au cours d'une heure de référence, sans indication supplémentaire sur l'évolution de cette vitesse sur un arc au cours du temps ainsi que sur sa variabilité entre différents véhicules en présence à un instant donné. Nous l'avons dit, cette question renvoie en fait à une interrogation plus large sur l'usage d'un modèle d'affectation dynamique plutôt que statique pour établir des évaluations de nuisances émises par les transports routiers.

Le test a consisté à réintroduire de la variance dans les vitesses par arc estimées par DAVIS puis à dérouler sans modification la suite de la méthode d'évaluation des émissions. Cette réintroduction s'est faite en considérant que sur chaque arc, 40% des véhicules ont circulé à la vitesse moyenne calculée (Vit_m) et que les 60% restants se sont répartis en deux classes égales, l'une roulant à une vitesse de $Vit_{m+x\%}$ et l'autre à $Vit_{m-x\%}$. Les cycles de conduite ainsi que l'état fluide ou pulsé de la circulation ont ensuite été établis pour chaque classe de vitesse, sur chaque arc.

Quatre simulations ont dès lors été faites, la première, *S0*, servant de référence ($x=0\%$), les trois suivantes, *S1*, *S2* et *S3*, introduisant une variabilité de plus en plus importante, avec x respectivement égal à 5, 15 et 25%. Ces niveaux de vitesse et la répartition des trafic par vitesse ont été fixés sans aucune recherche de réalisme : l'objectif a été de se rendre compte de l'impact éventuel de la variabilité des vitesses par axe sur les résultats, il n'était pas de retrouver cette variabilité.

Tableau 18 : Répartition et vitesses du trafic calculés sur chaque arc suivant les 4 simulations du test :

Répartition du trafic par classe de vitesse		<i>S0</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>
Arc <i>i</i> du réseau,	30%	Vit _m	Vit _m -5%	Vit _m -15%	Vit _m -25%
	40%	Vit _m	Vit _m	Vit _m	Vit _m
∇ <i>i</i>	30%	Vit _m	Vit _m +5%	Vit _m +15%	Vit _m +25%

D'un point de vue statistique, le coefficient de variation σ_v/v_{moy} des vitesse par arc passe ainsi de 0% pour *S0* à 3,9% pour *S1*, 11,6% pour *S2* puis 19,4% pour *S3*. Or la première observation de l'impact de cette variabilité croissante sur le niveau des trafics suivant les différents états de la circulation montre qu'ils se trouvent peu affectés. Au niveau des cycles de conduite, entre les deux simulations extrêmes *S0* et *S3*, environ 5% du trafic passe des cycles autoroutiers aux cycles routiers qui gagnent 4%, le 1% restant bénéficiant aux cycles urbains. En terme de fluidité l'impact est encore plus faible puisque seul 1% du trafic semble touché.

Tableau 19 : Part des veh.km suivant les différentes conditions de circulation :

Cycles de conduite et fluidité du trafic	<i>S0</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>
Autoroute	26,54	26,18	24,39	21,68
Route	43,91	44,63	45,67	47,78
Urbain	29,55	29,20	29,94	30,53
Circulation fluide	53,66	54,15	53,56	52,40

Sachant que d'une part la répartition des trafics suivant les conditions de circulation se trouve très peu affectée et que d'autre part la distance parcourue totale reste constante pour les 4 simulations (les flux par arcs ne sont pas modifiés par les hypothèses des différentes simulations), il n'est pas étonnant de trouver des résultats très stables les uns par rapport aux autres, tant au niveau des émissions polluantes que des émissions sonores :

Tableau 20 : Evolution des émissions polluantes en fonction de la variabilité des vitesses par arc :

	S0	S1	S2	S3
Poussière	100,00	99,72	99,00	98,33
NOx	100,00	99,98	99,58	98,97
SO2	100,00	99,66	99,39	99,58
CO2	100,00	99,64	99,40	99,69
Hydrocarbure	100,00	99,55	99,58	100,47
Plomb	100,00	99,30	99,23	100,60
CO	100,00	99,45	99,78	101,33

Tableau 21 : Evolution du nombre de km de tronçons de voirie exposés à un niveau sonore donné, mesuré sur l'isophone de référence en Leq(1h) dB(A), base 100 pour S0.

Classe de bruit	S0 (km)	S0	S1	S2	S3
L<60	83,3	100,0	100,7	99,9	93,8
60≤L<65	253,9	100,0	99,3	97,5	98,6
65≤L<70	327,3	100,0	100,4	102,1	102,8
L≥70	133,5	100,0	100,0	99,6	99,8

Concernant les émissions de polluants atmosphériques, les variations entre résultats sont suffisamment faibles au regard des variations introduites dans les hypothèses de calcul pour considérer que l'usage de vitesses moyennes est amplement suffisant pour établir nos évaluations (la variation maximale est de 1,7% -poussières- pour un coefficient de variation des vitesses σ_v/v_{moye} de 19%).

S'agissant des émissions sonores, l'introduction d'une variabilité des vitesses par arc n'a guère plus de répercussion sur les variations de kilomètres de voirie par classes de niveaux sonores, hormis un léger décrochage entre S2 et S3 pour la classe L<60 dB(A).

Ce décrochage est surtout lié aux imprécisions de calcul à faibles vitesses. En effet, faute de données lorsque les vitesses sont inférieures à 20 km/h, le niveau d'émission sonore d'un véhicule est estimé constant et égale au niveau correspondant à 20 km/h. Or dans ces situations l'état de la circulation est presque toujours défini comme pulsé et les émissions sonores par véhicule sont estimées décroissantes avec la vitesse. Ceci entraîne que pour tous les arcs où la vitesse est proche de 20 km/h, les résultats sont très sensibles aux hypothèses du test. Dans cette zone de vitesse moyenne, l'introduction d'une variabilité entraîne une baisse du niveau sonore calculé car les émissions sonores du trafic à $Vit_m+x\%$ (>20 km/h) baissent sans être compensées par une variation symétrique des émissions du trafic à $Vit_m-x\%$ (<20 km/h). Ce phénomène lié au processus de calcul reste cependant très marginal puisqu'il n'est perceptible qu'à travers la légère baisse des kilomètres exposés à moins de 60 dB(A) lorsque l'on introduit des écarts de plus de 65% entre les vitesses extrêmes des véhicules.

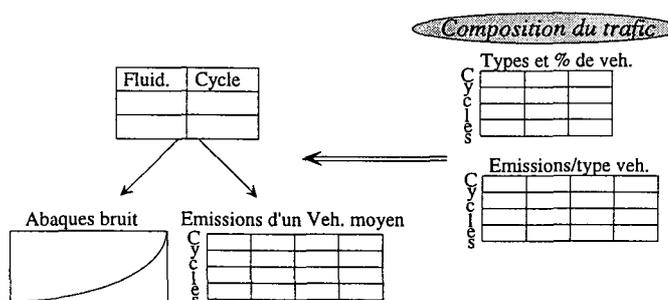
On retiendra donc que la recherche d'une image plus fidèle des conditions de circulation à travers l'introduction de vitesses différenciées sur un même arc ne semble pas devoir apporter grand chose à la qualité des résultats. L'usage de vitesses moyennes par arc reste tout à fait suffisant pour mener nos analyses.

2.2.3. L'importance des hypothèses de composition du trafic

Les hypothèses de constitution du parc ont une influence directe sur les résultats puisque les différents types de véhicules envisagés, véhicules légers essence, véhicules légers diesel, poids lourds, ont des émissions unitaires très différentes : par rapport à l'essence, les véhicules légers diesel émettent plus de soufre et de poussières mais en contrepartie leur rendement énergétique est meilleur et ils émettent beaucoup moins de CO et CO₂, d'oxydes d'azote, de plomb ou d'hydrocarbure au kilomètre ; les émissions atmosphériques et sonores des poids lourds, ramenées au véh.km, sont beaucoup plus fortes que celles des véhicules légers ; l'incidence des moteurs à froid, enfin, est sans doute loin d'être négligeable.

Cette partie est donc consacrée à la mise en perspective de l'impact de chacune de ces trois caractéristiques de la composition du parc (part des VL diesel, des PL, des moteurs à froid) sur les résultats de l'évaluation. Elle permettra donc tout à la fois de se rendre compte de l'importance de chacun de ces facteurs et de mettre éventuellement en évidence les points faibles des calculs, là où tout à la fois les hypothèses sont peu sûres et les résultats très sensibles aux variations de ces hypothèses.

Graphique 9 :
Situation des paramètres testés dans la procédure de calcul



Ce test s'est déroulé en trois étapes distinguant les influences respectives des parts de véhicules circulant à froid, de véhicules légers diesels et de poids lourds. Le principe retenu est le même pour chaque phase du test avec à chaque fois des variations de ± 25 et $\pm 50\%$ autour de la proportion initiale du type de véhicule dans le total du trafic. Ce trafic total restant constant, la variation d'un type de véhicule donné entraîne une modification parallèle de la proportion des autres types de véhicules. On obtient donc trois plans de 5 simulations à comparer entre elles, avec comme seul paramètre modifié la proportion du type de véhicules considérés au sein du trafic total :

Tableau 22 : Proportions du type de véhicule testé, pour les 5 simulations de chaque phase du test sur la composition du parc

Simulation	S-2	S-1	S0	S+1	S+2
Proportion de véhicules testés	P0-50%.P0	P0-25%.P0	P0 Prop. initiale	P0+25%.P0	P0+50%.P0

Dans les phases du test portant sur les véhicules à froid et les véhicules légers diesel, seul l'impact sur les émissions de polluants atmosphériques a été mesuré. Les éventuelles variations d'émissions sonores n'ont été prises en compte. Elles ont par contre été retenues lors de la phase portant sur les poids lourds.

a) L'importance des hypothèses concernant les poids lourds

La première phase du test concerne les poids lourds. Leur proportion a donc été modifiée de ± 25 et $\pm 50\%$. Par contre le trafic total a été conservé constant, ce qui signifie que la proportion de VL a également été affectée. Les proportions de PL dans le trafic suivant les différentes simulations du test sont alors les suivantes :

Tableau 23 : Proportion de PL par cycle, à trafic total constant, dans les 5 simulations sur l'impact des PL (en %)

Cycle	S-2	S-1	S0	S+1	S+2
Autoroute	5	7,5	10	12,5	15
Route	3,5	5,25	7	8,75	10,5
Urbain	3	4,5	6	7,5	9

Même si elles varient dans un rapport allant de 1 à 3 entre S-2 et S+2, les proportions de PL restent toujours marginales par rapport à un trafic VL qui, même en hypothèse extrême, représente encore 85% du trafic total (cycles autoroutiers sous S+2). Il peut donc sembler *a priori* que même des variations de 25 à 50% du trafic PL, qui jouent au plus sur 5 à 3% du trafic suivant les cycles, ne peuvent guère affecter les résultats. Cependant, les émissions unitaires des poids lourds sont beaucoup plus importantes que celles des véhicules légers, tant au niveau de la pollution atmosphérique que des émissions sonores. Il est donc nécessaire de se pencher sur l'impact de ces variations, même relativement faibles.

Au niveau de la pollution atmosphérique, on peut tout d'abord constater que les poids lourds représentent une part non négligeable des émissions sur certains types de polluants :

Tableau 24 : Part des poids lourds dans les émissions de polluants atmosphériques du trafic total (en%) :

Part des PL dans le trafic total	7,5%
Poussière	65,2%
SO ₂	32,0%
NO _x	30,3%
CO ₂	21,9%
Hydrocarbure	4,2%
CO	2,6%
Plomb	0,0%

L'importance des émissions de soufre et surtout de poussière est due au fait que les véhicules à essence n'émettent pas ou très peu de ces deux types de polluants. Les émissions des PL ne sont donc à mettre en balance qu'avec celles des VL diesel qui ne représentent que 14% du trafic total. Le poids des PL est alors plus compréhensible.

L'importance des émissions de NO_x et de CO₂ est quant à elle à rattacher aux surémissions particulièrement fortes des PL par rapport aux VL. Pour les NO_x, quel que

soit le cycle, il existe un rapport minimal de 1 pour 4 entre VL et PL, allant jusqu'à 7 pour les VL essence en cycle urbain lent, voir jusqu'à 20 pour les VL diesel en cycles autoroutiers. Une différence très forte existe aussi, quoique d'une importance moindre, pour le CO₂ : il est d'environ 1 pour 4,5 en cycles autoroutiers mais ne dépasse pas 1 pour 2 en cycle urbain lent (Cf. annexe II, §5.3.).

Quelle qu'en soit la raison, émissions typiquement diesel à ramener au trafic diesel ou surémissions PL vraiment très fortes par rapport aux VL en général, cette part très importante des émissions des PL dans les émissions totales de certains polluants atmosphériques entraîne une sensibilité marquée des résultats aux hypothèses de trafic PL.

Tableau 25 : Evolution des émissions polluantes en fonction des variations de la part des poids lourds dans le trafic total

	S-2	S-1	S0	S+1	S+2
<i>Plomb</i>	104.0	102.0	100.0	98.1	96.2
<i>CO</i>	102.5	101.2	100.0	98.9	97.6
<i>Hydrocarbure</i>	101.4	100.7	100.0	99.2	98.5
<i>CO2</i>	92.2	96.1	100.0	104.0	107.9
<i>NOx</i>	87.8	93.9	100.0	106.1	112.2
<i>SO2</i>	86.7	93.3	100.0	106.7	113.3
<i>Poussière</i>	68.8	84.4	100.0	115.6	131.2

Les polluants ont pu être regroupés en trois familles évoluant différemment suivant la part de PL dans le trafic :

- entre S-2 et S+2, le plomb, le CO et les hydrocarbures, polluants très rattachés aux véhicules à essence, ont tendance à stagner voire diminuer du fait de la baisse relative des VL essence entre ces 2 simulations extrêmes (-8% du trafic VL essence correspondant à une multiplication par 3 du trafic PL) ;
- le CO₂, les NO_x et le SO₂ qui sont relativement sensibles au trafic PL ;
- les poussières, enfin, qui se trouvent pratiquement multipliées par 2 entre S-2 et S+2.

Pour ces deux dernières familles de polluants, il existe donc une sensibilité relativement forte à très forte des résultats aux hypothèses de trafic PL. Cette sensibilité est à bien noter car les hypothèses concernant tout à la fois les trafics et les émissions des PL sont entachées d'une certaine incertitude (Cf. annexe I, §2.1.).

Concernant les émissions sonores, il existe une différence variant de 13 à 9 dB(A) entre un véhicule léger et un poids lourd suivant la vitesse et l'état de fluidité estimé de la circulation. Du fait de cette différence importante, les résultats obtenus sont également sensibles aux trafics PL.

Tableau 26 : Evolution du nombre de km de tronçons de voirie exposés à un niveau sonore donné, mesuré sur l'isophone de référence en $Leq(1h)$ dB(A), base 100 pour S-2.

Classe de bruit	S-2 (km)	S-2	S-1	S0	S+1	S+2
$L < 60$	133.0	160.0	119.8	100.0	81.3	66.2
$60 \leq L < 65$	374.9	133.9	118.6	100.0	81.4	70.8
$65 \leq L < 70$	328.9	78.7	91.7	100.0	109.3	110.2
$L \geq 70$	107.7	65.9	79.2	100.0	117.5	140.9

Entre chaque simulation on constate un transfert constant des classes de voirie à faibles émissions sonores vers les classes plus bruyantes. Les kilomètres de voirie exposés à plus de 70 dB(A) notamment augmentent plus vite que la proportion de PL dans le trafic.

En guise de conclusion d'étape, nous retiendrons donc que les hypothèses concernant les poids lourds ont des conséquences non négligeables sur les résultats, surtout pour les évaluations de bruit et sur les émissions de poussières et, dans une moindre mesure, de NOx, soufre et gaz carbonique. Cette sensibilité est d'autant plus à noter que les hypothèses de trafic et d'émissions des polluants atmosphériques concernant les PL sont approximatives.

b) Les hypothèses concernant la part de véhicules à froid

Parmi les véhicules roulant à froid seuls les véhicules légers ont été considérés car nous avons supposé que la part des poids lourds à froid est négligeable. La série de simulations a consisté à faire varier la proportion de VL circulant à froid à trafic VL constant. Les véhicules légers roulant à froid représentent 27% du trafic VL dans les hypothèses initiales, soit environ 25% du trafic total incluant les poids lourds.

Tableau 27 : Proportion de VL à froid, à trafic VL constant, dans les 5 simulations sur l'impact des VL froids

Simulation	S-2	S-1	S0	S+1	S+2
Proportion de VL froids	13,5%	20,25%	27%	33,75%	40,5%

La part initiale des véhicules roulant à froid dans les émissions atmosphériques est très variable d'un type de polluant à l'autre. Deux facteurs doivent être distingués pour expliquer ces différences :

- d'une part les coefficients de surémission à froid établis par l'INRETS sont plus ou moins forts suivant le polluant considéré (Cf. annexe I, §2.2.1.a) : ils sont très importants pour les hydrocarbures (+200% sur les VL essence, +62% sur les VL diesel) et le monoxyde de carbone (respectivement +116 et +61%) et très faibles pour les NOx (+5 et +11%) ;
- d'autre part les variations d'émissions ne portent que sur les émissions des véhicules légers. Ramenées aux émissions totales, elles peuvent sembler plus ou moins importantes suivant la part initiale des poids lourds. Ainsi, comme nous venons de le voir, si ces derniers n'ont aucun poids dans les émissions

d'hydrocarbures et de monoxyde de carbone (4,2 et 2,6%), ils apportent une inertie très forte dans les variations d'émissions de poussières, de soufre et de NOx où ils représentent respectivement 65, 32 et 30% des émissions.

Pour se défaire de cette inertie induite par la prise en compte des poids lourds, on peut ramener les émissions des véhicules roulant à froid aux émissions des seuls véhicules légers. L'impact des moteurs à froid devient alors beaucoup plus homogène, avec 27% du trafic émettant entre 28 et 36% des polluants. Les 2 seules exceptions notables sont les hydrocarbures et le CO auxquels, comme il vient d'être dit, correspondent des coefficients de surémission à froid très importants.

Tableau 28 : Part des véhicules roulant à froid dans les émissions totales et les émissions des VL :

	trafic total	trafic VL
<i>Part de VL froids</i>	25,0%	27,0%
<i>Hydrocarbure</i>	50,3%	52,5%
<i>CO</i>	43,2%	44,4%
<i>Plomb</i>	36,3%	36,3%
<i>CO2</i>	25,6%	32,8%
<i>SO2</i>	23,9%	35,2%
<i>NOx</i>	19,6%	28,0%
<i>Poussière</i>	12,5%	36,0%

L'impact de cette part relativement importante des véhicules à froid dans les émissions totales se traduit par une sensibilité moyenne des résultats aux variations de ce facteur. Les NOx restent totalement insensibles ; les poussières, le CO2, le soufre et le plomb ne progressent que de l'ordre de 10% pour une variation de 200% du trafic de VL à froid ; enfin, l'oxyde de carbone et surtout les hydrocarbures sont relativement affectés avec des progressions de 26 et 40%. Par contre, prendre en compte le trafic total ou ne considérer que le trafic VL ne change pas grand chose aux conclusions.

Tableau 29 : Evolution des émissions polluantes en fonction des variations de la part des véhicules roulant à froid dans le trafic total

	S-2	S-1	S0	S+1	S+2	S+2 (trafic VL exclusivement)
<i>NOx</i>	99.5	99.7	100.0	100.2	100.5	100.9
<i>Poussière</i>	97.8	98.9	100.0	101.1	102.2	110.7
<i>CO2</i>	96.9	98.4	100.0	101.6	103.1	104.9
<i>SO2</i>	96.2	98.2	100.0	101.9	103.8	107.6
<i>Plomb</i>	93.6	96.8	100.0	103.2	106.4	106.4
<i>CO</i>	88.4	94.3	100.0	105.8	111.6	112.3
<i>Hydrocarbure</i>	83.3	91.6	100.0	108.3	116.7	118.4

c) Véhicules légers essence et véhicules légers diesel

En ce qui concerne la phase de test portant sur les véhicules légers diesel, nous avons fait varier leur part de ± 25 et $\pm 50\%$ au sein du trafic des véhicules légers. Leur

proportion initiale est de 14% quel que soit le cycle de conduite. Il faut également souligner que la distance parcourue par les véhicules légers ayant été conservée constante, la variation de la part des VL diesel entraîne une modification de la part des VL essence.

Tableau 30 : Proportion de VL diesel, à trafic VL constant, dans les 5 simulations sur l'impact des VL diesel

Simulation	S-2	S-1	S0	S+1	S+2
Proportion de VL Diesel	7	10,5	14	17,5	21

Par rapport aux autres types de véhicules retenus ici, VL essence et PL, les véhicules légers diesel ont une contribution très faible dans la pollution atmosphérique des transports routiers urbains. Ceci est dû au fait que, concernant les polluants pris en compte, tant leur proportion au sein du trafic que leurs émissions unitaires restent relativement faibles. Ceci est particulièrement vrai pour le plomb, le CO, les hydrocarbures et les NOx. Leur contribution reste moyenne pour le CO2 et le SO2. Par contre, les véhicules à essence n'émettant pas ou pratiquement pas de poussières, la part dans ce type d'émissions des véhicules légers diesel dépasse largement leur proportion dans le trafic sans pour autant - et de loin - atteindre l'importance des poids lourds.

Tableau 31 : Part des véhicules légers diesel dans les émissions totales :

<i>Part de VL diesel</i>	14,0%
<i>Plomb</i>	0,0
<i>CO</i>	0,5
<i>Hydrocarbure</i>	0,9
<i>NOx</i>	3,5
<i>CO2</i>	13,2
<i>SO2</i>	15,9
<i>Poussière</i>	34,8

Ce poids faible à très faible des VL diesel dans les émissions polluantes fait que, hormis pour les poussières, les résultats sont peu sensibles aux variations de leur proportion dans le trafic.

On trouve cependant quelques écarts qui s'expliquent beaucoup moins par les variations dans la part des VL diesel que celles, allant dans le sens opposé, des VL essence (entre les deux simulations extrêmes S-2 et S+2, ils baissent de 15% pour une hausse de 200% des VL diesel). Ainsi, les polluants que les VL diesel n'émettent pas ou peu ont tendance à baisser. Ceux qu'ils émettent de façon moyenne restent très stables, les parts d'émissions "gagnées" par la hausse du trafic diesel étant "perdus" par la baisse simultanée du trafic essence. Par contre les poussières se montrent relativement sensibles sans cependant atteindre la même réactivité que par rapport aux PL : pour une même variation relative de leurs trafics respectifs, elles gagnent un peu plus de 40% avec les VL diesel contre 90% avec les poids lourds.

Tableau 32 : Evolution des émissions polluantes en fonction des variations de la part des véhicules légers diesel dans le trafic total

	S-2	S-1	S0	S+1	S+2
Plomb	108.9	104.5	100.0	95.6	91.2
CO	108.3	104.2	100.0	95.9	91.7
Hydrocarbure	108.0	104.0	100.0	96.0	92.0
NOx	104.2	102.1	100.0	97.9	95.8
CO2	99.2	99.6	100.0	100.4	100.8
SO2	96.7	98.4	100.0	101.6	103.4
Poussière	82.6	91.2	100.0	108.7	117.3

2.2.4. Synthèse des résultats

Au cours de cette partie, sept séries de tests ont été effectuées pour mesurer la sensibilité des évaluations d'émissions polluantes et sonores à des variations de différents paramètres de calcul, tels que des options du modèle d'affectation utilisé, la manière de représenter les conditions de circulation et les hypothèses de composition du trafic. Pour chaque test une analyse des résultats obtenus a déjà été menée et nous n'y reviendrons pas. Par contre, il reste à comparer ces différents résultats entre eux pour se rendre compte des paramètres qui sont le plus susceptibles de jouer sur les évaluations.

a) Les incertitudes sur les évaluations d'émissions des polluants atmosphériques

Concernant la sensibilité des polluants atmosphériques, l'indicateur de comparaison utilisé correspond à une élasticité, mesurée entre les simulations extrêmes du test considéré. Si l'on appelle R_i^- et R_i^+ les résultats d'émissions du polluant i pour les deux simulations extrêmes S^- et S^+ d'un test donné, ainsi que P_j^- et P_j^+ les valeurs du paramètre j entre ces 2 simulations, on a $e_{i,j}$ tel que :

$$e_{i,j} = \frac{R_i^- - R_i^+}{R_i^-} \bigg/ \frac{P_j^- - P_j^+}{P_j^-}$$

Si on suppose que la relation entre la variation des paramètres et la variation résultante des évaluations d'émissions polluantes est une relation linéaire, la valeur de $e_{i,j}$ indique la proportion dans laquelle les émissions du polluant i varient lorsque la valeur du paramètre j varie de 1.

Hormis pour le premier test que nous traiterons à part, les sensibilités des estimations des émissions polluantes aux variations des différents paramètres retenus figurent dans le tableau suivant. Pour alléger le tableau et permettre une lecture plus rapide, la valeur de $e_{i,j}$ n'a pas été représentée dans les cas où elle est inférieure à 2,5.

Tableau 33 : La sensibilité des évaluations des émissions de polluants atmosphériques aux variations des différents paramètres testés

		SO ₂	NO _x	Poussières	CO	CO ₂	Hydrocarbures	Plomb
<i>Temps Généralisé</i>	<i>Coef. fiabilité</i>	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Facteur distance</i>	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Bonus Autoroute</i>	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Tous ensembles</i>	-	-	-	-	-	-	-
<i>Etat de la Circulation</i>	<i>Cycles de conduite</i>	11,2	-14,7	-4,8	44,9	13,8	61,8	28,1
	<i>Var. des vitesses</i>	-	-	-2,5	-	-	-	-
<i>Composition du trafic</i>	<i>Part des VL diesel</i>	3,4	-4,0	21,1	-7,7	-	-7,4	-8,2
	<i>Part des PL</i>	15,4	13,9	45,4	-	8,5	-	-3,8
	<i>Part des VL à froid</i>	3,9	-	-	13,1	3,2	20,1	6,8

Tous les paramètres sont donc loin d'avoir le même impact sur les différents polluants. Celui qui se révèle être le plus sensible correspond à la représentation des cycles de conduite : si l'on décale les vitesses limites, déterminant le passage d'un cycle à l'autre, certains polluants tels que les évaluations d'hydrocarbures, de CO ou de plomb connaissent des variations notables. Ce sont donc essentiellement les émissions liées aux véhicules à essence qui se trouvent touchées ici. Concernant les émissions propres aux véhicules diesel (SO₂ et surtout poussières), elles se trouvent plus directement affectées lorsque l'on modifie la composition du trafic, notamment la proportion de poids-lourds et dans une moindre mesure celle des véhicules légers diesel. Enfin, on peut constater que les coefficients de calcul du temps généralisé n'ont pratiquement aucun impact sur les émissions de polluants atmosphériques au niveau global où elles sont évaluées.

Les deux paramètres pour lesquels les évaluations sont relativement sensibles sont donc la représentation des cycles de conduite et la proportion de PL dans le trafic, chacun affectant des polluants différents. Il n'est pas possible ici d'évaluer l'incertitude qui touche les valeurs affectées à ces deux variables. On peut cependant souligner la différence importante qui existe entre ces deux incertitudes :

- Les vitesses seuils qui servent à déterminer les cycles de conduites sont fixées sur la base des vitesses moyennes par cycle établies par l'INRETS. Même si ceci n'est pas suffisant pour affirmer la représentativité de ces vitesses seuils (d'autres facteurs interviennent, plus ou moins bien pris en compte lors des calculs par la variable "type de voirie"), on peut cependant estimer qu'elles donnent un ordre de grandeur plausible.
- il n'en va pas de même en ce qui concerne les trafics poids lourds. En effet, leur proportion dans le trafic total est mal connue au niveau d'une agglomération. De plus, leurs émissions unitaires sont elles mêmes sujettes à caution, ce qui peut remettre en partie en cause la mesure actuelle de l'impact de ce type de trafic. Ainsi dans ce cas, deux incertitudes fortes se combinent et rendent peu fiables les évaluations des émissions sensibles au paramètre "poids-lourds".

Les estimations des émissions liées aux véhicules à essence, notamment les hydrocarbures et dans une moindre mesure le CO et le plomb, sont donc susceptibles d'être remises en cause. Cependant l'incertitude qui les concerne est beaucoup moins forte que celle qui touche les émissions de poussières lorsque l'on travaille sur les trafics globaux,

VL et PL réunis. Concernant les autres types de polluants, il faudrait de très importantes modifications des valeurs des paramètres de calcul pour enregistrer des variations sensibles de leurs évaluations.

b) Les incertitudes sur les évaluations des émissions sonores

L'indicateur de mesure des émissions sonores n'étant pas bâti autour d'un chiffre unique mais reprenant la répartition des kilomètres de voirie exposés à différents niveaux d'émission, l'indicateur de sensibilité retenu précédemment ne pouvait pas s'appliquer ici. Nous avons cependant gardé le principe de comparaison des deux simulations extrêmes rapportée à la variation relative du paramètre de calcul concerné. Par contre, au lieu de comparer les 2 chiffres résultants de ces 2 simulations, nous avons calculé la variation moyenne par classe de bruit entre chaque simulation :

$$e_{i,j} = \frac{\sum_i |Km_i^- - Km_i^+|}{\sum_i Km_i} \bigg/ \frac{P_j^- - P_j^+}{P_j^-}$$

Les notations sont les mêmes que dans la formule précédente, avec en plus la variable Km_i qui représente les kilomètres de voirie soumis au niveau sonore de la classe i .

Il faut noter que cet indicateur, même s'il en respecte en partie l'esprit, ne correspond pas à une élasticité. Il ne peut donc pas être directement confronté avec l'indicateur utilisé pour les émissions polluantes. De plus, sa valeur dépend fortement du nombre de classes de bruit retenues et a tendance à s'élever lorsque ce dernier augmente. Il ne permet donc de faire des comparaisons que lorsque le nombre de classes est identique d'un test à l'autre.

Compte tenu de ses précautions d'usage, les valeurs obtenues lorsque l'on retient 7 classes de niveau sonore ($L < 50$, $50 \leq L < 55$, $55 \leq L < 60$, $60 \leq L < 65$, $65 \leq L < 70$, $70 \leq L < 75$, $L \geq 75$) sont les suivantes :

Tableau 34 : La sensibilité des évaluations des émissions sonores aux variations des différents paramètres testés :

	<i>Coef. fiabilité</i>	0,09
<i>Temps</i>	<i>Facteur distance</i>	0,03
<i>Généralisé</i>	<i>Bonus Autoroute</i>	0,02
	<i>Tous ensemble</i>	0,04
<i>Etat de la Circulation</i>	<i>Cycles de conduite</i>	0,08
	<i>Var. des vitesses</i>	0,07
<i>Composition du trafic</i>	<i>Part des PL</i>	0,27
	<i>Part des VL diesel</i>	-
	<i>Part des VL à froid</i>	-

Nos évaluations des émissions sonores sont donc, là encore, surtout sensibles à d'éventuelles révisions au niveau du trafic poids lourds. Lorsque ce trafic varie de $x\%$, la

variation des kilomètres de voirie dans chaque classe de bruit est en moyenne de 0,27.x% ce qui est plus de trois fois plus que tous les autres paramètres un peu sensibles (coefficient de fiabilité des temps de parcours, intervenant dans le calcul des temps généralisés, 0,09 ; seuils de vitesse permettant de basculer d'un cycle de conduite à un autre, 0,08 ; variabilité plus ou moins importante des vitesses sur chaque tronçon de voirie, 0,07).

3. Conclusion

Ce chapitre, d'ordre méthodologique, avait pour objectif essentiel de présenter la manière dont ont été établis les niveaux de pollutions sonores et atmosphériques soutenant les analyses des chapitres qui suivent.

Grâce à la coopération du CETE de Lyon, ces calculs ont pu être faits sur la base des déplacements routiers effectués une heure de pointe du soir dans la COmmunauté URbaine de LYon en 1990. La représentation de ces déplacements a été réalisée à l'aide du modèle d'affectation du trafic DAVIS que l'INRETS a laissé à notre disposition. A partir notamment des flux et des vitesses moyennes par tronçon ainsi obtenus, des évaluations des émissions polluantes et sonores ont ensuite été établies.

Ces résultats n'ont pas vocation à avoir un sens en eux-mêmes. Ils sont à considérer comme autant d'indicateurs dont les variations, lorsqu'un paramètre du système de transport routier est modifié, rendent compte de la sensibilité du polluant atmosphérique ou sonore qu'ils représentent. De même les données de l'agglomération lyonnaise ne sont qu'un prétexte pour une réflexion générale sur les pollutions sonores et atmosphériques liées à la route en milieu urbain. Pour éviter le plus possible les confusions entre ces indicateurs de tendance et des niveaux d'émissions réels, les chiffres calculés en valeur absolue ont systématiquement été renvoyés en annexe. Seules leurs variations relatives lorsque la valeur d'un paramètre change ont été conservées dans le corps du texte.

Le test de la méthode de calcul montre que les résultats restent relativement stables par rapport aux différents paramètres évalués. Deux résultats importants nous semblent pouvoir être dégagés de cette série de tests :

- D'une part il semble bien que les modèles traditionnels d'affectation statique du trafic constituent un outil suffisant tant que les résultats restent présentés à un niveau global. L'usage de vitesses moyennes par arc n'affecte que très peu les calculs d'émissions, les variations que l'on peut introduire se compensent en grande partie entre elles. Par contre des précautions beaucoup plus importantes doivent être prises si l'on veut établir des résultats au niveau fin des tronçons de voirie routiers. En effet la modification d'un paramètre de calcul peut se traduire par de forts basculements de trafic d'un axe sur l'autre. On retrouve en fait ici toute la difficulté de l'exercice d'affectation.
- D'autre part la source d'incertitude la plus importante dans les résultats obtenus est liée au trafic des poids-lourds. Les indicateurs d'émissions de poussières et d'émissions sonores sont relativement sensibles à ce type de trafic : lorsque le trafic des poids-lourds évolue de 1 point, les estimations des premières varient de 1/2 point ; la répartition des kilomètres de voirie à l'intérieur des classes de niveaux sonores retenues ($L < 50$, $50 \leq L < 55$, $55 \leq L < 60$, $60 \leq L < 65$, $65 \leq L < 70$, $70 \leq L < 75$, $L \geq 75$)

varie quant à elle de 1/4 de point en moyenne. Cette sensibilité des résultats est d'autant plus à considérer que les informations disponibles à propos des poids-lourds sont très approximatives, tant en ce qui concerne les distances parcourues en milieu urbain que pour les données d'émissions unitaires.

Cette sensibilité à un paramètre peu fiable de la méthode de calcul amène à souligner l'importance des enjeux qui tournent autour des nuisances poids-lourds. On les retrouve d'une part au niveau de la recherche, dans les travaux d'évaluation physique des émissions de ces véhicules ainsi qu'à travers les enquêtes actuelles sur les trafics des poids-lourds en agglomération. Ils renforcent également le poids des débats sur les niveaux de différenciation des taxes entre les carburants et accentuent la nécessité de la mise en application dans le courant de l'année 1996 de la directive européenne dite "camion propre", conduisant notamment à une réduction de plus de 50% des émissions de poussières des véhicules neufs de plus de 3,5 tonnes.

Elle a enfin une implication directe sur la suite du travail. En effet, pour éviter que les résultats présentés ne soient trop dépendants d'une telle source d'incertitude, ils seront le plus souvent présentés en deux temps, n'incluant tout d'abord que les trafics des véhicules légers avant de prendre en compte les trafics poids-lourds. Ceci signifie que la réflexion, dans la suite du travail, portera plus sur l'automobile en particulier que sur la route en général.

C'est donc armés de cet outil que nous allons maintenant tenter de mesurer l'impact relatif des trois paramètres qui ont été retenus pour comprendre le niveau des émissions polluantes et sonores générées par le trafic routier urbain, à savoir la composition et le niveau général du trafic ainsi que les conditions de circulation. Pour faire le pendant à la mesure statique des enjeux liés à ces nuisances présentée au cours du chapitre 2, cette analyse sera menée à court et à long terme, avec des projections établies sur les quinze ans qui viennent.

Le chapitre qui vient sera plus spécifiquement consacré aux effets de la congestion, qui correspond à un état dégradé des conditions de circulation. Nous verrons quels sont ses effets immédiats sur les surémissions des véhicules mais aussi sur la redistribution spatiale des flux. Ses conséquences à long terme seront essentiellement abordées sous l'angle de l'adaptation du réseau de voirie pour prévenir l'apparition d'une congestion trop forte.

Le chapitre 5 quant à lui opposera directement la croissance prévue de la mobilité automobiles aux améliorations technologiques des véhicules attendues à l'horizon 2010. Ceci sera l'occasion de montrer que certains moyens déjà mis en oeuvre aujourd'hui comme le pot catalytique font plus que compenser les effets de la croissance du trafic. Par contre d'autres évolutions, comme la forte tendance à la diésélisation du parc automobile, risquent d'entraîner des dérives que l'on ne s'est guère donné les moyens de prévenir à l'heure actuelle.

CHAPITRE 4 :
CONGESTION URBAINE,
ENVIRONNEMENT ET CADRE DE VIE

Dans une société où l'échange est synonyme de création de richesse, de croissance et de progrès, la recherche constante d'une amélioration du système de transport et de communication semble un objectif logique. Toute viscosité tend à être niée pour aboutir au temps réel. *A contrario* la congestion devient symbole d'une société bloquée, fermée par des contradictions internes de son mode de fonctionnement, qu'elle doit parvenir à lever pour retrouver le chemin de l'expansion.

Si à cette image de la mort économique par l'immobilité on rajoute celles, écologiques et sociales, des dégradations de l'environnement et du cadre de vie¹, il devient alors difficile de considérer le phénomène de congestion comme acceptable - et le cas de la congestion routière est typique, qui s'illustre souvent par un gaspillage énergétique, une pollution atmosphérique et sonore catastrophique, un nombre d'accidents de la route inquiétant, des coupures encore plus marquées entre des espaces *a priori* proches mais séparé par des infrastructures viaires de plus en plus larges et de plus en plus chargées.

Cependant il existe de nombreux auteurs qui, sans chercher à remettre fondamentalement en cause les moteurs de nos sociétés modernes, s'opposent à une trop impérative recherche de fluidité. Pour eux un certain niveau de congestion est le signe même d'une bonne adéquation entre les efforts consentis en matière de transports et une vie sociale et économique active. Certains d'entre eux estiment même que lutter contre la congestion des transports routiers risque d'accentuer les nuisances que l'on cherche à combattre car cela peut conduire à allonger les distances parcourues, tant du fait des détours pour emprunter des itinéraires rapides que d'un usage des sols moins intensif par les activités industrielles et résidentielles, à abaisser la qualité de service des transports publics, à augmenter considérablement les besoins d'espace en matière de résidence et

¹ L'extrait suivant de Serge Christophe Kolm rend bien par son accumulation tout le mal que l'on peut attendre du phénomène de congestion : "L'encombrement peut provoquer des gênes diverses en réduisant la place disponible ou en accroissant les bruits, exhibitions, odeurs, saletés, etc. ; il peut allonger des délais, réduire des vitesses, causer des attentes ou imposer des dates ou des moments de service peu commodes ; il peut causer ou répandre des pollutions ou des épidémies ; il peut raréfier ou épuiser des ressources naturelles ; il peut provoquer des brouillages de communications et des pertes d'information de tous genres ; il peut accroître des risques d'accident, d'incendie, de vol, d'épidémie, de panique et tout simplement de manque de bien ou service utile de toute espèce au moment et au lieu du besoin."

Cf. pp. 18-19 de KOLM Serge Christophe, *La théorie économique générale de l'encombrement*. Paris : Futuribles, Ed. SEDEIS, 1968. 82 p.

d'infrastructures autoroutières, à augmenter les taux de possession d'automobiles, à augmenter l'immigration vers les zones urbaines².

Les deux paragraphes précédents donnent à choisir entre deux maux, à savoir la congestion ou l'absence de congestion. Dans le cadre de ce chapitre, nous resterons surtout attachés à l'aspect environnemental de la question, même si d'autres éléments permettant une réflexion plus large seront abordés.

D'emblée nous pouvons affirmer que selon le critère "environnement et cadre de vie" privilégié ici, le trafic total (*i.e.* la distance parcourue totale) prime sur l'état général de la circulation. Les enjeux ne seraient donc pas à placer directement au niveau de la congestion, même si celle-ci peut être révélatrice de l'état de la concurrence entre les différents modes de transports et du type de développement urbain qui, par contre, peuvent jouer un rôle important. Malgré ce poids relativement faible en matière d'impact sur l'environnement et de cadre de vie, deux raisons nous ont poussé à consacrer un chapitre complet au thème de la congestion :

- tout d'abord cette première affirmation peut apparaître rapide et fondée sur peu de chose ; il reste donc sinon à la démontrer de manière définitive du moins à présenter les divers résultats qui lui donnent consistance ;
- ensuite il existe aujourd'hui un débat important autour du coût réel des transports avec d'une part les taxes sur les carburants, l'éventualité d'une mise à péage de l'accès aux centres villes ou les règles de concurrence entre transports publics et véhicules privés comme enjeux et d'autre part la congestion et ses conséquences environnementales comme éléments déterminants des calculs ; ce chapitre est donc également l'occasion de présenter la manière dont le thème de la congestion s'insère dans ce débat.

Pour traiter de ces questions une démarche en deux parties a été adoptée. Dans un premier temps le thème de la congestion est abordé sous un angle essentiellement économique pour souligner les difficultés théoriques qui existent pour la mesurer et la prendre en compte de manière économiquement optimale. Dans une seconde partie l'outil développé et testé dans le chapitre précédent est repris et appliqué sur une série de situations qui simulent le phénomène de congestion en considérant qu'à court terme celle-ci résulte d'un accroissement du nombre de déplacements alors qu'à long terme, c'est l'évolution même du réseau routier qui donne une mesure de la pression exercée par la congestion. Nous pourrions alors vérifier que l'effet de la congestion joue beaucoup moins sur les niveaux globaux d'émissions que sur leur dispersion sur l'ensemble du territoire -

² Cette dernière phrase est directement adaptée de l'affirmation suivante : "Relative to a system operating with moderate to heavy congestion, an uncongested transportation system may be expected to have :

1. more use of longer distance, but higher speed routes ;
2. lower public transit patronage ;
3. longer distance journeys to work ;
4. lower intensity of development of industrial floor space and residential space ;
5. less possibility of efficiently serving workplaces and residences by rapid transit ;
6. substantial increases in land requirements for residential development ;
7. substantial increases in land requirements for highways ;
8. increased auto ownership rates ;
9. increased immigration to urban areas."

Cf. p. 56 de BOYCE David E., KIM Tschangho John, "The role of congestion of transportation networks in urban location and travel choices", *Transportation*, Vol. 14, n°1, 1987. pp. 53-62.

sachant que, de plus, nous restons ici cantonnés au simple niveau du réseau routier, sans prendre en compte une éventuelle concentration urbaine liée à la recherche d'une minimisation des coûts de déplacements effectués en situation congestionnée et limitant ainsi les trafics et leurs émissions atmosphériques et sonores.

1. Le thème de la congestion routière en économie : un effet externe difficile à internaliser

Il existe de fait une "multiplicité des images et visions de la congestion urbaine : drame fatal de la ville moderne, prétexte de la scène politique, défi pour la technologie moderne, jeu de société vécu (initiation et transgression...)", au sein de laquelle celle de l'ingénierie du trafic "ne tient qu'un rôle accessoire"³. Nous avons cependant pris le parti de nous baser sur cette représentation technique de la congestion routière car elle permet de conserver un point de référence qui reste en cohérence avec l'ensemble des thèmes qui vont être abordés.

Nous verrons d'ailleurs que la tentative d'objectivation du phénomène qu'elle implique n'empêche en rien les controverses suivant le niveau où l'on se place pour en comprendre la genèse ou en observer les conséquences. La polysémie, gommée un instant, retrouve sa place par la suite. Elle est rapidement apparente lorsque l'interprétation économique, en terme de temps perdu, de la définition en ingénierie du trafic du phénomène de congestion est replacée dans le cadre des débats sur la tarification de l'usage de la route. Elle reste également évidente lorsque l'on se préoccupe de ses conséquences au niveau de l'environnement et du cadre de vie.

1.1. La référence à l'ingénierie du trafic

L'explication classique du phénomène de congestion en matière de circulation routière joue sur quatre variables clés, en partie dépendantes les unes des autres :

- la vitesse des véhicules (distance/temps),
- l'espace moyen que chacun d'entre eux occupe sur la voirie,
- la capacité maximale de cette voirie,
- le nombre total de véhicules écoulés pendant un laps de temps donné, autrement dit le débit observé.

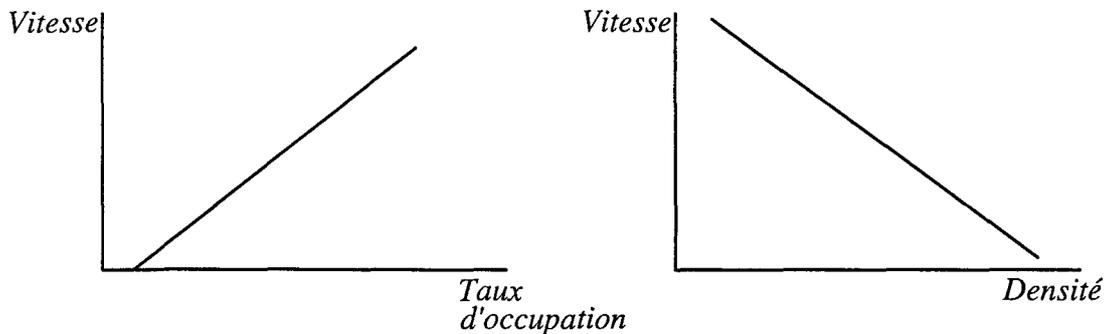
³ Cf. p. 103 de LASSAVE Pierre, "L'embouteillage dans les médias", *Les Annales de la recherche urbaine* n°42, mars-avril 1989. pp. 98-103.

Cette multiplicité des registres employés par les médias est censée donner une image de la multiplicité des perceptions de la congestion routière dans notre société : "La technicisation relative du discours médiatique [sur la congestion] (...) se légitime comme réponse aux attentes de sérieux de certains segments de clientèle (*Le Monde*, mais aussi *Le Quotidien*, *Le Parisien*, *Le Figaro*...) - les registres de l'ironie, du paradoxe (*Libération*) de la dénonciation (*France-Soir*), du jeu, du service rendu (*Le Parisien*, radios...) visant dès lors d'autres cibles" *Ibidem*.

Tout le "problème" de la congestion réside dans le fait que l'espace occupé par un véhicule, ou taux d'occupation, est proportionnel à sa vitesse : rouler vite revient à occuper plus d'espace car les distances de sécurité augmentent. Quel que soit l'état initial de la circulation, l'introduction de nouveaux véhicules va provoquer une concurrence accrue en terme de taux d'occupation et le maintien d'un niveau minimal de sécurité va contraindre les automobilistes à ralentir. Ceci est encore amplifié lorsqu'il existe des différentiels de vitesse importants entre les véhicules.

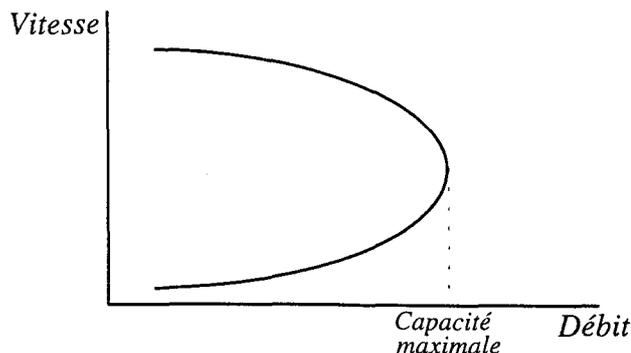
Une autre manière de présenter ce phénomène consiste à dire que lorsque les vitesses augmentent, le nombre de véhicules sur un espace de voirie donné diminue : la densité des véhicules est inversement proportionnelle à leur vitesse. Ces deux relations équivalentes peuvent être visualisées graphiquement de manière simple si l'on ne se préoccupe pas des questions de courbures :

Graphique 1 : les relations taux d'occupation - vitesse et densité - vitesse sur un axe routier



Ces relations taux d'occupation - vitesse ou densité - vitesse ont un impact au niveau des débits observés sur la voirie. En effet, lorsque la circulation est relativement fluide, l'ajout de quelques véhicules supplémentaires entraîne une diminution des taux d'occupation plus rapide que la baisse des vitesses. Ainsi, même si les véhicules se gênent mutuellement et sont obligés de ralentir, le débit enregistré sur la voirie peut encore augmenter. Cependant, si la voirie se charge encore, il arrive un moment où les taux d'occupation ne peuvent plus guère se compresser alors que les vitesses continuent à baisser de manière sensible. A ce point limite correspondant à la capacité maximale de la voirie, le débit va également décroître avec les vitesses. On obtient dès lors une courbe débit-vitesse à la forme bien caractéristique :

Graphique 2 : la relation entre vitesse et débit sur un axe routier



Ce graphique appelle une première distinction importante entre deux types de congestion. La première correspond à la situation où lorsque les véhicules se gênent les vitesses baissent mais le débit continue d'augmenter. Ce type de congestion est souvent qualifié de circulation en régime laminaire, ou de congestion de 1^{er} type. La seconde correspond alors à la situation où, passé le point de capacité maximale, vitesse et débit varient dans le même sens. On parle alors de circulation en régime forcé ou de congestion de 2^{ème} type⁴.

Il faut souligner que cette présentation rapide, derrière son apparente simplicité, gomme des difficultés que les ingénieurs du trafic ont du mal à traiter. Entre présenter la logique de la congestion et parvenir à un modèle opérationnel permettant de reproduire de manière fiable le phénomène, il existe un large fossé qu'il serait dommageable d'oublier.

Tout d'abord, si la logique de construction de cette courbe débit-vitesse semble se vérifier partout, son calibrage peut être extrêmement variable. Le type de voirie et surtout sa largeur interviennent bien sûr, mais d'autres facteurs sont également déterminants. Le comportement des automobilistes, par exemple, joue un rôle important sur les distances entre véhicules et la notion de "capacité maximale" d'un tronçon de voirie est toute relative : des facteurs culturels, technologiques ou la simple habitude de conduite en circulation dense peuvent permettre de maintenir des vitesses importantes avec des distances entre véhicules réduites, ce qui repousse d'autant les limites de débit possible⁵. Les améliorations technologiques en matière de sécurité des "véhicules intelligents" à venir constituent d'ailleurs un enjeu considérable à ce niveau de la gestion de la circulation.

Un autre point à souligner est l'aspect extrêmement erratique du phénomène de congestion lorsqu'on passe en régime forcé. Autant les mesures empiriques révèlent toujours une relation linéaire consistante en régime laminaire, autant ensuite cette liaison se relâche et si l'on constate bien un mouvement général où débits et vitesses baissent ensemble, les observations sont extrêmement dispersées. En effet, en régime forcé le

⁴ Cette distinction entre deux types de congestion peut conduire à des confusions sémantiques dans la mesure où suivant les auteurs, le même terme renvoie à l'un ou l'autre type. On peut par exemple distinguer 4 écoles linguistiques différentes, sans même prendre en compte la terminologie que nous avons adoptée :

Economistes anglosaxons	Ingénieurs anglosaxons	Economistes français	Ingénieurs français
congestion	free flow	congestion	fluidité
hypercongestion	congestion	congestion (hypercongestion)	saturation ou sursaturation

Ce tableau est tiré p. 2 de MILOT Julie, LEURENT Fabien, PAPON Francis, *DEGAGEMENT - Gestion spatio temporelle et multimodale du trafic de voyageurs et de marchandises sur le corridor nord-sud français. Tâche T3 : Identification de la congestion*. Arcueil : INRETS, Rapport de tâche, 1995. 105 p.

⁵ On peut reprendre ici les réflexions de Francis Navin : "There is little doubt that automobiles and to some extent driving have improved over the last half century. These changes have been reflected in the relationship between speed, flow and density or occupancy. The end result is that where cars previously operated almost independently within a stream of traffic now they must be considered as platoons or a loosely connected trains of vehicles pulsing along a highway. Consequently vehicles travel very close together at high speeds and this combined with the shorter high performance vehicles has produced a higher volume at capacity and reduces influence of flow on speed."
NAVIN Francis, "Travel Time Models", *Sixth World Conference on Transports Research*, Lyon, France, 29 juin 3 juillet 1992. pp. 2 465-2 476 des actes du colloque, Vol. IV. : *Innovation technologique et gestion des réseaux*. avril 1993. pp. 2 337-3 158.

système devient très instable et tout évènement en apparence mineur peut provoquer un fort ralentissement. Les variations de vitesses deviennent alors très fortes, sans que l'on puisse forcément en comprendre les raisons : la plupart des modèles font intervenir une composante stochastique, d'autres s'inspirent de la théorie des catastrophes pour des analyses *a posteriori*⁶. Notons que cette variabilité imprévisible des vitesses peut être encore plus pénible pour l'automobiliste que la baisse moyenne des temps de parcours.

1.2. La congestion routière mesurée en terme de temps perdu

Reprise avec les outils économiques traditionnels évoqués dans le premier chapitre, la congestion s'interprète en terme de coût externe : la concurrence entre les taux d'occupation des véhicules provoquant une baisse générale des vitesses correspond bien à une liaison physique hors marché qui affecte négativement les fonctions d'utilité des automobilistes.

Une telle analyse conduit logiquement à conclure que l'état congestionné est non efficient, en régime forcé comme en régime laminaire. Il n'y a alors qu'un pas à franchir pour affirmer l'opportunité d'une taxe permettant de retrouver sinon une circulation parfaitement fluide au moins un niveau optimal de congestion pour lequel tout effort supplémentaire pour améliorer les conditions de trafic serait trop élevé pour être compensé par l'amélioration elle-même.

Face à cette position interventionniste il existe des approches dont les conclusions sont beaucoup plus nuancées. Ces réserves portent sur différents points. D'une part il est fait état des problèmes redistributifs posés par la mise en place d'un péage, soit entre usagers de la voirie, soit entre ces mêmes usagers et le reste de la collectivité. D'autre part certains arguent du fait que ces liaisons hors marché sont déjà compensées, soit directement entre automobilistes qui subissent eux mêmes les ralentissements qu'ils provoquent, soit indirectement par le marché foncier qui prendrait en compte les variations d'accessibilité liés à une congestion récurrente.

1.2.1. Les problèmes redistributifs posés par une taxation de la congestion.

Une première évocation des questions économiques posées par la congestion peut être faite en abordant le thème de sa régulation par la mise à prix du temps perdu et des problèmes redistributifs que cela peut poser. Notre but n'est pas d'apporter une réponse définitive à ce débat toujours ouvert mais plutôt de montrer, d'une manière la plus synthétique possible, la diversité des points de vue et des logiques qui les animent. En effet, derrière cette idée apparemment simple de péage urbain -puisque c'est de cela qu'il s'agit- des positions très antagonistes se trouvent confrontées.

⁶ "The occurrence of gaps in freeway operations data, for example in flow-concentration plots, and the accompanying jumps in the behavior of some of the variables, have been observed in many data sets. Conventional representations of speed-flow-concentration relationships do not address those jumps, much less explain why the jumps occur at different values of the variables in different data sets. Catastrophe theory provides a way to understand that behavior."

Cf. p. 191 de HILL F.L., "An interpretation of speed-flow-concentration relationship using catastrophe theory". *Transportation Research*, Vol. 21 A, n°3, mai 1987. pp. 191-201. On peut également se référer à l'article de Francis Navin *Op. Cit.*

a) *Les questions d'équité entre automobilistes*

La première réserve opposée à l'idée de péage concerne le principe d'équité qu'il ne respecterait pas en défavorisant les plus démunis par rapport aux "personnes" plus aisées - nous prenons le terme personne avec des guillemets car ce sont sans doute les déplacements générés par des entreprises, à motifs professionnels, qui bénéficieraient le plus d'un tel péage. L'écart social introduit par cette taxe se jouerait en fait à deux niveaux :

- Le premier peut être introduit par l'évocation des transferts que provoque la congestion. En effet, celle-ci pénalise plus les déplacements dérivés d'activités à forte valeur du temps (parce qu'ils représentent un coût en personnel par exemple). On peut supposer *a contrario* que les automobilistes les plus pauvres effectuant des déplacements à motif personnel sont les moins touchés. La congestion a donc un effet redistributif "négatif" dans le sens où, pénalisant tout le monde, elle affecte plus les riches que les pauvres, plus les entreprises que les personnes physiques. A ce niveau, combattre l'embouteillage, c'est réintroduire l'inégalité originelle entre les acteurs économiques.
- La seconde source d'inégalité introduite par une taxe rejoint une critique traditionnelle de la théorie économique néoclassique. Elle repose sur l'idée que l'argent n'est pas un simple moyen d'échange pratique et neutre mais que, entre autres, sa valeur n'est pas forcément la même pour tous (Cf. par exemple chapitre 2, sous-section 2.3. "critiques de la méthode"). En d'autres termes un déplacement soumis à taxation dont deux personnes retireraient exactement la même utilité peut très bien être réalisé par l'une et annulé par l'autre en fonction de la valeur que chacune attribue à l'argent. Si on suppose de plus que cette valeur est étroitement liée au revenu, le péage constitue alors un facteur renforçant les inégalités sociales.

Et ces sources d'inégalité peuvent apparaître d'autant plus injustes socialement que "pendant des décennies, nous avons fourni les ressources aux automobilistes en tant que groupe minoritaire. Maintenant, juste au moment où les propriétaires de voitures et leurs utilisateurs deviennent majoritaires dans la population, nous commençons à parler de supprimer leurs privilèges et à décevoir leurs espérances. Cela paraît être le contraire d'une politique juste et équitable"⁷.

b) *Le problème de la réaffectation du produit d'un péage*

Cette première série de critiques concernant les problèmes de redistribution d'une taxe destinée à lutter contre la congestion reste restreinte aux transferts internes à l'ensemble des usagers de la voirie. Une autre interrogation touche au fait qu'un péage économiquement efficient ne peut être réalisé à travers un processus parétien car il pose des problèmes redistributifs entre les usagers de la voirie et le reste de la collectivité⁸.

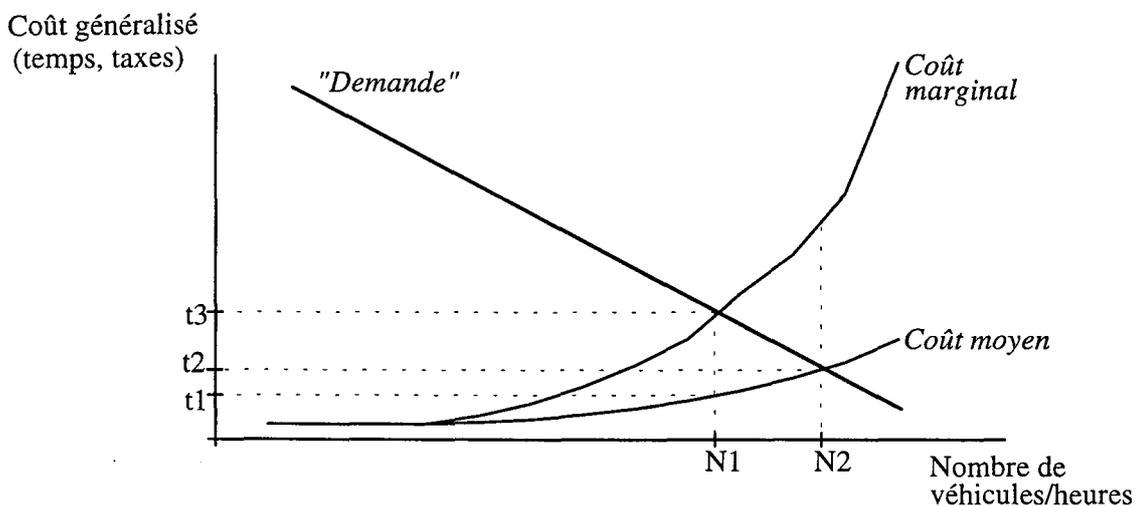
⁷ Cf. p. 28 de GOODWIN P.B., "Comprendre la congestion", *Recherche Transports Sécurité* n°24, décembre 1989, pp. 23-28.

⁸ Cette question est notamment très bien présentée pp. 236-240 de BAUMOL Williams J., OATES Wallace E., *The theory of environmental policy*. Grande-Bretagne, Cambridge : Cambridge University Press, 2^{de} ed., 1988 (1^{ère} ed., 1975). 299 p.

En effet, lutter contre la congestion et retrouver un fonctionnement efficient du système des déplacements automobiles nécessite d'imposer aux conducteurs une taxe économiquement optimale qui leur fasse prendre en compte la totalité de leur coût marginal (voir *supra*, chapitre 1, sous section 1.2. : "les externalités et leur internalisation"). Le produit de cette taxe doit ensuite être reversé dans les caisses publiques, sans être forcément réaffecté au transport routier urbain : le rôle de l'Etat étant de répartir ses fonds de manière à optimiser le système économique dans son ensemble, cette taxe servira tout autant à financer d'autres biens publics, baisser d'autres charges imposées par ailleurs qu'éventuellement aider à la lutte contre la congestion.

Théoriquement, si elle est bien menée, une telle politique produira un gain net de richesse au niveau de la collectivité. Par contre, comme l'indique le graphique ci-dessous, il y a de fortes chances pour que les automobilistes payeurs soient perdants dans cet exercice redistributif.

Graphique 3 : coût moyen et coût marginal des véhicules en situation de congestion



Compte tenu de la fonction de demande envisagée, sans régulation autre que celle de la congestion, les automobilistes créeront un flux de $N2$ véhicules/heure puisqu'ils ne ressentent que le coût moyen de déplacement. Or le niveau optimal est de $N1$, où courbes de demande et de coût marginal se croisent. Il correspond à un coût marginal de $t3$ et un coût moyen ressenti de $t1$. La taxe permettant de retrouver ce flux optimal d'un point de vue collectif s'élève donc à $(t3 - t1)$.

Cependant, le gain que retirent les $N1$ automobilistes restants s'obtient en observant la variation de coût moyen entre les deux situations, soit $(t2 - t1)$. On se rend facilement compte que ce gain est inférieur à la taxe demandée puisque, nous l'avons vu, le coût marginal (ici, $t3$) est supérieur au coût moyen ($t1$). Ainsi, même si d'un point de vue collectif la situation s'améliore, elle se dégrade pour les usagers de la route dont la contribution financière n'est pas compensée par un gain en temps équivalent.

L'amélioration générale n'est donc pas parétienne et, du fait de la très grande visibilité d'un péage pour les usagers, il ne peut devenir politiquement acceptable que si au moins une partie du produit de la taxe est explicitement redistribuée à ceux qui la payent, par exemple sous forme d'investissements routiers qui leur permettent de bénéficier de

gains sensibles de vitesse. Ce résultat que nous reprenons ici appliqué de manière particulière à la congestion automobile peut en fait être généralisé à tous les cas de biens publics sujets à des coûts de congestion croissants avec leur usage : l'application d'une taxe optimale dégradera la situation des usagers de cette ressource tant qu'ils seront exclus de la réaffectation du produit de cette taxe⁹.

Par contre cette réaffectation ne permet plus de prétendre à une efficience économique globale (Cf. chapitre 1, point 1.1.4. " Analyses de second rang et applications en équilibre partiel"). Dans un pays comme la France, elle pose également des problèmes à un niveau institutionnel puisque théoriquement les recettes du budget de l'Etat dont soumises à la règle de non affectation selon laquelle il ne doit pas exister de lien entre l'origine des recettes et les dépenses qu'elles permettent. De plus de nombreuses réserves existent quant à la mise en place d'un péage réaffecté aux automobilistes. Les craintes exprimées tournent notamment autour de l'idée qu'un tel système renforcerait encore l'avantage comparatif de la route par rapport aux transports collectifs ce qui serait malvenu, notamment du point de vue environnemental - que nous aborderons plus loin¹⁰.

Malgré ces limites, l'idée d'un péage peut très bien être défendue et mise en oeuvre :

- Un point de vue pragmatique peut conduire à privatiser en partie certains tronçons de voirie à construire pour contourner les obstacles institutionnels. Cependant en passant du public au privé - ou plutôt, souvent, à l'économie mixte-, la logique de gestion et de tarification change de nature. En effet le péage sert alors à financer l'infrastructure : les usagers de la route bénéficient bien du produit de leur taxe mais, par contre, l'idée initiale d'optimisation du surplus collectif est abandonnée (d'où les craintes évoquées dans le paragraphe précédent). C'est cette logique qui a permis le développement du schéma autoroutier français, elle retrouve également un regain d'intérêt à travers les projets de tunnels urbains à péage, mis en place à Marseille, en construction à Lyon, en attente à Paris¹¹.

⁹ "Wherever a common-property resource is subject to rising costs of congestion, the imposition of optimal Pigouvian tax will reduce the welfare of users of that resource so long as they are excluded from the benefits accruing from the tax revenues. We may see here why opposition to "optimal" taxes is to be expected, unless special provisions are made to assist the losers." Cf. p. 240 de BAUMOL W., OATES W., *The theory of environmental policy. Op. Cit.*

¹⁰ On retrouve par exemple reprendre ce point de vue dans un récent rapport publié par l'UIC : "[The] internalisation of congestion costs on road would actually **improve** the competitive situation for the road haulage industry (compared with railways). They would pay congestion charges instead of fixed vehicle taxes and achieve net savings by the reduction of time and operating costs on the network which would be less congested after congestion pricing." Cf. p. 27 de MAUCH Samuel, ROTHENGATTER Werner, *External Effects of Transports. Op. Cit.*

¹¹ Sur l'analyse de l'efficacité économique de ce type de voies rapides urbaines à péage, voir notamment le travail de PAPON Francis, *Péage Urbain. Les routes de première classe*. Caen : Paradigme, coll. Transports et communication, 1992. 317 p.

- Une autre position consiste à affirmer que d'une part une volonté politique forte peut très bien lever les blocages institutionnels¹² et que d'autre part la réflexion doit dépasser le cadre étroit de la route pour être portée au niveau plus global des transports. En clair, réinvestir le produit d'un péage dans un système de transports collectifs compétitif peut tout à fait se révéler profitable pour les usagers de la route en favorisant un transfert de la voiture particulière vers les transports publics autant lié aux améliorations de ces derniers qu'au surcoût du péage¹³. Cette idée présente de plus l'avantage de répondre pour partie aux réserves sur les effets socialement discriminants du péage puisque le produit de la taxe sert aussi à compenser la perte de bien-être de ceux qui abandonnent l'automobile du fait de son surcoût.

c) La tarification lorsque la circulation se fait en régime forc.

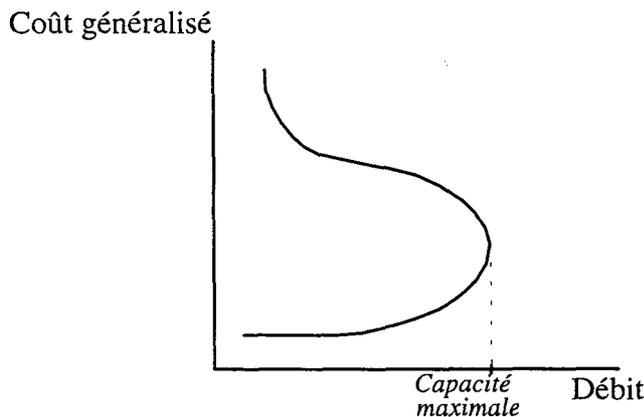
Pour terminer ce tour d'horizon sur les problèmes de tarification, on peut remarquer que l'ensemble des débats évoqués ne se préoccupent pas de la forme de la courbe débit-vitesses présentées précédemment et restent, de fait sur le cas d'une circulation en régime laminaire. En effet on peut montrer qu'une congestion trop forte va conduire à une augmentation des coûts même lorsque le nombre d'automobilistes concernés tend à diminuer. On peut même supposer avec Bruce Johnson¹⁴, qui est à l'origine de la courbe ci-dessous, qu'au delà d'un certain seuil, le temps perdu devient tellement important que les coûts croissent de manière exponentielle malgré des débits de plus en plus faibles :

¹² En effet, dans la plupart des pays anglo-saxons, cette règle de non affectation n'a pas force de loi. Même en France, elle n'est pas respectée de manière systématique, notamment dans certains cas particuliers de gestion de biens publics environnementaux. Par exemple dans le domaine de l'eau, les 6 agences de l'eau qui gèrent le territoire français perçoivent des redevances auprès des utilisateurs et des pollueurs dont elles se servent directement pour aider aux investissements destinés à améliorer la qualité de l'eau ou à en accroître la disponibilité. D'autres exemples peuvent être fournis avec le cas de certaines émissions polluantes ainsi qu'en matière de bruit ou de gestion des déchets. Cf. p. 32 de DELACHE Xavier, GASTALDO Sylviane, "Les instruments des politiques d'environnement". *Op. Cit.*

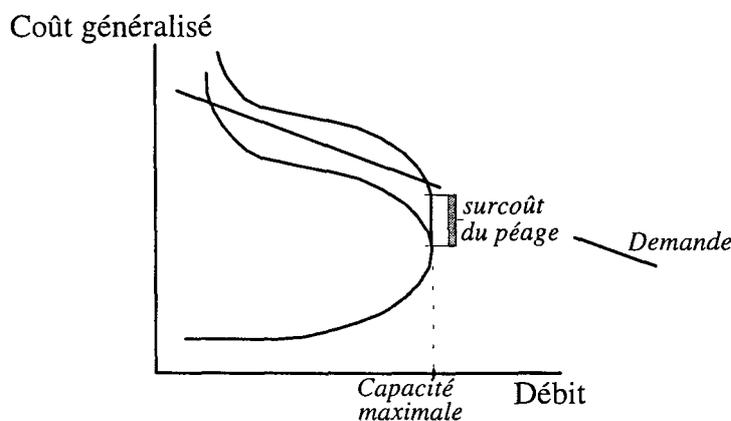
¹³ "L'usager de la voiture ne devrait-il pas contribuer au financement des investissements de transport public, dès lors qu'il en est un important bénéficiaire indirect ? [Les résultats de nos travaux nous poussent] à poser le problème de la tarification des transports urbains au niveau des deux modes de transport et, plus précisément, la question de savoir si le système global des déplacements peut être optimisé sans une tarification d'usage de la voiture particulière".

Cf. p. 333 de BONNAFOUS Alain, "Quatre questions pour un débat", Entretien Jacques Cartier, *La régulation des déplacements urbains par leurs prix*, 4-6 décembre 1991. pp. 329-324 des actes du colloque : *La mobilité urbaine : de la paralysie au péage ?* Lyon : CNRS, Programme Rhône-Alpes Recherches en Sciences Humaines, 1991. 363 p.

¹⁴ JOHNSON M. Bruce, "On the economics of road congestion", *Econometrica*, 32, 1964. pp. 1137-1150. Cité pp. 21-23 par DERYCKE Pierre-Henri, GANNON Frédéric, ROTILLON Gilles, DECAESTECKER Jean-Paul, *Concentration urbaine et effets de congestion - L'exemple des transports et de l'eau*. Rapport de recherche pour le compte de la DATAR, Paris : CERREVE, août 1990. 253 p.

Graphique 4 : relation débit - coût du déplacement

Lorsque la position de la courbe de demande conduit à une situation de régime forcé, la question d'une tarification se pose tout autrement. Dans ce cas si la mise à péage permet de renvoyer la partie "régime forcé" de la fonction de coût généralisé du déplacement (temps + péage + coût d'usage du véhicule) au dessus de la courbe de demande, on observe tout à la fois une amélioration des vitesses et une demande réalisée supérieure. Dans un tel cas de figure la question de la réaffectation du péage aux usagers de la voirie ne se pose plus avec la même intensité puisque ces derniers dégagent une importante contrepartie du prix qu'ils ont payé.

*Graphique 5 : relation débit - coût du déplacement*¹⁵

Par contre la question des conséquences redistributive de la taxe entre automobilistes demeure. De plus, un tel péage ne peut être destiné qu'à retrouver le niveau de débit maximal qui représente une zone charnière à partir de laquelle les questions de régulation tarifaire en régime laminaire se posent à nouveau, mais qui constitue également une zone d'équilibre instable où il suffit de quelques véhicules supplémentaires pour retrouver à nouveau une situation extrêmement dégradée du point de vue de la circulation.

¹⁵ Ce graphique est repris p. 140 de BOUF Dominique, CROZET Yves, "Péage urbain versus congestion : l'économiste et les usagers", Entretiens Jacques Cartier, *La régulation des déplacements urbains par leurs prix*, Op. Cit. pp. 129-141.

Les débats sur les enjeux redistributifs de la congestion et de sa régulation tarifaire dépassent donc le simple cadre de l'équité entre usagers de la voirie et ouvrent sur des thèmes comme la complémentarité des modes de transports individuels et collectifs ou le principe de non affectation *a priori* des recettes de l'Etat. D'autres approches s'interrogeant sur l'idée même de la congestion comme coût externe à internaliser permettent d'enrichir encore la réflexion en lui apportant notamment la dimension spatiale qui lui manque pour l'instant.

1.2.2. Existe-t-il des compensations directes ou indirectes aux coûts de congestion ?

Pour certains auteurs, même si la congestion routière peut être considérée comme une liaison hors marché, il existe par contre des phénomènes de compensation qui font qu'une internalisation par les méthodes économiques traditionnelles risquerait d'être inopportune ou, en tout cas, très délicate à mettre en oeuvre sans effets pervers. Une première approche soutient que la congestion reste un problème entre automobilistes qu'ils gèrent très bien entre eux. Nous verrons que son argumentation n'est guère recevable du fait de son manque de cohérence interne. Un second type de réflexion, axé sur les liens entre activités, accessibilités et marché foncier, s'interroge sur la signification de la congestion à un niveau économique global ainsi que sur les conséquences qu'un péage urbain pourrait avoir sur les localisations. C'est cette approche plus spatialisée qui nous permettra d'introduire la question des liens entre congestion et environnement.

a) La congestion comme problème interne aux usagers de la voirie.

On peut lire parfois que le temps perdu par les automobilistes dans la congestion ne représente pas un coût externe sous prétexte que ces derniers supportent les dommages qu'ils ont engendrés. Autrement dit, on peut raisonnablement penser que la situation est économiquement optimale au niveau des déplacements automobiles, il n'y a donc pas de dépense supplémentaire à envisager en matière d'infrastructure routière. Cette position permet le plus souvent de justifier des mesures de restrictions budgétaires ou une réaffectation des crédits publics de la route vers les transports collectifs non protégés qui, eux, subissent la congestion¹⁶.

Cependant, en dehors de son aspect lobbying, cette position ne tient guère. En effet l'automobiliste "moyen" ne prend en compte que la durée moyenne nécessaire pour parcourir un tronçon de voirie. En situation de congestion, pour que cette durée moyenne augmente avec chaque nouvel automobiliste, il faut nécessairement que le coût de ce

¹⁶ Voir par exemple Pascal AUZANNET et Adeline BELLALOU (Département du Développement à la RATP) dans leur tentative d'évaluation du coût des transports pour la collectivité : "*les automobilistes étant à la fois émetteurs et récepteurs d'externalités négatives, les coûts et gênes qu'ils s'occasionnent ne sont pas pris en compte.*" Par contre : "le coût de la congestion pour les usagers du réseau d'autobus (temps perdu dans les transports) est fonction de l'écart entre la vitesse commerciale des autobus et la vitesse objectif correspondant à une situation de fluidité." Il faut aussi ajouter "le coût annuel supporté par les entreprises exploitantes des transports en commun correspondant aux moyens qui seraient économisés si la vitesse objectif était atteinte (...)." Cf. p. 18 de AUZANNET Pascal, BELLALOU Adeline, "Le coût des transports pour la collectivité", *Revue Générale des Chemins de Fer, Op. Cit.* (C'est nous qui mettons l'italique).

dernier en terme de temps total perdu soit supérieur. Par contre ce coût supplémentaire se trouve réparti entre tous les automobilistes, aucun d'entre eux - et surtout pas le dernier - n'en ressent toute l'ampleur¹⁷. On retrouve visuellement ce résultat sur la graphique n°3, l'état congestionné initial correspondant à un flux de N2 véhicules/heure pour un coût moyen t2 et un coût marginal du dernier véhicule beaucoup plus élevé. Il y a donc bien coût externe dans le sens où la gêne totale provoquée par le dernier automobiliste n'est pas compensée par une gêne équivalente qu'il aurait à subir. En d'autres termes les automobilistes ne supportent pas la totalité des dommages qu'ils engendrent puisqu'ils ne ressentent qu'un coût moyen, inférieur à leur coût marginal.

Ainsi, soutenir que la congestion est un problème interne aux usagers de la voirie ne suffit pas pour considérer que les coûts externes qu'elle représente constituent un enjeu dont l'Etat n'a pas à tenir compte lorsqu'il intervient pour pallier aux défaillances du marché.

b) Congestion marché foncier et localisation des activités

Jusqu'à présent toutes les discussions sur le thème de la congestion routière ont été présentées en partant d'un point de vue essentiellement "automobilistique", même si elles débouchent parfois sur des conclusions à portées plus larges. Un tel point de départ pousse à considérer la congestion comme un mal infligé aux usagers de la voirie et les débats tendent à se restreindre autour de la recherche des moyens pour la combattre ou des difficultés pratiques et théoriques de mise en oeuvre des politiques envisagées.

Pour éviter de bloquer la réflexion à ce premier noeud sur le fil du discours que nous développons sur la congestion, il faut revenir à l'idée simple selon laquelle les déplacements ne s'effectuent pas pour eux-mêmes mais pour satisfaire d'autres activités : en dehors de quelques cas de loisirs on ne se déplace pas pour le plaisir de se déplacer mais pour un (ou plusieurs) motif qui pousse à se rendre en un lieu donné. Ceci revient à dire qu'il existe une relation étroite entre les transports, les activités humaines et leurs localisations. La congestion ne correspond alors plus à un simple dysfonctionnement interne au système des transports mais représente le résultat du jeu d'un ensemble de facteurs dont les composantes transports ne constituent qu'une partie. Et toucher à ce résultat par des mesures d'ingénierie du trafic, des investissements routiers ou une politique tarifaire, c'est affecter en retour toutes les dimensions connexes aux transports.

La manière la plus simple d'évoquer ces interactions est de reprendre les réflexions qui ont été poursuivies dans la ligne de la "nouvelle économie urbaine" développée aux USA à partir des années 60. Cette approche correspond à une application

¹⁷ On trouvera en annexe III, §2.1., un exemple chiffré calculé sur un cas d'école p. 266 par DARBERA Richard, "Faire payer les embouteillages ?", *Transports* n°315, mai 1986, pp. 265-273.

spatialisée des prémisses de l'économie néoclassique¹⁸. Elle tente de formuler une théorie de l'utilité de l'usage des sols, le marché foncier discriminant les choix de localisation des activités et le système des transports représentant un sous-marché sur lequel s'établissent les coûts d'accès aux différents lieux et donc aux différentes activités de la zone modélisée.

Une liaison directe entre transports et marché foncier est donc clairement établie, que l'on a pu tenter de quantifier par la suite. Ainsi, en reprenant la méthode des prix hédonistes évoquée en chapitre 2, le canadien Des Rosiers a calculé qu'un éloignement compris entre 5 et 10 mn du centre de Québec pour un déplacement automobile correspond à une baisse moyenne de 4,6% du prix des résidences. De même, le finlandais Laakso a pu estimer qu'à Helsinki une augmentation de 1% des temps d'accès au centre pour les transports collectifs se traduit par une baisse de 0,2% des prix du foncier le long des lignes existantes¹⁹.

Dans un tel cadre le renchérissement du coût moyen des déplacements impliqué par la congestion conduit à la recherche d'une diminution des distances parcourues et donc à un usage plus intensif du sol. On assiste alors à un double mouvement de concentration et de ségrégation spatiales. La concentration se traduit par le rapprochement relatif d'activités complémentaires, une limitation du phénomène d'étalement urbain et un bassin d'emplois géographiquement plus restreint. La ségrégation quant à elle se fait à travers une augmentation considérable de la pression foncière dans les zones centrales (les "Central Business Districts") qui va par exemple rejeter en périphérie certaines populations à faible revenu. On peut remarquer que cet impact de la congestion sur la localisation des activités a un effet en retour sur le système de transport car la densification des activités favorise l'efficacité des transports publics.

Dans ce schéma la congestion apparaît toujours comme une externalité négative dont les conséquences en terme de coût moyen par déplacement entrent directement en jeu sur le marché foncier sans que, par contre, l'information contenue dans le coût marginal soit prise en compte. Cependant ce déséquilibre localisé au niveau des automobilistes occasionne une réorganisation spatiale des activités urbaines qui fait que le niveau optimal

¹⁸ Il existe d'autres tentatives établissant un lien entre localisation des activités et transports : les modèles dérivés du travail de LOWRY partent d'une analogie gravitaire et postulent une structuration des activités économiques et des zones de résidence autour d'une activité de base préexistante ; les améliorations apportées par WILSON ont conduit à une famille de modèles débouchant sur une répartition stochastique des activités, contraintes cependant par des limites de coûts de transport et la définition d'attractions (ou de répulsions) entre elles. Ces différents modèles présentent l'inconvénient, dans le cadre de notre discours, de ne pas apporter d'éléments explicatifs aux phénomènes qu'ils décrivent. Ainsi, malgré leur faible opérationnalité, nous avons préféré évoquer les travaux plus directement dérivés du courant économique néoclassique car ils fournissent un cadre analytique aux liens existants entre transports et localisations.

Pour plus de détail sur ces différentes approches, on peut se référer à :

DERYCKE Pierre-Henri, *Economie et planification urbaine*, vol. II, *Théories et modèles*. Paris : PUF, 1982. 408 p.

DE LA BARRA Tomas, *Integrated land use and transport modelling : decision chains and hierarchies*. Cambridge : Cambridge University Press, 1989. XIV + 182 p.

Ainsi que la synthèse de DUCHIER Didier, *Revue méthodologique des modèles interactifs de localisation des activités et de transport*. Mémoire de DEA d'économie des transports. Lyon : Université Lumière Lyon 2, Faculté de sciences économiques et de gestion, octobre 1991. 115 p.

¹⁹ Les résultats de LAAKSO sont cités p. 25 de DEBOULET Agnès, "A vendre appartement proximité gare", *Transport Public*, mai 1993. pp. 22-27. Ceux de DES ROSIERS figurent p. 94 de DES ROSIERS François, "Centralité urbaine et valeurs foncières : les enjeux d'une tarification des déplacements", Entretiens Jacques Cartier, *La régulation des déplacements urbains par leurs prix*, Op. Cit. pp. 89-100.

de congestion ne correspond plus simplement au point d'intersection entre coût marginal et fonction de demande d'usage de la voirie. Dès lors l'exercice consistant à fixer "un programme optimal d'investissement dans le secteur des transports [devient délicat car] la diminution des coûts de transport provoquée par la baisse de la congestion doit être mise en balance avec certains coûts accrus suscités par une ville plus grande et plus étalée dans l'espace" du fait même des facilités de déplacements introduites par les investissements²⁰.

On le voit, l'exercice consistant à peser le pour et le contre de la congestion routière se complexifie dès l'instant où l'on ne se contente plus simplement d'intégrer directement le temps qu'elle nous fait perdre. Ainsi, ne serait-ce qu'au niveau des transports, la structuration de l'espace qu'elle implique entraîne en retour des économies au niveau des distances à parcourir et une meilleure efficacité des transports publics.

1.3. La prise en compte des autres coûts externes induits par la congestion

Jusqu'à présent nous sommes restés arrêtés sur l'aspect "temps perdu" comme caractéristique essentielle des coûts de la congestion. Nous venons de voir que ses effets en terme de localisations des activités n'étaient pas forcément tous négatifs. Mais il existe encore de nombreux autres coûts externes liés aux transports routiers qui se trouvent affectés par la congestion, tels que l'insécurité, le bruit ou la pollution atmosphérique. Ces éléments doivent bien sûr être pris en compte pour qui veut dresser un bilan des phénomènes d'encombres même si, comme nous l'avons vu au cours du chapitre 2, leur valorisation monétaire peut fortement varier en fonction des méthodes retenues.

Cependant, encore plus que précédemment, les effets de la congestion peuvent apparaître avec plus ou moins d'intensité suivant le niveau auquel on se place et pousser à la considérer de manière plus ou moins critique. Elle est souvent synonyme de croissance exponentielle des nuisances, avec une pollution automobile catastrophique, un fond sonore très agressif et une insécurité constante²¹. Sans chercher à dévoiler les détails de la prochaine partie on peut déjà relativiser cette vision trop négative.

En matière d'insécurité par exemple, on peut constater que la très forte densité du trafic sur le réseau urbain entraîne un taux d'accidents élevé : la circulation urbaine représente 34% du trafic des voitures particulières pour 60% des accidents qu'elles

²⁰ ROTHENBERG Jérôme, "Discussion du modèle d'Eytan SHESHINSKI", *American Economic Review, Papers and Proceedings*, mai 1973, pp. 67-70. Cité pp. 44-45 par DERYCKE Pierre-Henri et alii, *Concentration urbaine et effets de congestion. Op. Cit.*

²¹ Voir par exemple p. 24 de GOODWIN P.B., "Comprendre la congestion", *Op. Cit.* : "Il faut considérer le coût de la congestion de telle façon qu'il comprenne non seulement les pertes d'argent et de temps dues aux retards mais encore toutes leurs répercussions indirectes, y compris l'économie en souffrance, une réduction substantielle de la qualité de vie, et, trop souvent, même la perte de vies." Plus concentré sur les rapports entre congestion et pollution atmosphérique et exposé de manière moins technique, on peut citer l'article de la revue de l'Union des Transports Publics reprenant les échos de la presse à l'occasion de son congrès de juin 1992 sur le thème de "l'écomobilité" et "de l'asphyxie des villes due à la bagnole" : *La lettre des élus locaux* du 12 juin 1992, "comment se déplacer de manière intelligente dans la ville, sans polluer et... sans polluer" ; *La Croix* du 20 juin : "Fêtera-t-on l'an 2 000 au milieu des bouchons et de la pollution des villes ? ou dans des villes qui respirent, roulent, bougent et s'oxygènent ?". Cf. p. 22 de MADJARIAN A.G., "Le temps de l'écomobilité", *Transport Public* n°906, juillet-août 1992. pp. 22-25.

provoquent²². Une variation du trafic sur la voirie a donc un impact plus que proportionnel sur le nombre d'accidents ce qui semble impliquer un coût marginal croissant avec le trafic. Cependant, d'autres facteurs entrent en ligne de compte qui font que le lien entre accidents et coût de la route ne sont pas aussi forts que ce que le laissent supposer ces premiers chiffres. En effet, lorsqu'on se penche sur la gravité des accidents, les rapports sont complètement inversés : toujours en se cantonnant au cas de l'automobile, le trafic urbain n'est la cause que de 22% des décès ; le nombre de blessés graves est de 34% ; par contre, le nombre de blessés légers s'élève à 60%. Si le risque d'accidents est plus élevé en agglomération, les conséquences en sont donc beaucoup moins graves²³.

Cette différence de gravité en faveur de la circulation en milieu urbain, s'explique largement par des vitesses de déplacement beaucoup moins élevées. Par contre même si elle y contribue largement, la congestion n'est pas le seul facteur à entrer en jeu. Une voirie peu adaptée et des limitations de vitesse beaucoup plus strictes sont aussi des éléments à prendre en compte. Lorsqu'on élimine ces deux facteurs en observant par exemple la relation trafic-accidents sur autoroute, il semblerait qu'en régime laminaire le nombre d'accidents ne dépende que de manière linéaire du nombre de véhicules en présence - il n'y a donc pas d'effet de congestion dans le sens où la probabilité d'accident par véhicule n'augmente pas. Cette relation linéaire semble se relâcher voir s'inverser en régime forcé²⁴.

Ainsi, en matière d'insécurité routière, la congestion ne semble pas avoir l'impact négatif qu'on lui attribue parfois. D'autre part on ne peut pas simplement parler d'effet de la congestion sur l'insécurité, il faut aussi prendre en compte le type de voirie affectée : dans les rues en milieu urbain dense, l'effet de la congestion se trouve accompagné par des facteurs qui favorisent une moindre gravité des accidents ; sur les voies plus rapides comme les rocades par exemple, il existe sans doute une liaison linéaire positive entre

²² Ces chiffres ainsi que les suivants sont calculés à partir des données p. 10 publiées par l'Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière, *Bilan annuel de la Sécurité routière, statistiques et commentaires, année 1991*. Paris : La Documentation Française, 1993. 183 p.

²³ La mesure monétaire à partir des coûts tutélaires en vigueur en France reflète bien cette moindre gravité des accidents. Le coût global des dommages non compensés est de 14,3 milliards de francs 1990 en milieu urbain pour 36,8 milliards en interurbain (tous modes routiers confondus). Exprimés en coût moyen par kilomètre parcouru, ceci nous donne un coût de l'insécurité routière de 9,8 centimes en urbain pour 12,9 en interurbain soit une différence de plus de 30% entre les deux (on peut remarquer que les coûts tutélaires en vigueur en 1991 étaient beaucoup plus faibles et conduisaient aux résultats suivants : coût global : 4,60 Mds F90 en milieu urbain, 13,05 Mds en interurbain ; coût moyen au kilomètre parcouru : 3,14 cts en milieu urbain, 4,09 cts en interurbain).

Ces chiffres ont été calculés dans le cadre de CROZET Yves et alii, *La mobilité en milieu urbain : de la préférence pour la congestion à la préférence pour l'environnement ? Op. Cit.* Cf. pp. 130-135.

²⁴ "Sur les autoroutes, l'insécurité routière est étroitement déterminée par le volume de trafic : la moitié de l'explication de la variation spatiale du nombre d'accidents par kilomètre est due à la variation spatiale du trafic". "En deçà d'un seuil de 70 000 véhicules par jour, la relation entre le volume de trafic et le nombre d'accidents est linéaire". "65 à 70 000 véhicules par jour sur un tronçon autoroutier paraît être un seuil de saturation/congestion du trafic au-delà duquel il devient moins fréquent d'observer des accidents avec lésions corporelles ; [à partir de ce niveau] la courbe n'est plus ascendante et entamerait une phase horizontale : c'est un plafond dans le nombre d'accidents". Remarquons cependant que l'auteur reste prudente sur ce dernier point du fait qu'elle ne dispose que d'un nombre d'observations très faible à l'intérieur de la classe de trafic considérée.

Cf. pp. 1 854-1 855 de THOMAS Isabelle, "La relation trafic-accidents sur autoroute. Approche statistique empirique". *Sixth World Conference on Transport Research*, Lyon, France, 29 juin 3 juillet 1992. pp. 1 847-1 856 des actes du colloque, Vol. IV, *Op. Cit.*

trafic et accidents, au moins en régime laminaire, la congestion ne jouant positivement qu'à partir du régime forcé.

Remarquons que nous ne cherchons pas simplement à jouer sur les mots. Il est évident d'après les chiffres fournis ci-dessus que la hausse du trafic routier se mesure en vies humaines. Par contre assimiler cette croissance du trafic -qui correspond à une distance totale parcourue par l'ensemble des véhicules- à une aggravation de la congestion - qui se définit par une relation entre débit et vitesse-, c'est risquer un recours à de mauvais remèdes : fluidifier la circulation par des mesures d'ingénierie du trafic ou investir en matière d'infrastructures routières peut permettre de lutter contre la congestion, pas contre la hausse du trafic routier...

En matière de pollution atmosphérique, le même bilan peut être tiré, qui relativise le discours sur une congestion source de tous les maux. En fait une lecture très nettement hiérarchisée peut être faite de l'impact de la congestion sur les émissions liées à la circulation routière.

A un premier niveau correspondant aux émissions unitaires d'un véhicule en fonction de l'état de la circulation, il est clair que la congestion joue un rôle négatif : "entre une circulation urbaine fluide et une circulation urbaine très dense, la consommation est multipliée par 3, les émissions d'hydrocarbures et d'oxyde de carbones par presque 4. (...) Maîtriser les déplacements urbains, c'est contribuer à améliorer la qualité de la vie en ville"²⁵.

On peut également se pencher sur le total des émissions au niveau d'un axe. Tant que l'on est en régime laminaire, étant donné la relation précédente, on se trouve dans une situation où tout à la fois le nombre de véhicules et leurs émissions unitaires augmentent : la pollution croît donc de manière importante. Par contre, lorsque l'on passe en régime forcé le trafic diminue. L'évolution du niveau des émissions dépend alors de l'intensité de la relation entre vitesse et polluant par rapport à celle existant entre vitesse et trafic. On peut cependant s'interroger sur les surcoûts économiques d'un tel "bouchon écologique"²⁶.

²⁵ Cf. pp. 31-32 du "Point de vue" de MORCHEOINE Alain, "Transport et environnement : quels enjeux pour la ville ?", *Transports Publics*, mars 1993. pp. 30-32. Les chiffres que l'auteur fournit correspondent aux résultats des travaux de l'INRETS que nous avons utilisés pour nos propres évaluations (Cf. chapitre précédent, sous-section 1.2. "Calcul des indicateurs de nuisance").

²⁶ Une présentation plus formelle peut être faite de cette éventuelle diminution du niveau des émissions en cas de circulation en régime forcé :

Soient P_i le niveau total de pollution pour le polluant i , T le trafic total sur l'axe pour une période donnée exprimé en véhicules.kilomètres, E_i les émissions unitaires moyennes des véhicules pour le polluant i . Enfin, T et E_i sont tous deux fonction de V , indicateur global homogène à une vitesse.

On a :

$$P_i = T \cdot E_i$$

En dérivant par rapport à V , il vient : $dP_i/dV = E_i \cdot dT/dV + T \cdot dE_i/dV$

On obtient une relation entre les élasticités en multipliant par V et en divisant par P :

$$(dP_i/P_i)/(dV/V) = (dT/T)/(dV/V) + (dE_i/E_i)/(dV/V)$$

soit :

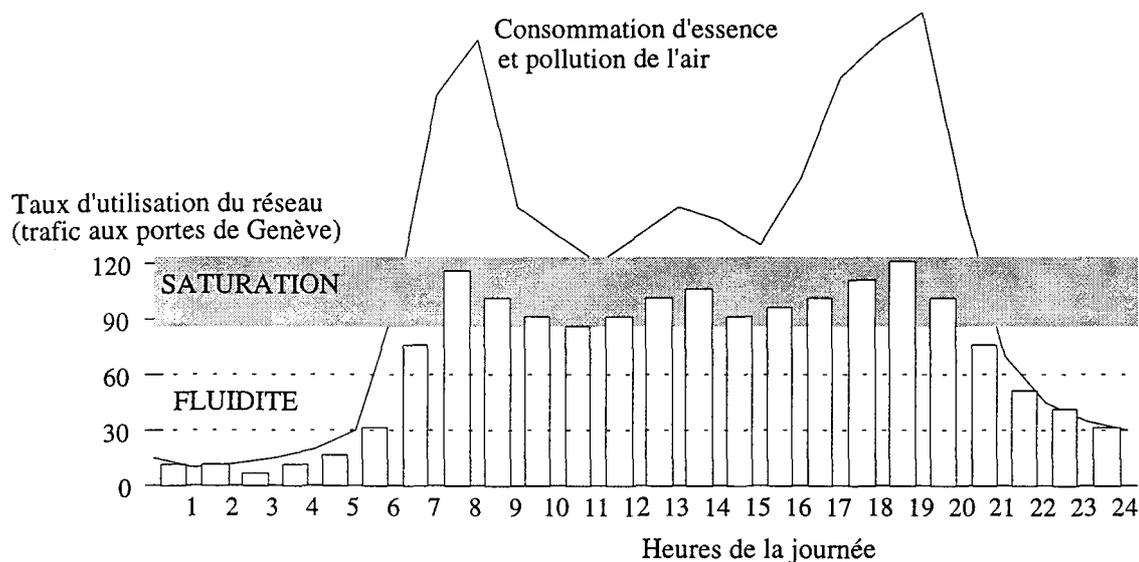
$$e_{P_i/V} = e_{T/V} + e_{E_i/V}$$

L'élasticité de la pollution à la vitesse de circulation sera donc la somme de l'élasticité de la quantité unitaire de pollution émise ($e_{E_i/V}$, positive) et de l'élasticité de la quantité de VKm ($e_{T/V}$, négative).

Cette formalisation est due à BOUF Dominique, "Elasticités critiques" in CROZET Yves et alii, *La mobilité en milieu urbain : de la préférence pour la congestion à la préférence pour l'environnement ? Op. Cit.* Cf. pp. 211-212.

Ces deux premiers niveaux de lecture s'illustrent très bien par un graphique montrant les pointes de pollution que l'on observe en ville lors des heures de pointe du trafic automobile - même si nous avons retenu pour l'exemple un graphique où l'auteur a particulièrement joué sur les différences d'échelles utilisées pour accentuer encore le phénomène :

Graphique 6 : Trafic urbain et pollution de l'air au cours d'une journée de semaine²⁷ :

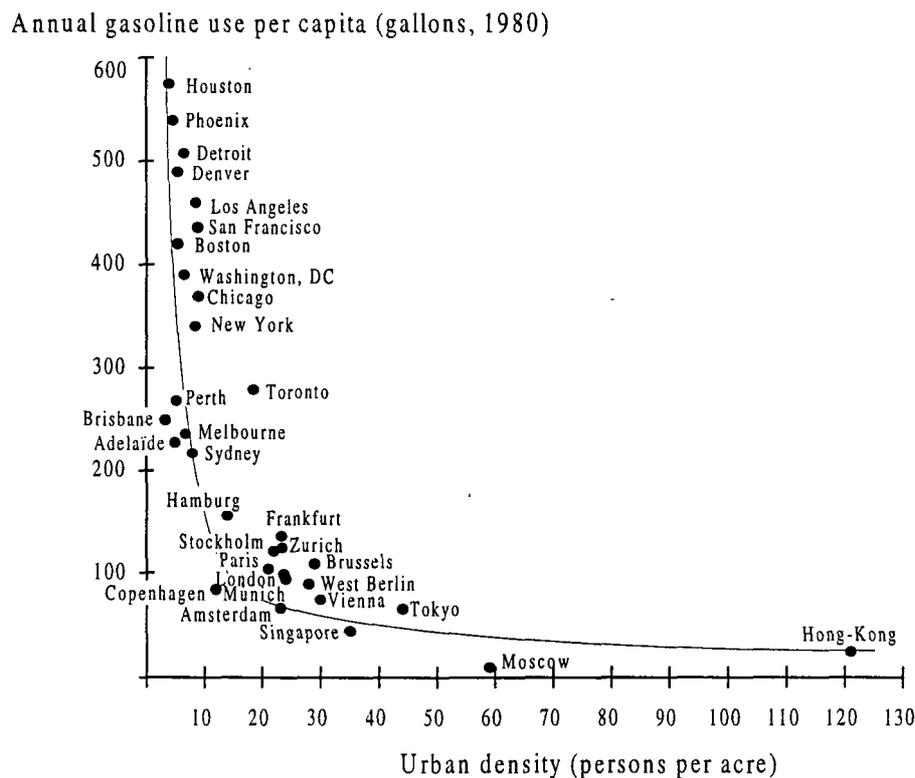


Source : P.H. Bovy, 1992.

²⁷ Cf. p. 15 de BOVY Philippe, "Impulsions de l'environnement sur le développement des transports publics suisses", *Congrès annuel du GART*, Lyon, 9-11 décembre 1992. 17 p.

A un niveau plus général encore on peut s'interroger sur l'impact de la congestion en terme de réaffectation du trafic sur le réseau. Nous verrons plus loin que le bilan de la congestion est alors beaucoup plus relatif. Enfin, au niveau global d'une agglomération, il semble bien que les effets à long terme de la congestion sur les localisations et en retour sur le système de transport peuvent jouer un rôle positif en matière environnementale. Le graphique de Newman et Kenworthy, même s'il compare des situations extrêmement différentes et qu'il tend à faire assimiler congestion avec concentration urbaine lorsqu'il est présenté tel quel, n'en reste pas moins suggestif de ce point de vue :

Graphique 7 : Consommation annuelle de fuel par personne en fonction de la densité urbaine²⁸ :



Source : NEWMAN et KENWORTHY, 1988.

1.4. Conclusion

Cette première partie s'est basée sur une confrontation d'analyses à consonance essentiellement économique, relatives à la congestion routière en milieu urbain. On a pu constater que malgré une définition commune importée de l'ingénierie du trafic, qui lie vitesse, taux d'occupation et débit observé, les points de vue divergent parfois très nettement quant aux mesures à adopter pour réguler le système des déplacements urbains. Même si les approches présentées s'accordent assez largement pour étiqueter ce phénomène comme un coût externe, les différences apparaissent immédiatement lorsqu'il s'agit de déterminer les efforts à mettre en oeuvre pour limiter ses effets.

²⁸ Cf. NEWMAN Peter W.G., KENWORTHY Jeffrey R., "The transport energy trade-off : fuel-efficient traffic versus fuel-efficient cities", *Transportation Research*, Vol. 22 A, n°3, mai 1988. pp. 163-174.

Nous avons vu tout d'abord que les débats peuvent porter sur la nature de ces efforts. En effet le recours traditionnel en économie à une taxe sur les déplacements routiers permettant de retrouver un niveau de congestion acceptable, sinon optimal, suscite de nombreuses réserves. Certains soulignent l'aspect inégalitaire d'une telle mesure ; d'autres s'interrogent sur les risques d'un renforcement de l'automobile car pour rendre un système de péage acceptable il apparaît nécessaire de redistribuer le produit de la taxe à ceux qui la paie -sous forme de nouvelles infrastructures par exemple. D'autres encore affirment que cette redistribution peut tout à fait s'envisager à un niveau global du système des transports, les investissements dans le domaine des transports collectifs étant susceptibles de bénéficier indirectement aux automobilistes.

Mais des divergences importantes apparaissent également sur la mesure de l'effort à fournir contre la congestion. Sans même se pencher sur des évaluations quantitatives, on peut montrer que suivant le niveau auquel on se place la congestion génère des effets contraires qui conduisent à des conclusions antagonistes. Du simple point de vue des usagers de la route, la congestion est une nuisance qui a d'importantes répercussions économiques négatives. Cependant, si on considère les répercussions spatiales des transports, il apparaît que la congestion favorise la concentration des activités. Par conséquent, elle évite une perte d'efficacité pour les transports collectif et contribue à un trafic plus faible du fait des distances parcourues plus réduites. Et ces contre-effets positifs semblent encore se renforcer lorsque l'on considère les aspects cadre de vie et environnement affectés par les transports routiers, comme nous l'avons montré à travers les exemples de l'insécurité et de la pollution atmosphérique.

Sans aller jusqu'à considérer la congestion comme bénéfique, de nombreux auteurs sont ainsi tentés de la considérer comme un moindre mal qui permet de limiter l'expansion de l'automobile. Pour eux, s'il existe un niveau optimal de congestion, il se trouve placé à un niveau très supérieur à celui que l'on fixerait en ne considérant que les coûts directement engendrés par les usagers de la voirie.

2. L'impact de la congestion sur les émissions sonores et atmosphériques au niveau du réseau d'une agglomération

Cette discussion sur la congestion va maintenant être réinsérée de manière plus formelle au sein de notre projet d'ensemble, à savoir prendre une mesure de l'impact relatif des principaux facteurs concourant à la pollution atmosphérique et sonore des transports routiers urbains - congestion, niveau de mobilité automobile et technologies mises en oeuvre.

Pour ce faire nous allons reprendre l'outil développé et testé en chapitre 3 et observer les résultats d'une simulation d'un état de circulation congestionnée. La représentation que nous pouvons faire de cet état reste forcément limitée et les questions de l'impact de la congestion sur l'extension spatiale d'une agglomération ou sur l'étalement des déplacements au cours de la journée ne seront pas abordées directement. En fait, la congestion est envisagée ici sous deux aspects différents. Sur le court terme, elle a été assimilée à une croissance du nombre de déplacements trop forte par rapport aux capacités du réseau routier et nous avons donc simulé une montée en charge progressive de la voirie, à structure constante de la matrice des origines et destinations. Les conséquences à long

terme de la congestion ont été traduites par le développement du réseau, et nous avons testé l'impact environnemental de l'évolution du réseau lyonnais à l'horizon 2010.

2.1. Les effets d'une croissance du nombre de déplacements à réseau routier figé

La première partie du travail a donc consisté à simuler une augmentation progressive du nombre de déplacements sur le réseau de voirie. Nous avons pu voir précédemment que le discours sur la congestion pouvait fortement diverger selon le niveau d'observation adopté, entre celui du couple conducteur-automobile et celui de la répartition spatiale des activités au sein d'une agglomération et de leur interaction avec le système de transport. En se situant au niveau intermédiaire de l'ensemble des déplacements effectués au cours d'une même période sur le réseau viaire, nos résultats seront nuancés : ils ne prennent pas en compte l'effet d'une diminution globale du trafic que pourrait provoquer une éventuelle concentration spatiale entraînée par la congestion mais ils permettent de montrer que cette dernière entraîne des réaffectations d'itinéraires qui tendent aussi à diminuer les distances parcourues, limitant ainsi les émissions qui lui sont liées.

Il restera ensuite à s'interroger sur le sens de cet effet auto-compensateur de la congestion, changement de nature du problème plutôt qu'effet positif, résultat témoignant d'un phénomène quantitativement important ou déformation liée à la modélisation, négligeable en réalité.

2.1.1. Points de méthode.

Avant de présenter les résultats et de tenter de les interpréter, plantons le décor méthodologique qui devra constamment rester en arrière-plan. La méthode de calcul retenue reprend bien sûr l'ensemble des éléments présentés au cours du chapitre 3. Il fallait cependant se doter d'un moyen "d'isoler" la congestion pour pouvoir en mesurer l'impact en matière de trafics, d'état de la circulation et de nuisances sonores et atmosphériques.

a) Situations "avec" et "sans" congestion

Pour parvenir à cette fin, la méthode a tout d'abord consisté à comparer les résultats issus de deux affectations du trafic entre lesquelles un seul paramètre varie, toutes autres choses supposées égales par ailleurs :

- Une première affectation est effectuée sans prendre en compte les contraintes de capacité qui caractérisent chaque arc du réseau. Elle est établie à partir d'une attribution des itinéraires des déplacements routiers par une méthode de tout ou rien en une itération, reposant sur les seules vitesses *a priori* attribuées à chaque arc. L'affectation est donc effectuée comme si le phénomène de congestion n'existait pas.
- La seconde affectation intègre les contraintes de capacités des arcs du réseau et permet donc de prendre en compte les effets de la congestion. Elle correspond en fait à une affectation selon le principe d'équilibre de Wardrop, avec 6 itinéraires et écrêtement de la demande. Soulignons qu'elle correspond

également au scénario *S0* servant de référence lors de la série de tests effectués au cours du chapitre précédent.

Pour un même nombre de déplacements avec des origines et destinations identiques, on obtient alors 2 résultats d'affectation reposant sur des logiques de calcul nettement différenciées, que l'on peut interpréter comme prenant ou non en compte le problème de la congestion. Pour chacune de ces affectations, des calculs d'émissions atmosphériques et sonores peuvent ensuite être faits en fonction des vitesses de circulation, des flux de véhicules et des types de voirie. Les écarts entre les deux situations, tant en termes de vitesses moyennes et de répartition des flux sur le réseau que d'émissions sonores et atmosphériques, sont ensuite attribués aux effets de la congestion.

b) Une montée en charge progressive du réseau

Un deuxième point réside dans le fait que le phénomène de congestion ainsi que ses effets ne relèvent pas de processus linéaires comme en témoignent la forme de la courbe débit-vitesse ou les émissions unitaires des véhicules en fonction de l'état de la circulation. De plus nous avons vu que ses effets ne semblent pas être les mêmes suivant le niveau d'observation où l'on se situe.

Pour ne pas masquer cette éventuelle non-linéarité de la congestion et de ses effets au niveau d'un réseau, plusieurs affectations ont été effectuées, simulant une montée en charge progressive du réseau. Pour réaliser ce travail, la structure de la matrice origine-destination a été conservée constante, seul le nombre total de déplacements étant affecté. Autrement dit la matrice origine-destination d'heure de pointe du soir 1990 fournie par le CETE de Lyon a servi de matrice de référence et a été multipliée par un coefficient λ pour chaque simulation. Au total, 9 simulations ont été effectuées, pour lesquelles la double affectation "avec" et "sans" congestion a été reconduite à chaque fois. Les coefficients λ et les volumes de déplacements correspondants sont les suivants :

Tableau 1 : Nombre de déplacements pour chacune des 9 simulations, avec et sans congestion

Simulation	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Volume de déplacements	46 350	77 260	108 160	123 610	139 060	154 510	169 960	185 420	200 870
Coef. multiplicateur λ / à la simulation n°6 de ref.	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3

c) Discussion autour de la méthode

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 principales limites que l'on peut évoquer tournent autour de 4 grands thèmes, chacun renvoyant à l'une des 4 familles de paramètres qui avaient été évoquées au cours du chapitre 3 pour présenter le modèle DAVIS (Cf. chapitre 3, sous-section 1.1.1. "l'usage d'un modèle d'affectation du trafic : DAVIS") :

- une représentation figée des déplacements et la non prise en compte des réadaptations hors réseau à court comme à long terme ;

- hypothèse d'une connaissance parfaite de l'état du réseau par les conducteurs au moment où ils prennent leur véhicule ;
- limites de représentation du réseau au sein du modèle ;
- limites de représentation de la congestion au sein du modèle.

(i) Tout d'abord, les différentes simulations ne jouent que sur deux paramètres, le volume de déplacements et la capacité de la voirie, toutes autres choses étant supposées égales par ailleurs. La qualité de la voirie et les vitesses autorisées restent identiques. Au niveau de la demande, la structure de la matrice O-D reste inchangée. Les effets qu'une congestion chronique peut avoir sur les décisions de déplacements des personnes, comme par exemple l'annulation de certains déplacements, les changements de destination, les réorganisations temporelles des activités ou les reports modaux n'ont pas vocation à être analysés ici. De même les répercussions à long terme sur la structuration du réseau ou les localisations d'activités évoquées dans la partie précédente ne sont pas prises en compte.

(ii) Pour effectuer ses calculs, le modèle utilisé pose l'hypothèse de comportement rationnel de conducteurs connaissant parfaitement l'état de la circulation sur tous les itinéraires possibles. Or plus le niveau général d'encombrement du réseau est élevé, plus cette hypothèse semble irréaliste dans le sens où un état globalement congestionné se manifeste par une forte imprévisibilité des temps de parcours sur les différents itinéraires envisageables par un automobiliste. Cependant, nous avons vu au cours du chapitre que certains paramètres ont été introduits pour amender cette hypothèse trop forte, avec notamment une pondération représentant une "préférence pour les grands axes" et un coefficient de "pénibilité de l'incertitude sur les temps de parcours" fonction du temps perdu calculé pour chaque itinéraire.

Les tests effectués ont permis de montrer qu'à trafic constant les résultats globaux d'émissions sonores et atmosphériques sont peu à très peu sensibles à des variations de ces paramètres autour des valeurs retenues. Tant que les conditions de circulation restent relativement bonnes, on peut estimer que l'enjeu lié à ces valeurs reste limité. Par contre nous n'avons pas les moyens de tester leur validité lorsque le nombre de déplacements augmente très fortement, notamment lorsque la matrice originelle sur laquelle le modèle a été calibré est multipliée par un facteur λ supérieur à 1. Pour les simulations n°7, 8 et 9, nous ferons donc l'hypothèse que les valeurs de ces paramètres restent valides.

(iii) Les limites liées à une représentation incomplète du réseau ont déjà été exposées. Les origines et les destinations des déplacements correspondent en fait à des centres de zones. D'une part les déplacements à l'intérieur d'une même zone ne sont pas pris en compte. D'autre part la représentation de la voirie à l'intérieur des zones est schématisée à l'extrême : elle est en général résumée à 2 ou 3 tronçons qui relient le centre de zone au réseau de voirie principal. Il n'est donc pas question ici de chercher à mesurer les conséquences de la congestion sur un réseau réel, même si l'usage d'une image simplifiée du réseau lyonnais permet de travailler à partir d'une configuration réaliste.

(iv) Enfin, un dernier point concerne la manière dont la congestion est représentée sous DAVIS. Nous avons vu lors du test de la méthode qu'avec une matrice des déplacements routiers en heure de pointe sur le réseau lyonnais, une affectation selon le principe d'équilibre de Wardrop avec 6 itinéraires et écrêtement de la demande permet d'obtenir la même précision qu'avec 18 itinéraires possibles *a priori*. Lorsqu'on augmente encore le nombre de déplacements de presque 1/3 (cas de la simulation n°9), il n'apparaît

que des différences marginales inférieures au dixième de pourcent entre les trafics obtenus suivant les deux modes de calcul. Malgré la répercussion quasiment nulle sur la fiabilité des résultats, ce sont ceux de l'option "18 itinéraires" qui ont été repris pour les 2 dernières simulations.

Concernant les niveaux de finesse proposée dans ses options d'affectation le modèle utilisé semble donc respecter une certaine cohérence interne à travers les résultats qu'il fournit lorsque le nombre de déplacements augmente, toutes autres choses égales par ailleurs. Par contre il n'y a pas moyen de tester sa robustesse par rapport à la réalité lorsque ce nombre de déplacements devient supérieur à celui de la matrice initiale. Nous faisons donc là encore l'hypothèse que les calculs de DAVIS restent valides pour les simulations n°7, 8 et 9. Il faut souligner que c'est surtout cette inconnue sur la limite de validité du modèle d'affectation qui nous a conduit à ne pas augmenter trop fortement le nombre total de déplacements de la matrice et à éviter par exemple de simuler un état de congestion généralisée.

La démarche suivie permet donc d'obtenir des indications sur les conséquences d'une augmentation du nombre de déplacements sur la voirie interzone, toutes choses égales par ailleurs. Trop d'informations restent inconnues pour prétendre fournir une image exacte des effets de la congestion : trafic intrazone non pris en compte ; frontières de validité du modèle d'affectation mal maîtrisées lorsque le niveau de congestion devient élevé - le nombre de déplacements a été volontairement limité à la hausse pour éviter des dérives trop importantes et non vérifiables liées au mode de calcul ; mais surtout les adaptations immédiates comme à long terme des personnes et du système urbain dans son ensemble restent complètement ignorées.

Les résultats obtenus n'apportent donc qu'un éclairage particulier au phénomène de la congestion. En se situant au niveau global d'un réseau ils permettent de dépasser les niveaux trop restreints du véhicule et de son conducteur qui ne fournissent que des informations élémentaires en termes de temps perdu et d'émissions unitaires ou de l'axe routier sur la base duquel la congestion est définie comme relation entre taux d'occupation, débits et vitesses. Par contre ils ne peuvent pas prétendre apporter une vision achevée de l'objet étudié : les limites qui viennent d'être évoquées sont là pour le rappeler.

2.2.2. Un impact important de la hausse du nombre de déplacements sur les niveaux d'émissions

Une première lecture des résultats peut être faite en observant la manière dont évoluent les caractéristiques des déplacements lorsque leur nombre augmente et que la congestion est prise en compte : une baisse progressive de leur vitesse moyenne avec comme corollaire une hausse significative de leur durée mais aussi, du fait d'une réadaptation de leurs itinéraires par les conducteurs, une baisse sensible des distances moyennes parcourues (-16% entre les scénarios 1 et 9).

Tableau 2 : évolution des caractéristiques des déplacements suivant les 9 simulations

Caractéristiques moyennes par déplacement	Sim. 1	Sim. 2	Sim. 3	Sim. 4	Sim. 5	Sim. 6	Sim. 7	Sim. 8	Sim. 9
Vitesse (km/h)	62	54	45	41	36	31	27	23	20
Durée (mn)	9.5	10.1	11.8	12.9	14.5	16.6	18.9	21.8	24.1
Longueur (km)	9.8	9.1	8.8	8.8	8.7	8.6	8.5	8.4	8.2

Avant de s'interroger sur la signification et les implications de la baisse de la longueur moyenne des déplacements, nous allons d'abord estimer l'impact de la variation des vitesses sur les émissions sonores et atmosphériques.

a) Pollution atmosphérique...

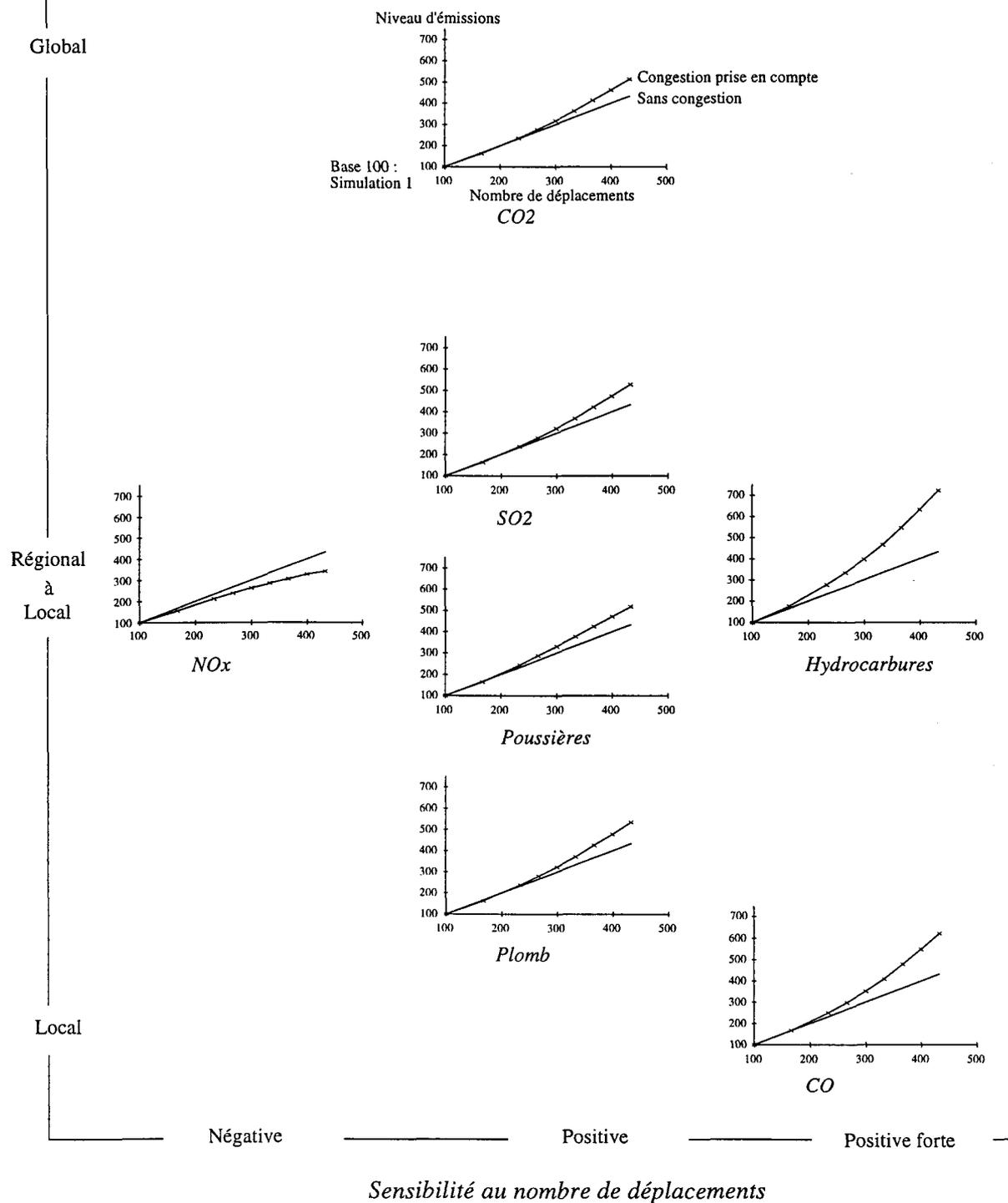
La série de graphiques de la page suivante permet de donner une idée de la sensibilité des différents types de polluants à la hausse du nombre de déplacements. Pour chacun d'entre eux, on a représenté le niveau global d'émissions du trafic des véhicules légers en fonction du nombre total de déplacements simulés sur le réseau. La courbe avec les croix renvoie aux affectations de trafic prenant en compte la congestion, la droite correspond quant à elle à la progression linéaire qu'auraient connues ces émissions si le phénomène de congestion n'existait pas. Enfin, pour mieux comparer les évolutions, toutes les valeurs ont été ramenées en base 100 par rapport aux résultats de la simulation 1 (soit un nombre de déplacements égale à 30% de celui de la matrice originelle), qui a été considérée équivalente à une situation sans congestion car les résultats bruts sont quasiment identiques entre les deux méthodes d'affectation retenues. Les données en valeur absolue figurent en annexe III, §2.2..

Une première conclusion, immédiate, renvoie à l'hétérogénéité des liaisons à la congestion. Trois "familles" peuvent être dégagées :

- Les émissions d'hydrocarbures et de monoxyde de carbone sont très sensibles à la congestion puisqu'entre les deux simulations extrêmes n°1 et 9, leurs croissances moyennes sont respectivement de 44 et 66% supérieures à celle du nombre de déplacements.
- Les poussières, le plomb, le soufre et le gaz carbonique forment un groupe homogène avec une croissance moyenne supérieure de 20% à celle du nombre de déplacements.
- Les oxydes d'azotes, enfin, ont tendance à croître moins vite que le nombre de déplacements (-21% en moyenne).

Graphique 8 : Sensibilité des émissions VL de polluants atmosphériques à la hausse du nombre de déplacements au niveau d'un réseau routier urbain

Niveau d'impact



On retrouve en fait ici les hypothèses posées sur les émissions unitaires moyennes des véhicules légers en fonction des cycles de conduite. Alors que les émissions de NOx ont tendance à baisser régulièrement entre le cycle autoroutier 1 et le cycle urbain lent 3, celles de CO₂, poussières, SO₂ et plomb passent de 1 à une fourchette de 2,6-3,8 alors que le CO et les hydrocarbures voient leurs émissions multipliées respectivement par 5,9 et 9,9. Or avec la croissance simulée du nombre de déplacements, les parts relatives des cycles à vitesses lentes augmentent au détriment des cycles autoroutiers. Cette tendance se trouve illustrée de manière plus précise dans le tableau ci-dessous qui représente les élasticités des diverses émissions VL à la hausse du nombre total de déplacements sur le réseau routier.

Tableau 3 : Les élasticités des différentes émissions polluantes des véhicules légers à la hausse du nombre de déplacements - établies entre les deux simulations extrêmes.

	élasticité des émissions VL au trafic total
NOx	0.788
CO ₂	1.188
Poussières	1.195
SO ₂	1.216
Plomb	1.233
CO	1.439
Hydrocarbures	1.665

Il faut cependant remarquer que les émissions des poids lourds ne sont pas prises en compte dans les résultats présentés ici. En effet ces derniers ont un impact non négligeable sur les relations que l'on peut établir entre certaines émissions et le nombre de déplacements, notamment les émissions de poussières mais aussi celles de soufre et de CO₂²⁹. Nous avons donc préféré nous cantonner aux émissions des véhicules légers pour lesquelles tout à la fois les hypothèses de calcul apparaissent plus fiables et les résultats

²⁹ Lorsqu'on prend en compte les émissions des poids-lourds, les élasticités telles qu'elles sont calculées dans le tableau précédent passent de 1,2 à 0,88 pour les émissions de poussières, 1,22 à 1,04 pour le SO₂ et 1,19 à 1,07 pour le CO₂. Elles restent par contre pratiquement inchangées pour les autres types de polluants (Cf. annexe III, §2.2.). Ce phénomène peut s'expliquer par la combinaison de plusieurs facteurs jouant entre eux :

1) D'une part nous avons déjà vu que les poids lourds jouent un rôle important sur le niveau des émissions plus spécifiques à la traction diesel, à savoir les poussières et le SO₂. Leur part est également importante pour les NOx et le CO₂ (lié directement à la consommation d'énergie). C'est donc sur les élasticités de ces polluants que les changements sont importants.

2) D'autre part les émissions unitaires des poids lourds, compte tenu des différentes hypothèses posées pour les établir, sont relativement peu liées aux différents cycles de conduite (Cf. annexe I, §2.2.3.). La prise en compte des trafics PL dans les calculs d'émissions introduit alors une certaine inertie, d'autant plus importante que le polluant considéré est sensible aux variations de vitesses et donc de cycles de conduite impliqués par la hausse du nombre de déplacements. Ceci permet de comprendre pourquoi les élasticités calculées ont toutes tendance à baisser avec l'introduction des PL, celle des poussières passant même sous la barre du 1.

3) Il existe enfin un effet de structure qui atténue sans doute le mécanisme précédent. Par hypothèse les PL sont supposés plus nombreux en cycles autoroutiers (ils composent alors 10% du trafic, pour 7% en cycles routiers et 6% en cycles urbains). Or la part relative des trafics en cycles autoroutiers décroît fortement entre les simulation 1 et 9, passant de 51 à 9% du total (elles augmentent cependant de 50% en valeur absolue). De ce fait la proportion de PL dans le trafic total diminue de presque 20%, passant de 8,5 à 6,9% du trafic.

restent plus stables lorsque ces mêmes hypothèses varient (Cf. chapitre 3, section 2.2.3. "L'importance des hypothèses de composition du trafic").

On peut noter que les élasticités calculées ne représentent que des indicateurs moyens et que les liaisons ne sont pas linéaires. Hormis le cas des hydrocarbures, la progression des émissions reste calquée sur celle des déplacements jusqu'à la troisième, voir la quatrième simulation - soit 70 à 80% des déplacements de la matrice originelle d'heure de pointe du soir dans l'agglomération lyonnaise en 1990. Ensuite les graphiques montrent bien que les effets de la congestion se font sentir de manière de plus en plus forte lorsque le nombre de déplacements augmente. Nous avons cependant préféré ne pas continuer l'expérience au delà de la neuvième simulation (+30% des déplacements de la matrice originelle), la validité des résultats d'affectation du modèle, calibré pour la simulation n°6, devenant trop incertaine.

Enfin, une remarque évidente qui peut être faite à partir des graphiques concerne l'impact relativement faible de la congestion sur les émissions de polluants atmosphériques en général. Si l'on se réfère à la simulation 6 qui se rapproche le plus d'une situation réelle d'heure de pointe dans une grande agglomération française, plomb, poussières, soufre et CO₂ émis en plus du fait de la congestion ne représenteraient que 10% du total des émissions. Les NO_x baisseraient même de 17%. Par contre les émissions de CO et surtout d'hydrocarbures liées à la congestion constituent respectivement 19 et 28% du total.

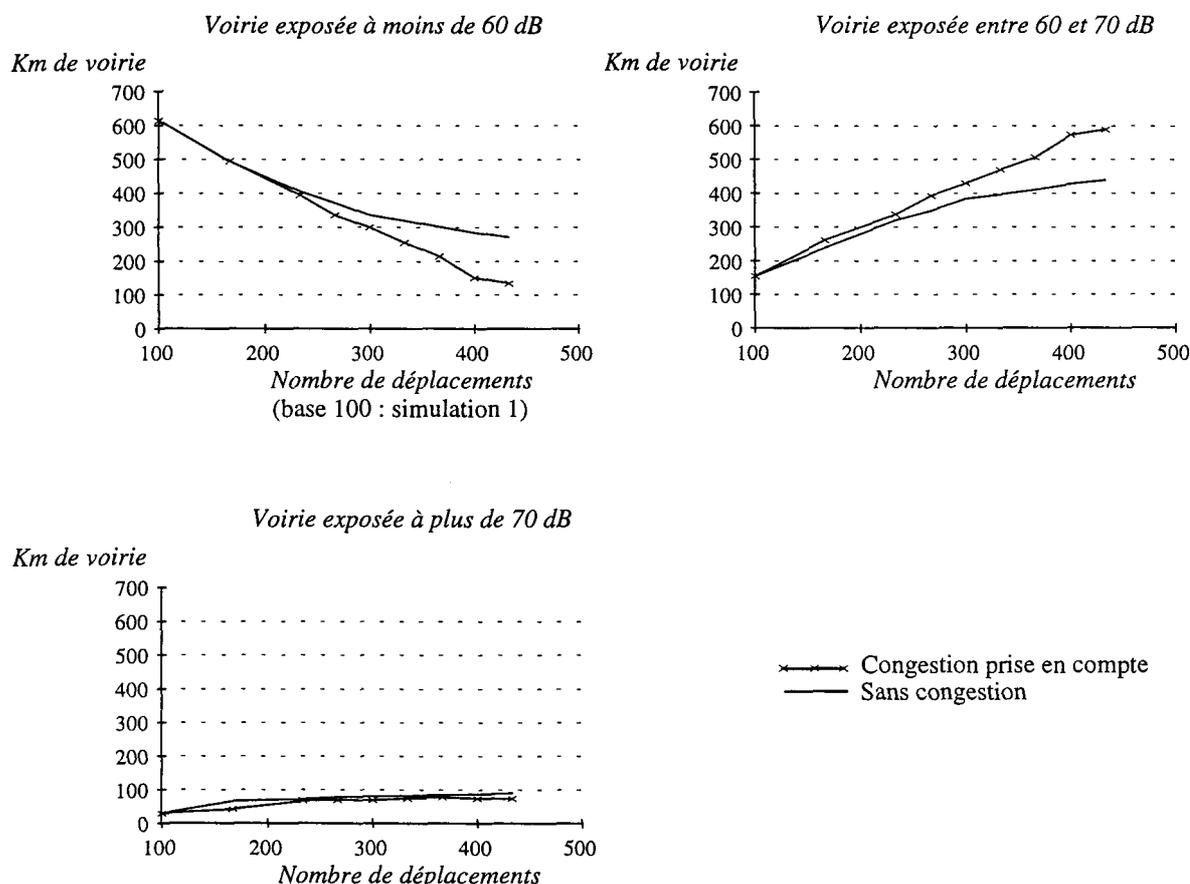
Même lorsque l'on simule une augmentation des déplacements de presque 1/3 par rapport à cette situation originelle l'impact de la congestion reste relativement faible - même s'il est en augmentation - sauf pour les hydrocarbures où il est cause de 40% des émissions. Le discours sur la liaison exponentielle entre congestion et émissions polluantes semble donc devoir être relativisé à la vue de ces résultats. La cause première de la pollution est à attribuer directement au trafic lui-même, non aux phénomènes d'encombrements qu'il peut entraîner lorsque son niveau est trop élevé par rapport aux capacités du réseau viaire. Du strict point de vue de la qualité de l'air, la réflexion ne devrait donc pas se tourner sur les questions de fluidification de la circulation mais sur les moyens de faire baisser les kilomètres parcourus sur la route ou sur les technologies susceptibles de diminuer les émissions unitaires.

b) ...et nuisances sonores

L'indicateur de nuisance sonore qui a été retenu correspond au nombre de kilomètres de voirie exposée à différentes classes de niveaux sonores calculés sur l'isophone de référence et mesurés en Leq(1h) dB(A). Les résultats obtenus ont été synthétisés à l'aide de 3 graphiques représentant l'évolution de cet indicateur établi sur 3 classes de niveaux sonores ($L < 60$ dB, $60 \leq L < 70$ dB, $70 \leq L$) en fonction du nombre de déplacements envisagés sur la voirie, celui de la première simulation servant de référence en base 100. Comme précédemment les résultats des affectations avec et sans congestion sont figurés, les premiers étant symbolisés par des croix, les seconds par la courbe en trait continu.

Les résultats présentés ici ne prennent en compte que les émissions sonores générées par les véhicules légers. On pourra trouver en annexe III, §2.3., les graphiques équivalents établis à partir des émissions sonores de l'ensemble des véhicules.

Graphique 9 : Evolution des émissions sonores du trafic VL en fonction du nombre de déplacements routiers
mesurées en km de tronçons de voirie exposés à différents niveaux sonores établis sur l'isophone de référence en $Leq(1h)$ dB(A).



Comme l'illustrent les graphiques ci-dessus, l'augmentation progressive du nombre de déplacements sur le réseau viaire se traduit essentiellement par un large transfert des tronçons de la classe <60 dB vers la classe 60-70 dB. Par contre les tronçons exposés à un niveau de bruit *a priori* très élevé (>70 dB avec le trafic VL) restent relativement peu nombreux. Ils augmentent rapidement au début (multipliés par 2,5 entre les trois premières simulations) pour se stabiliser ensuite.

De la comparaison des résultats avec et sans prise en compte de la congestion, 3 grandes observations peuvent être tirées :

- Tout d'abord, comme dans le cas de la pollution atmosphérique, les chiffres obtenus sont quasiment identiques pour les premières simulations et l'écart entre les courbes ne se creuse qu'à partir des simulations 3 et 4. La congestion ne commence donc à faire sentir ses effets que lorsque le nombre de déplacements atteint un niveau équivalent à 70-80% de celui de la matrice originelle d'heure de pointe du soir.
- Pour les simulations suivantes on s'aperçoit que la prise en compte de la congestion génère un transfert beaucoup plus important des classes à faible niveau sonore vers les classes moyennes.

- Les tronçons fortement exposés sont par contre légèrement moins nombreux et, surtout, lorsqu'on analyse les résultats plus finement, on s'aperçoit que ces tronçons subiraient des niveaux sonores encore plus élevés si le phénomène de congestion n'existait pas. Dans le cas extrême de la simulation 9, pour 89 kilomètres de tronçons "fortement exposés", 53 connaissent des niveaux d'émissions supérieurs à 75 dB alors qu'avec la prise en compte de la congestion, ce niveau n'est jamais atteint.

Pour interpréter ces résultats, il faut revenir sur les principales variables qui jouent sur l'indicateur utilisé, à savoir la vitesse et le nombre de véhicules/heure sur chacun des deux arcs généralement constitutifs d'un tronçon :

- La vitesse a une grande influence sur les émissions sonores par véhicule. D'après les abaques retenues pour les calculs (Cf. Chap. 3, 1.2.2. "Calcul des émissions sonores") la vitesse optimale au regard du critère "bruit" est d'environ 40-50 km/h pour les véhicules légers et 60 km/h pour les poids lourds. A ce niveau, le régime des moteurs est, en moyenne, le plus performant et le moins bruyant. A une vitesse supérieure, le bruit du moteurs se trouve progressivement masqué par celui du contact entre les pneumatiques et la chaussée.
- Le nombre de véhicules/heure permet ensuite d'établir le niveau sonore moyen par arc, puis, par agrégation, de retrouver le niveau sonore pour chaque tronçon. Il faut souligner que ces flux ne dépendent pas que des caractéristiques de l'arc par lequel ils s'écoulent mais sont également le résultat de l'état général de la circulation sur l'ensemble du réseau car c'est en fonction de ce dernier que les conducteurs vont adapter leur itinéraire.

Compte tenu de ces éléments, la logique d'évolution des émissions sonores générée par les véhicules légers en fonction du nombre de déplacements sur le réseau peut s'expliquer de la façon suivante.

Si le phénomène de congestion n'existe pas et que les vitesses par arc restent constantes quel que soit le nombre de véhicules en présence, les conducteurs ne vont pas modifier leurs itinéraires initiaux, fixés en fonction des seules vitesses *a priori* des arcs et concentrés sur les voiries les plus rapides³⁰. Lorsque le nombre de déplacements augmente avec une structure stable des origines-destinations, les flux par arc vont alors augmenter de façon proportionnelle. Cette hausse uniforme des trafics, toutes autres choses égales par ailleurs, conduit à un transfert général des voiries faiblement exposées vers les voiries soumises à un niveau moyen compris entre 60 et 70 dB. De même on observe un renforcement des niveaux d'exposition sur les axes rapides où vitesse élevée et flux relativement importants se combinent pour générer très rapidement des niveaux sonores supérieurs à 70 dB.

La réintroduction du phénomène de congestion vient modifier ce premier schéma en affectant tout d'abord les vitesses puis en se répercutant sur les flux par arc. On assiste alors à des réaffectation massives d'itinéraires et les flux qui se concentraient sur quelques tronçons privilégiés à vitesse rapide se redistribuent sur l'ensemble du réseau. Cette

³⁰ A propos des hypothèses posées sr les types de voirie privilégiés par les conducteurs, Cf. *infra*, 2.3. "Une redistribution des flux".

augmentation du nombre de véhicules sur le réseau secondaire conduit alors à un transfert important et plus rapide qu'en l'absence de congestion des tronçons peu exposés vers ceux qui le sont moyennement. Par contre les tronçons les plus exposés voient rapidement leur situation se stabiliser du fait même de leur saturation - absolue ou relative. Ainsi les émissions sonores générées par les véhicules légers restent toujours inférieures à 75 dB lorsque la congestion est prise en compte³¹.

La congestion, par la redistribution spatiale des itinéraires qu'elle entraîne, conduit donc à une nette détérioration dans des zones non conçues pour un trafic important comme les zones résidentielles par exemple. Elle contribue par contre à atténuer les émissions sonores le long des axes de transit. La congestion évite ainsi la création de quelques points noirs catastrophiques, mais au prix d'un étalement de la nuisance sonore sur l'ensemble du territoire couvert par le réseau considéré.

Ainsi, contrairement au cas de la pollution de l'air, du strict point de vue des émissions sonores générées par un trafic routier trop dense, la construction de nouvelles infrastructures à gros gabarit n'est pas forcément à rejeter sous conditions de bonnes protections phoniques et d'un non allongement de la distance moyenne parcourue par déplacement lié aux détours occasionnés pour les emprunter. L'exemple des tunnels d'accès au centre-ville rentre tout à fait dans ce cadre et évite du même coup une grande partie des effets de coupure générés par les grosses infrastructures.

2.2.3. Une redistribution des flux : baisse des distances moyennes et envahissement du territoire

Cette première analyse de la congestion semble montrer que l'importance de ses effets en termes de pollutions atmosphérique et sonore se joue autant sur un plan quantitatif que qualitatif, autant au niveau du total des kilomètres parcourus que de leur répartition sur le réseau routier. Il est évident que le phénomène d'étalement du trafic évoqué dans le cas du bruit a aussi des conséquences au niveau de la pollution atmosphérique, d'autant plus significatives que le polluant a des effets locaux importants. De même la baisse des distances moyennes parcourues en cas de congestion du fait de cette réaffectation des itinéraires atténue sans nul doute les effets globaux liés à un accroissement du nombre de déplacements.

³¹ Les résultats obtenus avec l'ensemble du trafic, poids-lourds inclus, peuvent être expliqués par cette même logique. La seule différence importante réside dans le fait que les niveaux sonores par tronçon sont plus élevés : dans le cas de la simulation n°1 par exemple au lieu d'avoir une répartition des km de voirie suivant les 3 classes de niveau sonore $L < 60\text{dB}$, $60 \leq L < 70\text{dB}$ et $70 \leq L$ correspondant à 77, 19 et 4% comme dans le cas des calculs établis sur la base du trafic VL, on obtient une répartition de 55, 37 et 8%. Ce différentiel dans les distributions de la simulation n°1 se retrouve ensuite sur l'ensemble des résultats des simulations suivantes (Cf. graphique en annexe III, §2.3.).

Par contre en cas de prise en compte de la congestion on observe bien (1) un transfert plus important des tronçons peu exposés vers la classe des 60-70 dB et (2) des pointes sonores beaucoup plus faibles sur les tronçons les plus exposés. Le schéma explicatif précédent, avec saturation des axes les plus rapides puis redistribution des déplacements supplémentaires sur le reste du réseau, fonctionne toujours.

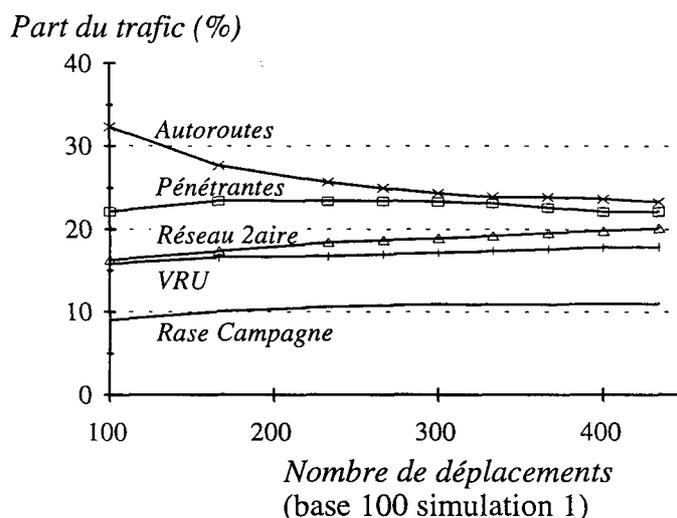
C'est donc à cette question de la redistribution des flux liée à la congestion que nous allons maintenant nous consacrer en tentant de mieux saisir la signification des résultats d'affectation du modèle et de mettre en évidence leur portée et leurs limites.

L'adaptation des automobilistes face à une situation d'engorgement se traduit par une redistribution à la fois temporelle et spatiale des flux : temporelle du fait d'un report des déplacements en dehors des périodes les plus difficiles qui se traduit par un étalement dans le temps de la pointe de trafic ; spatiale car les conducteurs en recherche d'itinéraires moins encombrés vont éviter les axes lourds surchargés et envahir le reste de la voirie. Nous avons également vu au cours de la section précédente que sur le long terme la congestion peut avoir des conséquences sur la structure urbaine en conduisant à un usage plus intensif des sols. Parmi toutes ces dimensions, seul l'aspect spatial et à court terme de la redistribution des flux est évoqué ici.

Le mécanisme qui pousse à ce phénomène est relativement simple : en situation de circulation fluide, les automobilistes n'hésitent pas à faire un détour pour rejoindre les grands axes sur lesquels la vitesse peut être élevée tant du fait des caractéristiques de la voirie que de limitations moins contraignantes. Lorsque le nombre de déplacements augmente, ces axes lourds se trouvent de ce fait parmi les premiers touchés par la congestion. Un nombre croissant d'automobilistes a alors intérêt à rectifier son itinéraire et à abandonner son détour : la distance moyenne par déplacement a tendance à baisser.

Ce mécanisme de redistribution d'une partie des flux des axes rapides vers les autres voies peut être illustré par le graphique suivant qui reprend l'évolution de la structure des trafics par type de voirie³². Les autoroutes ont une importance relative décroissante et leur part dans le trafic total passe de 32 à 23% entre les deux simulations extrêmes (soit une baisse de 30% de leur poids relatif). Les voiries de type "pénétrante" qui correspondent à la continuation logique de ces axes vers le centre ville subissent moins fortement ce mécanisme de transfert : elles commencent tout d'abord à gagner quelques parts de trafic pour le reperdre ensuite ; de ce fait leur part relative dans le trafic est identique pour les simulations 1 et 9, soit 22%. Enfin, tous les autres types de voirie bénéficient des surplus de trafics qui ne peuvent s'écouler sur les autoroutes et gagnent entre 13 (voies rapides urbaines) et 22-24% (rase campagne et réseau secondaire) de part relative du trafic.

³² Les voiries de types "rocade" et "centre-ville" ainsi que la "CD300" (contournement est de l'agglomération) ne sont pas reprises dans ce graphique car elles ne représentent guère plus de 5% du trafic total. On peut retrouver l'ensemble de ces résultats en annexe III, §2.4..

Graphique 10 : Reports de trafic liés à la congestion suivant le type de voirie

La première conséquence de cette modification des itinéraires est la diminution de leur longueur moyenne. Entre les deux simulations extrêmes cette longueur passe de 9,8 à 8,2 km soit une baisse d'environ 16%. De même, à une heure de pointe du soir en 1990 dans l'agglomération lyonnaise (simulation 6) correspond une baisse totale de 12% des véh.km par rapport à une situation fluide à demande de déplacements identique. On peut alors estimer que cet effet induit par la congestion a permis d'éviter une hausse encore plus forte des nuisances de la route : les émissions sonores et atmosphériques se sont faites sur une distance totale parcourue inférieure de 12% à ce qu'elle aurait pu être...

En second lieu la congestion implique une redistribution du trafic des axes à grande vitesse sur l'ensemble du réseau. Cette redistribution n'a pas grande importance pour ce qui concerne les émissions dont l'impact se mesure à un échelon régional ou global. Par contre, pour les nuisances de proximité, les conséquences sont toutes autres : elle évite des concentrations encore plus fortes en certains points noirs mais, par contre, va étendre le nombre de zones concernées par les nuisances des transports routiers. On peut parler en quelque sorte de la tendance redistributive et égalitariste de la congestion sur l'ensemble des résidents d'une agglomération. Par contre les mesures de protection qui peuvent éventuellement être prises en certains points localisés sont difficilement susceptibles d'être étendues à l'ensemble du territoire, même si elles sont plus légères du fait d'une moindre concentration des flux.

Remarquons cependant que ce phénomène a été mis en évidence en supposant que les conducteurs ont une bonne connaissance des itinéraires alternatifs permettant de réaliser leur déplacement ainsi que de l'état de la circulation sur l'ensemble de ces itinéraires. Cette hypothèse ne peut apparaître vraisemblable que dans des conditions stables de circulation (fluide ou congestionnée) pour des déplacements répétitifs tels que le domicile-travail. Dans ce cadre précis on peut estimer que les automobilistes ont réussi à optimiser leur itinéraire et que si la situation est globalement fluide, les déplacements sont sans doute plus longs que si elle avait été congestionnée.

Par contre lors de déplacements non habituels pour lesquels les automobilistes n'ont pas la même connaissance des points noirs et des itinéraires alternatifs les adaptations risquent d'être moins nombreuses. De même en cas d'évènement imprévu comme un

encombrement provoqué par un accident ou des travaux temporaires les adaptations d'itinéraire se font en cours de route impliquant le plus souvent des détours plus ou moins importants. On peut également remarquer que les risques d'évènements imprévisibles ayant une conséquence significative sur l'état de la circulation s'élèvent lorsqu'on s'approche du régime forcé : on aurait là un mécanisme aux conséquences inverses à celui qui vient d'être présenté. Par contre la tendance à l'envahissement du réseau secondaire se trouverait encore plus confirmée.

La baisse de la longueur des déplacements peut donc être considérée comme un moindre mal si l'on dresse un bilan global des émissions des transports routiers, notamment dans le domaine de la pollution atmosphérique. Cependant cette baisse se paie par un envahissement de l'automobile sur l'ensemble du territoire du fait d'un report des itinéraires concentrés sur les axes rapides vers le reste du réseau. Enfin cette baisse des distances moyennes liée à l'augmentation du nombre de déplacements peut sans doute être considérée comme une tendance lourde même si elle n'est certainement pas aussi forte que ce qui est proposé par DAVIS.

2.2. Congestion et renouvellement du réseau routier à long terme

Une seconde manière d'envisager les effets de la congestion est de considérer que sur le long terme les investissements prévus en matière de voirie reflètent les difficultés ressenties ou prévues en matière de circulation. Du point de vue économique, cette mise en parallèle entre investissements viaires et congestion est également souvent établie pour calculer le coût de cette dernière par la méthode du coût de l'évitement : quelle serait la somme à débloquer pour retrouver un niveau de fluidité acceptable dans telle ou telle situation³³ ?

On peut émettre des réserves face à la conception d'une équivalence stricte entre la congestion et l'évolution du réseau routier :

- D'une part, le présupposé d'un lien fort entre progrès, accessibilité et richesse, qui permet de comprendre cette adéquation, la dépasse largement. Même si la congestion n'existait pas, ou plutôt restait cantonnée à un niveau satisfaisant, il pousserait au développement continu du système de transport et donc des infrastructures routières.
- D'autre part, en se concentrant sur les conséquences de la congestion en matière de développement de la voirie, on ne prend pas en compte certains points abordés précédemment, tels que son rôle de frein sur le développement urbain ou ses effets sur la redistribution des déplacements routiers au cours de la journée - par contre on peut d'ores et déjà souligner le rôle antagoniste de ce type de régulation par le développement de la voirie avec les logiques précédentes de concentration spatiale ou étalement temporel, permettant d'optimiser les déplacements sur un espace trop rare en certaines périodes.

³³ Voir pp. 81-83 de CROZET Yves et alii, *La mobilité en milieu urbain : de la préférence pour la congestion à la préférence pour l'environnement ? Op. Cit.*

- Enfin, rejoignant ce dernier point, Gabriel Dupuy avait déjà souligné dans les années 70 que le lien fort qui existe entre le développement du réseau routier et les prévisions d'évolution de la mobilité automobile n'est pas unilatéral³⁴. L'existence de nouvelles infrastructures induit également une part de trafic qui ne serait pas apparue si elles n'avaient pas été construites. Les prévisions de hausse du trafic se réalisent donc d'elles-mêmes dès lors qu'elles se traduisent en terme de développement du réseau. Il devient alors difficile d'assimiler de manière simple et directe "hausse de la congestion" et "évolution du réseau", la relation de cause à effets étant bouclée sur elle-même.

Il n'en reste pas moins que la congestion joue un rôle important dans le développement des infrastructures viaires et nous ferons ici comme si le lien entre les deux était complet, à un décalage temporel près. Nous supposons donc que l'impact des réaménagements du réseau routier sur les émissions de polluants atmosphériques et sonores correspond à l'impact à long terme de la congestion, présente ou prévue.

2.2.1. Points de méthode

Les principaux éléments de la méthode que nous avons développée dans cette partie se retrouvent aussi dans le chapitre suivant qui traite spécifiquement des évolutions à venir des nuisances atmosphériques et sonores de la route, liées de fait à l'évolution du réseau de voirie mais aussi au renouvellement technologique du parc et à la hausse de la mobilité automobile. Nous ne présenterons donc ici que les principaux points concernant directement la question de la congestion et du renouvellement du réseau, renvoyant au prochain chapitre les précisions méthodologiques qui touchent aux hypothèses d'évolution du trafic et des émissions unitaires.

Pour mesurer l'impact de l'évolution du réseau routier sur les niveaux d'émissions polluantes et sonores des véhicules routiers nous avons, comme précédemment, raisonné toutes choses égales par ailleurs : seule l'évolution du réseau est prise en compte et les affectations et calculs ont été établis à matrice des déplacements et caractéristiques technologiques du trafic constants.

Une précision, importante, doit être apportée. L'exercice a consisté à raisonner sur trois états différents au cours du temps du réseau routier lyonnais, en 1994, 2000 et 2010, toutes autres choses égales par ailleurs. Cependant les hypothèses d'évolutions de la mobilité utilisées par le CETE de Lyon pour construire les matrices de déplacements prennent en compte une certaine redistribution spatiale des activités et la mise à jour du réseau routier tente, dans la mesure du possible, de rester en cohérence avec ces évolutions. On peut donc supposer que l'impact de l'évolution du réseau est différent suivant la matrice de déplacements envisagée et la plus ou moins bonne adéquation existant entre les deux.

Pour prendre en compte cette liaison entre l'évolution du réseau et de son "environnement", à savoir les états des déplacements et des technologies en 1994, 2000 et 2010, ce n'est pas un mais trois tests qui ont été établis. Ce sont les constantes repérées au cours de ces trois tests successifs que nous avons tenté de mettre en évidence.

³⁴ Cf. DUPUY Gabriel, *Une technique de planification au service de l'automobile : les modèles de trafic urbain*. Paris : Copédith, document de travail, Action Concertée de Recherche Urbaine, 1975. 203 p.

Les trois états du réseau routier envisagés sur le Grand Lyon pour 1994, 2000 et 2010 ont été définis par le CETE de Lyon. Ce travail a été mené dans le cadre de la mise en oeuvre du Dossier de Voiries d'Agglomération³⁵ :

- L'état du réseau en 1994 a servi de base de référence par rapport aux deux suivants, notamment du fait qu'il a été établi sur la base d'un découpage de l'agglomération compatible entre les trois périodes et donc une représentation des origines et destinations des déplacements identiques³⁶.
- Les changements envisagés entre 1994 et 2000 correspondent à des opérations programmées et déjà engagées avec notamment l'ouverture du Tunnel Nord Périphérique et du Boulevard Urbain Sud ainsi que le doublement de l'autoroute rejoignant St Etienne avec l'A45.
- Le réseau considéré pour 2010 relève quant à lui plus d'une vision idéale de planification, sachant que certains projets seront sans doute modifiés, repoussés ou ne verront jamais le jour. Il correspond au "scénario F" du Dossier de Voiries d'Agglomération qui considère notamment une ceinture éloignée composée de la Rocade Est actuelle, du Tunnel Nord Périphérique et du Boulevard Urbain Sud en construction, et bouclée par le projet du Tunnel Ouest Périphérique. De plus un grand Contournement Est passant par l'aéroport de Satolas est envisagé³⁷.

Les matrices de déplacements correspondant à ces trois dates, 1994, 2000 et 2010, ont également été établies par le CETE de Lyon. Soulignons qu'elles ne reposent pas sur l'hypothèse d'école de la partie précédente d'une croissance homogène du nombre de déplacements. Les déplacements périphériques croissent de manière plus importante du fait d'une hypothèse de stabilité de la mobilité automobile des résidents du centre de l'agglomération (Lyon et Villeurbanne) contre une croissance annuelle de 5% pour les résidents de la périphérie. Ceci débouche globalement sur une croissance de 40% du nombre total de déplacements entre 1994 et 2010, avec une augmentation limitée à 33% des déplacements internes à l'agglomération et des progressions beaucoup plus rapides des

³⁵ Communauté Urbaine de Lyon, Conseil Général du Rhône, DDE 69, *Schéma de grandes voiries de l'agglomération lyonnaise - document technique de synthèse*. Lyon : DDE du Rhône, septembre 1993. 99 p.

³⁶ Ainsi, le réseau et la matrice de déplacements utilisés précédemment pour le test de la méthode (chapitre 3) et la simulation d'une croissance du nombre de déplacements (partie précédente), correspondant à 1990, n'ont pas pu être conservés. Ils reposaient en effet sur une base de 141 zones alors que les projections effectuées par le CETE de Lyon ont été établies sur un découpage plus fin de 191 zones, identiques entre 1994, 2000 et 2010.

L'inconvénient essentiel qu'aurait présenté le fait de conserver les données de 1990 touche à l'exclusion de certains petits déplacements. En effet, certains d'entre eux n'apparaissent pas en 1990 car ils s'effectuent à l'intérieur d'une zone donnée : étant caractérisés par un même centroïde en origine et destination, il est techniquement impossible de leur affecter un itinéraire. Par contre ils peuvent très bien être pris en compte à partir de 1994 lorsque le découpage devient plus fin et permet de leur attribuer une origine et une destination différentes. L'utilisation des données de 1990 aurait ainsi conduit à une hausse artificielle du nombre de déplacements, liées à des questions purement techniques, et nous avons préféré travailler directement à partir de 1994. On pourra trouver au chapitre suivant les éléments de réactualisation des hypothèses d'émissions qui ont été nécessaires pour cette nouvelle date de référence.

³⁷ Cf p. 67 de COURLY, C.G. 69, DDE 69, *Schéma de grandes voiries de l'agglomération lyonnaise*. Op. Cit.

déplacements liés aux échanges (+60%) et au transit (+67%)³⁸. On trouvera dans la première section du chapitre prochain une présentation plus détaillée de ces évolutions et des grands enjeux qu'elles recouvrent.

De même les évolutions de la composition du trafic et des technologies des véhicules qui ont été envisagées sont présentées au chapitre suivant. Soulignons simplement que les incertitudes concernant le trafic poids-lourd et ses émissions nous ont conduit à ne pas les prendre en considération. Les véhicules légers à essence sont progressivement tous équipés du pot catalytique (30% en 1994, 70% en 2000 et 100% en 2010). Enfin la tendance forte d'une diésélisation du parc automobile devrait se poursuivre et nous avons retenu une part de 24% de diesel au sein du trafic des véhicules légers en 1994, 36% en 2000 et 42% en 2010.

Soulignons ici encore que la recherche d'une proximité la plus forte possible avec une réalité existante ou à venir ne nous intéresse guère en elle-même. Travailler sur le cas de Lyon et son agglomération permet de tester dans des situations vraisemblables les différents facteurs qui ont été retenus comme fondamentaux pour comprendre la dynamique des émissions atmosphériques et sonores des véhicules routiers (congestion, mobilité et technologie). Dans le cadre de ce vraisemblable nous ne nous intéressons guère à des niveaux exacts d'émissions mais beaucoup plus à l'impact relatif de ces différents facteurs, les uns par rapport aux autres.

De même, dans notre esprit, l'intérêt de la série d'évaluations qui a été faite dans le cadre de cette partie n'est pas, en soi, de savoir comment évolueraient les émissions atmosphériques et sonores si seul changeait le réseau routier lyonnais. Il est beaucoup plus de se rendre compte de l'importance de l'impact du facteur "évolution du réseau", assimilé ici à une conséquence à long terme de la congestion, relativement aux autres facteurs évoqués : représente-t-il un enjeu direct en matière environnementale ou ne tient-il qu'un rôle secondaire ? La question posée en ces termes reste par contre soumise à la réserve évoquée précédemment des adaptations qu'aurait connu le système si aucun développement viaire n'avait été consenti : nous resterons donc cantonnés aux enjeux directs, sans considération des répercussions en chaîne.

2.2.2. L'impact de l'évolution du réseau sur les vitesses et les itinéraires

a) Configuration du réseau routier et évolution des conditions de circulation

On assiste à une détérioration continue des conditions de circulation malgré les efforts fournis en matière de voirie : de 1994 à 2010, la vitesse moyenne sur le réseau baisse fortement alors que les longueurs augmentent légèrement, se traduisant par une progression de presque 1/3 de la durée moyenne d'un déplacement.

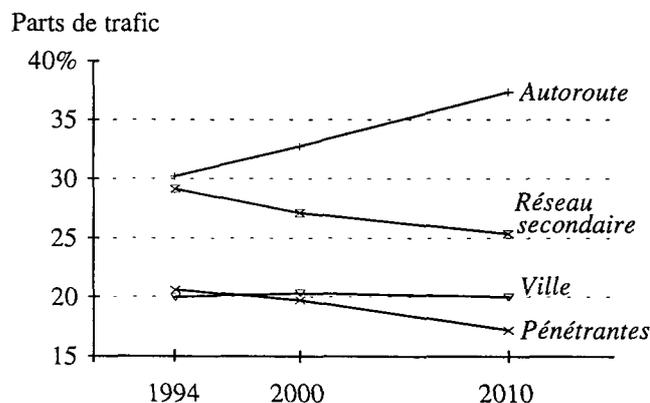
³⁸ *Idem* p. 49.

Tableau 4 : Evolutions des caractéristiques moyennes d'un déplacement entre 1994 et 2010

	Vitesse	Longueur	Durée
1994	34,4	9,6	16,7
2000	29,9	9,5	19,0
2010	28,3	10,0	21,2

L'évolution du réseau a néanmoins un impact important. En effet, lorsqu'on affecte la matrice des déplacements de 1994 sur les réseaux de 1994 puis de 2000 et 2010, on constate une nette amélioration des conditions de circulation avec une vitesse moyenne qui gagne 18% entre le réseau de 1994 à celui de 2010. Par contre la distance moyenne du parcours augmente de 11% ce qui compense l'amélioration des vitesses et conduit à une faible baisse de la durée moyenne des déplacements (-6%). Ce constat peut être reconduit pour les matrices 2000 et 2010 (respectivement +36% et +43% pour la vitesse, +0,5% et +5% pour la distance ainsi que -26,2% et -26,5% pour la durée).

L'amélioration des vitesses peut être en grande partie expliquée par l'évolution de la répartition des trafics sur les différents types de voirie. Le développement du réseau autoroutier (+40% sur 15 ans) conduit à une hausse de 71% du trafic sur ce type de voirie alors qu'au contraire le réseau secondaire stagne (+4,6%) et parvient mal à accueillir le trafic supplémentaire (+21% pour une hausse générale du trafic de 39%)³⁹. En parts relatives de trafic par type de voirie au cours des trois périodes, on obtient le graphique suivant :

Graphique 11 : évolution des parts de trafic suivant les types de voirie

A 1 ou 2% près, cette évolution de la répartition des trafics se retrouve pour chacune des trois matrices de déplacements que l'on affecte successivement aux trois réseaux 1994, 2000 et 2010. Par delà l'impact des volumes globaux de déplacements, qui conduisent malgré tout à une détérioration de la circulation, la configuration des réseaux joue donc un rôle important sur la manière dont se répartissent les flux et permet des

³⁹ Les types de voirie évoqués ici correspondent à des regroupements :

Autoroute = autoroute + CD 300 ;

Réseau secondaire = réseau secondaire + rase campagne ;

Ville = centre ville + VRU + rocade ;

Pénétrantes = pénétrantes.

améliorations sensibles en matière de vitesse et de durée de déplacement - ou plutôt évite des situations encore plus dégradées.

b) Amélioration du réseau routier et allongement de la longueur moyenne des déplacements

Une remarque importante doit être faite à propos des distances parcourues. En effet, tant que l'état de la circulation n'est pas dégradé de manière importante et généralisée, la longueur moyenne des déplacements conditionne largement les nuisances émises, qu'elles soient liées au bruit ou à la pollution atmosphérique.

Or nous avons déjà vu qu'une croissance du nombre de déplacements, à structure des origines-destinations et réseau constant, entraîne une baisse de leur longueur moyenne. Dans le cas présent, des variations du nombre de déplacements autour des hypothèses initiales de mobilité de l'ordre de $\pm 5\%$ pour 2000 ou de $\pm 10\%$ pour 2010 confortent cette première constatation : les longueurs moyennes diminuent respectivement de 4 et 29%.

Lorsque le réseau évolue et se renforce du fait des investissements destinés à résoudre des problèmes actuels ou prévus, on peut constater que cette tendance se confirme. Les améliorations des conditions de circulation sur certains axes amènent une part croissante d'automobilistes à modifier et à allonger leur itinéraire pour bénéficier des gains de temps. Ainsi la longueur moyenne a tendance à progresser lorsque l'on affecte une même matrice de déplacements successivement sur les 3 réseaux, 1994, 2000 et 2010 : entre les deux dates extrêmes cette augmentation est de 11% pour la matrice de 1994, de seulement 0,5% pour 2000 et 5% pour 2010.

Si au lieu de raisonner à matrice constante on tente de prendre en compte l'évolution de la demande de déplacements, au moins trois facteurs nouveaux doivent être considérés pour comprendre l'évolution de la distance moyenne parcourue par déplacement.

- D'une part, du fait de la tendance à l'étalement urbain au cours du temps, la structure des origines et destinations se modifie et conduit à des distances à vol d'oiseau plus longues. Ceci tend à allonger les distances de déplacements.
- D'autre part le nombre de déplacements augmente fortement. Il passe d'une base 100 en 1994 à 117 en 2000 et 133 en 2010. Les améliorations du réseau ne permettent certainement pas d'annihiler les effets de tels surplus et l'on assiste à des mécanismes de reports sur voiries secondaires moins rapides en situation fluide mais intéressantes car offrant des possibilités d'itinéraires plus courts : ceci correspond au mécanisme déjà décrit précédemment. Il contribue à atténuer l'effet de surémissions de polluants atmosphériques liées à une circulation dégradée mais entraîne une diffusion des nuisances sur l'ensemble du territoire.
- Enfin il faut souligner que l'évolution du réseau routier ne se décide pas au hasard. Elle est censée répondre au mieux aux difficultés envisagées à l'horizon choisi et sa conception se base donc sur les matrices de déplacements que nous avons utilisées. Or comme nous allons le voir elle peut avoir des répercussions très différentes sur les distances parcourues en fonction de sa plus ou moins forte cohérence spatiale avec les principales origines et destinations.

L'effet du développement d'un réseau sur les distances parcourues n'a pas un caractère automatique et dépend grandement de ses possibilités d'aménagement. Ainsi à Lyon, on peut constater une contribution différente des évolutions de la voirie entre 1994 et 2000 et entre 2000 et 2010, tant en ce qui concerne les conditions générales de circulation que pour la distance parcourue totale en particulier.

Le réseau routier prévu pour l'an 2000 ne permet pas d'enregistrer de très fortes améliorations des vitesses par rapport à celui de 1994 (+5% avec la matrice des déplacements de 1994, +21% avec celle de 2000 pour laquelle il est prévu, +7% avec celle de 2010). Par contre il a un impact très faible sur l'allongement des distances (+1,6% avec la matrice 1994, +0% avec celle de 2010) et parvient même à les raccourcir de 4,3% sur 2000. Ces performances du réseau routier de 2000 par rapport à celui de 1994 sont liées à une création nette de 30% de voirie urbaine supplémentaire de type VRU ou rocade (171 km en 1994, 220 en 2000), avec notamment la mise en place du Tunnel Nord Périphérique. Ces investissements modifient en profondeur la configuration du réseau et permettent notamment d'améliorer certains itinéraires en centre-ville ou en proche périphérie en évitant des détours importants pour trouver des voiries performantes dans ces espaces denses.

Au contraire les évolutions du réseau routier entre 2000 et 2010 ont un fort impact sur les vitesses (+12% avec les matrices 1994 et 2000 et surtout +34% avec celle de 2010) au prix d'un allongement notable des distances parcourues (+9% avec les déplacements de 1994, +5% avec ceux de 2000 et 2010). En fait, le développement du réseau qui se poursuit après 2000 est moins concentré sur l'agglomération restreinte (+20% de rocades et VRU cependant) et s'opère beaucoup plus en périphérie avec une création envisagée de 108 km de voirie à caractère autoroutier au sein périmètre du Grand Lyon (soit +37%). Ce schéma permet de contenir la dégradation prévisible des vitesses de circulation : les déplacements de 2010 auraient une vitesse moyenne inférieure de 25% s'ils étaient réalisés sur le réseau de 2000 plutôt que sur celui de 2010 ; dans ce qui est effectivement prévu, elles ne baissent que de 5%. Par contre la distance moyenne parcourue par déplacement, à matrice identique, a tendance à s'allonger de manière plus nette qu'au cours de la période précédente. Lorsqu'on ajoute le phénomène de l'étalement urbain (en reprenant les matrices de déplacements affectées sur leur réseau correspondant) cette distance moyenne par déplacement augmente encore légèrement : elle passe ainsi d'une baisse de -1% entre 1994 et 2000 à une hausse de +5,5% entre 2000 et 2010.

2.2.3. Emissions sonores et atmosphériques : des évolutions différentes selon le type de développement du réseau

a) Les conséquences en matière d'émissions de polluants atmosphériques

L'impact de l'évolution du réseau routier sur la longueur moyenne des déplacements a un effet direct sur les évolutions constatées des émissions de polluants atmosphériques

- La matrice des déplacements de 1994 affectée successivement aux réseaux routiers de 1994, 2000 puis 2010 permet de constater une augmentation légère des distances parcourues entre 94 et 2000, beaucoup plus nette avec l'entrée en service des autoroutes périphériques de 2010. Les niveaux d'émissions suivent

la même tendance : faible augmentation au cours de la première période, les polluants les plus sensibles à l'état de la circulation ayant même tendance à baisser du fait de son amélioration ; par contre hausse générale entre 2000 et 2010, allant de 4,4% pour les hydrocarbures à 10,4% pour les NOx.

- La matrice des déplacements de 2000 conduit quant à elle à une baisse des distances parcourues lorsqu'on passe du réseau 94 à celui de 2000 du fait de la configuration de ce dernier et de son adaptation à la demande prévue. Ces distances augmentent à nouveau en 2010, annulant ainsi les effets du réseau 2000. Parallèlement les émissions de polluants atmosphériques baissent nettement dans un premier temps puis remontent légèrement lorsqu'on passe du réseau de 2000 à celui de 2010, exception faite des hydrocarbures et du CO qui bénéficient de l'amélioration de la vitesse moyenne - *a contrario* les émissions de NOx reviennent à leur niveau initial.
- Enfin l'affectation de la matrice de 2010 est tout d'abord marquée par une stabilité de la longueur moyenne des déplacements puis par une augmentation perceptible, de l'ordre de 5%. L'amélioration régulière des conditions de circulation entre les trois réseaux, les bonnes performances générales du réseau de 2000 en matière d'itinéraires ainsi que la cohérence, malgré tout, du réseau 2010 avec les déplacements prévus pour cette date conduit à une baisse lente mais continue des niveaux d'émissions (plus forte pour CO et hydrocarbures, quasi stabilité pour le NOx).

L'ensemble de ces remarques peut être retrouvé de manière chiffrée à l'aide des tableaux ci-dessous :

Tableau 5 : Effets de l'évolution du réseau routier sur les émissions de polluants atmosphériques (à matrice de déplacements constante).

Déplacements de 1994 - parc 1994 -

Réseaux	Longueur moyenne par déplacement	SO2	NOx	Poussières	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
1994	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2000	101.6	100.5	101.9	100.1	99.7	100.6	98.9	100.4
2010	111.0	108.6	112.6	107.7	106.7	108.9	103.2	108.6

Déplacements de 2000 - parc 2000 -

Réseaux	Longueur moyenne par déplacement	SO2	NOx	Poussières	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
1994	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2000	95.7	90.6	95.0	90.1	88.6	91.0	87.4	90.5
2010	100.5	91.3	100.2	91.6	86.8	92.0	83.4	91.2

Déplacements de 2010 - parc 2010 -

Réseaux	Longueur moyenne par déplacement	SO ₂	NO _x	Poussières	CO	CO ₂	Hydrocarbure	Plomb
1994	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	-
2000	100.0	96.4	98.5	95.7	95.1	96.6	94.6	-
2010	105.3	91.9	99.2	92.3	86.8	92.8	84.4	-

La lecture de ces tableaux permet également de souligner l'impact nettement différencié de l'évolution du réseau sur les divers types de polluants atmosphériques. En effet, comme nous avons pu le voir au cours de la partie précédente, les polluants sont plus ou moins sensibles à l'état de la circulation et le même constat peut être tiré ici. Les améliorations apportées en matière de fluidité du trafic bénéficient fortement aux émissions de CO et d'hydrocarbures ainsi que de manière sensible à celles de CO₂, de soufre, de poussières et de plomb. Par contre elles n'affectent pas, ou peu, les émissions de NO_x.

b) Les conséquences en matière d'émissions sonores

Comme dans le cas des émissions de polluants atmosphériques, les émissions sonores sont liées à la distance moyenne parcourue par les véhicules. Cependant, du fait de leur caractère de proximité, il est également intéressant de s'interroger sur les conséquences de la diffusion ou de la concentration relative des flux sur le réseau routier.

Ainsi est-il important de souligner que quelle que soit la matrice utilisée, la version 2000 du réseau routier lyonnais a surtout tendance à soulager le réseau secondaire et dans une moindre mesure les pénétrantes en concentrant les flux sur les voies rapides urbaines. Les trafics sur autoroute restent globalement stables avec cependant des transferts importants entre les axes, notamment au profit du contournement Est (CD 300). Pour 2010 le phénomène se poursuit avec une concentration qui se réalise très fortement sur le réseau autoroutier.

En terme d'émissions sonores la concentration des trafics sur les axes rapides que favorise le développement du réseau routier tend tout à la fois à élargir les zones calmes desservies par le réseau secondaire et à développer les points noirs situés en proximité d'axes lourds. Entre les réseaux de 1994 et 2010, la longueur des tronçons très silencieux (<50 dB sur notre échelle, toute relative) a tendance à diminuer. Par contre les kilomètres de voirie pour lesquelles le niveau sonore est compris entre 50 et 55 dB progressent de 65 à 165% suivant la matrice de déplacements de référence. A l'autre extrême, en l'absence de prise en compte de la circulation des poids-lourds, aucun point noir supérieur à 75 dB n'apparaît et les progressions s'enregistrent sur le créneau des 70-75 dB (de +18 à +30% suivant la matrice de déplacements).

Les classes intermédiaires de 60-65 dB et 65-70 dB varient elles-aussi avec l'évolution du réseau et représentent entre 50 et 75% de la voirie suivant les cas. Une ligne de démarcation s'établit cependant entre ces deux classes, très nette avec les matrices de déplacements de 2000 et 2010. La classe des 60-65 dB a tendance à bénéficier des reports d'itinéraires et croît légèrement avec le développement du réseau. Par contre celle des 65-70 dB se réduit nettement, tant du fait de certains tronçons dont le trafic s'allège et qui basculent en 60-65 dB que du fait de ceux dont le trafic s'accroît et pour lesquels le niveau sonore augmente.

Si l'on cherche maintenant à souligner plus précisément l'impact de chaque version du réseau routier lyonnais, on peut d'abord constater que celle de 2000, en réduisant les distances parcourues, permet d'augmenter le nombre de tronçons peu bruyants sans transferts vers les classes à niveau sonore élevé. La situation s'améliore donc nettement entre les réseaux de 1994 et 2000 à matrice de déplacements constante, notamment pour celles de 2000 et 2010.

Le bilan du développement autoroutier de 2010 est plus mitigé car si il permet de soulager le réseau secondaire, l'allongement des distances moyennes parcourues ainsi que la forte concentration des trafics sur certains axes rapides conduisent à une augmentation nette de la longueur de voirie à plus de 70 dB. La lutte contre le bruit est sans doute plus facile sur ces quelques axes lourds que sur l'ensemble de la voirie. Par contre les effets de gêne et de coupure dont le bruit témoigne restent quant à eux importants malgré un changement de nature, plus concentrés, moins diffus.

La plupart de ces commentaires peuvent s'illustrer par les chiffres fournis ci-dessous, des données plus précises figurant en annexe III, §3.3. :

Tableau 6 : Effets de l'évolution du réseau routier sur les émissions sonores (à matrice de déplacements constante).

Déplacements de 1994

	1994 (Km)	1994 (base 100)	2000	2010
<i>L</i> <60	387	100.0	110.8	114.2
60≤ <i>L</i> <65	453	100.0	102.5	107.1
65≤ <i>L</i> <70	174	100.0	81.2	109.1
<i>L</i> >70	109	100.0	111.3	129.4

Déplacements de 2000

	1994 (Km)	1994 (base 100)	2000	2010
<i>L</i> <60	245	100.0	137.5	153.0
60≤ <i>L</i> <65	513	100.0	96.8	103.5
65≤ <i>L</i> <70	246	100.0	82.1	85.8
<i>L</i> >70	120	100.0	101.3	118.0

Déplacements de 2010

	1994 (Km)	1994 (base 100)	2000	2010
<i>L</i> <60	165	100.0	124.6	169.1
60≤ <i>L</i> <65	507	100.0	103.8	113.2
65≤ <i>L</i> <70	340	100.0	91.7	76.7
<i>L</i> >70	111	100.0	101.4	129.5

2.3. Synthèse

Nous avons vu que la congestion, qui correspond d'abord à un phénomène interne au système de transport dont les coûts se mesurent en terme de temps perdu et d'imprévisibilité du temps de parcours, peut également avoir des répercussions plus large à travers d'éventuelles adaptations temporelles et spatiales des activités économiques et sociales. Nous avons repris ici deux représentations du phénomène. La première, qui traduit une vision directe et immédiate de la congestion, a consisté à simuler une augmentation progressivement du nombre de déplacements, toutes choses égales par ailleurs. La seconde, plus indirecte et à long terme, revient à considérer que l'évolution d'un réseau routier est le fruit des prévisions de mobilité automobile et résulte donc de la "pression", actuelle ou prévue, exercée par la congestion sur ce réseau. Ces deux représentations sont loin de couvrir l'ensemble des phénomènes liés à la congestion évoqués en première partie, tels que le développement urbain ou l'étalement des heures de pointe. Elles n'ont donc permis d'établir que des conclusions partielles sur les conséquences de la congestion sur les émissions atmosphériques et sonore du trafic routier.

Les conséquences d'une simple croissance du nombre de déplacements, toutes choses égales par ailleurs, s'enchaînent en deux temps principaux :

- D'une part l'altération des vitesses entraîne de fortes variations des nuisances par véhicule.kilomètre. Il y a surconsommation d'énergie et surémission de polluants atmosphériques. Par contre les émissions sonores, qui sont en partie liées positivement à la vitesse, se trouvent amoindries.
- D'autre part l'adaptation des automobilistes face à une situation d'engorgement se traduit par une redistribution à la fois temporelle et spatiale des flux sur la voirie. Nous ne nous sommes intéressés ici qu'à l'aspect spatial. La recherche d'itinéraires moins encombrés amène les automobilistes à éviter les axes lourds surchargés et à envahir les voiries secondaires. Ce phénomène va avoir une double conséquence. Tout d'abord les distances parcourues par déplacement ont légèrement tendance à baisser entraînant, globalement, une baisse du nombre total de véhicules.kilomètres et donc des nuisances qui y sont liées. Par contre cette redistribution a tendance à disperser les nuisances sur un territoire plus vaste au lieu de les laisser concentrées en certains points noirs bien localisés.

Ainsi la dégradation des conditions de circulation aboutit à des tendances contradictoires, la redistribution des flux permettant d'atténuer la hausse globale des émissions de polluants atmosphériques mais entraînant du même coup une dégradation du cadre de vie sur une échelle beaucoup plus vaste. Les atteintes à l'environnement s'exerçant à un niveau régional ou global (smogs, pluies acides, effet de serre) se trouvent peu modifiées par ce mécanisme car les émissions polluantes qui en sont à l'origine ne se trouvent en fait que peu affectées par la congestion elle-même - exception faite des hydrocarbures. Ce sont essentiellement les nuisances de proximité telles que le bruit, les émissions de CO ou les effets locaux et immédiats des autres polluants atmosphériques qui se trouvent modifiées en étant réparties de manière plus uniforme que si il n'y avait pas de congestion (à nombre de déplacements et structure des origines et destinations identiques).

A plus long terme l'impact de la congestion sur l'évolution du réseau peut avoir des conséquences différentes sur les émissions atmosphériques et sonores du trafic selon les réaménagements proposés. Les résultats dépendent en fait beaucoup des types de

réaffectation d'itinéraires que la nouvelle configuration du réseau permet et notamment de l'allongement éventuel des distances moyennes parcourues qu'elle entraîne.

Ainsi, les forts investissements en matière de voirie urbaine prévus entre 1994 et 2000 (voies rapides urbaines, avec notamment l'entrée en service du Tunnel Nord Périphérique) n'affectent pas ou très peu la longueur moyenne des déplacements tout en évitant une dégradation trop forte des conditions de circulation. Ils permettent ainsi de contenir la progression des émissions de polluants atmosphériques, notamment ceux qui sont le plus sensible aux variations de la vitesse moyenne sur le réseau, et contribuent à améliorer l'environnement sonore du réseau (l'amélioration est sensible entre 1994 et 2000 avec une matrice des déplacements constante).

L'évolution du réseau envisagée entre 2000 et 2010 est plus concentrée sur un développement des autoroutes en périphérie. Ceci évite une baisse trop forte de la vitesse moyenne sur le réseau mais conduit par contre à un allongement sensible des distances parcourues par déplacement du fait des détours nécessaires pour bénéficier des avantages de temps de parcours. Le bilan environnemental est donc plus mitigé. Le fait d'éviter une dégradation trop sensible des conditions de circulation permet aux émissions de polluants atmosphériques de diminuer. Cette diminution est cependant moins forte entre 2000 et 2010 qu'entre 1994 et 2000 à matrice constante ; la simulation avec la matrice de 1994, pour laquelle l'effet lié à l'état de la circulation est moins fort entre les versions 2000 et 2010 du réseau, conduit même à une augmentation de ces émissions. En matière d'émissions sonore, la concentration des flux que favorise le schéma autoroutier permet, comme en 2000, une extension des zones calmes. Par contre cette même concentration, renforcée par l'augmentation du trafic provoquée par la variation des distances parcourues, conduit également à un renforcement des points noirs.

3. Conclusion

Ce chapitre consacré au thème de la congestion a permis de montrer que si ce phénomène peut être considéré comme un coût externe, au sens traditionnel d'une liaison hors marché affectant négativement les fonctions d'utilité de ceux qui en subissent les conséquences, il est par contre difficile d'en prendre la mesure. D'une part ses effets se font sentir à plusieurs niveaux différents : individus, tronçons de voirie, réseau routier, agglomération. D'autre part on peut distinguer ceux qui participent directement de l'aspect "gestion du temps" des automobilistes par rapport à ceux qui découlent de ces effets premiers et dont nous avons principalement retenu les aspects environnement et cadre de vie à travers les pollutions atmosphériques et sonores. Enfin tous ces effets ne convergent pas et peuvent même s'opposer d'un niveau à l'autre. Un tableau peut rapidement synthétiser les différents points abordés à ce propos (Cf. page suivante).

La première partie avait également été l'occasion d'aborder la question d'une tarification de l'usage de la route prenant en compte le mieux possible les coûts générés. Sans revenir sur les problèmes de redistribution qui ont été évoqués il nous semble important de ne pas surestimer les effets néfastes de la congestion sur l'environnement. En effet, si l'on retient seulement le fait que "les coûts externes unitaires sont très sensibles au phénomène de congestion" on a alors tendance, dans le cadre de ce débat sur la prise en compte des coûts de la route, à défendre un "système de tarification passible d'une

différenciation temporelle et spatiale⁴⁰ qui risquerait d'avoir des effets contraires à ceux attendus.

Une partie des déplacements pourrait bien se détourner sur d'autres heures, ce qui ne diminue pas le trafic en terme de distance parcourue totale, ou sur d'autres lieux en périphérie, ce qui risque de l'augmenter - sans tenir compte de l'éventualité de l'arrivée de nouveaux déplacements pour lesquels la valeur du temps économisé est plus forte que le prix du péage, limitant ainsi la baisse attendu du trafic en centre ville. Or, nous l'avons vu, si la congestion étale et redistribue les émissions polluantes et sonores, c'est d'abord le niveau global du trafic qui en fixe le niveau. Un péage d'accès à une zone, à lui seul, a de fortes chances de modifier la donne en matière d'environnement et de cadre de vie d'une agglomération, cela ne signifie par contre pas qu'il entraînerait une amélioration. Au cas où un tel péage devrait voir le jour, il faudrait probablement développer un système de transports alternatifs performant pour le rendre cohérent avec un objectif environnemental. On retrouve ici une convergence sur les moyens de dépasser les problèmes de redistribution et environnementaux posés par l'éventualité d'un péage d'accès aux centres urbains.

Tableau 7 : les divergences suivant les niveaux d'observation des effets de la congestion

	Relations temporelles	Conséquences environnementales
Individuel (conducteur ou véhicule)	Baisse des vitesses, Temps perdu.	Hausse des émissions atmosphériques Baisse des émissions sonores.
Arc	Courbe débit-vitesse : - régime laminaire, - puis régime forcé.	Hausse générale du niveau des nuisances (possibilité de tassement, voire de baisse en régime forcé).
Réseau	Réaffectation des itinéraires : - baisse des distances moyennes parcourues ; - diffusion des trafics sur tout le réseau.	Niveau d'émissions atmosphériques légèrement plus important ; Pointes de niveaux sonores beaucoup moins élevées ; Diffusion des nuisances sur tout le réseau ⇒ lien fort entre congestion et nuisances de proximité.
Agglomération	Réaménagement des horaires, écrêtement de l'heure de pointe. Réaménagement des origines et des destinations. A long terme : - concentration des activités et intensification de l'usage des sols - meilleur efficacité des transports publics.	A terme, le bilan de la congestion ne pourrait-il pas être positif du point de vue environnemental - surtout pour les pollutions globales et régionales ? Cf. graphique de Newman et Kenworthy.

⁴⁰ Pour les deux citations, Cf. p. 29 de Commissariat Général du Plan (Groupe présidé par Alain BONNAFOUS), *Transports : pour une cohérence stratégique*. Paris : CGP, septembre 1993. 189 p.

Enfin il convient d'insister sur le fait que ce bilan mitigé de la congestion par rapport au critère "environnement et cadre de vie" ne permet pas une recherche tous azimuts de la fluidité du trafic. En effet, la cause première des nuisances routières reste d'abord et avant tout le nombre total de kilomètres parcourus par l'ensemble des véhicules sur le périmètre ou le réseau considéré. Les mesures de lutte contre les encombrements qui ne visent pas, en même temps, à réduire le trafic routier (soit par une baisse du nombre de déplacements, soit par une diminution de leur longueur moyenne) conduisent, au regard de ce seul critère, à une détérioration de la situation.

Ainsi en est-il des investissements dans de nouvelles infrastructures ou des améliorations de la voirie existante. Le bilan environnemental des investissements routiers effectués sur le réseau routier lyonnais entre 1994 et 2000 est relativement bon car il permet de contenir - voire de baisser - les distances parcourues tout en évitant une trop forte dégradation des conditions de circulation ; celui de 2000-2010, basé sur le développement d'autoroutes en périphérie, est beaucoup plus mitigé car la baisse de vitesse moyenne qu'il évite se trouve compensée par un allongement significatif des itinéraires empruntés. On peut souligner également l'impact que peuvent avoir ces évolutions du réseau en matière de nuisances de proximité du fait de la diffusion ou concentration relative des flux auxquelles elles conduisent.

La réflexion sur la difficile mise en balance, d'un point de vue environnement et cadre de vie, entre fluidité de la circulation et niveau global du trafic peut être reconduite à propos des plans de feux gérés en "temps réel" et des diverses Technologies de Transport Avancées ou "TTA" : à court terme, leur effet va être amoindri par l'allongement des distances de déplacements qu'elles vont provoquer ; à long terme, le trafic induit par ces nouvelles potentialités de circulation va ramener le niveau de congestion à son état initial avec cependant un nombre accru de véhicules.kilomètres parcourus⁴¹.

Dans ces conditions, si le niveau de nuisances ne s'aggrave pas, c'est qu'entre-temps les progrès technologiques ont rendu les véhicules plus performants dans ce domaine. Ainsi, jusqu'à présent, la lutte contre la congestion n'a pu se justifier que pour pallier aux dysfonctionnements internes du système de transport en tablant sur les progrès technologiques pour éviter l'apparition de contradictions entre mobilité automobile et environnement. Pour l'avenir, la montée des exigences environnementales, tant locales que globales, tend à accélérer le processus d'amélioration technologique des véhicules routiers. La question est de savoir si ces améliorations permettront de contrebalancer suffisamment

⁴¹ Par exemple, les TTA sont souvent censées remédier tout à la fois aux problèmes de congestion, d'insécurité routière et de pollution atmosphérique et sonore : "The fully automated control of vehicles (...) offers the potential for substantial improvements in highway safety, trip predictability, level of service, operation in inclement weather, mobility and air quality." Cf. p. 5 de : "Government Announces Partnership For Automated Highway System", *ITS Review*, University of California, Vol. 18, n°1, novembre 1994. pp. 4-5.

Nous préférons ici un discours plus nuancé quant aux conséquences environnementales de ces technologies si elles sont utilisées dans le but d'augmenter la capacité de la voirie existante par 2 ou par 3 comme dans le cas du programme PATH évoqué précédemment ("The DOT estimated that a dedicated AHS [Automated Highway System] lane can double or triple the flow rate (in vehicle per hour) of a manual lane, even in adverse weather conditions". *Ibid.*). En effet, "il est très difficile d'évaluer les bénéfices pour l'environnement de ces innovations qui peuvent à long terme favoriser une augmentation continue de la mobilité motorisée". Cf. p. 12 de LAMURE Claude André, "Transport et environnement dans les grandes villes du monde", *TEC* n°123, *Op. Cit.*

les effets d'une hausse des flux pour satisfaire à la montée des exigences environnementales. Nous tenterons d'y répondre en partie dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 5 :
EVOLUTION DE LA MOBILITE
***VERSUS* PROGRES TECHNOLOGIQUE**

Le chapitre 2 a permis de prendre mesures des nuisances liées à la pollution sonore et atmosphérique du trafic routier urbain, avec un regard privilégiant l'approche économique d'évaluation des coûts externes qui s'y rattachent. Le chapitre suivant a été l'occasion de montrer quelles étaient les limites de nos connaissances qui fragilisent le plus les bilans établis directement à partir de données de trafic. Il a permis également de poser les bases méthodologiques de calcul de l'impact relatif des principaux paramètres du trafic qui se trouvent impliqués de manière directe ou indirecte dans la génération des pollutions atmosphériques et sonores des véhicules : poids de la congestion et de la dégradation des conditions de circulation, évolution de la mobilité automobile et renouvellement technologique au sein du trafic. Un chapitre complet vient d'être consacré à la question de la congestion, il nous reste donc à opposer les deux facteurs restants puisque *a priori* leurs effets devraient être largement antagoniques dans les prochaines années.

D'un côté, la hausse globale du nombre total de kilomètres parcourus par les automobiles en agglomération devrait conduire à une dégradation en matière d'environnement et de cadre de vie urbain. Un certain nombre de facteurs contribue à cette croissance du trafic avec notamment l'augmentation du nombre de déplacements automobile par personne et par jour ainsi qu'une tendance à leur allongement liée à une croissance plus forte en périphérie qu'en centre d'agglomération.

On peut par contre souligner le fait que la détérioration des conditions de circulation pousse, à court comme à long terme, à une réduction des distances parcourues : à court terme par adaptation des itinéraires et abandon des détours par les axes plus rapides dont les vitesses se détériorent relativement plus vite que sur le reste de la voirie ; à long terme par adaptation des localisations et optimisation de l'usage de l'espace. Cependant cette tendance se trouve elle-même combattue par le développement du réseau routier qui permet d'éviter des niveaux de congestion estimés socialement et économiquement trop coûteux. Les itinéraires ne sont dès lors pas forcément révisés en faveur d'une baisse des distances parcourues et, sur le long terme, on assiste à un étalement progressif de la ville que l'amélioration du réseau favorise.

De l'autre côté les progrès technologiques permettent de compenser les conséquences environnementales auxquelles conduit cette augmentation globale du trafic, au moins sur les grands indicateurs à l'ordre du jour à une époque donnée. Cependant ces progrès n'ont pas forcément un impact immédiat car leur introduction se fait le plus souvent en suivant le rythme de renouvellement du parc automobile. De plus ils peuvent apparaître extrêmement diversifiés, notamment à une époque comme la nôtre où la sensibilité croissante en faveur de l'environnement conduit à un foisonnement des réponses technologiques, plus ou moins pertinentes du triple point de vue de l'environnement et des contraintes économique et sociale qu'elles doivent respecter pour dépasser un éphémère succès médiatique. Enfin le développement de ces technologies ne doit pas se mesurer en terme de proportion du parc de véhicules mais en proportion du trafic total. Un exemple

simple concerne la technologie traditionnelle du diesel qui, avec sa banalisation au sein du parc, tend à connaître un usage qui se rapproche de celui de l'essence, tout au moins en milieu urbain.

Ainsi, croissance de la mobilité automobile *versus* améliorations technologiques, les termes de l'équation sont trop mouvants pour que l'on puisse espérer établir une prévision définitive sur l'évolution des émissions atmosphériques et sonores du trafic routier urbain. C'est donc à partir de la logique esquissée depuis le chapitre 3 que nous tenterons d'établir une mesure du poids relatif de chaque facteur plutôt que de déterminer des niveaux absolus dont la validité des valeurs ne peut guère être contrôlée. La question de l'évolution des émissions étant conditionnée par ces valeurs relatives, ce n'est qu'à travers leur estimation que l'on pourra non pas y répondre mais tout au moins en discuter certaines des réponses possibles.

Cependant avant de passer à cette partie qui reprend les éléments de la méthode présentée au cours des deux précédents chapitres, un exposé général va être consacré aux questions d'évolution de la mobilité urbaine d'une part et du renouvellement technologique d'autre part. Ceci permettra tout à la fois de fournir un cadre général à la réflexion, d'aboutir aux hypothèses retenues pour les calculs et d'en mesurer les limites comme les enjeux.

1. L'évolution de la mobilité

Cette première partie est destinée à situer le contexte général au sein duquel les hypothèses d'évolution des déplacements routiers dans l'agglomération lyonnaise aux horizons 2000 et 2010 ont été établies. L'exercice de prospective, qui consiste à observer les tendances passées pour délimiter les futures possibles¹, nécessite en effet de ne pas s'arrêter à ces seules hypothèses et d'observer les grandes évolutions liées à la mobilité de manière suffisamment globale pour en cerner les principaux enjeux perceptibles aujourd'hui.

Les prévisions retenues ne prennent pas en compte l'ensemble des principaux facteurs économiques, socio-démographiques et spatiaux susceptibles d'évoluer et d'affecter les trafics routiers. Cependant, même si elles s'arrêtent à une unique alternative, elles n'en dessinent pas moins un futur suffisamment vraisemblable pour fournir un cadre cohérent pour notre exercice. En effet celui-ci ne consiste pas, rappelons le, à établir une prévision des nuisances atmosphériques et sonores aux horizons 2000 et 2010. Il vise à donner une idée du poids relatif des deux facteurs que sont le renouvellement technologique du parc automobile et la progression de la mobilité automobile. Ceci est

¹ "La prospective est bien en effet une manière - un art, dans les meilleurs des cas - de regarder à la fois au loin et de loin une situation donnée ou un problème déterminé. Au loin, en s'efforçant de conjecturer ses devenir possibles ou probables. Mais aussi de loin, en prenant tous les reculs du temps : recul rétrospectif, qui contraint à mémoriser l'histoire dont cette situation ou ce problème sont les produits actuels ; distance anticipatrice, qui conduit à les considérer à partir de leurs avenir possibles". Cf. p. 24 de DECOUFLE André Clément, "Prévision et prospective" in DECOUFLE André Clément (sous la direction de), *Traité élémentaire de prévision et de prospective*. Paris : PUF, 1978. 432 p. pp. 21-41.

obtenu à travers une série de simulations dont les hypothèses varient de manière maîtrisée, permettant ainsi de comparer leurs résultats entre eux.

1.1. Présentation générale : définitions et principaux chiffres

Une première définition, stricte, de la mobilité d'une personne correspond à son nombre de déplacements journaliers². Cependant la notion de mobilité est souvent établie sur une conception beaucoup plus large faisant intervenir les espaces concernés par les déplacements, les rapports sociaux entretenus par la personne, avec notamment les contraintes et les rythmes qu'ils impliquent, ainsi que sa manière d'user du système de transport. Pour être opérationnelle, cette vision élargie se base sur le choix d'une batterie d'indicateurs représentatifs des problèmes jugés importants sur la période.

On peut reprendre par exemple la série de traits caractéristiques de l'évolution de la mobilité dans les grandes agglomérations entre 1975 et 1990 retenue par J.P. Orfeuill, classées en nombre de déplacements par mode, motifs, zones géographiques et descriptifs physiques³.

On constate ainsi que si entre ces deux dates le nombre de déplacements par jour reste à peu près constant (3,2 en province, 3,5 en Ile-de-France⁴), la répartition modale a par contre fortement évolué. En province l'automobile a connu une progression très nette (40% des déplacements sur les enquêtes de 1976-80, 56% pour la période 1985-92), les transports collectifs se sont maintenus à 10-11% tandis que les modes de proximité ont fortement chuté, les deux-roues passant de 9 à 4% et la marche à pied de 41 à 29%. En Ile-de-France les mouvements sont identiques avec dès le départ une part modale plus favorable aux TC (20%) au détriment de l'automobile, qui ne passe "que" de 32 à 43%.

Au niveau des motifs, la structure des déplacements reste globalement stable, même si on peut observer une légère baisse du domicile-travail, du fait notamment de l'abandon des retours à domicile pour midi et du frein constitué par l'augmentation du

² "On appelle mobilité le nombre moyen de déplacements fait dans une journée par un habitant d'une agglomération (un aller-retour fait deux déplacements)". Cf. p. 23 de CETUR, *10 ans de mobilité urbaine - Les années 80*. Bagneux, CETUR, Novembre 1990. 86 p.

Une telle approche, pour être opérationnelle et permettre des comparaisons géographiques et intertemporelles, nécessite une définition précise de l'unité de temps retenue et du "déplacement" lui-même. Ainsi la première se définit souvent par le Jour Ouvrable Banalisé (JOB) et le second comme "l'action, pour une personne, de se rendre d'un lieu à un autre pour y réaliser une activité, en utilisant un ou plusieurs modes de transports". Cf. p. 71 de ORFEUIL Jean-Pierre, TROULAY Patrick, "Les déplacements dans le cadre habituel", pp. 71-84 in INRETS, *Un milliard de déplacements par semaine - La mobilité des français*. Paris : La Documentation Française, 1989. 293 p.

³ Cf. pp. 42-44 de ORFEUIL Jean-Pierre, *Je suis l'automobile*. La Tour d'Aigue : Editions de l'aube, 1994. 88 p.

⁴ Les chiffres fournis ici proviennent des résultats de base des enquêtes ménages du Cetur pour la province et des "enquêtes globales de transport" pour l'Ile-de-France. La "province" correspond ici aux villes de Lille (enquêtes en 1976 et 1987), Lyon (1976, 1985), Marseille (1976, 1988), Nancy (1976, 1991), Toulouse (1977, 1990), Bordeaux (1978, 1990), Grenoble (1978, 1985, 1992), Amiens (1979, 1991) et Nantes (1980, 1989). On en trouve un condensé dans MINVIELLE Erwann, "La mobilité des personnes en milieu urbain", *Note de Synthèse OEST*, juillet-août 1994. 6 p.

chômage. Cette baisse s'effectue au profit des déplacements pour autres motifs (loisirs et école notamment)⁵.

Du point de vue géographique, les déplacements à l'intérieur et en direction des centres-villes ont progressé beaucoup moins vite que ceux effectués en périphérie, lieu où l'automobile devient un moyen de transport privilégié. Les caractéristiques physiques de la mobilité reflètent en partie ces évolutions : le temps quotidien de déplacement reste stable, autour de 1h10 en région parisienne, autour de 50 mn dans les villes de province enquêtées et, en tout cas, varient beaucoup moins vite que les vitesses et les distances parcourues qui augmentent fortement (+75% en moyenne avec une progression de 90% pour les distances VP et de 60% pour celles des transports collectifs⁶).

Cependant, tous ces chiffres liés aux indicateurs retenus ne présentent vraiment d'intérêt qu'à travers les enjeux de société que l'on estime importants et pour lesquels l'évolution de la mobilité sert de témoin. Trois grands thèmes sont, nous semble-t-il, plus particulièrement privilégiés aujourd'hui. Notons tout de suite qu'ils ne relèvent pas d'une tentative de recensement exhaustif et qu'ils apparaissent beaucoup plus complémentaires qu'exclusifs les uns des autres :

- le premier est relatif au lien positif entre croissance économique, taux de motorisation et évolution de l'usage de l'automobile, une telle dynamique étant appelée à terme à se contredire et à affecter un développement économique harmonieux du fait des problèmes de congestion et de nuisances auxquels elle conduit ;
- le second consiste à se pencher de manière plus fine sur l'évolution des modes de vie et de la démographie ; il peut permettre d'enrichir les résultats du premier thème comme il peut aussi constituer une source de questionnements à part entière, l'aspect économique devenant un facteur d'évolution des modes de vie parmi d'autres ;
- enfin le troisième relève de l'interaction entre espace et modes de transport, sachant qu'en milieu urbain la grande tendance est à l'étalement de la ville conduisant au et permis par le développement de l'automobile.

On le voit, parmi ces trois grandes manières d'aborder les questions de mobilité, la croissance de l'usage quotidien de l'automobile reste un thème central. Nous allons maintenant reprendre ces trois points de vue de manière plus détaillée afin d'illustrer les grands chiffres présentés plus haut. Ils permettront également de mieux saisir les points forts et les limites des hypothèses qui ont été posées par le CETE de Lyon pour établir les prévisions de déplacements automobiles sur l'agglomération lyonnaise aux horizons 2000 et 2010, hypothèses qui ont été reprises dans ce travail.

⁵ *Idem* p. 4. Remarquons cependant que cette tendance "moins de travail, plus d'autres motifs" est plus nette en Ile-de-France qu'en province pour les enquêtes ménages s'étalant de 1976 à 1992.

⁶ Ces chiffres sur l'évolution des distances sont établis sur la base de panels de l'INRETS, des enquêtes de conjoncture de l'INSEE et des comptes transport par BIEBER Alain, MASSOT Marie-Hélène, ORFEUIL Jean-Pierre, *Questions vives pour une prospective de la mobilité quotidienne*. Arcueil : Synthèse INRETS n°19, janvier 1993. 76 p. Cités p. 32.

1.2. Mobilité et croissance économique

Si la mobilité mesurée en nombre moyen de déplacements par jour et par personne reste stable depuis les années 70, nous avons vu par contre qu'il existe de fortes variations entre les modes utilisés avec notamment une progression très nette de l'automobile. Une première analyse consiste à observer que cette progression semble très nettement liée à la croissance économique, et ce à un niveau macro-économique très large.

Ainsi, lorsqu'on se penche sur l'évolution du nombre de déplacements effectués en automobile par l'ensemble de la population des pays européens, on s'aperçoit qu'il a progressé de plus de 60% entre 1970 et 1986, pour une hausse identique du revenu moyen des ménages. Il existerait donc une élasticité de long terme proche de 1 entre croissance économique et mobilité VP. De même, lorsque l'on rentre plus dans le détail, on peut montrer que les pays où l'automobile a le moins progressé au cours des années 80 sont ceux qui ont connu une croissance économique ralentie (France, Allemagne, Belgique, Italie et Pays-Bas), alors que le Royaume Uni et le Danemark voyaient la croissance de leur mobilité VP et de leur économie s'accélérer⁷.

Tableau 1 : Evolution du nombre de déplacements automobiles en Europe de 1970 à 1986

	1970 <i>mds de voyageurs</i>	1975 <i>base 100 1970</i>	1980	1986
France	305	123	149	170
Allemagne	351	115	134	145
Belgique	49	116	133	139
Italie	230	121	141	171
Royaume-Uni	267	110	137	168
Pays-Bas	72	131	156	175
Danemark	33	115	115	136
Total	1 307	118	140	161

A partir de Dobias, 1989.

On introduit souvent le taux de motorisation comme un facteur intermédiaire à cette relation entre croissance économique et mobilité automobile. En effet, le niveau de revenu est une condition permissive pour l'accession à l'automobile et donc à son usage au détriment des autres modes, permettant également de réaliser des activités sur des espaces élargis.

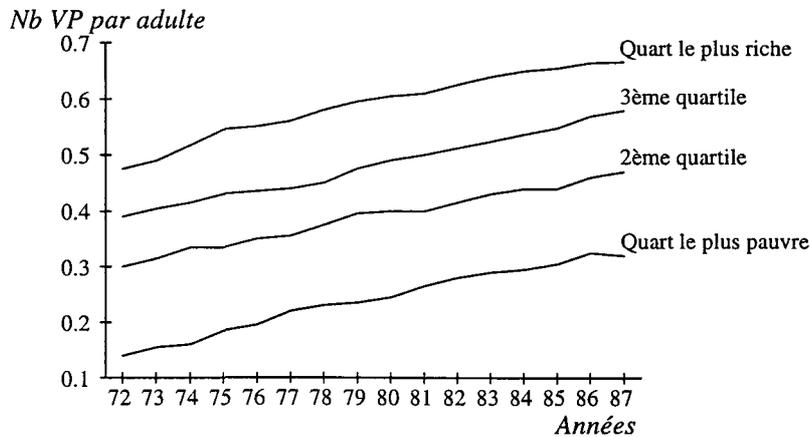
Notons tout d'abord que la relation entre le taux de motorisation et le revenu des ménages est au moins aussi forte que la relation précédente, tant d'un point de vue dynamique que statique. Ainsi la croissance économique, qui assure la croissance des revenus, permet de renouveler et d'augmenter le parc automobile des ménages. De plus, en coupe instantanée, on observe une différenciation nette entre taux de motorisation et niveau de revenu. Madre et Lambert ont très bien exprimé cette double liaison statique et

⁷ Les chiffres fournis sont tirés de DOBIAS G., *Les transports interrégionaux de personnes*. Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1989. 363 p.

L'analyse est quant à elle directement reprise p. 29 à BONNAFOUS Alain, "Structures démographiques et comportements sociaux" in CEMT, *La croissance des transports en question*, Actes du 12^{ème} symposium international sur la théorie et la pratique dans l'économie des transports, Lisbonne, 1992. Paris : Publications de l'OCDE, 1993. 700 p. pp. 21-77.

dynamique en reprenant graphiquement l'évolution du taux de motorisation au cours du temps -et donc de la croissance économique- et en distinguant quatre segments de la population en fonction de ses revenus⁸ :

Graphique 1 : Evolution du nombre de voitures par adulte selon le niveau de revenu



Source : Lambert T., Madre J.L., 1989.

L'introduction de cette variable intermédiaire que constitue le taux de motorisation permet de se poser la question d'un éventuel seuil de saturation : lorsque chaque ménage puis chaque membre du ménage en âge de conduire sera en possession de son propre véhicule, les besoins de déplacements VP ne seront-ils pas plus ou moins couverts ? Si on tient pour acquis que la croissance économique repose sur une croissance des échanges, ceux-ci se réaliseraient dès lors grâce à d'autres modes ou supports - transports collectifs rapides ou télématique par exemple.

Cependant pour répondre à une telle question, il faudrait pouvoir définir quantitativement un seuil. Or ce niveau n'est pas déterminé et l'on peut très bien imaginer une différenciation des véhicules selon leur usage permettant, à la limite, d'aboutir à un nombre d'automobiles supérieur au nombre de personnes susceptibles de conduire. De plus un regard sur le graphique précédent permet de se rendre compte que même en supposant une saturation de l'équipement des plus riches, ce qui n'est pas le cas, de larges progressions pourraient être enregistrées avant que les plus pauvres ne parviennent à leur tour à ce niveau⁹.

Sous-jacent à ce débat sur la progression ou la saturation éventuelle du taux de motorisation se pose le problème de la croissance du trafic automobile, contenue en partie aujourd'hui par un développement économique ralenti, mais qui pourrait repartir brusquement en cas de reprise. Les thèmes de la congestion et des nuisances environnementales du trafic VP risqueraient alors de se retrouver plus que jamais d'actualité, menaçant sous des formes diverses la dynamique qui les aura générés.

⁸ Ce graphique a été établi à partir des enquêtes de conjoncture auprès des ménages de l'INSEE. Cf. p. 27 de MADRE Jean-Loup, LAMBERT Thierry, *Prévisions à long terme du trafic automobile*. Paris : rapport CREDOC n°60, mai 1989. 106 p.

⁹ Voir BONNAFOUS Alain, "Structures démographiques et comportements sociaux" *Op. Cit.* pp. 30-31.

1.3. Mobilité, modes de vie et démographie

Une autre manière d'aborder la question de la mobilité et de son évolution consiste à observer les changements dans les modes de vie ainsi que dans le poids démographique des différentes sous-populations. Notons que cette approche n'est pas exclusive de la précédente et la dimension économique se trouve intégrée dans l'observation des comportements quotidiens de chacun.

Depuis le début des années 70, les mutations qu'a connu la société française ont affecté de manière sensible les mobilités quotidiennes : augmentation du nombre des retraités, jeunesse plus studieuse, femmes plus actives, montée du chômage et passage progressif à la journée continue, mais aussi restructuration des espaces que nous aborderons de manière plus précise dans la partie suivante. Ces grandes tendances peuvent être illustrées par le tableau suivant¹⁰ :

Tableau 2 : Les changements de la démographie française

* : 1988 ; valeurs en million sauf mention contraire.	1970	1990
Population	50,5	56,3
dont - 15 ans	12,6	11,3
15-60 ans	28,8	34,2
+ 60 ans	9,1	10,8
Population active totale	21,4	24,5
dont chômeurs	0,5	2,2
Taux d'activités 15-24 ans H	64%	43%
15-24 ans F	48%	39%
25-49 ans F	49%	72%
60-64 ans H	64%	24%
60-64 ans F	31%	17%
Effectifs écoles et collèges	11,1	10,1*
Baccalauréats délivrés (en milliers)	139	226*
Effectifs enseignement public post-bac	0,8	1,3*

Source : Bieber et alii 1993.

On peut tout d'abord souligner que les adaptations individuelles et collectives face à la crise économique et à la montée du chômage ont largement participé aux évolutions présentées dans ce tableau, en accentuant la tendance à l'allongement de la durée des études chez les 15-24 ans, en contribuant pour partie à la recherche d'un second salaire au sein des ménages et en abaissant l'âge moyen de départ à la retraite.

On assiste à l'émergence d'une "nouvelle phase du cycle de vie : celle des 16-25 ans qui ont quitté l'enfance sans être totalement entrés dans la vie adulte"¹¹. Durant cette période de transition le nombre des petits boulots se multiplie et la durée des études se prolonge : le taux d'activité des 15-24 ans est tombé de 56 à 41% entre 1970 à 1990. Dès lors les jeunes restent plus ou moins dépendants financièrement des ressources de leurs

¹⁰ p. 21 de BIEBER Alain et alii, *Questions vives pour une prospective de la mobilité quotidienne*. Op. Cit.

¹¹ *Idem* p. 20.

parents. L'automobile est utilisée de plus en plus tôt, même si c'est encore souvent celle des parents qui est empruntée pendant les moments où ceux-ci ne s'en servent pas. Mais il faut bien souligner que les limites financières des jeunes de cette classe d'âge ont sans doute joué un rôle significatif dans le maintien de la mobilité TC au cours de ces dernières années¹².

Sur ces 25 dernières années la proportion de femmes actives a considérablement augmenté. Si à la fin des années 60, 30% des emplois étaient tenus par des femmes, la proportion est de 43% en 1990. Ce phénomène a contribué au développement de la seconde voiture au sein des ménages, outil nécessaire à la réalisation de leur nouvelle autonomie. Il a également renforcé la contrainte temporelle du programme d'activités quotidiens des femmes et favorisé une modification des rythmes d'activité, tant dans le monde du travail qu'au sein du ménage : développement du travail à temps partiel (moins fort cependant en France que dans le reste de l'Europe) permettant aux femmes de continuer à s'occuper des tâches familiales et notamment la garde des enfants ; difficultés par contre pour préparer le déjeuner à domicile et renforcement de la journée continue ; gestion temporelle et spatiale différente des activités semi-contraintes du ménage comme les achats par exemple. L'ensemble de ces évolutions a eu des conséquences qui se compensent entre elles au niveau du nombre moyen de déplacements au sein des ménages. Par contre "cette égalité porte en germe celle de l'égalité d'accès à l'automobile, donc à la bimotorisation qui est en France la plus élevée d'Europe"¹³.

Un troisième mouvement socio-démographique important réside dans le poids croissant des retraités au sein de la population. Avec l'augmentation de l'espérance de vie ainsi que la baisse moyenne de départ à la retraite, l'amplitude de cette période s'est considérablement allongée et est équivalente aujourd'hui à plus de la moitié de la durée de la vie active¹⁴. Une telle durée ne peut que couvrir des situations très diverses. D'une part le niveau de vie de cette catégorie de population s'est nettement amélioré au cours des 20 dernières années, la libérant en partie d'une contrainte financière qui restreignait auparavant les choix d'emploi du temps et de mode de vie ; d'autre part il existe des différences très nettes, liées au sexe, à l'origine sociale et au passé professionnel, à l'intégrité physique

¹² A travers les analyses qu'elle mène sur les résultats des Enquêtes INSEE de Conjoncture auprès des Ménages, Caroline Gallez note par exemple qu'au cours des années 90 le taux d'utilisation de la seconde voiture du ménage par les jeunes a tendance à augmenter : les fils, fille, gendre et belle-fille étaient utilisateur principal de la seconde voiture du ménage dans 12,5% des cas en 1989, dans 15% des cas 3 ans plus tard en 1992. De plus elle signale un "point de rebroussement" dans le taux d'équipement des générations de ménage dont le chef est né après 1945, inflexion particulièrement nette pour ceux nés après 1960 : "il nous semblerait vraisemblable d'y voir un impact des difficultés actuellement éprouvées par les jeunes ménages, plus durement touchés par le chômage et la précarité des emplois, et parmi lesquels se dénombrent de moins en moins de couples". Cf. p. 163 et pp. 170-172 de GALLEZ Caroline, *Modèles de projection à long terme de la structure du parc et du marché de l'automobile*. Paris : Université Paris I, Thèse de doctorat en Sciences Economiques, 1994. 333 p

¹³ p. 20 de BIEBER Alain et alii, *Questions vives pour une prospective de la mobilité quotidienne*. Op. Cit.

¹⁴ Entre 1975 et 1994, l'espérance de vie à la naissance est passée de 69,0 à 73,6 pour les hommes et de 76,8 à 81,8 pour les femmes ; de plus au cours de cette période ce sont essentiellement les classes d'âge élevé qui ont contribué à cet allongement. D'autre part, entre 1973 et 1988, le taux d'activité sur la période charnière de 55 à 65 ans a fortement baissé : il est passé de 82 à 67% chez les hommes de 55-59 ans et de 62 à 25% chez les 60-64 ; pour les femmes on enregistre des variations respectives de 43 à 45% et de 33 à 18%. Ces chiffres sont repris p. 26 et p. 37 de POCHET Pascal, *Mobilité quotidienne des personnes âgées en milieu urbain : évolutions récentes et perspectives*. Lyon : Université Lumière Lyon 2, thèse de doctorat de sciences économiques, 15 juin 1995. 313 p.

souvent affectée après 75-80 ans qui, par leur interaction, accentuent de plus en plus la diversité des situations au sein de cette population¹⁵.

D'un point de vue général cette évolution socio-démographique joue d'une double manière sur la mobilité. Tout d'abord, l'arrivée à l'âge de la retraite, à travers le bouleversement dans le mode de vie qu'elle implique, conduit à une baisse sensible du nombre moyen de déplacements quotidiens. Par contre les nouvelles générations de personnes âgées, en moyenne plus aisées, plus motorisées et habituées à conduire, ont tendance à plus se déplacer que les générations précédentes et à plus utiliser la voiture. Ainsi, effet de cycle de vie *versus* effet de génération, "le vieillissement de la population n'implique pas nécessairement une diminution de la mobilité en voiture particulière"¹⁶. Remarquons cependant que l'automobile se banalise progressivement dans toutes les couches de la population et les écarts de mobilité VP entre les dernières générations arrivées à l'âge de la retraite ont aujourd'hui tendance à se réduire, même si de fortes potentialités de l'usage de l'automobile par les femmes âgées existent encore (le nombre de déplacements conducteur des femmes de plus de 60 ans pourrait être multiplié par 3 entre 1992 et 2006). Les effets de génération ne devraient donc pas se résorber avant 15 à 20 ans, l'effet cycle de vie devenant ensuite prédominant¹⁷.

Enfin, nous terminerons ce rapide tour d'horizon des évolutions de la société française au cours de ces 25 dernières années avec les changements dans les rythmes des activités quotidiennes. Ceux-ci peuvent s'illustrer aussi bien au niveau de la vie familiale que professionnelle :

- Le développement de l'équipement domestique joue sur deux registres avec d'une part l'extension des loisirs à domicile (télévision et magnétoscope par exemple ; si en 1981-83, 53,5% des français regardaient la télévision tous les jours, ils étaient 73,2% en 1988-90), et d'autre part une gestion du temps consacré aux tâches ménagères plus serrée (lave vaisselle, association congélateur/micro onde par exemple). Ce dernier point est d'ailleurs à rapprocher du développement de la journée continue, à la montée du travail féminin et à la concentration des achats en fin de semaine en grande surface : les tâches domestiques entrent dans un cadre temporel de plus en plus restreint et leur organisation se rationalise.
- Dans le cadre du travail, les horaires deviennent plus flexibles et le temps partiel se banalise. Cette plus grande souplesse a une conséquence directe sur le système de transport : on assiste à un étalement progressif des heures de pointe, les trafics augmentant moins vite durant ces périodes que durant les périodes avoisinantes. Ainsi, par exemple, les déplacements automobiles effectués entre 17 et 18 h dans l'agglomération lyonnaise sont passés de 11,7% du total des

¹⁵ *Idem*. Voir notamment la partie pp. 45-75 "Les modes de vie à la retraite : homogénéité ou disparités".

¹⁶ Voir BONNAFOUS Alain, "Structures démographiques et comportements sociaux" *Op. Cit.* p. 33.

¹⁷ Cf. p. 238 de POCHET Pascal, *Mobilité quotidienne des personnes âgées en milieu urbain : ... Op. Cit.*

déplacements automobiles lors de l'enquête de 1976 à 10,6% en 1986, à périmètre identique¹⁸.

L'ensemble de ces évolutions sociales et démographiques a été accompagné, dans le domaine de la mobilité, par un recours croissant au véhicule automobile. On peut se demander si ces grands mouvements ne devraient pas se ralentir progressivement dans l'avenir, contraignant alors la mobilité automobile à une croissance moins soutenue : l'époque des années 60 est révolue, où "chaque point de croissance transformait des agriculteurs ou artisans en salariés urbains, qui adoptaient progressivement les habitudes de déplacements liées à leur nouvel environnement"¹⁹. La proportion des plus de 60 ans va continuer à augmenter parmi la population (20% en 1990, 27% pour 2020) et l'effet de génération de conquête de l'automobile par cette classe d'âge devrait progressivement s'atténuer au seul profit -d'ici 15 ans cependant- de l'effet de baisse de mobilité lié au cycle de vie. De même, alors que le taux d'activité féminin a continué à progresser dans les années 80, cette croissance devrait se ralentir, passant d'une variation annuelle observée de +130 000 femmes actives par an entre 1985 et 1990 à une stabilisation vers 2005-2010 (+7000 femmes actives par an)²⁰. La croissance de la mobilité automobile liée à ce facteur devrait donc se ralentir dans les mêmes proportions.

Par contre d'autres facteurs pourraient contrebalancer cette tendance au tassement. Un redémarrage éventuel de la croissance économique permettrait sans doute aux jeunes d'accéder plus facilement à l'indépendance financière et à l'automobile ; de même, en résorbant la poche de chômage il contribuerait à un regain de déplacements. Une autre contretendance que nous allons maintenant évoquer touche à l'étalement urbain et à l'allongement des distances, favorables à l'automobile.

1.4. Mobilité et étalement urbain

Un dernier point souvent évoqué concerne l'étalement constaté des villes. En terme de mobilité, ceci se traduit par un allongement significatif des distances parcourues et l'automobile devient omniprésente sur ces nouveaux territoires, à la fois cause et conséquence de leur élargissement.

Il faut d'abord souligner que ce phénomène d'étalement urbain s'appuie sur un premier mouvement de concentration. Entre 1954 et 1975 par exemple, la population urbaine a augmenté de plus de 40% à territoire constant, bénéficiant notamment de l'exode rural. Depuis, cette croissance s'est effectuée de manière beaucoup plus visible - compte tenu des bases géographiques et statistiques disponibles - par une extension du territoire urbain. Ainsi de 1982 à 1990, sur 2 millions de personnes de plus à être recensées comme

¹⁸ CETE de Lyon, *Une réflexion multimodale sur la demande automobile*. Lyon : CETE de Lyon, note de travail, avril 1992. 8 p.

Ce phénomène est bien sûr lié en premier lieu à la saturation du système de transports, tant au niveau du réseau viarie que de l'offre TC. La flexibilité des horaires de travail ne joue qu'un rôle permissif dans l'étalement de la période de pointe.

¹⁹ p. 30 de BIEBER Alain et alii, *Questions vives pour une prospective de la mobilité quotidienne*. Op. Cit.

²⁰ Cf. p. 48 de MARCHAND Olivier, "La population active commence à diminuer juste après l'an 2000", *Economie et Statistique* n°190, juillet-août 1986. pp. 41-54. Des articles plus récents confirment cette prospective. Voir notamment DESPLANQUES Guy, "Activité féminine et vie familiale", *Economie et Statistique* n°261, janvier 1993. pp. 23-32.

urbaines, un tiers résidaient sur des communes périphériques qui se sont vues annexées au territoire urbain du fait de leur croissance démographique²¹.

Soulignons que le mouvement de concentration ainsi enregistré est à considérer de manière relative car du fait de l'augmentation globale de la population la croissance urbaine ne signifie pas forcément une désertification accélérée des campagnes. De plus cette concentration se réalisant sur des territoires de plus en plus large, on n'assiste pas à une augmentation des densités humaines dans les zones les plus denses. Ainsi entre 1962 et 1990, la population française ayant augmenté de 15%, "les 5% de la population la moins dense qui ont étendu leur emprise de 33 à 43% du territoire ont vu leur densité baisser seulement de 13,3 à 11,8 habitant au kilomètre carré et les 50% les plus denses de 2450 en 1975 à 1960 en 1990"²².

Ce mouvement général de concentration des hommes et des activités sur des zones urbaines qui ont quant à elles tendance à s'élargir semble bien reproduit par le modèle dit "de Bussière". Celui-ci exprime la densité de population d'une aire urbaine concentrique en fonction du rayon retenu. Si l'on note r le rayon et $D(r)$ la densité moyenne de la population située sur ce rayon, on peut écrire :

$$D(r) = A e^{-br}$$

Les paramètres A et b s'interprètent respectivement comme la densité du centre et comme le taux de décroissance de la densité en fonction de la distance au centre. Soulignons que la valeur de D ainsi obtenue représente l'espérance mathématique de la densité à la distance r du centre et non la densité effective que l'on devra trouver sur ce rayon : il peut très bien exister des compensations de densités sur des rayons différents.

Cette première version apporte une description statique de la densité urbaine. Reprise d'un point de vue dynamique, en comparant les valeurs de A et b pour une même agglomération à différentes périodes, on constate alors que "la croissance des villes modernes, dans la phase actuelle de leur développement, s'accompagne régulièrement d'une diminution dans le temps de la densité au centre [A], ainsi que d'une diminution du taux de décroissance de la densité en fonction de la distance au centre [b]"²³. L'intérêt de ce constat est surtout renforcé par le fait que, comme l'a montré René Bussière, les paramètres A et b évoluent dans le temps en fonction linéaire l'un de l'autre. Cette une liaison semble très forte puisque pour toutes les villes étudiées les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0,998²⁴ : on pourrait donc prévoir l'évolution de la population urbaine dans le temps et dans l'espace.

²¹ Ces chiffres sont cités par MINVIELLE Erwann, *La mobilité des personnes en milieu urbain. Op. Cit.*

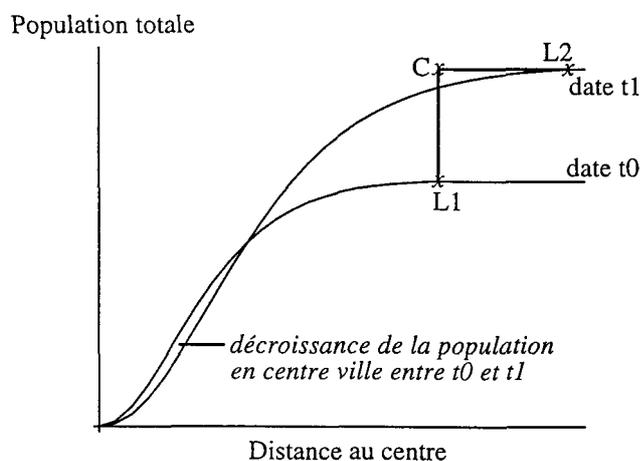
²² Cf. p. 120 de LE BRAS Hervé, *La planète au village*. La Tour d'Aigue : Editions de l'Aube / DATAR, 1993. 222 p.

²³ Cf. pp. 55-56 de BUSSIERE René, *Modèle urbain de localisation résidentielle*. Paris : Centre de Recherche d'Urbanisme. 1972. 163 p.

²⁴ *Idem* p. 57. Les villes étudiées sont Montréal (1941-1964), Toronto (1941-1961), Stockholm (1957-1969), Winnipeg (1941-1961), Malmö (1960-1969), Helsingborg (1960-1969) et Paris (1876-1968, avec une liaison linéaire forte entre A et b à partir de 1911).

Ce phénomène se visualise très bien à partir du graphique suivant, emprunté à Alain Bonnafous et Henri Puel, au sein duquel la représentation de la population totale est préférée à celle de la densité (soit la population totale rapportée à la surface)²⁵ :

Graphique 2 : repérage entre deux période du phénomène de croissance-étalement



C-L1 : croissance de la population urbaine entre t0 et t1

C-L2 : étalement urbain entre t0 et t1

Source : Bonnafous et Puel, 1983.

Cette formalisation permet d'illustrer le fait que d'une part la croissance urbaine correspond à une augmentation de la population et à une extension spatiale de la ville et que d'autre part cette croissance n'est pas homogène, le centre ayant tendance à se vider alors que la périphérie se densifie.

Tout d'abord il faut souligner que si cette représentation fonctionne très bien d'un point de vue global, les logiques de localisation sont par contre très diverses suivant les acteurs de la vie urbaine. Lorsqu'on compare par exemple les parcours résidentiels des actifs et les stratégies de localisation des activités correspondantes, on obtient des divergences plus ou moins fortes suivant les secteurs économiques. Les écarts les plus importants s'enregistrent notamment pour certaines activités du tertiaire (service aux entreprises, commerce de gros, enseignement, santé, administration générale, banque et assurance) qui se regroupent sur le centre alors que leurs actifs résident de plus en plus en périphérie²⁶. Les distances ainsi créées génèrent un trafic automobile important et la longueur moyenne des déplacements domicile-travail est passée de 7,4 à 14 km entre 1975 et 1990²⁷. Enfin la convergence de certains déplacements vers le centre favorise toujours la saturation des points d'entrée de l'agglomération, même si leur croissance la plus forte est enregistrée pour des origines-destinations périphériques.

²⁵ Ce graphique est repris de BONNAFOUS Alain, PUEL Henri, *Physionomies de la ville*. Paris : Economie et Humanisme, Les Editions Ouvrières, 1983. 168 p.

²⁶ Résultats obtenus à partir de la comparaison des localisations des personnes et des entreprises dans un rayon de 25 km autour de l'agglomération lyonnaise en 1975 et 1990. Cf. TABOURIN Eric, "Les formes de l'étalement urbain", *Les Annales de la Recherche Urbaine* n°67, juin 1995. pp. 33-42.

²⁷ Chiffres INSEE établis sur l'ensemble de la population active française, cités par MINVIELLE Erwann, *La mobilité des personnes en milieu urbain*. Op. Cit.

Ensuite on peut remarquer avec Yves Geffrin que ce processus de croissance urbaine n'est pas forcément uniquement favorable à l'automobile. En effet si celle-ci reste irremplaçable sur les limites du territoire urbain, le centre reste dense malgré tout et sa proche périphérie se densifie : les transports collectifs deviennent alors une solution envisageable sur un périmètre qui s'élargit. Encore faut-il être prêt à se donner les moyens de parier sur le développement des banlieues, "clefs des mutations urbaines, [qui] n'ont pas la rigidité des centres, [ni] l'inconsistance du périurbain"²⁸, contre un étalement toujours plus large et plus diffus des hommes et des activités, favorisé par un investissement trop tourné sur l'accessibilité automobile.

Remarquons également avec cet auteur que la croissance urbaine n'est pas un fait systématique. Il existe de nombreuses villes en France situées dans des zones en difficulté économique et qui se dépeuplent. Pour celles-là les questions de mobilité automobile deviennent représentatives d'enjeux d'une toute autre nature, économique et sociale, et les problèmes en matière de transport portent avant tout sur les réseaux de transports collectifs dont il devient de plus en plus difficile d'assurer la maintenance²⁹.

Sans chercher à disposer d'un schéma explicatif complet et définitif, il semble cependant que ce processus de croissance repose sur la conjonction de 3 variables clés, touchant à la démographie, à l'économie et au système de transport.

La croissance démographique des villes s'est faite largement par un apport de l'extérieur, qu'il corresponde à l'exode rural ou à l'immigration étrangère. Nous venons de voir que dans certains bassins d'emplois très affectés par la crise économique, le solde migratoire devient négatif et la question de la croissance urbaine disparaît. On peut également s'interroger sur la croissance des autres agglomérations : la croissance endogène devient incertaine avec le vieillissement de la population ; l'exode rural est aujourd'hui tari ; par contre elle peut continuer à s'alimenter de l'arrivée de personnes de zones moins favorisées, étrangères ou nationales.

Les stratégies de localisation des acteurs économiques à l'intérieur d'une zone urbaine constituent un élément explicatif central et relativement mal connu. On peut cependant souligner la diversité de ces stratégies : "certains types d'entreprises privilégient la centralité à l'image du tertiaire supérieur, d'autres au contraire - et tout particulièrement les activités industrielles - trouvent avantage à se localiser en périphérie du fait des disponibilités importantes de terrains et des prix fonciers peu élevés. (...) [D'un autre côté] la délocalisation des ménages a été d'autant plus forte que la croissance des revenus, les aides de l'Etat au secteur du BTP ont accompagné et encouragé le désir d'accession à la propriété individuelle dans des espaces peu denses, donc forcément situés en lointaine périphérie"³⁰.

Enfin l'évolution du système de transport a joué un rôle permissif à ce modèle de développement urbain. Ainsi, appliqué sur la croissance urbaine au siècle dernier le modèle de Bussière ne donne pas de résultats satisfaisants : il semble ne pouvoir fonctionner

²⁸ Cf. p 39 de GEFFRIN Yves, "Mobilité, diversité, inégalité" in ADEME, DRAST, INRETS : *Se déplacer au quotidien dans 30 ans*. Paris : La Documentation Française, 1995, 234 p. pp. 35-40.

²⁹ *Idem* p. 38.

³⁰ Cf. pp. 40-41 de TABOURIN Eric, "Les formes de l'étalement urbain" *Op. Cit.*

qu'avec l'avènement des véhicules à moteurs, voiture particulière et transports collectifs confondus³¹.

On peut reprendre avec Alain Bieber et *alii* l'hypothèse de Zahavi selon laquelle "tout se passe comme si", à un niveau global, les personnes disposent pour leurs déplacements d'un budget temps constant de l'ordre de une heure par jour (ce qui se vérifie à peu près dans les agglomérations françaises d'après les enquêtes ménages)³². L'amélioration générale des vitesses de déplacements individuels du fait de l'augmentation de l'équipement automobile des ménages ainsi que du développement constant des infrastructures viaires et des techniques de régulation du trafic ne serait dès lors pas utilisée pour diminuer le temps de déplacements au sein d'un cadre temporel par nature rigide mais pour augmenter l'espace au sein duquel les personnes exercent leurs diverses activités. On peut d'ailleurs noter qu'entre 1975 et 1990 l'augmentation des distances domicile-travail a été plus forte dans les villes de province qu'en région parisienne, où les difficultés de circulation sont plus vives (moins de 30% en Ile de France contre plus de 60% dans les grands bassins de province)³³.

Ce processus de concentration et d'étalement devrait-il continuer à l'avenir ? La pression démographique existera sans doute encore longtemps dans les régions économiquement les plus dynamiques. Concernant les autres facteurs, le rythme de l'étalement dépendra en grande partie des volontés politiques en matière d'encouragement à la propriété et de développement des infrastructures routières. Si on admet l'idée que la mobilité n'est pas qu'une simple "pulsion sociale", à dimension individuelle, mais aussi "une production sociale et le résultat d'une culture de la technostructure et des décideurs³⁴", on peut alors s'interroger sur la manière dont cette culture des élites techniques et politiques va s'infléchir dans les années qui viennent.

Entre les pressions montantes pour une écologie urbaine rétablissant des valeurs de proximité et une vision négative de la centralité, poussant à un développement de l'accessibilité routière de périphéries de plus en plus lointaines, il existe une multitude de pistes dont nous sommes bien incapables de décrypter le devenir.

³¹ Cf. BUSSIERE, *Modèle urbain de localisation résidentielle. Op. Cit.* pp. 66-67 : "Considérant Paris, on voit que la fonction A(b) n'est linéaire que depuis 1911. (...) Or c'est vers 1911 que se produit l'introduction massive de moyens mécaniques de transports tant collectifs qu'individuels, en site propre aussi bien qu'utilisant la voirie publique. (...) S'agit-il d'une simple coïncidence ? C'est possible mais, nous semble-t-il, peu probable. Et nous pensons que, d'une façon générale, ce comportement du modèle n'est probablement associé qu'à la phase "moderne" de la croissance des villes".

³² Voir BIEBER Alain et *alii*, *Questions vives pour une prospective de la mobilité quotidienne. Op. Cit.* Précisons également que pour Zahavi, le niveau moyen de déplacements quotidiens d'une personne est régi par une double contrainte : temporelle avec l'hypothèse de Budget Temps de Transport constant ; mais aussi monétaire avec une part du revenu des ménages consacré aux transports n'excédant pas 15% du revenu total. Cette dernière contrainte reste par contre peu visible dans les pays occidentaux pour lesquels, aujourd'hui, les coûts des transports sont relativement faibles et restent en deça de la limite tracée par la contrainte de budget temps.

³³ Cf. p. 43 de ORFEUIL Jean-Pierre, "Trois futurs pour la mobilité et pour la ville" in ADEME, DRAST, INRETS : *Se déplacer au quotidien dans 30 ans*. Paris : La Documentation Française, 1995, 234 p. pp. 41-50.

³⁴ Cf. p. 178 de BIEBER Alain, MASSOT Marie-Hélène, ORFEUIL Jean-Pierre, "Prospective de la mobilité quotidienne" pp. 157-184 in BONNAFOUS Alain, PLASSARD François, VULIN Bénédicte (sous la direction de), *Circuler demain*. La Tour d'Aigue : Editions de l'Aube / DATAR, 1993. 188 p.

1.5. Conclusion : l'évolution projetée des déplacements routiers sur le Grand Lyon aux horizons 2000 et 2010

Les tendances dans l'évolution de la mobilité qui viennent d'être évoquées de manière générale se retrouvent dans leurs grandes lignes au niveau de l'agglomération lyonnaise. Même s'il ne les a pas toutes prises en compte -ne serait-ce que du fait de leur redondance-, le CETE de Lyon y fait largement référence lorsqu'il établit ses hypothèses de calcul des évolutions des déplacements automobiles sur la communauté urbaine du Grand Lyon aux horizons 2000 et 2010. Trois constats principaux ont en fait servi pour poser ces hypothèses, concernant :

- l'évolution des taux motorisation et de la mobilité VP entre les différentes enquêtes ménages effectuées sur l'agglomération (1965 et surtout 1976 et 1986) ;
- le processus continu de concentration et étalement de l'agglomération ;
- la tendance au tassement du trafic routier à l'heure de pointe du soir qui sert de référence pour établir les affectations sous DAVIS et dimensionner la voirie.

a) taux de motorisation et mobilité automobile

Les résultats fournis par les enquêtes ménages indiquent que non seulement l'augmentation du taux de motorisation des ménage a tendance à ralentir mais que chaque véhicule supplémentaire contribue à un accroissement de déplacement automobile moindre que le précédent. L'augmentation du taux de motorisation a été de 52% en 1965 et 1976 et de 25% entre 1976 et 1986 ; le nombre de déplacements automobile par personne et par jour a augmenté de 94% dans un premier temps pour tomber à seulement +12% ensuite³⁵.

Ces chiffres semblent indiquer que taux de motorisation et mobilité automobile parviennent actuellement au seuil de saturation évoqué en partie 1.2. "Mobilité et croissance économique". Le CETE de Lyon a opté pour cette hypothèse et a supposé que ce seuil serait atteint aux alentours de 2000 pour les résidents du Grand Lyon, après une croissance d'environ 25% du taux de motorisation par rapport à 1990, se traduisant par une progression de la mobilité VP de 6-8% seulement.

On peut cependant souligner que ce ralentissement de la croissance de la mobilité automobile est sans doute aussi lié au ralentissement de la croissance économique : les hypothèses du CETE retiennent donc implicitement l'idée d'une croissance économique identique à celle de la période précédente.

b) concentration et étalement urbain

Le processus de concentration et d'étalement urbain devrait continuer. Au niveau du Grand Lyon, il est prévu un gain de 100 000 habitants entre 1990 et 2010 (soit un peu

³⁵ Sauf indication contraire, tous les chiffres fournis ici peuvent être retrouvés pp. 41-51 de Conseil Général du Rhône, DDE du Rhône, Communauté Urbaine de Lyon, *Schéma des grandes voiries de l'agglomération lyonnaise - Document technique de synthèse*. Lyon : Communauté Urbaine de Lyon, septembre 1993.

moins de 10% de la population de 1990) ainsi que 118 000 emplois supplémentaires (+20% environ).

Le phénomène d'étalement se traduit quant à lui par une densification plus importante de la périphérie, avec une croissance de l'usage de l'automobile pour un nombre total de déplacements à peu près constant : en 1986, la mobilité VP est de 1,46 déplacement par personne et par jour sur "l'agglomération restreinte"³⁶ et 2,25 pour la périphérie (soit une moyenne de 1,57). De ce fait les augmentations de mobilité prévues pour 2010 ont essentiellement été attribuées aux résidents des communes des première et seconde couronnes autour de Lyon et Villeurbanne.

Notons également que l'étalement urbain déborde largement le cadre du Grand Lyon. La croissance attendue des déplacements routiers en provenance de l'extérieur est donc beaucoup plus forte que celle envisagée en interne. Cependant, leur poids étant relativement faible par rapport aux déplacements routiers des résidents de l'agglomération (un peu plus de 20% en 1990) ils ne dépassent pas l'ordre des 30% en 2010. Par contre ils vont avoir tendance à saturer les grands axes d'accès au centre de l'agglomération³⁷.

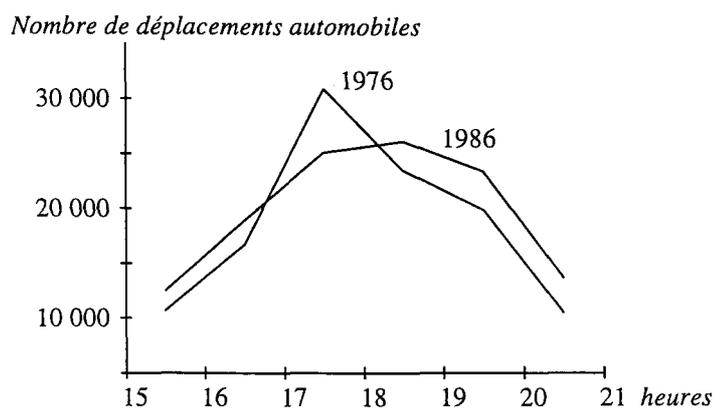
c) L'étalement des déplacements routiers autour de l'heure de pointe du soir

L'hypothèse d'une croissance des déplacements routiers essentiellement attribuée à la périphérie est aussi justifiée par le fait que l'heure de pointe du soir, sur laquelle sont établies les prévisions, a tendance à stagner notamment en centre-ville. Ce phénomène que nous n'avons guère évoqué au cours de la présentation précédente est très net sur la ville de Lyon puisqu'entre 1976 et 1986 les déplacements automobile des résidents de l'agglomération partant du centre-ville (Vieux-Lyon, Presqu'île et Rive Gauche) ont baissé de 20% entre 17 et 18 heure et l'heure de pointe s'est décalée légèrement sur 17h30-18h30³⁸ :

³⁶ "L'agglomération lyonnaise" correspond ici implicitement au périmètre de l'enquête ménages de 1986 qui recouvre celui du Schéma Directeur de l'agglomération, soit à peu de chose près celui de la communauté urbaine du Grand Lyon. "L'agglomération restreinte" correspond quant à elle au périmètre plus réduit de l'enquête ménages de 1976.

³⁷ Voir LE NIR Michel, ROUTHIER Jean-Louis, TABOURIN Eric, "Massification des flux et migrations alternantes. Application au bassin d'emploi de l'agglomération lyonnaise", *Sixth World Conference on Transport Research*, Lyon, France, 29 juin 3 juillet 1992. pp. 2 217-2 229 des actes du colloque, Vol. III. : *Transport Policies*. avril 1993. pp. 1 542-2 336.

³⁸ Cf. p. 4 de CETE de Lyon, *Une réflexion multimodale sur la demande automobile*. Op. Cit.

Graphique 3 : Evolution du nombre de déplacements émis par le centre ville entre 1976 et 1986

Nota : les déplacements correspondent à ceux effectués par les résidents de l'agglomération à partir du centre-ville

A partir de CETE de Lyon, 1992.

L'amélioration du service des transports publics, avec la mise en service des lignes A, B et C du métro entre les deux périodes, a sans doute contribué à cette baisse du nombre de déplacements automobile en heure de pointe. La plus grande souplesse des horaires de travail a quant à elle favorisé l'étalement global des déplacements au cours de la soirée.

Notons cependant que ce constat d'étalement de l'heure de pointe du soir ne porte que sur une catégorie particulière de déplacements puisqu'elle ne concerne que ceux effectués par des résidents de l'agglomération, qui bénéficient plus directement des améliorations de la desserte des transports collectifs, et qu'elle reste circonscrite au centre ville comme origine, zone où les problèmes de circulation sont parmi les plus sensibles. Avec la prise en compte des non-résidents et de l'ensemble de l'agglomération, le processus d'étalement de la pointe est beaucoup moins net, notamment en ce qui concerne son écrêtement.

Les hypothèses finalement retenues en matière de mobilité automobile correspondent finalement à une stagnation du nombre de déplacements effectués par les habitants du centre ville et une progression de 5% par an pour les résidents du reste de l'agglomération. Projetée de 1992, date de référence des calculs, sur 2010, on obtient globalement une croissance de 42% du nombre de déplacements sur l'agglomération, avec une augmentation limitée à +35% des déplacements internes et des progressions beaucoup plus rapides des déplacements liés aux échanges (+60%) et au transit (+67%). Notons enfin que ces déplacements automobiles assimilent en fait poids-lourds et véhicules légers. Nous verrons dans la partie suivante, qui distingue plus précisément les différents types de trafic et de véhicules, que les conséquences de cette approximation ne sont pas très importantes.

Tableau 3 : Evolution projetée du nombre de déplacements routiers à l'heure de pointe du soir entre 1992 et 2010

	1992	2010
Déplacements intraurbains	130 000	176 000
Déplacements d'échange	38 200	61 000
Déplacements de transit	4 800	8 000
Total	173 000	245 000

Source : Schéma des grandes voiries de l'agglomération lyonnaise, 1993.

2. L'évolution et la diversification technologique du parc automobile

Outre les évolutions en matière de mobilité, une autre variable clé en matière de pollutions atmosphériques et sonores concerne les avancées technologiques prévisibles et la place qu'elles prendront sur le marché de l'automobile. En effet les caractéristiques du parc automobile sont appelées à évoluer de manière sensible dans les quinze années à venir, avec une part croissante de véhicules diesel au détriment de l'essence, avec une amélioration nette de leurs performances environnementales, notamment en matières de pollution atmosphérique grâce aux pots catalytiques, à la désulfuration du diesel et à la baisse des émissions unitaires de poussières, avec enfin l'utilisation d'énergies présentées sous de nouvelles formes, gaz, biomasse ou électricité³⁹.

Soulignons que ces renouvellements technologiques n'ont de sens qu'à travers les enjeux économiques et politiques qui les sous-tendent et qui sont beaucoup plus larges que les simples pollutions atmosphériques et sonores qui nous préoccupent plus spécifiquement ici. De puissants leviers agissent, notamment au niveau de la diversification des énergies utilisées, pour lesquels les questions de pollution atmosphérique ne constituent qu'un argument supplémentaire en leur faveur :

- Au plan national, la dépendance pétrolière soumet la France aux instabilités politiques de ses fournisseurs (Pays du Golfe) qui peuvent avoir des répercussions importantes sur la facture énergétique. Outre un moyen possible de rééquilibrer la balance commerciale, les enjeux de développement industriel ne sont pas non plus négligeables car les constructeurs automobiles voient dans la percée de ces technologies des sources de diversification de leur production. On peut ajouter aussi les arguments agricoles et d'aménagement du territoire liés, en particulier, aux biocarburants qui seront mentionnés plus loin.
- Au plan local, les politiques d'amélioration du cadre de vie en milieu urbain ne visent pas seulement la diminution de la pollution de l'air ou l'amélioration des nuisances sonores ; elles se préoccupent également beaucoup des questions liées aux encombrements et à l'insécurité routière...

³⁹ Même si elle ne reprend pas tout et réactualise certains éléments, cette partie doit beaucoup au travail de MALGAT Jean-Luc, *Energies nouvelles pour l'automobile : enjeux, réalités et perspectives*. Vaulx-en-Velin : Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Travail de Fin d'Etude, juin 1994. 100 p.

Ces points de vue conditionnent de manière importante les caractéristiques du parc à venir et jouent essentiellement sur les questions de pollution atmosphérique des véhicules routiers. Nous traiterons donc de manières séparées les thèmes de la pollution atmosphérique et des nuisances sonores, avec des développements plus importants pour les premiers.

2.1. Les développements technologiques attendus pour les 15 ans qui viennent

Pour les années qui viennent les technologies utilisées dans le parc automobile grand public ne devraient pas connaître de changements révolutionnaires. Les véhicules à propulsion thermique traditionnels, qu'ils soient diesel ou essence, vont continuer à constituer l'essentiel du trafic automobile. Cependant cette permanence technologique ne signifie pas que les performances des véhicules en matière de pollution atmosphérique vont rester identiques : la systématisation du pot catalytique et les progrès en matière d'émissions diesel vont avoir des conséquences sensibles sur leurs émissions unitaires.

A plus long terme, d'autres améliorations peuvent être attendues avec le développement de petits véhicules plus spécifiquement adaptés aux conditions urbaines de circulation et de stationnement, propulsés par des moteurs à deux temps ou à l'énergie électrique. Le gaz naturel, le gaz de pétrole liquéfié et les biocarburants permettront sans doute de diversifier les types d'énergie utilisée, même s'il est peu probable qu'ils connaissent tous le même succès. Leur usage complémentaire, voire marginal pour certains, fait que le bilan environnemental que l'on peut en attendre doit rester mesuré.

2.1.1. Les améliorations des technologies utilisant les carburants traditionnels

A moins d'envisager une évolution radicale en matière de politique fiscale sur les carburants, les parts de marché continueront à progresser en faveur des véhicules diesel. En effet l'élasticité de la consommation de carburants à leur prix est assez fortement négative à long terme⁴⁰ et ceci s'est beaucoup plus traduit par un succès croissant des véhicules diesel - notamment des gammes inférieures et intermédiaires - que par une moindre consommation des véhicules essence (l'amélioration des rendements énergétiques a plutôt favorisé une augmentation de la puissance moyenne des véhicules, essence et diesel confondus). Cette sensibilité peut être illustrée par la progression depuis 15 ans du nombre de véhicules diesel vendus par rapport aux véhicules à essence :

Tableau 4 : taux de pénétration du diesel sur les véhicules particuliers

%	1978	1981	1984	1988	1989	1993
Proportion de diesels vendus parmi les VP neufs	6,3	11,5	14	23,5	30	50

Cité par P.H. Bernard, 1993.

⁴⁰ Cette élasticité serait en France de l'ordre de -0,27 à court terme et de -0,71 à long terme : une hausse de 10% des prix des carburants se traduit à long terme par une baisse de 7,1% des consommations. Cf. p. 83 de ORFEUIL Jean-Pierre, *Energie, environnement, fiscalité, déplacements quotidiens*. Arcueil : INRETS, document de travail, décembre 1993. 133 p.

a) Le véhicule diesel

Depuis 1993 la proportion de véhicules particuliers diesel vendus en France est supérieure à celle des véhicules à essence. Plusieurs facteurs jouent en faveur de ce mouvement. La technologie du diesel s'est considérablement améliorée et les problèmes de confort ou de démarrages par grands froids ont été nettement atténués. Mais ce sont surtout des arguments d'ordre économique qui expliquent son essor : le différentiel fiscal favorable au diesel est bien sûr important mais il est également renforcé par une consommation qui ne dépasse pas 70 à 75% en volume de celle de l'essence ; de plus la baisse progressive du coût d'achat du diesel permet aujourd'hui de bénéficier immédiatement des économies réalisées sur l'usage ; sa longévité permet enfin d'en profiter plus longtemps. Ainsi même si le succès du diesel, qui se traduit aujourd'hui par un manque à gagner sur la TIPP significatif pour l'Etat, risque d'entraîner un rattrapage fiscal passant par une hausse plus forte des taxes sur le gazole que sur l'essence, sa position devrait encore se renforcer (Cf. *Infra* pour les estimations de la part du diesel dans le parc et le trafic automobile aux horizons 2000 et 2010)

Une analyse en terme de rationalisation des filières énergétiques dans le secteur des transports, telle qu'elle a par exemple pu être menée par Jean Orselli⁴¹, débouche également sur la conclusion que du point de vue de la collectivité, le développement du diesel permet une meilleure utilisation du pétrole brut. En effet, ceci diminue les fractions de gazole aujourd'hui disponibles à bas prix dans d'autres domaines d'activités (le chauffage notamment), n'y encourageant pas une recherche d'économies d'énergie alors qu'elles sont beaucoup plus faciles.

Les performances en matière de pollution atmosphérique des véhicules diesel par rapport à l'essence sont inégales suivant les types de polluants. Par contre les progrès technologiques escomptés devraient amener des progrès sensibles :

- Ils n'émettent pas ou très peu d'hydrocarbures et de monoxyde de carbone, leurs émissions de gaz carbonique et de NOx sont nettement moins fortes que celles des véhicules à essence. Cependant les améliorations attendues en matière de réduction catalytique devraient à terme conduire à la mise au point de pots catalytiques susceptibles d'éliminer la quasi totalité des hydrocarbures et du CO ainsi que de réduire de manière suffisantes les émissions de NOx pour respecter les normes à venir⁴².
- Les émissions de SO2 sont significatives, même si celles liées aux activités industrielles restent beaucoup plus importantes. Cependant la diminution du taux de soufre dans le gazole est continue depuis plusieurs années. Elle devrait permettre à terme d'aboutir à un carburant totalement désulfuré.
- Enfin et surtout, les fumées noires et poussières deviennent d'autant plus préoccupantes que la proportion de véhicules diesel augmente. Des recherches existent concernant l'amélioration de filtres à particules et des progrès

⁴¹ ORSELLI Jean, *Energies nouvelles pour l'automobile*. Caen : Paradigme, 1992. 507 p.
Concernant la question du diesel, voir notamment pp. 437-449

⁴² Notons cependant que même si "des recherches actives ont lieu, l'industrie des catalyseurs a des traditions de secret telles que rien n'apparaît dans la littérature, même très spécialisée. Il n'est donc guère possible de connaître les programmes en cours, ni leur état d'avancement". Cf. p. 448 de ORSELLI Jean, *Energies nouvelles pour l'automobile*. Op. Cit.

importants se font pour les autobus et les poids lourds. Les applications pour les véhicules légers sont par contre moins avancées.

b) Le pot catalytique sur les véhicules à essence

Même si le diesel a pris une large place sur le marché de l'automobile français, les véhicules à essence constituent encore la majorité du parc et la moitié des véhicules vendus.

Depuis le 1^{er} janvier 1993 les normes européennes en vigueur sur les véhicules à essence neufs leur imposent de fait de disposer d'un pot catalytique. Cette obligation ne joue pas en faveur des véhicules à essence dans leur concurrence avec le diesel. En effet, la catalyse se fait grâce à des métaux précieux tels que le platine, le palladium ou le rhodium. Le coût de cette technologie est donc relativement élevé - de l'ordre de 5000 francs par véhicule -, et représente un montant significatif pour les véhicules de petite gamme. Il est prévu à terme l'usage de métaux moins précieux permettant de jouer sur les prix du pot catalytique.

Placés entre le moteur et le pot d'échappement, ces catalyseurs transforment les gaz polluants en azote (N₂), en gaz carbonique et en vapeur d'eau. Les effets sur la pollution de l'air sont importants puisque les émissions d'hydrocarbures se trouvent divisées par 10, de CO par 5, de NO_x par 6. Par contre ces excellentes performances sont à relativiser du fait d'autres points encore mal résolus :

- L'efficacité des pots catalytiques est quasiment nulle lorsque le véhicule circule à froid (Cf. *Infra*). Or, nous l'avons vu, plus du quart de la distance totale parcourue en automobile en France est effectué à froid. L'enjeu est donc de taille et de nombreux travaux sont en cours sur l'amélioration du comportement des pots à températures peu élevées et sur leur amorçage par des résistances de chauffage.
- Le pot catalytique entraîne une légère surconsommation de l'ordre de 3 à 5%. Plus souvent que le problème énergétique, c'est la question des surémissions induites d'environ 15% du CO₂ par rapport aux véhicules non équipés qui est évoquée. On doit cependant souligner que le bilan du pot catalytique en matière d'effet de serre est positif du fait de la baisse des émissions des autres polluants et notamment des NO_x qui jouent un rôle actif dans ce phénomène⁴³.
- Enfin, la fin de vie des pots catalytiques posent également des problèmes mal résolus. D'une part ils deviennent inefficaces après environ 100 000 kilomètres d'utilisation, donc bien avant que le véhicule lui-même soit hors d'état. D'autre part ils constituent un déchet que l'on sait encore mal recycler.

⁴³ Voir par exemple p. 433 de ORSELLI Jean, *Energies nouvelles pour l'automobile. Op. Cit.*

c) Très Petit Véhicule Urbain, moteur à deux-temps et mélange pauvre : des voies d'approfondissement.

Une des causes de la forte consommation des véhicules en ville et donc de leurs émissions réside dans leur poids et leur puissance. De nombreuses études sont actuellement en chantier pour proposer des "très petits véhicules", pesant moins de 650 kg, d'une longueur inférieure à 3,2 mètres et d'une puissance de 3 à 4 chevaux. Plusieurs facteurs jouent en leur faveur du point de vue des constructeurs : "Au delà de la mode et des exigences commerciales, le renouveau des études sur la morphologie d'ensemble des véhicules peut-être dû aux contraintes d'espace en ville, [au développement de] la propulsion électrique, à la recherche d'une apparence écologique - petite taille, petits déchets et petite consommation -, aux exigences de confort de stationnement"⁴⁴.

Ce type de véhicules, bien implanté au Japon du fait d'une réglementation extrêmement restrictive en matière d'espace de stationnement, est très peu développé en Europe. Il souffre de plus en France d'une image négative liée aux voiturettes sans permis, assimilées à un type trop particulier de conducteurs. Ceci ne semble pas assombrir le regain d'intérêt des constructeurs qui se traduit par des efforts en matière de *design*, des progrès dans les matériaux et les technologies utilisées. A terme des réductions sensibles des coûts et donc des prix laissent également supposer que des développements importants sont possibles pour ces véhicules.

Parallèlement à cet éventuel essor du très petit véhicule, le moteur à deux temps est remis au goût du jour car sa compacité et son moindre coût de fabrication en font un complément intéressant. Ce type de moteur a déjà connu des applications automobiles, avec la Trabant par exemple dans les pays de l'Europe de l'est. La "Synthesis 2010" présentée par Ford au salon de l'automobile de Genève en 1994 était équipée d'un moteur deux temps de 1,2 litre de cylindrée, pesant 40% de moins et d'un volume inférieur de 30% par rapport à un quatre temps équivalent.

Jusqu'à aujourd'hui les performances environnementales du deux temps étaient globalement médiocres car même si les émissions de NOx sont très réduites, ce type de moteur a un taux d'émissions d'hydrocarbures élevé et il est impossible d'utiliser des pots catalytiques oxydants du fait de ces mêmes hydrocarbures susceptibles de prendre feu. Par contre les derniers développements (introduction de l'injection pneumatique) ont permis des résultats spectaculaires puisqu'ils permettent aujourd'hui de respecter les normes de pollution en vigueur pour les véhicules à essence sans équipement de pot catalytique.

Une autre voie enfin concerne l'amélioration du rendement des moteurs à allumage commandé grâce à l'utilisation de "mélanges pauvres" (c'est à dire des mélanges pour lesquels le rapport essence/air est plus faible qu'aujourd'hui). Cependant si ce progrès est aujourd'hui possible, il reste conditionné par la mise au point de pots catalytiques susceptibles de fonctionner dans cet environnement moins riche et d'éliminer notamment des émissions de NOx encore trop élevées. Soulignons que la mise au point d'un tel pot représente également un enjeu pour le diesel, qui fonctionne de fait en mélange pauvre.

⁴⁴ Cf. p. 147 de LAMURE Claude, *Quelle automobile dans la ville ?* Paris : Presses de l'ENPC, 1995. 333 p.

2.1.2. Les combustibles de substitution comme solution à moyen terme

Une alternative à l'amélioration des moteurs alimentés par des carburants traditionnels consiste à rechercher des énergies de substitution estimées moins polluantes et économiquement intéressantes. Certaines pistes comme celle des biocarburants semblent ne pouvoir apporter que des résultats limités. D'autres comme l'énergie électrique sont sans doute intéressantes à long terme lorsque les véhicules hybrides ou bi-énergie seront au point. Le véhicule électrique restera sans doute cantonné à des créneaux spécifiques en attendant ces jours meilleurs. Les véhicules à propulsion au gaz enfin, avec le Gaz de Pétrole Liquéfié qui n'a guère eu de succès en France, mais surtout le Gaz Naturel pour Véhicules, sont peut-être les mieux placés pour devenir à terme une alternative crédible aux véhicules à carburants traditionnels.

a) Les biocarburants

Issus de la matière végétale, ces carburants alternatifs sont encore dénommés carburants verts ou carburants de biomasse. En France deux grandes voies sont actuellement explorées : d'une part l'éthanol, dont le nom fait référence à la famille chimique des éthers et des alcools, est fabriqué à partir de céréales (notamment le blé) ou de betteraves ; d'autre part le diester (ou biogazol, diesel-bi, diesol...) correspond à l'ester méthylique extrait de l'huile de colza.

Leur très forte prise en considération en France ces dernières années est liée à la poussée des lobbies agricoles. En effet la mise en jachères de 15% de la surface cultivable du pays, soit 1,5 millions d'hectares, imposée par la Politique Agricole Commune a provoqué "un choc aux conséquences sentimentales et culturelles très fortes"⁴⁵ au sein du monde agricole : en plus de répondre aux enjeux d'indépendance énergétique et de réduction des pollutions atmosphériques, le développement de ces types de carburants est alors destiné à atténuer le problème agricole et à participer de manière positive aux questions d'aménagement du territoire.

Pour l'éthanol comme pour le diester, plusieurs écueils en limitent l'extension, avec une consommation d'espace importante pour les cultures nécessaires, un apport d'énergie significatif pour les extraire et un rendement énergétique limité des carburants eux mêmes. On a ainsi pu estimer que les techniques agricoles modernes permettraient de produire 5% du carburant français si toutes les terres disponibles étaient utilisées - à peine 2% pour l'ensemble de la CEE⁴⁶. En outre les distillations successives nécessaires à l'obtention de l'éthanol requièrent une énergie équivalent à 90% du pouvoir calorifique obtenu. Ce produit reste de plus encombrant puisqu'il en faut 1,8 litres pour égaler les performances énergétiques de 1 litre de gazole. Les performances du diester sont meilleures, sa fabrication ne nécessitant que l'équivalent de 57% de son pouvoir calorifique et la surconsommation du diester pur ne dépassant pas les 10% par rapport au gazole.

⁴⁵ Cf. p. 4 de LEVY Raymond, *Les biocarburants*. Paris : rapport remis au Premier Ministre, février 1993. 17 p.

⁴⁶ Cf. p. 39 de BERNARD Pierre-André, "Quelles énergies nouvelles pour l'automobile", *TEC* n°119, juillet-août 1993. pp. 34-41. Voir également p. 223 de ORSELLI Jean, *Energies nouvelles pour l'automobile. Op. Cit.*

Ces rendements médiocres tout au long de la chaîne de production et consommation rendent ces produits relativement onéreux : même à un stade de production industriel, le prix de revient d'un litre d'éthanol ne passerait que de 3,07 à 2,75 francs, celui du diester de 2,80 à 2,55 francs. Ramenés à l'équivalence énergétique d'un litre de gazole (0,86 f/l), ces prix de revient s'élèvent respectivement à 4,95 et 2,80 francs⁴⁷.

En plus de ce mauvais bilan énergétique et économique, les performances environnementales des biocarburants restent mitigées :

- Concernant la pollution atmosphérique, les résultats restent très épars car les mesures ne sont guère harmonisées. On enregistre cependant systématiquement des gains importants sur les polluants classiques avec l'éthanol ; le diester est globalement moins efficace avec peu ou pas d'amélioration pour les NOx et le CO. Par contre d'autres types de polluants atmosphériques font leur apparition : formol, acroléine, benzo-pyrène⁴⁸...
- Un autre aspect de la pollution reste difficile à évaluer : il s'agit de la pollution liée aux engrais pour cultiver blé, betteraves et colza ainsi que du problème de traitement des déchets de fabrication (par exemple un hectare de colza permet d'obtenir 1 tonne de diester et 2 tonnes de tourteau mais on obtient également 100 kg de glycérine pour lesquels les débouchés restent très limités).

L'ensemble de ces médiocres résultats fait que les biocarburants ne peuvent pas constituer à l'heure actuelle une alternative crédible aux carburants traditionnels. Ils restent cependant à l'ordre du jour car leur développement peut s'intégrer dans la politique de soutien à l'agriculture française. Ainsi l'objectif affiché au niveau du Ministère de l'Agriculture est de parvenir à un diesel, en France, comportant 5% de diester. Par ailleurs des campagnes ont été menées ces dernières années pour tester ces carburants verts sur les réseaux de transports en commun de plusieurs villes de province, avec l'espoir d'améliorer l'image des autobus, ternie par les fumées noires du diesel. Cependant même si toutes ces initiatives nationales et locales parvenaient à prendre corps, elles restent trop marginales pour avoir un réel impact sur la qualité de l'air en milieu urbain.

b) Gaz Naturel pour Véhicule et Gaz de Pétrole Liquéfié

Contrairement aux biocarburants, le Gaz Naturel pour Véhicule, ou GNV (ou méthane), et le Gaz de Pétrole Liquéfié, ou GPL, regroupent de nombreux avantages qui plaident en faveur de leur développement.

Les réserves de gaz naturel présentent l'avantage d'être très importantes et de voir leur volume augmenter régulièrement au fur et à mesure de découvertes beaucoup plus rapides que pour le pétrole. De plus elles se trouvent relativement bien réparties à travers le globe et sont donc moins dépendantes d'éventuelles secousses politiques au Moyen Orient. Enfin, à énergie équivalente, le gaz naturel coûte environ 30% moins cher, même si la volatilité du marché du pétrole ne permet pas de considérer ce rapport comme stable.

⁴⁷ Chiffres 1992 repris par MALGAT Jean-Luc, *Energies nouvelles pour l'automobile : enjeux, réalités et perspectives*. Op. Cit. Voir pp. 28-31 et p. 82.

⁴⁸ On trouve une bonne synthèse de ces résultats dans MALGAT Jean-Luc, *Energies nouvelles pour l'automobile ... Op. Cit.* Voir p. 30 et p. 83.

L'usage du gaz naturel est en constante expansion avec, parallèlement, un développement important des réseaux de gazoduc permettant sa distribution : on estime ainsi que les zones couvertes en Europe en 2000 correspondront à la desserte d'environ 80% du parc automobile⁴⁹. De plus l'intérêt de ce carburant est sa très grande adaptabilité aux véhicules traditionnels : l'expérience italienne, avec environ 2% du parc équipé au GNV (7 à 8% dans certaines régions bien desservies) du fait d'une fiscalité attractive, montre qu'un investissement d'environ 6000 francs permet à un véhicule traditionnel de rouler indifféremment à l'essence ou au GNV. De plus la meilleure pureté du gaz ralentit l'encrassement du moteur et améliore sa longévité.

Sur le plan des émissions de polluants atmosphériques, les moteurs au GNV s'avèrent très performants. Des estimations établies par l'UTAC⁵⁰ lors d'essais avec des véhicules bi-énergie essence/GNV montrent une amélioration très forte en matière d'émissions de CO et d'hydrocarbure (-80 et -50%), plus faible en ce qui concerne les oxydes d'azote (-5%) et le CO₂ (-15%). Les émissions de soufre, poussière ou plomb sont inexistantes. Par contre les hydrocarbures émises par le GNV sont en grande partie constituées de méthane (70%), *a priori* inoffensif pour l'organisme mais actuellement pointé du doigt pour son haut pouvoir contributif à l'effet de serre. Les véhicules au GNV peuvent donc facilement être mis aux normes 93 voire à leur sévèrisation grâce à une simple optimisation de leur rendement ou par l'installation d'un pot oxydant.

Le GPL (GPL-C : Gaz de Pétrole Liquéfié-Carburant) est un produit obtenu soit à partir du pétrole, soit lors de la purification du gaz naturel. De plus en plus réduit à la catégorie des "déchets valorisés" du marché pétrolier, son usage par les transports permet de reclasser à prix très intéressant une énergie qui s'écoule très mal aujourd'hui du fait d'une demande réduite. Le problème - et l'expérience française en témoigne - consiste à parvenir à la mise en place d'un réseau de distribution suffisamment étendu pour que ce type de carburants puisse apparaître crédible pour les automobilistes et pour parvenir à des coûts de distribution intéressants. Ainsi, les cas du Japon, de l'Italie et des Pays-Bas montrent que le GPL peut représenter plus de 10% des carburants automobiles, poids lourds compris.

Comme pour le gaz naturel, l'adaptation d'un véhicule au GPL est relativement légère et permet par la suite un entretien simplifié et une plus grande longévité. Sur le plan de la pollution atmosphérique, les expériences menées par l'INRETS montrent que les émissions de CO et de HC sont fortement réduites sans atteindre les valeurs des véhicules diesel. Les émissions ne contiennent ni SO₂, ni plomb, ni particules et les quantités de CO restent inférieures d'environ 10% à celle de l'essence. Par contre les émissions de NO_x sont plus importantes, dépassant d'environ 40% celles liées à l'essence⁵¹. La mise en place d'un pot catalytique est donc nécessaire pour respecter les normes de 1993.

Malgré l'échec de la France dans les années 80 dans sa tentative de lancement du GPL comme carburant alternatif à l'essence, les expériences d'autres pays montrent que cet

⁴⁹ Cf. p. 130 de ORSELLI Jean, *Energies nouvelles pour l'automobile. Op. Cit.*

⁵⁰ UTAC, rapport SERT 91.12.73.523.1833, 1991. Cité pp. 159-160 par ORSELLI Jean, *Energies nouvelles pour l'automobile. Op. Cit.*

⁵¹ Cf. p. 5 de HAUGER Anne, JOUMARD Robert, "Emissions de polluants du GPL". Colloque ONU-CEE, *Utilisation du gaz naturel comprimé (GNL), du gaz naturel liquéfié (GNC) et du gaz de pétrole liquéfié (GPL) comme carburant moteur*, Kiev, Ukraine, 23-27 septembre 1991. 11 p.

objectif est réalisable sous condition de lancer et de soutenir un réseau de distribution de taille minimale ainsi que de le promouvoir par une taxe moins élevée. Les avantages du GPL et du GNV sont évidents d'un point de vue indépendance énergétique puisqu'ils permettent de varier les sources et que leurs prix sur les marchés internationaux sont actuellement inférieurs à ceux du pétrole - à énergie équivalente. Leurs similarités avec l'essence leur confèrent une très bonne adaptabilité, à un coût acceptable, sur les véhicules traditionnels. Enfin, d'un point de vue environnemental, ils permettent des améliorations sensibles, avec de très bonnes performances pour le GNV, même si les normes de 1993 contraignent à l'installation d'un pot catalytique complémentaire.

c) *Le véhicule électrique*

La propulsion électrique pour l'automobile n'est pas une idée neuve puisque sa première application remonte à 1889 avec la *Jamais Contente* de l'ingénieur Jenatzy qui dépassait déjà les 100 km/h. Cependant, les contraintes techniques posées par les batteries n'ont jamais permis à ce type de véhicule de connaître le succès des véhicules thermiques et on peut se demander si elles ne risquent pas de faire à nouveau capoter les tentatives pour le remettre au goût du jour.

Le renouveau des études autour du véhicule électrique est lié à la convergence d'intérêts écologiques, politiques et économiques. Le premier argument est bien sûr d'ordre environnemental : le véhicule électrique correspond très exactement au *Zero Emission Vehicle*, tel qu'il a pu être défini dans le cadre des lois sur la pollution atmosphérique en Californie. L'électricité apparaît également dans certains pays comme une possibilité pour réduire leur dépendance énergétique vis-à-vis du pétrole : ainsi en est-il de la France avec le nucléaire ou des Etats Unis pour lesquels moins de 6% de l'électricité est produite à partir du pétrole. Enfin la nuit est la période idéale pour recharger ces véhicules, car cette opération reste très longue (de l'ordre de 6 à 8 heures en chargement "normal" qui n'abîme pas les batteries) : les producteurs d'électricité, comme EDF en France, ont donc intérêt à promouvoir un véhicule qui tout à la fois leur ouvre un nouveau marché et contribue à éponger les surplus non stockables d'énergie nocturne. Enfin les constructeurs automobiles ont intérêt à se placer sur ce créneau qui peut leur permettre de diversifier leur production mais surtout leur confère un label vert qu'ils ne veulent pas négliger.

Cependant ce premier bilan doit être relativisé. D'un point de vue environnemental, l'avantage de la voiture électrique reste essentiellement local. La Californie pousse à son développement parce que la production d'électricité, surtout basée sur le gaz, est à 80% réalisée à l'extérieur de ses frontières. En France le nucléaire change la nature du problème. D'autres pays comme l'Allemagne Fédérale restent beaucoup plus réservés car leur électricité provient de centrales thermiques polluantes. Une autre source d'incertitude réside dans le recyclage des batteries qui contiennent des produits très toxiques tels que le plomb ou le cadmium et qui doivent être changés tous les 4 ou 5 ans environ.

Une autre interrogation réside dans le succès que peut connaître le véhicule électrique auprès du grand public. Deux points essentiels risquent de freiner son expansion, avec d'une part des contraintes relativement lourdes liées aux batteries et d'autre part un prix d'achat élevé.

Un véhicule électrique dispose aujourd'hui d'une autonomie de l'ordre de 80 km. Il faut ensuite recharger ses batteries, ce qui nécessite plusieurs heures dans des conditions normales, même s'il existe des possibilités de recharge rapide sur bornes distributrices à haute tension. Ces contraintes d'ordre technique restreignent la clientèle potentielle à l'ensemble des ménages multimotorisés, possédant un garage (pour la recharge) et n'ayant pas de parcours quotidiens trop longs⁵². Cependant, au moins autant que fixer les contraintes objectives conditionnant les possibilités de choix d'un ménage, il faut souligner la petite révolution culturelle que l'usage d'un véhicule électrique implique. En effet l'adaptation au quotidien à ces contraintes passe aussi par une autre gestion du parc automobile des ménages, avec des échanges de véhicules en fonction de l'emploi du temps et de la distance à parcourir pour chaque personne dans la journée : ceci nécessite un effort de planification qui entre en contradiction avec la liberté de mouvements apportée par les véhicules individuels classiques et amène à différencier nettement le produit "véhicule électrique" par rapport à l'automobile⁵³.

Les contraintes d'usage d'un véhicule électrique entrent en contradiction avec son prix. En effet son coût d'achat est supérieur de 20 à 30% à celui d'un véhicule thermique équivalent, sans compter les batteries qu'il faut changer régulièrement. A ce surcoût initial, il est opposé le faible coût d'usage avec une électricité ne subissant pas de TIPP et proposée à des tarifs avantageux aux heures creuses de nuit, ainsi qu'une très bonne longévité du moteur et un coût d'entretien très faible. Certains calculs montrent que surcoût initial et économies d'usage tendent à s'équilibrer, plaçant le véhicule électrique entre véhicules à essence et véhicules diesel⁵⁴.

En l'absence de progrès technologique prévisible même à long terme en matière d'autonomie et de temps de recharge, le véhicule électrique restera toujours quelque chose de différent d'une voiture telle qu'on peut la concevoir aujourd'hui. De ce fait l'expansion du marché du véhicule électrique est aujourd'hui essentiellement conditionnée par les commandes passées par les administrations et grandes entreprises pour certains usages réguliers et reste donc limitée à un créneau très précis. Son développement à terme passe par un soutien politique et financier sans faille, sous forme de promotion médiatique, certes, mais aussi de mise en place d'un réseau de distribution, de subventions à l'achat et

⁵² Notons que lorsqu'on donne un contour plus précis à cette première définition, le marché potentiel est vite à dimension variable, les estimations allant de 2% à 28% du marché :

"En se limitant aux seuls banlieusards (30% des ménages) disposant de deux voitures (25%), d'un pavillon (50%), et allant travailler chaque jour à plus de 10 km (30%), le marché potentiel semble très étroit (2% du marché)". Georges HONORE, "Voiture électrique urbaine : un bilan social positif, mais une fiscalité inadaptée". *Note de synthèse OEST*, avril 1994. 4 p.

A un autre extrême, des chercheurs américains estiment qu'aux USA, la clientèle potentielle représente 27,9% du marché de l'automobile si on considère l'ensemble des ménages propriétaires de leur logement possédant un garage et au moins deux voitures et dont la distance du trajet domicile-travail (A-R) n'excède pas le niveau d'autonomie d'un véhicule électrique. Cf. Nesbitt K.A., KURANI KS DELUCHI M.A., "Home recharging and household electric vehicle market : a near term constraint analysis", *Annual Meeting of the Transportation Research Board*, janvier 1992. 33 p.

⁵³ Pour les problèmes d'adaptation face aux contraintes du véhicule électrique, voir FAIVRE D'ARCIER Bruno, NICOLAS Jean-Pierre, *Attitudes et comportements des ménages face à la voiture électrique - premiers résultats d'une enquête interactive de préférences déclarées*. Bron : INRETS, recherche pour le compte de l'ADEME, janvier 1995. 105 p.

⁵⁴ Georges HONORE, "Voiture électrique urbaine : un bilan social positif, mais une fiscalité inadaptée". *Op. Cit.* Selon l'auteur, il faudrait ajuster la fiscalité du gazole sur celle du super pour rendre la propulsion électrique compétitive.

d'absence de taxe récupérant le manque à gagner de la TIPP : il reste donc à savoir si la volonté politique ira jusque là, sachant que le bilan énergétique et environnemental de ce type de véhicule n'est pas apprécié de la même façon dans tous les pays.

2.1.3. Les développements technologiques à long terme

La solution des énergies alternatives, gaz, carburants verts ou électricité, ne semble donc pas devoir amener de changements radicaux au sein du parc automobile. Les contraintes spécifiques de chacune d'entre elles conduisent le plus souvent à considérer leur développement comme marginal, assurant simplement une base technologique de transition aux véritables changements qui pourraient voir le jour d'ici 20 ans, avec les véhicules bi-motorisés, le moteur à pile à combustible et le moteur à hydrogène.

a) Véhicules bi-motorisés : l'hybride et le bi-énergie.

La conception d'un véhicule à deux moteurs, l'un électrique, l'autre thermique, conduit à deux alternatives qui ont chacune été explorées par les constructeurs, avec la possibilité d'un montage des moteurs en série - véhicule hybride - ou en parallèle - véhicule bi-énergie. Dans les deux cas, l'idée est de privilégier la propulsion électrique en ville tout en conservant l'autonomie et la liberté conférée par le moteur thermique en rase campagne ou en péri-urbain.

Dans le cas du véhicule bi-énergie, les deux moteurs sont dissociés et l'électricité provient uniquement de batteries indépendantes. Avec le véhicule hybride, le moteur thermique est électrogène. De plus, son rendement est amélioré grâce à la souplesse du moteur électrique sur les périodes de ralenti, d'arrêt et de décélération, ainsi que sur la récupération des énergies de freinage. Enfin des progrès récents enregistrés dans le domaine de l'électronique de puissance devraient permettre d'optimiser encore le mélange des puissances issues du moteur thermique et des accumulateurs.

Pour ces types de véhicules, l'installation des deux moteurs se répercute autant sur les prix que sur les contraintes techniques de volume et de poids. Sur ce plan le véhicule hybride apparaît plus intéressant car l'exploitation simultanée des moteurs permet d'en réduire la taille et le prix. Les recherches semblent donc s'orienter sur son développement, d'autant que l'utilisation optimale du moteur thermique permet d'améliorer considérablement ses performances environnementales.

b) La pile à combustible

Contrairement au cas du véhicule électrique actuel, ce système n'a plus besoin de batteries d'accumulateurs pour stocker une électricité fabriquée par ailleurs. Celle-ci est produite directement à bord du véhicule par récupération de l'énergie de réactions électrochimiques qui sont générées au fur et à mesure des besoins lors des déplacements. La logique de fonctionnement serait similaire à celle des véhicules hybrides, avec un moteur produisant l'énergie primaire et un moteur électrique assurant la souplesse nécessaire à la circulation automobile. Aucune retombée à court terme n'est attendue de cette technologie car elle reste complexe et nécessite actuellement des quantités

importantes de catalyseurs, principalement le platine, qui la rendent économiquement inintéressante.

c) Moteur à hydrogène

La technologie permettant de récupérer l'énergie de l'hydrogène (H₂) grâce au moteur thermique semble relativement au point aujourd'hui. Les deux problèmes principaux proviennent de la fabrication et du stockage de ce combustible : d'une part l'hydrogène n'existe pas à l'état brut et se produit essentiellement par électrolyse de l'eau ce qui revient très cher (5 à 6 fois le prix du gazole) ; d'autre part le volume d'hydrogène nécessaire pour obtenir des performances équivalentes aux autres combustibles limitent fortement les possibilités d'autonomie d'un véhicule équipé de ce type de moteur (50 litres d'essence correspondent à 750 litre d'hydrogène comprimé, 300 litres liquide, 250 litres d'hydrures). Par contre ses performances en matière de pollution atmosphérique sont excellentes, avec simplement des émissions de vapeur d'eau et des oxydes d'azote en faible quantité.

2.2. Les hypothèses de composition du trafic et d'émissions unitaires des automobile retenues aux horizons 2000 et 2010

Le tour d'horizon qui vient d'être fait des pistes technologiques à moyen et long terme ne permet certainement pas d'établir une prévision de ce que représentera la pollution automobile en 2000 et 2010. Nous l'avons déjà dit, la simple considération des évolutions techniques ne permet pas d'avoir une idée des éventuels changements culturels et organisationnels de la société urbaine, qui peuvent être profonds en 15 ans, surtout si la crise économique persiste ou si les inquiétudes écologiques se renforcent.

En matière d'évolution de la structure du parc automobile, on peut cependant supposer que les grandes dynamiques à l'oeuvre ces dernières années conservent suffisamment d'inertie pour que les projections à l'horizon 2000 restent raisonnables. La tendance devrait être essentiellement concentrée sur la redistribution des parts de trafic entre véhicules essence et diesel en faveur de ces derniers. Par contre pour 2010 le succès éventuel de certaines des options technologiques présentées peut modifier de manière sensible la structure du parc. Les modèles actuels montrent que la progression du diesel au détriment de l'essence devrait se ralentir, avec d'une part une convergence autour d'une répartition de 60% de véhicules essence et 40% de diesel et d'autre part une diminution continue du surplus de kilométrage parcouru par les véhicules diesel par rapport à l'essence (même si ce dernier élément est moins sensible en milieu urbain si on suppose que ce surkilométrage est surtout réalisé en interurbain)⁵⁵. Il reste par contre difficile d'indiquer quel sera le succès relatif de telle ou telle nouvelle technologie. Nous avons donc préféré agir en deux temps avec d'un côté l'établissement d'un scénario de référence à partir duquel

⁵⁵ Nous faisons notamment référence au travail de GALLEZ Caroline, *Modèles de projection à long terme de la structure du parc et du marché de l'automobile*. Op. Cit. voir notamment les pp. 204-287 consacrées aux perspectives à long terme de la structure et du renouvellement du parc automobile. Voir également pp. 15-18 de JOUMARD Robert, LAMBERT Jacques, *Evolution des émissions de polluants par les transports en France de 1970 à 2010*. Bron : INRETS, rapport INRETS n°143, juillet 1991. 66 p.

s'effectue l'essentiel de la réflexion sur les poids relatifs des facteurs retenus et de l'autre la fixation *a priori* d'objectifs pour donner une idée des taux de pénétration minimum des nouvelles technologies permettant de les atteindre.

Le scénario de référence que nous avons retenu est essentiellement basé sur les tendances d'évolution des véhicules thermiques traditionnels. Nous avons en effet supposé que la percée éventuelle d'une autre technologie restera trop marginale pour affecter de manière sensible les estimations d'émissions de polluants atmosphériques, soit que cette percée reste trop timide, soit que les améliorations qu'elle apporte dans ce domaine sont faibles par rapport aux performances d'un parc de véhicules thermiques classiques de 2010. Ce scénario de base est donné dans le tableau ci-dessous, sachant que le détail des hypothèses qui nous ont permis d'y aboutir figurent en annexe I, §3. :

Tableau 5 : Répartition des trafics des véhicules légers essence et diesel aux différents horizons de simulation (1990, 1994, 2000 et 2010)

%	1990	1994	2000	2010
<i>Essence</i>	≈85*	76	64	58
<i>dt catalysées</i>	≈0	23	45	58
<i>Diesel</i>	≈15*	24	36	42

* compte tenu des répartitions par cycle de conduite.

Les émissions unitaires retenues suivant le cycle de conduite ont été supposées constantes pour les véhicules classiques non catalysés sachant que d'une période sur l'autre ces émissions ont tendance à baisser mais que leur proportion dans le trafic (et donc dans les émissions totales) diminue fortement. Les émissions unitaires des véhicules à essence équipés d'un pot catalytique ont été établies à partir des travaux de l'INRETS⁵⁶. De même les émissions unitaires des véhicules diesel sont basées sur les données initiales de 1990 que nous avons fait évoluer jusqu'en 2010 sur la base des hypothèses de Joumard et Lambert, réactualisées à partir des prescriptions européennes dites "Euro96" qui permettent une diminution sensible des émissions de poussières⁵⁷. L'ensemble des données chiffrées figurent en annexes I, §3.1.2. et §3.1.3., accompagnées des hypothèses de calculs qui ont été retenues.

Concernant l'impact à long terme du renouvellement technologique, plutôt que de bâtir des scénarios extrêmes fixant les fourchettes du vraisemblable, nous avons préféré rechercher des taux de pénétration minimum dans le trafic urbain pour que les technologies alternatives soient susceptibles de modifier de manière sensible l'évolution "normale" que devraient procurer les améliorations du parc de véhicules thermiques traditionnels. Suivant le type d'évolution enregistrée sur chaque polluant nous avons envisagé soit une poursuite

⁵⁶ Ces données ont été établies à partir des comparaisons de JOURMARD Robert, VIDON Robert, PRUVOST Christophe, TASSEL Patrick, DE SOETE Gérard, "Evolution des émissions de polluants des voitures particulières lors du départ à froid". Bron : INRETS, préactes du 3^{ème} colloque internationale *Transports et pollution de l'air*, Avignon, 6-10 juin 1994. pp. 161-168.

⁵⁷ Voir JOURMARD Robert, LAMBERT Jacques : *Evolution des émissions de polluants par les transports en France de 1970 à 2010*. Op. Cit. Ainsi que DRON Dominique, COHEN de LARA Michel : *Pour une politique soutenable des transports*. Paris : La Documentation Française, collection des rapports officiels, septembre 1995. 327 p.

des tendances calculées entre 1994 et 2000 sur la période suivante, soit une stabilité des émissions entre 1994 et 2010 (cas où l'on enregistre de fortes progressions : poussières et CO₂). La technologie alternative retenue est la propulsion électrique. Les autres évolutions envisageables présentées au cours de cette partie ont été considérées soit comme assimilables à des options intermédiaires, leur prise en compte n'apportant donc que peu de chose par rapport à ce qui pourra être montré par ailleurs, soit comme ne pouvant connaître de développement suffisamment fort pour être intéressantes d'ici 2010.

Il faut souligner également l'absence totale de prise en compte des trafics poids-lourds pour établir les évaluations. En effet, compte tenu des incertitudes existant encore aujourd'hui ainsi que de la sensibilité des résultats à une altération des caractéristiques PL, nous avons préféré ne pas retenir leur trafic pour des projections à long terme. Leur part a donc été retirée des trafics obtenus après affectation sous DAVIS, sachant que nous avons estimé que celle-ci pouvait être considérée comme constante entre 1990 et 2010 sans que les résultats d'évaluation des émissions du trafic automobile en soient grandement modifiés (voir justification en annexe I, §3.3.).

Enfin, il est certain que notre indicateur de la pollution atmosphérique générée par le trafic routier reste trop statique pour pouvoir être complètement pertinent à l'horizon 2010 :

- Des sept types de polluants qui constituent cet indicateur général, le plomb n'aura plus aucune valeur puisque les carburants n'en contiendront plus. Par contre d'autres types de polluants feront leur entrée en scène, soit du fait d'une augmentation de leurs émissions liées aux nouvelles technologies utilisées (par exemple certains hydrocarbures aromatiques polycycliques -HAP- utilisés comme adjuvants dans les nouveaux carburants sans plomb), soit parce que des travaux auront mis en évidence la nocivité de certains rejets déjà existants (les effets sur les personnes et les plantes des NO_x transformés en ozone étaient par exemple négligés il y a 10 ans).
- De plus cet indicateur reste très pointu et ne rend pas compte de toutes les répercussions environnementales des transformations en matière d'émissions atmosphériques des véhicules : les réponses apportées par le pot catalytique ou la voiture électrique posent des problèmes de traitement en fin d'usage du pot lui-même ou des batteries ; de même la production végétale permettant d'introduire 5% de diester dans le gazole conduit à des utilisations d'engrais dommageables pour les nappes phréatiques. Notre travail reste donc très sectoriel et n'a pas vocation à fournir de bilan écologique global des nouvelles technologies utilisées au sein du trafic.

2.3. Les progrès en matière de nuisances sonores et les hypothèses retenues pour les scénarios

Les questions d'environnement sonore ne connaissent pas aujourd'hui le même succès que celles liées à la pollution atmosphérique même si, nous l'avons vu au chapitre 2, les mesures économiques des nuisances qui y sont liées conduisent le Commissariat Général du Plan à retenir des valeurs sensiblement équivalentes (respectivement 0,3 et 0,4% du PNB). Ce relatif retrait médiatique n'a cependant pas empêché de nombreux progrès d'être réalisés dans ce domaine.

Les émissions sonores d'un véhicule proviennent de nombreuses sources dont la contribution est plus ou moins forte dans le niveau global du bruit émis et dépend du contexte général et notamment de la vitesse. Ainsi, les améliorations technologiques portent sur différents points et leurs conséquences sont fortement liées à la vitesse envisagée comme l'indique le tableau suivant :

Tableau 6 : Contributions approximatives des différentes sources à la somme totale de la puissance acoustique des véhicules à moteur à explosion.

	Voies urbaines		Vitesse élevée	
	VL	PL	VL	PL
Admission	*	*		
Echappement	**	*	*	**
Bloc moteur	*	***		**
Boîte vitesse / transmission	variable			
Ventilateur		**		
Contact pneu/chaussée	* à **		***	

* contribution importante, ** contribution très importante, *** contribution majeure.

Source : C. Lamure, 1995. Op. Cit. p. 47.

L'ensemble des sources de bruit présentées dans ce tableau est communément distingué en deux classes, l'une rassemblant les sources internes aux véhicules, l'autre relative au contact entre pneumatique et chaussée. On peut également relever que pour le cas des véhicules légers qui nous intéresse plus spécifiquement ici, les sources intrinsèques jouent un rôle important pour les vitesses faibles et moyennes tandis qu'à vitesses élevées, ce sont les émissions liées au contact pneu/chaussée qui prédominent nettement.

a) Le bruit intrinsèque aux véhicules

Au niveau des véhicules de nombreux progrès ont été réalisés depuis les années 70, avec un renforcement progressif des normes en vigueur sur les nouveaux modèles⁵⁸. Il est probable que ces normes continueront à évoluer d'ici 2010, sans qu'il existe pour autant une programmation et des niveaux cibles disponibles aujourd'hui :

Tableau 7 : Evolution de la réglementation européenne sur le bruit intrinsèque des véhicules

	Niveaux sonores maximum admissibles				
	1970	1982	1985	1989	1995
Véhicules légers	82	80	80	77	74
Véhicules utilitaires (2t < MTA < 3,5t)	89	82/84	81	79	77
Véhicules lourds (MTA > 3,5t ; P > 160 kW)	91	88	88	84	80

Source : R. Sanejouand, 1994.

⁵⁸ Voir par exemple SANEJOUAND Renaud, "Enjeux, moyens et perspectives de la lutte contre le bruit routier", *Revue Générale des Routes et des Aéroports*, Hors Série 2-1994. pp. 16-18.

Une évolution radicale concerne le véhicule électrique puisque son moteur est totalement silencieux et qu'il n'est pas équipé de boîte à vitesse. Au niveau des moteurs à explosion des progrès sensibles ont pu être réalisés sur certains véhicules diesel grâce à l'encapsulation du moteur. Une voie technologique envisagée concerne le contrôle actif du bruit. Son principe repose sur la génération d'un signal acoustique de même amplitude et de même contenu fréquentiel que le bruit à éliminer, mais en opposition de phase avec lui. Des systèmes de silencieux électroniques de ce type placés au niveau de l'échappement du moteur permettraient tout à la fois des gains d'une dizaine de dB(A) à 2 mètres de l'échappement et une légère amélioration du rendement énergétique du moteur (2%) en supprimant les phénomènes de contrepression au niveau du pot⁵⁹.

Notons enfin que les exigences de plus en plus strictes en matière de bruit dans les pays nordiques, assorties d'incitations financières, ont permis le développement d'un marché du poids lourds silencieux : leurs émissions avoisineraient celles des véhicules légers actuels avec 77-80 db(A) pour un surcoût de 3 à 9% par rapport aux véhicules traditionnels équivalents⁶⁰.

Cependant ces progrès ne traitent qu'une partie des émissions sonores générées sur voirie urbaine et ne concernent pas celles liées aux vitesses élevées. De plus l'amélioration continue des technologies liées à la sécurité comme la tendance à l'augmentation des puissances ont permis une croissance des vitesses et une diminution des distances inter-véhicules sur les voiries rapides : le second aspect des émissions sonores du trafic routier, qui concerne le contact entre pneumatiques et chaussées et croit fortement avec la vitesse, devient donc aujourd'hui prédominant.

b) Le bruit lié au contact entre pneumatique et chaussée⁶¹

Des progrès sont sans doute possibles en matière de pneumatiques mais les contraintes posées par les exigences de résistance, de déformabilité et d'adhérence semblent limiter les gains possibles en matière d'émissions sonores.

Aujourd'hui ce sont essentiellement les revêtements routiers qui font l'objet d'études en matière d'amélioration du bruit du trafic routier, avec une attention particulière portée sur les enrobés drainants. Ce type de revêtement correspond à un empilement de gros granulats collés entre eux par un liant suffisamment performant pour permettre l'existence de vides dont la configuration ("tortuosité") et l'ampleur (jusqu'à plus de 25% de vide) peut varier. Conçus à l'origine pour drainer l'eau de pluie et améliorer ainsi le confort et la sécurité de conduite par mauvais temps, l'enrobé drainant s'est également révélé posséder d'excellentes qualités acoustiques en limitant la génération du bruit et en absorbant une partie des émissions sonores.

⁵⁹ Voir par exemple pp. 286-287 de LAMURE Claude, *Quelle automobile dans la ville ? Op. Cit.*

⁶⁰ Voir p. 46 de LAMURE Claude, *Quelle automobile dans la ville ? Op. Cit.* Pour les chiffres cités, l'auteur fait référence à une communication de JÄCKER M., ROGALL H., "Benutzervorteile für lärmane Lastkraftwagen - das Heidelberger Modell". Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 6/93 novembre 1993.

⁶¹ Voir BAR Pascal, DELANNE Yves, *Réduire le bruit pneumatiques-chaussées*. Paris : Presses de l'ENPC, 1993. 266 p. Cf également la revue *Déplacements* n°11, 1992, : "Bruit de contact pneumatiques/chaussées".

Il faut cependant souligner les limites actuelles de ces revêtements qui en restreignent l'usage essentiellement aux nouvelles infrastructures à fort débit et vitesses élevées. D'une part les surcoûts liés à ces types de produits ne permettent de dégager un bilan économique satisfaisant pour la collectivité que pour des voies à circulation importante. Cette contrainte économique conduit souvent à envisager la substitution des barrières anti-bruit par l'enrobé drainant : ceci permet alors à la collectivité de réaliser des économies à niveau de service plus ou moins équivalent en matière de bruit mais ne conduit par contre pas à une amélioration de l'environnement sonore des riverains.

D'autre part ces bétons poreux ont tendance à se boucher à l'usage, perdant alors leurs qualités d'absorption sonore. Sur la voirie rapide la croûte formée en surface se trouve brisée au fur et à mesure de sa formation par le passage des véhicules et la pression des pneus. Par contre sur les voiries urbaines plus lentes, encrassées de plus en profondeur par d'autres usages - stationnement, marchés, etc. -, les vitesses sont insuffisantes pour empêcher ce colmatage et les techniques actuelles de nettoyage se sont révélées peu efficaces ou trop chères. Les propriétés acoustiques des enrobés drainants sont ainsi annihilées en moins de deux ans sur les voiries urbaines lentes et d'autres formules de revêtement sont aujourd'hui à l'étude.

c) Des scénarios d'évolution des niveaux d'émissions sonores sont ils possibles pour 2010 ?

L'ensemble des informations fournies ci-dessus laisse entrevoir la complexité du problème consistant à tenter de bâtir un ou plusieurs scénarios raisonnables d'évolutions des niveaux sonores entre 1994, 2000 et 2010.

Au niveau des véhicules, il faut partir d'un bilan actuel de leurs émissions intrinsèques moyennes et prendre en compte l'effet de la législation sur les émissions à venir en fonction du taux de renouvellement du parc. On pourrait sans doute également prévoir un renforcement des normes dans les 15 prochaines années.

Suivant la montée des exigences collectives en matière de bruit les gains sur les pneumatiques, sans être très élevés, pourraient sans doute atteindre 1 à 2 dB, avec des effets qui se ressentiraient rapidement. Les réductions d'émissions permises par des revêtements absorbants sont sans doute conséquentes mais elles restent pour l'instant limitées aux axes les plus rapides. De plus ce sont essentiellement les nouvelles infrastructures qui sont concernées et l'on peut donc supposer que les effets de ces techniques resteront limités au niveau d'une agglomération.

Dès lors, compte tenu du nombre important de ces facteurs avec des ajustements temporels et géographiques différents, nous avons préféré ne pas travailler sur une base de scénarios "raisonnables" dont les résultats sont à comparer entre eux, tels que nous en avons construits en matière d'évolution des émissions atmosphériques. Notre choix a été de construire un objectif *a priori* et de rechercher quel type de scénario permet de l'atteindre lorsque l'on joue sur les deux paramètres essentiels que sont l'évolution des émissions à vitesse élevée et à vitesse faible. L'objectif retenu a été celui d'un simple maintien de la situation actuelle et l'analyse a consisté à observer la manière dont jouent les paramètres pour atteindre ou diverger de cet objectif. Des éléments chiffrés et plus précis de la méthode figurent dans la partie suivante.

2.4. Conclusion

Les possibilités de renouvellement technologique du parc automobile et de son environnement sont multiples. Elles peuvent conduire à des schémas d'émissions du trafic extrêmement diversifiés que notre scénario, centré sur une recomposition et une modernisation des véhicules essence et diesel traditionnels, ne montre pas.

Nous verrons cependant que les simples hypothèses de diésélisation du parc et de systématisation de l'équipement en pot catalytique des véhicules à essence conduisent à des changements importants dans la nature des émissions de polluants atmosphériques d'ici 2010. Le taux de pénétration d'autres véhicules, même totalement non polluants, devrait être très élevé pour prétendre pouvoir modifier sensiblement ces tendances. En matière de bruit, le problème risque essentiellement de se poser sur la diffusion du trafic sur l'ensemble du réseau du fait de la forte progression de la mobilité, que la seule mise en place de revêtements silencieux sur les nouvelles infrastructures sera loin de pouvoir traiter.

3. L'impact relatif des évolutions de la mobilité et des technologies sur les émissions atmosphériques et sonores de l'automobile en milieu urbain.

Les développements des deux parties précédentes mettent en balance les deux principaux facteurs dont les évolutions joueront un rôle prédominant dans la détérioration ou l'amélioration des émissions atmosphériques et sonores du trafic routier urbain des 15 prochaines années. Cependant cette première opposition ne permet pas de se rendre compte des évolutions possibles, qui nécessitent un détours calculatoire important. Elle a par contre été l'occasion de poser les hypothèses nécessaires aux calculs et d'en souligner les limites.

Cette partie consacrée à la mesure de l'impact relatif des évolutions de la mobilité et des technologies sur les émissions atmosphériques et sonores de l'automobile en milieu urbain se trouve donc maintenant cadrée et éclairée par un discours plus général qui en fixe les limites et les enjeux. Son exposé se déroule en trois temps avec tout d'abord un rapide point sur les méthodes de calcul retenues, puis la présentation des résultats obtenus en matière de pollution atmosphérique d'une part et de pollution sonore d'autre part.

3.1. Les méthodes utilisées

Comme nous avons déjà pu l'évoquer au cours de ce chapitre, deux méthodes ont été utilisées pour mesurer l'impact relatif des évolutions des différents facteurs sur les émissions polluantes et sonores.

a) Variations des valeurs d'un paramètre, toutes choses égales par ailleurs, et validation des résultats par comparaison sur plusieurs situations de référence différentes

La première renvoie à la logique déjà établie au cours des chapitres précédents et consiste à observer l'impact de la modification d'un facteur particulier toutes choses égales par ailleurs. Cependant, du fait des interactions entre les différents facteurs liées notamment aux phénomènes d'adaptations des itinéraires et de variations des émissions unitaires suivant les conditions de circulation, on peut toujours se demander si les conclusions auxquelles on aboutit avec une telle méthode ne restent pas dépendantes de la situation de référence et ne peuvent pas être la cause d'un ensemble d'attributs plus large que les seules modifications du paramètre analysé.

Pour éviter le plus possible ce risque, nous avons dans chaque cas retenu plusieurs situations de base différentes à l'intérieur desquelles le paramètre testé a varié suivant les mêmes valeurs. Seules les conclusions qui pouvaient être maintenues quelle que soit la situation de référence ont été considérées comme pertinentes et caractéristiques de l'effet du paramètre sur les émissions polluantes et sonores du trafic automobile.

b) Fixation d'un objectif a priori et analyse des valeurs du paramètre susceptible de le remplir

Une seconde méthode a été utilisée dans les cas où l'incertitude sur l'évolution d'un paramètre testé était trop forte pour disposer d'un scénario de référence consistant. Cela a été essentiellement le cas pour établir certaines hypothèses de situation technologique en 2010, avec d'une part les difficultés de prévision sur la percée des nouveaux types de véhicules et de propulsion au sein d'un parc traditionnel amélioré et d'autre part l'incertitude sur les progrès réalisables en matière de bruit routier.

Nous avons alors retourné la question initiale : "quel est l'impact de l'évolution de tel facteur par rapport à tous les autres sur les émissions polluantes et sonores du trafic automobile ?" pour nous demander : "quelle devrait être l'évolution de ce facteur par rapport à tous les autres pour qu'elle puisse avoir tel impact, fixé *a priori*, sur les émissions polluantes et sonores du trafic automobile ?". La méthode a donc consisté à fixer un objectif *a priori* et à rechercher les variations de valeurs du ou des paramètres propres au facteur observé, qui permettent de l'atteindre. Ceci nous a dès lors permis de nous rendre compte de l'ampleur des évolutions nécessaires pour que l'impact de tel ou tel facteur soit sensible et de discuter du réalisme ou non de ces évolutions.

3.2. L'impact des évolutions du trafic automobile sur les émissions de polluants atmosphériques

L'analyse de l'impact de l'évolution du trafic sur les émissions de polluants atmosphériques se déroulera en trois temps. Les effets de l'évolution de la mobilité automobile et ceux de l'introduction des technologies nouvelles seront repris séparément avant de les comparer entre eux et de tenter de mieux cerner les tendances enregistrées lorsque tout évolue en même temps.

3.2.1. Une forte sensibilité aux hypothèses de mobilité automobile

La sensibilité des émissions polluantes à l'évolution de la mobilité automobile ne tient pas simplement à l'augmentation du nombre de déplacements. Le chapitre précédent a été l'occasion de mettre en évidence le rôle des adaptations d'itinéraires, de l'effet direct de la dégradation des conditions de circulation sur les émissions unitaires, de l'impact du renouvellement du réseau que les hausses de trafic attendues suscitent, etc. C'est donc l'ensemble de ces éléments que nous allons maintenant reprendre pour comprendre les résultats obtenus lorsque l'on affecte successivement les trois matrices de déplacements 1994, 2000 et 2010, toutes choses égales par ailleurs - *i.e.* à réseau et parc constant dans un premier temps, puis à parc constant simplement .

a) L'évolution de la mobilité automobile, ses liens avec les conditions de circulation et la répartition du trafic sur le réseau routier

L'analyse des effets environnementaux de la hausse prévue de la mobilité automobile aux horizons 2000 et 2010 touche à plusieurs facteurs liés entre eux, avec notamment l'évolution globale du trafic, mais aussi les conditions de circulation et la répartition du trafic sur le réseau.

L'évolution globale du trafic fait en grande partie appel aux développements du chapitre précédent. En effet sa traduction en terme de véhicules.kilomètres, qui nous intéresse plus directement pour rendre compte ensuite des évolutions en matière de pollutions atmosphériques et sonores, peut être décomposée en 4 grands facteurs : elle est en fait le produit de la hausse du nombre de déplacements et de la variation de leur longueur moyenne, sachant que cette dernière dépend des évolutions du réseau, de l'état de la circulation et de la structure des origines destinations.

Le tableau ci-dessous permet de mieux se rendre compte de l'importance relative de chacun de ces paramètres dans l'évolution du trafic total :

Tableau 8 : Le poids des différents facteurs explicatifs de l'évolution du trafic entre 1994 et 2010

	Nombre de déplacements	Distance moyenne par déplacement Réseau	Vitesse	O-D	Total
de 1994 à 2000	117,0	95,6	98,7	105,0	116,0
de 2000 à 2010	113,8	104,8	99,5	101,0	119,8
de 1994 à 2010	133,2	100,2	98,2	106,1	139,1

Ce tableau souligne l'importance essentielle de la hausse du nombre de déplacements parmi ces 4 facteurs pour expliquer les variations de trafic entre 1994, 2000 et 2010. Les autres paramètres ont une importance moindre et beaucoup plus variable : l'évolution du réseau a un impact significatif à chaque période mais ses effets s'annulent d'une période sur l'autre ; l'étalement urbain, tel qu'il est pris en compte dans les projections retenues, joue un rôle non négligeable pour l'horizon 2000 ; par contre les variations des conditions de circulation, décrites par la vitesse moyenne des véhicules sur le réseau, sont trop faibles pour affecter vraiment la distance moyenne parcourue. Notons cependant que

le calcul de la valeur de ces deux derniers paramètres est approximative - même si les chiffres en jeu restent de toute façon beaucoup plus faibles que ceux de l'évolution absolue du nombre de déplacements⁶².

L'évolution de la mobilité, telles qu'elle est envisagée dans les scénarios de 2000 et 2010, se traduit également par une dégradation sensible des conditions de circulation puisque la vitesse moyenne sur le réseau baisse nettement entre 1994 et 2000 (-13%) et se stabilise entre 2000 et 2010 du fait des développements autoroutiers (-5,5%). En plus de ses conséquences sur la répartition des flux sur le réseau routier, cette dégradation joue bien sûr directement sur les émissions unitaires des véhicules.

On peut également rappeler que l'évolution de la configuration du réseau tend progressivement à concentrer les flux automobiles sur les grands axes qui attirent plus de 37% du trafic en 2010 pour 30% en 1994, alors que la voirie secondaire et de rase campagne perd 4 points, passant de 29 à 25%. Soulignons cependant que cette tendance est donnée en mesure relative et ne signifie pas que les zones à vocation résidentielle se trouvent libérées de l'automobile. Ainsi, entre les deux dates extrêmes le trafic augmente de 39% sur l'ensemble du réseau, avec une forte croissance sur les autoroutes qui gagnent +72% de trafic pour une augmentation de 40% de l'offre de ce type de voirie (en terme de distance offerte). Par contre ces gains n'empêchent pas une nette densification de la circulation sur les autres voies, notamment les pénétrantes et le réseau secondaire (rase campagne incluse) dont le trafic augmente respectivement de 16 et 20% alors que leur longueur totale n'augmente pas ou peu (+0,5 et +4,6%).

b) La sensibilité des émissions de polluants atmosphériques

Le cumul des évolutions du trafic, des conditions de circulation et de la répartition sur le réseau, toutes directement liées aux hypothèses de mobilité retenues pour 1994, 2000 et 2010, a un impact important en matière d'émissions de polluants automobiles.

Cet impact peut être constaté en affectant successivement les trois matrices de déplacements sur un réseau fixé, à caractéristiques technologiques du parc constantes. Cependant les évolutions enregistrées ne sont pas forcément identiques selon le réseau utilisé car l'état initial de la circulation n'est pas le même. Ainsi le réseau de 1994 se trouve déjà en partie saturé avec la matrice 1994 alors que cela n'est pas du tout le cas avec celui de 2010 ; les conditions d'émissions unitaires s'en trouvent affectées et les évolutions des niveaux globaux d'émissions sont plus nettes dans le premier cas que dans le second.

Néanmoins, comme le montre le tableau suivant, l'impact de la mobilité sur les émissions reste très fort même dans le cas d'une affectation sur le réseau de 2010 pour lequel la dégradation des conditions de circulation est moins sensible qu'avec les autres réseaux : la forme générale des courbes d'évolution des émissions reste donc respectée quel que soit la variante utilisée du réseau lyonnais. Précisons de plus que l'état technologique du parc automobile est complètement indépendant des autres variables et n'a donc quasiment aucun impact sur les évolutions en valeur relative constatées ici (Cf. *Infra*).

⁶² Le calcul des chiffres de ce tableau figurent en annexe III, §6.1.

Tableau 9 : Impact des hypothèses d'évolution de la mobilité automobile à réseau et parc constants

	Affectation sur réseau 1994 -Emissions unitaires : Parc 1994- Matrice 1994 Mat. 2000 Mat. 2010			réseau (et parc) 2000 Mat. 2000 Mat. 2010		réseau (et parc) 2010 Mat. 2000 Mat. 2010	
	<i>NOx</i>	100	119	128	114	133	110	128
<i>Poussières</i>	100	130	155	117	148	111	133
<i>CO2</i>	100	132	157	119	151	111	134
<i>SO2</i>	100	132	158	120	153	111	135
<i>Plomb</i>	100	133	160	120	153	-	-
<i>CO</i>	100	138	171	123	163	113	139
<i>Hydrocarbures</i>	100	141	174	125	168	114	144

On retrouve la même sensibilité des différents polluants atmosphériques à l'évolution de la mobilité automobile que celle établie lors du précédent chapitre en augmentant le nombre de déplacements toutes choses égales par ailleurs. Les trois groupes établis alors peuvent être repris, avec des émissions de NOx peu sensibles, un groupe intermédiaire incluant les poussières, le CO2, le soufre et le plomb, ainsi que les deux polluants très réactifs que sont le CO et surtout les hydrocarbures. On doit souligner que se sont sur ces derniers que l'introduction du pot catalytique a l'effet le plus important, permettant ainsi de relativiser l'impact de la hausse de la mobilité. De même, le plomb devrait avoir complètement disparu de l'essence d'ici 2010.

On peut également tenter d'intégrer dans un même résultat l'impact des hypothèses d'évolution de la mobilité et du réseau routier, à caractéristiques du parc constantes.

Les chiffres ci-dessous sont établis à partir de l'affectation de chacune des matrices de déplacements sur le réseau routier de l'époque correspondante. Les caractéristiques du parc correspondent à celles de 1994, sachant que l'on enregistre des évolutions similaires avec les autres parcs (les variations sont de l'ordre de 0,1 à 0,2%, sauf pour les émissions de plomb absentes pour le parc de 2010 et celles de NOx qui connaissent une évolution plus forte - 142,4 avec le parc 2010 au lieu de 138,1 - du fait de la concomitance entre la hausse du taux de diésélisation du parc et de la baisse des vitesses - Cf. *Infra*).

Tableau 10 : Impact des hypothèses d'évolution de la mobilité et du réseau, à parc constant (1994)

	1994	2000	2010
<i>NOx</i>	100.0	114.3	138.1
<i>Poussières</i>	100.0	117.1	142.9
<i>CO2</i>	100.0	119.7	145.6
<i>SO2</i>	100.0	120.0	145.9
<i>Plomb</i>	100.0	120.2	146.3
<i>Hydrocarbures</i>	100.0	123.0	148.3
<i>CO</i>	100.0	122.5	148.5

Les écarts obtenus entre les différents types de polluants ont tendance à être plus resserrés que précédemment. La typologie établie en fonction des sensibilités aux conditions de trafic apparaît beaucoup moins évidente, même si la hiérarchie alors obtenue

est toujours respectée. En fait la raison est bien simple : le réseau routier, en s'adaptant dans la mesure du possible à l'évolution attendue de la mobilité automobile, évite une dégradation trop catastrophique des conditions de circulation et limite donc les surémissions des polluants atmosphériques les plus sensibles à la congestion. De même le maintien des vitesses permet aux émissions de NOx de progresser sensiblement de la même façon que les autres.

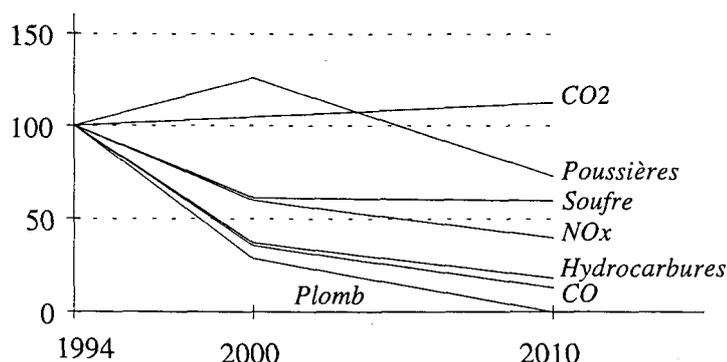
La fourchette d'évolution des émissions des différents polluants atmosphériques se resserre donc par rapport à celle des résultats précédents car les adaptations du réseau routier évitent une trop grande discrimination entre elles, qui serait liée à de fortes surémissions induites par une progression marquée de la congestion d'une période sur l'autre. Si l'on compare ces résultats à l'évolution du trafic - 1994 : 100, 2000 : 116, 2010 : 139 -, la progression des NOx est légèrement inférieure tandis que les autres types de polluants restent circonscrits à la limite supérieure de 7 et 11 points, pour 2000 et 2010 respectivement, tracée par la courbe des émissions d'hydrocarbures. Les risques de surémissions liés à un renforcement de la congestion semblent donc relativement bien contenus même s'ils se payent, nous l'avons vu, par un allongement significatif des itinéraires entre 2000 et 2010 du fait de l'évolution du réseau routier.

3.2.2. Le renouvellement de la composition du trafic et des technologies utilisées : un bilan contrasté suivant l'échéance et le type d'émission

a) Des évolutions contrastées suivant le polluant

Les améliorations technologiques apportées sur les automobiles et introduites dans le parc au fur et à mesure de son renouvellement sont censées répondre de manière plus qu'équivalente aux hausses importantes des émissions de polluants atmosphériques induites par la croissance attendue de la mobilité. Celles-ci vont, rappelons-le, de +38% pour le NOx à +48% pour les hydrocarbures entre 1994 et 2010 (Cf. tableau précédent) : une simple amélioration technologique permettant de diviser par 2 les émissions moyennes des véhicules ne permettrait guère qu'une stabilisation du niveau global des émissions du trafic automobile. Sur ce point, comme l'indique le graphique ci-dessous, les résultats sont mitigés car si certains polluants voient leurs émissions chuter (plomb, CO et hydrocarbures), les autres se réduisent de manière limitée par rapport aux hypothèses d'évolution du trafic (NOx, SO2 et poussières qui continuent même à augmenter jusqu'aux environs de 2000), le CO2 ayant quant à lui tendance à croître légèrement.

Graphique 4 : Effet de l'évolution de la composition du trafic à mobilité et réseau constants (1994) sur les émissions de polluants atmosphériques



L'ensemble des évolutions que ce graphique illustre sont liées à trois points essentiels :

- aux améliorations technologiques prévues et introduites sur les véhicules neufs, essence et diesel ;
- au taux de renouvellement du parc dans son ensemble, se traduisant par une forte inertie avant que les innovations ne fassent ressentir leur plein effet (par exemple en 2000, 30% des véhicules essence ne seront toujours pas équipés en pot catalytique et il n'y aura guère que 30% des véhicules diesel concernés par les normes dites "Euro96") et conduisant à un rééquilibrage progressif entre diesel et essence avec des conséquences importantes sur les types de polluants émis ;
- enfin, en plus des évolutions de la composition du parc il faut considérer l'évolution de l'usage des différents types de véhicules qui le constituent : ainsi la part croissante du diesel au détriment de l'essence se traduit par une tendance à l'homogénéisation de leurs usages ; les kilomètres annuels parcourus par les véhicules diesel sont en baisse et leur part dans le trafic progresse moins vite que ne le laisse supposer leur croissance dans le parc.

La hausse la plus inquiétante est bien sûr celle des émissions de poussières, qui est de l'ordre de +23% entre 1994 et 2000. Cependant, après ce pic, les effets de la mise en oeuvre des normes européennes sur les véhicules diesel se font progressivement sentir, permettant une chute de plus de 50% des émissions de ce polluant sur la période suivante - soit une baisse globale de 30% entre 1994 et 2010 (Cf. graphique ou annexe III, §4., pour les chiffres en valeur absolue). On peut donc insister sur le temps nécessaire pour qu'une réglementation sur des véhicules neufs commence à être efficace. Même en la supposant bien appliquée et respectée, les fortes inerties induites par la nécessité de renouveler le parc automobile implique un certain temps de latence. Cette baisse des poussières est également ralentie par la forte diésélisation du parc entre 1990 et 2000, qui se poursuit d'une manière plus douce sur la décennie suivante.

Le fort allègement de la teneur en soufre du gazole prévue en 1996 (taux divisé par 6 par rapport au début 94) permet d'enregistrer une baisse significative de ce type d'émission à trafic constant entre 1994 et 2000. Par contre si aucune amélioration n'est prévue concernant la teneur en soufre de l'essence et du gazole après 1996, la baisse des émissions unitaires de SO₂ reste limitée à -38% entre 1994 et 2010, en moyenne par véhicule.

L'évolution des émissions de NOx est, au contraire, contrariée par la hausse de la part du diesel dans le trafic. En effet, alors que l'équipement progressif en pot catalytique des véhicules à essence permet de réduire leurs émissions sur ce type de polluant (-78% pour un véhicule équipé et à moteur chaud), la contribution croissante des véhicules diesel, passant de 10 à plus de 35% entre 1994 et 2010, ralentit nettement la baisse que l'on pourrait attendre. En effet malgré un taux d'émission relativement bas, les véhicules diesel émettent entre 1,5 à 5 fois plus de NOx que les véhicules à essence catalysés en cycles urbains (le rapport monte jusqu'à 8 en cycle "urbain lent 2") et l'introduction des normes imposées par les normes Euro96 ne semble pas permettre un réel progrès. Leur progression au sein du trafic automobile ne permet dès lors qu'une baisse de 58% de ce type d'émissions.

Le CO2 progresse légèrement à trafic constant et enregistre +6% entre 1994 et 2010. Les véhicules diesels émettant plutôt moins de gaz carbonique que les véhicules à essence, leur part croissante dans le trafic devrait plutôt contribuer à faire baisser ces émissions - même si leurs émissions unitaires ont été supposées stables sur toute la période. Par contre les surémissions provoquées par l'installation du pot catalytique sur les véhicules à essence, de l'ordre de 20%, ont un fort impact et permettent d'expliquer la légère augmentation du CO2 malgré la baisse de la proportion de véhicules à essence dans le trafic.

Enfin les hydrocarbures, l'oxyde de carbone et le plomb bénéficient largement des normes d'émissions de 1993 imposant la mise en place du pot catalytique sur les véhicules à essence. Entre 1994 et 2000, leurs émissions baissent respectivement de 80, 85 et 100%. Le plomb aurait de toute façon disparu des émissions automobiles du fait de son remplacement progressif dans l'essence par d'autres produits (dont nous n'avons pas tenté d'évaluer les émissions). Remarquons aussi que la totalité de cette baisse est à attribuer à la mise en place du pot catalytique sur les véhicules à essence, ces derniers étant les émetteurs quasi-exclusifs de ces polluants.

La diésélisation du parc et du trafic automobile apparaît comme un des facteurs explicatifs les plus importants de l'évolution des émissions de polluants atmosphériques. On peut retracer l'évolution de son impact au sein du tableau suivant - que l'on peut d'ailleurs lire "en creux" pour retrouver l'impact de certaines évolutions des véhicules essence :

Tableau 11 : Evolution de la part du diesel dans les émissions de polluants atmosphériques, à trafic constant.

	1994	2000	2010
<i>Part du diesel dans le trafic VL</i>	0.24	0.36	0.42
<i>Part du diesel dans les émissions de :</i>			
<i>Poussières</i>	1.00	1.00	1.00
<i>CO2</i>	0.25	0.36	0.40
<i>NOx</i>	0.11	0.25	0.37
<i>SO2</i>	0.35	0.14	0.17
<i>Hydrocarbures</i>	0.02	0.05	0.07
<i>CO</i>	0.01	0.03	0.06
<i>Plomb</i>	0.00	0.00	-

Soulignons enfin que l'ensemble des évolutions ainsi enregistrées dépendent d'un trafic dont les caractéristiques ont très fortement évolué et pour lequel les tests réalisés au cours du chapitre 3 s'avèrent caduques. Une nouvelle série de tests a donc été effectuée sur la sensibilité des résultats aux hypothèses de proportion de véhicules circulant à froid et de véhicules diesel au sein du trafic (Cf. annexe II, §6.).

Il apparaît que les très fortes surémissions à froid des véhicules équipés d'un pot catalytique rend les évaluations de CO et d'hydrocarbures très sensibles à la valeur retenue pour ce paramètre : elles varient de 1/2 point lorsque la proportion de véhicules roulant à froid est modifiée de 1 point. La chute de ces polluants étant très forte, nous ne pensons pas qu'il faille la remettre en cause ; par contre il existe une marge d'incertitude indéniable introduite par ce paramètre.

Par ailleurs les hypothèses concernant le taux de diésélisation du trafic affectent directement les estimations d'émissions de poussières : le rapport est de 1 pour 1 puisque seuls les véhicules diesel en émettent. Notons également que la variation du trafic diesel, en affectant celui des véhicules à essence, modifie les niveaux d'émissions propres à ce dernier. Cette sensibilité reste cependant plus limitée, avec un maximum de 1/4 pour 1 dans le cas des émissions de CO.

A cette incertitude introduite par le poids des véhicules à froid ou des véhicules diesel au sein du trafic, il faut rajouter celle liée à l'efficacité des technologies mises en oeuvre et du bon respect des réglementations en vigueur. Il existe là aussi une source de forte variabilité des résultats que nous n'avons pas tenté de mesurer.

b) Une efficacité du parc marginalement décroissante avec le temps.

Après avoir retracé l'évolution générale des différents types de polluants automobiles entre 1994 et 2010, on peut également souligner le tassement relatif qui s'observe entre les deux périodes 1994-2000 et 2000-2010. Le facteur explicatif principal tient au ralentissement de l'évolution envisagée de la structure du parc :

- après une progression très nette, les véhicules diesel semblent devoir trouver leur niveau d'équilibre au sein du trafic, leur part augmentant de 50% sur 6 ans entre 1994 et 2000 pour seulement 17% sur 10 ans entre 2000 et 2010 ;
- au niveau des véhicules à essence l'introduction du pot catalytique est déjà en grande partie accomplie en 2000 avec 72% des véhicules catalysés et l'impact de l'équipement des 28% restants au cours des 10 années suivantes, sans être négligeable, est moins important.

Ce constat conduit d'ailleurs à remarquer que les hypothèses retenues à propos de l'évolution des technologies et de la composition du trafic débouchent sur une stabilisation des caractéristiques d'émissions du trafic automobile, à kilométrage constant et pour les polluants observés. Le trafic final est en effet constitué de véhicules à essence équipés à 100% de pot catalytique et d'une proportion de véhicules diesel établie à un niveau légèrement supérieur à 40% en milieu urbain. De plus nous n'avons pas envisagé d'évolution des performances du pot catalytique sur les 15 années à venir tandis que le parc de véhicules diesel est supposé s'adapter progressivement aux normes européennes actuelles.

Il apparaît dès lors intéressant de s'interroger sur les améliorations susceptibles d'être apportées aux caractéristiques de ce parc 2010 qui couvre une hypothèse haute d'émissions de polluants atmosphériques par le trafic automobile.

On peut tout d'abord noter que les efforts à porter sur l'amélioration de l'impact environnemental du diesel devraient principalement se concentrer sur la question des émissions de poussières, ce d'autant plus que le reste du bilan de ces véhicules est satisfaisant. La mise au point de pots catalytiques performants sur les moteurs utilisant des mélanges pauvres permettrait également, à terme, d'avoir un impact significatif sur les émissions de NOx.

Il faut par contre souligner que les progrès enregistrés entre 1994 et 2000 seront difficiles à reconduire sur les dix années suivantes. Ainsi, comme l'indique le tableau ci-dessous, pour que le taux de baisse annuel des émissions enregistré entre 1994 et 2000 se perpétue sur la période 2000 à 2010 pour les hydrocarbures, le CO, les NOx et le SO₂, il faudrait un renouvellement important du parc avec des véhicules absolument non polluants pour l'atmosphère, de type véhicule électrique. De même les proportions restent très élevées pour ramener les émissions de poussières à leur niveau de 1994 si les véhicules diesel conservent leurs performances moyennes de 2010 - alors même que le respect complet des normes mises en place aujourd'hui devrait avoir un effet beaucoup plus sensible.

De tels chiffres montrent que les performances du parc automobile seront de toute façon marginalement décroissantes pour les polluants envisagés ici et que se sont essentiellement des solutions technologiques précises qui donneront les meilleurs résultats.

Tableau 12 : Des progrès en matière d'émissions atmosphériques entre 1994 et 2000 difficilement reproductibles entre 2000 et 2010, même à trafic constant.

	Evolution annuelle entre 1994 et 2000	Part de "zero emission vehicle" dans le trafic 2010 pour :
		a) retrouver ce taux d'évolution moyen entre 2000 et 2010
CO	-12,7%	26%
NOx	-7,3%	32%
Hydrocarbures	-11,9%	33%
SO ₂	-6,9%	49%
		b) rétablir le niveau d'émissions de 1994
CO ₂	+0,7%	6%
Poussières	+3,5%	22%

3.2.3. Bilan : les évolutions des émissions automobiles et le poids relatif des différents facteurs.

La prise en compte simultanée des effets liés aux hypothèses d'évolution de la mobilité automobile et des caractéristiques technologiques du trafic en matière d'émissions conduit à amplifier encore les écarts dans l'évolution des différents polluants atmosphériques envisagés. Elle ne suffit cependant pas à expliquer la totalité des évolutions enregistrées, qui dépendent également de l'impact de la dégradation générale de la circulation sur les émissions unitaires. Ainsi entre 1994 et 2010 la vitesse moyenne de

circulation baisse de presque 18% entraînant une surémission du trafic variable selon le polluant envisagé. Nous avons établi le poids de cette baisse de la vitesse moyenne sur le réseau routier en déduisant l'impact des autres facteurs de l'évolution générale des différents types de polluants atmosphériques. Un tableau synthétique permet d'exposer les progressions enregistrées sur les deux périodes 1994-2000 et 2000-2010 tout en rappelant le poids de chaque facteur :

Tableau 13 : L'impact de l'évolution technologique, de la mobilité et de la baisse de la vitesse moyenne sur les émissions atmosphériques du trafic automobile urbain entre 1994 et 2000

entre 1994 et 2000 :

	CO2	Poussières	SO2	NOx	Hydrocarbures	CO	Plomb
<i>Technologies</i>	104.8	123.0	65.1	63.4	46.6	44.3	34.0
<i>Vitesse</i>	103.1	100.9	103.5	99.6	106.1	105.5	103.6
<i>Mobilité</i>	116.0						
<i>Evolution globale</i>	125.4	144.1	78.2	73.2	57.4	54.3	40.8

entre 2000 et 2010 :

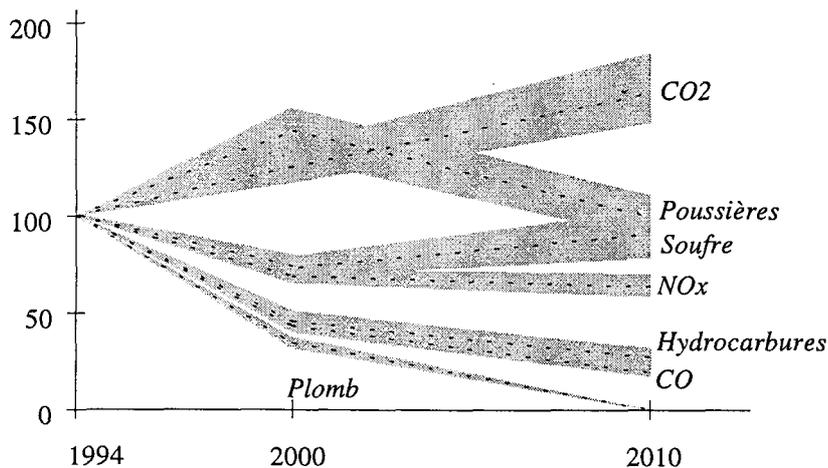
	CO2	Poussières	SO2	NOx	Hydrocarbures	CO	Plomb
<i>Technologies</i>	101.6	56.9	95.4	64.8	38.0	34.5	0.0
<i>Vitesse</i>	101.5	101.8	101.5	102.7	101.1	101.3	-
<i>Mobilité</i>	119.8						
<i>Evolution globale</i>	123.6	69.4	116.1	79.3	45.9	41.9	0.0

entre 1994 et 2010 :

	CO2	Poussières	SO2	NOx	Hydrocarbures	CO	Plomb
<i>Technologies</i>	106.5	70.0	62.1	41.0	17.7	15.3	0.0
<i>Vitesse</i>	104.7	102.7	105.1	102.4	107.3	106.9	-
<i>Mobilité</i>	139.1						
<i>Evolution globale</i>	155.0	100.0	90.8	58.1	26.3	22.7	-

L'évolution générale des émissions des polluants atmosphériques retenus peut également être illustrée par le graphique ci-dessous. Les courbes en pointillés reprennent les résultats évoqués jusqu'à présent. La zone en grisé qui les encadre donne une idée de leur sensibilité à une variation des hypothèses de mobilité, avec une variation envisagée de $\pm 5\%$ du nombre de déplacements de la matrice de 2000 à structure constante ainsi que de $\pm 10\%$ sur celle de 2010 :

Graphique 5 : Evolution globale des émissions de polluants atmosphériques entre 1994 et 2010



L'ensemble de ces résultats appelle plusieurs remarques en forme de conclusion d'étape, touchant à la grande variabilité des évolutions des émissions ainsi qu'aux impacts différenciés des facteurs d'émissions. Enfin il faut insister sur l'incertitude qui règne autour de ces chiffres qui permettent de guider la réflexion mais ne prétendent pas au statut de "prévisions".

i) Nous noterons tout d'abord que la prise en compte de l'ensemble des facteurs a tendance à réduire les effets positifs de l'évolution des technologies. Les émissions soufrées remontent entre 2000 et 2010, une fois passé l'effet bénéfique de la désulfuration du gazole (leur baisse se trouve dès lors réduite à moins de 10%). Les NOx ne baissent que du tiers au lieu de plus de la moitié. Au niveau des poussières, les mesures réglementaires prises sur les véhicules diesel ne permettent guère que de retrouver en 2010 le niveau d'émissions de 1994.

On peut également souligner la nette progression des émissions de CO2 (55%). Cependant, l'effet de serre supplémentaire induit par cette croissance est en partie compensé par la baisse de polluants qui jouent également un rôle important dans ce domaine (hydrocarbures et NOx notamment) : suivant l'horizon temporel retenu pour le calcul des indices d'équivalence entre les différents gaz, nos chiffres indiquent soit une stabilité (-3%) soit une progression (+16%) de la pression des émissions automobiles sur ce phénomène⁶³. Malgré la moindre contribution par véhicule liée à l'installation du pot catalytique sur les véhicules à essence et au développement du diesel, la contribution du trafic automobile à l'effet de serre ne décroîtrait donc pas entre une heure de pointe du soir

⁶³ Les chiffres ci-dessous sont repris p. 432 de ORSELLI Jean, *Energies nouvelles pour l'automobile. Op. Cit.* L'International Panel on Climate Change a tenté d'estimer des équivalents CO2 de l'effet de serre des différents gaz atmosphériques (Global Warming Potentials ou GWPs). Le CO aurait un effet de serre 5 à 3 fois plus élevé que le CO2 selon l'horizon considéré (respectivement 30 à 100 ans), les hydrocarbures non méthaniques de 21 à 10 fois plus, les NOx de 92 à 38 fois et les N2O, non directement évoqués ici seraient particulièrement actifs avec un indice 200 à 100 fois plus fort.

Nos calculs appliqués à une heure de pointe du soir sur l'agglomération lyonnaise indiquent qu'entre 1994 et 2010, les émissions de CO2 passent de 369 461 à 572 526 kg, celles de CO de 28 255 à 15 332, celles d'hydrocarbures de 4 104 à 1 081 et celles de NOx de 2 608 à 1 515 (Cf. annexe III, §6.2.).

En pondérant ces masses par les indices d'équivalence ci-dessus, on obtient alors une baisse de la pression des émissions automobiles mesurée sur un horizon de 30 ans de 3,1% entre 1994 et 2010 et une progression de 15,6% avec un horizon de 100 ans.

1994 et une heure de pointe du soir 2010. Sans remettre en cause les réponses technologiques actuelles pour diminuer les pollutions locales et régionales induites par les transports, on peut souligner leur insuffisance pour répondre aux exigences de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

ii) Les facteurs envisagés ont des impacts très différents sur l'évolution des émissions de polluants atmosphériques par le trafic automobile. Les plus importants correspondent au renouvellement des technologies utilisées au sein du trafic et à l'évolution de la mobilité automobile. Nous l'avons vu, leurs effets s'opposent, la plupart du temps à l'avantage du renouvellement technologique. Cependant concernant le SO₂ et le NO_x dans une moindre mesure, une variation des hypothèses de mobilité ou un élargissement de la période d'observation à l'ensemble de la journée au lieu d'une simple heure de pointe du soir pourraient modifier sensiblement les résultats. De même il est certain que nos résultats élargis à la journée conduiraient à une croissance des émissions de poussières et du bilan des émissions de gaz à effet de serre.

L'ensemble des éléments qui concernent la congestion - baisse des vitesses, réaffectations d'itinéraires ou, à plus long terme, évolution du réseau routier - ne jouent quant à eux qu'un rôle secondaire par rapport aux deux facteurs précédents :

- la variation des conditions de circulation, conduisant à une baisse des vitesses de l'ordre de 18% entre 1994 et 2010, affecte le niveau des émissions de 2,4 (NO_x) à 7,3% (hydrocarbures) ;
- le renouvellement du réseau ne joue que sur 5% du trafic avec cependant de fortes variations entre les périodes (-4% entre 1994 et 2000, +10% entre 2000 et 2010).

Leur rôle ne peut pas être qualifié de négligeable mais il est certain que les enjeux de la congestion tournent beaucoup plus autour des questions de temps perdu et d'efficacité du système économique et sociale que sur les problèmes environnementaux. Le point qui relie ces deux thèmes, temps perdu et environnement, concerne beaucoup plus directement la question du niveau global du trafic - du total des véhicules.kilomètres parcourus - que celle de la fluidité du trafic.

Rappelons pour terminer que l'ensemble de ces chiffres n'a pas vocation à fournir de véritable prévision sur l'évolution à venir des émissions polluantes. Trop de facteurs d'incertitude entrent en jeu, à travers notamment les hypothèses de progression de la mobilité automobile - qu'il faudrait de plus élargir à la journée - mais aussi les interrogations qui restent en suspend concernant le respect des normes d'émissions, tant du fait de la rigueur des contrôles que de l'efficacité réelle des technologies (pot catalytique à froid par exemple) ainsi que l'évolution de la composition du parc, le succès du diesel pouvant aussi bien s'amplifier que se retourner dans les années qui viennent.

Les tests de sensibilité effectués (Cf. §3.2.2.b) et annexe II, §6.) laissent penser que la plus forte incertitude concerne l'évolution des émissions de poussières, directement concernées par chacun des 3 facteurs évoqués. Les résultats sont également incertains pour le SO₂, les NO_x et le bilan sur les gaz à effet de serre. La relative stabilité ou la baisse que nous avons calculé pour chacun d'eux peuvent très bien être remis en question si trop de facteurs jouent ensemble dans le mauvais sens.

3.3. L'impact du trafic automobile sur les émissions sonores

L'impact des évolutions du trafic automobile sur les émissions sonores ne joue pas de la même façon que pour les émissions atmosphériques.

D'une part nous avons déjà pu voir que la dégradation des conditions de circulation évite des évolutions catastrophiques sur certains axes du fait de la baisse conjointe des vitesses et des débits en cas de congestion. Par contre les réaffectations d'itinéraires qu'elle entraîne conduit à une détérioration très nette de la situation sur l'ensemble du réseau routier.

D'autre part les éléments dont nous disposons ne permettent guère d'établir un scénario sur les progrès envisageables en matière de bruit routier d'ici 2010. Nous verrons cependant que ceux nécessaires pour parvenir simplement à une stabilisation de la situation semblent difficiles à atteindre.

3.3.1. *Les hypothèses de croissance de la mobilité automobile : disparition des zones calmes mais stabilité des points noirs.*

Pour établir l'impact des hypothèses de croissance de la mobilité automobile entre 1994, 2000 et 2010 nous avons repris la méthode déjà utilisée précédemment de comparaison des résultats d'affectation des trois matrices de déplacements sur une version fixée du réseau lyonnais. La prise en compte dans un deuxième temps des évolutions enregistrées sur les deux autres versions du réseau permet de vérifier ensuite que les conclusions dégagées sont bien attribuables à un effet "croissance de la mobilité" et non à la simple configuration du réseau routier à une époque donnée.

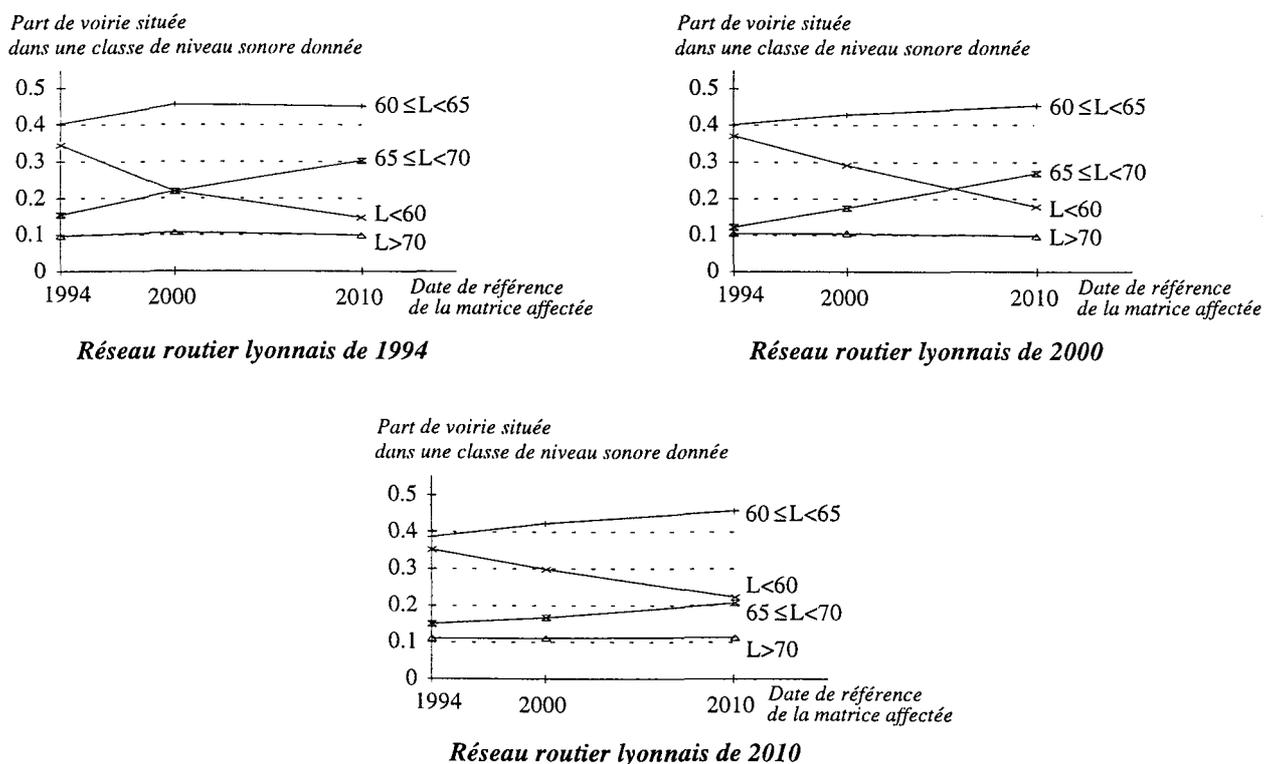
Les résultats obtenus en matière d'évolution des émissions sonores correspondent à ceux décrits au cours du chapitre précédent, lors de la simulation d'une augmentation progressive du nombre de déplacements, toutes choses égales par ailleurs.

L'affectation successive des trois matrices, 1994, 2000 et 2010, sur le réseau routier correspond à une dégradation progressive des conditions de circulation. Les itinéraires utilisés sont modifiés et les trafics sur la voirie secondaire augmentent relativement plus vite que sur les axes lourds qui, étant empruntés en priorité du fait de leur rapidité, sont aussi les premiers à subir une altération de leur qualité de service. Ce phénomène a une triple répercussion au niveau des émissions sonores :

- Les zones les plus calmes, où le trafic était peu élevé, disparaissent progressivement. Suivant le réseau, la longueur de voirie à moins de 60 dB connaît une baisse qui varie entre 40 et 60% et sa part au sein du total de la voirie passe d'environ 35% à 15-20%.
- La part de la voirie la plus bruyante n'augmente pas de manière symétrique et reste au contraire très stable : la longueur de la voirie à plus de 70 dB représente 10-11% du total, quel que soit le réseau concerné et la matrice affectée.
- Ce sont donc les classes de 60-65 dB et 65-70 dB qui augmentent le plus du fait des adaptations d'itinéraires. La croissance la plus nette est celle de la longueur de la voirie à 65-70 dB qui double entre les réseaux 1994 et 2000.

Ces commentaires se visualisent très bien sur les trois graphiques ci-dessous, reprenant les résultats d'affectation sur chacun des trois états du réseau lyonnais en 1994, 2000 et 2010. On peut aussi observer le décalage du processus qui vient d'être exposé en fonction de la version du réseau. Suivant l'état de développement des infrastructures, les conditions initiales de circulation se trouvent déjà plus ou moins dégradées avec la première matrice de déplacements et le "point de départ" du processus n'est donc pas le même. Par contre sa dynamique reste identique et l'on pourrait presque assembler les trois graphiques pour disposer d'une représentation basée sur un spectre plus étendu de la dégradation des conditions de circulation.

Graphique 6 : Impact de l'évolution des hypothèses d'évolution de la mobilité automobile sur les émissions sonores à réseau constant



Pour conclure, il faut souligner que ces résultats montrent qu'à travers les hypothèses d'évolution de la mobilité automobile, ce sont essentiellement la croissance prévue du nombre de déplacements et la réaffectation des trafics qu'elle provoque qui ont un impact sur l'évolution des émissions sonores. L'étalement urbain et l'évolution envisagée des localisations des activités restent invisibles au niveau global où nous nous situons. L'effet de la configuration du réseau est quant à lui plus perceptible sans pour autant affecter les logiques décrites précédemment : la part de la voirie à moins de 60 dB est toujours supérieure en 2000 que pour la version 1994 du réseau routier, sans que des transferts de trafic ne rendent le reste de la voirie plus bruyant ; par contre en 2010 les gains en voirie silencieuse (15% de la voirie est à moins de 60 dB après affectation de la matrice 2010 sur le réseau 1994, 22% sur sa version 2010) se font au prix d'un allongement et d'une concentration du trafic sur les axes lourds (11% de la voirie est à plus de 70 dB sur le réseau 2010 quelle que soit la matrice, pour seulement 10% sur le réseau 1994, soit une différence de 10% entre les parts relatives mais de 30% en terme de kilomètres de voirie).

3.3.2. *L'impact de l'évolution des émissions sonores du trafic : un bilan incertain.*

a) Point de méthode

Compte tenu de l'extrême incertitude de nos informations les niveaux d'émissions sonores à venir des automobiles au cours des 15 prochaines années, il est difficile d'établir des projections basées sur des hypothèses "raisonnables" d'évolutions technologiques. Il est donc hors de question de reprendre la logique de la méthode consistant à mesurer l'impact des progrès en la matière en construisant deux scénarios d'évolution technologique, l'un pour 2000, l'autre pour 2010, à les appliquer successivement sur une situation fixée, avec matrice et réseau constant, puis à vérifier la permanence des résultats sur les trois dates 1994, 2000 et 2010 pour éviter le plus possible une confusion avec d'éventuels effets de période.

Nous avons dès lors préféré rester campés sur la seconde méthode parfois utilisée, consistant à s'interroger sur les progrès technologiques qui seraient nécessaires (quelle que soit la technologie mise en oeuvre) pour réaliser un objectif fixé *a priori*.

Concernant les objectifs fixés en matière d'évolution des émissions de polluants atmosphériques nous avons envisagé une poursuite des tendances enregistrées entre 1994 et 2000 sur la période 2000-2010 en cas d'amélioration ou une simple stabilité sur toute la période 1994-2010 en cas de détérioration. Compte tenu de la dégradation importante de la situation si aucun progrès n'est réalisé au niveau des émissions sonores (Cf. *Infra*) ainsi que des difficultés économiques et techniques pour résoudre autre chose que des problèmes ponctuels sur des zones particulièrement sensibles, nous avons préféré nous cantonner à la seconde solution : quels progrès faudrait-il réaliser pour simplement maintenir la situation de 1994 en matière d'émissions sonores du trafic automobile de 2010 ?

L'indicateur retenu correspond comme précédemment aux nombres de kilomètres de voirie exposée à moins de 60 dB(A), 60-65 dB(A), 65-70 dB(A) et plus de 70 dB(A), mesurés en $Leq(1h)$ - d'heure de pointe du soir - sur l'isophone de référence. Le nombre total de kilomètres de voirie augmentant de 13% entre les deux versions 1994 et 2010 du réseau routier lyonnais à notre disposition, il est donc impossible d'obtenir une situation stable à l'intérieur de ces quatre classes de niveaux sonores. Nous avons donc recherché la situation pour laquelle les classes de bruit le plus élevé restent stables, les classes de bruit plus faibles (<60, 60-65 dB) absorbant l'équivalent de la progression kilométrique du réseau routier.

Cet objectif étant posé, il reste ensuite à s'interroger sur la manière d'envisager l'évolution des émissions sonores. En effet, nous avons vu que celles-ci sont liées à deux facteurs principaux, à savoir l'automobile elle-même et le contact entre les pneumatiques et la chaussée. Le premier est prédominant en vitesse lente (moins de 53 km/h pour reprendre les abaques du CETUR que nous utilisons comme référence de calcul) et pourrait notamment s'améliorer grâce à des progrès au niveau des moteurs (encapsulage plus systématique) et de l'échappement. Le second, qui croît de manière exponentielle avec la vitesse, devient rapidement la seule source de bruit perceptible au delà de cette limite des 50 km/h. Les progrès possibles, apparemment nettement plus sensibles que dans le premier cas, portent sur des améliorations des pneumatiques (structure, matériaux) et surtout sur les matériaux utilisés pour la chaussée (enrobés drainants notamment).

Nous avons donc envisagé deux types d'améliorations technologiques correspondant plus ou moins à celles évoquées ci-dessus et affectant les niveaux de bruit des véhicules de manière différente selon la vitesse moyenne du trafic établie sur un arc donné. En dessous de 53 km/h, nous avons affecté de manière uniforme la baisse de niveau sonore envisagée pour le scénario. Au delà de 53 km/h, une baisse du niveau sonore a été fixée pour une vitesse de 100 km/h puis nous avons réajusté la courbe établie entre 53 et 130 km/h de telle sorte qu'il n'y ait pas de saut de valeur à 53 km/h et qu'elle passe au point choisi pour 100 km/h. Sur ce principe, cinq scénarios ont été bâtis progressivement, qui permettent d'éclairer les résultats de la solution finale répondant à l'objectif retenu :

- tout d'abord, une hypothèse de stabilité des émissions sonores unitaires entre 1994 et 2010 a servi de scénario de référence .
- une seconde simulation a été faite en supposant une baisse de 1 dB à faible vitesse et de 3 dB à 100 km/h ;
- nous avons ensuite testé l'impact d'une amélioration plus importante au niveau des vitesses élevées (-4 dB à 100 km/h), sans changement à vitesses urbaines (-1 dB) ;
- un scénario symétrique a été ensuite envisagé avec -2 dB pour $v < 53$ km/h et -3 dB pour $v = 100$ km/h ; nous verrons que c'est ce scénario qui remplit l'objectif ;
- enfin un scénario extrême (par rapport aux autres simulations simulées) a été envisagé, avec une baisse de 2 dB à moins de 53 km/h et -6 dB à 100 km/h.

La définition des courbes auxquelles ces hypothèses conduisent figurent en annexe.

Enfin soulignons encore une fois les limites de l'exercice si l'on tente de se servir de ses résultats pour illustrer directement la réalité. L'indicateur de niveau sonore retenu est un indicateur d'émissions à la source qui reste très théorique en donnant un niveau moyen d'émissions pendant une durée d'une heure sur l'isophone de référence, c'est-à-dire à 30 mètres de la source si rien ne venait modifier la trajectoire et le niveau du bruit. Il ne dit donc rien sur la propagation du bruit *in situ* ni sur les éventuelles protections phoniques en bordure de voirie ou aux domiciles. De plus nous ne prenons pas en compte ici les conséquences du trafic des poids-lourds, dont il est sûr qu'il peut faire nettement remonter certains résultats. Enfin les trafics retenus correspondent à ceux d'une heure de pointe du soir qui n'augmenteront pas aussi fortement que ceux du reste de la journée, ne serait-ce que du fait des contraintes de capacité de la voirie.

Les résultats obtenus ne doivent pas être pris comme directement illustratifs de la réalité. Leur intérêt réside beaucoup plus dans les grandes tendances qu'ils indiquent lorsqu'on les compare entre eux et d'une période sur l'autre. En soit l'indication selon laquelle n km de voirie connaissent un trafic qui émet entre x et y dB(A) en $Leq(1h)$ mesurés sur l'isophone de référence ne veut pas dire grand chose. Elle ne prend sens que lorsque l'on peut savoir que cette classe de bruit passe de n à n' km entre telle et telle situation et a progressé de $(1-n/n')\%$ au profit ou au détriment de telle ou telle autre classe.

b) Les résultats obtenus :

Si aucun progrès n'est réalisé en matière d'émissions sonores du trafic automobile, la situation dérape nettement entre les scénarios de 1994 et 2010. En effet, avec un tel

scénario, on enregistre d'un côté une baisse de 28% de la longueur de voirie à moins de 60 dB et de l'autre une augmentation de 32% de celle à plus de 70 dB, les classes intermédiaires augmentant également nettement avec +27% pour la voirie à 60-65 dB et surtout +50% pour celle à 65-70 dB. La croissance du nombre de déplacements automobile entraîne donc une dégradation générale de l'environnement sonore lié au trafic routier, tant du fait des concentrations de flux sur les axes lourds, qui conduit à l'augmentation de la voirie à niveaux de bruit élevé (sachant que les contraintes de capacité, en limitant les vitesses et en évinçant une certaine part de trafic, évite à ces axes de connaître des situations encore plus dégradées) que du fait de la diffusion du trafic sur le réseau secondaire, qui réduit la part des zones calmes.

Une hypothèse moyenne de réduction à la source des émissions sonores, envisageant un gain de 1 dB à faibles vitesses et de 3 dB à 100 km/h entre 1994 et 2010, permet de contenir cette dérive en stabilisant les résultats des classes extrêmes à moins de 60 et plus de 70 dB. Par contre les classes médianes progressent avec +22% pour la classe de 60-65 dB et +29% pour celle de 65-70 dB.

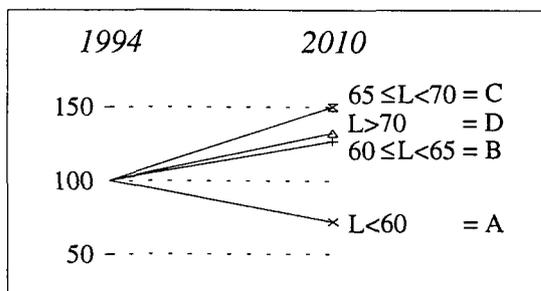
Si l'on envisage une amélioration supplémentaire des émissions sonores à vitesse élevée de 1 dB par rapport à ce dernier scénario (donc un gain en 2010 de 4 dB à 100 km/h par rapport à 1994), ce sont uniquement les classes de niveau sonore élevé qui sont affectées : la moitié de la voirie à plus de 70 dB passe dans la classe de 65-70 dB, qui augmente de 59%. La progression des classes de 60-65 et <60 dB reste par contre identique à celle du scénario précédent.

Toujours par rapport à ce scénario d'un gain de 1 à 3 dB suivant la vitesse, une amélioration supplémentaire de 1 dB à vitesses lentes (soit un gain en 2010 de 2 dB à moins de 53 km/h par rapport à 1994) permet une amélioration beaucoup plus nette sur les classes de bruit faible (+22% pour celle de moins de 60 dB, +11% à 60-65 dB). De plus la progression des classes élevées est également bien contenue avec une légère baisse de la voirie à plus de 70 dB (-10%) et une faible augmentation (+6,5%) de celle à 65-70 dB. Ce sont donc les hypothèses de ce scénario qui permettraient de répondre au mieux à un objectif de stabilisation des émissions sonores entre 1994 et 2010 malgré l'évolution du trafic et compte tenu de l'accroissement de la longueur du réseau.

Ainsi, par rapport à l'hypothèse d'une amélioration des émissions sonores à grande vitesse qui permet uniquement des gains sur les niveaux de bruit élevé, une hypothèse d'amélioration des émissions à vitesses "urbaines" permet tout à la fois de contenir les dérapages sur les classes de bruit sensibles et d'observer une croissance nette des zones à faible niveau d'émissions sonores liées au trafic routier. Une simulation envisageant un progrès particulièrement sensible à vitesses élevées (-6 dB à 100 km/h) pour une amélioration de 2 dB à moins de 53 km/h permet de confirmer ce résultat. Par rapport au scénario précédent l'évolution des classes à faible niveau sonore reste similaire (<60 dB : +30% pour une croissance de 22% précédemment ; 60-65 dB : +5% pour +11%). Tout le bénéfice de l'amélioration envisagée profite aux classes de bruit élevé, avec une quasi disparition de la voirie à plus de 70 dB (-85%) qui bascule sur la classes de 65-70 dB (+52%).

Graphique 7 : Evolutions des kilomètres de voirie au sein de chaque classe de niveau sonore (<60, 60-65, 65-70 et ≥70 dB(A)) en fonction des hypothèses de baisse des émissions sonores des véhicules légers entre 1994 et 2010

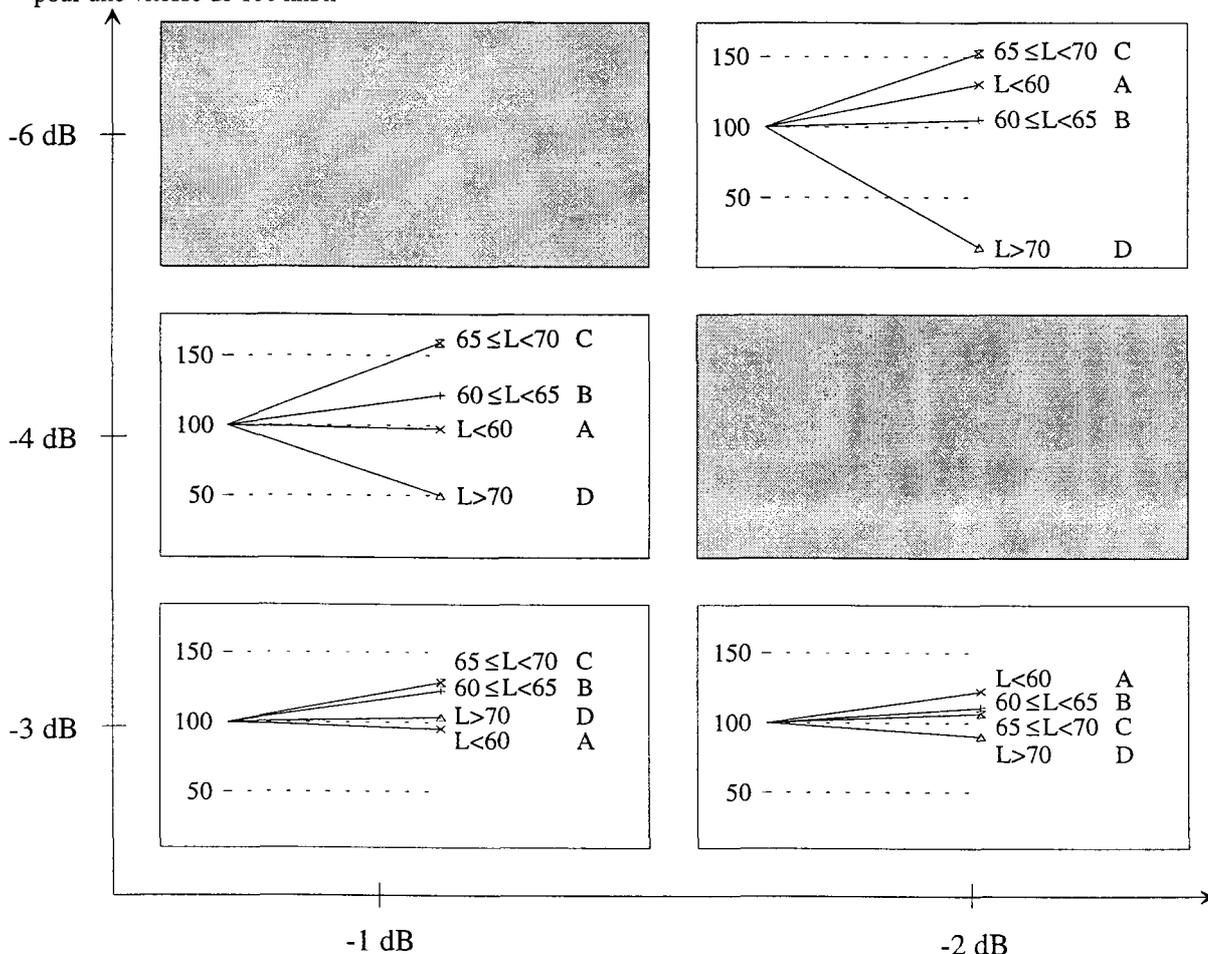
a) Projection de référence, sans modification des émissions sonores unitaires entre 1994 et 2010



b) Projections en supposant une évolution des émissions sonores unitaires différenciée selon la vitesse moyenne des véhicules sur chaque arc

Améliorations du contact pneumatiques-chaussée

- Baisse des émissions sonores par véhicule pour une vitesse de 100 km/h -



Améliorations au niveau du moteur et de l'échappement

- Baisse des émissions sonores par véhicule pour les vitesses inférieures ou égales à 53 km/h -

L'évolution des émissions sonores liées au trafic routier dépend donc fortement du type de progrès enregistré. Un large effort en matière de bruit émis lors du contact entre pneumatiques et chaussée peut permettre de très nettes améliorations sur les axes lourds à fort trafic. Par contre il n'empêche pas une détérioration de la situation sur le réseau secondaire où les vitesses sont moins élevées et les émissions sonores plus directement liées aux bruits des véhicules eux-mêmes. La croissance de la circulation et sa diffusion prévisible sur ce type de voirie obligent également à porter attention aux améliorations sur les émissions propres aux véhicules car ce sont elles qui éviteront une dégradation des zones calmes et à vitesse limitée.

3.4. Synthèse : un impact limité de la congestion et des évolutions diversifiées suivant l'impact du renouvellement technologique face à la croissance du trafic.

Même s'ils sont établis sur la base d'évolutions de trafic en heure de pointe du soir, les calculs effectués au cours de cette dernière partie montrent que l'on devrait assister à de profonds bouleversements dans la nature des pollutions atmosphériques et sonores du trafic automobile en agglomération dans les 15 années qui viennent. Certains points jugés critiques aujourd'hui devraient nettement s'améliorer, d'autres au contraire risquent de s'amplifier de plus en plus.

a) Un impact limité de la congestion

Considérés sous l'angle quantitatif de la variation des émissions les effets de la congestion devraient être relativement peu importants. D'une part en matière de pollution atmosphérique, les polluants les plus sensibles à la dégradation des conditions de circulation seront normalement bien traités par les nouvelles technologies utilisées au sein du trafic. Les hydrocarbures et l'oxyde de carbone sont peu émis par le diesel et efficacement combattus par le pot catalytique. La sensibilité des émissions atmosphériques à la congestion s'en trouvera réduite d'autant. D'autre part dans le domaine du bruit, même en régime laminaire, la congestion évite des dégradations trop catastrophique de la situation en limitant la hausse des débits et en diminuant les vitesses.

L'impact de la congestion est par contre sensible en matière de redistribution des flux sur le réseau car les déplacements automobiles supplémentaires ont plus tendance à encombrer le réseau secondaire que les grands axes routiers. Ceci est particulièrement net en matière d'émissions sonores pour lesquelles un simple traitement des grands axes à l'aide par exemple de nouveaux revêtements comme l'enrobé drainant s'avère insuffisant pour maintenir la situation par rapport à 1994. Les zones les plus bruyantes connaissent effectivement une nette amélioration mais on assiste par contre à une dégradation tout au long de la voirie secondaire si aucune autre mesure n'est prise.

On peut rappeler ici le rôle que joue l'évolution du réseau en matière d'émissions polluantes et sonores du trafic routier. Les investissements prévus entre 1994 et 2000, concentrés sur la voirie spécifiquement urbaine avec le Tunnel Nord Périphérique notamment, évite une dégradation trop nette des vitesses sans pour autant pousser à un allongement des distances parcourues. Leur bilan environnemental à court terme sur les indicateurs retenus est positif. Par contre les infrastructures autoroutières périurbaines attendues entre 2000 et 2010 contribuent à un allongement des distances parcourues. Même

si elles permettent aux vitesses moyennes du réseau de ne pas trop baisser, elles ont tendance à faire augmenter les émissions de polluants atmosphériques et à renforcer les points noirs liés au bruit.

D'un simple point de vue quantitatif, l'impact de la congestion sur la distance totale parcourue - et donc des émissions - est de l'ordre de -1,5% entre 1994 et 2010 ; celui de la variation des émissions unitaires liée à la dégradation des vitesses est compris entre 2,5% (NOx) et +7,5% (hydrocarbures) ; celui de l'évolution du réseau varie entre -5% pour 2000 par rapport à 1994 et +5% pour 2010 par rapport à 2000. La croissance de la mobilité automobile joue donc un rôle beaucoup plus fort en tant que telle qu'à travers ses dérivés liés à la congestion. En effet sa contribution directe est de l'ordre de +33% en prenant en compte la simple augmentation du nombre de déplacements entre 1994 et 2010, voire +41% lorsqu'on intègre les accroissements de la distance parcourue liés à l'évolution prévue de la localisation des activités et à l'étalement urbain.

Ces chiffres, basés sur des prévisions pour une heure de pointe du soir, ne permettent pas d'établir le poids de la croissance du trafic et de la dégradation induite des vitesses sur l'évolution générale, pour une journée complète, des émissions polluantes et sonores du trafic automobile. Ils montrent bien par contre que l'ensemble des facteurs liés à la congestion ont un impact beaucoup moins fort que la simple croissance du nombre de déplacements.

b) Evolutions technologiques versus croissance du trafic automobile ?

Les évolutions technologiques sont susceptibles d'apporter une réponse satisfaisante sur certains types de polluants propres à l'essence qui devraient quasiment disparaître avec la systématisation du pot catalytique. Ce sont notamment le plomb, le CO et les hydrocarbures, sans que nous puissions apporter ici des précisions sur l'éventuelle progression des nouveaux produits rajoutés dans l'essence pour en maintenir l'indice d'octane.

Les autres types d'émissions ne connaissent pas une baisse suffisamment forte pour que l'on puisse envisager de manière certaine une amélioration d'ici 2010, surtout en élargissant la réflexion au niveau d'une journée.

Les émissions de produits soufrés vont en fait certainement augmenter - elles restent stables sur l'heure de pointe du soir -, même si les enjeux sur ce type d'émissions ont déjà fortement diminués et restent encore largement tributaires des secteurs de l'industrie et du chauffage. Les émissions de NOx, souvent pointées du doigt aujourd'hui, baissent de manière beaucoup plus nette (-40%) mais il faudra vraisemblablement envisager des progrès en matière de catalyse pour que l'on puisse confirmer cette amélioration d'ici 2010.

Concernant l'effet de serre, un bilan rapide prenant en compte les principaux gaz automobile permet de relativiser l'impression laissée par la croissance du CO₂. Alors que ce dernier pourrait croître de 55%, l'impact du trafic routier sur l'effet de serre varierait entre -3 et +16% selon qu'on le mesure à un horizon de 30 ou 100 ans.

Enfin le bilan en matière d'émissions de poussières reste également très incertain. En supposant un bon respect des dernières normes européennes par les véhicules légers

diesels, leur niveau en 2010 pourrait revenir à celui de 1994 après une hausse sensible au cours des prochaines années (+44% entre 1994 et 2010, -30% entre 2000 et 2010). Ces résultats restent cependant très liés aux hypothèses de respect des normes, de croissance du trafic et de diésélisation du parc.

Il faut souligner que ces résultats sont établis en se basant uniquement sur une évolution des véhicules thermiques traditionnels, avec une hypothèse de forte diésélisation du trafic et l'installation de pots catalytiques sur les véhicules à essence. Ils font cependant figure de tendances lourdes et l'introduction de véhicules alternatifs, pour avoir un impact sensible, nécessiterait des taux de pénétration relativement élevés.

En matière d'émissions sonores, notre connaissance nous semble trop parcellaire pour tenter de donner une idée des évolutions à venir des nuisances sonores liées au trafic automobile. On peut retenir cependant deux choses :

- D'une part les simulations effectuées montrent que si l'on veut éviter que la situation ne se dégrade il faudrait améliorer aussi bien les niveaux d'émissions propres aux véhicules que ceux liés aux contacts entre pneumatiques et chaussée. En effet, si les revêtements d'enrobés drainants permettent une action efficace sur les axes structurants, ils sont par contre moins performants sur le réseau secondaire où la hausse du trafic devrait être encore plus sensible.
- D'autre part cette obligation à réfléchir sur des améliorations à vitesses faibles comme élevées découle directement de la tendance à l'envahissement du réseau, voirie secondaire et axes structurants confondus. Qu'on parvienne à la traiter ou non, la question du bruit témoigne ici du problème plus large de l'omniprésence de l'automobile en tous lieux de la ville et de la gêne croissante qu'elle risque de générer vis-à-vis des autres activités.

4. Conclusion

La mobilité automobile semble être appelée à croître de manière encore très importante dans les villes françaises des quinze prochaines années si rien ne change dans la dynamique de développement du système de transports. Tous les indicateurs poussent dans ce sens :

- Le lien entre croissance économique, taux de motorisation des ménages et mobilité automobile reste fort. Même si les ménages les plus aisés parvenaient à saturation de leur taux d'équipement - ce qui ne semble pas être le cas -, des rattrapages importants resteraient à faire pour les plus modestes. De même on peut supposer que la croissance ralentie que nous connaissons a créé des poches de mobilité potentielle (chez les jeunes et les chômeurs ainsi qu'au niveau de l'entreprise) qui pourraient se réaliser brusquement avec un redémarrage de l'activité économique.
- Les tendances socio-démographiques jouent également dans le sens d'un développement de la mobilité automobile, au moins pour les 10 à 15 ans qui viennent. Le taux d'activité féminin devrait continuer à progresser au cours des 10 prochaines années - de manière de moins en moins forte il est vrai. De

même la tendance au développement de l'usage de l'automobile au sein des classes âgées ne devrait pas se stabiliser avant une quinzaine d'années.

- Enfin le phénomène de concentration et d'étalement urbain n'a pas de raison de se ralentir, au moins au sein des agglomérations les plus dynamiques. Favorisée par la croissance économique et démographique, autorisée par le développement du réseau routier urbain et périurbain, la logique de diffusion spatiale contribue à allonger les distances moyennes à parcourir et pousse à substituer l'automobile à d'autres modes.

Pour les quinze ans qui viennent la croissance du trafic automobile en agglomération semble donc inévitable. Même si l'on peut sans doute discuter du chiffre retenu ici (+33% de déplacements et surtout +39% de véhicules.kilomètres entre 1994 et 2010 en heure de pointe du soir), il n'empêche que l'ordre de grandeur qu'il fournit témoigne de l'enjeu que représente l'évolution technologique du parc si l'on veut éviter que la situation ne se dégrade.

Le premier point à souligner concerne la lourdeur des tendances dans ce domaine des évolutions des technologies utilisées au sein du trafic. Elles s'effectuent d'une part au rythme lent du renouvellement du parc automobile. Ainsi les derniers véhicules à essence non équipés de pots catalytiques ne disparaîtront pas avant 2010. Ce mouvement sera par contre accéléré de manière temporaire par les incitations à la casse instaurées par les plans successifs de relance de la consommation automobile de Mrs Balladur et Juppé.

On peut être séduit par la richesse des technologies alternatives qui passent aujourd'hui sur la rampe des média : voiture électrique, carburants verts, concepts de petits véhicules urbains... Cependant, sans même s'interroger sur leur efficacité parfois toute relative, chacune de ces alternatives présente des spécificités particulières qui en limiteront l'usage. Ainsi il y a fort peu de chance pour que leur avènement vienne modifier de manière sensible et significative la tendance actuelle de substitution de l'essence par le diesel : celui-ci pourrait constituer plus de 40% du trafic urbain en 2010, pour une estimation de 24% en 1994.

Ce double mouvement au sein du parc par des véhicules thermiques traditionnels (équipement en pots catalytiques pour l'essence ; diésélisation plus forte du parc) semble devoir être la tendance lourde des 15 prochaines années.

Il devrait permettre la disparition ou la chute sensible de certains polluants automobiles classiques comme le plomb, le CO ou les hydrocarbures. L'avenir d'autres polluants est plus incertain (NOx et SO2) et leur bilan global devrait rester mitigé, plus ou moins décevant selon l'évolution effective du trafic que l'on enregistrera sur une journée globale entre 1994 et 2010. Enfin il est probable que malgré l'évolution des normes et des technologies, le bilan du trafic routier en matière d'émissions de poussières et de gaz à effet de serre s'aggraverait entre ces deux dates. Notons également que d'autres types de polluants seront sans doute pris en considération à l'horizon 2010 alors qu'ils ne sont pas ou peu mesurés aujourd'hui (notamment certains HAP contenus dans le gazole et dans les essences sans plomb).

Ce renouvellement technologique des véhicules composant le trafic conduit à des évolutions très nettes en matière d'émissions moyennes par véhicule entre 1994 et 2000 qui se continuent, mais de manière plus atténuée, entre 2000 et 2010. Pour les modifier de manière sensible, soit en confirmant les mouvements à la baisse soit en enrayant les

hausse, il faudrait envisager une percée extrêmement forte des véhicules alternatifs, avec des chiffres de l'ordre de 25 à 30% de véhicules électriques au sein du trafic pour retrouver les améliorations enregistrées entre 1994 et 2000 au cours des 10 années suivantes en matière d'émissions d'heure de pointe du soir de poussières, de CO, d'hydrocarbures ou de NOx.

Le poids de la congestion à l'intérieur de ces évolutions, sans être marginal, reste secondaire. Les surémissions liées à la baisse des vitesses ou l'impact de l'extension du réseau routier jouent certes un rôle mais dans une mesure minimale de 1 à 3 par rapport aux impacts de la simple croissance du nombre de véh.km ou du renouvellement technologique au sein du trafic. Ainsi, en écho à la conclusion du chapitre précédent, l'évolution générale des émissions polluantes et sonores du trafic automobile urbain est beaucoup plus liée au trafic total qu'aux conditions de circulation : jouer sur l'état de la circulation au sein d'une agglomération aura toujours un impact environnemental plus fort si on privilégie le rouler moins au rouler mieux.

Enfin, dernier point, la croissance de la mobilité automobile accompagnée par le renforcement d'un réseau d'axes lourds sur l'agglomération pousse à une concentration des flux mais n'empêche cependant pas le reste de l'agglomération d'être envahi par la voiture. L'analyse en matière de bruit routier montre bien que si l'on cherche à stabiliser la situation entre 1994 et 2000, ce ne sont pas simplement les voies rapides qu'il faut revêtir d'enrobé drainant ou protéger d'isolations phoniques, c'est également au niveau de toute la voirie secondaire qu'il faudrait diminuer les émissions des véhicules - notamment en renforçant les normes sur leurs émissions sonores intrinsèques. Et quelles que soient les réponses technologiques que l'on apportera, une telle logique de développement du système de transports urbains conduira à l'omniprésence de l'automobile, même dans les zones *a priori* les plus calmes aujourd'hui.

CONCLUSION GENERALE

L'ambition de ce travail a été de fournir une mesure des enjeux liés aux émissions polluantes et sonores du trafic routier urbain. Cette mesure s'est faite en deux temps avec un bilan statique des dommages puis, de façon plus approfondie, une analyse dynamique des interactions et du poids relatif des principaux paramètres du trafic contribuant à la génération des nuisances : niveau de trafic, technologies et congestion notamment.

Nous avons donc tenté d'apporter une réponse d'ingénierie des transports à des questions d'environnement, dont la genèse et l'évolution relèvent aussi de dynamiques sociales et culturelles. Notre travail, dont nous présentons ici une synthèse, tente d'apporter une contribution à la réflexion dans un domaine d'actualité qui croise les préoccupations environnementales et la question du développement urbain de nos sociétés. Il ne prétend par contre pas fournir un cadre et des réponses définitives, ne serait ce que parce qu'il ne s'est guère penché sur les questions de logiques d'acteurs ainsi que des "angoisses" collectives qui prennent la question de l'environnement comme prétexte et qui jouent un rôle important dans ce domaine.

1. Un premier bilan des conséquences des émissions polluantes et sonores du trafic routier urbain

L'état des lieux a permis de montrer que le trafic routier urbain avait une part de responsabilité importante dans de nombreuses pollutions urbaines - bruit, émissions de CO, hydrocarbures et NOx notamment - qui ont un impact certain à tous les niveaux, local, régional et global. Ils affectent directement la santé humaine, en particulier celle des personnes les plus fragiles au départ - asthmatiques, enfants, personnes âgées - mais ils contribuent également à modifier le climat urbain, plus humide et plus chaud que son environnement et certains d'entre eux sont de plus en plus pointés du doigt dans le phénomène des pluies acides - hydrocarbures et NOx.

Il n'existe pas de véritable tentative d'évaluation économique du coût de ces dommages liés au seul trafic urbain. Notons simplement qu'à partir de la diversité des chiffres qu'il a pu recueillir, Emile Quinet a retenu une estimation médiane des nuisances des transports correspondant à 0,3% de notre PNB pour le bruit et 0,4% pour la pollution atmosphérique locale et régionale. Concernant les pollutions globales, elles représenteraient de 0,2 à 2% du PNB selon l'importance que l'on attribue au risque et au long terme. Les transports routiers sont responsables de l'essentiel de ces coûts et un quart de leur trafic se réalise en milieu urbain où la concentration humaine rend ses émissions beaucoup plus sensibles et nuisibles. Enfin, on peut ramener ces coûts aux dépenses consacrées à ce secteur, soit environ 15% du PNB : le rapport est loin d'être négligeable.

Une telle tentative d'évaluation physique et économique reste cependant très approximative et statique. Elle permet bien sûr de fixer des ordres de grandeurs, ce qui

présente déjà un intérêt certain. Par contre, elles restent extrêmement dépendantes du lieu et de l'époque de référence. Nous avons donc tenté de réaliser une analyse plus dynamique qui permette de mieux se rendre compte du poids relatif des différents paramètres entrant en jeu dans les émissions polluantes et sonores du trafic routier urbain. Cette seconde phase du travail ne s'oppose pas à la précédente : elle est au contraire guidée par les enjeux désignés par les premières évaluations.

2. A propos des calculs effectués : une analyse en termes relatifs sur des dynamiques à horizons temporels différents

Tirer un bilan général des 3 derniers chapitres nécessite de remettre en ordre l'ensemble des points évoqués au cours de la réflexion et de poser de manière claire les liens qui ont été établis entre eux. Sans prétendre mettre à jour un schéma conceptuel abouti qui aurait servi de référence implicite aux analyses, cette représentation nous permettra ensuite de mieux situer et mesurer les enjeux liés aux principaux facteurs pesant sur l'évolution des émissions polluantes et sonores du trafic automobile urbain. Nous pourrons également mieux discerner les limites de l'analyse.

Pour aider à dresser ce premier bilan, une distinction peut être faite au sein du cadre temporel utilisé, entre les indicateurs et les liaisons retenus pour les analyses statiques, ceux utilisés pour éclairer les dynamiques de court terme et ceux servant de référence pour comprendre les dynamiques de long terme. Ces trois niveaux s'interpénètrent : la première analyse statique fournit les éléments pour comprendre les ajustements à court terme qui eux-mêmes jouent un rôle certain dans les évolutions à long terme ; de même, en plus de participer au cadre explicatif de sa genèse, une situation prévue à un horizon de 15 ou 20 ans peut être décrite en partie grâce aux indicateurs statiques et de dynamique de court terme. Leur distinction permet cependant d'éviter une certaine confusion, chaque niveau faisant appel à un cadre de réflexion plus large que le précédent : statique \subset court terme \subset long terme.

2.1. Le cadre des analyses statiques

Nos réflexions relevant du cadre d'analyse statique ont fait appel à une hiérarchie d'indicateurs découlant les uns des autres. Cette hiérarchie respecte les grandes lignes de la logique des méthodes de calcul établies au chapitre 3. Le processus d'affectation sous DAVIS reste cependant une boîte noire et seuls les résultats finaux sont utilisés.

Les quatre indicateurs de base sont d'une part le *nombre* et la *longueur moyenne des déplacements* et d'autre part les *conditions de circulation*, souvent représentées par la vitesse moyenne sur le réseau, et les *caractéristiques technologiques des véhicules* au sein du trafic, débouchant sur la description des émissions d'un véhicule moyen.

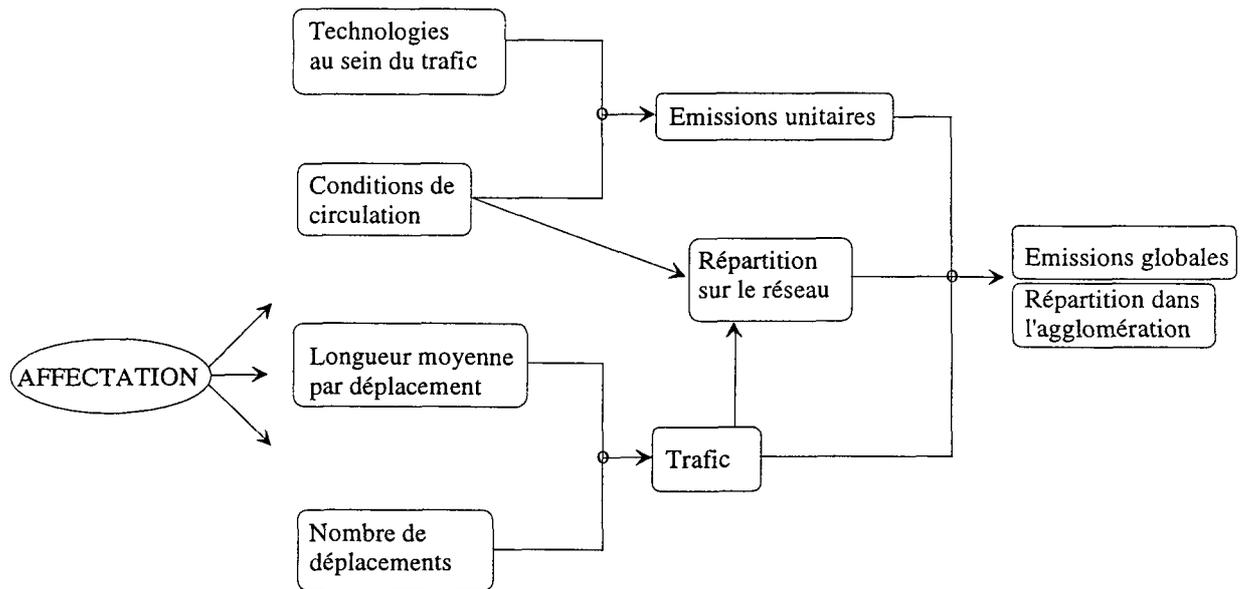
Le produit des deux premiers donne le *trafic global*, ou total du kilométrage parcouru sur le réseau. La comparaison des deux seconds permet de comprendre le niveau des *émissions unitaires* d'un véhicule moyen. Enfin, le croisement entre trafic et émissions unitaires débouche sur les *émissions globales*.

D'autre part le niveau global du trafic et les conditions de circulation - qui en découlent en grande partie mais l'affectent également - sont repris pour comprendre la

répartition du trafic sur les grandes familles de voirie du réseau et déboucher ainsi sur une image de la répartition des nuisances locales au sein de l'agglomération.

Notons pour terminer que cette étape d'analyse statique a très peu été utilisée en tant que telle. Elle a essentiellement permis de fournir des éléments de comparaison entre différentes situations et ce sont des analyses en termes relatifs qui ont été développées.

Graphique 1 : les indicateurs utilisés et leurs interactions dans un cadre d'analyse statique



2.2. Les dynamiques de court terme

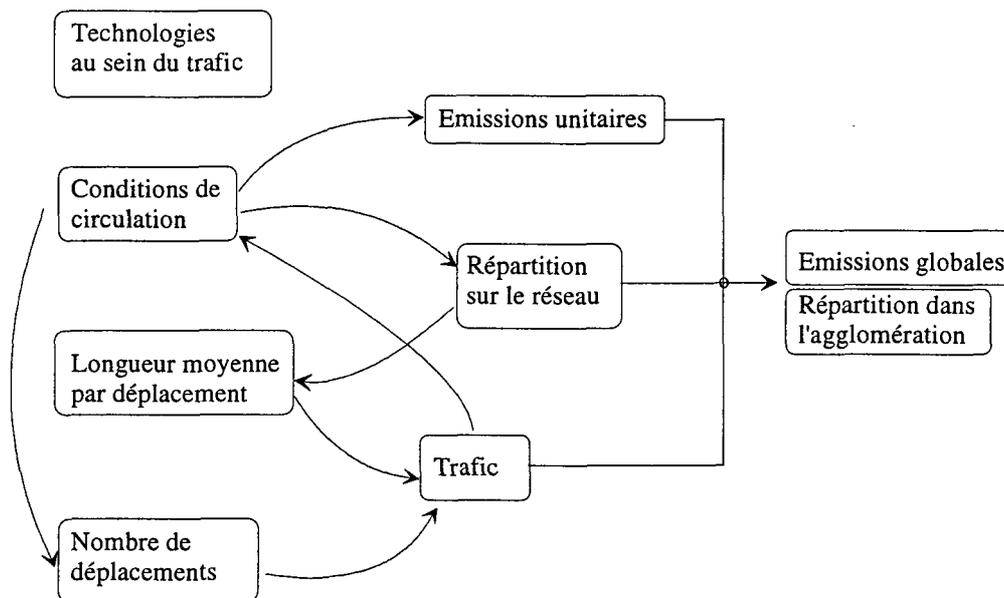
Sous le terme "dynamique de court terme" nous avons surtout placé les adaptations des automobilistes par rapport aux conditions de circulation ainsi que leurs répercussions en retour sur le trafic global et sa répartition sur le réseau.

Au cours des deux derniers chapitres nous avons pu voir que la simple hausse du nombre de déplacements, même à structure constante des origines et destinations, conduit à court terme à des tendances contradictoires dont il est difficile d'établir un bilan net en faveur ou en défaveur des nuisances liées à la route.

- D'un côté la hausse du nombre de déplacements se traduit directement par une croissance du trafic qui, en dégradant les conditions de circulation, pousse à une augmentation des émissions. Ce premier mécanisme très puissant dans certains cas (CO et hydrocarbures) n'est cependant pas systématique. Ainsi avec la baisse des vitesses moyennes les émissions unitaires de NOx ont tendance à décroître légèrement ; de même le phénomène de la congestion évite les situations catastrophiques en matière d'émissions sonores.
- D'autres mécanismes se mettent également en place : l'évolution des conditions de circulation amène une partie des automobilistes à réviser leurs itinéraires et à abandonner certains détours sur les axes lourds dont les vitesses diminuent plus vite qu'ailleurs. D'une part la voirie secondaire se trouve alors envahie et avec elle des zones non spécifiquement conçues comme "espaces circulatoires"

pour lesquelles le conflit entre automobile et autres activités est immédiat. D'autre part, étant donné les détours évités, on enregistre une baisse de la longueur moyenne des déplacements, donc du trafic et des émissions correspondantes. Ce phénomène limite mais ne compense cependant pas la plupart des surémissions liées à la congestion.

Graphique 2 : les indicateurs utilisés et leurs interactions dans un cadre d'analyse de dynamique de court terme



Cette tendance à la réduction de la longueur des itinéraires est liée à la logique d'affectation sous DAVIS et est établie sur la base d'une congestion endémique, bien repérée des automobilistes. Par contre les cas de détérioration locale et inhabituelle de la circulation peuvent tout à fait provoquer l'effet inverse et pousser à un allongement des déplacements du fait des détours effectués au fur et à mesure des difficultés rencontrées.

De plus la détérioration des conditions de circulation peut également conduire à modifier les caractéristiques du déplacement, allant de son annulation pure et simple à son report dans le temps ou dans l'espace. Travaillant plus spécifiquement avec l'aide d'un modèle statique d'affectation, avec une matrice de déplacements dont les origines et destinations sont fixées *a priori*, dans le cadre temporel précis d'une heure de pointe du soir, l'ensemble de ces points n'a pas été traité.

Notons simplement que là encore leurs effets peuvent être contradictoires : les ajustements d'itinéraires au coup par coup poussent à une augmentation du trafic ; les autres types d'adaptation jouent plutôt dans le sens d'une amélioration, soit en diminuant directement le trafic (annulation, report sur d'autres modes), soit en évitant des dégradations encore plus fortes de la situation aux moments et aux lieux où elle est le plus dégradée.

2.3. Les dynamiques de long terme

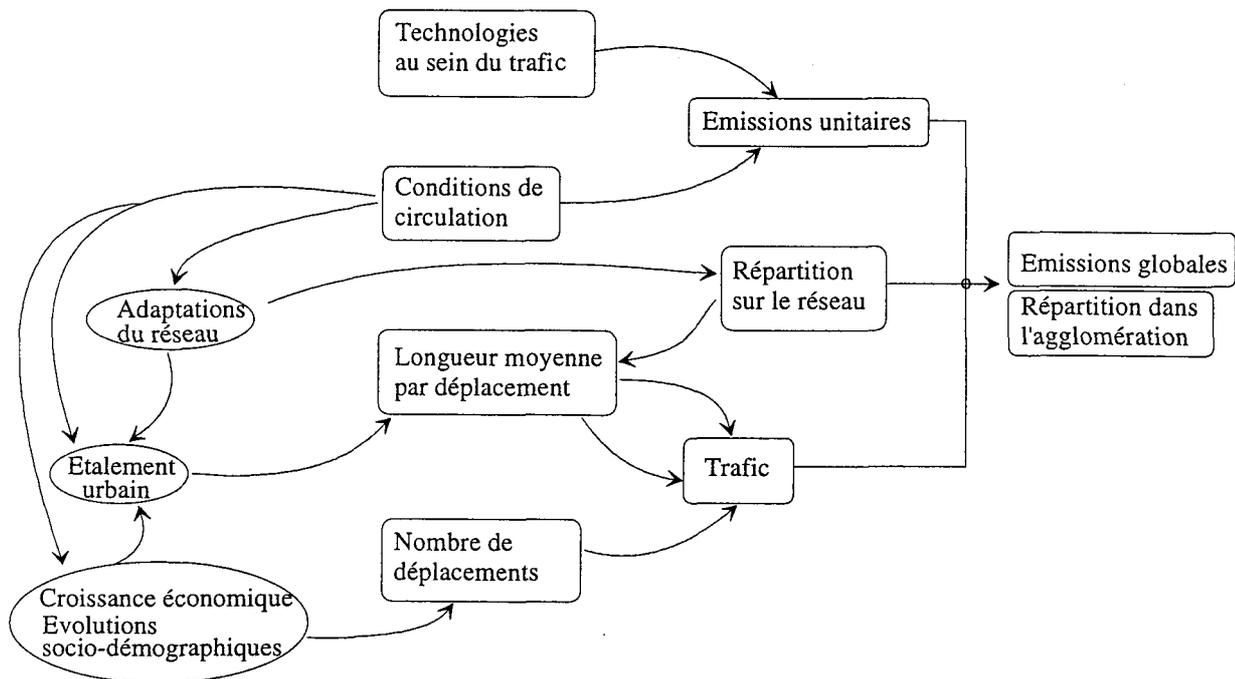
Sur le long terme enfin, d'autres mécanismes se trouvent mis en oeuvre, dont les effets en matière d'environnement sont là encore contradictoires. Deux principaux facteurs,

externes au système des transports mais qui le dynamisent et profitent de son développement, ont été envisagés avec d'un côté les évolutions technologiques et de l'autre la croissance économique et les évolutions sociales et démographiques.

Les conséquences les plus complexes sont liées à la croissance à long terme de la mobilité automobile, favorisée par les tendances socio-démographiques et la dynamique économique. La dégradation des conditions de circulation qui en découle joue à plusieurs niveaux.

- D'une part elle tend à modifier les émissions unitaires, même si sa contribution sur ce point tend à baisser avec la diminution progressive des polluants les plus sensibles à la congestion (hydrocarbures et CO, très efficacement réduits par l'équipement systématique des véhicules à essence en pot catalytique).
- D'autre part la dégradation prévue des conditions de circulation conduit à faire évoluer le réseau de manière à maintenir au mieux son efficacité et à éviter ainsi que la congestion ne freine la croissance économique. Cette évolution du réseau va entraîner des adaptations d'itinéraires qui peuvent contribuer selon les cas à une augmentation ou à une baisse de la longueur moyenne des déplacements, donc du trafic global et des émissions qui correspondent. Ainsi les investissements en voirie urbaine effectués entre 1994 et 2000 permettent d'optimiser les déplacements (-5% de leur longueur en moyenne), à l'inverse des développements autoroutiers en périurbain de la période 2000-2010 qui poussent aux détours et à l'allongement des distances (+5%).
- Enfin un faisceau de relations vient favoriser et limiter le phénomène d'étalement dont la principale conséquence, dans notre cas, est d'augmenter les distances parcourues. D'un côté la croissance économique et l'évolution du réseau favorisent cet étalement de la ville ; de l'autre la congestion pousse à une optimisation de l'usage de l'espace et favorise donc la concentration urbaine. Sans être marginal, l'étalement urbain apparaît de manière mineure à travers les prévisions utilisées d'évolution du trafic. Il contribue à un allongement d'environ 5% des distances entre 1994 et 2010.

Graphique 3 : les indicateurs utilisés et leurs interactions dans un cadre d'analyse de dynamique de long terme



L'évolution technologique des véhicules composant le trafic a quant à elle un impact variable. Les émissions de plomb, de CO et d'hydrocarbures devraient disparaître ou fortement régresser d'ici 2010 du fait du pot catalytique et des essences sans plomb. Le bilan en matière de NO_x, positif en heure de pointe du soir (-40%) risque d'être moins convaincant si l'on considère l'ensemble de la journée et qu'aucune amélioration technologique supplémentaire n'intervient. Les émissions soufrées pourraient facilement augmenter (seulement -10% en HPS) ; les enjeux liés à ce polluant restent cependant plus importants dans d'autres secteurs comme le chauffage ou l'industrie. L'effet de serre supplémentaire induit par la croissance importante du CO₂ (+55%) se trouve en grande partie compensé par la baisse des autres polluants automobiles impliqués dans ce phénomène (CO, NO_x et hydrocarbures). Enfin la hausse des émissions de poussières impliquée par la forte diésélisation du parc automobile se trouve ralentie puis inversée du fait des nouvelles normes européennes sur ces véhicules. Le niveau d'émission de ce polluant en 2010 pourrait être identique à celui de 1994 sur l'heure de pointe du soir. Soulignons que ces résultats sont suffisamment sensibles à des variations dans les hypothèses de trafic, de respect des normes et de composition du parc pour que l'on puisse envisager une baisse beaucoup plus relative du NO_x ainsi qu'une hausse du SO₂, des poussières et de l'effet de serre.

Enfin la question de l'évolution des émissions sonores nous permet d'évoquer la manière dont évolue à long terme la répartition du trafic sur le réseau avec une forte tendance à la concentration des flux sur le réseau de voirie "structurante" renforcé de nouvelles infrastructures, mais également une diffusion continue du trafic sur le reste du réseau. En terme de bruit ce double phénomène signifie que si l'on veut parvenir à maintenir la situation entre 1994 et 2010, les progrès doivent être réalisés aussi bien sur les voiries à vitesses faibles que celles à vitesses élevées. Ils devraient donc porter aussi bien sur les enrobés drainants et les protections phoniques utilisés sur les axes lourds que sur les émissions sonores intrinsèques des véhicules, surtout sensibles en vitesses urbaines. Quels

que soient les progrès réalisés en la matière, il faut souligner que ce constat témoigne de la présence de plus en plus forte de l'automobile dans la ville.

3. Les limites et apports du travail

La synthèse descriptive des résultats qui vient d'être faite ne présente de véritable intérêt que si elle est complétée d'un exposé sur les limites de fiabilité des calculs effectués d'une part et d'une réflexion sur les principales conclusions que l'on peut tirer de ces résultats d'autre part.

3.1. Les précautions d'emploi : limites des hypothèses et fiabilité des résultats

Les tests de sensibilité effectués au chapitre 3 ont permis de souligner l'incertitude introduite par la prise en compte des trafics poids-lourds. En effet les niveaux de trafics et les émissions unitaires de ces véhicules restent aujourd'hui déterminés de manière approximative alors que les résultats obtenus sont relativement sensibles aux valeurs retenues. Les calculs les plus affectés par cette incertitude concernent les émissions de poussières et les émissions sonores. Pour éviter de trop altérer la validité de nos résultats nous avons préféré restreindre nos calculs au trafic des véhicules légers, quitte à vérifier dans un second temps les tendances obtenues en élargissant l'analyse au trafic total (chapitre 4).

Une autre incertitude forte est introduite par la définition des "cycles de conduite" et notamment des vitesses fixées pour borner chaque cycle. Les résultats les plus sensibles aux hypothèses posées dans ce domaine concernent les émissions de CO, d'hydrocarbures et de plomb. Les conséquences de cette sensibilité nous sont apparues limitées dans la mesure où nous avons supposé que les vitesses moyennes par cycle fournies par l'INRETS apportaient un gage de fiabilité suffisant pour la définition de classes de vitesses par cycle. On peut rajouter que pour les projections sur 2000 et 2010 la très forte baisse voire la disparition des émissions des polluants les plus concernés diminue d'autant les niveaux d'incertitude et les enjeux qui y sont liés.

D'autres sources d'incertitude sont par contre apparues avec l'exercice de prospective introduit au chapitre 5 :

- La première concerne bien sûr les évolutions envisagées du trafic. Cependant notre objectif n'étant pas de faire de la prévision, cette limite a été classée comme secondaire : il nous suffisait de disposer de niveaux de trafic plausibles aux horizons 2000 et 2010.
- Une autre zone d'instabilité s'est renforcée autour de la proportion des véhicules roulant à froid. En effet, avec l'équipement en pot catalytique des véhicules à essence, une très forte proportion de leurs émissions est générée au cours des premiers kilomètres des déplacements. On peut cependant montrer que si les évaluations des émissions des véhicules à essence sont très sensibles aux hypothèses concernant les véhicules à froid, cette sensibilité se restreint nettement lorsque l'on passe à l'ensemble du trafic des véhicules légers. Enfin

cette sensibilité se trouvera d'autant plus réduite que l'on améliorera le comportement à froid des pots catalytiques.

- Enfin un troisième point touche aux conséquences de la diésélisation du parc et du trafic des véhicules légers. Il est évident en effet que l'hypothèse finalement retenue d'un trafic composé de 42% de véhicules diesel en 2010 reste arbitraire et indique surtout une tendance lourde à la diésélisation. Les émissions les plus sensibles à une modification de cette hypothèse concernent les poussières et dans une moindre mesure les NOx : ce sont donc ces deux polluants qui sont concernés par ce phénomène de diésélisation et qui dépendront le plus de l'ampleur du mouvement - si aucune évolution des normes d'émissions sur les véhicules légers diesel et/ou de la fiscalité sur le gazole n'intervient d'ici 2010.

Dans l'autre sens, il reste à souligner la très grande stabilité des résultats face à l'ensemble des tests que nous avons pratiqués pour vérifier la pertinence de l'usage d'un modèle d'affectation statique des déplacements routiers. Tant que l'on analyse les résultats à un niveau global et que l'on évite de se pencher trop finement sur les tronçons de voirie, les niveaux d'émissions obtenus ne varient quasiment pas avec les options de calcul et le mode d'affectation retenu, plus court chemin ou principe de Wardrop.

3.2. Quelques conclusions du travail

Parmi l'ensemble des conclusions évoquées, nous en avons sélectionné quelques unes susceptibles d'alimenter directement les débats actuels sur les moyens de prendre en compte les problèmes liés aux nuisances du trafic routier urbain. La première concerne la question de la congestion et les problèmes d'internalisation de ses effets environnementaux. La seconde touche au développement du diesel au sein du parc des véhicules légers et à ses conséquences, pour l'instant peu prévues, en matière d'émissions polluantes. Une troisième enfin renvoie à une réflexion d'ordre général sur les conditions d'une croissance durable de la mobilité.

a) Le risque de surévaluer les conséquences environnementales négatives de la congestion

Il semble être aujourd'hui un fait acquis que la congestion du trafic routier est la cause d'une part importante des nuisances urbaines, de la dégradation de l'environnement atmosphérique et sonore en particulier.

Si le terme "congestion" signifie la masse croissante du trafic, le constat est difficilement contestable même si on peut le nuancer sur tel ou tel polluant particulier. Par contre si par "congestion" on désigne les phénomènes de gêne mutuelle provoqués par la croissance du nombre de déplacements routiers et notamment la baisse moyenne des vitesses qu'ils entraînent, notre position reste beaucoup plus réservée.

- D'une part seuls quelques types de polluants s'avèrent très sensibles aux variations des conditions de circulation : les hydrocarbures et le monoxyde de carbone (CO). Les niveaux d'émissions des autres polluants restent beaucoup plus stables lorsque les vitesses varient et certains apparaissent même comme décroissants tels que les NOx ou les émissions sonores. De plus les émissions des polluants les plus sensibles devraient baisser très fortement dans les années

à venir, notamment du fait de l'installation du pot catalytique sur les véhicules à essence.

- D'autre part la congestion contribue à long terme à une meilleure rationalisation du choix des localisations des activités. Elle évite donc *a priori* un étalement urbain trop marqué ce qui a pour corollaire que les distances parcourues ne s'allongent pas et que les modes de transports alternatifs comme la marche à pied ou les transports collectifs restent efficaces.
- Enfin la croissance du trafic est beaucoup plus forte aux heures creuses et en périphérie qu'en heure de pointe en centre ville. La progression du trafic est donc plus forte là où elle affecte le moins les conditions de circulation.

L'ensemble de ces points nous pousse à penser que la lutte contre la congestion, en soi, n'améliorera pas ou peu le bilan environnemental du trafic routier. Le principal facteur explicatif des niveaux d'émissions reste le niveau global du trafic, c'est à dire le total de la distance parcourue par l'ensemble des véhicules sur le territoire et la période considérés.

Une politique visant à maintenir ou améliorer les vitesses peut sans doute s'argumenter par des critères d'efficacité économique. Par contre elle ne peut guère prétendre des avantages environnementaux qu'elle procure, surtout si les gains d'accessibilité routière qu'elle permet conduisent à une importante induction de trafic.

Ainsi une survalorisation des nuisances générées par la congestion risque de renforcer le développement d'infrastructures routières dont la conséquence va être une génération encore plus importante d'émissions que dans la période précédente. De même l'introduction des Technologies de Transport Avancées (guidage dynamique et contrôle automatique des véhicules, gestion en temps réel des plans de feux...) peut permettre une amélioration de la sécurité et une optimisation de la gestion du trafic, même avec des flux plus importants. Ne réduisant pas les flux, leur impact environnemental immédiat reste limité et les progressions de trafic permises à moyen et long terme risquent de rendre leur bilan environnemental négatif.

Le même raisonnement nous pousse à rester réservé sur le bilan environnemental d'un péage urbain. Nous avons vu en effet qu'un péage d'accès à une zone aux tarifs différenciés selon les heures modifierait sans aucun doute la donne en matière d'environnement et de cadre de vie d'une agglomération. Par contre les redistributions spatiales et temporelles des déplacements qu'il impliquerait ne signifie pas forcément une baisse du trafic et des émissions qui y sont liées. Pour le rendre cohérent avec un objectif environnemental il faudrait donc développer une forte alternative en transports collectifs facilitant les transferts modaux au détriment d'une redistribution des déplacements automobiles. On observe ici une convergence avec une exigence de justice sociale qui se satisfait mal du fait que les surcoûts du péage ne compensent pas les améliorations des conditions de circulation pour une partie des automobilistes (certains se trouvant même exclus de l'accès à la zone à péage).

En écho à la conclusion du chapitre 4, l'évolution générale des émissions polluantes et sonores du trafic automobile urbain est donc beaucoup plus liée au trafic total qu'aux conditions de circulation. En ce sens, la réflexion sur les liens entre circulation routière et environnement est plus à tourner sur le moins rouler que sur le rouler mieux.

b) Les évolutions du parc automobile et l'impact de sa diésélisation

Lorsqu'on évoque les réponses technologiques susceptibles d'améliorer les émissions du trafic routier (émissions atmosphériques notamment), on pense souvent au développement des modes de propulsion alternatifs qui reviennent en force dans les discours aujourd'hui : biocarburants, électricité, GNV ou GPL, etc. Cependant plusieurs facteurs limitent de fait tout espoir d'un impact sensible et immédiat de l'usage de ces énergies "nouvelles" sur les émissions :

- elles imposent toutes, chacune à leur manière, des contraintes techniques qui freinent leur développement industriel ou commercial ;
- une fois ces contraintes dépassées, le temps nécessaire pour que le marché s'ouvre sur ces nouveautés et que la composition du parc ait quelques chances de s'en ressentir vraiment sera de toute façon de l'ordre d'une dizaine d'année ;
- enfin, les progrès des performances des véhicules traditionnels entraînent la nécessité d'une expansion d'autant plus forte des technologies alternatives pour que leur impact soit significatif.

Leur développement pose sans doute les bases de l'automobile écologique de demain, véhicules bi-motorisés, pile à combustible, moteur à hydrogène... On ne peut cependant pas attendre de résultat spectaculaire dans les quinze années qui viennent.

En fait les principales modifications à attendre viennent des exigences nouvelles sur les véhicules traditionnels et de la forte recomposition du parc que l'on observe actuellement.

D'une part les directives européennes en vigueur depuis janvier 1993 obligent les véhicules à essence neufs d'être équipés de pots catalytiques ; une prochaine loi devrait conduire à une division par 6 du taux de soufre dans le gazole (de 0,3 g/l début 1994 à 0,05 g/l à la fin 96). Malgré les progressions attendues du trafic ces mesures devraient permettre - nous l'avons déjà vu - une forte baisse des hydrocarbures et du CO ainsi qu'une disparition du plomb. Les émissions de NOx devraient baisser et celle de SO2 pourraient rester stables.

D'autre part on observe aujourd'hui une très forte tendance à la diésélisation du parc automobile. Les améliorations du confort et l'avantage financier à l'usage par rapport à l'essence poussent à cette tendance et rien ne permet de penser à un retournement dans les années qui viennent. Cette recomposition du parc induit une modification des caractéristiques d'émissions du trafic et malgré les normes qui se renforcent aujourd'hui sur les véhicules diesel, les poussières risquent de devenir un des polluants automobile les plus pointés du doigt dans les années qui viennent.

c) *Trafic routier et mobilité durable*

L'idée de "mobilité durable" se décline de multiples manières selon les acteurs concernés. On peut adopter une attitude "marginaliste", comme certains constructeurs qui préféreraient n'envisager que des modifications ponctuelles sur leurs véhicules et estiment suffisants les progrès déjà accomplis. Ainsi Jacques Calvet, PDG de PSA, affirmait dans le *Financial Times* du 12/01/96 que toute "nouvelle aggravation des normes des voitures neuves en l'an 2000 renchérirait sans doute inutilement les coûts" (repris par *Libération* du 13-14 janvier 1996). D'autres intègrent leur discours dans des stratégies commerciales à long terme où l'exigence environnementale est considérée comme contrainte de fait : ils affichent des perspectives plus ouvertes qui sauvegardent l'essentiel en préservant l'idée même du développement de l'automobile.

Ce type de démarche, nécessaire, est aujourd'hui un des éléments moteurs de l'évolution technologique des véhicules routiers. En Europe, et en France en particulier, il devra notamment se préoccuper du développement du diesel au sein du parc automobile et déboucher sur la mise au point de moyens de lutte contre les particules au niveau des véhicules légers. Sur le long terme, c'est aux questions de consommation d'énergie et d'émissions de CO₂ qu'il se trouve également confronté.

Mais accepter l'effort à développer sur les performances écologiques des véhicules routiers ne suffit pas pour clore le débat. Si l'on considère le poids des tendances sociales démographiques et économiques qui ont été évoquées au cours du chapitre 5, la croissance de la mobilité sera sans doute essentiellement automobile.

On peut envisager ce fait comme inévitable et l'accompagner. Nous avons pu voir à travers le thème de la congestion qu'une telle attitude ne peut guère prétexter de la contrainte environnementale pour justifier de la nécessité de maintenir voire d'améliorer la fluidité du trafic. Ce sont essentiellement des arguments sur l'efficacité économique du système qui peuvent être avancés, touchant aux gains de temps et à l'accessibilité des espaces ainsi qu'au lien constaté entre la croissance du trafic routier et celle des activités économiques, la première étant alors supposée jouer un rôle permissif pour la seconde.

On peut cependant s'interroger sur les conséquences de la reproduction indéfinie d'une telle logique de développement du système des transports, sachant que les gains d'accessibilités ont toujours été utilisés pour étendre l'espace disponible que pour gagner du temps et l'utiliser à d'autres activités que le transport (Bieber, Massot, Orfeuill, 1993. Cf. chapitre 4) : dissociation de plus en plus nette des fonctions économiques et sociales inscrites dans l'espace et éclatement progressif des territoires de référence de chacun, croissance incessante de la part de l'espace dédié aux transports routiers, dépendance presque totale à un seul mode de déplacement...

Nous ne nous sommes pas attachés dans ce travail à étudier les nombreux moyens de régulation qui devront permettre de contrôler un tel développement. Trois grands leviers internes au système des transports peuvent néanmoins être évoqués, avec la recherche d'une régulation par les prix (taxes sur les carburants et sur la possession d'une automobile, mise à péage des parkings et de la voirie), l'évolution des mesures réglementaires (interdiction des zones centrales, alternances des véhicules autorisés à circuler, protection des zones résidentielles par de fortes limitations de vitesses), et la mise en place de politiques volontaires en faveur des modes alternatifs à l'automobile (emprise sur voirie réservée pour les pistes cyclables, développement des transports collectifs, qui restent une

alternative privilégiée à l'automobile ; enfin, une très forte offre de taxis ou le développement de systèmes de location de véhicules peuvent également être des moyens de rationaliser l'usage de l'automobile). Une réflexion dépassant le simple cadre des transports est sans doute également nécessaire, qui remette à plat nos usages de l'espace et les logiques de localisation de nos activités et insiste sur l'idée d'une accessibilité durable comme condition nécessaire à celle d'une mobilité durable.

Les conditions d'une croissance durable de notre mobilité passent par une action simultanée sur l'ensemble de ces paramètres. Et les enjeux sont d'autant plus importants qu'ils dépassent le simple cadre de l'interaction entre transports routiers urbains et pollutions atmosphériques et sonores qui a été traitée dans ce travail. C'est aussi une conception de notre manière de vivre la ville qui se trouve engagée. C'est le choix de toute une société puisque notre monde, aujourd'hui, est urbain.

ANNEXES

ANNEXE I

LA METHODE D'ESTIMATION

DES EMISSIONS DE POLLUANTS ATMOSPHERIQUES

Cette première annexe est consacrée au détail des hypothèses de calcul servant à l'estimation des émissions de polluants atmosphériques du trafic routier. Ces hypothèses ont été posées pour plusieurs époques : 1990 qui a servi de référence dans l'élaboration de la méthode mais aussi 1994, 2000 et 2010 dans le cadre de l'exercice prospectif du chapitre 5.

De façon générale, la méthodologie retenue pour estimer les émissions de polluants atmosphériques a été la suivante :

- déduction des émissions unitaires (en g/veh.km) à partir des cycles de conduite pour trois grands types de véhicules (VL essence, VL diesel, PL) ;
- prise en compte d'un facteur de correction permettant de d'estimer les surémissions liées aux moteurs tournant à froid ; des parts de moteurs froids pour chaque cycle de conduite ont donc dues être estimées pour les VL, celles des PL étant considérées comme négligeables ;
- enfin, la part respective de chaque type de véhicule à l'intérieur de chaque cycle a été estimée ; pour chaque cycle de conduite, la somme des émissions unitaires de chaque type de véhicule, corrigées de la part de surémissions des moteurs froids et pondérée de leur proportion dans le trafic a permis d'obtenir un niveau d'émission unitaire moyen.

Les cycles de conduite ont été établis par l'INRETS sur la base d'une campagne d'enquête sur les conditions réelles d'utilisation des véhicules¹. La formalisation que nous avons utilisé pour adapter ces informations aux résultats fournis par le modèle d'affectation DAVIS est présentée page suivante².

Les données d'émissions (NO_x, CO, CO₂, hydrocarbures et poussières) et de consommation d'énergie des véhicules légers sont issus des travaux de l'INRETS³. Leurs émissions de SO₂ et de plomb ont été calculées en fonction des teneurs en soufre et en plomb des carburants.

Les données d'émissions des poids lourds et de surémissions des moteurs à froid n'ont pas été reprises directement de travaux existants mais ont fait l'objet de traitements spécifiques. Le détail des hypothèses retenues pour les calculer est exposé au cours des pages suivantes.

Les données d'émissions unitaires par type de véhicule pour chaque cycle de conduite sont présentées en fin d'annexe. Elles permettent de déboucher sur les émissions moyennes d'un véhicule "moyen" roulant pendant 1 km à un cycle de conduite donné. Ce tableau résultant est également fourni à la fin.

¹ ANDRE M., ROUMEGOUX, J.P., DELSEY J., GUITTON, J.P., VIDON R. : *Etude expérimentale sur les utilisations réelles des véhicules (EUREV)*. Bron : Rapport INRETS n°48, 1987. 125 p.

² Cette formalisation est reprise à EUROPLAN : *POLYEN, analyse des émissions de pollution liées à l'énergie dans l'agglomération lyonnaise. Volumes I, II et III*. Etude pour le compte de la COURLY, la Commission des Communautés Européennes (DG VII) et Rhônalpénergie. Lyon, Mars 1992.

³ On peut les retrouver en annexes de JOUMARD R., PATUREL L., VIDON R., GUITTON J.P., SABER A.I., COMBET E. : *Emissions unitaires de polluants des véhicules légers*. Bron : Rapport INRETS n°116, 1990. 119 p. p. 86 et p. 94.

1. La définition des cycles de conduite dans le cadre de notre travail

Nous reprenons ici, pour rappel, le tableau 2 fourni au chapitre 3. Cette définition des cycles de conduite à partir des vitesses moyennes et des types de voiries a été reprise du travail de la société EUROPLAN pour ses propres évaluations des émissions polluantes dans l'agglomération lyonnaise⁴.

Tableau 1 : La définition des cycles de conduite

Cycle	Type de voirie	Vitesse comprise entre
Autoroute 1	9	> 85 km/h
Autoroute 2	4, 6 9	>70 km/h 60 et 85 km/h
Route 1	9 4, 6 2, 3, 7, 8	0 et 60 km/h 55 et 70 km/h >55 km/h
Route 2	2, 3, 4, 6, 7, 8	42 et 55 km/h
Route 3	2, 3, 4, 6, 7 8	33 et 42 km/h 0 et 42 km/h
Urbain fluide 1	2, 3, 4, 6, 7 5	25 et 33 km/h > 25 km/h
Urbain fluide 2	2 à 7	19 et 25 km/h
Urbain fluide 3	2 à 7	12 et 19 km/h
Urbain lent 1	2 à 7	7 et 12 km/h
Urbain lent 2	2 à 7	0 et 7 km/h

Les 9 types de voirie définis pour le réseau de Lyon dans DAVIS sont les suivants, sachant que le "réseau de voirie intérieur" (type n°1) n'a pas été pris en compte car il correspond aux liens fictifs reliant les centroïdes de zones au réseau proprement dit :

- | | |
|----------------------------------|------------------|
| (1. Réseau secondaire intérieur) | 6. CD 300 |
| 2. Réseau secondaire | 7. Pénétrante |
| 3. Rode | 8. Rase campagne |
| 4. Voie rapide urbaine | 9. Autoroute |
| 5. Centre Ville | |

⁴ Voir EUROPLAN : *POLYEN, analyse des émissions de pollution liées à l'énergie dans l'agglomération lyonnaise. Op. Cit.*

2. L'estimation des émissions unitaires en 1990

2.1. Le calcul des émissions unitaires des Poids Lourds

2.1.1. Les données d'émissions disponibles

Les données de base concernant les émissions unitaires en g/km des Poids-Lourds ont été reprises du rapport CORINAIR⁵ :

Tableau 2 : Emissions unitaires des Poids Lourds Diesel de 3,5 à 16 t

<i>en g/km</i>	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>
<i>Urbain</i>	227	1,36	8,7	0,95	18,8	670,5	2,75
<i>Rase Campagne</i>	189	1,13	7,4	0,82	7,3	576,1	0,76
<i>Autoroute</i>	154	0,92	6,0	0,66	4,2	472,3	0,60

Tableau 3 : Emissions unitaires des Poids Lourds Diesel de plus de 16 t

<i>en g/km</i>	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>
<i>Urbain</i>	366	2,20	16,2	1,6	18,8	1094,5	5,8
<i>Rase Campagne</i>	328	1,97	14,8	1,4	7,3	1004,3	2,6
<i>Autoroute</i>	294	1,76	13,5	1,25	4,2	904,0	2,3

Tableau 4 : Emissions unitaires des Autocars

<i>en g/km</i>	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>
<i>Urbain</i>	330	1,98	16,5	1,4	17,0	986,7	5,3
<i>Rase Campagne</i>	280	1,68	18,2	1,2	6,2	857,4	2,2
<i>Autoroute</i>	215	1,29	13,9	0,9	3,0	661,2	1,7

Les émissions unitaires de NOx, poussières, CO, hydrocarbures ainsi que la consommation de gaz-oil sont extraites des tableaux pp. 52-53. Les émissions de SO2 sont directement établies à partir de la consommation en supposant que la totalité du soufre contenue dans le carburant est émise (Cf. p. 27 du rapport CORINAIR). Le taux de soufre dans le diesel a été posé égale à 0,6%. Enfin les émissions unitaires de dioxyde de carbone ont été retrouvées à partir de la formule n°17 fournie p. 27 :

⁵ Commission of the European Communities : *CORINAIR working group on emission factors for calculating 1990 emissions from road traffic. Volume 1 : Methodology and emissions factors*. Bruxelles-Luxembourg : ECSC-EEC-EAEC, 1993. 115 p.

$$\text{Masse de CO}_2 = 44,011 * [\text{masse de fuel}/(12,011+1,008*r_{\text{H/C}}) \\ - \text{masse de CO}/28,011 \\ - \text{masse d'hydrocarbure}/13,85 \\ - \text{masse de poussières}/12,011]$$

avec $r_{\text{H/C}} \approx 2$ pour le diesel

2.2.2. La structure du trafic PL suivant les cycles de conduite

Etant donné les différences importantes qui existent au niveau des émissions unitaires des trois catégories de poids lourds considérées, il s'avère nécessaire de s'interroger sur la part relative de chacune d'entre elles dans les cycles "Urbain", "Rase Campagne" et "Autoroute". Ce n'est qu'ensuite que l'on pourra établir des émissions unitaires moyennes par cycle.

Or les données concernant les trafic poids-lourds sont rares, surtout en milieu urbain. Elles sont de plus très hétérogènes. Nous nous sommes servis de deux sources distinctes, concernant la dernière enquête cordon de Lyon effectuée en 1990⁶ et une enquête spécifique sur les trafics poids-lourds menée par l'INRETS en 1992⁷. L'enquête cordon, fournissant des informations sur les trafics sortant de la COURLY, a été utilisée pour établir les trafics sur autoroute et en "rase campagne". L'enquête INRETS, effectuée dans le tunnel de la Croix-Rousse, a servi de référence aux données de trafic urbain car cet axe est réputé pour son usage local.

a) Données enquête cordon

- Le dénombrement des PL

Sur une journée de semaine moyenne (6h-20h), l'enquête cordon a permis de dénombrer 1 380 autocars en sortie d'agglomération, ainsi que 27 840 autres PL qui se répartissent en 40% de camions, 9% de camions+remorques et 51% de semi-remorques.

Les *autocars* constituent environ 1% du trafic total, quel que soit le type d'axe, sur une journée 6h-20h, ce qui représente 760 véhicules sur les autoroutes à péage, 315 sur les R.N. principales et autoroutes sans péage et 710 sur les autres axes⁸.

Concernant le *transport de marchandise*, on connaît le tonnage moyen transporté par type de PL et par type de voirie⁹ :

⁶ DDE du Rhône, CETE de Lyon : *Enquête cordon de Lyon, les problèmes quotidiens de circulation : transit et échange avec l'extérieur de l'agglomération*. Lyon, 1992. 33 p.

⁷ PILLOT Didier : "Analyse fine des trafics lourds". 3^{ème} colloque international *Transports et pollution de l'air*, Avignon, 6-10 Juin 1994. Préactes, Bron : INRETS éd. pp. 87-94.

⁸ *Idem* p. 12.

⁹ *Idem* p. 25

Tableau 5 : Tonnage moyen transporté par type de PL marchandises et de voie sur une journée 6h-20h

	Autoroutes à péage	R. N. principales et Autoroutes sans péage	Autres axes	Total
Camion	3 656	3 401	4 079	11 136
Camion+remorque	1 556	570	380	2 506
Semi-remorque	10 106	2 482	1 610	14 198
Total	15 318	6 453	6 069	27 840

En ramenant le tonnage total transporté par chacun de ces 3 types de PL au total de véhicules dénombrés pour chaque type, on peut tout d'abord déduire le tonnage moyen transporté par type de PL de marchandise : 3,73 tonnes pour les camions, 9,34 pour les camions+remorque et 12,11 pour les semi-remorque. En reportant cette moyenne à l'intérieur du tableau précédent, on obtient une évaluation du nombre de PL de marchandises suivant leur type et le type de voie empruntée :

Tableau 6 : Nombre de poids lourds de marchandises par type de voirie sur une journée 6h-20h

	Autoroutes à péage	R. N. principales et Autoroutes sans péage	Autres axes
Camion	3 656	3 401	4 079
Camion+remorque	1 556	570	380
Semi-remorque	10 106	2 482	1 610

Pour rester homogène avec les données de l'enquête INRETS qui ne distingue que deux catégories de PL de marchandises, "camions solo" et "ensembles routiers", nous avons rassemblé camion+remorque et semi-remorque en une même rubrique.

- Les hypothèses de répartition des trafics par cycle de conduite

Nous avons ensuite considéré que la répartition des différents types de PL dans la colonne "Autoroute à péage" est représentative de leur répartition en cycle de conduite autoroutier. Les deux autres colonnes, Autoroutes sans péage, Routes Nationales et autres axes en sortie d'agglomération, ont été considérées comme représentatives de la répartition des différents types de PL en cycle routier.

- Les résultats

Les parts relatives des 3 types de Poids-Lourds, autocars, camions solo et ensembles routiers sont alors les suivantes pour les cycles routiers et autoroutiers :

Tableau 7 : Structure du trafic poids-lourds retenue pour les cycles de conduite routier et autoroutier

	Cycles autoroutiers	Cycles routiers
Autocars	0,05	0,08
Camions solo	0,25	0,55
Ensembles routiers	0,70	0,37

b) Données "Enquête INRETS"

L'enquête menée entre 1991 et 1992 par Didier PILLOT de l'INRETS concerne l'analyse détaillée des trafics Poids-Lourds avec pour objectif d'alimenter les modèles de calcul des émissions de polluants utilisés notamment par le Centre d'Etude des Tunnels¹⁰.

Trois axes ont été sélectionnés pour l'enquête, le premier transfrontalier à trafic international, le second à trafic interurbain et le troisième, enfin, à trafic urbain. L'axe retenu pour les relevés en zone urbaine correspond au tunnel de la Croix-Rousse. Il a été enquêté à la mi-avril 1992. Le trafic PL sur cet axe est essentiellement un trafic à caractère local car les grands flux de transit passent surtout par le tunnel de Fourvière ou empruntent le Contournement Est de Lyon : dans la journée, entre 6h et 20h, 53% du trafic PL est à vocation locale, 38% est lié à du trafic d'échange entre la COURLY et l'extérieur et 9% seulement correspond à du transit¹¹. Nous l'avons donc considéré plus pertinent que les trafics "enquête cordon" pour donner une image de la structure du trafic poids-lourd en cycle urbain.

Concernant les PL de plus de 3,5 t, cette enquête reprend la distinction autocars, camions solo et ensembles routiers (camion + remorque ou semi-remorque). Les trafics journaliers (8h-20h) moyens sur une semaine complète peuvent dès lors être décomposés de façon compatible avec ceux de l'enquête cordon. Les résultats, assimilés pour la suite à la structure du trafic PL en cycles urbains, sont les suivants :

Tableau 8 : Trafics poids-lourds moyen en journée 8-20h sous le tunnel de la Croix-Rousse. Données en valeur absolue et relative (assimilée à la structure du trafic PL en cycles urbains)

	Trafics 8h-20h	Trafic PL en cycles urbains
Autocars	757	0,12
Camions solo	4 628	0,72
Ensembles routiers	1 037	0,16

2.2.3. Les émissions moyennes des poids lourds suivant le cycle de conduite

Pour estimer les émissions moyennes des poids lourds, nous avons assimilé les poids lourds de 3,5-16 tonnes aux camions solo et ceux de plus de 16 tonnes aux ensembles routiers. De même, les données autocars de CORINAIR ont été estimées cohérentes avec la flotte d'autocars concernés par les données d'enquêtes utilisées.

Le calcul des émissions unitaires moyennes des poids lourds s'est fait ensuite en additionnant les émissions unitaires pondérées par la part relative dans le trafic PL du type de poids lourds correspondant (autocars, camion solo et ensemble autoroutier), pour un cycle de conduite donné (urbain, routier ou autoroutier). Les résultats obtenus sont les suivants :

¹⁰ Cf. PILLOT Didier : "Analyse fine des trafics lourds". *Op. Cit.*

¹¹ Cf. DDE du Rhône, CETE de Lyon : *Enquête cordon de Lyon... Op. Cit.* p. 15.

Tableau 9 : Emissions unitaires moyennes des Poids Lourds suivant les différents cycles de conduites

<i>en g/km</i>	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>
<i>Cycles urbains</i>	262	1,57	10,83	1,11	18,59	776,2	3,54
<i>Cycles routiers</i>	248	1,49	10,97	1,06	7,22	756,7	1,55
<i>Cycles autoroutiers</i>	255	1,53	11,63	1,08	4,14	782,6	1,84

Ce sont ces émissions unitaires qui ont été utilisées dans les évaluations d'émissions au niveau de l'agglomération. On peut tout d'abord remarquer que les différentes répartitions par type de poids-lourds suivant les cycles viennent perturber l'ordonnement habituel des niveaux d'émissions correspondant à des cycles urbains très polluants, des cycles autoroutiers peu polluants et des cycles routiers au milieu. En fait les niveaux d'émissions se trouvent plutôt lissés, sauf pour le CO et les hydrocarbures pour lesquels les émissions en cycle urbain sont très élevées par rapport aux deux autres cycles, quel que soit le type de PL considéré.

Il ne faut cependant pas considérer ces chiffres comme définitifs. De nombreuses approximations ont été faites, dont celle qui a consisté à assimiler certains types de voirie à des cycles de conduite n'est pas des moindres. Ces résultats ont été établis faute de mieux et les tests effectués au cours du chapitre 3 montrent combien l'incertitude qui les entoure a une incidence importante sur les résultats d'émissions au niveau global de l'agglomération.

2.2. A propos des surémissions à froid

2.2.1. Les véhicules légers

a) Les coefficients de surémission

Les coefficients de surémission retenus sont ceux établis par le Laboratoire Energie Nuisances de l'INRETS en 1990¹² :

¹² Cf. p. 46 de JOURMARD et alii : *Emissions unitaires... Op. Cit.*

Tableau 10 : Rapport des émissions unitaires moyennes départ froid/départ chaud selon le type de carburant (mesuré pour les cycles urbain lent et ECE15 sur des véhicules non réglés avant tests)

	Cycle	Energie	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure
VL Essence	Urbain lent	1,63	1,1	-	2,20	1,40	3,39
	Norme ECE15	1,44	0,99	-	2,12	1,27	2,61
	Moyenne retenue	1,54	1,05	-	2,16	1,34	3,00
VL Diesel	Urbain lent	1,27	1,12	1,49	1,87	1,25	1,42
	Norme ECE15	1,20	1,10	1,56	1,34	1,21	1,82
	Moyenne retenue	1,24	1,11	1,52	1,61	1,23	1,62

Pour l'ensemble des évaluations, les émissions de SO₂ et de plomb ont été estimées égales à la proportion de ces deux polluants dans le carburant, soit respectivement 2,9 et 0,12 g par litre d'essence ainsi que 5,7 et 0 g par litre de gazole¹³. Leur coefficient de surémission à froid a, de même, été estimé égale au coefficient de surconsommation à froid du carburant.

b) La proportion de véhicules légers à froid dans le trafic

C'est une étude sur les utilisations réelles des véhicules menées par l'INRETS entre 1983 et 1985 qui a permis d'établir les cycles de conduite utilisés ici. Elle a également été l'occasion de mesurer le fonctionnement et la température du moteur et de montrer qu'au sein du trafic VL la proportion de véhicules circulant à froid est de 0,27 si l'on définit comme "froid" tout moteur dont la température de l'eau est inférieure à 70°C¹⁴.

Tableau 11 : Fonctionnement moteur et températures d'eau : estimation des distances, durées parcourues et consommations par plages de température.

	Seuils de température d'eau du moteur					Total
	20°C	40°C	60°C	80°C	+ de 80°C	
<i>nombre de trajets</i>						
-démarrés sous le seuil	906	1 764	2 390	2 934	271	3 205
-ayant atteint le seuil	742	1 307	1 324	891	-	
<i>pour atteindre le seuil :</i>						
-distance moyenne (km)	0,88	1,35	2,24	4,80	-	
-durée moyenne (mn)	2,25	3,12	4,41	7,51	-	
-consommation (l)	0,17	0,21	0,29	0,50	-	
<i>distance sous le seuil</i>						
-en km	730	2 080	4 160	9 170	13 190	22 360
-en %	3,1	9,3	18,6	41,0	59,0	

Nous avons donc attribué les coefficients de surémission du premier tableau à 27% des véhicules, quel que soit le cycle de conduite.

¹³ Cf. EUROPLAN : POLYEN... Op. Cit. p. 240.

¹⁴ Cf. pp. 32-37 de ANDRE et alii : Etude expérimentale sur les utilisations réelles des véhicules (EUREV). Op. Cit. Le tableau suivant est tiré de la p. 36.

c) Les limites des hypothèses retenues

Les imprécisions qui entachent ce procédé de calcul sont de deux ordres :

- d'une part ce calcul procède du tout ou rien : à moins de 70°, le véhicule est froid et à plus de 70°, il est chaud. A notre connaissance, il n'existe pas pour l'instant de résultats sur les étapes intermédiaires.
- d'autre part l'échantillon de déplacements qui a permis d'établir cette proportion correspond à une moyenne nationale alors que nos calculs se font en un lieu spécifique (une zone urbaine), à une période bien particulière (l'heure de pointe du soir), et des conditions climatiques qui lui sont propres (région lyonnaise en soirée, en moyenne sur une année).

Rajoutons de plus que dans notre travail les déplacements effectués à l'intérieur des zones définies pour permettre le processus d'affectation sous DAVIS ne sont pas pris en compte. Tous ces déplacements exclus correspondent à des petites distances et sont de fait les premiers concernés par les considérations sur les moteurs à froid. Cette exclusion a sans doute des répercussions importantes. En effet l'enquête EUREV révèle une distance parcourue moyenne par déplacement de 7 km ; nous obtenons en HPS 1990 sur l'agglomération lyonnaise une moyenne de 8,6 km alors que l'on aurait pu s'attendre à une distance inférieure à celle obtenue par les chercheurs de l'INRETS.

Nous avons cependant fait le choix de rester cohérent avec nos données initiales sans prise en compte des petits déplacements, *a priori* plus nombreux en ville qu'en interurbain, mais exclus du fait des contraintes de technique d'affectation. Les résultats de l'INRETS, obtenus à un niveau national, urbain et interurbain confondus, et établissant une part de 27% du trafic automobile effectué à froid a été retenu. Le test sur la sensibilité des résultats à ce paramètre devra par contre être surveillé avec attention.

2.2.2. Les poids lourds

En ce qui concerne les poids lourds il n'existe pas, à notre connaissance, de données sur les questions d'émissions à froid. Nous avons fait l'hypothèse que la proportion de poids lourds à froid parmi l'ensemble du trafic poids lourds est négligeable du fait d'un usage beaucoup plus intensif que les véhicules légers.

2.3. Les émissions unitaires retenues par type de véhicule et par cycle de conduite

On peut trouver à la page suivante l'ensemble des données de calcul finalement retenues, avec pour chaque cycle de conduite la proportion des différents véhicules au sein du trafic (VL essence, VL diesel et PL) ainsi que leurs émissions unitaires en SO₂, NO_x, poussières, CO, CO₂, hydrocarbure et plomb.

3. les hypothèses d'évolution du parc aux horizons 1994, 2000 et 2010

Les hypothèses d'émissions unitaires des véhicules en 1990 ont servi dans les premières phases de notre travail. Cependant, lors de l'exercice prospectif du dernier chapitre, les caractéristiques technologiques du parc et la composition du trafic ont largement évoluées. Comme nous l'expliquons ici, ce sont surtout les tendances lourdes actuelles qui ont été privilégiées, avec une forte diésélisation du parc automobile et une profonde évolution des performances des véhicules à essence équipés du pot catalytique. Nous n'avons par contre pas pris en compte les nouveaux types de véhicules et de propulsion, considérant que leurs effets seront encore trop marginaux en 2010.

3.1. Les véhicules légers traditionnels : la montée du diesel au détriment de l'essence

3.1.1. La répartition des trafics entre VL essence et VL diesel en 1994, 2000 et 2010

Concernant la répartition essence/diesel des véhicules légers pour les différents horizons de notre simulation, à savoir 1994, 2000 et 2010, nous nous sommes principalement référé au travail de Caroline Gallez¹⁵. Ses projections de la structure du parc automobile donnent les résultats suivants¹⁶ :

Tableau 12 : Evolution de la répartition des véhicules légers entre essence et diesel de 1992 à 2010

%	1992	1995	2000	2005	2010
<i>Essence</i>	80	73	64	60	58
<i>Diesel</i>	20	27	36	40	42

Source : Caroline Gallez, 1994.

Une simple interpolation linéaire permet de trouver une répartition de 76% de véhicules à essence et 24% de diesel pour l'année 1994 qui sert de référence à nos propres calculs.

Ces résultats devraient être corrigés du fait que les distances annuelles parcourues en moyenne par les véhicules diesel sont supérieures à celles des véhicules à essence (+69% en 1988). Par contre on constate une baisse continue de ce surkilométrage, liée tout à la fois à la diminution du prix relatif à l'achat du diesel, qui contribue à développer un usage plus proche de celui de l'essence, et à une progression dans les véhicules de gammes moyennes et basses, qui parcourent des distances plus faibles que les grosses cylindrées. Pour leurs projections à l'horizon 2010 Joumard et Lambert ont ainsi fait l'hypothèse d'une

¹⁵ GALLEZ Caroline : *Modèles de projection à long terme de la structure du parc et du marché de l'automobile*. Paris : Université Paris I, Thèse de doctorat en Sciences Economiques, 1994. 333 p.

¹⁶ *Idem* pp. 267-268.

décroissance linéaire entre 1990 et 2010 aboutissant à un rapport de 1,17¹⁷. On obtiendrait alors les trafics suivants :

Tableau 13 : Evolution de la répartition du trafic entre VL essence et diesel de 1992 à 2010

	1988	1992	1994	1995	2000	2005	2010
<i>Rapport des Km parcourus (Dies/Ess)</i>	1.69	1.60	1.55	1.52	1.41	1.29	1.17
<i>Part du trafic essence</i>		0.72	0.67	0.64	0.56	0.54	0.54
<i>part du trafic diesel</i>		0.28	0.33	0.36	0.44	0.46	0.46

Nous avons cependant estimé que le surkilométrage des véhicules diesel est surtout lié à des distances parcourues en interurbain. Avec une telle hypothèse, la répartition du trafic en milieu urbain correspond alors à la répartition des véhicules suivant leurs carburants. Nous avons fait figurer dans l'annexe les résultats qui seraient obtenus avec une répartition du trafic global (sans distinction urbain/interurbain), permettant ainsi de mieux se rendre compte de leur sensibilité à cette hypothèse.

3.1.2. Les émissions des véhicules à essence équipés d'un pot catalytique

Le pot catalytique représente à l'heure actuelle l'unique technologie performante dont on dispose pour diminuer de manière significative la pollution des véhicules à essence. Placés entre le moteur et le pot d'échappement, ces catalyseurs transforment les gaz polluants en azote (N₂), en gaz carbonique et en vapeur d'eau. La catalyse se fait grâce à des métaux précieux tels que le platine, le palladium ou le rhodium qui rendent cette technologie relativement chère.

a) Le taux d'équipement en pot catalytique des véhicules à essence

Les normes européennes en vigueur depuis le 1^{er} janvier 1993 sur les véhicules neufs ont rendu obligatoire l'équipement d'un pot catalytique puisque c'est la seule technologie qui permette actuellement de les respecter.

Pour établir la proportion de véhicules à essence équipés aux différentes dates de simulations, nous avons repris les résultats des projections à l'horizon 2010 de Caroline Gallez concernant le volume total du parc de véhicules légers ainsi que la nombre de véhicules neufs achetés dans l'année¹⁸. Ces chiffres étant fournis pour 1992, 1995, 2000, 2005 et 2010, nous avons établis les données manquantes par simple interpolation linéaire. Nous avons ensuite calculé, pour chaque année *a* le nombre cumulé de véhicules vendus entre 1993 et *a*, rapporté au parc total de cette même année. Le rapport obtenu a été

¹⁷ Cf. pp. 15-18 de JOURMARD Robert, LAMBERT Jacques : *Evolution des émissions de polluants par les transports en France de 1970 à 2010*. Bron : INRETS, rapport INRETS n° 143, juillet 1991. 66 p.

¹⁸ Voir p. 265 de GALLEZ Caroline : *Modèles de projection à long terme de la structure du parc et du marché de l'automobile*. Op. Cit.

considéré comme représentatif du taux d'équipement en pots catalytiques des véhicules à essence.

Tableau 14 : Détermination de la part d'automobiles sorties après 1993 à l'intérieur du parc automobile - estimations de 1992 à 2010.

	<i>Nombre total de véhicules légers (en milliers)</i>	<i>Dont véhicules neufs de l'année courante</i>	<i>Part de véhicules \geqjanv.93</i>
1992	23 658	2 068	0.00
1993	24 026	2 192	0.09
1994	24 395	2 315	0.18
1995	24 763	2 439	0.28
1996	25 224	2 458	0.37
1997	25 686	2 477	0.46
1998	26 147	2 495	0.55
1999	26 609	2 514	0.63
2000	27 070	2 533	0.72
2001	27 443	2 549	0.80
2002	27 816	2 566	0.88
2003	28 188	2 582	0.96
2004	28 561	2 599	1.00
2005	28 934	2 615	1.00
...			
2010	30 476	2 707	1.00

Chiffres en gras : Caroline Gallez, 1994.

Si l'on reporte telle quelle cette part d'automobiles sorties après 1993 sur la part de véhicules catalysés parmi les véhicules légers à essence, on obtient pour ces derniers un taux d'équipement de 18% pour 1994, 72% pour 2000 et 100% pour 2010.

Il faut noter que cette approximation reste grossière :

- les calculs présentés dans le tableau ci-dessus ne reprennent pas la finesse des projections de Caroline Gallez, basés sur des modèles démographiques et le calcul de lois de survie d'une année sur l'autre des véhicules suivant leur carburant et leur niveau de gamme ; ainsi, nous ne prenons pas en compte le fait que parmi les véhicules neufs, certains ont une durée de vie très courte alors que d'autre peuvent continuer à rouler très longtemps : il restera sans doute encore des véhicules sans pot catalytique après 2005 ;
- la progression du diesel est plus forte que celle de l'essence, facteur qui devrait ralentir la progression du taux d'équipement ici calculé ;
- un autre facteur "oublié" qui devrait avoir un effet inverse tient au fait que de nombreux véhicules, notamment dans les gammes les plus hautes, étaient déjà équipés avant 1993 ;
- de même les primes à la casse des gouvernements Balladur et Juppé, ainsi que le renforcement des exigences en matière de contrôles techniques, devraient accélérer le taux de renouvellement du parc, avec une pointe sur la période actuelle.

Cependant les chiffres avancés par les constructeurs convergent vers ces résultats, malgré un écart notable pour 1994 : 30% de véhicules équipés en 1994, 70% en 2000, 95%

en 2010¹⁹. Nous avons rectifié notre premier chiffre en considérant que les taux d'équipement dont disposent les constructeurs pour les véhicules sortis avant 1993 sont beaucoup plus complets que les nôtres.

Notons enfin que le fait d'être équipé n'est pas supposé affecter les distances parcourues et la répartition des trafics reste identique à celle du parc.

b) Les émissions atmosphériques des véhicules à essence équipés d'un pot catalytique

Par rapport aux véhicules à essence plus anciens, ceux équipés d'un pot catalytique voient leurs performances très fortement améliorées, notamment en matière d'émissions de CO, d'hydrocarbures et de NOx. Par contre leur performance énergétique est légèrement amoindrie, ce qui se traduit par des surémissions de CO₂ relativement sensibles²⁰. De plus un pot catalytique n'est efficace que lorsque le moteur est chaud et au cours des premiers kilomètres les émissions restent à peu près équivalentes à celles d'un véhicule non équipé.

Une étude récente de l'INRETS fournit des émissions moyennes pour ce type de véhicule, à chaud comme à froid, et les compare à celles des véhicules à essence non équipés et aux véhicules diesel²¹. Pour établir leurs émissions unitaires par cycle de conduite, nous avons calculé le rapport moyen pour chaque polluant entre véhicule à essence équipé et non équipé puis pondéré les émissions unitaires déjà utilisées pour 1990 par les coefficients ainsi obtenus. De plus les surémissions à froid sont directement fournies. Cependant, les distances moyennes à parcourir avant que les émissions de chaque type de polluant ne se stabilisent sont plus longues pour les véhicules avec pot catalytique. Les coefficients de surémission ont donc été corrigés de ce facteur distance :

¹⁹ Cf. p. 148 de SAVEY D. : "L'avenir et l'industrie automobile" in ADEME, DRAST, INRETS : *Se déplacer au quotidien dans 30 ans*. Paris : La Documentation Française, 1995, 234 p. pp. 143-152.
(D. SAVEY est directeur adjoint au directeur de la Division Automobiles de PSA-Peugeot-Citroën).

²⁰ Il faut cependant remarquer que les gains totaux pour les divers types d'émissions font que le bilan global en matière d'effet de serre des véhicules essence équipés d'un pot catalytique semble meilleur que ceux non équipés.
Voir par exemple pp. 432-433 de ORSELLI Jean : *Energies nouvelles pour l'automobile*. Caen : Paradigme, 1992. 507 p.

²¹ JOUMARD Robert, VIDON Robert, PRUVOST Christophe, TASSEL Patrick, DE SOETE Gérard : "Evolution des émissions de polluants des voitures particulières lors du départ à froid". Bron : INRETS, préactes du 3^{ème} colloque internationale *Transports et pollution de l'air*, Avignon, 6-10 juin 1994. pp. 161-168.

Tableau 15 : Calcul des coefficients de surémissions à froid des véhicules avec pot catalytique

	Coef. initial de surémission	long. de parcours à froid :		Coef. de surémission retenu
	<i>a</i>	sans pot cat. <i>b</i>	avec pot cat. <i>c</i>	<i>a.(c/b)</i>
NOx	1.51	4.37	6.87	2.37
CO	11.57	6.33	5.89	10.77
CO2	1.08	6.47	7.11	1.19
HC	16.58	3.08	3.64	19.59

A partir de Joumard et alii, 1994.

Cette même étude permet de retrouver le rapport d'émissions entre véhicule équipé et non équipé lorsque le moteur est chaud²². Ainsi les émissions d'hydrocarbures sont divisées par 23,7, celles de CO de 19,6 et celle de NOx de 4,5. Les émissions de CO2 augmentent de 22% et nous avons considéré que celles de soufre restaient inchangées. Le plomb quant à lui disparaît puisque le bon fonctionnement du pot catalytique nécessite une essence qui n'en contienne pas. Enfin, les surémissions à froid sont inversement proportionnelles à l'efficacité à chaud des pots catalytiques, ceci étant en plus accentué par les distances légèrement plus longues à parcourir pour retrouver le fonctionnement à chaud : 19,6 pour les hydrocarbures, 10,8 pour le CO, 2,37 pour les NOx et 1,19 pour le CO2. Nous avons supposé un coefficient inchangé pour le SO2.

3.1.3. Les émissions des véhicules diesel en 1994, 2000 et 2010.

Concernant l'évolution des émissions des véhicules diesel, nous avons repris les estimations établies par Joumard et Lambert²³. Ils intègrent notamment la tendance forte à la diminution des cylindrées -et donc de la consommation et des émissions- sur ce type de véhicules ainsi que le renforcement prévu des normes d'émissions par gammes de véhicules en supposant que leur taux de sévérisation se traduira par un taux équivalent de diminution des émissions des véhicules neufs.

De plus nous avons réactualisé ce travail à partir de deux séries de normes apparues depuis.

D'une part la teneur en soufre du gazole se trouve très fortement diminuée entre 1994 et l'automne 1996, passant de 0,30 à 0,05 grammes par litre²⁴. Les émissions unitaires s'en trouvent réduites d'autant, et sont donc divisées par 6 entre 1994 et 2000. Faute d'information supplémentaire, nous les avons par contre conservées constantes entre 2000 et 2010 - même si on peut supposer que ces normes peuvent encore se renforcer.

D'autre part la mise en oeuvre des normes dites "Euro 93" et surtout "Euro 96" devraient avoir un impact significatif sur les émissions de poussières des véhicules légers

²² *Idem* p. 163.

²³ JOUMARD Robert, LAMBERT Jacques : *Evolution des émissions de polluants par les transports en France de 1970 à 2010. Op. Cit.*

²⁴ CITEPA : *Teneur en soufre du gazole et du fuel domestique*. Paris, Etude documentaire n°108, 1993.

diesel. Elle conduirait à une baisse des émissions unitaires de 60% pour les véhicules respectant ces normes par rapport à ceux de 1994²⁵. D'autres types de polluants se trouvent également affectés, même si l'impact de ces mesures au niveau global des émissions reste beaucoup plus faible du fait du moindre poids du diesel. En reprenant les mêmes références de calcul que pour les poussières, on obtient les évolutions suivantes entre la moyenne 1994 et le respect des normes :

- NOx : -25%
- CO : -43%
- Hydrocarbures : -67%²⁶

Enfin, compte tenu des chiffres sur le renouvellement du parc automobile fournis par le tableau 14, nous avons estimé qu'environ 30% des véhicules légers diesels respecteraient ces normes en 2000 et 100% en 2010.

Les estimations d'évolution des émissions unitaires des VL légers sont dès lors les suivantes si l'on prend les résultats de 1990 comme base 100 (les chiffres présentés et utilisés dans nos calculs sont arrondis à l'unité la plus proche) :

Tableau 16 : Evolution des émissions unitaires des véhicules légers diesel entre 1990 et 2010.

	1990	1994	2000	2010
CO	100	65	57	37
CO2	100	98	97	95
NOx	100	108	106	86
Poussières	100	84	69	34
hydrocarbures	100	100	80	33
SO2	100	100	17	17

A partir de Joumard et Lambert, 1991 ; Gallez, 1994 ; Dron et Cohen de Lara, 1995.

3.2. Les nouvelles technologies attendues à long terme :

Sur le long terme, la diversification technologique du parc automobile devrait être plus importante qu'aujourd'hui, même si elle risque de connaître des contraintes logistiques liées aux problèmes de ravitaillement en énergie, comme en témoignent l'échec récent du GPL ou la limite actuelle atteinte dans les stations avec la multiplication des types de carburants (essences normale, sans plomb 95 et 98, diesel).

Du fait de la multiplicité des combinaisons envisageables, il n'était pas guère intéressant de considérer tous les scénarios possibles, notamment à l'horizon 2010 (on peut supposer que pour 2000, les grandes tendances à l'oeuvre aujourd'hui sont suffisamment

²⁵ Soit 0,08g/km après pour 0,2 g avant si l'on reprend les chiffres fournis pp. 289-291 de DRON Dominique, COHEN de LARA Michel : *Pour une politique soutenable des transports*. Paris : La Documentation Française, collection des rapports officiels, septembre 1995. 327 p.

²⁶ *Ibidem*. Les chiffres repris sont les suivants : NOx : 0,8 avant pour 0,6 après ; CO : 1,75 avant pour 1 après ; hydrocarbures : 0,3 avant pour 0,1 après.

fortes pour que l'éventuelle percée de telle ou telle technologie alternative n'affecte qu'une part marginale du parc automobile). Plutôt que de bâtir des scénarios extrêmes fixant les fourchettes du vraisemblable concernant l'impact à long terme du renouvellement technologique, nous avons préféré rechercher les taux de pénétration minimum dans le trafic urbain pour que les technologies alternatives soient susceptibles de modifier de manière sensible l'évolution "normale" que devraient procurer les améliorations du parc de véhicules thermiques traditionnels.

Le seuil d'une modification sensible a été fixé ici à 10% par rapport à une évolution normale (des seuils à 5, 15 et 20% figurent également en annexe). La technologie alternative retenue est la propulsion électrique. Les autres évolutions envisageables présentées dans le corps du texte ont été considérées soit comme assimilables à des options intermédiaires (leur prise en compte n'apportant donc que peu de chose par rapport à ce qui pourra être montré par ailleurs), soit comme ne pouvant connaître de développement suffisamment fort pour être intéressantes (d'ici 2010 en tout cas).

1. La montée programmée du véhicule électrique ?

Pour 2010 on peut supposer que les nouvelles générations de véhicules, avec notamment les véhicules électriques ou hybrides ainsi que les véhicules au gaz auront commencé à prendre une place importante dans le trafic VL. Pour se rendre compte du poids qu'ils devraient prendre pour que les évolutions des émissions globales soient sensiblement modifiées, nous avons simulé une montée en charge progressive du taux de véhicules électriques dans le trafic.

Pour cet exercice, il a été supposé que cette nouvelle technologie mordait de manière équivalente sur les parts de marché des véhicules essence et diesel traditionnels, même si le véhicule électrique apparaît plutôt alternatif à certains usages de l'essence. Dans ce cadre d'hypothèses, la répartition évoquée précédemment entre essence et diesel (58 et 42% en 2010) est encore valable pour la part restante de ces types de véhicules.

Enfin, concernant les données d'émissions unitaires, nous considérerons que la part de véhicules électriques dans le trafic n'émet aucun polluant atmosphérique

2. L'impasse sur le GPL, le GNV et les biocarburants

Les véhicules au gaz naturel et au GPL n'ont pas été pris en compte dans la constitution du parc car leurs émissions polluantes sont sensiblement équivalentes à celles des véhicules classiques avec pot catalytique ou nécessitent parfois la mise en oeuvre du pot catalytique (en ce qui concerne les NOx). Nous avons donc considéré que les améliorations qu'ils pourraient connaître en matière d'émissions polluantes, en les plaçant à un niveau intermédiaire entre véhicules à essence catalysés et véhicules électriques, ne nous permettraient pas d'apporter beaucoup d'information supplémentaire par rapport à la comparaison des scénarios de parc traditionnel avec et sans véhicule électrique.

De même on a estimé que le développement des biocarburants sera insuffisant pour modifier sensiblement les niveaux d'émissions. On sait que pour des teneurs inférieures à 30% de diester dans le gazole, l'impact sur les émissions unitaires des

véhicules diesel restent peu important. Or avec des taux de 5%, le surcoût pour la collectivité est déjà énorme et l'agriculture française ne pourrait pas y pourvoir.

3.3. La non prise en compte du trafic des poids-lourds

Un dernier point important restant à évoquer à propos de l'évolution des véhicules constituant le trafic routier urbain concerne les poids-lourds. Compte tenu des incertitudes existant encore aujourd'hui ainsi que de la sensibilité des résultats à une altération des caractéristiques PL, nous avons préféré ne pas retenir leur trafic pour des projections à long terme.

Il a par contre été nécessaire d'estimer leur proportion dans le trafic aux horizons 2000 et 2010 pour pouvoir la retirer et ne travailler que sur des trafics VP. En fait nous avons considéré que la répartition entre véhicules légers et poids-lourds devrait restée sensiblement constante entre les différentes dates envisagées.

En effet, les estimations établies par l'OEST concluent que dans le cas d'une croissance moyenne du PIB le trafic total des poids-lourds sur le territoire français devrait augmenter en moyenne de 2,1% par an, soit passer d'une base 100 en 1990 à 151,5 en 2010²⁷. Or les projections établies par le CETE de Lyon sur l'évolution des trafics routiers PL et VL confondus sur l'agglomération aboutissent à un trafic de 154,8 en 2010 pour une base 100 en 1990 (+2,44%/an entre 1990 et 2000 puis +3,33%/an ensuite) : malgré les larges différences dans les techniques et les bases de projection, ces chiffres laissent supposer que le rapport PL/VL devrait rester à peu près constant.

Pour cadrer la stabilité apparente de ce rapport PL/VL, notons que dans le cas d'une croissance rapide du PIB, le trafic PL augmenterait de 103% entre 1990 et 2010. Même en supposant que le trafic global sur Lyon ne soit pas affecté par cette croissance économique et que l'évolution du trafic PL soit le même en urbain que sur l'ensemble du territoire français, la part des PL dans le trafic routier lyonnais passerait alors de 7,5% en moyenne en 1990 à 9,8% en 2010. Une hypothèse basse de croissance économique ralentie avec un trafic PL en France ne progressant que de 0,7% par an conduirait, selon les mêmes prémisses, à une part de PL de 5,6% sur Lyon.

Etant donné la faible variation relative que ces chiffres entraînent pour le trafic des véhicules légers, nous avons estimé que l'on pouvait considérer la part de trafic PL à retirer comme constante sans que les résultats aux horizons retenus en soient vraiment affectés. Cette part de trafic PL retirée des trafics obtenus après affectation sous DAVIS a donc été de 10% en cycles autoroutiers, 7% en cycles routiers et 6% en cycles urbains.

3.4. Conclusion : le parc de véhicules légers aux différents horizons envisagés, composition et émissions unitaires.

L'évolution du parc des véhicules légers ainsi envisagée est reprise dans le tableau ci-dessous. Hormis pour les proportions de 1990 qui ont déjà servi de base de calcul, tous

²⁷ Voir GIRAUD Maurice, BOUTON François : *Prévision des trafics de marchandises à l'horizon 2010*. Paris, note de synthèse OEST, mars 1994.

les chiffres ont été arrondis à l'entier le plus proche. En effet, compte tenu du type d'exercice, la recherche d'une composition réelle du parc aux différents horizons envisagés est exclue et les décimales n'ont aucun sens, ne faisant qu'alourdir la lisibilité des hypothèses.

Tableau 17 : Hypothèses de composition du parc de véhicules légers aux différents horizons de simulation (1990, 1994, 2000 et 2010)

		essence et pot catalytique		diesel
		Sans	Avec	
	%			
1990	Autoroutier	84,4		15,6
	Routier	84,9	-	15,1
	Urbain	85,1		14,9
1994	Tous cycles	53	23	24
2000	"	18	46	36
2010	"	0	58	42

Les données d'émissions unitaires retenues pour chaque type de véhicule sont indiquées dans les tableaux ci-dessous. Soulignons que pour tous les types de véhicules, quel que soit le cycle, on a supposé que la proportion de moteur froid correspondait à la moyenne enregistrée en 1987 lors de l'enquête EUREV de l'INRETS, soit 27%.

Emissions unitaires par cycle de conduite d'un flux de trafic de 1 km en 1990

*Part des VL essence
dans le trafic*

Emissions unitaires des VL essence en g/km

<i>moteur froid</i>		CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HC	Plomb
A1	0.76	58.22	0.17	2.99	0.00	15.99	171.79	1.09	0.01
A2	0.76	57.21	0.17	2.77	0.00	14.95	170.81	1.36	0.01
R1	0.79	52.73	0.15	2.34	0.00	16.16	151.59	1.69	0.01
R2	0.79	59.19	0.17	2.22	0.00	19.36	167.69	2.45	0.01
R3	0.79	73.41	0.21	2.34	0.00	28.03	202.80	3.97	0.01
U1	0.80	70.80	0.21	2.10	0.00	25.47	194.85	3.57	0.01
U2	0.80	78.83	0.23	1.79	0.00	29.30	214.22	3.52	0.01
U3	0.80	115.38	0.33	1.89	0.00	44.20	312.03	5.52	0.01
UL1	0.80	131.82	0.38	1.53	0.00	48.80	365.43	6.42	0.02
UL2	0.80	221.91	0.64	1.63	0.00	94.10	590.05	10.70	0.03
<i>Surémission moteur froid</i>		1.54	1.54	1.05	1.00	2.16	1.34	3.00	1.54

*Part des VL diesel
dans le trafic*

Emissions unitaires des VL diesel en g/km

<i>moteur froid</i>		CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb
A1	0.14	54.98	0.31	0.56	0.25	0.61	186.50	0.09	0.00
A2	0.14	54.93	0.31	0.52	0.24	0.58	186.31	0.09	0.00
R1	0.14	50.94	0.29	0.49	0.15	0.53	177.90	0.10	0.00
R2	0.14	57.88	0.33	0.57	0.19	0.61	201.24	0.16	0.00
R3	0.14	72.18	0.41	0.63	0.35	0.92	257.00	0.20	0.00
U1	0.14	63.85	0.36	0.67	0.26	0.87	230.64	0.26	0.00
U2	0.14	70.13	0.40	0.76	0.29	1.05	252.66	0.29	0.00
U3	0.14	104.37	0.59	1.16	0.43	1.53	375.11	0.43	0.00
UL1	0.14	114.85	0.65	1.62	0.45	2.76	395.80	0.54	0.00
UL2	0.14	187.41	1.07	2.70	0.68	3.29	660.29	1.04	0.00
<i>Surémission moteur froid</i>		1.24	1.24	1.11	1.52	1.61	1.23	1.62	1.24

*Contributions des véhicules légers à essence
aux émissions d'un flux de 1 km (en g/km)*

	CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HC	Plomb
A1	50.70	0.15	2.30	0.00	15.96	142.55	1.28	0.01
A2	49.82	0.14	2.13	0.00	14.92	141.73	1.59	0.01
R1	47.73	0.14	1.87	0.00	16.76	130.75	2.06	0.01
R2	53.58	0.16	1.78	0.00	20.08	144.64	2.98	0.01
R3	66.45	0.19	1.87	0.00	29.08	174.92	4.83	0.01
U1	64.90	0.19	1.70	0.00	26.76	170.19	4.40	0.01
U2	72.26	0.21	1.45	0.00	30.78	187.11	4.34	0.01
U3	105.76	0.31	1.53	0.00	46.43	272.54	6.80	0.01
UL1	120.83	0.35	1.24	0.00	51.27	319.18	7.91	0.01
UL2	203.41	0.59	1.32	0.00	98.86	515.37	13.18	0.02

*Contributions des véhicules légers diesel
aux émissions d'un flux de 1 km (en g/km)*

	CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb
A1	8.20	0.05	0.08	0.04	0.10	27.73	0.01	0.00
A2	8.19	0.05	0.07	0.04	0.09	27.70	0.01	0.00
R1	7.59	0.04	0.07	0.02	0.09	26.45	0.02	0.00
R2	8.63	0.05	0.08	0.03	0.10	29.92	0.03	0.00
R3	10.76	0.06	0.09	0.06	0.15	38.21	0.03	0.00
U1	9.52	0.05	0.10	0.04	0.14	34.29	0.04	0.00
U2	10.45	0.06	0.11	0.05	0.17	37.57	0.05	0.00
U3	15.56	0.09	0.17	0.07	0.25	55.78	0.07	0.00
UL1	17.12	0.10	0.23	0.07	0.45	58.85	0.09	0.00
UL2	27.94	0.16	0.39	0.11	0.54	98.18	0.17	0.00

**Part des poids-lourds
dans le trafic**

<i>moteur froid</i>		Emissions unitaires des poids-lourds en g/km							
		CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb
A1	0.10	254.6	1.5	11.6	1.1	4.1	782.6	1.8	0.0
A2	0.10	254.6	1.5	11.6	1.1	4.1	782.6	1.8	0.0
R1	0.07	247.6	1.5	11.0	1.1	7.2	756.7	1.6	0.0
R2	0.07	247.6	1.5	11.0	1.1	7.2	756.7	1.6	0.0
R3	0.07	247.6	1.5	11.0	1.1	7.2	756.7	1.6	0.0
U1	0.06	261.6	1.6	10.8	1.1	18.6	776.2	3.5	0.0
U2	0.06	261.6	1.6	10.8	1.1	18.6	776.2	3.5	0.0
U3	0.06	261.6	1.6	10.8	1.1	18.6	776.2	3.5	0.0
UL1	0.06	261.6	1.6	10.8	1.1	18.6	776.2	3.5	0.0
UL2	0.06	261.6	1.6	10.8	1.1	18.6	776.2	3.5	0.0
<i>Surémission moteur froid</i>									
		-	-	-	-	-	-	-	-

**Contributions des poids-lourds
aux émissions d'un flux de trafic de 1 km (en g/km)**

	CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb
A1	25.46	0.15	1.16	0.11	0.41	78.26	0.18	0.00
A2	25.46	0.15	1.16	0.11	0.41	78.26	0.18	0.00
R1	17.33	0.10	0.77	0.07	0.51	52.97	0.11	0.00
R2	17.33	0.10	0.77	0.07	0.51	52.97	0.11	0.00
R3	17.33	0.10	0.77	0.07	0.51	52.97	0.11	0.00
U1	15.70	0.09	0.65	0.07	1.12	46.57	0.21	0.00
U2	15.70	0.09	0.65	0.07	1.12	46.57	0.21	0.00
U3	15.70	0.09	0.65	0.07	1.12	46.57	0.21	0.00
UL1	15.70	0.09	0.65	0.07	1.12	46.57	0.21	0.00
UL2	15.70	0.09	0.65	0.07	1.12	46.57	0.21	0.00

Emissions unitaires moyennes d'un flux de trafic de 1 km (en g/km)

	CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb
A1	84.4	0.3	3.5	0.15	16.5	248.5	1.5	0.006
A2	83.5	0.3	3.4	0.15	15.4	247.7	1.8	0.006
R1	72.7	0.3	2.7	0.10	17.4	210.2	2.2	0.006
R2	79.5	0.3	2.6	0.10	20.7	227.5	3.1	0.006
R3	94.5	0.4	2.7	0.13	29.7	266.1	5.0	0.008
U1	90.1	0.3	2.4	0.11	28.0	251.1	4.7	0.008
U2	98.4	0.4	2.2	0.11	32.1	271.3	4.6	0.009
U3	137.0	0.5	2.3	0.14	47.8	374.9	7.1	0.013
UL1	153.6	0.5	2.1	0.14	52.8	424.6	8.2	0.014
UL2	247.0	0.8	2.4	0.18	100.5	660.1	13.6	0.024

Emissions unitaires par cycle de conduite d'un flux de VL de 1 km en 1994

Part des véhicules à essence dans le trafic VL

Emissions unitaires des VL essence en g/km

moteur froid	Emissions unitaires des VL essence en g/km									
	CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HC	Plomb		
A1	0.68	0.27	58.22	0.169	2.99	0.00	15.99	171.79	1.09	0.007
A2	0.68	0.27	57.21	0.166	2.77	0.00	14.95	170.81	1.36	0.007
R1	0.68	0.27	52.73	0.153	2.34	0.00	16.16	151.59	1.69	0.006
R2	0.68	0.27	59.19	0.172	2.22	0.00	19.36	167.69	2.45	0.007
R3	0.68	0.27	73.41	0.213	2.34	0.00	28.03	202.80	3.97	0.009
U1	0.68	0.27	70.80	0.205	2.10	0.00	25.47	194.85	3.57	0.008
U2	0.68	0.27	78.83	0.229	1.79	0.00	29.30	214.22	3.52	0.009
U3	0.68	0.27	115.38	0.335	1.89	0.00	44.20	312.03	5.52	0.014
UL1	0.68	0.27	131.82	0.382	1.53	0.00	48.80	365.43	6.42	0.016
UL2	0.68	0.27	221.91	0.644	1.63	0.00	94.10	590.05	10.70	0.027
Surémission moteur froid	1.54	1.54	1.05	1.00	2.16	1.34	3.00	1.54		

Part des VL essence catalysés dans le trafic VL

Emissions unitaires des VL essence catalysés en g/km

moteur froid	Emissions unitaires des VL essence catalysés en g/km									
	CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb		
A1	0.11	0.27	60.55	0.176	0.66	0.00	0.82	210.31	0.05	0.000
A2	0.11	0.27	59.50	0.173	0.61	0.00	0.76	209.11	0.06	0.000
R1	0.11	0.27	54.84	0.159	0.52	0.00	0.82	185.58	0.07	0.000
R2	0.11	0.27	61.56	0.179	0.49	0.00	0.99	205.29	0.10	0.000
R3	0.11	0.27	76.35	0.221	0.52	0.00	1.43	248.28	0.17	0.000
U1	0.11	0.27	73.63	0.214	0.46	0.00	1.30	238.54	0.15	0.000
U2	0.11	0.27	81.98	0.238	0.40	0.00	1.49	262.26	0.15	0.000
U3	0.11	0.27	120.00	0.348	0.42	0.00	2.26	382.00	0.23	0.000
UL1	0.11	0.27	137.09	0.398	0.34	0.00	2.49	447.37	0.27	0.000
UL2	0.11	0.27	230.79	0.669	0.36	0.00	4.80	722.36	0.45	0.000
Surémission moteur froid	1.62	1.62	2.37	1.00	10.77	1.19	19.59	1.00		

Contributions des véhicules légers à essence aux émissions d'un flux de VL de 1 km (en g/km)

	CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HC	Plomb
A1	35.36	0.10	1.61	0.00	11.13	99.41	0.89	0.00
A2	34.74	0.10	1.49	0.00	10.41	98.84	1.11	0.00
R1	32.02	0.09	1.26	0.00	11.25	87.72	1.38	0.00
R2	35.94	0.10	1.19	0.00	13.47	97.03	2.00	0.00
R3	44.58	0.13	1.26	0.00	19.51	117.35	3.24	0.01
U1	42.99	0.12	1.13	0.00	17.73	112.75	2.91	0.01
U2	47.87	0.14	0.96	0.00	20.39	123.96	2.87	0.01
U3	70.07	0.20	1.02	0.00	30.76	180.56	4.51	0.01
UL1	80.05	0.23	0.82	0.00	33.96	211.46	5.24	0.01
UL2	134.76	0.39	0.88	0.00	65.49	341.43	8.73	0.02

Contributions des véhicules légers à essence catalysés aux émissions d'un flux de VL de 1 km (en g/km)

	CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb
A1	16.26	0.05	0.21	0.00	0.68	50.81	0.06	0.00
A2	15.98	0.05	0.19	0.00	0.64	50.52	0.08	0.00
R1	14.72	0.04	0.16	0.00	0.69	44.84	0.10	0.00
R2	16.53	0.05	0.15	0.00	0.83	49.60	0.14	0.00
R3	20.50	0.06	0.16	0.00	1.20	59.98	0.23	0.00
U1	19.77	0.06	0.15	0.00	1.09	57.63	0.21	0.00
U2	22.01	0.06	0.12	0.00	1.25	63.36	0.21	0.00
U3	32.22	0.09	0.13	0.00	1.89	92.29	0.32	0.00
UL1	36.81	0.11	0.11	0.00	2.08	108.09	0.38	0.00
UL2	61.97	0.18	0.11	0.00	4.02	174.52	0.63	0.00

**Part des VL diesel
dans le trafic VL**

<i>moteur froid</i>		Emissions unitaires des VL diesel en g/km							
		CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb
A1	0.21	53.88	0.31	0.60	0.21	0.40	182.77	0.09	0.00
A2	0.21	53.83	0.31	0.56	0.20	0.38	182.58	0.09	0.00
R1	0.21	49.92	0.29	0.53	0.13	0.34	174.34	0.10	0.00
R2	0.21	56.72	0.33	0.62	0.16	0.40	197.22	0.16	0.00
R3	0.21	70.74	0.41	0.68	0.29	0.60	251.86	0.20	0.00
U1	0.21	62.57	0.36	0.72	0.22	0.57	226.03	0.26	0.00
U2	0.21	68.73	0.40	0.82	0.24	0.68	247.61	0.29	0.00
U3	0.21	102.28	0.59	1.25	0.36	0.99	367.61	0.43	0.00
UL1	0.21	112.55	0.65	1.75	0.38	1.79	387.88	0.54	0.00
UL2	0.21	183.66	1.07	2.92	0.57	2.14	647.08	1.04	0.00
<i>Surémission moteur froid</i>		1.24	1.24	1.11	1.52	1.61	1.23	1.62	1.24

**Contributions des véhicules légers diesel
aux émissions d'un flux de VL de 1 km (en g/km)**

	CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb
A1	13.77	0.08	0.15	0.06	0.11	46.59	0.03	0.00
A2	13.76	0.08	0.14	0.06	0.11	46.54	0.03	0.00
R1	12.76	0.07	0.13	0.03	0.10	44.44	0.03	0.00
R2	14.50	0.08	0.15	0.04	0.11	50.27	0.04	0.00
R3	18.08	0.11	0.17	0.08	0.17	64.20	0.06	0.00
U1	15.99	0.09	0.18	0.06	0.16	57.62	0.07	0.00
U2	17.56	0.10	0.20	0.07	0.19	63.12	0.08	0.00
U3	26.14	0.15	0.31	0.10	0.28	93.70	0.12	0.00
UL1	28.76	0.17	0.43	0.10	0.50	98.87	0.15	0.00
UL2	46.94	0.27	0.72	0.16	0.60	164.94	0.29	0.00

Emissions unitaires moyennes d'un flux de VL de 1 km (en g/km)

	CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb
A1	65.38	0.23	1.96	0.06	11.92	196.81	0.98	0.00
A2	64.47	0.23	1.82	0.06	11.15	195.90	1.21	0.00
R1	59.50	0.21	1.55	0.03	12.03	177.00	1.51	0.00
R2	66.97	0.24	1.50	0.04	14.41	196.90	2.19	0.00
R3	83.16	0.29	1.59	0.08	20.87	241.54	3.53	0.01
U1	78.76	0.28	1.45	0.06	18.97	228.00	3.20	0.01
U2	87.45	0.30	1.29	0.07	21.83	250.44	3.16	0.01
U3	128.42	0.45	1.46	0.10	32.93	366.55	4.95	0.01
UL1	145.62	0.51	1.36	0.10	36.55	418.42	5.77	0.01
UL2	243.66	0.84	1.71	0.16	70.11	680.90	9.65	0.02

Emissions unitaires par cycle de conduite d'un flux de VL de 1 km en 2000

Part des véhicules à essence dans le trafic VL

Emissions unitaires des VL essence en g/km

moteur froid		CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb	
AI	0.18	0.27	58.22	0.169	2.99	0.00	15.99	171.79	1.09	0.007
A2	0.18	0.27	57.21	0.166	2.77	0.00	14.95	170.81	1.36	0.007
RI	0.18	0.27	52.73	0.153	2.34	0.00	16.16	151.59	1.69	0.006
R2	0.18	0.27	59.19	0.172	2.22	0.00	19.36	167.69	2.45	0.007
R3	0.18	0.27	73.41	0.213	2.34	0.00	28.03	202.80	3.97	0.009
UI	0.18	0.27	70.80	0.205	2.10	0.00	25.47	194.85	3.57	0.008
U2	0.18	0.27	78.83	0.229	1.79	0.00	29.30	214.22	3.52	0.009
U3	0.18	0.27	115.38	0.335	1.89	0.00	44.20	312.03	5.52	0.014
UL1	0.18	0.27	131.82	0.382	1.53	0.00	48.80	365.43	6.42	0.016
UL2	0.18	0.27	221.91	0.644	1.63	0.00	94.10	590.05	10.70	0.027
Surémission moteur froid			1.54	1.54	1.05	1.00	2.16	1.34	3.00	1.54

Part des VL essence catalysés dans le trafic VL

Emissions unitaires des VL essence catalysés en g/km

moteur froid		CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb	
AI	0.46	0.27	60.55	0.18	0.66	0.00	0.82	210.31	0.05	0.00
A2	0.46	0.27	59.50	0.17	0.61	0.00	0.76	209.11	0.06	0.00
RI	0.46	0.27	54.84	0.16	0.52	0.00	0.82	185.58	0.07	0.00
R2	0.46	0.27	61.56	0.18	0.49	0.00	0.99	205.29	0.10	0.00
R3	0.46	0.27	76.35	0.22	0.52	0.00	1.43	248.28	0.17	0.00
UI	0.46	0.27	73.63	0.21	0.46	0.00	1.30	238.54	0.15	0.00
U2	0.46	0.27	81.98	0.24	0.40	0.00	1.49	262.26	0.15	0.00
U3	0.46	0.27	120.00	0.35	0.42	0.00	2.26	382.00	0.23	0.00
UL1	0.46	0.27	137.09	0.40	0.34	0.00	2.49	447.37	0.27	0.00
UL2	0.46	0.27	230.79	0.67	0.36	0.00	4.80	722.36	0.45	0.00
Surémission moteur froid			1.62	1.62	2.37	1.00	10.77	1.19	19.59	1.00

Contributions des véhicules légers à essence aux émissions d'un flux de VL de 1 km (en g/km)

	CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HC	Plomb
AI	12.01	0.03	0.55	0.00	3.78	33.76	0.30	0.00
A2	11.80	0.03	0.51	0.00	3.53	33.57	0.38	0.00
RI	10.88	0.03	0.43	0.00	3.82	29.79	0.47	0.00
R2	12.21	0.04	0.40	0.00	4.58	32.96	0.68	0.00
R3	15.14	0.04	0.43	0.00	6.63	39.86	1.10	0.00
UI	14.60	0.04	0.38	0.00	6.02	38.29	0.99	0.00
U2	16.26	0.05	0.33	0.00	6.93	42.10	0.98	0.00
U3	23.80	0.07	0.34	0.00	10.45	61.32	1.53	0.00
UL1	27.19	0.08	0.28	0.00	11.54	71.82	1.78	0.00
UL2	45.77	0.13	0.30	0.00	22.24	115.96	2.97	0.01

Contributions des véhicules légers à essence catalysés aux émissions d'un flux de VL de 1 km (en g/km)

	CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb
AI	32.51	0.09	0.42	0.00	1.36	101.62	0.13	0.00
A2	31.95	0.09	0.39	0.00	1.28	101.04	0.16	0.00
RI	29.45	0.09	0.33	0.00	1.38	89.67	0.20	0.00
R2	33.06	0.10	0.31	0.00	1.65	99.20	0.29	0.00
R3	41.00	0.12	0.33	0.00	2.39	119.97	0.46	0.00
UI	39.54	0.11	0.29	0.00	2.17	115.27	0.42	0.00
U2	44.03	0.13	0.25	0.00	2.50	126.72	0.41	0.00
U3	64.44	0.19	0.26	0.00	3.77	184.58	0.65	0.00
UL1	73.62	0.21	0.21	0.00	4.17	216.17	0.75	0.00
UL2	123.93	0.36	0.23	0.00	8.03	349.05	1.25	0.00

**Part des VL diesel
dans le trafic VL**

moteur froid		Emissions unitaires des VL diesel en g/km							
		CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb
A1	0.36	53.33	0.05	0.60	0.17	0.35	180.91	0.07	0.00
A2	0.36	53.28	0.05	0.55	0.17	0.33	180.72	0.07	0.00
R1	0.36	49.41	0.05	0.52	0.10	0.30	172.56	0.08	0.00
R2	0.36	56.14	0.06	0.61	0.13	0.35	195.20	0.13	0.00
R3	0.36	70.01	0.07	0.67	0.24	0.52	249.29	0.16	0.00
U1	0.36	61.93	0.06	0.71	0.18	0.49	223.72	0.21	0.00
U2	0.36	68.03	0.07	0.81	0.20	0.59	245.08	0.23	0.00
U3	0.36	101.24	0.10	1.23	0.30	0.87	363.86	0.34	0.00
UL1	0.36	111.40	0.11	1.72	0.31	1.56	383.93	0.43	0.00
UL2	0.36	181.79	0.18	2.87	0.47	1.86	640.48	1.83	0.00
Surémission moteur froid		1.24	1.24	1.11	1.52	1.61	1.23	1.62	1.24

**Contributions des véhicules légers diesel
aux émissions d'un flux de VL de 1 km (en g/km)**

	CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb
A1	20.44	0.02	0.22	0.07	0.14	69.17	0.03	0.00
A2	20.42	0.02	0.21	0.07	0.14	69.10	0.03	0.00
R1	18.94	0.02	0.19	0.04	0.13	65.98	0.03	0.00
R2	21.52	0.02	0.22	0.05	0.22	74.64	0.05	0.00
R3	26.84	0.03	0.25	0.10	0.21	95.32	0.07	0.00
U1	23.74	0.02	0.26	0.07	0.25	85.54	0.09	0.00
U2	26.08	0.03	0.30	0.08	0.36	93.71	0.10	0.00
U3	38.81	0.04	0.46	0.12	0.66	139.12	0.14	0.00
UL1	42.70	0.04	0.64	0.13	0.78	146.80	0.18	0.00
UL2	69.68	0.07	1.06	0.19	0.46	244.89	0.35	0.00

Emissions unitaires moyennes d'un flux de VL de 1 km (en g/km)

	CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb
A1	64.97	0.15	1.18	0.07	5.29	204.55	0.46	0.00
A2	64.17	0.15	1.10	0.07	4.95	203.71	0.57	0.00
R1	59.27	0.14	0.95	0.04	5.33	185.45	0.70	0.00
R2	66.79	0.15	0.94	0.05	6.37	206.79	1.02	0.00
R3	82.98	0.19	1.00	0.10	9.24	255.14	1.63	0.00
U1	77.88	0.18	0.94	0.07	8.40	239.10	1.49	0.00
U2	86.36	0.20	0.88	0.08	9.68	262.53	1.48	0.00
U3	127.04	0.29	1.07	0.12	14.58	385.03	2.32	0.00
UL1	143.51	0.33	1.13	0.13	16.36	434.79	2.71	0.00
UL2	239.39	0.56	1.59	0.19	31.06	709.90	4.57	0.01

Emissions unitaires par cycle de conduite d'un flux de VL de 1 km en 2010

Part des VL essence catalysés dans le trafic VL

Emissions unitaires des VL essence catalysés en g/km

moteur froid		CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb	Contributions des véhicules légers à essence catalysés aux émissions d'un flux de VL de 1 km (en g/km)								
A1	0.58	0.27	60.55	0.18	0.66	0.00	0.82	210.31	0.05	0.00	41.00	0.12	0.53	0.00	1.72	128.13	0.16	0.00
A2	0.58	0.27	59.50	0.17	0.61	0.00	0.76	209.11	0.06	0.00	40.29	0.12	0.49	0.00	1.61	127.40	0.20	0.00
R1	0.58	0.27	54.84	0.16	0.52	0.00	0.82	185.58	0.07	0.00	37.13	0.11	0.41	0.00	1.74	113.07	0.25	0.00
R2	0.58	0.27	61.56	0.18	0.49	0.00	0.99	205.29	0.10	0.00	41.68	0.12	0.39	0.00	2.08	125.08	0.36	0.00
R3	0.58	0.27	76.35	0.22	0.52	0.00	1.43	248.28	0.17	0.00	51.69	0.15	0.41	0.00	3.02	151.26	0.58	0.00
U1	0.58	0.27	73.63	0.21	0.46	0.00	1.30	238.54	0.15	0.00	49.86	0.14	0.37	0.00	2.74	145.33	0.53	0.00
U2	0.58	0.27	81.98	0.24	0.40	0.00	1.49	262.26	0.15	0.00	55.51	0.16	0.31	0.00	3.15	159.78	0.52	0.00
U3	0.58	0.27	120.00	0.35	0.42	0.00	2.26	382.00	0.23	0.00	81.25	0.24	0.33	0.00	4.76	232.74	0.81	0.00
UL1	0.58	0.27	137.09	0.40	0.34	0.00	2.49	447.37	0.27	0.00	92.82	0.27	0.27	0.00	5.25	272.57	0.95	0.00
UL2	0.58	0.27	230.79	0.67	0.36	0.00	4.80	722.36	0.45	0.00	156.26	0.45	0.29	0.00	10.13	440.11	1.58	0.00
Surémission moteur froid			1.62	1.62	2.37	1.00	10.77	1.19	19.59	1.00								

Part des VL diesel dans le trafic VL

Emissions unitaires des VL diesel en g/km

moteur froid		CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb	Contributions des véhicules légers diesel aux émissions d'un flux de VL de 1 km (en g/km)								
A1	0.42	0.27	52.23	0.05	0.48	0.08	0.23	177.18	0.03	0.00	23.36	0.02	0.21	0.04	0.11	79.03	0.01	0.00
A2	0.42	0.27	52.18	0.05	0.45	0.08	0.22	176.99	0.03	0.00	23.34	0.02	0.19	0.04	0.11	78.95	0.01	0.00
R1	0.42	0.27	48.39	0.05	0.42	0.05	0.20	169.01	0.03	0.00	21.64	0.02	0.18	0.02	0.10	75.39	0.02	0.00
R2	0.42	0.27	54.99	0.06	0.49	0.06	0.23	191.18	0.05	0.00	24.59	0.03	0.21	0.03	0.11	85.28	0.03	0.00
R3	0.42	0.27	68.57	0.07	0.54	0.12	0.34	244.15	0.07	0.00	30.67	0.03	0.23	0.06	0.17	108.91	0.03	0.00
U1	0.42	0.27	60.66	0.06	0.58	0.09	0.32	219.11	0.09	0.00	27.13	0.03	0.25	0.04	0.16	97.74	0.04	0.00
U2	0.42	0.27	66.62	0.07	0.66	0.10	0.39	240.03	0.10	0.00	29.80	0.03	0.28	0.05	0.19	107.07	0.05	0.00
U3	0.42	0.27	99.15	0.10	1.00	0.14	0.57	356.35	0.14	0.00	44.34	0.05	0.43	0.07	0.28	158.96	0.07	0.00
UL1	0.42	0.27	109.11	0.11	1.40	0.15	1.03	376.01	0.18	0.00	48.79	0.05	0.60	0.07	0.50	167.73	0.09	0.00
UL2	0.42	0.27	178.04	0.18	2.33	0.23	1.22	627.28	0.35	0.00	79.62	0.08	1.01	0.11	0.60	279.82	0.17	0.00
Surémission moteur froid			1.24	1.24	1.11	1.52	1.61	1.23	1.62	1.24								

Emissions unitaires moyennes d'un flux de VL de 1 km (en g/km)

	CE	SO2	NOx	Pous.	CO	CO2	HCNM	Plomb
A1	64.36	0.14	0.73	0.04	1.83	207.17	0.18	0.00
A2	63.62	0.14	0.68	0.04	1.71	206.36	0.22	0.00
R1	58.77	0.13	0.59	0.02	1.84	188.46	0.27	0.00
R2	66.27	0.15	0.60	0.03	2.19	210.36	0.39	0.00
R3	82.36	0.18	0.65	0.06	3.18	260.18	0.62	0.00
U1	76.98	0.17	0.62	0.04	2.90	243.07	0.57	0.00
U2	85.31	0.19	0.60	0.05	3.34	266.85	0.57	0.00
U3	125.59	0.28	0.76	0.07	5.03	391.70	1.88	0.00
UL1	141.62	0.32	0.87	0.07	5.75	440.30	1.03	0.00
UL2	235.89	0.53	1.29	0.11	10.72	719.92	1.75	0.00

ANNEXE II

PRESENTATION DES TESTS DE LA METHODE DE CALCUL DES EMISSIONS POLLUANTES ET SONORES

1. Tests sur les différents types d'affectation sous DAVIS

Nous avons vu que DAVIS propose deux grandes procédures d'affectation des déplacements sur le réseau :

- soit en plus court chemin, avec un unique itinéraire pour chaque origine-destination et un calcul itératif permettant de charger progressivement la matrice des déplacements sur le réseau et de prendre en compte les effets des trafics sur les vitesses ;
- soit par la recherche d'un état d'équilibre respectant le premier principe de Wardrop selon lequel la recherche individuelle d'un itinéraire optimal pour chaque automobiliste peut aboutir, entre chaque origine et destination, à l'établissement de plusieurs itinéraires au coût généralisé équivalent (et inférieur à ceux de tous les autres itinéraires possibles).

De plus la question de la saturation, lorsque les flux calculés sur un arc deviennent supérieurs à sa capacité, peuvent être traités de deux manière différentes :

- soit par simple prolongation des courbes vitesse-débit ;
- soit par écrêtement de la demande, création de files d'attente et éventuellement propagation en amont de la congestion.

Il est possible, en cas d'affectation au plus court chemin, de choisir entre 1 et 18 itérations et, en cas d'équilibre de Wardrop, de calculer de 1 à 18 itinéraires entre chaque origine destination. Lorsque l'on rajoute les possibilités de prendre en compte plus ou moins finement les questions de saturation, le nombre total d'options de calcul de l'affectation devient considérable. Pour tester l'éventuelle stabilité des résultats d'émissions polluantes et sonores, 7 options couvrant le champ des possibilités de calcul, de la plus grossière à la plus fine ont été retenues :

- affectation en *tout ou rien*, en une itération (**TTR1**) : tous les flux sont affectés en une seule fois, en ne prenant en compte que les vitesses a priori attribuées à chaque arc ;
- affectation en *tout ou rien*, en 6 itérations (**TTR6**) : les flux sont chargés progressivement sur le réseau et l'influence des trafics sur les vitesses intervient ;
- affectation en *tout ou rien*, en 18 itérations (**TTR18**) : idem que précédemment, avec un chargement du réseau encore plus progressif ;
- affectation en *tout ou rien*, en 6 itérations et avec écrêtement de la demande (**TTR6-DE**) : l'influence des trafics sur les vitesses intervient avec éventuellement création de files d'attente et débordements sur les arcs amont ;
- affectation en *tout ou rien*, en 18 itérations et avec écrêtement de la demande (**TTR18-DE**) : idem que précédemment, avec un chargement du réseau encore plus progressif ;
- affectation selon le *principe d'équilibre de Wardrop*, avec 6 itinéraires et écrêtement de la demande (**WP6-DE**) : la recherche d'optimisation va éventuellement jusqu'à 6 itinéraires possibles et égaux en temps généralisé entre une origine et une destination données ; c'est cette option qui a été retenue pour

mener l'ensemble des évaluations et qui servira de référence pour comparer les différents résultats de ce test ;

- affectation selon le *principe d'équilibre de Wardrop*, avec 18 itinéraires et *écrêtement de la demande (WP18-DE)* : la recherche d'optimisation va éventuellement jusqu'à 18 itinéraires possibles et égaux en temps généralisé entre une origine et une destination données.

Tableau 1 : Les trafics par cycle suivant les sept simulations : répartition en véh.km et en part relative

CYCLE	TTRI	TTR6	TTR18	TTR6-DE	TTR18-DE	WP6-DE	WP18-DE
A1	274 293	11 095	18 289	35 161	35 145	35 234	35 234
A2	151 117	55 851	289 117	317 939	323 064	313 008	313 008
R1	514 911	348 508	148 388	117 914	111 017	127 564	127 564
R2	121 141	32 836	188 636	228 346	213 057	241 837	241 837
R3	19 209	233 597	202 399	200 529	215 643	202 520	202 520
U1	18 919	38 397	139 814	165 326	143 255	167 830	167 830
U2	0	65 363	112 773	100 349	104 731	98 478	98 478
U3	0	146 284	95 944	86 128	78 798	85 201	85 201
UL1	0	216 198	62 509	42 017	50 264	36 065	36 065
UL2	0	709 074	45 794	20 082	20 302	17 469	17 469
<i>Total</i>	1 099 589	1 857 201	1 303 663	1 313 790	1 295 276	1 325 205	1 325 205

CYCLE	TTRI	TTR6	TTR18	TTR6-DE	TTR18-DE	WP6-DE
A1	24,9	0,6	1,4	2,7	2,7	2,7
A2	13,7	3,0	22,2	24,2	24,9	23,6
R1	46,8	18,8	11,4	9,0	8,6	9,6
R2	11,0	1,8	14,5	17,4	16,4	18,2
R3	1,7	12,6	15,5	15,3	16,6	15,3
U1	1,7	2,1	10,7	12,6	11,1	12,7
U2	0,0	3,5	8,7	7,6	8,1	7,4
U3	0,0	7,9	7,4	6,6	6,1	6,4
UL1	0,0	11,6	4,8	3,2	3,9	2,7
UL2	0,0	38,2	3,5	1,5	1,6	1,3

Tableau 4 : Variations du niveau de pollution sonore*en valeur absolue : kms de voirie exposés à un niveau sonore donné (Leq(1h) en dB(A))*

	L<50	50≤L<55	55≤L<60	60≤L<65	65≤L<70	70≤L<75	L≥75
TTR1	74,4	34,3	119,9	219,7	235,8	66,0	45,3
TTR6	3,6	3,6	4,3	94,8	362,4	270,1	58,8
TTR18	8,7	11,4	76,7	226,8	329,8	139,8	5,1
TTR6-DE	9,9	16,8	62,8	236,0	337,3	131,1	4,4
TTR18-DE	10,0	12,0	85,0	238,6	316,3	130,4	6,0
WP6-DE	7,6	13,3	57,7	259,7	328,5	127,4	4,0

en valeur relative : part de chaque classe dans le kilométrage total de voirie

%	L<50	50≤L<55	55≤L<60	60≤L<65	65≤L<70	70≤L<75	L≥75
TTR1	9,3	4,3	15,1	27,6	29,6	8,3	5,7
TTR6	0,4	0,5	0,5	11,9	45,4	33,9	7,4
TTR18	1,1	1,4	9,6	28,4	41,3	17,5	0,6
TTR6-DE	1,2	2,1	7,9	29,6	42,3	16,4	0,6
TTR18-DE	1,3	1,5	10,6	29,9	39,6	16,3	0,8
WP6-DE	1,0	1,7	7,2	32,5	41,1	16,0	0,5

2. Tests sur le temps généralisé

Pour chaque arc le modèle calcule un temps généralisé prenant en compte le temps de parcours, le taux d'encombrement, la distance et la "lisibilité" de l'arc (être ou ne pas être à caractéristique autoroutière). Pour chaque itinéraire entre une origine et une destination donnée, c'est la somme des temps généralisés par arc emprunté qui détermine le temps généralisé total et permet ensuite d'établir des comparaisons. La formule est la suivante :

$$Tg = t_0 + [(t(x)-t_0) \cdot Cfi] + [(Fd - [Ba]) \cdot d]$$

avec : Tg = temps généralisé

t_0 = temps de base (à vide)

$t(x)$ = temps résultat du calcul par la loi vitesse-débit et de la file d'attente (demande écrêtée)

x = taux de saturation

Cfi = coefficient de fiabilité

Fd = facteur distance

[Ba] = bonus autoroutier si applicable au tronçon

d = longueur du tronçon

Test des paramètres Cfi, Fd et [Ba]

Les tests ont été effectués en 4 séries de 3 simulations selon la logique suivante :

Tableau 5 : Présentation des simulations effectuées pour tester les paramètres du temps généralisé

Paramètre testé	Simulation 1 -S1-	Simulation 2 -S2-	Simulation 3 -S3-
Variation des 3 paramètres simultanément	<i>Tout à 0</i> Cfi = 0 Fd = 0 Ba = 0	<i>Valeurs conseillées</i> Cfi = 1,40 Fd = 0,40 Ba = 0,30	<i>Test2 + 50%</i> Cfi = 2,1 Fd = 0,6 Ba = 0,45
Coefficient de fiabilité (Fd=0,40, Ba=0,30)	<i>Test2 - 25%</i> Cfi = 1,05	<i>Valeur conseillée</i> Cfi = 1,40	<i>Test2 + 25%</i> Cfi = 1,75
Facteur distance (Cfi=1,40, Ba=0,30)	<i>Test2 - 25%</i> Fd = 0,30	<i>Valeur conseillée</i> Fd = 0,40	<i>Test2 + 25%</i> Fd = 0,50
Bonus autoroutier (Cfi=1,40, Fd=0,40)	<i>Test2 - 25%</i> Ba = 0,225	<i>Valeur conseillée</i> Ba = 0,300	<i>Test2 + 25%</i> Ba = 0,375

Tableau 6 : Les distances parcourues par cycles suivant les différents tests

<i>Ts facteurs</i>				<i>Fiabilité</i>			
	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>		<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>
<i>A1</i>	39 065	32 208	32 254	<i>A1</i>	35 252	32 208	35 202
<i>A2</i>	278 890	319 153	310 764	<i>A2</i>	323 565	319 153	304 105
<i>R1</i>	149 998	122 182	139 609	<i>R1</i>	125 694	122 182	141 147
<i>R2</i>	240 553	236 904	235 251	<i>R2</i>	224 704	236 904	244 378
<i>R3</i>	234 088	222 200	227 227	<i>R3</i>	212 153	222 200	213 364
<i>U1</i>	180 454	167 207	163 877	<i>U1</i>	153 453	167 207	172 416
<i>U2</i>	88 632	85 349	90 205	<i>U2</i>	94 480	85 349	83 548
<i>U3</i>	86 158	83 356	75 295	<i>U3</i>	88 284	83 356	78 779
<i>UL1</i>	28 718	37 513	42 275	<i>UL1</i>	38 514	37 513	42 403
<i>UL2</i>	11 802	17 864	11 866	<i>UL2</i>	20 043	17 864	15 114
<i>total</i>	1 338 358	1 323 937	1 328 622	<i>total</i>	1 316 143	1 323 937	1 330 456

<i>Distance</i>				<i>Bonus Autoroute</i>			
	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>		<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>
<i>A1</i>	32 254	32 208	35 173	<i>A1</i>	35 201	32 208	32 215
<i>A2</i>	318 421	319 153	315 410	<i>A2</i>	312 433	319 153	309 828
<i>R1</i>	134 074	122 182	124 802	<i>R1</i>	127 255	122 182	146 464
<i>R2</i>	235 254	236 904	230 736	<i>R2</i>	228 827	236 904	228 418
<i>R3</i>	216 552	222 200	223 825	<i>R3</i>	223 815	222 200	220 535
<i>U1</i>	165 803	167 207	149 017	<i>U1</i>	159 674	167 207	159 037
<i>U2</i>	90 010	85 349	98 190	<i>U2</i>	94 875	85 349	92 078
<i>U3</i>	78 488	83 356	79 366	<i>U3</i>	79 866	83 356	80 120
<i>UL1</i>	36 999	37 513	42 031	<i>UL1</i>	40 521	37 513	35 306
<i>UL2</i>	20 086	17 864	18 182	<i>UL2</i>	17 145	17 864	20 067
<i>total</i>	1 327 940	1 323 937	1 316 732	<i>total</i>	1 319 610	1 323 937	1 324 068

2.1. Variations de tous les paramètres simultanément

Tableau 7 : Variations des kilomètres parcourus

	Veh.Km	base 100
S1	1 338 358	101,09
S2	1 323 937	100,00
S3	1 328 622	100,35

Tableau 8 : Variations des émissions de polluants atmosphériques :

en valeur absolue (Kg)

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
S1	122 853	471	3 687	164	34 207	348 969	5 051	10,15
S2	123 149	472	3 667	165	34 267	349 868	5 039	10,18
S3	122 385	470	3 675	164	33 882	347 947	4 990	10,09

en valeur relative : base 100 pour S2

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
S1	99,8	99,8	100,5	99,8	99,8	99,7	100,2	99,7
S2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
S3	99,4	99,5	100,2	99,8	98,9	99,5	99,0	99,2

Tableau 9 : Variations du niveau de pollution sonore

en valeur absolue : kms de voirie exposés à un niveau sonore donné (Leq(1h) en dB(A))

	L<50	50≤L<55	55≤L<60	60≤L<65	65≤L<70	70≤L<75	L≥75
S1	14,0	10,6	63,9	237,9	341,2	126,4	4,0
S2	8,1	10,4	64,8	253,9	327,3	129,5	4,0
S3	5,7	13,6	62,5	262,9	328,4	121,6	4,5

en valeur relative : part de chaque classe dans le kilométrage total de voirie

	L<50	50≤L<55	55≤L<60	60≤L<65	65≤L<70	70≤L<75	L≥75
S1	1,75	1,33	8,01	29,82	42,76	15,84	0,50
S2	1,01	1,30	8,12	31,82	41,02	16,23	0,50
S3	0,71	1,70	7,82	32,90	41,09	15,21	0,56

2.2. Variations du coefficient de fiabilité

Tableau 10 : Variations des kilomètres parcourus

	Veh.Km	base 100
S1	1 316 143	99,41
S2	1 323 937	100,00
S3	1 330 456	100,49

Tableau 11 : Variations des émissions de polluants atmosphériques :

en valeur absolue (Kg)

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
S1	123 135	472	3 648	164	34 310	349 740	5 022	10,19
S2	123 149	472	3 667	165	34 267	349 868	5 039	10,18
S3	123 019	472	3 676	164	34 156	349 584	5 024	10,16

en valeur relative : base 100 pour S2

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
S1	100,0	99,9	99,5	99,7	100,1	100,0	99,7	100,1
S2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
S3	99,9	99,9	100,2	99,8	99,7	99,9	99,7	99,9

Tableau 12 : Variations du niveau de pollution sonore

en valeur absolue : kms de voirie exposés à un niveau sonore donné (Leq(1h) en dB(A))

	L<50	50≤L<55	55≤L<60	60≤L<65	65≤L<70	70≤L<75	L≥75
S1	6,4	18,9	66,8	236,1	334,1	130,0	5,8
S2	8,1	10,4	64,8	253,9	327,3	129,5	4,0
S3	6,4	11,8	60,4	260,2	333,9	122,6	4,0

en valeur relative : part de chaque classe dans le kilométrage total de voirie

	L<50	50≤L<55	55≤L<60	60≤L<65	65≤L<70	70≤L<75	L≥75
S1	0,80	2,37	8,37	29,58	41,87	16,29	0,72
S2	1,01	1,30	8,12	31,82	41,02	16,23	0,50
S3	0,80	1,48	7,55	32,56	41,78	15,34	0,50

2.3. Variations du facteur distance

Tableau 13 : Variations des kilomètres parcourus

	Veh.Km	base 100
S1	1 327 940	100,81
S2	1 323 937	100,00
S3	1 316 732	99,46

Tableau 14 : Variations des émissions de polluants atmosphériques :

en valeur absolue (Kg)

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
S1	123 425	473	3 677	165	34 334	350 654	5 037	10,20
S2	123 149	472	3 667	165	34 267	349 868	5 039	10,18
S3	122 790	470	3 645	164	34 206	348 806	5 019	10,16

en valeur relative : base 100 pour S2

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
S1	100,2	100,2	100,3	100,1	100,2	100,2	100,0	100,2
S2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
S3	99,7	99,7	99,4	99,6	99,8	99,7	99,6	99,8

Tableau 15 : Variations du niveau de pollution sonore

en valeur absolue : kms de voirie exposés à un niveau sonore donné (Leq(1h) en dB(A))

	L<50	50≤L<55	55≤L<60	60≤L<65	65≤L<70	70≤L<75	L≥75
S1	7,6	17,0	65,5	242,6	336,2	125,2	4,0
S2	8,1	10,4	64,8	253,9	327,3	129,5	4,0
S3	7,6	13,7	63,5	247,6	333,9	126,9	4,8

en valeur relative : part de chaque classe dans le kilométrage total de voirie

	L<50	50≤L<55	55≤L<60	60≤L<65	65≤L<70	70≤L<75	L≥75
S1	0,95	2,12	8,21	30,40	42,13	15,68	0,50
S2	1,01	1,30	8,12	31,82	41,02	16,23	0,50
S3	0,95	1,72	7,96	31,03	41,84	15,91	0,60

2.4. Variations du bonus autoroutier

Tableau 16 : Variations des kilomètres parcourus

	<i>Veh.Km</i>	<i>base 100</i>
S1	1 319 610	99,67
S2	1 323 937	100,00
S3	1 324 068	100,01

Tableau 17 : Variations des émissions de polluants atmosphériques :

en valeur absolue (Kg)

	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
S1	122 784	470	3 651	164	34 195	348 791	5 025	10,15
S2	123 149	472	3 667	165	34 267	349 868	5 039	10,18
S3	122 990	471	3 663	164	34 256	349 367	5 023	10,17

en valeur relative : base 100 pour S2

	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
S1	99,7	99,7	99,6	99,6	99,8	99,7	99,7	99,7
S2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
S3	99,9	99,8	99,9	99,7	100,0	99,9	99,7	99,9

Tableau 18 : Variations du niveau de pollution sonore

en valeur absolue : kms de voirie exposés à un niveau sonore donné (Leq(1h) en dB(A))

	<i>L<50</i>	<i>50≤L<55</i>	<i>55≤L<60</i>	<i>60≤L<65</i>	<i>65≤L<70</i>	<i>70≤L<75</i>	<i>L≥75</i>
S1	6,4	15,5	61,2	247,1	339,2	124,6	4,0
S2	8,1	10,4	64,8	253,9	327,3	129,5	4,0
S3	6,4	16,6	61,1	251,6	333,8	125,8	4,0

en valeur relative : part de chaque classe dans le kilométrage total de voirie

	<i>L<50</i>	<i>50≤L<55</i>	<i>55≤L<60</i>	<i>60≤L<65</i>	<i>65≤L<70</i>	<i>70≤L<75</i>	<i>L≥75</i>
S1	0,80	1,94	7,67	30,96	42,51	15,62	0,50
S2	1,01	1,30	8,12	31,82	41,02	16,23	0,50
S3	0,80	2,08	7,64	31,48	41,76	15,74	0,50

2.5. Les variations de trafic par arc suivant les valeurs du paramètre testé :

Les variations des valeurs des paramètres de calcul du temps généralisé ont un impact important à un niveau local. Par contre ces variations locales se compensent entre elles et les résultats obtenus à un niveau global de l'agglomération restent très stables comme le montrent les tableaux des pages précédentes.

Pour donner une indication des variations locales, nous avons mesuré, pour chaque arc, le rapport entre le trafic résultant des hypothèses de la simulation 1 et le trafic résultant des hypothèses de la simulation 3 :

$$\Delta_i = \text{Flux}(S1) / \text{Flux}(S3) \text{ sur l'arc } n^{\circ}i$$

Les résultats obtenus montrent que la moyenne de Δ reste très proche de 1 (il n'y a pas ou peu de variations globales des flux entre les simulations extrêmes 1 et 3).

Par contre les valeurs de Δ_i varient plus ou moins fortement autour de cette moyenne suivant le paramètre testé : les coefficients de variation $\sigma_{\Delta}/\Delta_{\text{moyen}}$ s'établissent dans une fourchette allant de 16% pour le facteur distance à 23% pour le coefficient de fiabilité. Ces écarts restent cependant assez limités lorsque l'on observe que les variations de Cfi, Fd et Ba sont de plus de 50% entre les simulations 1 et 3. Nous n'avons fait figurer sur les tableaux ci-dessous que l'écart-type σ_{Δ} de Δ , sachant que le coefficient de variation est sensiblement égale à cette valeur puisque la moyenne de Δ est toujours très proche de 1.

Enfin, nous avons calculé moyenne et écart-type de Δ par type de voirie pour établir d'éventuelles différences qui permettraient de définir des "classes d'incertitude" plus ou moins fortes suivant ce critère. Des différences existent effectivement même si nous ne les avons pas retenues comme suffisantes dans nos commentaires en corps de texte : la voirie secondaire et la voirie de rase campagne sont sujettes aux variations les plus fortes, à l'inverse des trafics autoroutiers qui restent très stables ; les autres types de voirie, secondaire intérieur, rocade, VRU, centre-ville, contournement Est et pénétrante connaissant dans l'ensemble des variations modérées, souvent légèrement inférieures aux variations globale, toute voirie confondue.

Tableau 19 : Les variations de trafic par arc suivant les paramètres testés**Comportement statistique de Δ lors du test des trois paramètres simultanément :**

Type de voirie	Δ moyen	Ecart-type de Δ
Réseau secondaire	0,98	0,26
Rocade	1,04	0,19
Voie Rapide Urbaine	1,03	0,10
Centre-Ville	0,99	0,17
Contournement Est	1,03	0,13
Pénétrante	1,01	0,18
Rase Campagne	1,04	0,21
Autoroute	0,99	0,06
Toute voirie confondue	1,00	0,22

Comportement statistique de Δ lors du test du coefficient de fiabilité :

Type de voirie	Δ moyen	Ecart-type de Δ
Réseau secondaire	0,99	0,30
Rocade	0,99	0,17
Voie Rapide Urbaine	1,00	0,11
Centre-Ville	1,03	0,09
Contournement Est	0,85	0,14
Pénétrante	1,01	0,15
Rase Campagne	0,97	0,18
Autoroute	0,99	0,03
Toute voirie confondue	0,99	0,23

Comportement statistique de Δ lors du test du facteur distance :

Type de voirie	Δ moyen	Ecart-type de Δ
Réseau secondaire	0,99	0,22
Rocade	1,02	0,13
Voie Rapide Urbaine	1,01	0,06
Centre-Ville	1,03	0,12
Contournement Est	0,95	0,13
Pénétrante	1,01	0,11
Rase Campagne	1,00	0,14
Autoroute	1,00	0,02
Toute voirie confondue	1,00	0,16

Comportement statistique de Δ lors du test du bonus autoroutier :

Type de voirie	Δ moyen	Ecart-type de Δ
Réseau secondaire	1,01	0,23
Rocade	1,02	0,09
Voie Rapide Urbaine	0,99	0,03
Centre-Ville	1,02	0,09
Contournement Est	0,95	0,06
Pénétrante	1,01	0,06
Rase Campagne	1,05	0,35
Autoroute	0,98	0,02
Toute voirie confondue	1,01	0,18

3. Le lien entre vitesse et calcul des cycles de conduite

La première série de tests concernant les vitesses a été construite pour vérifier que la méthode de reconstitution des conditions de circulation, plutôt grossière, n'entache pas d'une trop grosse incertitude les résultats d'émissions.

Le croisement des différents types de voirie avec certains intervalles de vitesse a servi de base pour déterminer les cycles de conduite ainsi que l'état de fluidité du trafic. Pour donner une idée de l'impact d'une modification de ces règles, le test a consisté à décaler les classes de vitesses de $\pm 25\%$ autour des conditions initiales. Trois simulations ont donc été faites avec cette seule modification dans la méthode de calcul, toutes autres choses égales par ailleurs :

- *S-I* : classes de vitesses décalées de - 25%
- *S0* : classes de vitesses initiales
- *S+I* : classes de vitesses décalées de + 25%

L'affectation sous DAVIS est donc la même pour les trois simulations. Entre *S-I*, *S0* et *S+I* le trafic total ainsi que les trafics par arc restent constants. De même les vitesses moyennes par arc sont identiques. Seuls les définitions des cycles de conduite et de la fluidité de la circulation se trouvent modifiées et avec elles les trafics par cycle puis les calculs d'émissions qui en découlent.

Tableau 20 : La définition des cycles de conduite suivant les trois scénarios S-1, S0 et S+1

Cycle	Fluidité	Type de voirie	Vitesses S-1 (km/h)	Vitesses S0 (km/h)	Vitesses S+1 (km/h)
Autoroute 1	Fluide	9	>63,75	> 85	> 106,25
Autoroute 2		9 4, 6	]45,00 ; 63,75] >52,50	]60 ; 85] >70	]75,00 ; 106,25] >87,50
Route 1		9 4, 6 2, 3, 7, 8	[0,00; 45,00]]41,25 ; 52,50] > 41,25	[0 ; 60]]55 ; 70] > 55	[0,00 ; 75,00]]68,75 ; 87,50] > 68,75
Route 2		2, 3, 4, 6, 7, 8	]31,50 ; 41,25]	]42 ; 55]	]52,50 ; 68,75]
Route 3	Pulsée	2, 3, 4, 6, 7 8	]24,75 ; 31,50] [0,00; 31,50]	]33 ; 42] [0 ; 42]	]41,25 ; 52,50] [0,00 ; 52,50]
Urbain fluide 1		2, 3, 4, 6, 7 5	]18,75 ; 24,75] > 18,75	]25 ; 33] > 25	]31,25 ; 41,25] > 31,25
Urbain fluide 2		2 à 7	]14,25; 18,75]	]19 ; 25]	]23,75 ; 31,25]
Urbain fluide 3		2 à 7	]9,00 ; 14,25]	]12 ; 19]	]15,00 ; 23,75]
Urbain lent 1		2 à 7	]5,25 ; 9,00]	]7 ; 12]	]8,75 ; 15,00]
Urbain lent 2		2 à 7	[0,00 ; 5,25]	[0 ; 7]	[0,00 ; 8,75]

1. Réseau secondaire intérieur
(Non pris en compte ici)
2. Réseau secondaire
3. Rode
4. Voie rapide urbaine

5. Centre Ville
6. CD 300
7. Pénétrante
8. Rase campagne
9. Autoroute

Tableau 21 : Les trafics par cycle suivant les trois simulations : répartition en véh.km et en part relative

CYCLE	S-1	S0	S+1	S-1	S0	S+1
A1	275 363	32 208	0	20,80	2,43	0,00
A2	163 186	319 153	110 000	12,33	24,11	8,31
R1	283 233	122 182	274 735	21,39	9,23	20,75
R2	204 579	236 904	123 681	15,45	17,89	9,34
R3	158 633	222 200	275 728	11,98	16,78	20,83
U1	102 591	167 207	180 356	7,75	12,63	13,62
U2	65 517	85 349	154 045	4,95	6,45	11,64
U3	41 288	83 356	129 838	3,12	6,30	9,81
UL1	20 249	37 513	46 106	1,53	2,83	3,48
UL2	9 297	17 864	29 448	0,70	1,35	2,22
Total		1 323 937			100,00	

Tableau 22 : Les trafics suivant l'état de fluidité de la circulation pour les trois simulations : répartition en véh.km et en part relative

Circulation	S-1	S0	S+1	%	S-1	S0	S+1
Fluide	926 361	710 447	508 416	69,97	53,66	38,40	
Pulsée	397 576	613 490	815 521	30,03	46,34	61,60	

Tableau 23 : Variations des émissions de polluants atmosphériques :

en valeur absolue (Kg)

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
test 1	115 455	450	3 824	163	29 872	330 888	4 105	9,26
test 2	123 149	472	3 667	165	34 267	349 868	5 039	10,18
test 3	128 609	483	3 449	158	38 817	361 258	5 797	11,00

en valeur relative : base 100 pour test 2

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
test 1	93,8	95,3	104,3	99,1	87,2	94,6	81,5	91,0
test 2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
test 3	104,4	102,4	94,1	96,0	113,3	103,3	115,0	108,1

Tableau 24 : Variations du niveau de pollution sonore*en valeur absolue : kms de voirie exposés à un niveau sonore donné (Leq(1h) en dB(A))*

	$L < 50$	$50 \leq L < 55$	$55 \leq L < 60$	$60 \leq L < 65$	$65 \leq L < 70$	$70 \leq L < 75$	$L \geq 75$
<i>test 1</i>	8,10	12,20	66,34	260,40	318,18	121,26	11,55
<i>test 2</i>	8,10	10,40	64,79	253,92	327,33	129,49	4,00
<i>test 3</i>	8,10	10,40	64,71	249,70	333,33	127,79	4,00

en valeur relative : part de chaque classe dans le kilométrage total de voirie

%	$L < 50$	$50 \leq L < 55$	$55 \leq L < 60$	$60 \leq L < 65$	$65 \leq L < 70$	$70 \leq L < 75$	$L \geq 75$
<i>test 1</i>	1,0	1,5	8,3	32,6	39,9	15,2	1,4
<i>test 2</i>	1,0	1,3	8,1	31,8	41,0	16,2	0,5
<i>test 3</i>	1,0	1,3	8,1	31,3	41,8	16,0	0,5

4. Modélisation statique et vitesses moyennes :

Les sorties de DAVIS ne fournissent qu'une estimation de la vitesse moyenne par arc des véhicules partis au cours d'une heure de référence, sans indications supplémentaires sur l'évolution de cette vitesse sur un arc au cours du temps ainsi que sur sa variabilité entre différents véhicules en présence à un instant donné. On peut alors se demander si cette absence de variabilité des vitesses par arc n'obère pas en partie la qualité des résultats.

Le test a consisté à réintroduire de la variance dans les vitesses par arc estimées par DAVIS puis à dérouler sans modification la suite de la méthode. Cette réintroduction s'est faite en considérant que sur chaque arc, 40% des véhicules ont circulé à la vitesse moyenne calculée (Vit_m) et que les 60% restants se sont répartis en deux classes égales, l'une roulant à une vitesse de $Vit_m+x\%$ et l'autre à $Vit_m-x\%$. Les cycles de conduite ainsi que l'état fluide ou pulsé de la circulation ont ensuite été établis pour chaque classe de vitesse, sur chaque arc.

Quatre simulations ont dès lors été faites. La première, $S0$, correspond à la simulation normale, sans variation des vitesses moyennes, et sert de référence. Les trois suivantes, $S1$, $S2$ et $S3$, introduisant une variabilité de plus en plus importante, avec x respectivement égal à 5, 15 et 25%. Ceci revient à introduire un coefficient de variation $\sigma_v/v_{moyenne}$ de 0, 3,87, 11,62 et 19,36% pour $S0$, $S1$, $S2$ et $S3$.

Ces niveaux de vitesse et la répartition des trafic par vitesse ont été fixés sans aucune recherche de réalisme : l'objectif a été de se rendre compte de l'impact éventuel de la variabilité des vitesses par axe sur les résultats, il n'était pas de retrouver cette variabilité.

Tableau 25 : Répartition et vitesses du trafic calculées sur chaque arc, suivant les 4 simulations du test :

Répartition du trafic par classe de vitesse		$S0$	$S1$	$S2$	$S3$
Arc i du	30%	Vit_m	$Vit_m-5\%$	$Vit_m-15\%$	$Vit_m-25\%$
réseau,	40%	Vit_m	Vit_m	Vit_m	Vit_m
$\forall i$	30%	Vit_m	$Vit_m+5\%$	$Vit_m+15\%$	$Vit_m+25\%$

Les résultats obtenus se révèlent peu sensibles à cette introduction progressive d'une variabilité des vitesses par arc, tant au niveau des conditions de circulation que des niveaux de pollutions atmosphériques et sonores :

Tableau 26 : Les trafics par cycle suivant les quatre simulations : répartition en véh.km et en part relative

CYCLE	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
A1	32 208	38 115	61 617	85 828	2,43	2,88	4,65	6,48
A2	319 153	308 454	261 227	201 251	24,11	23,30	19,73	15,20
R1	122 182	134 994	174 056	209 844	9,23	10,20	13,15	15,85
R2	236 904	235 310	212 227	196 760	17,89	17,77	16,03	14,86
R3	222 200	220 517	218 377	225 990	16,78	16,66	16,49	17,07
U1	167 207	163 080	162 833	156 132	12,63	12,32	12,30	11,79
U2	85 349	87 839	99 515	103 954	6,45	6,63	7,52	7,85
U3	83 356	82 737	82 311	88 992	6,30	6,25	6,22	6,72
UL1	37 513	36 338	34 607	36 428	2,83	2,74	2,61	2,75
UL2	17 864	16 553	17 167	18 758	1,35	1,25	1,30	1,42
Total	1 323 937							

Tableau 27 : Les trafics suivant l'état de fluidité de la circulation pour les quatre simulations : répartition en véh.km et en part relative

Circulation	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
Fluide	710 447	716 872	709 127	693 683	53,66	54,15	53,56	52,40
Pulsée	613 490	607 065	614 810	630 254	46,34	45,85	46,44	47,60

Variations des émissions de polluants atmosphériques :

en valeur absolue (Kg)

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
S0	123 149	472	3 667	165	34 267	349 868	5 039	10,18
S1	122 683	470	3 666	164	34 079	348 611	5 004	10,13
S2	122 477	469	3 652	163	34 192	347 758	5 000	10,14
S3	123 024	470	3 630	162	34 723	348 798	5 069	10,23

en valeur relative : base 100 pour test 2

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
S0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
S1	99,62	99,66	99,98	99,72	99,45	99,64	99,30	99,55
S2	99,45	99,39	99,58	99,00	99,78	99,40	99,23	99,58
S3	99,90	99,58	98,97	98,33	101,33	99,69	100,60	100,47

Tableau 28 : Variations du niveau de pollution sonore*en valeur absolue : kms de voirie exposés à un niveau sonore donné (Leq(1h) en dB(A))*

	$L < 50$	$50 \leq L < 55$	$55 \leq L < 60$	$60 \leq L < 65$	$65 \leq L < 70$	$70 \leq L < 75$	$L \geq 75$
<i>S0</i>	8,1	10,4	64,79	253,9	327,3	129,5	4,0
<i>S1</i>	8,1	10,4	65,4	252,1	328,5	129,5	4,0
<i>S2</i>	8,1	10,4	64,7	247,6	334,3	124,3	8,6
<i>S3</i>	6,9	11,6	59,6	250,3	336,4	120,4	12,8

en valeur relative : part de chaque classe dans le kilométrage total de voirie

%	$L < 50$	$50 \leq L < 55$	$55 \leq L < 60$	$60 \leq L < 65$	$65 \leq L < 70$	$70 \leq L < 75$	$L \geq 75$
<i>S0</i>	1,0	1,3	8,1	31,8	41,0	16,2	0,5
<i>S1</i>	1,0	1,3	8,2	31,6	41,2	16,2	0,5
<i>S2</i>	1,0	1,3	8,1	31,0	41,9	15,6	1,1
<i>S3</i>	0,9	1,5	7,5	31,4	42,2	15,1	1,6

5. L'importance des hypothèses de composition du parc en 1990

Le test portant sur la composition du parc s'est fait en trois étapes permettant de distinguer les influences respectives des hypothèses sur les parts de véhicules circulant à froid, de véhicules légers diesels et de poids lourds. Le principe retenu est le même pour chaque phase du test : à chaque fois, des variations de 25 et 50% ont été envisagées autour de l'hypothèse initiale. On obtient donc trois plans de 5 simulations à comparer entre elles, avec comme seul paramètre modifié la proportion de véhicules.

Concernant le test des hypothèses sur les véhicules à froid, la série de simulations a consisté à faire varier la proportion de VL circulant à froid, à trafic VL constant.

Tableau 29 : Proportion de VL à froid, à trafic VL constant, dans les différentes simulations

Simulation	S-2	S-1	S0	S+1	S+2
Proportion de VL froids	13,5	20,25	27	33,75	40,5

En ce qui concerne la phase de test portant sur les véhicules légers diesel, nous avons fait varier leur part de ± 25 et $\pm 50\%$ au sein du parc de véhicules légers. Leur proportion initiale est de 14% quel que soit le cycle de conduite. Notons que sa variation entraîne une modification de la part des véhicules essence puisque nous avons conservé constante la distance parcourue par les véhicules légers.

Tableau 30 : Proportion de VL diesel, à trafic VL constant, dans les différentes simulations

Simulation	S-2	S-1	S0	S+1	S+2
Proportion de VL Diesel	7	10,5	14	17,5	21

Enfin la dernière phase du test touche les poids lourds. Leur proportion a également été modifiée ± 25 et $\pm 50\%$. Par contre le trafic total a été conservé constant, ce qui signifie que la proportion de VL a également été affectée. Enfin, alors que dans les autres phases seul l'impact sur les émissions polluantes a été évalué, les variations d'émissions sonores ont également été prises en compte ici.

Tableau 31 : Proportion de PL par cycle, à trafic total constant, dans les différentes simulations

Cycle	S-2	S-1	S0	S+1	S+2
Autoroute	5	7,5	10	12,5	15
Route	3,5	5,25	7	8,75	10,5
Urbain	3	4,5	6	7,5	9

5.1. La part de véhicules roulant moteur à froid

**Tableau 32 : Les véhicules kilomètres parcourus moteur à froid
(27% des VL, 0% des PL)**

CYCLE	Véh.Km	dont à froid	en %
A1	32 208	7 827	24,3
A2	319 153	77 554	24,3
R1	122 182	30 680	25,1
R2	236 904	59 487	25,1
R3	222 200	55 795	25,1
U1	167 207	42 437	25,4
U2	85 349	21 662	25,4
U3	83 356	21 156	25,4
UL1	37 513	9 521	25,4
UL2	17 864	4 534	25,4
	1 323 937	330 651	25,0

Tableau 33 : Part des moteurs froids dans les émissions totales

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
<i>Emissions des moteurs froids</i>	34 920	113	717	21	14 816	89 723	2 533	3,69
<i>Emissions des moteurs chauds</i>	88 228	359	2 950	144	19 451	260 145	2 506	6,49
<i>Total</i>	123 149	472	3 667	165	34 267	349 868	5 039	10,18
<i>Part des moteurs froids dans les émissions totales</i>	28,4	23,9	19,6	12,5	43,2	25,6	50,3	36,3

Tableau 34 : Sensibilité du total des émissions polluantes aux variations de la part des véhicules roulant à froid*Résultats en valeur absolue (kg)*

	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
S-2	117 351	454	3 649	161	30 294	338 966	4 197	10
S-1	120 250	463	3 658	163	32 280	344 417	4 618	10
S0	123 149	472	3 667	165	34 267	349 868	5 039	10
S+1	126 047	481	3 676	166	36 253	355 319	5 460	11
S+2	128 946	490	3 685	168	38 240	360 769	5 881	11

Résultats en valeur relative (base 100 pour S0)

	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
S-2	95,3	96,2	99,5	97,9	88,4	96,9	83,3	93,6
S-1	97,6	98,1	99,8	98,9	94,2	98,4	91,6	96,8
S0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
S+1	102,4	101,9	100,2	101,1	105,8	101,6	108,4	103,2
S+2	104,7	103,8	100,5	102,1	111,6	103,1	116,7	106,4

Tableau 35 : Sensibilité des émissions polluantes des VL aux variations de la part des véhicules roulant à froid*Résultats en valeur absolue (kg)*

	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
S-2	92 188	303	2 540	54	29 418	262 454	3 986	9,53
S-1	95 087	312	2 549	56	31 405	267 905	4 407	9,86
S0	97 986	321	2 558	57	33 391	273 356	4 828	10,18
S+1	100 884	330	2 567	59	35 378	278 807	5 249	10,50
S+2	103 783	339	2 576	61	37 364	284 258	5 670	10,83

Résultats en valeur relative (base 100 pour S0)

	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
S-2	94,1	94,4	99,3	93,8	88,1	96,0	82,6	93,6
S-1	97,0	97,2	99,6	96,9	94,1	98,0	91,3	96,8
S0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
S+1	103,0	102,8	100,4	103,1	105,9	102,0	108,7	103,2
S+2	105,9	105,6	100,7	106,2	111,9	104,0	117,4	106,4

Tableau 38 : Sensibilité des émissions polluantes aux variations de la part des VL diesel parmi les VL

Résultats en valeur absolue (kg)

	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
<i>S-2</i>	124 107	456	3 819	136	37 118	347 031	5 441	11,08
<i>S-1</i>	123 628	464	3 743	150	35 692	348 450	5 240	10,63
<i>S0</i>	123 149	472	3 667	165	34 267	349 868	5 039	10,18
<i>S+1</i>	122 669	480	3 591	179	32 841	351 286	4 839	9,73
<i>S+2</i>	122 190	488	3 515	193	31 416	352 704	4 638	9,27

Résultats en valeur relative (base 100 pour S0)

	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
<i>S-2</i>	100,8	96,7	104,1	82,6	108,3	99,2	108,0	108,9
<i>S-1</i>	100,4	98,3	102,1	91,3	104,2	99,6	104,0	104,4
<i>S0</i>	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
<i>S+1</i>	99,6	101,7	97,9	108,7	95,8	100,4	96,0	95,6
<i>S+2</i>	99,2	103,3	95,9	117,4	91,7	100,8	92,0	91,1

5.3. Les Poids Lourds

Tableau 39 : Les véhicules kilomètres parcourus par les poids lourds

CYCLE	Véh.Km	dont PL (%)
Autoroute	351 361	10
Route	581 286	7
Urbain	335 912	6
Urbain lent	55 377	6
	1 323 937	7,5

Part des PL dans les émissions totales : Cf. phase précédente

Tableau 40 : Sensibilité des émissions polluantes aux variations de la part des PL à trafic total constant

Résultats en valeur absolue (kg)

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
S-2	114 398	409	3 219	113	35 096	322 361	5 113	10,58
S-1	118 773	441	3 443	139	34 682	336 114	5 076	10,38
S0	123 149	472	3 667	165	34 267	349 868	5 039	10,18
S+1	127 524	503	3 891	190	33 852	363 621	5 003	9,98
S+2	131 899	535	4 115	216	33 437	377 374	4 966	9,78

Résultats en valeur relative (base 100 pour S0)

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
S-2	92,9	86,7	87,8	68,8	102,4	92,1	101,5	103,9
S-1	96,4	93,3	93,9	84,4	101,2	96,1	100,7	102,0
S0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
S+1	103,6	106,7	106,1	115,6	98,8	103,9	99,3	98,0
S+2	107,1	113,3	112,2	131,2	97,6	107,9	98,5	96,1

Tableau 41 : Variations du niveau de pollution sonore*en valeur absolue : kms de voirie exposés à un niveau sonore donné (Leq(1h) en dB(A))*

	$L < 50$	$50 \leq L < 55$	$55 \leq L < 60$	$60 \leq L < 65$	$65 \leq L < 70$	$70 \leq L < 75$	$L \geq 75$
S-2	9,9	25,7	97,4	374,9	328,9	107,7	0,0
S-1	8,4	14,5	76,7	332,0	383,5	127,3	2,1
S0	7,9	12,7	62,5	280,0	418,0	159,2	4,3
S+1	7,9	8,3	51,4	227,8	457,0	182,8	9,3
S+2	7,9	6,4	40,7	198,2	460,9	196,4	34,0

en valeur relative : part de chaque classe dans le kilométrage total de voirie

%	$L < 50$	$50 \leq L < 55$	$55 \leq L < 60$	$60 \leq L < 65$	$65 \leq L < 70$	$70 \leq L < 75$	$L \geq 75$
S-2	1,05	2,72	10,31	39,70	34,83	11,40	0,00
S-1	0,89	1,54	8,12	35,15	40,60	13,48	0,22
S0	0,84	1,34	6,62	29,65	44,25	16,85	0,45
S+1	0,84	0,88	5,44	24,12	48,39	19,35	0,99
S+2	0,84	0,68	4,31	20,99	48,80	20,79	3,59

6. L'importance des hypothèses de composition du parc en 2010

La composition du trafic évolue fortement entre les premières estimations de 1990 et celles calculées à l'horizon 2010, ce qui nécessite une seconde vague de tests pour établir l'impact de ces modifications sur la sensibilité des résultats d'émissions de polluants atmosphériques :

- Les véhicules diesel ne constituent plus du tout un élément marginal du trafic et passent de 15 à 42% des véhicules légers en circulation entre 1990 et 2010. Il est donc nécessaire de vérifier dans quelle mesure cette recomposition du trafic affecte la sensibilité des résultats à une variation des hypothèses.
- Un autre point concerne les véhicules à essence équipé d'un pot catalytique : ils connaissent de très fortes surémissions tant que le pot n'est pas suffisamment chaud. Il convient donc de tester l'impact des hypothèses de proportion des véhicules à froid sur la sensibilité des émissions globales.
- Enfin, compte tenu des incertitudes liées aux poids lourds et la forte sensibilité de certaines émissions aux variations de ce paramètre, nous avons préféré ne pas les prendre en compte dans nos projections et ne considérer que les trafics des véhicules légers. Les résultats qui suivent ne peuvent donc pas être directement comparés à ceux de la série de tests précédente puisque ce ne sont pas les mêmes trafics qui sont pris en compte.

Deux tests ont été finalement retenus, concernant les proportions de véhicules légers diesel et de véhicules à froid au sein du trafic automobile. Pour ces tests, nous avons procédé comme précédemment en envisageant à chaque fois des variations de ± 25 et $\pm 50\%$ autour des hypothèses initiales. Ceci conduit donc à deux plans de 5 simulations chacun dont les résultats sont exposés dans les tableaux qui suivent.

6.1. Test de la part de véhicules roulant à froid en 2010

Tableau 42 : Proportion de VL à froid, à trafic VL constant, dans les différentes simulations

Simulation	S-2	S-1	S0	S+1	S+2
Proportion de VL froids	13,5	20,25	27	33,75	40,5

Tableau 43 : Sensibilité des émissions polluantes du trafic VL 2010 aux variations de la part des véhicules roulant à froid

Résultats en valeur absolue (kg)

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
S-2	170 598	376	1 577	208	4 111	557 584	801	0
S-1	175 735	389	1 645	215	5 219	565 055	1 018	0
S0	180 872	402	1 713	222	6 327	572 526	1 236	0
S+1	186 010	415	1 781	229	7 435	579 996	1 453	0
S+2	191 147	428	1 849	236	8 543	587 467	1 671	0

Résultats en valeur relative (base 100 pour S0)

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
S-2	94.32	93.51	92.07	93.84	64.98	97.39	64.81	-
S-1	97.16	96.76	96.03	96.92	82.49	98.70	82.40	-
S0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	-
S+1	102.84	103.24	103.97	103.08	117.51	101.30	117.60	-
S+2	105.68	106.49	107.93	106.16	135.02	102.61	135.19	-

6.2. Test de la part de véhicules diesel en 2010

Tableau 44 : Proportion de VL diesel, à trafic VL constant, dans les différentes simulations

Simulation	S-2	S-1	S0	S+1	S+2
Proportion de VL Diesel	21	31,5	42	52,5	63

Tableau 45 : Sensibilité des émissions polluantes du trafic VL 2010 aux variations de la part des véhicules diesel

Résultats en valeur absolue (kg)

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
S-2	190 102	490	1 650	111	8 388	582 723	1 483	0
S-1	185 487	446	1 681	167	7 358	577 625	1 359	0
S0	180 872	402	1 713	222	6 327	572 526	1 236	0
S+1	176 258	358	1 745	278	5 297	567 427	1 112	0
S+2	171 643	314	1 776	333	4 266	562 328	989	0

Résultats en valeur relative (base 100 pour SO)

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
S-2	105.10	121.93	96.30	50.00	132.57	101.78	119.97	-
S-1	102.55	110.96	98.15	75.00	116.29	100.89	109.98	-
SO	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	-
S+1	97.45	89.04	101.85	125.00	83.71	99.11	90.02	-
S+2	94.90	78.07	103.70	150.00	67.43	98.22	80.03	-

6.3. Mesure de la sensibilité des évaluations des émissions de polluants atmosphériques aux variations des deux paramètres testés

Pour mesurer la sensibilité des évaluations des émissions de polluants atmosphériques aux variations des deux paramètres testés, nous avons repris ici l'indicateur utilisé au cours du chapitre 3. Pour rappel, il correspond à une élasticité, mesurée entre les simulations extrêmes du test considéré. Si l'on appelle R_i^- et R_i^+ les résultats d'émissions du polluant i pour les deux simulations extrêmes S⁻ et S⁺ d'un test donné, ainsi que P_j^- et P_j^+ les valeurs du paramètre j entre ces 2 simulations, on a $e_{i,j}$ tel que :

$$e_{i,j} = \frac{R_i^- - R_i^+}{R_i^-} \bigg/ \frac{P_j^- - P_j^+}{P_j^-}$$

Si on suppose que la relation entre la variation des paramètres et la variation résultante des évaluations d'émissions polluantes est une relation linéaire, la valeur de $e_{i,j}$ indique la proportion dans laquelle les émissions du polluant i varient lorsque la valeur du paramètre j varie de 1.

Les résultats obtenus à partir des tests sur les proportions de VL diesel et de VL à froid au sein du trafic automobile de 2010 sont alors les suivants :

Tableau 46 : la sensibilité des évaluations des émissions de polluants atmosphériques aux variations des deux paramètres testés

	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
Part des VL à froid	6.0	6.9	8.6	6.6	53.9	2.7	54.3	-
Part des VL diesel	-4.9	-18.0	3.8	100.0	-24.6	-1.8	-16.6	-

Les émissions de poussières dépendent directement du trafic diesel : si l'on modifie le niveau de ce dernier, les émissions évoluent exactement dans la même proportion. On peut également constater que la variation du trafic diesel, en affectant celui des véhicules à essence, modifie les niveaux d'émissions propres à ce dernier, tels que le CO, les hydrocarbures et le SO2 - on peut remarquer au passage que les mesures de désulfuration du gazole conduisent à des teneurs légèrement inférieures à celles de l'essence. Cette variabilité "de second ordre" reste cependant limitée.

Concernant l'impact de la proportion de véhicules à froid et des surémissions liées à l'inefficacité du pot catalytique dans ce cas, ce sont essentiellement les hydrocarbures et le CO qui se trouvent affectés. Ils s'avèrent particulièrement sensibles puisqu'ils varient de 1/2 point lorsque la proportion de véhicules à froid varie de 1.

Il convient de plus de rappeler ici la particularité de nos calculs qui prennent peu en compte les petits déplacements, souvent internes aux zones du découpage spatial utilisé pour le fonctionnement du modèle d'affectation. Ceci fait que les déplacements pris en compte ont une distance légèrement supérieure à la moyenne nationale. Dans ce cadre l'hypothèse de 27% de véhicules circulant à froid, correspondant à une moyenne nationale, peut apparaître comme recevable. Par contre si tous les déplacements internes à l'agglomérations avaient été pris en compte, cette proportion devrait être revue à la hausse et la sensibilité des résultats serait encore plus forte, notamment en ce qui concerne les hydrocarbures et le CO. Ce point est important à souligner, il signifie que les progrès en matière de comportement à froid des pots catalytiques joueront un rôle significatif sur le contrôle définitif de ces deux types d'émissions.

ANNEXE III

PRESENTATION DES RESULTATS DES SIMULATIONS :

DONNEES EN VALEURS ABSOLUES ET RELATIVES

1. La détermination des distances parcourues par cycle de conduite

Au cours des deux derniers chapitres, deux grandes séries de simulations ont été élaborées pour permettre d'analyser l'impact des différents paramètres envisagés sur les émissions polluantes et sonores du trafic routier. La première avait pour objectif de mesurer les effets d'une croissance du nombre de déplacements à réseau routier figé. Elle se base sur une matrice et un réseau datés de 1990. La seconde reprend les grandes évolutions envisagées d'ici 2010 et retrace les effets à long terme de l'évolution du réseau - considéré comme conséquence directe de la congestion - de la mobilité et des technologies au sein du trafic. Trois séries de réseaux et matrices compatibles entre eux ont été utilisés, correspondant à 1994, 2000 et 2010.

1.1. Simulation d'une croissance du nombre de déplacements à réseau routier figé

La première série de simulations recherche à mettre en évidence les effets à court terme de la congestion et a consisté à simuler une augmentation progressive du nombre de déplacements sur le réseau de voirie.

Elle repose tout d'abord sur une comparaison des résultats issus de deux affectations du trafic entre lesquelles un seul paramètre varie, toutes autres choses supposées égales par ailleurs :

- Une première affectation est effectuée sans prendre en compte les contraintes de capacité qui caractérisent chaque arc du réseau. Elle est établie à partir d'une attribution des itinéraires des déplacements routiers par une méthode de tout ou rien en une itération, reposant sur les seules vitesses *a priori* attribuées à chaque arc. L'affectation est donc effectuée comme si le phénomène de congestion n'existait pas.
- La seconde affectation intègre les contraintes de capacités des arcs du réseau et permet donc de prendre en compte les effets de la congestion. Elle correspond en fait à une affectation selon le principe d'équilibre de Wardrop, avec 6 itinéraires et écrêtement de la demande. Soulignons qu'elle correspond également au scénario *S0* servant de référence lors de la série de tests effectués au cours du chapitre précédent.

Pour un même nombre de déplacements avec des origines et destinations identiques, on obtient alors 2 résultats d'affectation reposant sur des logiques de calcul nettement différenciées, que l'on peut interpréter comme prenant ou non en compte le problème de la congestion. Pour chacune de ces affectations, des calculs d'émissions atmosphériques et sonores peuvent ensuite être faits en fonction des vitesses de circulation, des flux de véhicules et des types de voirie. Les écarts entre les deux situations, tant en termes de vitesses moyennes et de répartition des flux sur le réseau que d'émissions sonores et atmosphériques, sont ensuite attribués aux effets de la congestion.

Un deuxième point réside dans le fait que le phénomène de congestion ainsi que ses effets ne relèvent pas de processus linéaires comme en témoignent la forme de la courbe débit-vitesse ou les émissions unitaires des véhicules en fonction de l'état de la

circulation. De plus nous avons vu que ses effets ne semblent pas être les mêmes suivant le niveau d'observation où l'on se situe.

Pour ne pas masquer cette éventuelle non-linéarité de la congestion et de ses effets au niveau d'un réseau, plusieurs affectations ont été effectuées, simulant une montée en charge progressive du réseau. Pour réaliser ce travail, la structure de la matrice origine-destination a été conservée constante, seul le nombre total de déplacements étant affecté. Autrement dit la matrice origine-destination d'heure de pointe du soir 1990 fournie par le CETE de Lyon a servi de matrice de référence et a été multipliée par un coefficient λ pour chaque simulation. Au total, 9 simulations ont été effectuées, pour lesquelles la double affectation "avec" et "sans" congestion a été reconduite à chaque fois. Les coefficients λ et les volumes de déplacements correspondants sont les suivants :

Tableau 1 : Nombre de déplacements pour chacune des 9 simulations, avec et sans congestion

Simulation	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Volume de déplacements	46 350	77 260	108 160	123 610	139 060	154 510	169 960	185 420	200 870
Coef. multiplicateur λ / à la simulation n°6 de ref.	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3

Sur la base de ces 2x9 simulations, l'évolution des kilomètres parcourus par cycles de conduite est alors la suivante :

Tableau 2 : Trafic total par cycle de conduite obtenu pour les 9 simulations prenant en compte la congestion (Veh.Km)

Simulation Trafics	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A1	110 875	113 876	51 658	35 563	29 114	32 208	16 215	17 488	18 691
A2	54 772	117 631	260 354	304 069	318 322	319 153	296 091	212 111	134 979
R1	108 174	150 349	126 292	116 513	130 902	122 182	180 440	247 097	302 514
R2	106 862	150 780	214 867	236 733	236 880	236 904	229 252	226 886	217 931
R3	41 842	94 078	148 703	182 415	207 806	222 200	251 712	306 497	339 408
U1	11 728	47 450	98 945	113 640	139 268	167 207	143 431	191 572	174 792
U2	646	9 779	28 903	49 435	61 259	85 349	108 094	104 383	107 940
U3	268	2 465	21 574	36 332	62 093	83 356	122 865	141 767	171 035
UL1	0	137	3 552	10 475	18 783	37 513	59 101	68 279	118 549
UL2	0	168	1 055	2 709	7 831	17 864	33 441	50 361	69 918
Total	435 168	686 713	955 904	1 087 886	1 212 257	1 323 936	1 440 641	1 566 441	1 655 757

Tableau 3 : Trafic total par cycle de conduite obtenu pour les 9 simulations ne prenant pas en compte la congestion (Veh.Km)

Simulation Trafics.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A1	110 875	184 792	258 709	295 667	332 626	369 584	406 543	443 501	480 460
A2	54 772	91 286	127 800	146 058	164 315	182 572	200 829	219 086	237 344
R1	108 174	180 290	252 406	288 464	324 522	360 580	396 638	432 696	468 754
R2	106 862	178 104	249 346	284 966	320 587	356 208	391 829	427 450	463 070
R3	41 842	69 737	97 632	111 580	125 527	139 475	153 422	167 370	181 317
U1	11 728	19 546	27 365	31 274	35 183	39 093	43 002	46 911	50 821
U2	756	1 259	1 763	2 015	2 267	2 519	2 770	3 022	3 274
U3	284	474	663	758	853	947	1 042	1 137	1 232
UL1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UL2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	435 293	725 489	1 015 685	1 160 783	1 305 880	1 450 978	1 596 076	1 741 174	1 886 272

Rq : Les trafics des véhicules légers sont obtenus à partir de ces 2 tableaux en considérant qu'ils constituent 94% des véhicules en cycles urbains, 93% en cycles routiers et 90% en cycles autoroutiers (Cf. chapitre 3).

1.2. Les dynamiques de long terme entre 1994, 2000 et 2010

Une seconde campagne de simulations a été établie pour mesurer les effets sur le long terme de l'évolution du réseau viaire, de la mobilité automobile et des améliorations technologiques au sein du trafic.

La méthode retenue a consisté à envisager l'évolution de chacun de ces trois paramètres séparément, en raisonnant toutes autres choses égales par ailleurs. Cependant, du fait des interactions entre les différents facteurs liées notamment aux phénomènes d'adaptations des itinéraires et de variations des émissions unitaires suivant les conditions de circulation, on peut toujours se demander si les conclusions auxquelles on aboutit avec

une telle méthode ne restent pas dépendantes de la situation de référence et ne peuvent pas être attribuées aux seules modifications du paramètre analysé.

Pour éviter le plus possible ce risque, nous avons dans chaque cas retenu plusieurs situations de base différentes à l'intérieur desquelles le paramètre testé a varié suivant les mêmes valeurs. Seules les conclusions qui pouvaient être maintenues quelle que soit la situation de référence ont été considérées comme pertinentes et caractéristiques de l'effet du paramètre sur les émissions polluantes et sonores du trafic automobile.

Trois dates ont servi de référence : 1994, 2000 et 2010. Ce choix a essentiellement été fait pour une raison de disponibilité de données compatibles entre elles, mises à notre disposition par le CETE de Lyon. On obtient alors un univers des simulations possibles reposant sur trois états du réseau (un à chaque date de référence), trois états de la mobilité ainsi que trois états des technologies utilisées au sein du trafic, soit 27 simulations envisageables.

Cependant, au niveau de la phase d'affectation seuls les états du réseau et de la mobilité se trouvent impliqués, les données descriptives de l'état des technologies et du niveaux d'émissions unitaires par cycle n'étant utilisées que dans une phase ultérieure. C'est donc une série de 9 simulations qui a été effectuée sous DAVIS et dont les résultats en terme de kilomètres parcourus par cycle de conduite sont présentés ci-dessous.

Rajoutons que dans une optique particulière de projection sur 15 ans de l'évolution générale des paramètres retenus et des émissions qui en découlent, 4 autres simulations ont été effectuées, permettant de fixer des fourchettes hautes et basses aux situations envisagées pour 2000 et 2010. Ces fourchettes reposent sur une hypothèse de variation de $\pm 5\%$ de la matrice des déplacements en 2000 par rapport à la matrice 2000 de référence et $\pm 10\%$ en 2010 - ces valeurs de ± 5 et $\pm 10\%$ sont posées de manière arbitraires et permettent essentiellement de se rendre compte de l'impact des erreurs de prévision de la mobilité sur les niveaux d'émissions.

Tableau 4 : Trafic total par cycle de conduite suivant les différents états du réseau et de la matrice O-D entre 1994, 2000 et 2010 (Veh.Km)

	Réseau 1994			Réseau 2000			Réseau 2010		
	Mat. 1994	Mat. 2000	Mat. 2010	Mat. 1994	Mat. 2000	Mat. 2010	Mat. 1994	Mat. 2000	Mat. 2010
A1	103 316	104 791	99 834	112 427	107 533	88 079	191 462	152 178	110 586
A2	311 491	195 803	145 755	333 710	232 200	192 400	362 673	388 057	403 230
R1	274 508	363 093	420 115	299 511	448 586	451 648	357 285	416 628	429 368
R2	231 272	280 624	157 841	234 254	235 601	239 561	245 989	273 210	326 272
R3	284 303	376 567	436 706	270 731	308 250	400 071	249 529	270 877	337 419
U1	200 365	208 997	212 503	191 550	223 019	225 612	174 853	192 800	249 146
U2	109 118	170 430	223 108	100 347	126 081	165 536	105 651	116 457	138 350
U3	76 556	149 570	227 065	74 123	133 840	180 536	85 461	119 136	158 757
UL1	33 686	91 682	152 246	34 076	60 142	134 736	20 384	36 095	77 903
UL2	14 899	48 628	101 663	13 620	27 302	96 858	22 544	24 634	48 756
Total	1 639 512	1 990 186	2 176 836	1 664 349	1 902 554	2 175 038	1 815 832	1 990 070	2 279 786

Tableau 5 : Trafic total par cycle de conduite suivant les fourchettes de mobilité retenues en 2000 et 2010 (Veh.Km)

	Situation 1994	Situation 2000			Situation 2010		
		-5%	Matrice de référence	+5%	-10%	Matrice de référence	+10%
A1	103 316	108 755	107 533	105 607	130 635	110 586	78 780
A2	311 491	232 135	232 200	232 487	398 492	403 230	405 905
R1	274 508	445 999	448 586	439 230	442 950	429 368	438 758
R2	231 272	246 781	235 601	249 495	301 867	326 272	277 177
R3	284 303	278 938	308 250	330 018	302 404	337 419	455 296
U1	200 365	211 963	223 019	201 723	218 104	249 146	208 857
U2	109 118	96 709	126 081	157 675	121 306	138 350	177 965
U3	76 556	131 326	133 840	137 009	132 854	158 757	210 111
S1	33 686	46 290	60 142	95 959	43 155	77 903	104 779
S2	14 899	15 499	27 302	50 048	35 121	48 756	84 129
Total	1 639 512	1 814 395	1 902 554	1 999 251	2 126 889	2 279 786	2 441 758

2. Les effets d'une croissance du nombre de déplacements à réseau routier figé

2.1. La congestion comme coût externe

Tableau 6 : Cas simulé de congestion sur un tronçon de 15 km de route urbaine (perte de temps en minutes) :

Nombre de véhicules <i>a</i>	Temps moyen de parcours <i>b</i>	Temps perdu par l'ensemble des véhicules $c=a.b$	Temps perdu du fait des 200 véhicules supplémentaires $d_i=c_{i+1}-c_i$	Moyenne par véhicule sup. $e=d/200$
200	10	2 000	2 000	6
400	10	4 000	2 000	10
600	10	6 000	2 000	10
800	10	8 000	2 000	10
1 000	11	11 000	3 000	15
1 200	13	15 600	4 600	23
1 400	16	22 400	6 800	34
1 600	20	32 000	9 600	48
1 800	25	45 000	13 000	65
2 000	32	64 000	19 000	95
2 200	40	88 000	24 000	120
2 400	50	120 000	32 000	160
2 600	65	169 000	49 000	245

"Ce tableau donne le temps moyen de parcours du tronçon (colonne b) en fonction du flux horaire, c'est-à-dire du nombre de véhicules qui empruntent le tronçon (colonne a). Pour 200 comme pour 800 véhicules à l'heure, le temps moyen de parcours n'est pas affecté par le volume de trafic. Il faut environ 10 minutes, soit une vitesse moyenne de 90 km/h. Quand le flux augmente jusqu'à 1 400 véhicules, la vitesse baisse jusqu'à près de 60 km/h et il faut alors 16 minutes pour effectuer le même parcours.

Quand le flux atteint 1 600 véhicules, il faut 20 minutes. A ce niveau de trafic le temps total perdu par les véhicules est de 32 000 minutes (colonne c). Si 200 des automobilistes, qui ont choisi d'emprunter le tronçon à cette heure-là en estimant que 20 minutes étaient une perte de temps raisonnable, renonçaient à leur déplacement, il feraient gagner aux autres automobilistes 9 600 minutes, soit 200 fois 48 minutes. Le vrai coût de leur décision pour la collectivité n'était donc pas 20 mais 48 minutes."¹

¹ Ce tableau et son commentaire sont tirés de la p. 266 de DARBERA Richard : "Faire payer les embouteillages ?", *Transports* n°315, mai 1986, pp. 265-273.

2.2. Congestion et pollution atmosphérique

Tableau 7 : Emissions du trafic total obtenues pour les 9 simulations prenant en compte la congestion

Simulation	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
1	35 397	140	1 297	53	8 366	102 527	1 098	3
2	56 874	224	2 006	84	14 002	164 038	1 931	4
3	81 937	320	2 741	118	20 951	235 303	3 016	7
4	95 283	371	3 089	135	24 953	272 844	3 632	8
5	108 931	421	3 403	150	29 356	310 793	4 299	9
6	123 149	472	3 667	165	34 267	349 867	5 039	10
7	138 963	528	3 919	179	40 036	392 998	5 887	12
8	154 048	581	4 178	192	45 817	433 795	6 794	13
9	169 540	633	4 327	202	52 066	475 336	7 738	15

Tableau 8 : Emissions du trafic total obtenues pour les 9 simulations ne prenant pas en compte la congestion

Simulation	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
0	15 713	63	608	25	3 466	45 814	409	1.2
1	35 410	140	1 298	53	8 370	102 563	1 099	2.7
2	59 017	234	2 163	89	13 951	170 938	1 831	4.6
3	82 623	328	3 028	124	19 531	239 314	2 563	6.4
4	94 427	375	3 460	142	22 321	273 501	2 929	7.3
5	106 230	421	3 893	160	25 111	307 689	3 296	8.2
6	118 034	468	4 325	177	27 901	341 877	3 662	9.1
7	129 837	515	4 758	195	30 691	376 064	4 028	10.1
8	141 640	562	5 190	213	33 481	410 252	4 394	11.0
9	153 444	609	5 623	230	36 271	444 440	4 760	11.9

Tableau 9 : Emissions du trafic VL obtenues pour les 9 simulations prenant en compte la congestion

Simulation	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
1	26 529	87	899	15	8 154	75 368	1 037	2.7
2	43 188	142	1 394	25	13 640	122 192	1 832	4.5
3	63 084	207	1 902	37	20 402	177 764	2 873	6.5
4	74 014	243	2 145	44	24 304	207 990	3 466	7.7
5	85 568	281	2 368	50	28 599	239 644	4 111	8.9
6	97 986	321	2 558	57	33 391	273 356	4 828	10.2
7	112 219	367	2 744	65	39 052	311 776	5 658	11.7
8	125 942	412	2 950	72	44 707	348 573	6 549	13.1
9	140 644	460	3 071	79	50 852	387 851	7 480	14.7

Tableau 10 : Emissions du trafic VL obtenues pour les 9 simulations ne prenant pas en compte la congestion

Simulation	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
1	26 540	87	899	15	8 158	75 398	1 037	2.7
2	44 233	145	1 499	25	13 596	125 664	1 729	4.6
3	61 926	204	2 098	36	19 035	175 929	2 421	6.4
4	70 772	233	2 398	41	21 754	201 062	2 766	7.3
5	79 619	262	2 698	46	24 473	226 194	3 112	8.2
6	88 465	291	2 998	51	27 193	251 327	3 458	9.1
7	97 312	320	3 297	56	29 912	276 460	3 804	10.1
8	106 158	349	3 597	61	32 631	301 593	4 149	11.0
9	115 005	378	3 897	66	35 350	326 725	4 495	11.9

Tableau 11 : Les élasticités des différentes émissions polluantes du trafic total et du trafic VL au nombre de déplacements affectés sur le réseau routier

	élasticité trafic total (1)	élasticité trafic VL (2)	Rapport (2)/(1).100
NOx	0.770	0.788	102.39
CO2	1.070	1.188	111.00
Poussières	0.878	1.195	136.05
SO2	1.040	1.216	116.92
CE	1.105	1.223	110.69
Plomb	1.233	1.233	100.00
CO	1.436	1.439	100.21
Hydrocarbures	1.627	1.665	102.36

Si l'on note E_i^j le total des émissions du polluant i obtenu à partir de la simulation n° j , si AC et SC désignent respectivement les simulations avec congestion et sans congestion, les élasticités ci-dessus sont calculées à partir de la formule suivante :

$$e_i = \frac{\left[\frac{E_i^9}{E_i^1} \right]_{AC}}{\left[\frac{E_i^9}{E_i^1} \right]_{SC}}$$

2.3. Congestion et pollution sonore

EVOLUTION DES KILOMETRES DE TRONÇONS DE VOIRIE EXPOSES A UN NIVEAU SONORE DONNE EN FONCTION DU NOMBRE DE DEPLACEMENTS ROUTIERS (mesuré sur l'isophone de référence en $Leq(1h)$ dB(A)) : 4 tableaux, avec et sans congestion / tous trafics et trafic VL

Tableau 12 : Emissions sonore de l'ensemble du trafic routier, congestion prise en compte :

Simulation	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$L < 50$	67	45	20	15	15	10	9	8	6
$50 \leq L < 55$	107	69	38	28	18	19	14	3	1
$55 \leq L < 60$	261	160	139	113	85	73	55	28	21
$60 \leq L < 65$	246	326	292	278	258	237	213	206	181
$65 \leq L < 70$	50	120	219	266	310	322	347	387	389
$70 \leq L < 75$	68	78	89	93	107	132	154	159	185
$L \geq 75$	0	0	2	5	5	6	7	8	14

Tableau 13 : Emissions sonore de l'ensemble du trafic routier, congestion non prise en compte :

Simulation	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$L < 50$	67	38	32	25	24	24	24	22	20
$50 \leq L < 55$	107	86	49	49	43	39	31	30	30
$55 \leq L < 60$	261	172	156	140	114	102	100	97	96
$60 \leq L < 65$	246	299	276	270	266	261	239	220	196
$65 \leq L < 70$	50	122	194	218	235	250	276	280	291
$70 \leq L < 75$	68	53	43	42	50	54	60	77	90
$L \geq 75$	0	27	48	54	66	68	69	73	75

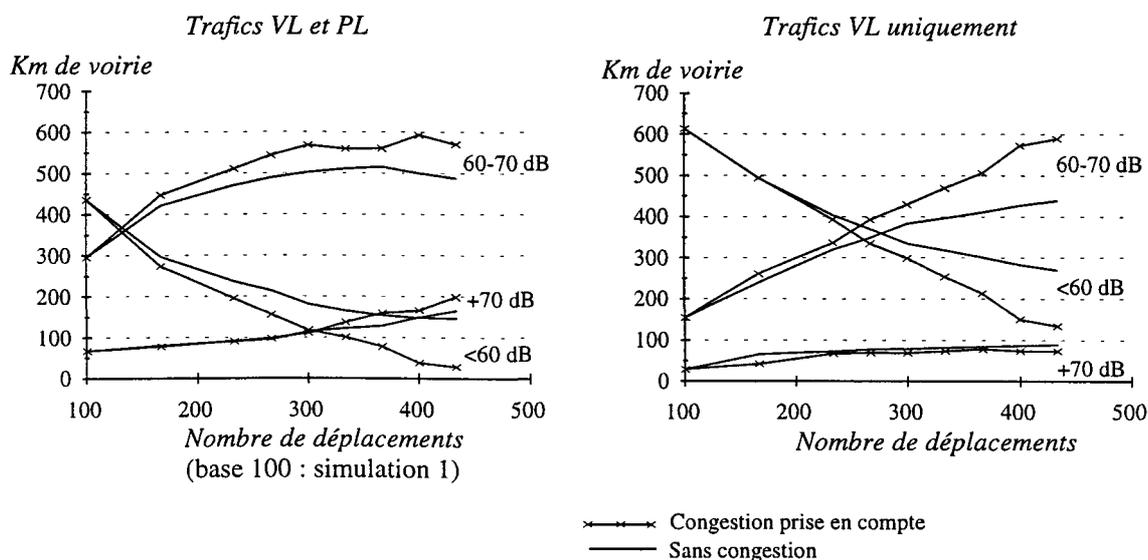
Tableau 14 : Emissions sonores du trafic VL, congestion prise en compte

Simulation	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$L < 50$	133	77	46	36	29	25	17	8	7
$50 \leq L < 55$	196	152	92	75	59	52	45	20	17
$55 \leq L < 60$	285	265	255	225	212	178	152	124	111
$60 \leq L < 65$	105	212	278	316	320	334	344	386	366
$65 \leq L < 70$	51	49	60	78	109	135	163	188	224
$70 \leq L < 75$	29	42	68	70	69	74	78	74	74
$L \geq 75$	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 15 : Emissions sonores du trafic VL, congestion non prise en compte

Simulation	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$L < 50$	133	88	61	54	49	47	43	37	35
$50 \leq L < 55$	196	151	118	100	86	82	80	70	66
$55 \leq L < 60$	285	255	226	217	200	190	180	177	169
$60 \leq L < 65$	105	197	252	272	288	281	272	271	268
$65 \leq L < 70$	51	42	68	77	96	116	139	157	171
$70 \leq L < 75$	29	66	71	51	52	53	52	39	37
$L \geq 75$	0	0	2	27	28	29	33	48	53

Evolution des émissions sonores des trafics VL et VL+PL en fonction du nombre de déplacements
 mesurées en km de tronçons de voirie exposés à différents niveaux sonores établis sur l'isophone de référence en $Leq(1h)$ dB(A).



2.4. Congestion et répartition du trafic sur le réseau de voirie

Tableau 16 : Répartition du trafic suivant le type de voirie - en %

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Réseau secondaire</i>	73 687	121 694	175 530	202 235	228 258	253 898	281 099	309 691	331 444
<i>Rocade</i>	11 576	20 476	29 661	34 494	39 012	43 530	47 541	51 291	54 164
<i>VRU</i>	71 586	116 268	159 633	183 499	207 202	230 165	252 719	278 238	294 096
<i>Centre ville</i>	6 315	10 613	15 426	17 560	19 853	22 252	24 267	24 875	25 899
<i>CD300</i>	2 349	3 707	5 223	5 976	7 128	8 196	9 221	10 356	12 170
<i>Pénétrante</i>	100 211	164 139	223 106	253 220	281 211	306 137	325 068	345 311	363 808
<i>Rase campagne</i>	40 769	70 438	101 185	116 529	131 294	143 800	155 555	171 213	180 084
<i>Autoroute</i>	146 450	193 914	244 850	270 031	293 937	316 343	342 943	369 258	383 121
<i>Total VKm</i>	452 941	701 250	954 614	1 083 545	1 207 894	1 324 320	1 438 412	1 560 234	1 644 785

Tableau 17 : Répartition du trafic suivant le type de voirie - en %

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Réseau secondaire</i>	16.27	17.35	18.39	18.66	18.90	19.17	19.54	19.85	20.15
<i>Rocade</i>	2.56	2.92	3.11	3.18	3.23	3.29	3.31	3.29	3.29
<i>VRU</i>	15.80	16.58	16.72	16.94	17.15	17.38	17.57	17.83	17.88
<i>Centre ville</i>	1.39	1.51	1.62	1.62	1.64	1.68	1.69	1.59	1.57
<i>CD300</i>	0.52	0.53	0.55	0.55	0.59	0.62	0.64	0.66	0.74
<i>Pénétrante</i>	22.12	23.41	23.37	23.37	23.28	23.12	22.60	22.13	22.12
<i>Rase campagne</i>	9.00	10.04	10.60	10.75	10.87	10.86	10.81	10.97	10.95
<i>Autoroute</i>	32.33	27.65	25.65	24.92	24.33	23.89	23.84	23.67	23.29

3. Congestion et renouvellement du réseau routier à long terme

3.1. Considérations générales sur les évolutions du réseau et du trafic

Tableau 18 : Evolution générale de la voirie entre 1994 et 2010 (en Km)

	1994	2000	2010
<i>Réseau secondaire</i>	889	897	910
<i>Rocade</i>	81	103	102
<i>VRU</i>	90	117	164
<i>Centre ville</i>	62	63	63
<i>CD300</i>	79	79	79
<i>Pénétrante</i>	373	374	374
<i>Rase campagne</i>	357	357	394
<i>Autoroute</i>	209	216	324
<i>Longueur totale du réseau</i>	2 140	2 206	2 410

Tableau 19 : Evolution des trafics par type de voirie (en Veh.Km)

	Matrice 1994			Matrice 2000		
	Res. 1994	Res. 2000	Res. 2010	Res. 1994	Res. 2000	Res. 2010
Réseau secondaire	303 630	293 206	297 054	377 886	330 617	322 159
Rocade	51 755	59 883	62 094	65 808	70 957	70 682
VRU	240 826	239 888	265 216	267 873	277 744	288 267
Centre ville	35 244	33 730	36 379	40 762	38 370	39 301
CD300	124 114	146 854	139 117	148 942	166 819	153 657
Pénétrante	338 164	337 235	336 300	394 466	375 626	355 985
Rase campagne	174 440	167 224	165 151	218 567	185 859	179 074
Autoroute	371 338	386 329	514 521	475 882	456 561	580 945
Total	1 639 512	1 664 349	1 815 832	1 990 186	1 902 554	1 990 070

	Matrice 2010		
	Res. 1994	Res. 2000	Res. 2010
Réseau secondaire	426 954	395 954	373 557
Rocade	71 664	84 262	84 103
VRU	288 176	318 919	329 700
Centre ville	44 073	43 553	42 954
CD300	156 925	181 925	168 305
Pénétrante	429 211	408 471	392 333
Rase campagne	236 795	213 385	204 789
Autoroute	523 038	528 569	684 044
Total	2 176 836	2 175 038	2 279 786

3.2. Effets sur les émissions de polluants atmosphériques liées au trafic de véhicules légers

Tableau 20 : Effets sur les émissions de polluant atmosphérique liés au réseau, technologie et mobilité de 1994

en VA (Kg)	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
Rés. 1994	125 991	443	2 608	98	28 255	369 461	4 104	8
Rés. 2000	126 550	445	2 659	98	28 158	371 536	4 058	8
Rés. 2010	136 831	481	2 936	106	30 142	402 205	4 235	9

Base 100 Rés 94	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
Rés. 1994	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Rés. 2000	100.4	100.5	101.9	100.1	99.7	100.6	98.9	100.4
Rés. 2010	108.6	108.6	112.6	107.7	106.7	108.9	103.2	108.6

Tableau 21 : Effets liés au réseau sur les émissions de polluant atmosphérique, technologie et mobilité de 2000

en VA (Kg)	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
Rés. 1994	165 676	382	2 056	173	17 132	509 451	2 734	4
Rés. 2000	150 213	346	1 952	156	15 168	463 341	2 389	3
Rés. 2010	151 490	349	2 059	159	14 867	468 775	2 280	3

Base 100 Rés 94	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
Rés. 1994	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Rés. 2000	90.67	90.58	94.96	90.11	88.54	90.95	87.37	90.52
Rés. 2010	91.44	91.28	100.18	91.59	86.78	92.02	83.39	91.16

Tableau 22 : Effets sur les émissions de polluant atmosphérique liés au réseau, technologie et mobilité de 2010

en VA (Kg)	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
Rés. 1994	196 267	437	1 726	241	7 294	617 113	1 464	0
Rés. 2000	189 371	422	1 701	230	6 938	596 334	1 385	0
Rés. 2010	180 872	402	1 713	222	6 327	572 526	1 236	0

Base 100 Rés 94	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
Rés. 1994	100.00	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	-
Rés. 2000	96.49	96.4	98.5	95.7	95.1	96.6	94.6	-
Rés. 2010	92.16	91.9	99.2	92.3	86.8	92.8	84.4	-

3.3. Effets sur les émissions sonores liées au trafic de véhicules légers

Tableau 23 : Effets sur les émissions sonores liés aux évolutions du réseau, matrice constante de 1994

Km de voirie exposés à un niveau sonore fixé	Données en valeurs relatives		
	Res. 1994	Res. 2000	Res. 2010
L<50	32.5	27.4	20.5
50≤L<55	55.1	79.0	90.7
55≤L<60	299.6	322.4	330.8
60≤L<65	452.7	464.0	484.8
65≤L<70	174.0	141.3	189.7
70≤L<75	108.6	120.9	140.6
L≥75	0.0	0.0	0.0
Total	1 122	1 155	1 257

Km de voirie exposés à un niveau sonore fixé	Données en valeurs relatives		
	Res. 1994	Res. 2000	Res. 2010
L<50	0.03	0.02	0.02
50≤L<55	0.05	0.07	0.07
55≤L<60	0.27	0.28	0.26
60≤L<65	0.40	0.40	0.39
65≤L<70	0.15	0.12	0.15
70≤L<75	0.10	0.10	0.11
L≥75	0.00	0.00	0.00
Total	1.00	1.00	1.00

Tableau 24 : Effets sur les émissions sonores liés aux évolutions du réseau, matrice constante de 2000

<i>Km de voirie exposés à un niveau sonore fixé</i>	<i>Données en valeurs relatives</i>		
	<i>Res. 1994</i>	<i>Res. 2000</i>	<i>Res. 2010</i>
<i>L < 50</i>	18.6	20.9	12.8
<i>50 ≤ L < 55</i>	30.9	59.5	68.4
<i>55 ≤ L < 60</i>	195.6	256.4	293.6
<i>60 ≤ L < 65</i>	512.6	496.1	530.5
<i>65 ≤ L < 70</i>	246.3	202.1	211.2
<i>70 ≤ L < 75</i>	119.9	121.4	141.4
<i>L ≥ 75</i>	0.0	0.0	0.0
<i>Total</i>	<i>1 124</i>	<i>1 156</i>	<i>1 258</i>

Tableau 25 : Effets sur les émissions sonores liés aux évolutions du réseau, matrice constante de 2010

<i>Km de voirie exposés à un niveau sonore fixé</i>	<i>Données en valeurs relatives</i>		
	<i>Res. 1994</i>	<i>Res. 2000</i>	<i>Res. 2010</i>
<i>L < 50</i>	10.7	8.5	10.1
<i>50 ≤ L < 55</i>	16.1	37.3	41.5
<i>55 ≤ L < 60</i>	138.8	160.4	228.2
<i>60 ≤ L < 65</i>	506.8	526.0	573.6
<i>65 ≤ L < 70</i>	340.2	311.9	261.0
<i>70 ≤ L < 75</i>	109.8	112.8	144.0
<i>L ≥ 75</i>	1.4	0.0	0.0
<i>Total</i>	<i>1 124</i>	<i>1 157</i>	<i>1 258</i>

4. Effets du renouvellement technologique sur les émissions de polluants atmosphériques et les émissions sonores

4.1. Effets du renouvellement technologique sur les émissions de polluants atmosphériques

Tableau 26 : Effets du renouvellement technologique sur les émissions de polluant atmosphérique, réseau et mobilité de 1994

<i>en VA (Kg)</i>	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
<i>Techn. 1994</i>	125 991	443	2 608	98	28 255	369 461	4 104	8
<i>Techn. 2000</i>	125 162	288	1 653	121	12 519	387 110	1 914	3
<i>Techn. 2010</i>	123 975	275	1 070	69	4 324	393 401	727	0

<i>Base 100 Techn. 94</i>	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
<i>Techn. 1994</i>	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<i>Techn. 2000</i>	99.34	65.11	63.36	123.00	44.31	104.78	46.63	33.96
<i>Techn. 2010</i>	98.40	62.14	41.04	70.00	15.31	106.48	17.72	0.00

Tableau 27 : Effets du renouvellement technologique sur les émissions de polluant atmosphérique, réseau et mobilité de 2000

<i>en VA (Kg)</i>	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
<i>Techn. 1994</i>	151 293	531	2 982	115	34 601	442 131	5 050	10
<i>Techn. 2000</i>	150 213	346	1 910	141	15 332	463 341	2 356	3
<i>Techn. 2010</i>	148 750	330	1 248	81	5 298	470 909	896	0

<i>Base 100 Techn. 94</i>	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
<i>Techn. 1994</i>	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<i>Techn. 2000</i>	99.29	65.19	64.05	123.00	44.31	104.80	46.67	33.96
<i>Techn. 2010</i>	98.32	62.20	41.85	70.00	15.31	106.51	17.74	0.00

Tableau 28 : Effets du renouvellement technologique sur les émissions de polluant atmosphérique, réseau et mobilité de 2010

<i>en VA (Kg)</i>	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
<i>Techn. 1994</i>	184 018	646	3 603	140	41 966	537 938	6 088	12
<i>Techn. 2000</i>	182 669	421	2 314	173	18 598	563 448	2 842	4
<i>Techn. 2010</i>	180 872	402	1 515	98	6 427	572 526	1 081	0

<i>Base 100 Techn. 94</i>	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
<i>Techn. 1994</i>	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<i>Techn. 2000</i>	99.27	65.21	64.22	123.00	44.32	104.74	46.69	33.96
<i>Techn. 2010</i>	98.29	62.22	42.04	70.00	15.32	106.43	17.75	0.00

4.2. Effets du renouvellement technologique sur les émissions sonores

Compte tenu de l'extrême incertitude de nos informations les niveaux d'émissions sonores à venir des automobiles au cours des 15 prochaines années, il était difficile d'établir des projections basées sur des hypothèses "raisonnables" d'évolutions technologiques. Il était donc hors de question de reprendre la logique de la méthode consistant à mesurer l'impact des progrès en la matière en construisant deux scénarios d'évolution technologique, l'un pour 2000, l'autre pour 2010, à les appliquer successivement sur une situation fixée, avec matrice et réseau constant, puis à vérifier la permanence des résultats sur les trois dates 1994, 2000 et 2010 pour éviter le plus possible une confusion avec d'éventuels effets de période.

Nous avons dès lors préféré rester campés sur la seconde méthode parfois utilisée, consistant à s'interroger sur les progrès technologiques qui seraient nécessaires (quelle que soit la technologie mise en oeuvre) pour réaliser un objectif fixé *a priori*.

Deux types d'améliorations technologiques ont été envisagés, correspondant plus ou moins aux progrès en matière d'émissions intrinsèques des véhicules, sensibles à vitesses réduites, et à la réduction du bruit généré par le contact entre pneumatiques chaussée, très élevé à vitesses élevées. Nous avons en fait affecté les niveaux de bruit des véhicules de manière différente selon la vitesse moyenne du trafic établie sur une arc donné : en dessous de 53 km/h, nous avons affecté de manière uniforme la baisse de niveau sonore envisagée pour le scénario ; au delà de 53 km/h, une baisse du niveau sonore a été fixée pour une vitesse de 100 km/h puis nous avons réajusté la courbe établie entre 53 et 130 km/h de telle sorte qu'il n'y ait pas de saut de valeur à 53 km/h et qu'elle passe au point choisi pour 100 km/h. Sur ce principe, cinq scénarios ont été bâtis progressivement, qui permettent d'éclairer les résultats de la solution finale répondant à l'objectif retenu :

- tout d'abord, une hypothèse de stabilité des émissions sonores unitaires entre 1994 et 2010 a servi de scénario de référence .
- une seconde simulation a été faite en supposant une baisse de 1 dB à faible vitesse et de 3 dB à 100 km/h ;
- nous avons ensuite testé l'impact d'une amélioration plus importante au niveau des vitesses élevées (-4 dB à 100 km/h), sans changement à vitesses urbaines (-1 dB) ;
- un scénario symétrique a été ensuite envisagé avec -2 dB pour $v < 53$ km/h et -3 dB pour $v = 100$ km/h ; nous verrons que c'est ce scénario qui remplit l'objectif ;
- enfin un scénario extrême (par rapport aux autres simulations simulées) a été envisagé, avec une baisse de 2 dB à moins de 53 km/h et -6 dB à 100 km/h.

La définition des courbes auxquelles ces hypothèses conduisent figurent ci-dessous :

Tableau 29 : Les hypothèses d'évolution des caractéristiques d'émissions sonores pour 2010

Nota : les précisions de chaque sous-tableau indiquant (-i,-jdB) sont à traduire par -idB(A) à vitesse faible ($\leq 43,5$ km/h en circulation fluide, $\leq 53,0$ km/h en circulation pulsée), -jdB(A) à 100 km/h par rapport au scénario de référence (Cf ci-dessous). Entre

43,5 (ou 53,0) et 100 km/h la pente de la droite a été réajustée pour permettre de retrouver l'hypothèse de -jdB.

Hypothèse 1 de référence

en situation de circulation fluide

Vitesse (km/h)	Coef. de pente	Constante
<20	0,0	29,4
[20,0 ; 43,5[	0,0	29,4
≥43,5	21,1	-5,2

en situation de circulation pulsée

Vitesse (km/h)	Coef. de pente	Constante
<20	0,0	34,0
[20,0 ; 40,0[	-9,3	46,1
[40,0 ; 53,0[	0,0	31,2
≥53,0	21,1	-5,2

Hypothèse 2 : améliorations techniques (-1, -3 dB)

en situation de circulation fluide

Vitesse (km/h)	Coef. de pente	Constante
<20	0,0	28,4
[20,0 ; 43,5[	0,0	28,4
≥43,5	23,8	-10,6

en situation de circulation pulsée

Vitesse (km/h)	Coef. de pente	Constante
<20	0,0	33,0
[20,0 ; 40,0[	-9,3	45,1
[40,0 ; 53,0[	0,0	30,2
≥53,0	24,7	-12,3

Hypothèse 3 : améliorations techniques (-1, -4 dB)

en situation de circulation fluide

Vitesse (km/h)	Coef. de pente	Constante
<20	0,0	28,4
[20,0 ; 43,5[	0,0	28,4
≥43,5	21,0	-6,0

en situation de circulation pulsée

Vitesse (km/h)	Coef. de pente	Constante
<20	0,0	33,0
[20,0 ; 40,0[	-9,3	45,1
[40,0 ; 53,0[	0,0	30,2
≥53,0	21,0	-6,0

Hypothèse 4 : améliorations techniques (-2, -3 dB)

en situation de circulation fluide

Vitesse (km/h)	Coef. de pente	Constante
<20	0,0	27,4
[20,0 ; 43,5[	0,0	27,4
≥43,5	26,6	-16,1

en situation de circulation pulsée

Vitesse (km/h)	Coef. de pente	Constante
<20	0,0	32,0
[20,0 ; 40,0[	-9,3	44,1
[40,0 ; 53,0[	0,0	29,2
≥53,0	28,3	-19,6

Hypothèse 5 : améliorations techniques (-2, -6 dB)*en situation de circulation fluide*

Vitesse (km/h)	Coef. de pente	Constante
<20	0,0	27,4
[20,0 ; 43,5[	0,0	27,4
≥43,5	18,3	-2,5

en situation de circulation pulsée

Vitesse (km/h)	Coef. de pente	Constante
<20	0,0	32,0
[20,0 ; 40,0[	-9,3	44,1
[40,0 ; 53,0[	0,0	29,2
≥53,0	17,4	-0,8

Compte tenu des hypothèses d'évolution de la mobilité automobile entre 1994 et 2010 sur l'agglomération lyonnaise, les résultats obtenus en matière d'émissions sonores liées au trafic des véhicules légers sont alors les suivants :

Tableau 30 : Evolution des émissions sonores entre 1994 et 2010 sans amélioration des émissions unitaires (hypothèses de référence)

<i>Km de voirie exposés à un niveau sonore fixé</i>	<i>En valeurs relatives</i>	
	1994	2010
<i>L<50</i>	32.5	10.1
<i>50≤L<55</i>	55.1	41.5
<i>55≤L<60</i>	299.6	228.2
<i>60≤L<65</i>	452.7	573.6
<i>65≤L<70</i>	174.0	261.0
<i>70≤L<75</i>	108.6	144.0
<i>L≥75</i>	0.0	0.0
<i>Total</i>	1 122	1 258

Tableau 31 : évolution des émissions sonores entre 1990 et 2010 avec -1 à vitesses lentes et -3 dB à 100 km/h

<i>Km de voirie exposés à un niveau sonore fixé</i>	<i>En valeurs relatives</i>	
	1994	2010
<i>L<50</i>	32.5	10.7
<i>50≤L<55</i>	55.1	70.6
<i>55≤L<60</i>	299.6	286.6
<i>60≤L<65</i>	452.7	554.1
<i>65≤L<70</i>	174.0	223.7
<i>70≤L<75</i>	108.6	112.5
<i>L≥75</i>	0.0	0.0
<i>Total</i>	1 122	1 258

Tableau 32 : évolution des émissions sonores entre 1990 et 2010 avec -1 à vitesses lentes et -4 dB à 100 km/h

<i>Km de voirie exposés à un niveau sonore fixé</i>			<i>En valeurs relatives</i>	
	<i>1994</i>	<i>2010</i>	<i>1994</i>	<i>2010</i>
<i>L<50</i>	32.5	10.7	0.03	0.01
<i>50≤L<55</i>	55.1	70.6	0.05	0.06
<i>55≤L<60</i>	299.6	295.1	0.27	0.26
<i>60≤L<65</i>	452.7	550.7	0.40	0.48
<i>65≤L<70</i>	174.0	276.6	0.15	0.24
<i>70≤L<75</i>	108.6	54.4	0.10	0.05
<i>L≥75</i>	0.0	0.0	0.00	0.00
<i>Total</i>	<i>1 122</i>	<i>1 258</i>	<i>1,00</i>	<i>1,00</i>

Tableau 33 : évolution des émissions sonores entre 1990 et 2010 avec -2 à vitesses lentes et -3 dB à 100 km/h

<i>Km de voirie exposés à un niveau sonore fixé</i>			<i>En valeurs relatives</i>	
	<i>1994</i>	<i>2010</i>	<i>1994</i>	<i>2010</i>
<i>L<50</i>	32.5	13.6	0.03	0.01
<i>50≤L<55</i>	55.1	100.2	0.05	0.09
<i>55≤L<60</i>	299.6	360.4	0.27	0.31
<i>60≤L<65</i>	452.7	501.1	0.40	0.43
<i>65≤L<70</i>	174.0	185.2	0.15	0.16
<i>70≤L<75</i>	108.6	97.8	0.10	0.08
<i>L≥75</i>	0.0	0.0	0.00	0.00
<i>Total</i>	<i>1 122</i>	<i>1 258</i>	<i>1,00</i>	<i>1,00</i>

Tableau 34 : évolution des émissions sonores entre 1990 et 2010 avec -2 à vitesses lentes et -6 dB à 100 km/h

<i>Km de voirie exposés à un niveau sonore fixé</i>			<i>En valeurs relatives</i>	
	<i>1994</i>	<i>2010</i>	<i>1994</i>	<i>2010</i>
<i>L<50</i>	32.5	15.7	0.03	0.01
<i>50≤L<55</i>	55.1	109.1	0.05	0.09
<i>55≤L<60</i>	299.6	378.3	0.27	0.33
<i>60≤L<65</i>	452.7	474.9	0.40	0.41
<i>65≤L<70</i>	174.0	264.4	0.15	0.23
<i>70≤L<75</i>	108.6	16.1	0.10	0.01
<i>L≥75</i>	0.0	0.0	0.00	0.00
<i>Total</i>	<i>1 122</i>	<i>1 258</i>	<i>1,00</i>	<i>1,00</i>

5. Evolutions en nombre et en structure des déplacements automobile et impact sur les émissions polluantes et sonores du trafic routier

5.1. Effets de l'évolution du nombre et de la structure des déplacements sur les émissions de polluants atmosphériques

Tableau 35 : Effets de l'évolution du nombre et de la structure des déplacements sur les émissions de polluants atmosphériques, technologie et réseau de 1994

<i>en VA (Kg)</i>	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
<i>Mat. 1994</i>	125 991	443	2 608	98	28 255	369 461	4 104	8
<i>Mat. 2000</i>	166 960	586	3 093	128	39 077	486 090	5 774	11
<i>Mat. 2010</i>	200 157	701	3 351	152	48 331	579 602	7 160	13

<i>Base 100 Mat. 94</i>	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
<i>Mat. 1994</i>	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<i>Mat. 2000</i>	132.52	132.32	118.59	129.97	138.30	131.57	140.70	132.82
<i>Mat. 2010</i>	158.87	158.36	128.48	154.75	171.06	156.88	174.48	159.63

Tableau 36 : Effets de l'évolution du nombre et de la structure des déplacements sur les émissions de polluants atmosphériques, technologie et réseau de 2000

<i>en VA (Kg)</i>	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
<i>Mat. 1994</i>	125 731	289	1 715	133	12 343	389 205	1 918	3
<i>Mat. 2000</i>	150 213	346	1 952	156	15 168	463 341	2 389	3
<i>Mat. 2010</i>	191 358	442	2 279	197	20 163	586 836	3 217	4

<i>Base 100 Mat. 94</i>	<i>Energie</i>	<i>SO2</i>	<i>NOx</i>	<i>Poussière</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>Hydrocarbure</i>	<i>Plomb</i>
<i>Mat. 1994</i>	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<i>Mat. 2000</i>	119.47	119.61	113.83	116.95	122.89	119.05	124.56	119.72
<i>Mat. 2010</i>	152.20	152.73	132.91	147.81	163.35	150.78	167.75	153.14

Tableau 37 : Effets de l'évolution du nombre et de la structure des déplacements sur les émissions de polluants atmosphériques, technologie et réseau de 2010

en VA (Kg)	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
Mat. 1994	134 659	299	1 337	167	4 541	427 882	856	0
Mat. 2000	150 046	333	1 468	185	5 111	476 303	975	0
Mat. 2010	180 872	402	1 713	222	6 327	572 526	1 236	0

Base 100 Mat. 94	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
Mat. 1994	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	-
Mat. 2000	111.43	111.47	109.80	110.56	112.54	111.32	113.91	-
Mat. 2010	134.32	134.53	128.13	132.69	139.32	133.80	144.35	-

5.2. Effets de l'évolution du nombre et de la structure des déplacements sur les émissions sonores

Tableau 38 : Effets sur les émissions sonores liés aux évolutions des déplacements automobile, réseau constant de 1994

Km de voirie exposés à un niveau sonore fixé	Données en valeurs relatives		
	Mat. 1994	Mat. 2000	Mat. 2010
<i>L</i> < 50	32.5	18.6	10.7
50 ≤ <i>L</i> < 55	55.1	30.9	16.1
55 ≤ <i>L</i> < 60	299.6	195.6	138.8
60 ≤ <i>L</i> < 65	452.7	512.6	506.8
65 ≤ <i>L</i> < 70	174.0	246.3	340.2
70 ≤ <i>L</i> < 75	108.6	119.9	109.8
<i>L</i> ≥ 75	0.0	0.0	1.4
Total	1 122	1 124	1 124

Tableau 39 : Effets sur les émissions sonores liés aux évolutions des déplacements automobile, réseau constant de 2000

	<i>Km de voirie exposés à un niveau sonore fixé</i>			<i>Données en valeurs relatives</i>		
	<i>Mat. 1994</i>	<i>Mat. 2000</i>	<i>Mat. 2010</i>	<i>Mat. 1994</i>	<i>Mat. 2000</i>	<i>Mat. 2010</i>
<i>L < 50</i>	27.4	20.9	8.5	0.02	0.02	0.01
<i>50 ≤ L < 55</i>	79.0	59.5	37.3	0.07	0.05	0.03
<i>55 ≤ L < 60</i>	322.4	256.4	160.4	0.28	0.22	0.14
<i>60 ≤ L < 65</i>	464.0	496.1	526.0	0.40	0.43	0.45
<i>65 ≤ L < 70</i>	141.3	202.1	311.9	0.12	0.17	0.27
<i>70 ≤ L < 75</i>	120.9	121.4	112.8	0.10	0.10	0.10
<i>L ≥ 75</i>	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00
<i>Total</i>	<i>1 155</i>	<i>1 156</i>	<i>1 157</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>

Tableau 40 : Effets sur les émissions sonores liés aux évolutions des déplacements automobile, réseau constant de 2010

	<i>Km de voirie exposés à un niveau sonore fixé</i>			<i>Données en valeurs relatives</i>		
	<i>Mat. 1994</i>	<i>Mat. 2000</i>	<i>Mat. 2010</i>	<i>Mat. 1994</i>	<i>Mat. 2000</i>	<i>Mat. 2010</i>
<i>L < 50</i>	20.5	12.8	10.1	0.02	0.01	0.01
<i>50 ≤ L < 55</i>	90.7	68.4	41.5	0.08	0.06	0.04
<i>55 ≤ L < 60</i>	330.8	293.6	228.2	0.29	0.25	0.20
<i>60 ≤ L < 65</i>	484.8	530.5	573.6	0.42	0.46	0.50
<i>65 ≤ L < 70</i>	189.7	211.2	261.0	0.16	0.18	0.23
<i>70 ≤ L < 75</i>	140.6	141.4	144.0	0.12	0.12	0.12
<i>L ≥ 75</i>	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00
<i>Total</i>	<i>1 257</i>	<i>1 258</i>	<i>1 258</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>

6. Evolutions entre 1994, 2000 et 2010, toutes hypothèses confondues

6.1. Le poids des différents facteurs explicatifs de l'évolution du trafic entre 1994 et 2010

L'évolution globale du trafic peut être décomposée suivant l'évolution de 4 grands paramètres qui sont la hausse du nombre de déplacements et la variation de leur longueur moyenne, sachant que cette dernière dépend des évolutions du réseau, de l'état de la circulation et de la structure des origines destinations. Le tableau ci-dessous, présenté au cours du chapitre 5 (§3.2.1. a)), permet de mieux se rendre compte de l'importance relative de chacun de ces paramètres dans l'évolution du trafic total :

Tableau 41 : Le poids des différents facteurs explicatifs de l'évolution du trafic entre 1994 et 2010

	Nombre de déplacements	Distance moyenne par déplacement			Total
		Réseau	Vitesse	O-D	
de 1994 à 2000	117,0	95,6	98,7	105,0	116,0
de 2000 à 2010	113,8	104,8	99,5	101,0	119,8
de 1994 à 2010	133,2	100,2	98,2	106,1	139,1

Ce tableau souligne l'importance essentielle de la hausse du nombre de déplacements parmi ces 4 facteurs pour expliquer les variations de trafic entre 1994, 2000 et 2010. Les autres paramètres ont une importance moindre et beaucoup plus variable : l'évolution du réseau a un impact significatif à chaque période mais ses effets s'annulent d'une période sur l'autre ; l'étalement urbain, tel qu'il est pris en compte dans les projections retenues, joue un rôle non négligeable pour l'horizon 2000 ; par contre les variations des conditions de circulation, décrites par la vitesse moyenne des véhicules sur le réseau, sont trop faibles pour affecter vraiment la distance moyenne parcourue. Notons cependant que le calcul de la valeur de ces deux derniers paramètres est approximative - même si les chiffres en jeu restent de toute façon beaucoup plus faibles que ceux de l'évolution absolue du nombre de déplacements.

Il a été construit sur la base des hypothèses suivantes :

Tableau 42 : Evolution des déplacements automobile : leur nombre, leur trafic et leur vitesse

	nb dépts	évolution	trafics	évolution	vitesse	évolution
1994	171 287		1 639 512		34,4	
2000	200 413	+17,0%	1 902 554	+16,0%	29,9	-15,2%
2010	228 135	+13,8%	2 279 786	+19,8%	28,3	-5,7%

Evolution des trafics du fait de l'évolution du réseau :

Matrice des déplacements de 2000 affectée sur le réseau de 1994 : 1 990 186 veh.km ; *affectée sur le réseau de 2000* : 1 902 512 veh.km. On obtient donc une baisse de 4,40% des distances parcourues, attribuée à l'évolution du réseau entre 1994 et 2000.

Matrice des déplacements de 2010 affectée sur le réseau de 2000 : 2 175 038 veh.km ; *affectée sur le réseau de 2010* : 2 279 786 veh.km. On obtient donc une hausse de 4,82% des distances parcourues, attribuée à l'évolution du réseau entre 2000 et 2010.

Evolution des trafics du fait de l'évolution des vitesses moyennes :

Lors du chapitre 4, nous avons calculé une élasticité de la longueur moyenne d'un déplacement à la vitesse moyenne sur le réseau de l'ordre de 0,241 (soit, entre les hypothèses extrême de nombre de déplacements, une baisse de 62 à 20 km/h des vitesses entraînant une baisse de 9,8 à 8,2 km des distances). Pour rester plus proche des conditions de circulation de l'heure de pointe, nous avons recalculé ici une élasticité à partir des simulations n°5 et 8 correspondant à la matrice originelle multipliée par 0,9 et 1,2 : on obtient une baisse de 36 à 23 km/h des vitesses entraînant une baisse de 8,7 à 8,4 km des distances, soit une élasticité de $[(8.4-8.7)/8.7]/[(23-36)/36]=0,095$.

La vitesse moyenne baisse de 15,2% entre 1994 et 2000, de 5,7% entre 2000 et 2010. Si l'on suppose correcte l'élasticité ci-dessus, la baisse de la longueur des déplacements induite par les réaffectations d'itinéraires est alors de 0,83% pour 2000 et de 0,68% pour 2010.

Soulignons que cette manière de procéder reste très sommaire puisqu'elle applique une élasticité calculée dans un contexte précis à une situation différente, avec un réseau et des origines - destinations modifiées, et assimile l'évolution de vitesse calculée entre deux périodes à une évolution liée à une augmentation artificielle du nombre de déplacements, toutes autres choses égales par ailleurs. Le test d'une variation de $\pm 50\%$ de cette élasticité ne modifie cependant que très peu les résultats globaux qui nous intéressent : -0,83% $\pm 0,63$ pour 2000 ; -0,51% $\pm 0,26$ pour 2010. L'impact de la variation des vitesses sur l'évolution du trafic total, sans être négligeable, reste le moins important par rapport aux 3 autres recensés.

Evolution des trafics liée à l'évolution des distances entre origines et destinations des déplacements :

Ce dernier résultat dépend complètement des précédents puisqu'il est calculé de telle façon que sa valeur permette de retrouver l'évolution générale du trafic, compte tenu des indices déjà établis. Il est notamment complètement dépendant des conditions précaires de calcul de l'impact des vitesses sur le trafic. On obtient cependant :

$$- \text{Pour 2000} : 1,160/(1,170*0,956*0,987) = 1,050$$

$$- \text{Pour 2010} : 1,198/(1,138*1,048*0,995) = 1,010$$

6.2. Evolution des émissions de polluants atmosphériques entre 1994 et 2010, toutes hypothèses confondues

Tableau 43 : Evolution des émissions polluantes dans le cadre d'une hypothèse "basse" de progression de la mobilité automobile (matrice 2000 : -5% ; matrice 2010 : -10%)

en VA (Kg)	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
1994	125 991	443	2 608	98	28 255	369 461	4 104	8
2000	139 919	322	1 817	132	14 118	432 207	2 161	3
2010	162 925	362	1 400	89	5 692	516 662	946	0

Base 100 1994	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
1994	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2000	111.05	72.81	69.67	133.99	49.97	116.98	52.67	37.99
2010	129.31	81.70	53.67	90.17	20.15	139.84	23.05	0.00

Tableau 44 : Evolution des émissions polluantes dans le cadre des hypothèses de référence de progression de la mobilité automobile

en VA (Kg)	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
1994	125 991	443	2 608	98	28 255	369 461	4 104	8
2000	150 213	346	1 910	141	15 332	463 341	2 356	3
2010	180 872	402	1 515	98	6 427	572 526	1 081	0

Base 100 1994	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
1994	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2000	119.23	78.22	73.24	144.06	54.26	125.41	57.42	40.83
2010	143.56	90.78	58.07	100.01	22.75	154.96	26.33	0.00

Tableau 45 : Evolution des émissions polluantes dans le cadre d'une hypothèse "haute" de progression de la mobilité automobile (matrice 2000 : +5% ; matrice 2010 : +10%)

en VA (Kg)	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
1994	125 991	443	2 608	98	28 255	369 461	4 104	8
2000	164 344	379	2 022	154	17 028	505 840	2 622	4
2010	204 880	456	1 653	112	7 467	646 793	1 266	0

Base 100 1994	Energie	SO2	NOx	Poussière	CO	CO2	Hydrocarbure	Plomb
1994	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2000	130.44	85.66	77.52	157.02	60.27	136.91	63.90	44.75
2010	162.61	102.94	63.36	113.98	26.43	175.06	30.86	0.00

BIBLIOGRAPHIE

"Government Announces Partnership For Automated Highway System", *ITS Review*, University of California, Vol. 18, n°1, novembre 1994. pp. 4-5.

ALEXANDRE Ariel, AVEROUS Christian, "Transport et environnement : comment les concilier ?", *Transports Urbains* n°63, avril-juin 1988. pp.31-37.

ALLEGRE Claude, *Ecologie des villes, écologie des champs*. Paris : Fayard, 1993. 233 p.

ALPHANDERY Pierre, BITOUN Pierre, DUPONT Yves, *L'équivoque écologique*. Paris : La Découverte, Coll. essais, 1991. 279 p.

ARABEYRE Agnès, BOUF Dominique, CHAUSSE Alain, CROZET Yves (sous la direction de), NICOLAS Jean-Pierre, PEREZ Marc, TOILIER Florence, *La mobilité en milieu urbain : de la préférence pour la congestion à la préférence pour l'environnement ?* Rapport pour le compte de l'ADEME et du Ministère de l'Environnement, LET, Lyon, juin 1994, 304 p.

ARABEYRE Agnès, CROZET Yves (sous la direction de), GUIHERY Laurent, NICOLAS Jean-Pierre, PEREZ Marc, SANTI Gérard, *Les effets externes en milieu urbain : de la valorisation à l'internalisation*. Recherche pour le compte de la SNCF, Direction de la stratégie et du plan. Lyon : LET, Novembre 1993. 171 p.

ASIF Faiz et alii, *Air pollution from motor vehicles*. Washington : World Bank & UNEP. Avril 1992.

AUZANNET Pascal, BELLALOUM Adeline, "Le coût des transports pour la collectivité", *Revue générale des Chemins de Fer*, mars 1993. pp. 15-21.

BAR Pascal, DELANNE Yves, *Réduire le bruit pneumatiques-chaussées*. Paris : Presses de l'ENPC, 1993. 266 p.

BARBIER SAINT HILAIRE F., *Manuel de référence, DAVIS-PLUS Equilibre et Tribut version 2.3*. Arcueil : INRETS, Centre Informatique Recherche (CIR), septembre 1992. Non paginé.

BARBIER SAINT HILAIRE F., *Réflexion sur la modélisation statique du trafic*. Arcueil : INRETS, Centre Informatique Recherche (CIR), 1992. 9 p. + ann.

BARDE Jean-Philippe, *Economie et politique de l'environnement*. Paris : P.U.F., 2^{ème} édition, 1992. 383 p.

BARDE Jean-Philippe, GERELLI Emilio, *Economie et politique de l'environnement*. Paris : PUF, 1977. 210 p.

BARRE Raymond, *Economie Politique*. Paris : PUF, Thémis, Coll. Sciences Economiques, 1987. 888 p.

BAUMOL Williams J., OATES Wallace E., *The theory of environmental policy*. Grande-Bretagne, Cambridge : Cambridge University Press, 2^{de} ed., 1988 (1^{ère} ed., 1975). 299 p.

BENARD Jean, *Economie Publique*. Paris : Economica, 1985. 414 p.

BERNARD Pierre-André, "Quelles énergies nouvelles pour l'automobile", *TEC* n°119, juillet-août 1993. pp. 34-41.

BIEBER Alain, MASSOT Marie-Hélène, ORFEUIL Jean-Pierre, *Questions vives pour une prospective de la mobilité quotidienne*. Arcueil : Synthèse INRETS n°19, janvier 1993. 76 p.

BLAUG Mark, *La pensée économique. Origine et développement*. Paris : Economica, 4^{ème} éd., 1986. 891 p.

BONNAFOUS Alain, "La symbiose entre transport et environnement dans la Maison Européenne", *Conférence de l'ESTI : Courants de trafic de marchandises en Europe*, Nürnberg, 2-3 avril 1992. 9 p.

BONNAFOUS Alain, "Quatre questions pour un débat", pp. 324-329 in RAUX Charles, LEE-GOSSELIN Martin, *La mobilité urbaine : de la paralysie au péage ?* Lyon : Programme Rhône-Alpes Recherches en Sciences Humaines, 1991. 363 p.

BONNAFOUS Alain, "Quelle stratégie pour les transports ?", *Les Annales des Mines*, juillet-août 1994. pp. 11-13.

BONNAFOUS Alain, "Structures démographiques et comportements sociaux", pp. 21-77 in CEMT : *La croissance des transports en question*. Paris : Publications de l'OCDE, 1993. 700 p.

BONNAFOUS Alain, "Transport et environnement. Comment valoriser les effets externes ?", *Economie et Statistique* n°258-259, octobre-novembre 1992. pp 121-128.

BONNAFOUS Alain, PLASSARD François, VULIN Bénédicte (sous la direction de), *Circuler demain*. La Tour d'Aigue : Editions de l'Aube / DATAR, 1993. 188 p.

BONNAFOUS Alain, PUEL Henri, *Physionomies de la ville*. Paris : Economie et Humanisme, Les Editions Ouvrières, 1983. 168 p.

BOUF Dominique, CROZET Yves, "Péage urbain versus congestion : l'économiste et les usagers", pp. 129-141 in RAUX Charles, LEE-GOSSELIN Martin, *La mobilité urbaine : de la paralysie au péage ?* Lyon : Programme Rhône-Alpes Recherches en Sciences Humaines, 1991. 363 p.

BOVY Philippe, "Impulsions de l'environnement sur le développement des transports publics suisses", *Congrès annuel du GART*, Lyon, 9-11 décembre 1992. 17 p.

BOYCE David E., KIM Tschangho John, "The role of congestion of transportation networks in urban location and travel choices", *Transportation*, Vol. 14, n°1, 1987. pp. 53-62.

BROSSIER Christian, AYOUN Philippe, LEUXE André, "Le débat sur la tarification des infrastructures est-il en train de se renouveler ?" *Transports* n°361, septembre-octobre 1993. pp. 301-306.

BURNIAUX Jean-Marc, OLIVERA-MARTINS Joaquim, "Effet de serre et relations Nord-Sud", *Economie et Statistique* n°258-259, octobre-novembre 1992, pp. 55-68.

BUSSIERE René, *Modèle urbain de localisation résidentielle*. Paris : Centre de Recherche d'Urbanisme. 1972. 163 p.

CADORET A. (textes réunis par), *Protection de la nature : histoire et idéologie - De la nature à l'environnement*. Paris : L'Harmattan, 1985. 245 p.

CATIN Maurice, *Effets externes : marché et systèmes de décision collective*. Paris : Cujas, 1985. 455 p.

CEMT, "Evaluer les investissements en infrastructures de transport", *Table ronde n°86*. Paris : Editions de l'OCDE, 1992. 114 p.

CEMT, OCDE, *Transports urbains et développement durable*. Paris : Publications de l'OCDE, 1995. 268 p.

CETE de Lyon, *Une réflexion multimodale sur la demande automobile*. Lyon : CETE de Lyon, note de travail, avril 1992. 8 p.

CETUR, *10 ans de mobilité urbaine - Les années 80*. Bagneux : CETUR, Novembre 1990. 86 p.

CETUR, *Guide du bruit des transports terrestres - Prévision des niveaux sonores*. Bagneux : Ministère de l'environnement et du cadre de vie, Ministère des transports (Direction Générale des Transports Intérieurs), novembre 1980. 303 p.

CETUR-SOFRETU, *Analyse des coûts de déplacements : élaboration d'une méthodologie dans le cadre d'un Compte Transports de Voyageurs*. Février 1994. 77 p. + ann.

COASE Ronald, "Le problème du coût social" pp. 129-168 in DORFMAN Robert, DORFMAN Nancy, *Economie de l'environnement*. Paris : Calmann-Lévy, 1975. 316 p.

Colloque de Cerisy, *Métamorphoses de la ville*. Paris : Economica, 1987. 413 p.

Commissariat Général du Plan (Groupe présidé par Alain BONNAFOUS), *Transports : pour une cohérence stratégique*. Paris : CGP, septembre 1993. 189 p.

Commissariat Général du Plan (Groupe présidé par Marcel BOITEUX), *Transports : pour un meilleur choix des investissements*. Paris : La Documentation Française, novembre 1994. 131 p.

Commissariat Général du Plan (sous la direction de Christian STOFFAES), *L'économie face à l'écologie*. Paris : La Découverte / La Documentation Française, 1993. 275 p.

Commission of the European Communities, *CORINAIR working group on emission factors for calculating 1990 emissions from road traffic. Volume 1 : Methodology and emissions factors*. Bruxelles-Luxembourg : ECSC-EEC-EAEC, 1993. 115 p.

COMMONER Barry, "Les coûts de la croissance sur l'environnement" pp. 215-246 in DORFMAN & DORFMAN, *Economie de l'environnement*. Paris : Calmann-Lévy, 1975. 316 p.

COMMONER Barry, *L'encerclement, Problèmes de survie en milieu terrestre*. Paris : Editions du Seuil, Coll. Science ouverte, 1972. 301 p.

Communauté Urbaine de Lyon, Conseil Général du Rhône, DDE 69, *Schéma de grandes voiries de l'agglomération lyonnaise - document technique de synthèse*. Lyon : DDE du Rhône, septembre 1993. 99 p.

Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, *Particules en suspension dans l'atmosphère : effets sur la santé et proposition pour une révision des valeurs limites*. Paris : Ministère des Affaires Sociales, de la Santé et de la Ville, juillet 1993. 82 p.

CROZET Yves, *Analyse économique de l'Etat*. Paris : Armand Colin, Coll. Cursus, 1991. 192 p.

CUMMINGS RG, BROOKSHIRE DS, SCHULTZE WD (eds), *An Assessment of the Contingent Valuation Method*. New Jersey : Rowman & Allanheld, 1986.

DARBERA Richard, "Faire payer les embouteillages ?", *Transports* n°315, mai 1986, pp. 265-273.

DDE du Rhône, CETE de Lyon, *Enquête cordon de Lyon, les problèmes quotidiens de circulation : transit et échange avec l'extérieur de l'agglomération*. Lyon, 1992. 33 p.

de JOUVENEL Bertrand, *La civilisation de puissance*. Paris : Fayard, 1976. 206 p.

DE LA BARRA Tomas, *Integrated land use and transport modelling : decision chains and hierarchies*. Cambridge : Cambridge University Press, 1989. XIV + 182 p.

de RHAM Casimir, DESPOT Fabienne, *Polydrom, offre et demande de transport intermodal ; Polytox, émissions et immissions de polluants atmosphériques*. Vevey, Suisse : Société d'Etude de l'Environnement, 1994. non paginé.

DEBOULET Agnès, "A vendre appartement proximité gare", *Transport Public*, mai 1993. pp. 22-27.

DECOUFLE André Clément, "Prévision et prospective" in DECOUFLE André Clément (sous la direction de), *Traité élémentaire de prévision et de prospective*. Paris : PUF, 1978. 432 p. pp. 21-41.

DELACHE, Xavier, GASTALDO, Sylvie, "Les instruments des politiques d'environnement", *Economie et Statistique* n°258-259, octobre-novembre 1992. pp. 27-34.

DELEAGE Jean-Paul, *Histoire de l'écologie. Une science de l'homme et de la nature*. Paris : La Découverte, 1992. 330 p.

DELSEY Jean, DOBIAS Georges, " Les transports routiers et l'effet de serre". *Recherche Transports Sécurité* n°32, décembre 1991. pp. 101-109.

Déplacements n°11, 1992, thème : "Bruit de contact pneumatiques/chaussées".

DERYCKE Pierre-Henri, *Economie et planification urbaine*, vol. II, *Théories et modèles*. Paris : PUF, 1982. 408 p.

DERYCKE Pierre-Henri, GANNON Frédéric, ROTILLON Gilles, DECAESTECKER Jean-Paul, *Concentration urbaine et effets de congestion - L'exemple des transports et de*

l'eau. Paris : CERREVE, rapport de recherche pour le compte de la DATAR, août 1990. 253 p.

DES ROSIERS François, "Centralité urbaine et valeurs foncières : les enjeux d'une tarification des déplacements", pp. 89-100 in RAUX Charles, LEE-GOSSELIN Martin, *La mobilité urbaine : de la paralysie au péage ?* Lyon : Programme Rhône-Alpes Recherches en Sciences Humaines, 1991. 363 p.

DESPLANQUES Guy, "Activité féminine et vie familiale", *Economie et Statistique* n°261, janvier 1993. pp. 23-32.

DOBIAS G., *Les transports interrégionaux de personnes*. Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1989. 363 p.

DRON Dominique, COHEN de LARA Michel : *Pour une politique soutenable des transports*. Paris : La Documentation Française, collection des rapports officiels, septembre 1995. 327 p.

DUCHIER Didier, *Revue méthodologique des modèles interactifs de localisation des activités et de transport*. Mémoire de DEA d'économie des transports. Lyon : Université Lumière Lyon 2, Faculté de sciences économiques et de gestion, octobre 1991. 115 p.

DUPUY Gabriel, *Une technique de planification au service de l'automobile : les modèles de trafic urbain*. Paris : Copédith, document de travail, Action Concertée de Recherche Urbaine, 1975. 203 p.

DUPUY Gabriel, *L'auto et la ville*. Paris : Flammarion, Coll. Dominos, 1995. 125 p.

DURET Pierre, "Moteur 2-temps pour l'an 2000", *TEC* n°123, mars-avril 1994. pp. 38-44.

EIZNER Nicole, "Les représentations sociales de l'environnement en France, Allemagne et Italie" in Recueil des textes du colloque *Les fonctions sociales de la Nature*, Chantilly (Les Fontaines), 8-12 mars 1993. SO.R.I.S.TEC. (Groupe de Recherche Société et Risques Scientifiques et TECchniques). 19 p.

EUROPLAN, POLYEN, *analyse des émissions de pollution liées à l'énergie dans l'agglomération lyonnaise. Volumes I, II et III*. Etude pour le compte de la COURLY, la Commission des Communautés Européennes (DG VII) et Rhônalpénergie. Lyon, Mars 1992.

FAIVRE D'ARCIER Bruno, NICOLAS Jean-Pierre, *Attitudes et comportements des ménages face à la voiture électrique - premiers résultats d'une enquête interactive de préférences déclarées*. Bron : INRETS, recherche pour le compte de l'ADEME, janvier 1995. 105 p.

FAUCHEUX Sylvie, NOEL Jean-François, *Les menaces globales sur l'environnement*. Paris : La Découverte, Coll. Repères, 1990. 123 p.

FAVRE B., *Le bruit de trafic routier. Méthodes de prévision*. Arcueil : Synthèse INRETS n°8, 1987. 70 p.

- FERRY Luc, *Le nouvel ordre écologique. L'arbre, l'animal et l'homme*. Paris : Grasset, 1992. 274 p.
- FESTA Demetrio, NUZZOLO Agostino, "A system of models for the evaluation of traffic pollution in urban areas", *6^{ème} Conférence Mondiale sur la Recherche dans les Transports*, Lyon, France, 29 juin - 3 juillet 1992. 12 p.
- GALLEZ Caroline, *Modèles de projection à long terme de la structure du parc et du marché de l'automobile*. Paris : Université Paris I, Thèse de doctorat en Sciences Economiques, 1994. 333 p
- GARNIER Christian, "Ecologie urbaine ou environnement urbain ?", *Métropolis* n°100. pp. 52-61.
- GEFFRIN Yves, "Mobilité, diversité, inégalité" in ADEME, DRAST, INRETS : *Se déplacer au quotidien dans 30 ans*. Paris : La Documentation Française, 1995, 234 p. pp. 35-40.
- GEFFRIN Yves, "Péages urbains, doux rêves, dures réalité", pp. 341-347 in RAUX Charles, LEE-GOSSELIN Martin, *La mobilité urbaine : de la paralysie au péage ?* Lyon : Programme Rhône-Alpes Recherches en Sciences Humaines, 1991. 363 p.
- GIRAULT Maurice, BOUTON François, "Prévision de trafics marchandises à l'horizon 2010", *Synthèse OEST*, mars 1994. 6 p.
- GIRAULT Maurice, *La circulation poids-lourds - Analyse statistique et prévision à l'horizon 2010*. Paris : OEST, avril 1989. 38 p. + ann.
- GODARD Olivier, "Des marchés internationaux du droits à polluer pour le problème de l'effet de serre : de la recherche de l'efficacité aux enjeux de légitimité", *Politiques et management public*, Vol. 10, n°2, juin 1992. pp. 101-131.
- GODARD Olivier, "Des taxes sur le carbone pour la prévention du risque de changement climatique ? Instruments économiques et politiques publiques en univers controversé", *Revue politiques et management public*, Vol. 10, n°4, déc. 1992. pp. 1-26.
- GOODWIN P.B., "Comprendre la congestion", *Recherche Transports Sécurité* n°24, décembre 1989. pp. 23-28.
- GUERRIEN Bernard, *L'économie néoclassique*. Paris : La Découverte, Coll. Repères. 1989. 128 p.
- GUERRIEN Bernard, *La théorie néo-classique. Bilan et perspectives du modèle d'équilibre général*. Paris : Economica, 3^{ème} éd., 1989. 495 p.
- HANSON Lars, "Air pollution fees and taxes in Sweden". *Transport Research Board's 70th Annual Meeting*, Washington D.C, 13-17 janvier 1991.
- HANSON Lars, MARKHAM J., *Internalisation of external effets in transportation*. Project Report C6Z5 external effects, UIC-C6 strategic planning committee, février 1992. 111 p.

HASSEL Dieter, HICKMAN John, JOURMARD Robert, NEMERLIN Jean, *Modelling of emissions and consumption in urban areas*. Bron : INRETS, projet DRIVE V1053, juin 1992. 54 p.

HAUGER Anne, JOURMARD Robert, "Emissions de polluants du GPL". Colloque ONU-CEE, *Utilisation du gaz naturel comprimé (GNL), du gaz naturel liquéfié (GNC) et du gaz de pétrole liquéfié (GPL) comme carburant moteur*, Kiev, Ukraine, 23-27 septembre 1991. 11 p.

HILL F.L., "An interpretation of speed-flow-concentration relationship using catastrophe theory", *Transportation Research*, Vol. 21 A, n°3, mai 1987. pp. 191-201.

HIMANEN Veli, NIJKAMP Peter, PADJEN Juraj, "Environmental quality and transport policy in Europe", *Transportation Research-A*, Vol. 26A, n°2, 1992. pp. 147-157.

HONORE Georges, "Voiture électrique urbaine : un bilan social positif, mais une fiscalité inadaptée". *Note de synthèse OEST*, avril 1994. 4 p.

HOURCADE J.C., SALLES J.M., "Environnement : les difficultés d'un accord international", *Problèmes Economiques* n°2.328, 2 juin 1993. pp. 13-17.

JEANRENAUD Claude, SOGUEL Nils, GROSCLAUDE Pascal, STRITT Marc-Alain, *Coûts sociaux du trafic urbain - Une évaluation monétaire pour la ville de Neuchâtel*. Zurich : Rapport n°42 du PNR "Ville et transport" établi par l'IRER-Université de Neuchâtel, mars 1993. XVII + 97 p.

JOHNSON M. Bruce, "On the economics of road congestion", *Econometrica*, 32, 1964. pp. 1137-1150.

JOURMARD R., PATUREL L., VIDON R., GUITTON J.P., SABER A.I., COMBET E., *Emissions unitaires de polluants des véhicules légers*. Bron : Rapport INRETS n°116, 1990. 119 p.

JOURMARD Robert, ANDRE Michel, CRAUSER Jean-Pierre, BADIN François, PATUREL Laurent, *Méthodologie de mesure des émissions réelles du parc automobile*. Bron : Rapport INRETS n°31, 1987. 81 p.

JOURMARD Robert, JOST Peter, HICKMAN John, HASSEL Dieter, "Hot Passenger car emission as a function of instantaneous speed and acceleration", 3^{ème} colloque international *Transport et pollution de l'air*, Avignon, 6-10 juin 1994. 8 p.

JOURMARD Robert, LAMBERT Jacques, *Evolution des émissions de polluants par les transports en France de 1970 à 2010*. Bron : INRETS, rapport INRETS n°143, juillet 1991. 66 p.

JOURMARD Robert, VIDON Robert, PRUVOST Christophe, TASSEL Patrick, DE SOETE Gérard, "Evolution des émissions de polluants des voitures particulières lors du départ à froid", 3^{ème} colloque internationale *Transports et pollution de l'air*, Avignon, 6-10 juin 1994. Préactes, Bron : INRETS éd. pp. 161-168.

KIS Martine, "Dossier : Concevoir une politique du bruit dans la ville", *Le Courrier des Maires*, 4 février 1994. pp. 22-27.

KOLM Serge Christophe, *La théorie économique générale de l'encombrement*. Paris : Futuribles, Ed. SEDEIS, 1968. 82 p.

La Recherche, n°243, Vol. 23, mai 1992, thème : "L'effet de serre". pp. 515-674.

LAFFONT Jean-Jacques, *Effets externes et théorie économique*. Paris : Editions du CNRS, Coll. Monographies du séminaire d'économétrie, 1977, 200 p.

LAFFONT Jean-Jacques, *Fondements de l'Economie Publique. Vol. 1. Cours de théorie microéconomique*. Paris : Economica, Coll. Economie et Statistiques Avancées, 1988. 281 p.

LAGUEUX Maurice, "Externalités, marché et coûts de transaction" pp. 169-179 in *La méthodologie de l'économie théorique et appliquée aujourd'hui*. Actes du colloque annuel de l'Association Française de Science Economique, 17-18 septembre 1990. Paris : Nathan, 1990. 189 p.

LAMBERT Jacques, LAMURE Claude, *Impact des transports terrestres sur l'environnement - Méthodes d'évaluation et coûts sociaux*. Bron : Synthèse INRETS n°23, septembre 1993. 101 p.

LAMURE Claude, "Transport et environnement dans les grandes villes du monde", *TEC* n°123, mars-avril 1994. pp. 2-14.

LAMURE Claude, *Quelle automobile dans la ville ?* Paris : Presses de l'ENPC, 1995. 333 p.

LASSAVE Pierre, "L'embouteillage dans les médias", *Les Annales de la recherche urbaine* n°42, mars-avril 1989. pp. 98-103.

LE BRAS Hervé, *La planète au village*. La Tour d'Aigue : Editions de l'Aube / DATAR, 1993. 222 p.

Le Monde diplomatique série *Manière de voir* n°8, mai 1990, thème "La planète mise à sac". 98 p.

LE NIR Michel, ROUTHIER Jean-Louis, TABOURIN Eric, "Massification des flux et migrations alternantes. Application au bassin d'emploi de l'agglomération lyonnaise", *Sixth World Conference on Transport Research*, Lyon, France, 29 juin 3 juillet 1992. pp. 2 217-2 229 des actes du colloque, Vol. III. : *Transport Policies*. avril 1993. pp. 1 542-2 336.

LENOIR Yves, *La vérité sur l'effet de serre*. Paris : La Découverte, 1992. 172 p.

Les Annales des Mines série *Réalités Industrielles*, juillet-août 1992, thème "L'environnement, à quel prix ?". 160 p.

Les Cahiers du Génie Urbain, mars 1992, thème "Ville, transports et environnement". 67 p.

Les Cahiers Français n°250, mars-avril 1991, thème "Environnement et gestion de la planète". 132 p.

LEVY Raymond, *Les biocarburants*. Paris : rapport remis au Premier Ministre, février 1993. 17 p.

MACKENZIE James J., DOWER Roger C., CHEN Donald D.T., *The going rate : what it really costs to drive*. Washington : World Resources Institute, juin 1992. 32 p.

MADJARIAN A.G., "Le temps de l'écomobilité", *Transport Public* n°906, juillet-août 1992. pp. 22-25.

MADRE Jean-Loup, LAMBERT Thierry, *Prévisions à long terme du trafic automobile*. Paris : rapport CREDOC n°60, mai 1989. 106 p.

MALGAT Jean-Luc, *Energies nouvelles pour l'automobile : enjeux, réalités et perspectives*. Vaulx-en-Velin : Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Travail de Fin d'Etude, juin 1994. 100 p.

MARCHAND Olivier, "La population active commence à diminuer juste après l'an 2000", *Economie et Statistique* n°190, juillet-août 1986. pp. 41-54.

MARTIN Jean, MAYSTRE Lucien-Yves, *Santé et pollution de l'air*. Lausanne : Presses Polytechniques Romandes, Coll. Gérer l'environnement, 1988. 250 p.

MARTIN Olivier, *Opinions et usage des voies de circulation routière : le réseau routier et l'environnement*. Paris : rapport CREDOC, juillet 1991. 94 p. + ann.

MAUCH Samuel P., ROTHENGATTER Werner (sous la direction de), *External Effects of Transport*. Zürich-Karlsruhe : IWW, INFRAS AG, rapport pour le compte de l'UIC Paris, novembre 1994. xiii + S14 + 345 p.

MAURIN M., LAMBERT J., ALAUZET A., *Enquête Nationale sur le bruit des transports en France*. Bron : Rapport INRETS n°71, juillet 1988. 132 p.

MEADE J.E., "External Economies and Diseconomies in a Competitive Situation", *Economic Journal*, LXII, mars 1952, pp. 54-67.

MEADOWS D.L., MEADOWS D.H., BEHRENS D.H., NAILL R.F., *Dynamique de la croissance dans un monde fini*. Paris : Economica, 1977. 622 p.

MERLIN Pierre, "Prendre en compte des coûts sociaux dans les transports", *Transport Public*, juillet-août 1992. pp. 36-45

MILOT Julie, LEURENT Fabien, PAPON Francis, *DEGAGEMENT - Gestion spatiale temporelle et multimodale du trafic de voyageurs et de marchandises sur le corridor nord-sud français. Tâche T3 : Identification de la congestion*. Arcueil : INRETS, Rapport de tâche, 1995. 105 p.

MINVIELLE Erwann, "La mobilité des personnes en milieu urbain", *Note de Synthèse OEST*, juillet-août 1994. 6 p.

MORCHEOINE Alain, "Quelles perspectives pour la voiture propre ?", *TEC* n°111, mars-avril 1992. pp. 20-25.

MORCHEOINE Alain, "Transport et environnement : quels enjeux pour la ville ?", *Transports Publics*, mars 1993. pp. 30-32.

MORCHEOINE Alain, *Transport, énergie et environnement, quelques points de repères*. Note de travail, ADEME, septembre 1992. 12 p.

MORIN Edgar, propos recueillis par Jean-Marie Colombani, pp. 13-15 in "Les grands entretiens du Monde", tome 2, n° spécial de *Dossiers et Documents du Monde*, mai 1994.

NAVIN Francis, "Travel Time Models", *Sixth World Conference on Transports Research*, Lyon, France, 29 juin 3 juillet 1992. pp. 2 465-2 476 des actes du colloque, Vol. IV. : *Innovation technologique et gestion des réseaux*. avril 1993. pp. 2 337-3 158.

NESBITT K.A., KURANI K.S., DELUCHI M.A., "Home recharging and household electric vehicle market : a near term constraint analysis", *Annual Meeting of the Transportation Research Board*, janvier 1992. 33 p.

NEWMAN Peter W.G., KENWORTHY Jeffrey R., "The transport energy trade-off : fuel-efficient traffic versus fuel-efficient cities", *Transportation Research*, Vol. 22 A, n°3, mai 1988. pp. 163-174.

Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière, *Bilan annuel de la Sécurité routière, statistiques et commentaires, année 1991*. Paris : La Documentation Française, 1993. 183 p.

Observatoire Régional de Santé d'Ile de France, *Evaluation de l'impact de la pollution atmosphérique urbaine sur la santé en Ile de France - 1987-1992*. Novembre 1994. 104 p

OCDE, *Le Principe Pollueur-Payeur. Définition, analyse, mise en oeuvre*. Paris : Publications de l'OCDE, 1975. 123 p.

OCDE, *Incidence sur l'environnement des transports automobiles - Le projet COMPASS de l'OCDE*. Paris : Publications de l'OCDE, 1986. 183 p.

OCDE, CEMT, *Transports urbains et développement durable*. Paris : Publications de l'OCDE, 1995. 268 p.

ODUM H.T., *Systems Ecology - An Introduction*. New-York : Wiley-Interscience, 1983. 354 p.

OEST, *Les transports en 1992 - 30ème rapport de la commission des comptes*. Paris : INSEE-OEST, juin 1993. 171 p.

OEST, *Les transports en 1993. Premiers résultats*. mars 1994. 15 p.

OEST, *Les transports en 1994 - 32ème rapport de la commission des comptes*. Paris : INSEE-OEST, juin 1995. 166 p.

OEST, *Les transports en 1994. Premiers résultats*. mars 1995. 16 p.

OPSHOOR J.B., VOS Hans B., *Instruments économiques pour la protection de l'environnement*. Paris : OCDE, 1989. 150 p.

ORFEUIL Jean-Pierre, "Trois futurs pour la mobilité et pour la ville" in ADEME, DRAST, INRETS, *Se déplacer au quotidien dans 30 ans*. Paris : La Documentation Française, 1995, 234 p. pp. 41-50.

ORFEUIL Jean-Pierre, Circulation, énergie, environnement : des facultés d'adaptation à ne pas sous-estimer", *TEC* n°100, mai-juin 1990. pp. 5-9.

ORFEUIL Jean-Pierre, *Energie, environnement, fiscalité, déplacements quotidiens*. Arcueil : INRETS, document de travail, décembre 1993. 133 p.

ORFEUIL Jean-Pierre, *Je suis l'automobile*. La Tour d'Aigue : Editions de l'aube, 1994. 88 p.

ORFEUIL Jean-Pierre, TROULAY Patrick, "Les déplacements dans le cadre habituel", pp. 71-84 in INRETS, *Un milliard de déplacements par semaine - La mobilité des français*. Paris : La Documentation Française, 1989. 293 p.

ORFEUIL Jean-Pierre, ZUMKELLER Dick, "Concevoir et tarifier les transports pour un développement viable", *Recherche Transports Sécurité* n°32, décembre 1991. pp 165-172.

ORSELLI Jean, *Energies nouvelles pour l'automobile*. Caen : Paradigme, 1992. 507 p.

PAPON Francis, *Péage Urbain. Les routes de première classe*. Caen : Paradigme, coll. Transports et communication, 1992. 317 p.

PASSET René, *L'économie et le vivant*. Paris : Petite Bibliothèque Payot, 1979. 287 p.

PASSET René, "Le copilotage du développement économique et de la biosphère" *Revue Tiers Monde*, t. XXXIII, n° 130, avril-juin 1992. pp. 396-416.

PEARCE David, *Environmental Economics*. Londres et New York : Longman, 1976.

PEARCE David, TURNER Kerry, *Economics of natural resources and the environment*. Londres : Harvester Wheatsheaf Ed., 1990. 377 p.

PEARCE David, TURNER Kerry, *Evaluation des avantages et prise de décision dans le domaine de l'environnement*. Paris : OCDE, 1992. 61 p.

PELLETIER J., DELFANTE Ch., *Villes et urbanisme dans le monde*. Paris : Masson, 1989. 200 p.

PERROUX François, "L'équilibre des unités passives et l'équilibration des unités actives". *Economie Appliquée* n°3-4, 1978. pp 271-291.

PEZZEY John, "Economic Analysis of Sustainable Growth and Sustainable Development", *World Bank, Environment Department Working Paper n°15*, Washington, mars 1989.

PIGEON Patrick, *Ville et environnement*. Paris : Nathan, Coll. Géographie d'aujourd'hui, 1994. 192 p.

PILLET Gonzague, *Economie écologique*. Genève : Georg Ed., 1993. 223 p.

PILLOT Didier, "Analyse fine des trafics lourds". 3^{ème} colloque international *Transports et pollution de l'air*, Avignon, 6-10 juin 1994. Préactes, Bron : INRETS éd. pp. 87-94.

PIPIEN Gilles, *Congestion des agglomérations*. Lyon : DDE du Rhône, mars 1992. 42 p.

POCHET Pascal, *Mobilité quotidienne des personnes âgées en milieu urbain : évolutions récentes et perspectives*. Lyon : Université Lumière Lyon 2, thèse de doctorat de sciences économiques, 15 juin 1995. 313 p.

POINT Patrick, "Les services rendus par le patrimoine naturel : une évaluation fondée sur des principes économiques", *Economie et Statistique* n°258-259, octobre-novembre 1992. pp. 11-18.

QUINET Emile, "Les coûts sociaux des transports : évaluation et liens avec les politiques d'internalisation des effets externes". *Document de travail n°1 du séminaire conjoint OCDE/CEMT sur l'internalisation des coûts externes des transports*. Paris, 30 Septembre - 1^{er} Octobre 1993. 51 p.

RAMADE François, *Eléments d'écologie appliquée. Action de l'homme sur la biosphère*. Paris : MacGraw-Hill Inc., Coll. Ediscience, 1978. 576 p.

RATP, Département du Développement, *La pollution liée aux transports de voyageurs en Ile de France*. Paris, août 1992. 24 p.

ROQUEPLO Philippe, *Pluies acides : menaces pour l'Europe*. Paris : Economica, 1988. 357 p.

ROTHENBERG Jérôme, "Discussion du modèle d'Eytan SHESHINSKI", *American Economic Review, Papers and Proceedings*, mai 1973, pp. 67-70.

SACHS Ignacy, "Le Sud et la conférence de Rio de Janeiro", *Les Cahiers Français* n°250, Environnement et gestion de la planète, mars-avril 1991. pp. 102-105.

SACHS Ignacy, *Stratégies de l'écodéveloppement*. Paris : Economie et Humanisme, Edition Ouvrière, 1980. 140 p.

SANEJOUAND Renaud, "Enjeux, moyens et perspectives de la lutte contre le bruit routier", *Revue Générale des Routes et des Aéroports*, Hors Série 2-1994. pp. 16-18.

SAUVE Sylvain, "Les carburants alternatifs : mythes, réalités et perspectives de développement", *Routes et transports* Vol. 23 n°1, printemps 1993. pp. 13-20.

SCHATTANEK Guido, SODEN Joel, KAHNG June, "Evaluation de la pollution d'origine automobile dans les grandes agglomérations", *RTS* n°32, décembre 1991. pp. 96-100.

SCITOVSKY Tibor, "Two Concepts of External Economies", *Journal of Political Economy*, n°1, 1954 pp. 143-151

SERRES Michel, *Le contrat naturel*. Paris : Flammarion, coll. Champs, 1990. 191 p.

SILEM Ahmed, *Introduction à l'analyse économique*. Paris : Armand Colin, 2^{de} éd., 1989. 190 p.

SIMON Herbert Alexander, *La science des systèmes, science de l'artificiel*. Paris : Epi, 1974. 155 p.

SIMON Herbert Alexander, *Sciences des systèmes, sciences de l'artificiel*. Paris : Dunod, Coll. AFCET Systèmes. 1991. 229 p.

SOGUEL Nils, *Evaluation monétaire des atteintes à l'environnement*. Neuchâtel : EDES Neuchâtel, Institut de Recherches Economiques et Régionales, 1994. 181 p.

TABOURIN Eric, "Les formes de l'étalement urbain", *Les Annales de la Recherche Urbaine* n°67, juin 1995. pp. 33-42.

TAZIEFF Haroun, *La terre va-t-elle cesser de tourner ?* Paris : Seghers, 1992. 191 p.

The World Commission on Environment and Development, *Our Common Future*. Oxford, New-York : Oxford University Press, 1987. xv + 383 p.

THOMAS Isabelle, "La relation trafic-accidents sur autoroute. Approche statistique empirique". *Sixth World Conference on Transport Research*, Lyon, France, 29 juin 3 juillet 1992. pp. 1 847-1 856 des actes du colloque, Vol. IV : *Innovation technologique et gestion des réseaux*, avril 1993. pp. 2 337-3 158.

VALLET Michel et alii, *Effets du bruit de circulation automobile - Données psychologiques, physiologiques et économiques*. Paris : Note d'information IRT n°28, décembre 1983. 114 p.

VALLET Michel, "L'évolution des exigences humaines en matière de bruit routier". *TEC* n°93, mars avril 1989. pp. 34-36.

VIENNET Robert, "Biocarburants, quelle réalité ?", *Transport Public*, avril 1992. pp. 10-15.

VIENNET Robert, "Le transport public et la lutte contre la pollution : à la pointe du combat", *Transport Public*, mars 1993. pp. 14-27.

WEBER Jean-Luc, *Les comptes de patrimoine naturel*, Collections de l'INSEE Série C n°137-138, décembre 1986.

ZUINDEAU Bertrand, "A propos de la problématique du développement durable : quelques réflexions". Intervention dans le cadre du séminaire de recherche *Analyse et évaluation des politiques de transport*. Paris, INRETS, 22 juin 1994. 17 p.

LISTE DES GRAPHIQUES ET ENCADRES

CHAPITRE 1

<i>Encadré 1</i> : Le processus d'allocation des ressources dans une économie d'échange.	27
<i>Encadré 2</i> : Fiscalité et marché de droits versus réglementation	39
<i>Encadré 3</i> : Les comptes du patrimoine naturel.....	45
<i>Encadré 4</i> : La dynamique du déséquilibre écologique lorsque les agents économiques sont incapables d'anticipation.....	51

<i>Graphique 1</i> : le niveau de coût externe optimal, mesure en termes de coûts totaux et marginaux.....	34
<i>Graphique 2</i> : optimum économique et déséquilibre écologique	49
<i>Graphique 3</i> : Participation des différents facteurs à l'évolution de quelques indices d'impact sur l'environnement.....	57

CHAPITRE 2

<i>Encadré 1</i> : l'inversion des températures illustrée par le cas de Los Angeles.....	73
<i>Encadré 2</i> : A propos de la mesure du bruit.....	80
<i>Graphique 1</i> : pollutions atmosphériques et sonores auxquelles sont liées les transports...71	
<i>Graphique 2</i> : Contribution des transports à la pollution de l'air dans certaines grandes villes.....	79
<i>Graphique 3</i> : Illustration des niveaux de bruit	81
<i>Graphique 4</i> : Bruit routier et gêne ressentie par les populations riveraines	82
<i>Graphique 5</i> : Les causes de la mort des forêts.....	84
<i>Graphique 6</i> : l'agrégation des courbes d'utilité individuelles et le calcul du surplus collectif.....	94
<i>Graphique 7</i> : synthèse des différentes méthodes d'évaluation économique des dommages	102
<i>Graphique 8</i> : Les méthodes d'évaluation et l'enveloppe de coût minimum pertinente.....	104

CHAPITRE 3

<i>Graphique 1</i> : Le déroulement du processus d'affectation	115
<i>Graphique 2</i> : Courbes standard Coût-Débit sous DAVIS	118
<i>Graphique 3</i> : Ecrêtement simple de la pointe.....	119
<i>Graphique 4</i> : Représentation des 10 cycles de conduite INRETS à partir des vitesses instantanées.....	125
<i>Graphique 5</i> : Emissions sonores d'un véhicule en conditions de circulation fluide ou pulsée	128
<i>Graphique 6</i> : Le déroulement de la méthode de calcul des émissions polluantes et sonores du trafic routier	132

CHAPITRE 4

<i>Graphique 1</i> : les relations taux d'occupation - vitesse et densité - vitesse sur un axe routier	166
<i>Graphique 2</i> : la relation entre vitesse et débit sur un axe routier.....	166
<i>Graphique 3</i> : coût moyen et coût marginal des véhicules en situation de congestion.....	170
<i>Graphique 4</i> : relation débit - coût du déplacement.....	173
<i>Graphique 5</i> : relation débit - coût du déplacement	173
<i>Graphique 6</i> : Trafic urbain et pollution de l'air au cours d'une journée de semaine :.....	180
<i>Graphique 7</i> : Consommation annuelle de fuel par personne en fonction de la densité urbaine :	181
<i>Graphique 8</i> : Sensibilité des émissions VL de polluants atmosphériques à la hausse du nombre de déplacements au niveau d'un réseau routier urbain	188
<i>Graphique 9</i> : Evolution des émissions sonores du trafic VL en fonction du nombre de déplacements routiers	191
<i>Graphique 10</i> : Reports de trafic liés à la congestion suivant le type de voirie	195
<i>Graphique 11</i> : évolution des parts de trafic suivant les types de voirie.....	200

CHAPITRE 5

<i>Graphique 1</i> : Evolution du nombre de voitures par adulte selon le niveau de revenu	218
<i>Graphique 2</i> : repérage entre deux période du phénomène de croissance-étalement	224
<i>Graphique 3</i> : Evolution du nombre de déplacements émis par le centre ville entre 1976 et 1986	229
<i>Graphique 4</i> : Effet de l'évolution de la composition du trafic à mobilité et réseau constants (1994) sur les émissions de polluants atmosphériques.....	253
<i>Graphique 5</i> : Evolution globale des émissions de polluants atmosphériques entre 1994 et 2010	258
<i>Graphique 6</i> : Impact de l'évolution des hypothèses d'évolution de la mobilité automobile sur les émissions sonores à réseau constant.....	261
<i>Graphique 7</i> : Evolutions des kilomètres de voirie au sein de chaque classe de niveau sonore (<60, 60-65, 65-70 et ³ 70 dB(A)) en fonction des hypothèses de baisse des émissions sonores des véhicules légers entre 1994 et 2010	265

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1

<i>Tableau 1</i> : Pourcentage annuel de l'accroissement de la production (et consommation) de différents produits aux Etats-Unis (1947-1970)	57
<i>Tableau 2</i> : Fonctions et niveaux d'utilisation des évaluations économiques coûts-avantages	59

CHAPITRE 2

<i>Tableau 1</i> : Modifications du mésoclimat urbain par la pollution atmosphérique	75
<i>Tableau 2</i> : Augmentation du nombre journalier de décès et variations des niveaux de polluants	78
<i>Tableau 3</i> : évaluations du coût du bruit par la méthode des prix hédonistes dans l'immobilier	91
<i>Tableau 4</i> : coûts de la pollution atmosphérique locale et régionale liée aux transports	98
<i>Tableau 5</i> : évaluations du coût du bruit par la méthode du coût d'évitement	100

CHAPITRE 3

<i>Tableau 1</i> : Répartition des déplacements dans l'agglomération de Lyon une heure de pointe du soir en 1990	123
<i>Tableau 2</i> : La caractérisation des conditions de circulation	126
<i>Tableau 3</i> : Emissions sonores des véhicules légers	128
<i>Tableau 4</i> : Emissions sonores des poids-lourds	129
<i>Tableau 5</i> : Part du trafic VL suivant les différents cycles de conduite	129
<i>Tableau 6</i> : Emissions unitaires d'un véhicule moyen pour chaque cycle de conduite (en g/km) :	130
<i>Tableau 7</i> : Les variations de trafic par arc entre l'option "Wardrop 6 itinéraires" et les autres options d'affectation :	138
<i>Tableau 8</i> : Les variations des conditions de circulation entre l'option "Wardrop 6 itinéraires" et les autres options d'affectation :	139
<i>Tableau 9</i> : Variations des émissions polluantes suivant les options d'affectation	139
<i>Tableau 10</i> : Variations du nombre de km de tronçons de voirie exposés à un niveau sonore donné, mesuré sur l'isophone de référence en Leq(1h) dB(A)	139
<i>Tableau 11</i> : Valeurs des options de calcul du temps généralisé suivant les différentes simulations du test	141
<i>Tableau 12</i> : Variations des émissions de polluants atmosphériques en fonction des variations des paramètres de calcul du temps généralisé, base 100 pour S0 :	142
<i>Tableau 13</i> : Evolution du nombre de km de tronçons de voirie exposés à un niveau sonore donné, mesuré sur l'isophone de référence en Leq(1h) dB(A)	142
<i>Tableau 14</i> : Les variations de trafic par arc suivant les valeurs du paramètre testé :	143
<i>Tableau 15</i> : Part des veh.km suivant les différentes conditions de circulation sous S-1, S0 et S+1 :	145
<i>Tableau 16</i> : Evolution des émissions polluantes en fonction des variations des classes de vitesse définissant les cycles de conduite	146
<i>Tableau 17</i> : Evolution du nombre de km de tronçons de voirie exposés à un niveau sonore donné, mesuré sur l'isophone de référence en Leq(1h) dB(A)	146
<i>Tableau 18</i> : Répartition et vitesses du trafic calculés sur chaque arc suivant les 4 simulations du test :	148
<i>Tableau 19</i> : Part des veh.km suivant les différentes conditions de circulation :	148
<i>Tableau 20</i> : Evolution des émissions polluantes en fonction	

de la variabilité des vitesses par arc :	149
<i>Tableau 21</i> : Evolution du nombre de km de tronçons de voirie exposés à un niveau sonore donné, mesuré sur l'isophone de référence en Leq(1h) dB(A)	149
<i>Tableau 22</i> : Proportions du type de véhicule testé, pour les 5 simulations de chaque phase du test sur la composition du parc	150
<i>Tableau 23</i> : Proportion de PL par cycle, à trafic total constant, dans les 5 simulations sur l'impact des PL (en %).....	151
<i>Tableau 24</i> : Part des poids lourds dans les émissions de polluants atmosphériques du trafic total (en%) :.....	151
<i>Tableau 25</i> : Evolution des émissions polluantes en fonction des variations de la part des poids lourds dans le trafic total.....	152
<i>Tableau 26</i> : Evolution du nombre de km de tronçons de voirie exposés à un niveau sonore donné, mesuré sur l'isophone de référence en Leq(1h) dB(A).	153
<i>Tableau 27</i> : Proportion de VL à froid, à trafic VL constant, dans les 5 simulations sur l'impact des VL froids	153
<i>Tableau 28</i> : Part des véhicules roulant à froid dans les émissions totales et les émissions des VL :	154
<i>Tableau 29</i> : Evolution des émissions polluantes en fonction des variations de la part des véhicules roulant à froid dans le trafic total	154
<i>Tableau 30</i> : Proportion de VL diesel, à trafic VL constant, dans les 5 simulations sur l'impact des VL diesel	155
<i>Tableau 31</i> : Part des véhicules légers diesel dans les émissions totales :.....	155
<i>Tableau 32</i> : Evolution des émissions polluantes en fonction des variations de la part des véhicules légers diesel dans le trafic total	156
<i>Tableau 33</i> : La sensibilité des évaluations des émissions de polluants atmosphériques aux variations des différents paramètres testés	157
<i>Tableau 34</i> : La sensibilité des évaluations des émissions sonores aux variations des différents paramètres testés :	158

CHAPITRE 4

<i>Tableau 1</i> : Nombre de déplacements pour chacune des 9 simulations, avec et sans congestion.....	184
<i>Tableau 2</i> : évolution des caractéristiques des déplacements suivant les 9 simulations...	187
<i>Tableau 3</i> : Les élasticités des différentes émissions polluantes des véhicules légers à la hausse du nombre de déplacements - établies entre les deux simulations extrêmes. .	189
<i>Tableau 4</i> : Evolutions des caractéristiques moyennes d'un déplacement entre 1994 et 2010	200
<i>Tableau 5</i> : Effets de l'évolution du réseau routier sur les émissions de polluants atmosphériques (à matrice de déplacements constante).....	203
<i>Tableau 6</i> : Effets de l'évolution du réseau routier sur les émissions sonores (à matrice de déplacements constante).	205
<i>Tableau 7</i> : les divergences suivant les niveaux d'observation des effets de la congestion	208

CHAPITRE 5

<i>Tableau 1</i> : Evolution du nombre de déplacements automobiles en Europe de 1970 à 1986	217
<i>Tableau 2</i> : Les changements de la démographie française	219
<i>Tableau 3</i> : Evolution projetée du nombre de déplacements routiers à l'heure de pointe du soir entre 1992 et 2010	230

<i>Tableau 4</i> : taux de pénétration du diesel sur les véhicules particuliers	231
<i>Tableau 5</i> : Répartition des trafics des véhicules légers essence et diesel aux différents horizons de simulation (1990, 1994, 2000 et 2010).....	242
<i>Tableau 6</i> : Contributions approximatives des différentes sources à la somme totale de la puissance acoustique des véhicules à moteur à explosion.....	244
<i>Tableau 7</i> : Evolution de la réglementation européenne sur le bruit intrinsèque des véhicules.....	244
<i>Tableau 6</i> : Le poids des différents facteurs explicatifs de l'évolution du trafic entre 1994 et 2010	249
<i>Tableau 8</i> : Impact des hypothèses d'évolution de la mobilité automobile à réseau et parc constants	251
<i>Tableau 9</i> : Impact des hypothèses d'évolution de la mobilité et du réseau, à parc constant (1994)	251
<i>Tableau 10</i> : Evolution de la part du diesel dans les émissions de polluants atmosphériques, à trafic constant.....	254
<i>Tableau 11</i> : Des progrès en matière d'émissions atmosphériques entre 1994 et 2000 difficilement reproductibles entre 2000 et 2010, même à trafic constant.....	256
<i>Tableau 12</i> : L'impact de l'évolution technologique, de la mobilité et de la baisse de la vitesse moyenne sur les émissions atmosphériques du trafic automobile urbain entre 1994 et 2000	257

ANNEXE I

<i>Tableau 1</i> : La définition des cycles de conduite	290
<i>Tableau 2</i> : Emissions unitaires des Poids Lourds Diesel de 3,5 à 16 t.....	291
<i>Tableau 3</i> : Emissions unitaires des Poids Lourds Diesel de plus de 16 t.....	291
<i>Tableau 4</i> : Emissions unitaires des Autocars.....	291
<i>Tableau 5</i> : Tonnage moyen transporté par type de PL marchandises et de voie sur une journée 6h-20h	293
<i>Tableau 6</i> : Nombre de poids lourds de marchandises par type de voirie sur une journée 6h-20h	293
<i>Tableau 7</i> : Structure du trafic poids-lourds retenue pour les cycles de conduite routier et autoroutier.....	293
<i>Tableau 8</i> : Trafics poids-lourds moyen en journée 8-20h sous le tunnel de la Croix-Rousse	294
<i>Tableau 9</i> : Emissions unitaires moyennes des Poids Lourds suivant les différents cycles de conduites.....	295
<i>Tableau 10</i> : Rapport des émissions unitaires moyennes départ froid/départ chaud selon le type de carburant	296
<i>Tableau 11</i> : Fonctionnement moteur et températures d'eau : estimation des distances, durées parcourues et consommations par plages de température.	296
<i>Tableau 12</i> : Evolution de la répartition des véhicules légers entre essence et diesel de 1992 à 2010	298
<i>Tableau 13</i> : Evolution de la répartition du trafic entre VL essence et diesel de 1992 à 2010	299
<i>Tableau 14</i> : Détermination du taux d'équipement en pot catalytique des véhicules à essence.....	300
<i>Tableau 15</i> : Calcul des coefficients de surémissions à froid des véhicules avec pot catalytique	302
<i>Tableau 16</i> : Evolution des émissions unitaires des véhicules légers diesel entre 1990 et 2010.....	303
<i>Tableau 17</i> : Hypothèses de composition du parc de véhicules légers aux différents horizons de simulation (1990, 1994, 2000 et 2010).....	306

ANNEXE II

1. Tests sur les différents types d'affectation sous DAVIS

<i>Tableau 1</i> : Les trafics par cycle suivant les sept simulations : répartition en véh.km et en part relative	320
<i>Tableau 2</i> : Les trafics suivant l'état de fluidité de la circulation pour les sept simulations : répartition en véh.km et en part relative	321
<i>Tableau 3</i> : Variations des émissions de polluants atmosphériques :	321
<i>Tableau 4</i> : Variations du niveau de pollution sonore	322

2. Tests sur le temps généralisé

<i>Tableau 5</i> : Présentation des simulations effectuées pour tester les paramètres du temps généralisé	323
<i>Tableau 6</i> : Les distances parcourues par cycles suivant les différents tests.....	324

2.1. Variations de tous les paramètres simultanément

<i>Tableau 7</i> : Variations des kilomètres parcourus	325
<i>Tableau 8</i> : Variations des émissions de polluants atmosphériques :	325
<i>Tableau 9</i> : Variations du niveau de pollution sonore	325

2.2. Variations du coefficient de fiabilité

<i>Tableau 10</i> : Variations des kilomètres parcourus	326
<i>Tableau 11</i> : Variations des émissions de polluants atmosphériques :	326
<i>Tableau 12</i> : Variations du niveau de pollution sonore	326

2.3. Variations du facteur distance

<i>Tableau 13</i> : Variations des kilomètres parcourus	327
<i>Tableau 14</i> : Variations des émissions de polluants atmosphériques :	327
<i>Tableau 15</i> : Variations du niveau de pollution sonore	327

2.4. Variations du bonus autoroutier

<i>Tableau 16</i> : Variations des kilomètres parcourus	328
<i>Tableau 17</i> : Variations des émissions de polluants atmosphériques :	328
<i>Tableau 18</i> : Variations du niveau de pollution sonore	328

2.5. Les variations de trafic par arc suivant les valeurs du paramètre testé

<i>Tableau 19</i> : Les variations de trafic par arc suivant les paramètres testés.....	330
---	-----

3. Le lien entre vitesse et calcul des cycles de conduite

<i>Tableau 20</i> : La définition des cycles de conduite suivant les trois scénarios S-1, S0 et S+1332	
<i>Tableau 21</i> : Les trafics par cycle suivant les trois simulations : répartition en véh.km et en part relative	333
<i>Tableau 22</i> : Les trafics suivant l'état de fluidité de la circulation pour les trois simulations : répartition en véh.km et en part relative.....	333
<i>Tableau 23</i> : Variations des émissions de polluants atmosphériques :	333
<i>Tableau 24</i> : Variations du niveau de pollution sonore	334

4. Modélisation statique et vitesses moyennes

<i>Tableau 25</i> : Répartition et vitesses du trafic calculées sur chaque arc, suivant les 4 simulations du test :	335
<i>Tableau 26</i> : Les trafics par cycle suivant les quatre simulations : répartition en véh.km et en part relative	336
<i>Tableau 27</i> : Les trafics suivant l'état de fluidité de la circulation pour les quatre simulations : répartition en véh.km et en part relative.....	336
<i>Tableau 28</i> : Variations du niveau de pollution sonore	337

5. L'importance des hypothèses de composition du parc en 1990

<i>Tableau 29</i> : Proportion de VL à froid, à trafic VL constant, dans les différentes simulations.....	338
--	-----

<i>Tableau 30</i> : Proportion de VL diesel, à trafic VL constant, dans les différentes simulations.....	338
<i>Tableau 31</i> : Proportion de PL par cycle, à trafic total constant, dans les différentes simulations.....	338
<i>Tableau 32</i> : Les véhicules kilomètres parcourus moteur à froid	339
<i>Tableau 33</i> : Part des moteurs froids dans les émissions totales.....	339
<i>Tableau 34</i> : Sensibilité du total des émissions polluantes aux variations de la part des véhicules roulant à froid.....	340
<i>Tableau 35</i> : Sensibilité des émissions polluantes des VL aux variations de la part des véhicules roulant à froid.....	340
<i>Tableau 36</i> : Les véhicules kilomètres parcourus par les véhicules légers	341
<i>Tableau 37</i> : Part des moteurs VL essence, VL Diesel et PL dans les émissions totales...341	
<i>Tableau 38</i> : Sensibilité des émissions polluantes aux variations de la part des VL diesel parmi les VL	342
<i>Tableau 39</i> : Les véhicules kilomètres parcourus par les poids lourds	343
<i>Tableau 40</i> : Sensibilité des émissions polluantes aux variations de la part des PL à trafic total constant.....	343
<i>Tableau 41</i> : Variations du niveau de pollution sonore	344
6. L'importance des hypothèses de composition du parc en 2010	
<i>Tableau 42</i> : Proportion de VL à froid, à trafic VL constant, dans les différentes simulations	345
<i>Tableau 43</i> : Sensibilité des émissions polluantes du trafic VL 2010 aux variations de la part des véhicules roulant à froid.....	346
<i>Tableau 44</i> : Proportion de VL diesel, à trafic VL constant, dans les différentes simulations.....	346
<i>Tableau 45</i> : Sensibilité des émissions polluantes du trafic VL 2010 aux variations de la part des véhicules diesel	346
<i>Tableau 46</i> : la sensibilité des évaluations des émissions de polluants atmosphériques aux variations des deux paramètres testés.....	347

ANNEXE III

<i>Tableau 1</i> : Nombre de déplacements pour chacune des 9 simulations, avec et sans congestion.....	352
<i>Tableau 2</i> : Trafic total par cycle de conduite obtenu pour les 9 simulations prenant en compte la congestion (Veh.Km).....	353
<i>Tableau 3</i> : Trafic total par cycle de conduite obtenu pour les 9 simulations ne prenant pas en compte la congestion (Veh.Km).....	353
<i>Tableau 4</i> : Trafic total par cycle de conduite suivant les différents états du réseau et de la matrice O-D entre 1994, 2000 et 2010 (Veh.Km)	354
<i>Tableau 5</i> : Trafic total par cycle de conduite suivant les fourchettes e mobilité retenues en 2000 et 2010 (Veh.Km).....	355
<i>Tableau 6</i> : Cas simulé de congestion sur un tronçon de 15 km de route urbaine	356
<i>Tableau 7</i> : Emissions du trafic total obtenues pour les 9 simulations prenant en compte la congestion	357
<i>Tableau 9</i> : Emissions du trafic VL obtenues pour les 9 simulations prenant en compte la congestion	357
<i>Tableau 10</i> : Emissions du trafic VL obtenues pour les 9 simulations ne prenant pas en compte la congestion	358
<i>Tableau 11</i> : Les élasticités des différentes émissions polluantes du trafic total et du trafic VL au nombre de déplacements affectés sur le réseau routier	358
<i>Tableau 12</i> : Emissions sonore de l'ensemble du trafic routier, congestion prise en compte.....	359

<i>Tableau 13</i> : Emissions sonore de l'ensemble du trafic routier, congestion non prise en compte :	359
<i>Tableau 14</i> : Emissions sonores du trafic VL, congestion prise en compte.....	360
<i>Tableau 15</i> : Emissions sonores du trafic VL, congestion non prise en compte.....	360
<i>Tableau 16</i> : Répartition du trafic suivant le type de voirie - en %.....	361
<i>Tableau 17</i> : Répartition du trafic suivant le type de voirie - en %.....	361
<i>Tableau 18</i> : Evolution générale de la voirie entre 1994 et 2010 (en Km)	361
<i>Tableau 19</i> : Evolution des trafics par type de voirie (en Veh.Km).....	362
<i>Tableau 20</i> : Effets sur les émissions de polluant atmosphérique liés au réseau, technologie et mobilité de 1994	362
<i>Tableau 21</i> : Effets liés au réseau sur les émissions de polluant atmosphérique, technologie et mobilité de 2000	363
<i>Tableau 22</i> : Effets sur les émissions de polluant atmosphérique liés au réseau, technologie et mobilité de 2010	363
<i>Tableau 23</i> : Effets sur les émissions sonores liés aux évolutions du réseau, matrice constante de 1994	363
<i>Tableau 24</i> : Effets sur les émissions sonores liés aux évolutions du réseau, matrice constante de 2000	364
<i>Tableau 25</i> : Effets du renouvellement technologique sur les émissions de polluant atmosphérique, réseau et mobilité de 1994.....	365
<i>Tableau 26</i> : Effets du renouvellement technologique sur les émissions de polluant atmosphérique, réseau et mobilité de 2000.....	365
<i>Tableau 27</i> : Effets du renouvellement technologique sur les émissions de polluant atmosphérique, réseau et mobilité de 2010.....	366
<i>Tableau 28</i> : Les hypothèses d'évolution des caractéristiques d'émissions sonores pour 2010.....	367
<i>Tableau 29</i> : Evolution des émissions sonores entre 1994 et 2010 sans amélioration des émissions unitaires (hypothèses de référence)	369
<i>Tableau 28</i> : évolution des émissions sonores entre 1990 et 2010 avec -1 à vitesses lentes et -3 dB à 100 km/h	369
<i>Tableau 30</i> : évolution des émissions sonores entre 1990 et 2010 avec -1 à vitesses lentes et -4 dB à 100 km/h	370
<i>Tableau 31</i> : évolution des émissions sonores entre 1990 et 2010 avec -2 à vitesses lentes et -3 dB à 100 km/h	370
<i>Tableau 32</i> : évolution des émissions sonores entre 1990 et 2010 avec -2 à vitesses lentes et -6 dB à 100 km/h	370
<i>Tableau 33</i> : Effets de l'évolution du nombre et de la structure des déplacements sur les émissions de polluants atmosphériques, technologie et réseau de 1994	371
<i>Tableau 34</i> : Effets de l'évolution du nombre et de la structure des déplacements sur les émissions de polluants atmosphériques, technologie et réseau de 2000	371
<i>Tableau 35</i> : Effets de l'évolution du nombre et de la structure des déplacements sur les émissions de polluants atmosphériques, technologie et réseau de 2010	372
<i>Tableau 36</i> : Effets sur les émissions sonores liés aux évolutions des déplacements automobile, réseau constant de 1994.....	372
<i>Tableau 37</i> : Effets sur les émissions sonores liés aux évolutions des déplacements automobile, réseau constant de 2000.....	373
<i>Tableau 38</i> : Effets sur les émissions sonores liés aux évolutions des déplacements automobile, réseau constant de 2010.....	373
<i>Tableau 39</i> : Le poids des différents facteurs explicatifs de l'évolution du trafic entre 1994 et 2010	374

<i>Tableau 40</i> : Evolution des déplacements automobile : leur nombre, leur trafic et leur vitesse	374
<i>Tableau 41</i> : Evolution des émissions polluantes dans le cadre d'une hypothèse "basse" de progression de la mobilité automobile (matrice 2000 : -5% ; matrice 2010 : -10%)	376
<i>Tableau 40</i> : Evolution des émissions polluantes dans le cadre des hypothèses de référence de progression de la mobilité automobile.....	376
<i>Tableau 41</i> : Evolution des émissions polluantes dans le cadre d'une hypothèse "haute" de progression de la mobilité automobile (matrice 2000 : +5% ; matrice 2010 : +10%)...	376

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	10
Le fait urbain	10
Les questions environnementales et l'exigence de développement durable	11
Les transports routiers	13
Problématique et méthodologie du travail.....	16
CHAPITRE 1 :	
ECOLOGIE ET ECONOMIE :DES INTERETS CONTRADICTOIRES ?.....	19
1. L'approche traditionnelle : économie du Bien-Être et externalités.....	23
<i>1.1. L'économie du Bien-Être : du marché concurrentiel et à l'intervention de l'Etat</i>	<i>23</i>
1.1.1. Conditions de concurrence pure et parfaite et équilibre général	23
1.1.2. L'équilibre général et l'optimum de Pareto.....	25
1.1.3. Le respect des hypothèses comme justification de l'intervention de l'Etat...28	
<i>1.2. Des externalités à leur internalisation</i>	<i>30</i>
1.2.1. Externalité : définition	30
1.2.2. La recherche du niveau de coût externe optimal	31
a) La mise en évidence théorique de ce coût externe optimal	31
b) Arthur Cecil Pigou et l'intervention de l'Etat	34
c) Ronald Coase ou le retour à plus de libéralisme	36
d) Internalisation, instruments réglementaires et économiques : confusions ....37	
<i>1.3. Quelques précisions sur les méthodes d'évaluation</i>	<i>39</i>
1.3.1. Des représentations sociales à la représentation économique de l'environnement.....	40
a) Les méthodes d'évaluation monétaire des dommages	41
b) L'actualisation	42
1.3.2. Pour l'amélioration des outils macro économiques.....	44
<i>1.4. Conclusion.....</i>	<i>46</i>
2. L'élargissement du cadre de réflexion pour mieux prendre en compte les rapports entre économie et écologie.....	46
<i>2.1. Ecologie et économie : des optima différents ?.....</i>	<i>47</i>
2.1.1. La logique du modèle économique traditionnel en contradiction avec les dynamiques écologiques	48
2.1.2. La nécessité d'un pouvoir d'anticipation pour les agents économiques.....51	
<i>2.2. Interactions entre activités humaines et processus écologiques</i>	<i>53</i>
2.2.1. Activités humaines et limites d'assimilation du milieu	54
2.2.2. Mesure humaine des risques environnementaux.....	55
a) Les facteurs humains de déstabilisation du milieu	55

b) Les effets en retour des dégradations : évaluations physiques et mesures économiques	57
2.3. Le développement durable comme fonction objectif	58
2.4. Les politiques à mettre en oeuvre	61
a) Rationalité substantielle, rationalité procédurale.....	61
b) Lorsque le thème des externalités n'est qu'un prétexte.....	62
c) L'instrument économique comme élément au sein d'une politique correctrice.....	63
3. Transition : écologie, économie, transports routiers urbains.....	64
 CHAPITRE 2 :	
LES NUISANCES DES TRANSPORTS ROUTIERS URBAINS : LA MESURE DES ENJEUX A TRAVERS LES EVALUATIONS ECONOMIQUES.....	
67	
1. Présentation des phénomènes de pollutions atmosphériques et sonores dans lesquels interviennent les transports.....	70
1.1. Au niveau local.....	71
1.1.1. Remarques climatiques et particularités du milieu urbain	72
a) Le phénomène d'inversion	72
b) Le dôme de pollution.....	74
1.1.2. Atteintes diverses de la pollution atmosphérique et contribution de l'automobile :	75
a) les polluants gazeux.....	75
b) Les poussières.....	77
c) Bilans : la liaison entre pollution et santé publique, le rôle des transports routiers	77
1.1.3. Les nuisances liées au bruit	79
1.2. Niveaux régional et global.....	83
1.2.1. Pluies acides... ..	83
1.2.2. ... et accroissement de l'effet de serre	85
2. La référence au marché et la mesure des courbes de préférence individuelles	86
2.1. Evaluation à partir de marchés de substitution.....	87
2.1.1. Les dépenses consenties pour obtenir un bien ou service non marchand....	87
2.2.2. La méthode des prix hédonistes	89
2.2. Evaluation à partir de marchés fictifs.....	91
2.3. Critiques de la méthode.....	93
3. Les évaluations macroéconomiques	95
3.1. Les démarches explicites.....	95
3.1.1. L'évaluation du coût des dommages.....	95

a) L'usage fréquent d'une relation physique initiale entre émissions et dommages.....	95
b) Valeur ajoutée non réalisée, dépenses en "bout de ligne", pretium doloris ..	96
3.1.3. Contraintes non économiques et coûts d'évitement.	98
3.2. <i>Mesures a posteriori</i>	101
4. Synthèse.....	102
5. Conclusion.....	106
CHAPITRE 3 :	
CONSTRUCTION D'UN OUTIL D'EVALUATION DES EMISSIONS POLLUANTES ET SONORES DU TRAFIC ROUTIER.....	109
1. Présentation de la méthode de calcul retenue pour estimer les émissions polluantes et sonores du trafic routier	113
1.1. <i>Un premier bilan de l'état de la circulation sur le Grand Lyon</i>	113
1.1.1. L'usage d'un modèle d'affectation du trafic : DAVIS.....	113
a) Une représentation figée des déplacements :.....	116
b) Une représentation géographique simplifiée des déplacements routiers et du réseau viaire :.....	116
c) Contraintes de capacité de la voirie et prise en compte de la congestion :..	118
d) A propos des hypothèses de comportement des automobilistes	120
1.1.2. Les données utilisées : l'heure de pointe du soir sur le Grand Lyon en 1990	121
1.2. <i>Calcul des indicateurs de nuisance</i>	124
1.2.1. Définition des états de circulation : les cycles de conduite.....	124
1.2.2 Le calcul des émissions sonore	127
a) Calcul des émissions unitaires.....	127
b) Réagrégation par tronçon	129
1.2.3. La pollution atmosphérique.....	130
1.3. <i>Conclusion</i>	132
2. De la méthode à l'interprétation des résultats obtenus.....	133
2.1. <i>Pour une lecture globale et relative des résultats</i>	133
2.1.1. Des données de départ contraignantes pour l'analyse des niveaux d'émissions calculés	134
2.1.2. Les problèmes posés pour une évaluation géographiquement localisée	134
2.2. <i>Test de la méthode d'évaluation et robustesse des résultats</i>	135
2.2.1. Sensibilité des résultats aux options de calcul du modèle.....	136
a) Affectation par tout ou rien ou principe de Wardrop ?	136
b) La fonction de temps généralisé.....	140
2.2.2. A propos des conditions de circulation	143

a) Le lien entre vitesse et calcul des cycles de conduite	144
b) Modélisation statique et vitesses moyennes : un outil suffisant.....	147
2.2.3. L'importance des hypothèses de composition du trafic	150
a) L'importance des hypothèses concernant les poids lourds.....	151
b) Les hypothèses concernant la part de véhicules à froid.....	153
c) Véhicules légers essence et véhicules légers diesel.....	154
2.2.4. Synthèse des résultats	156
a) Les incertitudes sur les évaluations d'émissions des polluants atmosphériques	156
b) Les incertitudes sur les évaluations des émissions sonores.....	158
3. Conclusion	159
CHAPITRE 4 :	
CONGESTION URBAINE, ENVIRONNEMENT ET CADRE DE VIE	161
1. Le thème de la congestion routière en économie : un effet externe difficile à internaliser	165
1.1. La référence à l'ingénierie du trafic.....	165
1.2. La congestion routière mesurée en terme de temps perdu	168
1.2.1. Les problèmes redistributifs posés par une taxation de la congestion.....	168
a) Les questions d'équité entre automobilistes.....	169
b) Le problème de la réaffectation du produit d'un péage	169
c) La tarification lorsque la circulation se fait en régime forc.	172
1.2.2. Existe-t-il des compensations directes ou indirectes aux coûts de congestion ?.....	174
a) La congestion comme problème interne aux usagers de la voirie.	174
b) Congestion marché foncier et localisation des activités.....	175
1.3. La prise en compte des autres coûts externes induits par la congestion.....	177
1.4. Conclusion.....	181
2. L'impact de la congestion sur les émissions sonores et atmosphériques au niveau du réseau d'une agglomération	182
2.1. Les effets d'une croissance du nombre de déplacements à réseau routier figé	183
2.1.1. Points de méthode.	183
a) Situations "avec" et "sans" congestion	183
b) Une montée en charge progressive du réseau.....	184
c) Discussion autour de la méthode.....	184
2.2.2. Un impact important de la hausse du nombre de déplacements sur les niveaux d'émissions.....	186
a) Pollution atmosphérique.....	187
b) ...et nuisances sonores	190
2.2.3. Une redistribution des flux : baisse des distances moyennes et envahissement du territoire	193

2.2. Congestion et renouvellement du réseau routier à long terme	196
2.2.1. Points de méthode	197
2.2.2. L'impact de l'évolution du réseau sur les vitesses et les itinéraires	199
a) Configuration du réseau routier et évolution des conditions de circulation	199
b) Amélioration du réseau routier et allongement de la longueur moyenne des déplacements	201
2.2.3. Emissions sonores et atmosphériques : des évolutions différentes selon le type de développement du réseau.....	202
a) Les conséquences en matière d'émissions de polluants atmosphériques.....	202
b) Les conséquences en matière d'émissions sonores.....	204
2.3. Synthèse.....	206
3. Conclusion.....	207

CHAPITRE 5 :

EVOLUTION DE LA MOBILITE VERSUS PROGRES TECHNOLOGIQUE	211
1. L'évolution de la mobilité	214
1.1. <i>Présentation générale : définitions et principaux chiffres.....</i>	<i>215</i>
1.2. <i>Mobilité et croissance économique</i>	<i>217</i>
1.3. <i>Mobilité, modes de vie et démographie</i>	<i>219</i>
1.4. <i>Mobilité et étalement urbain.....</i>	<i>222</i>
1.5. <i>Conclusion : l'évolution projetée des déplacements routiers sur le Grand Lyon aux horizons 2000 et 2010</i>	<i>227</i>
a) taux de motorisation et mobilité automobile.....	227
b) concentration et étalement urbain	227
c) L'étalement des déplacements routiers autour de l'heure de pointe du soir.	228
2. L'évolution et la diversification technologique du parc automobile.....	230
2.1. <i>Les développements technologiques attendus pour les 15 ans qui viennent ..</i>	<i>231</i>
2.1.1. Les améliorations des technologies utilisant les carburants traditionnels ..	231
a) Le véhicule diesel	232
b) Le pot catalytique sur les véhicules à essence.....	233
c) Très Petit Véhicule Urbain, moteur à deux-temps et mélange pauvre : des voies d'approfondissement.	234
2.1.2. Les combustibles de substitution comme solution à moyen terme	235
a) Les biocarburants.....	235
b) Gaz Naturel pour Véhicule et Gaz de Pétrole Liquéfié.....	236
c) Le véhicule électrique.....	238
2.1.3. Les développements technologiques à long terme.....	240
a) Véhicules bi-motorisés : l'hybride et le bi-énergie.	240
b) La pile à combustible	240

c) Moteur à hydrogène.....	241
2.2. Les hypothèses de composition du trafic et d'émissions unitaires des automobile retenues aux horizons 2000 et 2010.....	241
2.3. Les progrès en matière de nuisances sonores et les hypothèses retenues pour les scénarios.....	243
a) Le bruit intrinsèque aux véhicules.....	244
b) Le bruit lié au contact entre pneumatique et chaussée	245
c) Des scénarios d'évolution des niveaux d'émissions sonores sont ils possibles pour 2010 ?.....	246
2.4. Conclusion.....	247
3. L'impact relatif des évolutions de la mobilité et des technologies sur les émissions atmosphériques et sonores de l'automobile en milieu urbain.	247
3.1. Les méthodes utilisées.....	247
a) Variations des valeurs d'un paramètres, toutes choses égales par ailleurs, et validation des résultats par comparaison sur plusieurs situations de référence différentes	248
b) Fixation d'un objectif a priori et analyse des valeurs du paramètre susceptible de le remplir.....	248
3.2. L'impact des évolutions du trafic automobile sur les émissions de polluants atmosphériques.....	248
3.2.1. Une forte sensibilité aux hypothèses de mobilité automobile.....	249
a) L'évolution de la mobilité automobile, ses liens avec les conditions de circulation et la répartition du trafic sur le réseau routier.....	249
b) La sensibilité des émissions de polluants atmosphériques.....	250
3.2.2. Le renouvellement de la composition du trafic et des technologies utilisées : un bilan contrasté suivant l'échéance et le type d'émission	252
a) Des évolutions contrastées suivant le polluant.....	252
b) Une efficacité du parc marginalement décroissante avec le temps.	255
3.2.3. Bilan : les évolutions des émissions automobiles et le poids relatif des différents facteurs.	256
3.3. L'impact du trafic automobile sur les émissions sonores.....	260
3.3.1. Les hypothèses de croissance de la mobilité automobile : disparition des zones calmes mais stabilité des points noirs.	260
3.3.2. L'impact de l'évolution des émissions sonores du trafic : un bilan incertain.....	262
a) Point de méthode	262
b) Les résultats obtenus :	263
3.4. Synthèse : un impact limité de la congestion et des évolutions diversifiées suivant l'impact du renouvellement technologique face à la croissance du trafic.....	266
a) Un impact limité de la congestion	266
b) Evolutions technologiques versus croissance du trafic automobile ?	267
4. Conclusion.....	268

CONCLUSION GENERALE.....	271
1. Un premier bilan des conséquences des émissions polluantes et sonores du trafic routier urbain	273
2. A propos des calculs effectués : une analyse en termes relatifs sur des dynamiques à horizons temporels différents	274
<i>2.1. Le cadre des analyses statiques</i>	<i>274</i>
<i>2.2. Les dynamiques de court terme</i>	<i>275</i>
<i>2.3. Les dynamiques de long terme</i>	<i>276</i>
3. Les limites et apports du travail.....	279
<i>3.1. Les précautions d'emploi : limites des hypothèses et fiabilité des résultats....</i>	<i>279</i>
<i>3.2. Quelques conclusions du travail</i>	<i>280</i>
a) Le risque de surévaluer les conséquences environnementales négatives de la congestion.....	280
b) Les évolutions du parc automobile et l'impact de sa diésélisation.....	282
c) Trafic routier et mobilité durable	283
 ANNEXE I :	
LA METHODE D'ESTIMATION DES EMISSIONS DE POLLUANTS ATMOSPHERIQUES.....	287
1. La définition des cycles de conduite dans le cadre de notre travail.....	290
2. L'estimation des émissions unitaires en 1990.....	291
<i>2.1. Le calcul des émissions unitaires des Poids Lourds.....</i>	<i>291</i>
2.1.1. Les données d'émissions disponibles	291
2.2.2. La structure du trafic PL suivant les cycles de conduite	292
a) Données enquête cordon	292
b) Données "Enquête INRETS".....	294
2.2.3. Les émissions moyennes des poids lourds suivant le cycle de conduite....	294
<i>2.2. A propos des surémissions à froid.....</i>	<i>295</i>
2.2.1. Les véhicules légers	295
a) Les coefficients de surémission.....	295
b) La proportion de véhicules légers à froid dans le trafic	296
c) Les limites des hypothèses retenues	297
2.2.2. Les poids lourds	297
<i>2.3. Les émissions unitaires retenues par type de véhicule et par cycle de conduite</i>	<i>297</i>

3. les hypothèses d'évolution du parc aux horizons 1994, 2000 et 2010.....	298
3.1. Les véhicules légers traditionnels : la montée du diesel au détriment de l'essence.....	298
3.1.1. La répartition des trafics entre VL essence et VL diesel en 1994, 2000 et 2010.....	298
3.1.2. Les émissions des véhicules à essence équipés d'un pot catalytique.....	299
a) Le taux d'équipement en pot catalytique des véhicules à essence	299
b) Les émissions atmosphériques des véhicules à essence équipés d'un pot catalytique.....	301
3.1.3. Les émissions des véhicules diesel en 1994, 2000 et 2010.	302
3.2. Les nouvelles technologies attendues à long terme :.....	303
3.2.1. La montée programmée du véhicule électrique ?.....	304
3.2.2. L'impasse sur le GPL, le GNV et les biocarburants	304
3.3. La non prise en compte du trafic des poids-lourds.....	305
3.4. Conclusion : le parc de véhicules légers aux différents horizons envisagés, composition et émissions unitaires.....	305

ANNEXE II :

PRESENTATION DES TESTS DE LA METHODE DE CALCUL DES EMISSIONS POLLUANTES ET SONORES.....	317
1. Tests sur les différents types d'affectation sous DAVIS	319
2. Tests sur le temps généralisé.....	323
2.1. Variations de tous les paramètres simultanément.....	325
2.2. Variations du coefficient de fiabilité	326
2.3. Variations du facteur distance.....	327
2.4. Variations du bonus autoroutier	328
2.5. Les variations de trafic par arc suivant les valeurs du paramètre testé :.....	329
3. Le lien entre vitesse et calcul des cycles de conduite	331
4. Modélisation statique et vitesses moyennes :	335
5. L'importance des hypothèses de composition du parc en 1990.....	338
5.1. La part de véhicules roulant moteur à froid	339
5.2. Véhicules légers essence, véhicules légers diesel.....	341

5.3. <i>Les Poids Lourds</i>	343
6. L'importance des hypothèses de composition du parc en 2010.....	345
6.1. <i>Test de la part de véhicules roulant à froid en 2010</i>	345
6.2. <i>Test de la part de véhicules diesel en 2010</i>	346
6.3. <i>Mesure de la sensibilité des évaluations des émissions de polluants atmosphériques aux variations des deux paramètres testés</i>	347
 ANNEXE III :	
PRESENTATION DES RESULTATS DES SIMULATIONS : DONNEES EN VALEURS ABSOLUES ET RELATIVES	
1. La détermination des distances parcourues par cycle de conduite.....	351
1.1. <i>Simulation d'une croissance du nombre de déplacements à réseau routier figé</i>	351
1.2. <i>Les dynamiques de long terme entre 1994, 2000 et 2010</i>	353
2. Les effets d'une croissance du nombre de déplacements à réseau routier figé.....	356
2.1. <i>La congestion comme coût externe</i>	356
2.2. <i>Congestion et pollution atmosphérique</i>	357
2.3. <i>Congestion et pollution sonore</i>	359
2.4. <i>Congestion et répartition du trafic sur le réseau de voirie</i>	361
3. Congestion et renouvellement du réseau routier à long terme.....	362
3.1. <i>Considérations générales sur les évolutions du réseau et du trafic</i>	362
3.2. <i>Effets sur les émissions de polluants atmosphériques liées au trafic de véhicules légers</i>	363
3.3. <i>Effets sur les émissions sonores liées au trafic de véhicules légers</i>	364
4. Effets du renouvellement technologique sur les émissions de polluants atmosphériques et les émissions sonores.....	366
4.1. <i>Effets du renouvellement technologique sur les émissions de polluants atmosphériques</i>	366
4.2. <i>Effets du renouvellement technologique sur les émissions sonores</i>	368

5. Evolutions en nombre et en structure des déplacements automobile et impact sur les émissions polluantes et sonores du trafic routier	372
<i>5.1. Effets de l'évolution du nombre et de la structure des déplacements sur les émissions de polluants atmosphériques</i>	<i>372</i>
<i>5.2. Effets de l'évolution du nombre et de la structure des déplacements sur les émissions sonores.....</i>	<i>373</i>
6. Evolutions entre 1994, 2000 et 2010, toutes hypothèses confondues.....	375
<i>6.1. Le poids des différents facteurs explicatifs de l'évolution du trafic entre 1994 et 2010.....</i>	<i>375</i>
<i>6.2. Evolution des émissions de polluants atmosphériques entre 1994 et 2010, toutes hypothèses confondues.....</i>	<i>377</i>
 BIBLIOGRAPHIE	 379
 LISTE DES GRAPHIQUES ET ENCADRES	 395
 LISTE DES TABLEAUX.....	 399
 TABLE DES MATIERES	 409