



HAL
open science

Evaluation de modèles pour la simulation de la pollution à proximité des axes routiers

André Wroblewski, Véronique Riffault, Jean-Yves Chatelier, Laure Malherbe,
Frédéric Tognet

► **To cite this version:**

André Wroblewski, Véronique Riffault, Jean-Yves Chatelier, Laure Malherbe, Frédéric Tognet. Evaluation de modèles pour la simulation de la pollution à proximité des axes routiers. Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA). 2007. hal-04244677

HAL Id: hal-04244677

<https://hal.science/hal-04244677>

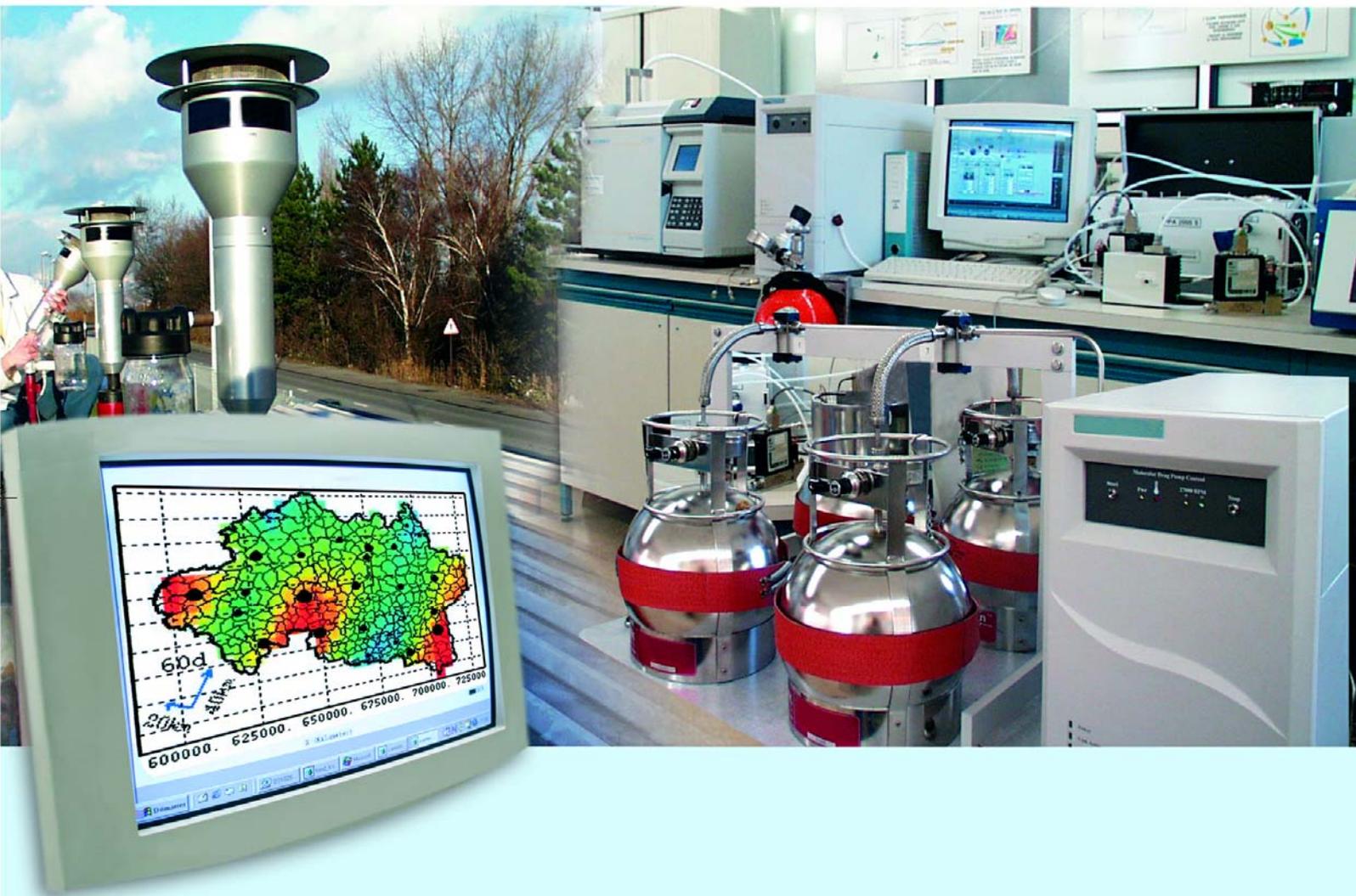
Submitted on 16 Oct 2023

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.

LCSQA

Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air



Modélisation et traitements numériques

**Evaluation de modèles pour la simulation de la pollution
à proximité des axes routiers**

Novembre 2007
Programme 2007

A. Wroblewski (EMD), V. Riffault (EMD),
J-Y. Chatelier (INERIS), L. Malherbe
(INERIS), F. Tognet (INERIS).





PREAMBULE

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air est constitué de laboratoires de l'Ecole des Mines de Douai, de l'INERIS et du LNE. Il mène depuis 1991 des études et des recherches finalisées à la demande du Ministère chargé de l'environnement, sous la coordination technique de l'ADEME et en concertation avec les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Ces travaux en matière de pollution atmosphérique supportés financièrement par la Direction des Préventions des Pollutions et des Risques du Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables sont réalisés avec le souci constant d'améliorer le dispositif de surveillance de la qualité de l'air en France en apportant un appui scientifique et technique aux AASQA.

L'objectif principal du LCSQA est de participer à l'amélioration de la qualité des mesures effectuées dans l'air ambiant, depuis le prélèvement des échantillons jusqu'au traitement des données issues des mesures. Cette action est menée dans le cadre des réglementations nationales et européennes mais aussi dans un cadre plus prospectif destiné à fournir aux AASQA de nouveaux outils permettant d'anticiper les évolutions futures.

ECOLE DES MINES DE DOUAI
DEPARTEMENT CHIMIE ET ENVIRONNEMENT

**Evaluation de modèles pour la simulation de la pollution à
proximité des axes routiers**

Convention 000653 de l'EMD

2007

André WROBLEWSKI (EMD), Véronique RIFFAULT (EMD)
Jean-Yves CHATELIER, Laure MALHERBE (INERIS), Frédéric TOGNET (INERIS)



Evaluation de modèles pour la simulation de la pollution à proximité des axes routiers

Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

Thème : Modélisation et traitements numériques

Programme financé par la Direction des Préventions des Pollutions et des Risques (DPPR)

Novembre 2007

J-Y. CHATELIER, L. MALHERBE, F TOGNET (INERIS)

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	J-Y. CHATELIER L. Malherbe F. TOGNET	L. ROUÏL	M. RAMEL
Qualité	Ingénieurs Direction des Risques Chroniques	Responsable Unité MECO Direction des Risques Chroniques	Responsable LCSQA/INERIS Direction des Risques Chroniques
Visa			

SOMMAIRE

1. Résumé de l'étude EMD/INERIS.....	7
2. Introduction.....	8
3. Recensement bibliographique des campagnes de mesure	9
3.1 Sources consultées.....	9
3.2 Statistiques sur les bases	9
3.2.1 Base exploitable	9
3.2.2 Base complémentaire	11
4. Etude bibliographique des différents types de modèles	11
4.1 Contraintes liées aux situations de proximité.....	11
4.2 Généralités sur les modèles	12
4.2.1 Modèles empiriques ou semi-empiriques	13
4.2.2 Méthodes analytiques.....	13
4.2.3 Modèles tridimensionnels	13
4.2.4 Méthodes statistiques et géostatistiques	15
4.3 Les modèles de rue	15
4.3.1 Bref état des lieux.....	16
4.3.2 Limites et remarques sur l'utilisation de modèles de rue	17
4.3.3 Performances des modèles de rue.....	17
4.4 Modèles gaussiens linéiques.....	18
4.4.1 Bref état des lieux.....	18
4.4.2 Limites et remarques sur l'utilisation des modèles.....	19
4.4.3 Performances des modèles gaussiens linéiques et analytiques.....	19
5. Conception du site Internet en vue de l'élaboration d'une base de connaissances française.....	21
5.1 Description.....	21
5.2 Spécifications.....	21
5.2.1 Principe.....	21
5.2.2 Contenu Campagne de mesure.....	22
5.2.3 Contenu Outil.....	24
5.2.4 Contenu Modèle	25
5.3 Mise en œuvre.....	26
5.4 Suite des travaux	27
6. Tests préliminaires des modèles de pollution de proximité automobile.....	28
6.1 Site Schildhornstrasse (Berlin).....	28
6.2 Modèles testés.....	29
6.2.1 OSPM (Operational Street Pollution Model)	29
6.2.2 CALINE 4.....	32
6.2.3 ADMS –Urban.....	33
6.2.4 SIRANE	33
6.3 Résultats.....	35
6.3.1 Modèle OSPM	35
6.3.2 Modèle CALINE 4.....	36
6.3.3 Comparaison OSPM/CALINE4/ADMS-Urban.....	37

7.	CONCLUSION	39
7.1	Recensement bibliographique	39
7.2	Elaboration de la base de données.....	39
7.3	Cahier des charges pour la mise en place de campagnes (en concertation avec les AASQA).....	40
7.4	Tests sur les modèles	40
8.	REFERENCES.....	41
9.	ANNEXES	44

1. Résumé de l'étude EMD/INERIS

Evaluation de modèles pour la simulation de la pollution à proximité des axes routiers.

André Wroblewski (EMD) wroblewski@ensm-douai.fr ; tel : + 33 (0)3 27 71 26 11

Laure Malherbe (INERIS) laure.malherbe@ineris.fr ; tel : + 33 (0)3 44 55 62 18

La présente étude porte exclusivement sur la modélisation de la pollution atmosphérique à proximité des axes routiers. Elle a pour objet d'élaborer une base de données et des méthodologies de référence permettant d'apprécier la qualité des modèles disponibles et d'optimiser leur usage. Ainsi une part de cette étude est consacrée à l'application de différents modèles, choisis parmi les plus courants, à quelques jeux de données de la base, afin de s'assurer que les données et méthodologies fournies sont cohérentes et aisément exploitables, et d'offrir des résultats quantitatifs de comparaison entre modèles.

Ces travaux sont planifiés pour une durée de deux ans au moins (2007-2008), voire trois ans en fonction des résultats intermédiaires et des besoins exprimés par les AASQA.

Ce rapport consigne les résultats du travail accompli en 2007 et qui a consisté à : recenser les campagnes de mesure réalisées près des axes routiers en France et à l'étranger. Ce recensement repose sur une consultation directe des AASQA, la lecture de rapports d'étude publiés par les AASQA et une analyse de publications étrangères. classer les campagnes recensées dans deux bases : l'une, dite « exploitable », qui regroupe et décrit les campagnes pour lesquelles toutes les données requises par une modélisation sont a priori disponibles (données en cours de récupération), l'autre, dite « complémentaire », qui présente toutes les autres campagnes.

concevoir un site Internet, où les informations recueillies et produites dans cette étude seront mises à disposition des utilisateurs de modèles ;

appliquer trois modèles (OSPM, CALINE4 et ADMS-Urban) à un jeu de données (campagne TRAPOS sur le site Schildhornstrasse).

2. Introduction

Les AASQA sont de plus en plus sollicitées pour fournir des données qui permettent d'évaluer l'exposition du citoyen à la pollution atmosphérique près des grandes sources (émetteurs industriels, axes routiers, ...). Elles doivent également répondre à un nombre croissant de demandes réglementaires locales (plans de protection de l'atmosphère, plans de déplacement urbain) qui supposent la possibilité de pouvoir quantifier l'impact de mesures de réduction des émissions. Les modèles numériques (déterministes ou géostatistiques) sont les outils les plus appropriés pour l'élaboration de cartographies et, s'agissant de la modélisation déterministe (éventuellement empirique), l'approche la plus adaptée à l'étude de situations futures. Cependant des incertitudes subsistent quant à leurs performances qui dépendent grandement des données d'entrée disponibles pour leur calage et leur mise en œuvre, de la résolution spatiale et temporelle considérée et du savoir-faire du modélisateur. Ainsi l'évaluation de l'incertitude liée à ces modèles demeure problématique. Le besoin d'approfondir cette question est ressorti des réunions de travail de la Commission Modélisation et devrait encore donner lieu à des travaux d'évaluation.

La présente étude, planifiée sur deux ou trois ans (de 2007 à 2009), porte exclusivement sur la modélisation de la pollution à proximité des axes routiers. Dans le contexte décrit ci-dessus, elle a pour objet d'élaborer une base de données des cas d'étude et des modèles, et des méthodologies de référence permettant d'apprécier la qualité des modèles et d'initier l'utilisateur à la mise en œuvre de ces outils. Ainsi dans cette étude, différents modèles sont appliqués, choisis parmi les plus courants, à quelques jeux de données de la base afin de s'assurer que les données et méthodologies fournies sont cohérentes et aisément exploitables, et d'offrir des résultats quantitatifs de comparaison entre modèles.

Ce rapport consigne les résultats du travail accompli en 2007 et qui a consisté à :

- recenser les campagnes de mesure réalisées près des axes routiers en France et à l'étranger. Ce recensement repose sur une consultation directe des AASQA, la lecture de rapports d'étude publiés par les AASQA et une analyse de publications étrangères.
- classer les campagnes recensées dans deux bases : l'une, dite « exploitable », qui regroupe et décrit les campagnes pour lesquelles toutes les données requises par une modélisation sont a priori disponibles (données en cours de récupération), l'autre, dite « complémentaire », qui présente toutes les autres campagnes.
- définir les spécifications et élaborer une première maquette de la partie du site Internet du LCSQA qui mettra à disposition l'ensemble des outils, méthodes et données issus de cette étude;
- appliquer trois modèles (OSPM, CALINE4 et ADMS-Urban) à un jeu de données (campagne TRAPOS sur le site Schildhornstrasse).

Il avait été initialement évoqué la possibilité de réaliser dans le cadre de ces travaux pluriannuels, des campagnes de mesure en sites de proximité, dédiées aux travaux d'évaluation. La richesse des données compilées en 2007 permet d'écarter a priori cette hypothèse, et de se concentrer sur l'exploitation des nombreuses données disponibles au sein des AASQA. Cette décision doit être validée par la Commission Modélisation.

Enfin, les travaux réalisés dans le cadre de cette étude seront mis en perspective par rapport à l'initiative européenne FAIRMODE, lancée par la Commission (DG ENV). Il s'agit de mettre en place un réseau de développeurs et d'utilisateurs de modèles de la qualité de l'air afin de définir des règles d'utilisation et des recommandations scientifiques et techniques, en vue de l'application des outils de modélisation pour la surveillance de la qualité de l'air. L'Agence Européenne de l'Environnement (EEA) et le Centre Commun de Recherche (JRC-Ispra) coordonnent le réseau.

3. Recensement bibliographique des campagnes de mesure

La première étape de l'étude a été consacrée à une **analyse bibliographique des études réalisées** dans les AASQA et des publications scientifiques portant sur l'étude de la pollution de proximité. L'objectif est de recenser les campagnes de mesure réalisées près des axes routiers en France et à l'étranger. Selon la pertinence des études et le niveau de renseignement de celles-ci, nous pourrions envisager l'exploitation des données dans le cadre d'un outil dont la vocation est de mettre à disposition de l'information permettant d'évaluer les modèles de simulation de transport des polluants.

Le niveau d'information étant relativement hétérogène, l'exploitation de la bibliographie nous a conduits à structurer les informations dans deux bases d'information différentes. La première, appelée **base exploitable**, recense l'ensemble des études possédant potentiellement toutes les informations nécessaires à la réalisation de simulations numériques à vocation de surveillance ou d'étude d'impact. La seconde, nommée **base complémentaire**, comprend des informations sur les études recensées qui ne présentent pas un potentiel de récupération de données suffisant en vue d'exercices de simulation. Cette base a cependant été conservée car elle offre une bonne vision des études conduites dans le domaine.

3.1 Sources consultées

Le recensement porte sur les études réalisées dans les AASQA, sur les études spécifiques ayant fait l'objet de publications ou sur les études conduites dans le cadre de projets européens ou internationaux. Le recensement comprend aujourd'hui 170 études.

3.2 Statistiques sur les bases

3.2.1 Base exploitable

La **base exploitable** recense l'ensemble des études possédant potentiellement toutes les informations nécessaires à la réalisation d'études de modélisation destinées à l'évaluation d'outils numériques. Nous avons retenu 159 études issues des sources suivantes :

- 84 % de rapports d'étude d'AASQA,
- 12% d'études développées par des équipes de recherche ayant fait l'objet de publications,
- 4% d'études provenant de programmes européens.

Les informations recensées comprennent :

- la liste des informations de description de l'étude,
- les informations relatives à la géométrie de la ou des rues considérées,
- les paramètres météorologiques,
- les mesures de concentration en polluant,
- les données relatives au trafic automobile,
- les caractéristiques des modèles appliqués sur le jeu de données (si les études de simulation existent)
- les résultats de simulation numérique (si existants).

Le recensement a permis d'identifier et de classer les études suivant le type de site. 7 grandes classes ont été définies :

- Canyon : rue ayant les caractéristiques d'une rue canyon [(largeur de la route/hauteur du bâti) < 1,5],
- Intersection rurale : intersection routière en zone dégagée,
- Intersection urbaine : intersection routière en zone bâtie,
- Ouvert rural : route dégagée en zone rurale,
- Ouvert urbain : route dégagée en zone urbaine,
- Rond-point,
- Tunnel.

La répartition a permis d'identifier (figure 1) une majorité d'études portant sur des rues en zones ouvertes (environ 55%). Le nombre d'études en rue canyon est également assez important (23%). Cette répartition conduit à une représentativité satisfaisante des données recensées par rapport aux typologies de rue que pourraient rencontrer les AASQA dans leurs études.

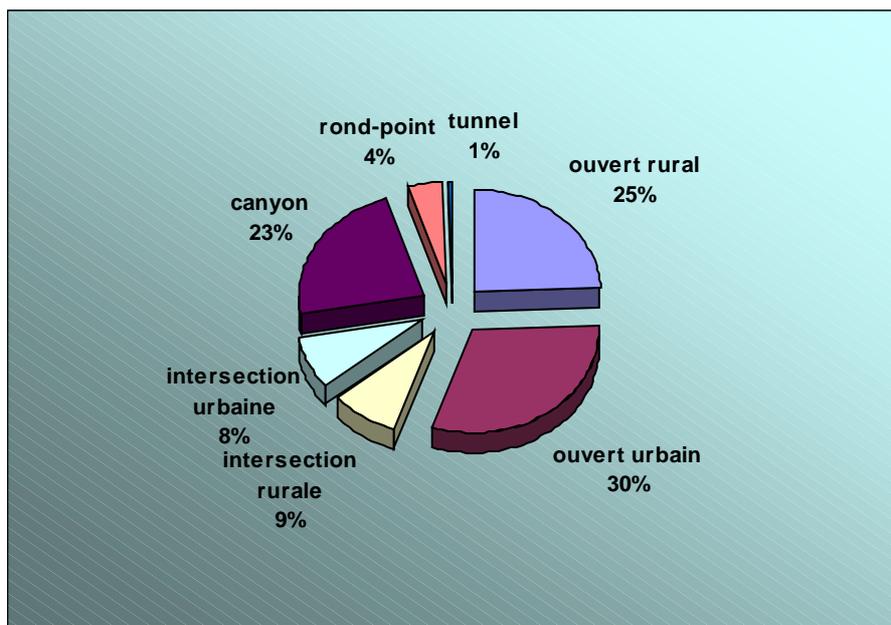


Figure 1 : répartition des études par type de rue

3.2.2 Base complémentaire

La **base complémentaire** comprend les informations disponibles sur les études recensées ne présentant pas un potentiel de récupération de données en vue d'exercices de simulation. 11 études, qui proviennent essentiellement de projets ayant fait l'objet de publications dans des revues scientifiques, sont compilées.

Les informations recensées comprennent au minimum :

- la liste des informations de description de l'étude,
- les informations relatives à la géométrie de la ou des rues
- les paramètres météorologiques,
- les mesures de concentration en polluant,
- les données relatives au trafic automobile,
- les caractéristiques des modèles appliquées sur les jeux de données (si existantes).

4. Etude bibliographique des différents types de modèles

4.1 Contraintes liées aux situations de proximité

La surveillance des voies de circulation en milieu urbain s'attache à évaluer les concentrations des polluants émis par le trafic routier, pour lesquels la réglementation fixe des valeurs limites, ou qui présentent un intérêt particulier à cause de leurs effets nocifs sur la santé humaine. Les polluants visés sont donc généralement des polluants primaires : oxydes d'azote, monoxyde de carbone, benzène, métaux lourds, HAPs, dioxines...

Plusieurs types d'approches sont disponibles et sont brièvement décrites ci-dessous. Cependant quelle que soit la méthode mise en œuvre, la qualité des résultats est toujours contrainte par la qualité des données d'entrée : données de sites, météorologie, inventaires d'émission, données d'observation.

La relation, évidente, entre émissions et concentrations atmosphériques, est exacerbée par le fait que les polluants considérés sont généralement des composés primaires. Les concentrations atmosphériques sont régies par les mécanismes de transport et de dépôt. Or si les émissions de certains polluants sont bien connues et documentées, il n'en est pas toujours ainsi, pour les émissions issues du trafic automobile (émissions d'usure, de resuspension ou même à l'échappement¹ pour certains polluants) comme pour les émissions industrielles (émissions diffuses, polluants ne faisant pas l'objet de contrôles à l'émission réguliers, prise en compte des situations de dysfonctionnement). De plus, les fluctuations temporelles des émissions peuvent être grandes, caractéristique parfois difficile à intégrer dans les modèles. Ces points constituent une première difficulté de la problématique.

La deuxième difficulté vient de la nature même des phénomènes auxquels l'on s'intéresse. En situation de proximité, les caractéristiques de site, la présence de bâtiments, d'arbres ou de tout autre obstacle, influence grandement les panaches de pollution, et induit une variabilité spatiale importante des concentrations. Aux abords d'un axe routier, la turbulence induite par le déplacement des véhicules contribue également à perturber la situation. Ainsi ni la mesure, ni la modélisation ne peuvent donner une image exacte des phénomènes de pollution. Cela pose également le problème de l'évaluation des modèles de proximité : dans quelle mesure un capteur trafic ou industriel, dont la représentativité est limitée dans l'espace peut être considéré comme une référence pour le calibrage des modèles ? Ces limites devront sérieusement être considérées dans l'interprétation des résultats.

4.2 Généralités sur les modèles

Plusieurs approches ont été étudiées et mises en œuvre pour évaluer les concentrations de polluants à proximité des sources de pollution (axes routiers, industries). Quatre grandes catégories de méthodes utilisées pour modéliser la dispersion atmosphérique des rejets sont identifiées :

- Les modèles empiriques ou semi-empiriques tels que les modèles dits « de rue » ;
- Les modèles analytiques, tels que les modèles gaussiens ;
- Les modèles tridimensionnels de type eulérien ou lagrangien ;
- Les modèles statistiques ou géostatistiques.

Ces approches sont fondées sur des bases théoriques totalement différentes.

¹ Même pour les oxydes d'azote, il est bien connu que des différences significatives peuvent être constatées

4.2.1 Modèles empiriques ou semi-empiriques

Les modèles empiriques ou semi-empiriques reposent sur des relations simples décrivant les concentrations, établies à l'aide de considérations physiques mais aussi à partir d'expérimentations en champ réel ou en soufflerie qui ont permis de calibrer les paramètres de ces modèles. Leur usage est par définition très simple, mais ils opèrent souvent sous forme de boîte noire, les paramètres de contrôle ayant été calés sur quelques situations de référence. Ainsi l'interprétation des résultats, qu'ils soient bons ou mauvais, peut s'avérer délicate et fortement dépendante de la similitude du cas étudié avec ceux qui ont permis de calibrer le modèle.

Les modèles de rue sont parmi les exemples les plus connus de ce type d'approche. Ils décrivent généralement les concentrations « au vent » et « sous le vent », à l'intérieur d'une rue bordée par des bâtiments (rue canyon). Ces relations dépendent de paramètres géographiques tels que le rapport hauteur des bâtiments sur largeur de la rue, mais aussi de la direction et de la force du vent.

4.2.2 Méthodes analytiques

Les méthodes analytiques reposent sur une description mathématique simple de la concentration en fonction de paramètres influents tels que la rugosité, le vent, la stabilité atmosphérique et les émissions.

Les modèles gaussiens sont des modèles analytiques simples et parmi les plus utilisés pour modéliser la qualité de l'air dans des zones relativement proches des sources de pollution (à moins de 10 km de la source). L'hypothèse de base est l'assimilation de la dispersion du panache de pollution à une courbe gaussienne dans les directions verticale et transversale. Les coefficients de dispersion dépendent de la météorologie. A noter que, dans les zones très proches des sources, où précisément le panache de pollution est fortement influencé par la turbulence induite par les émetteurs, l'hypothèse gaussienne devient caduque et les modèles ne sont plus applicables. Pour les mêmes raisons il est déconseillé de prolonger leur mise en œuvre au-delà d'une dizaine de kilomètres de la source.

Cette approche très peu coûteuse en temps de calcul, permet de multiplier le nombre de simulations réalisées et de disposer de moyennes et statistiques réellement établies sur des bases météorologiques annuelles ou pluriannuelles. En contrepartie, les paramétrisations sont simples, ce qui conduit à des approximations parfois rudimentaires de cas particuliers tels que l'effet du relief ou des bâtiments, dont on sait qu'ils peuvent avoir un effet non négligeable sur la dispersion, surtout à petite échelle !

4.2.3 Modèles tridimensionnels

Des méthodes déterministes plus sophistiquées tels que les modèles basés sur la résolution numérique ou analytique des équations de transport-diffusion régissant le comportement des polluants (K-modèles) peuvent également être utilisées.

Le traitement des équations est réalisé par des méthodes eulériennes ou lagrangiennes dont la formulation peut être plus ou moins simplifiée. Leur mise en œuvre est moins répandue du fait de leur complexité mais leur principal intérêt réside dans la possibilité de prendre en compte des phénomènes physiques et chimiques, tels que les effets de turbulence créés par le déplacement des véhicules ou l'interaction avec la chimie des composés atmosphériques considérés.

Les modèles tridimensionnels eulériens reposent sur le calcul en chaque point d'une grille tridimensionnelle couvrant le domaine, de la solution d'un système d'équations aux dérivées partielles décrivant les phénomènes physiques. Ils conduisent donc généralement, à condition de disposer d'une grille bien adaptée à la situation (donc avec suffisamment de cellules), à une description relativement satisfaisante des phénomènes complexes. En revanche la résolution des équations les plus sophistiquées est souvent coûteuse, et la mise en œuvre de ces modèles ne permet pas de simuler un très grand nombre de conditions météorologiques afin d'établir des statistiques annuelles (et quid des percentiles ?).

Les modèles lagrangiens reposent sur le transport tridimensionnel de particules virtuellement éjectées par la source. A ces particules est affectée une masse, dont la contribution est au final sommée pour obtenir la concentration massique du polluant en un point et un temps donnés. Des procédures d'intégration en temps peuvent alors être mises en œuvre pour obtenir des indicateurs tels que les moyennes annuelles ou les percentiles. Si la reconstruction des champs de vent et de turbulence transportant les particules est de bonne qualité, et si suffisamment de particules sont émises, les résultats obtenus sont généralement très satisfaisants. En particulier ces méthodes sont bien adaptées au traitement de zones de relief complexe, ou influencées par des obstacles. En revanche cela se fait au détriment du temps de calcul, souvent prohibitif pour obtenir une précision suffisante.

L'intérêt des approches tridimensionnelles est démontré dans de nombreux articles, surtout dans des situations de relief très accidenté [1]. Des expériences plus récentes ([2], [3]) montrent tout le bénéfice de cette approche pour disposer d'une représentation réaliste de la répartition spatiale des concentrations de polluants dans des zones urbaines. Les corrélations sont généralement excellentes (de 0,7 à 0,8) et les erreurs souvent inférieures à 30%, peuvent cependant atteindre 70% en situation de vent faible, pour des moyennes horaires. Ces modèles sont donc bien adaptés aux études de scénarios prospectifs de réduction des émissions ou à l'étude de configurations routières telles que l'on peut en imaginer dans le cadre de l'élaboration de plans de déplacement urbains.

Cependant ce ne sont pas les techniques que nous privilégierons ici. En effet, afin de mener à bien une surveillance opérationnelle des axes routiers, il paraît indispensable d'accéder à des outils qui permettent d'évaluer les indicateurs réglementaires que sont les moyennes journalières et annuelles pour la plupart des polluants considérés, et les percentiles pour le dioxyde d'azote. Cela nécessite un grand nombre de simulations et donc des modèles performants en temps de calcul. De plus, il est reconnu que leur mise en œuvre sur un site réel, faute de données d'entrée suffisamment précises, ne permet pas de résoudre toutes les questions inhérentes à la pollution de proximité (notamment celles relatives à la modélisation de la turbulence).

Ces constats conduisent à écarter les méthodes tridimensionnelles au bénéfice de méthodes plus simples, qui dans tous les cas, ne seront utilisées qu'une fois calibrées en fonction du site.

4.2.4 Méthodes statistiques et géostatistiques

Il est enfin important de rappeler **l'importance des méthodes statistiques** basées sur des historiques de données utilisés pour analyser l'influence des variables météorologiques et des caractéristiques du trafic sur les concentrations environnantes : elles connaissent aujourd'hui un véritable essor. Les méthodes fondées sur des techniques de régression ou d'exploitation de séries temporelles sont couramment utilisées, notamment dans le cadre d'études d'exposition. On assiste également à un développement des méthodes basées sur les réseaux neuronaux. Ce type d'approche permet d'aboutir à la description des phénomènes en identifiant par exemple les zones d'impact et des règles de décroissance des concentrations en fonction de l'éloignement de la source. Il n'empêche que des limites existent bien et résident principalement : 1) dans la nécessité de disposer d'historiques conséquents de données, qui ne sont pas toujours disponibles, 2) dans la non prise en compte réelle, par nature, de la physique du problème, 3) dans leur spécificité vis à vis d'un site donné qui rend la méthode parfois difficilement transposable à un autre site.

Les méthodes de géostatistique permettent de reconstituer des cartographies et des indicateurs de pollution en fonction des données d'observation disponibles et de variables auxiliaires contribuant à expliquer les concentrations observées : densité de population, émissions, altitude... L'usage de ces méthodes est très répandu pour les oxydes d'azote, puisque des campagnes de tubes passifs d'envergure peuvent être réalisées pour alimenter ces modèles. Il en est de même pour le benzène. Quelques AASQA ont ainsi pu caractériser de manière très convaincante les abords de sites routiers [4, 5, 6, 7]. En revanche, la question du monoxyde de carbone, des particules et des métaux lourds ne peut être résolue par cette approche, pour des contraintes métrologiques.

Il s'agit donc bien d'une méthode d'évaluation de la qualité de l'air, qui permet de compléter de manière pertinente et de valoriser l'information délivrée par les stations et les campagnes de mesure. Cependant, cela nécessite de pouvoir réaliser l'extrapolation au niveau de l'année des résultats disponibles, généralement représentatifs de quelques quinzaines de jours. Cette question est traitée dans les travaux du GT « échantillonnage temporel » qui remettra un guide méthodologique courant 2008.

4.3 Les modèles de rue

Les modèles de rue permettent d'évaluer la qualité de l'air aux abords des axes routiers dans des configurations urbaines. Il s'agit de la situation typiquement représentée par les rues canyons (figure 2) et qui a fait l'objet de rapports LCSQA précédents [8]. Ces modèles sont largement décrits dans le rapport de 2004, et seuls les principaux et plus récents résultats sont rappelés dans le présent document.

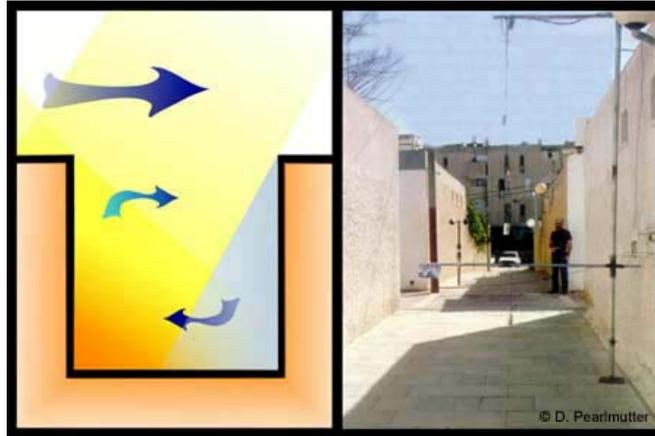


Figure 2 : Représentation schématique de l'écoulement dans une rue canyon ;
source : <http://ag.arizona.edu/OALS/ALN/aln47/pm2.html>

4.3.1 Bref état des lieux

Le principe de base des modèles de rue exprime la concentration dans la rue comme la somme d'une contribution provenant de sources situées à l'extérieur de la rue, qui est transportée par le vent synoptique (concentration de fond C_b), et d'une contribution provenant des émissions de la rue elle-même (ΔC).

C_b dépend de la concentration en polluant au niveau urbain ou régional. Elle peut être mesurée sur un site dit " de fond " ou calculée par un modèle adapté.

Dans une approche empirique, le calcul de ΔC se déduit des observations disponibles grâce aux campagnes de mesures, aux données de sites de proximité et parfois même aux résultats de simulations tridimensionnelles. Les premiers modèles ont été développés au début des années 70 et exprimaient le ΔC des concentrations de part et d'autre de la rue en fonction des émissions, du vent, des caractéristiques de la rue (hauteur des bâtiments et largeur) et de coefficients d'ajustement évalués empiriquement.

Une version « analytique » de cette approche, développée au début des années 80, permet de partiellement remplacer les coefficients empiriques par des formules analytiques. Les modèles les plus connus sont CPBM (Canyon Plume Box model) [9], OSPM [10] et SIRANE [11]. Ces modèles demeurent relativement simples d'usage, et intègrent de plus en plus de modules spécifiques permettant de rendre compte, de manière toujours très simplifiée, des phénomènes tels que la turbulence induite par les véhicules, la turbulence induite par les échanges avec l'écoulement synoptique en haut des bâtiments, les effets d'intersections. Ils ont fait l'objet d'évaluations par rapport à des données disponibles sur sites (voir les travaux menés dans le cadre du projet européen SATURN : <http://aix.meng.auth.gr/saturn/>) ou des essais en souffleries. Ils se comportent moins bien que les modèles tridimensionnels mais proposent des résultats corrects, notamment pour le calcul de grandeurs moyennées sur de longues périodes (saison, année).

Enfin, il faut évoquer les modèles paramétriques, qui reposent sur une base de données de résultats de simulation généralement issus de simulations 3D, pour des configurations jugées génériques. Les modèles paramétriques sont par construction

simples à utiliser, mais ils requièrent une évaluation soignée avant leur mise en œuvre, car ils ne peuvent pas exactement prendre en compte les spécificités d'un site (à moins que celui-ci ait servi à élaborer la base de données !). Le modèle STREET commercialisé en France par la société Targetting est le plus connu, très utilisé par les AASQA, pour élaborer des diagnostics relatifs à des études de scénario prospectifs.

4.3.2 Limites et remarques sur l'utilisation de modèles de rue

Les exercices d'intercomparaison menés ces dernières années sur différents modèles prouvent toujours la grande variabilité des résultats obtenus à partir de données d'entrée similaires. Ce problème a été mis en évidence lors de l'exercice d'intercomparaison européen TRAPOS (www2.dmu.dk/AtmosphericEnvironment/trapos/) dans lequel 24 modèles ont été testés sur différentes configurations de rue. De grosses différences ont été constatées [12] amenant les scientifiques à recommander :

- des travaux complémentaires sur l'incertitude des résultats issus des modèles de rue,
- le développement de jeux de données d'évaluation,
- l'élaboration de procédures standardisées, voire de normes, de bon usage des modèles de rue.

Ainsi l'application de ces modèles à des fins opérationnelles, en vue d'une meilleure gestion de la qualité de l'air **urbain, reste limitée à des travaux de première approche, qui doivent être complémentaires de la mesure**. Les phénomènes mis en jeu sont beaucoup trop complexes et variables dans le temps et l'espace pour être simplement représentés par des moyennes. Les conclusions issues d'exercices tels que ceux menés à l'échelle européenne sont prometteuses, puisque l'on constate que les modèles peuvent donner des résultats cohérents avec la mesure en quelques points, mais soulèvent aussi la question de leur calage. Dans une même ville, pour un calage donné, certaines rues pourront être très bien représentées et d'autres très mal. Cela pose des difficultés pour établir des conclusions pertinentes, compréhensibles par le public et interprétables par les évaluateurs de risques, sur la pollution de proximité. Il est donc recommandé de multiplier les évaluations par rapport à des données d'observations lors de la mise en œuvre d'un modèle de rue à l'échelle d'une agglomération et de toujours faire preuve de la plus grande prudence dans l'interprétation des résultats obtenus.

La qualité des résultats reste fortement conditionnée par la qualité des données d'entrée, notamment d'émission, dont on sait qu'elles sont souvent très difficiles à recenser de façon précise. Ainsi les facteurs d'émission liés au trafic routier font-ils encore l'objet de nombreuses interrogations.

4.3.3 Performances des modèles de rue

Celles-ci ont été largement discutées dans le rapport LCSQA 2004 dédié au sujet [8]. Pour mémoire, nous pouvons rappeler que plusieurs campagnes de mesure ont été menées en Europe, pour une meilleure compréhension des phénomènes de pollution dans les rues canyon. Elles reposent généralement sur l'instrumentation d'une rue de façon à évaluer les caractéristiques des variables météorologiques et les gradients de concentration verticaux et latéraux. Parmi les références les plus utilisées :

- Campagnes en Finlande à Elimaki (1995) et Helsinki (1997)
www.fmi.fi/research_air/air_9.html

- Campagnes dans les rues de Nantes (1999) [13]
- Campagnes en Allemagne : Cologne (1986) et Hanovre (2000 et 2002)
www.harmo.org/conferences/Proceedings/Sofia/publishedSections/Pages311to314.pdf
- Campagnes du projet DAPPLE à Londres (2003)
www.dapple.org.uk/Live_Resources/Leaflets/Leaflet2.pdf

4.4 Modèles gaussiens linéiques

4.4.1 Bref état des lieux

Les premiers modèles gaussiens linéiques ont été développés par General Motors Corporation et l'US-EPA dans les années 70. Ils ont été bâtis à l'aide de campagnes de mesures d'envergure, réalisées aux abords d'axes routiers principaux par la firme automobile. Les modèles de la gamme CALINE (3–4, <http://www.dot.ca.gov/hq/env/air/Documents/caline41989.pdf>), et HIWAY (US-EPA) ont été des précurseurs dans la formulation d'un modèle gaussien pour une source linéique, adapté au traitement de n'importe quelle direction de vent (initialement les modèles étaient limités au traitement des directions de vent perpendiculaires à la source).

Dans CALINE3 et CALINE4 (modèles encore très utilisés et référencés par l'USEPA), le tronçon routier est divisé en une série d'éléments pour lesquels des concentrations élémentaires sont calculées, celles-ci étant ensuite sommées pour estimer la contribution totale du tronçon à la concentration en un point récepteur. La longueur de ces éléments est réajustée en fonction de leur distance au point récepteur. Chaque élément est ensuite modélisé comme une ligne d'émission équivalente, perpendiculaire à la direction de vent, pour simuler des émissions se dispersant sous le vent. La zone se situant directement au-dessus de l'axe routier est considérée comme soumise à des émissions constantes et une turbulence uniforme. Il s'agit de la zone de mélange, dans laquelle les effets de turbulence mécanique induite par le déplacement des véhicules, et de turbulence thermique induite par les sorties de pots d'échappement dominant les effets de dispersion. Un modèle, défini empiriquement à l'aide des données des expériences General Motors, permet d'estimer la courbe des coefficients de dispersion verticale dans la zone de mélange. Celle-ci est utilisée pour estimer le coefficient de dispersion verticale σ_z dans une zone proche de la source. Au-delà le coefficient est ajusté en fonction de la distance à la source ce qui permet de bien prendre en compte les effets de turbulence mécanique et thermique induits par le trafic. Enfin, comme dans tout modèle gaussien classique, les coefficients de dispersion horizontale sont estimés en fonction de la déviation standard de la direction de vent.

L'approche se limite cependant aux situations de vent constant et a fortiori aux situations de terrain non complexes. Les intersections de routes sont également traitées de manière simplifiée. **Le modèle CAL3QHC** [14], également recommandé par l'US-EPA est une extension de CALINE3 pour le traitement des intersections et des points de congestion.

Le modèle GFLSM [15, 16] repose sur une solution analytique de l'équation de diffusion pour une source linéique de longueur finie. On obtient ainsi une formulation gaussienne pour laquelle les coefficients de dispersion utilisés sont issus d'une paramétrisation dépendant de la classification de la stabilité atmosphérique en classes de Pasquill.

Le modèle finlandais CAR-FMI [17] repose sur une approche similaire à celle de GFLSM, mais les coefficients de dispersion en dehors de la zone influencée par le déplacement des véhicules sont des fonctions de la longueur de Monin-Obukhov, de la vitesse de friction et de la hauteur de mélange. Dans la zone perturbée par le déplacement des véhicules, les coefficients de dispersion sont calibrés grâce aux données de l'expérience de référence SF6 de Général Motors.

Le modèle américain UCD2001 [18] repose sur une formulation analytique non gaussienne de la concentration en un point. Ce choix est justifié par les auteurs par le fait que pour une source à proximité du sol, et soumise à des effets de turbulence importants l'hypothèse de répartition gaussienne des concentrations est sans doute abusive. La source linéique est assimilée à un ensemble de pavés tridimensionnels formés d'un nombre fini de points émetteurs situés au-dessus de la route. La répartition des points sources permet de représenter une source non uniformément répartie dans les trois dimensions. Les paramètres de dispersion sont calés empiriquement sur l'expérience SF6 de Général Motors.

4.4.2 Limites et remarques sur l'utilisation des modèles

Les limites des modèles gaussiens linéiques sont les mêmes que celles des modèles gaussiens « ponctuels » : ils ne s'appliquent pas aux terrains complexes ou parsemés d'obstacles, et sont généralement peu adaptés aux vents faibles. De plus, comme expliqué précédemment, l'approximation des concentrations dans la zone proche de la route peut s'avérer délicate, les phénomènes de dispersion passive étant dominés par la turbulence induite par les véhicules. Enfin, ces modèles sont généralement assez peu performants pour des vents parallèles à la route (par construction). Leur principal atout est la simplicité de mise en œuvre, les faibles temps de calculs nécessaires, et des performances correctes lorsque les indicateurs recherchés sont des moyennes sur de longues périodes. La recherche des valeurs extrêmes et donc des dépassements s'avère plus délicate.

4.4.3 Performances des modèles gaussiens linéiques et analytiques

4.4.3.1 Références pour la validation pour une situation d'axe routier important isolé
Il est intéressant de noter que la problématique liée aux axes routiers de grande importance, ouverts et en milieu inter-urbain, fait toujours l'objet de campagnes de mesures d'envergure, aux Etats-Unis, en Asie et en Europe depuis près de 30 ans. Celles-ci se justifient pour partie par la recherche d'un modèle performant et correctement calibré, mais aussi par la définition et la vérification de facteurs d'émissions « réellement » représentatifs des conditions de roulage.

Pour information, sont listées ci-dessous les références de quelques-unes des campagnes de mesures les plus emblématiques, à partir desquelles la plupart des modèles utilisés et utilisables à ce jour ont été établis :

- **Etude SF6 General Motors (1975, Michigan)**. Cette étude a servi de référence dans la plupart des modèles cités pour calibrer la formulation des coefficients de dispersion. [19]
- **Campagne US-EPA (1978, San Diego)** : mesure d'ozone et de dioxyde d'azote. [19]
- Campagne SF6 Caltrans Highway 99 (1981-82, San Diego), [19]
- Campagne CO à Madras (1989-90), [16]

- Plusieurs campagnes de mesures ont été menées en Finlande : **Elimaki (1995)** ; mesure des concentrations de NO, NO₂, NO_x et ozone de part et d'autre d'un axe routier à trois hauteurs différentes (3,5, 6 et 10m) ; [20]

- **Campagne BABII réalisée en Allemagne (2001)**, qui a permis de mesurer dioxydes d'azote, PM, monoxyde de carbone, ozone sur différents transects d'un axe principal. Des mesures fines de paramètres météorologiques sont également disponibles, de même que des données précises de caractérisation du trafic [21].

4.4.3.2 Exemples de performances des modèles dans une situation d'axe routier isolé

Une comparaison CAR-FMI et CALINE4 a été menée sur Eimaki [20] : les modèles sont évalués par rapport à des mesures situées à 17 et 34 de la route pour des hauteurs de prélèvement de 3,5 et 6m respectivement. Les bonnes performances des deux modèles sont mises en avant si l'on considère les indicateurs statistiques classiques (Corrélation, erreur quadratique moyenne, biais, fraction de cas pour lesquels le rapport de la concentration prédite sur la concentration mesurée est compris entre 0,5 et 2). Cela vaut en particulier pour des indicateurs moyennés dans le temps et dans l'espace. Les corrélations obtenues varient de 0,7 à 0,8. Un léger avantage est à noter pour CALINE4 sur presque l'ensemble des indicateurs. Près de la route (17m) les performances se dégradent. Cependant à cette distance, la turbulence induite par les véhicules n'est plus prédominante. Ainsi il est peut-être possible d'attribuer le résultat à une mauvaise évaluation des hauteurs d'émission (autre facteur qu'il est primordial de connaître pour réaliser une bonne modélisation). Les modèles ont également tendance à surestimer les concentrations à des hauteurs plus élevées. Une dégradation des performances apparaît pour les vents inférieurs à 2m/s et quasiment parallèles à la route. Ce résultat est conforme aux limites connues des modèles gaussiens. Aucun résultat n'est fourni sur les indicateurs de pics et de dépassement (percentiles) traditionnellement beaucoup plus difficiles à modéliser.

Sivacoumar et al, 1999 [16] ont réalisé une évaluation de GFLSM pour le monoxyde de carbone, lors de la campagne de Madras. On peut noter pour ce polluant une très nette décroissance des concentrations dans les 200 premiers mètres (facteur 55) et facteur 2 dans les 60 premiers mètres. Une sous-estimation quasi-systématique des concentrations simulées est à déplorer. L'erreur est de l'ordre de 30%, et le facteur de corrélation est de l'ordre de 0.5. La variabilité des concentrations n'est pas bien reproduite avec le modèle. Le pourcentage de prédictions correctes dans un rapport 2 par rapport aux observations reste assez élevé (de l'ordre de 82%).

Le modèle analytique non gaussien UCD2001 est comparé aux observations de la campagne SF6 de General Motors et à CALINE3 et CALINE4 [18]. Des améliorations sensibles sont notées par rapport aux modèles gaussiens classiques, notamment pour la simulation des pics. Cependant, les auteurs reconnaissent que pour obtenir des performances similaires pour un site autre que celui de la campagne de General Motors, un recalibrage de ce modèle demeure nécessaire.

5. Conception du site Internet en vue de l'élaboration d'une base de connaissances française

5.1 Description

Un des objectifs de l'étude est de recueillir des données issues des AASQA ou d'autres organismes, notamment européens au travers du site web du LCSQA et de rendre disponibles ces données au travers du même site.

A la suite du travail bibliographique, deux recueils de données ont été constitués. Dans un premier temps, seules les données composées des études directement exploitables (d'après les critères définis dans la partie précédente) seront mises en ligne sur le site web du LCSQA.

Le site Internet sera composé de plusieurs volets qui :

- recensent les études en proximité des axes routiers (fiches de synthèse et données de campagne téléchargeables)
- mettent à disposition des outils statistiques d'évaluation des modèles de pollution de proximité
- permettent la discussion sur des problèmes spécifiques à cette thématique via un forum de discussion

5.2 Spécifications

Le site web du LCSQA a été complètement revu au cours de l'année 2007 afin de disposer notamment d'un outil collaboratif² permettant de définir deux nouveaux types de contenus qui peuvent à leur tour être facilement exploités pour:

- > L'affichage,
- > La recherche (filtrage de certains types de contenus avant de rechercher dans le contenu lui-même),
- > La création de nouveaux types de contenus plus riches.

5.2.1 Principe

Dans un premier temps, deux nouveaux types de contenus ont été conçus :

1. Campagnes de mesures,
2. Modèle.

Dans cette étude, un troisième type de contenu a été réutilisé pour accueillir les outils de validation au travers du contenu Outil.

Une fois ces types de contenus créés par un administrateur du site web, l'utilisateur³ peut créer des contenus de chacun de ces types. Ainsi, il commencera par créer des contenus de type campagne en renseignant les champs prévus puis en créant des outils de validation de la même façon et enfin en créant des contenus de type Modèle qu'il reliera⁴ aux campagnes et / ou modèles créés auparavant.

² Dans le sens où plusieurs acteurs peuvent travailler ensemble directement en ligne.

³ L'utilisateur doit posséder les droits suffisant pour réaliser ce type d'action.

⁴ L'action de liaison se fera en choisissant les campagnes dans une liste de campagnes existantes.

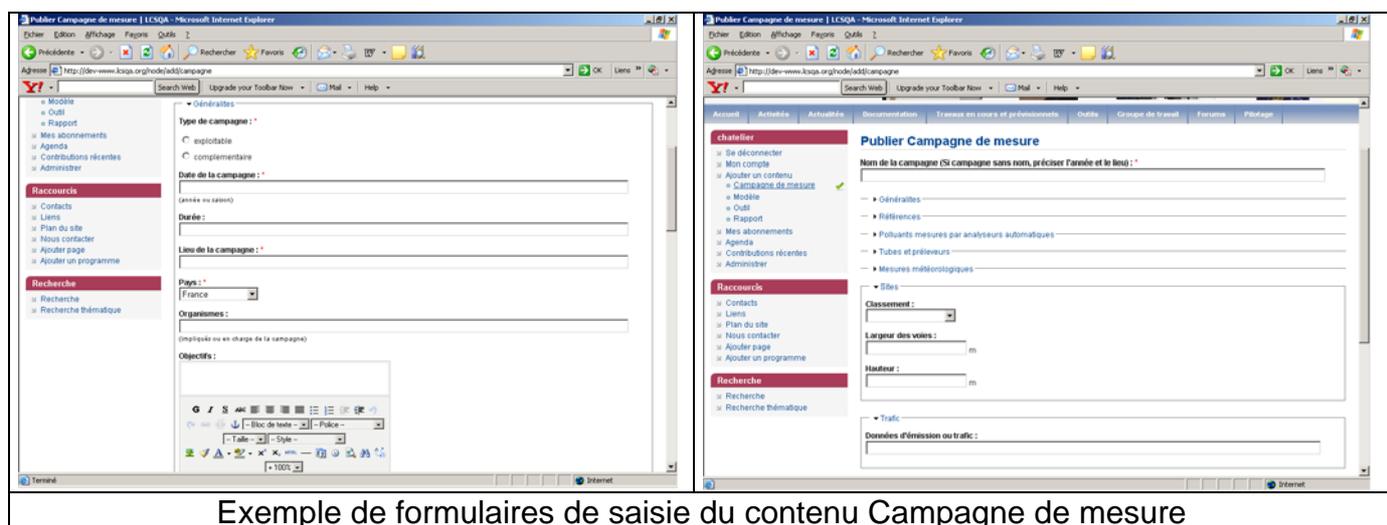
5.2.2 Contenu Campagne de mesure

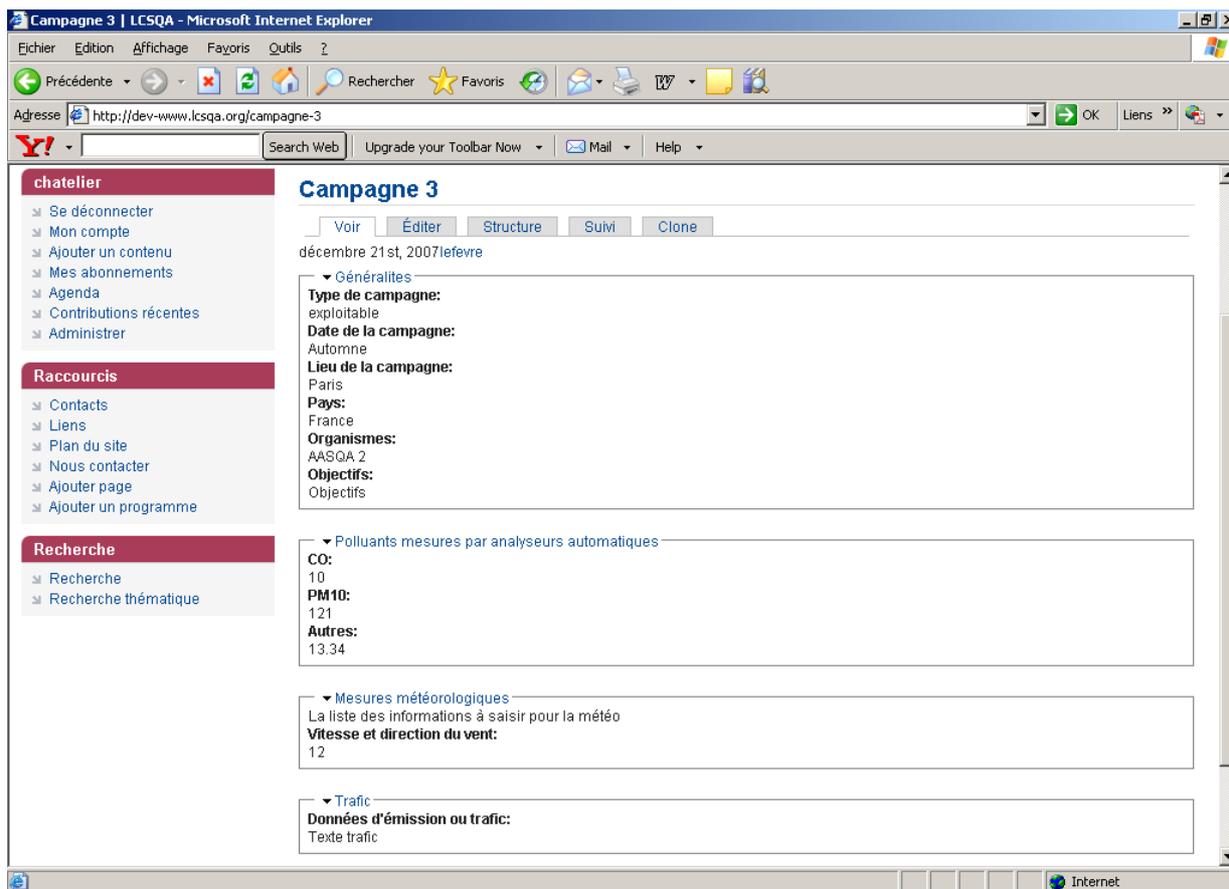
Une campagne de mesure est caractérisée par les éléments suivants :

Groupe	Obligatoire	Champ	Type	Commentaire
	OUI	Nom de la campagne	Chaîne	
Généralités	OUI	Type de campagne	Enuméré	> Exploitable : seules les campagnes identifiées comme exploitables pourront être associées à un modèle > Complémentaire
	OUI	Date de la campagne	Texte	Une saison peut être saisie
		Durée	Texte	Pas de format particulier
	OUI	Lieu de la campagne	Texte	Pas de format particulier
	OUI	Pays	Enuméré	Liste prédéfinie de pays
	NON	Organismes	Texte	Pas de format particulier
	NON	Objectifs	Texte	Saisie type page web
	NON	Schéma d'ensemble	Texte	Saisie type page web
	NON	Description du site et stratégie d'échantillonnage	Texte	Saisie type page web
Références	NON	Référence biblio	Texte	Pas de format particulier
	NON	Site Internet	Texte	Pas de format particulier
	NON	Contacts	Texte	Pas de format particulier
Polluants mesurés par analyseurs automatiques ⁵	NON	Catégorie de polluants	Enumérés	Les polluants listés sur le site web du LCSQA.
	NON	Benzène	Texte	Valeur de la résolution temporelle
	NON	CO	Texte	Valeur de la résolution temporelle
	NON	NO, NO2	Texte	Valeur de la résolution temporelle
	NON	PM 10	Texte	Valeur de la résolution temporelle
	NON	Autres	Texte	Nom du polluant + résolution

⁵ Il s'agit d'indiquer dans cette rubrique la résolution temporelle de la mesure pour chacun des polluants

Groupe	Obligatoire	Champ	Type	Commentaire
Tubes et préleveurs	NON	Catégorie de polluants	Enumérés	Les polluants listés sur le site web du LCSQA.
	NON	Benzène	Texte	Valeur de la résolution temporelle
	NON	NO2	Texte	Valeur de la résolution temporelle
	NON	Autres	Texte	Nom du polluant + résolution
Mesures météorologiques	NON	Vitesse et direction du vent	Texte	Pas de format particulier
	NON	Température	Texte	Pas de format particulier
	NON	Autres	Texte	Pas de format particulier
Site	NON	Classement	Enuméré	> Canyon > Intersection rurale > Intersection urbaine > Multi-sites > Ouvert rurale > Ouvert urbain > Rond-point > Tunnel
	NON	Largeur des voies	Numérique	Exprimé en m
	NON	Hauteur du bâti	Numérique	Exprimé en m
Trafic	NON	Données d'émission ou trafic	Texte	Pas de format particulier



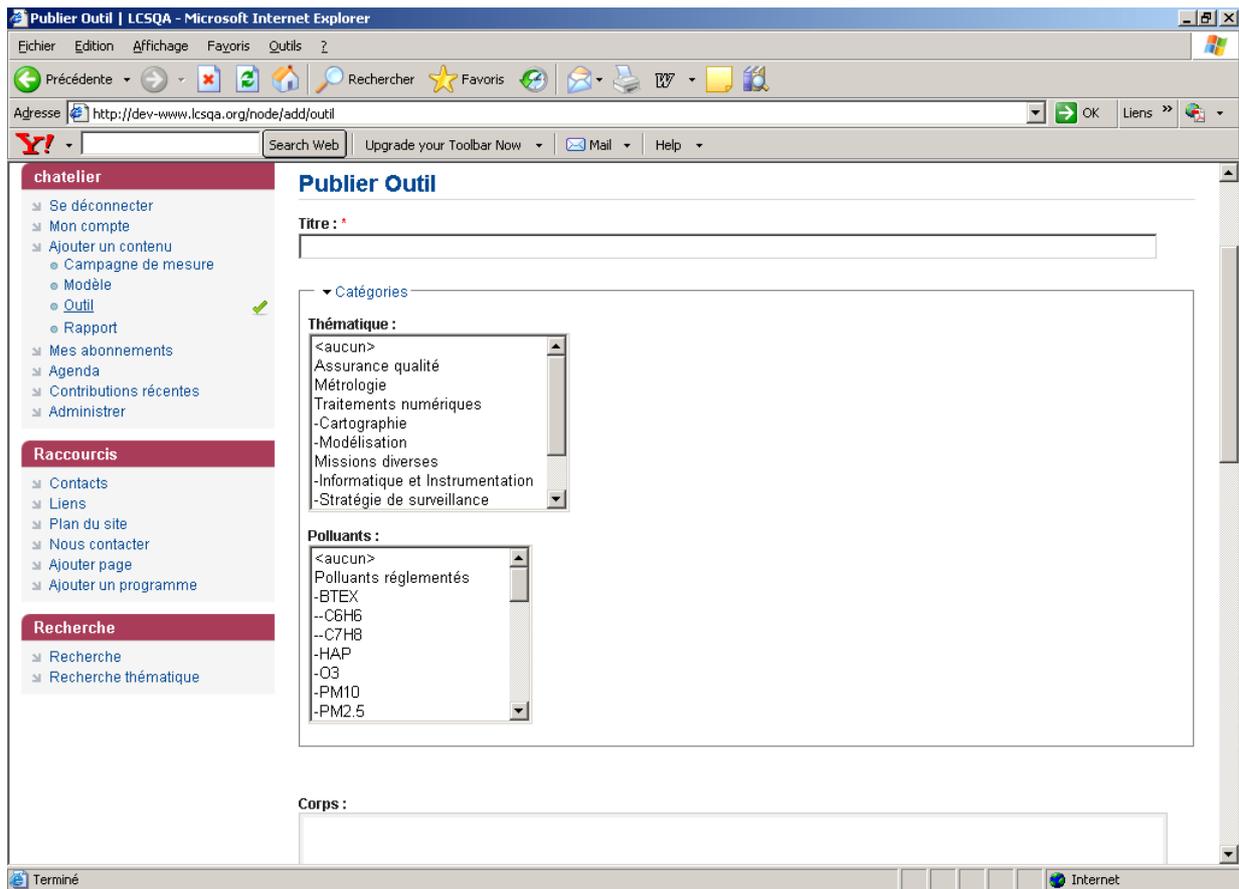


Un exemple d'affichage d'une campagne saisie au travers du site web

5.2.3 Contenu Outil

Un outil est caractérisé par les champs suivants :

Groupe	Obligatoire	Champ	Type	Commentaire
	OUI	Titre	Chaîne	Le nom de l'outil
Catégories	NON	Thématique	Enuméré	Les thèmes listés sur le site web du LCSQA.
	NON	Polluants	Enuméré	Les polluants listés sur le site web du LCSQA.
	NON	Corps	Texte	Saisie type page web
Documents	NON	Documents	Fichier(s)	<i>txt doc pdf ppt zip jpg</i>

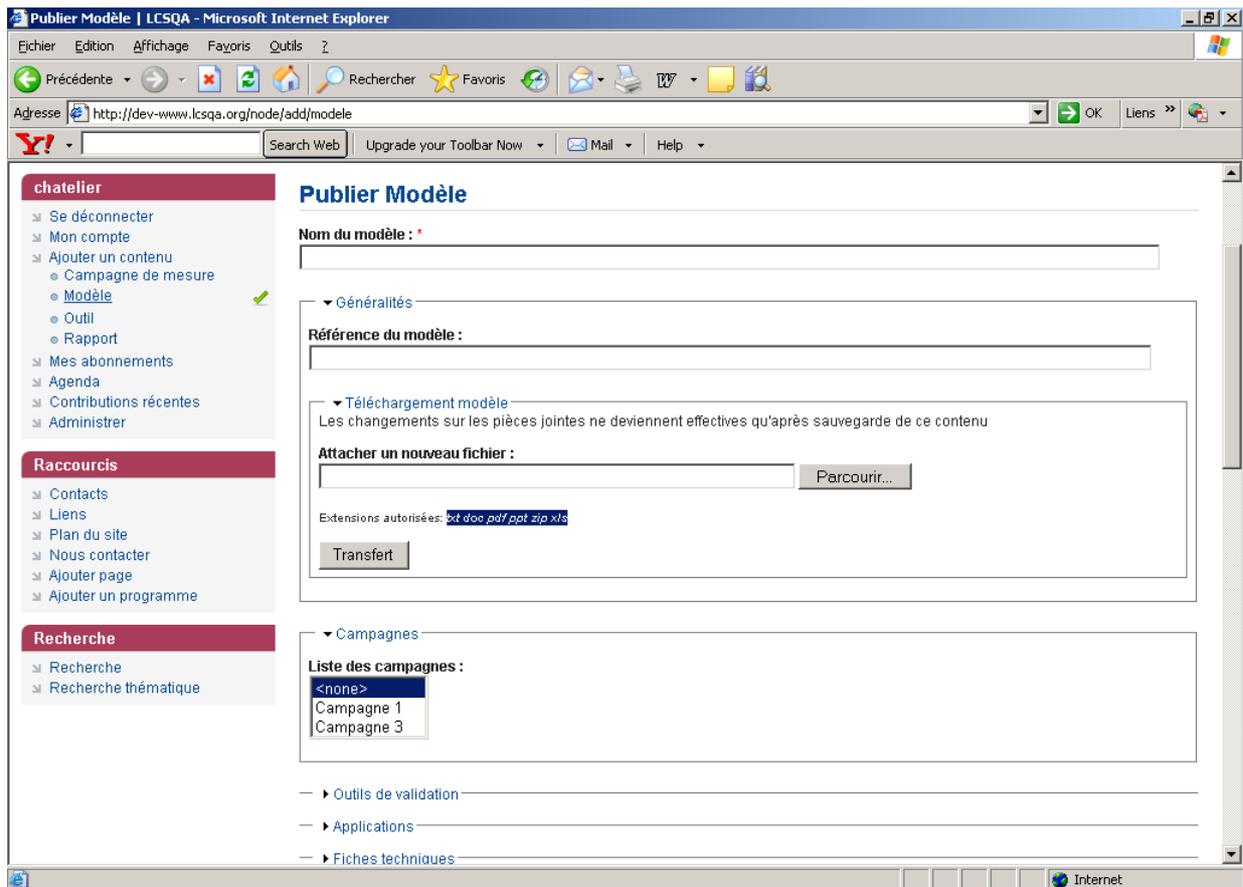


Un exemple de formulaire de saisie d'un outil au travers du site web

5.2.4 Contenu Modèle

Un modèle est caractérisé par les champs suivants :

Groupe	Obligatoire	Champ	Type	Commentaire
	OUI	Nom du modèle	Chaîne	
Généralités	NON	Téléchargement modèle	Fichier(s)	Extensions autorisées : <i>txt doc pdf ppt zip xls</i>
Campagnes	NON	Campagnes	Campagne	Sélection multiple de campagnes exploitables
Outils de validation	NON	Outils	Outil	Sélection multiple d'outils par mis tous les outils existant sur le site LCSQA
Applications	NON	Téléchargement	Fichier(s)	Extensions autorisées : <i>txt doc pdf ppt zip xls csv</i>
Fiches techniques	NON	Téléchargement	Fichier(s)	Extensions autorisées : <i>txt doc pdf ppt zip xls csv</i>
	NON	Commentaires	Texte	Saisie type page web



Un exemple de formulaire de saisie d'un modèle au travers du site web

5.3 Mise en œuvre

La mise en place de cette nouvelle architecture a nécessité l'ajout des modules DRUPAL suivants :

1. CCK Fieldgroup Tabs
2. Fieldgroup

L'architecture a été développée sur un serveur dédié (<http://dev-www.lcsqa.org>) indépendant du serveur de production.

Suite à l'introduction des nouveaux types de contenus (Campagne et Modèle), le module de recherche thématique dispose à présent des possibilités de recherche sur ces contenus comme le montre l'exemple suivant :

Résultat de la recherche

Voix Éditer Clone Exporter

Type: Est l'un de
Thématique: Tous
Polluant: Tous

Assurance qualité
Métrologie
Traitements numériques
-Cartographie
-Modélisation
-Missions diverses
-Informatique et Instrumentation
-Stratégie de surveillance

Polluants réglementés
-BTEX
-C6H6
-C7H8
-HAP
-O3
-PM10
-PM2.5

Soumettre

Type de contenu	Titre	Année
Campagne de mesure	Campagne 2	2007
Campagne de mesure	Campagne 1	2006
Campagne de mesure	Campagne 3	2005

5.4 Suite des travaux

Une fois le développement stabilisé, ces développements ont été portés sur un environnement de test (<http://test-www.lcsqa.org>) sur lequel plusieurs membres de l'étude ont pu réaliser des tests afin de vérifier la conformité du développement avec les attentes de l'étude. A l'issue de ces tests et des remarques soulevées, des correctifs seront apportés avant livraison sur le site de production grâce aux fonctions d'export. Ces exports de données seront naturellement exempts des données fictives créées pour les besoins des tests.

6. Tests préliminaires des modèles de pollution de proximité automobile

L'objectif est de fournir, à terme, une inter-comparaison de différents modèles couramment utilisés dans le cadre de l'évaluation de la pollution de proximité automobile. Dans un premier temps nous proposons de réaliser des calculs sur un ou deux sites de référence pour mettre en place le protocole d'inter-comparaison. Nous avons choisi de réaliser les calculs préliminaires sur un cas d'étude provenant du programme européen Trapos [22]. Le site étudié est une rue canyon ayant fait l'objet d'une étude de longue durée. Nous proposons d'appliquer plusieurs modèles : OSPM, CALINE 4, SIRANE, ADMS-Urban, sur ce jeu de données.

6.1 Site Schildhornstrasse (Berlin)

Le site retenu est situé à Berlin. Il s'agit d'une rue canyon de quatre voies de circulation soumise à un trafic journalier intense de 45 000 véhicules/jour. Ce boulevard est un accès majeur au périphérique berlinois. La rue est large de 26 m. La hauteur des bâtiments est de 19 m sur le côté nord-est de la rue et de 22m sur le côté sud-ouest. La rue est orientée avec un angle de 120° sur un axe nord-sud. Les trottoirs font approximativement 4 m de large et des places de parking sont présentes de chaque côté de la rue (Figure 6)

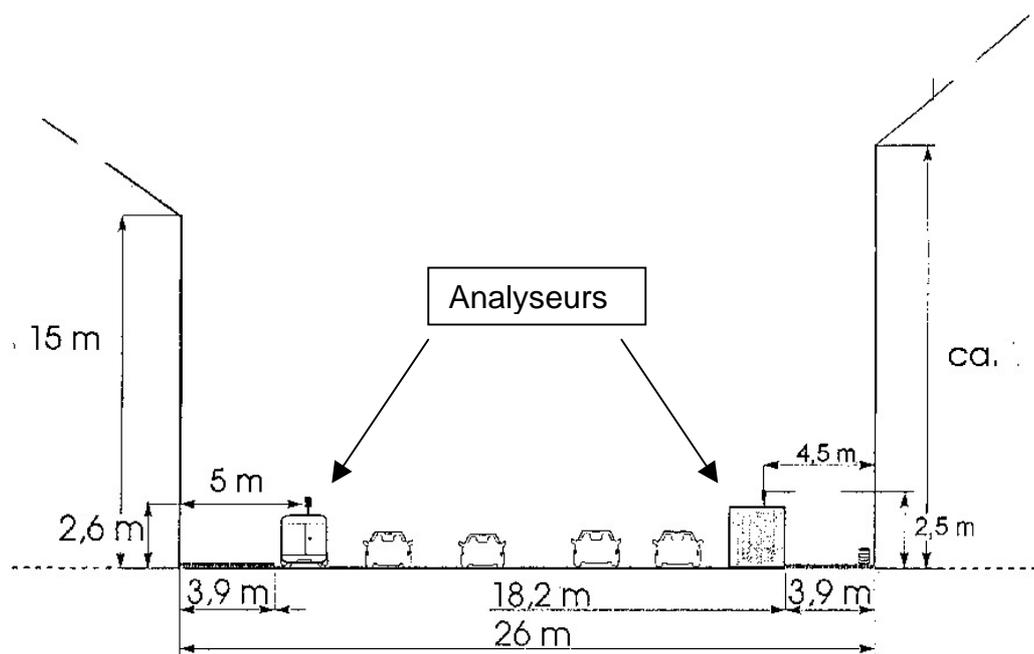


Figure 6 : Configuration de la rue canyon Schildhornstrasse

Les données utilisées pour la simulation portent sur une année de mesure sur la période de janvier 1995 à décembre 1995. Les mesures ont été réalisées par analyseurs automatiques de chaque côté de la rue. Durant la même période, le trafic

automobile a été compté. Les polluants mesurés sont les NO_x, NO₂, CO, benzène, toluène. Cependant les calculs que nous avons réalisés portent exclusivement sur l'exploitation des données de NO₂.

Des mesures de pollution urbaine de fond ont été obtenues sur un site situé à environ 1.5 km. Les données météorologiques proviennent d'une station de mesure positionnée 10 m au dessus des toits de la rue.

Les données météorologiques, en moyenne horaire, comprennent :

- la vitesse et direction de vent,
- le rayonnement solaire,
- la température

Les concentrations en polluants sont fournies en moyennes horaires, elles comprennent la mesure de la concentration urbaine de fond et la mesure dans la rue canyon.

Les données de trafic comprennent le nombre de véhicules circulant par heure au cœur de la rue décliné en quatre catégories : véhicule léger, véhicule utilitaire léger, camion et bus.

6.2 Modèles testés

Dans le cadre de l'inter-comparaison nous avons choisi de réaliser les calculs préliminaires au moyen de quatre modèles : OSPM, CALINE 4, SIRANE, ADMS-Urban.

6.2.1 OSPM (Operational Street Pollution Model)

6.2.1.1 Généralités

OSPM est un modèle de caractérisation de la pollution de proximité automobile développé par le National Environmental Research Institute, Department of Atmospheric Environment [23]

Le modèle est un modèle analytique développé sur des considérations physiques simples caractérisant l'écoulement dans une rue canyon.

La concentration est calculée à l'aide d'un modèle de boîte avec comme raffinement une intégration des contributions directes qui s'appuie sur une description rigoureuse du comportement du vent dans le canyon. La concentration de recirculation est également calculée à l'aide d'un modèle de boîte appliqué à une zone trapézoïdale sur laquelle s'étend le tourbillon (Figure 7).

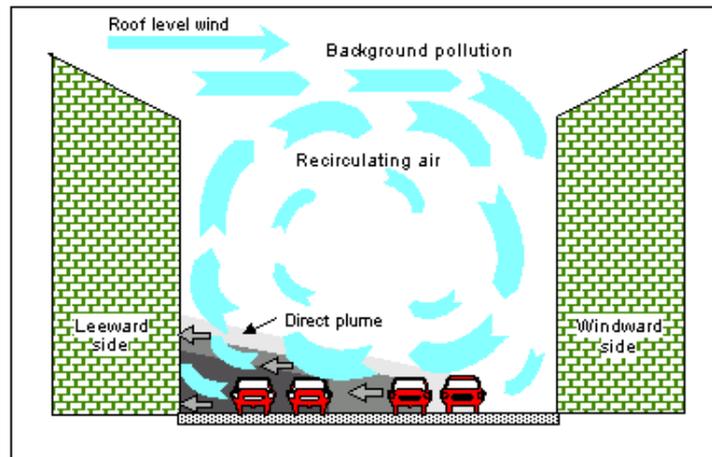


Figure 7 : définition de la boîte de calcul dans OSPM

6.2.1.2 Modèle

Le modèle est bâti sur un schéma double de prise en compte de la pollution dans la rue canyon. La première composante concerne les retombées immédiates du panache sur le côté de la rue (contribution directe), la deuxième composante concerne la concentration du composé brassé dans la rue et qui retombe sur le côté (contribution de recirculation).

La contribution directe est calculée à l'aide d'un panache gaussien. Le modèle formule l'hypothèse d'une distribution uniforme des émissions dans la rue. Les émissions sont traitées comme un ensemble de sources linéiques perpendiculaires à la direction du vent au niveau de la rue :

Dispersion verticale :

$$\sigma_z(x) = \sigma_w \frac{x}{u_b} + h_0 \quad (\text{eq. 1})$$

avec u_b vitesse du vent

σ_z et σ_w écart – type de diffusion horizontale et verticale

h_0 hauteur de la zone de prémélange ou dispersion initiale

Contribution directe :

$$C_d = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{Q}{W \sigma_w} \exp\left[-\frac{h_0 + (\sigma_w / u_b) W}{h_0}\right] \quad (\text{eq. 2})$$

avec W largeur de la rue

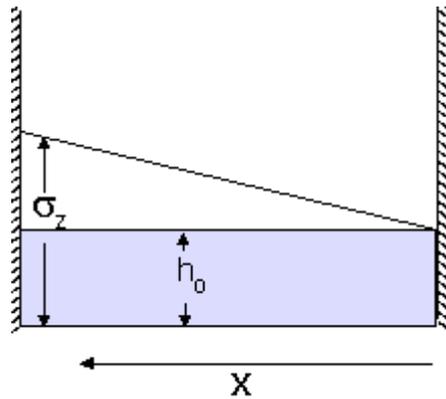


Figure 8 : schéma du modèle de boîte

La contribution de la recirculation est modélisée à l'aide d'un modèle de boîte. L'hypothèse porte sur la forme trapézoïdale de la boîte. On considère l'hypothèse du flux de polluants entrant dans la boîte égal au flux sortant. On considère également un mélange homogène des polluants dans la boîte (Figure 9).

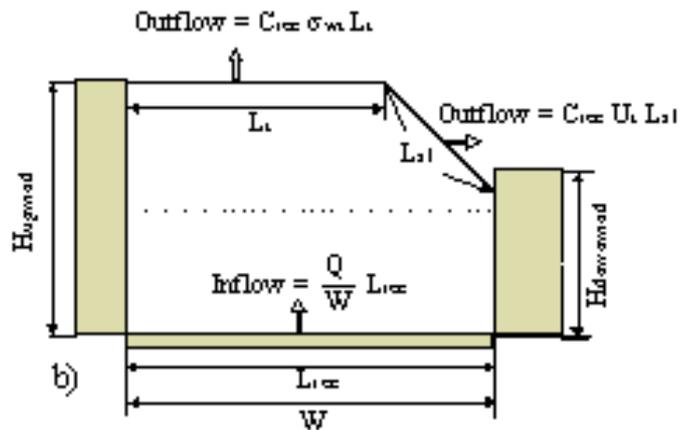


Figure 9 : Schéma du modèle de recirculation

La concentration en NO_2 est calculée en tenant compte des concentrations en NO - NO_2 - O_3 . Le modèle utilise une équation de chimie simplifiée de la formation NO - NO_2 - O_3 (eq. 3)



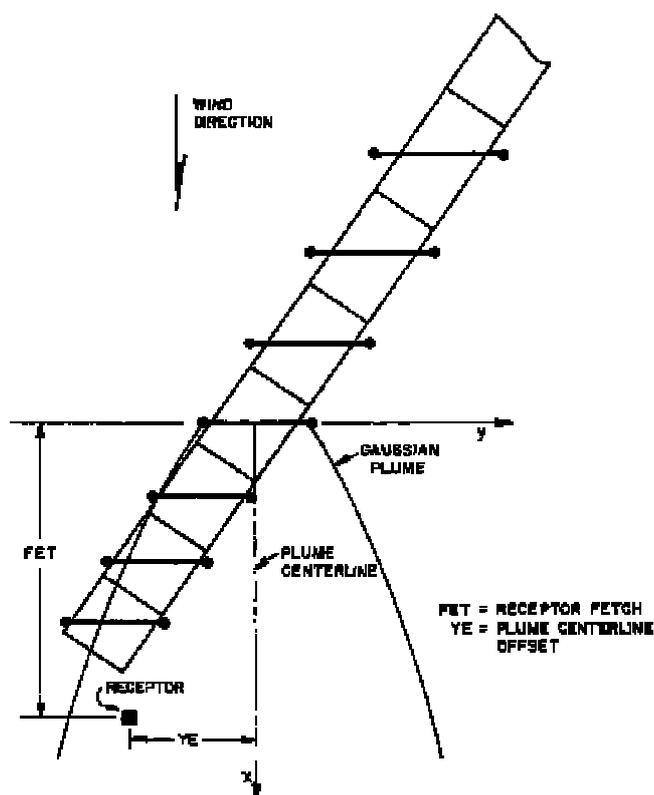
6.2.2 CALINE 4

CALINE est un modèle de dispersion linéique développé par l'état américain de Californie. CALINE 4 [24] a été conçu pour simuler l'impact du monoxyde de carbone (CO) provenant de la circulation automobile. Cependant le traitement passif du polluant, ainsi que la possibilité d'entrer ses propres facteurs d'émission, permet d'utiliser CALINE4 pour simuler la concentration en proximité automobile d'autres polluants. CALINE 4 est un modèle gaussien linéique. L'utilisateur doit définir :

- la géométrie et les caractéristiques de la rue,
- les paramètres météorologiques en moyenne horaire (vitesse, direction du vent, écart type de la direction du vent, température, stabilité atmosphérique, hauteur de mélange),
- la concentration de fond en polluant en moyenne horaire,
- le nombre horaire de véhicules avec le facteur d'émission correspondant.

Le modèle est conçu pour fournir la concentration le long de l'axe étudié.

La concentration est calculée à l'aide d'un panache gaussien. Le modèle formule l'hypothèse d'une distribution uniforme des émissions dans la rue. Les émissions sont traitées comme un ensemble de sources linéiques perpendiculaires à la direction du vent au niveau de la rue (Figure 10) :



ELEMENT SERIES REPRESENTED BY
SERIES OF EQUIVALENT FINITE LINE SOURCES

FIGURE 2

Figure 10 : schéma du modèle gaussien de CALINE 4

Ce modèle s'applique de préférence à des axes ouverts ; il doit être utilisé dans des conditions où le vent est perpendiculaire à l'axe.

6.2.3 ADMS –Urban

ADMS Urban est un système intégré de modélisation de la pollution atmosphérique à l'échelle urbaine, développé depuis 1994 par le CERC [25] Il est commercialisé en France par la société Numtech.

ADMS appartient à la catégorie des modèles gaussiens dits de « seconde génération ». Contrairement aux modèles de première génération définis à partir de relations calées empiriquement sur des campagnes de mesures de référence, les modèles de deuxième génération utilisent des profils de similarité de la couche limite atmosphérique afin de décrire la turbulence et la hauteur de couche limite.

Les paramètres météorologiques sont ainsi évalués à l'aide d'un pré-processeur météorologique qui calcule les conditions de dispersion à l'aide d'un certain nombre de grandeurs basiques telles que le vent, la température, l'humidité relative ou la nébulosité.

La dispersion des polluants est simulée à l'aide d'une formulation gaussienne (basée sur des coefficients de dispersion), le traitement des conditions fortement instables faisant l'objet d'un traitement spécifique. Les coefficients de dispersion sont calculés analytiquement en fonction des paramètres météorologiques tels que la longueur de Monin-Obukov, la vitesse de friction et les flux de chaleur.

Le modèle ADMS Urban permet l'estimation de la pollution de fond urbaine via la représentation du tissu urbain par des sources surfaciques (ou grid sources) et par des sources ponctuelles pour la pollution industrielle. Pour le traitement de la pollution dans chacune des rues considérées comme sources individuelles (Road source), un calcul spécifique de concentration est réalisé à l'aide du modèle OSPM (intégré dans ADMS Urban) et de la concentration de fond estimée au niveau de la rue considérée.

ADMS-Urban intègre un module de photochimie qui permet de prendre en compte les interactions entre NO, NO₂ et O₃ selon Venkatram et al. (1994) [26], les COV étant représentés par une espèce générique. ADMS Urban propose également un modèle de corrélation simple NO_x/NO₂ (Middleton, 1996) [27].

L'évaluation de ce modèle a été menée de façon intensive par le CERC, notamment sur des jeux de données de la ville de Londres : Owen, 2000 [28], DEFRA, 2003a, [28], DEFRA, 2003b, [29].

6.2.4 SIRANE

Le modèle SIRANE est développé au Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique de l'Ecole Centrale de Lyon. Les travaux de recherche qui ont conduit au développement de ce modèle ont été réalisés dans le cadre de la thèse de doctorat de Lionel Soulhac (2000) [30]. Nous ne présentons ici qu'une description générale du modèle et de ses applications.

Le modèle SIRANE est un modèle gratuit de dispersion atmosphérique en milieu urbain à l'échelle d'un quartier (échelle de l'ordre de 1km). Il permet de décrire les concentrations en polluants dans des zones constituées essentiellement de rues bordées de bâtiments. Le modèle SIRANE couvre une échelle spatiale située entre l'échelle de la rue, où l'on s'intéresse plutôt à la répartition des polluants à l'intérieur même de cette rue, et l'échelle de l'agglomération, où il n'est plus possible de

modéliser explicitement l'effet de chaque bâtiment. Il permet donc de fournir une cartographie de la pollution à l'échelle d'un quartier (cf. Figure 11). D'un point de vue temporel, SIRANE est adapté à des échelles caractéristiques de l'ordre de l'heure. Le modèle SIRANE traite différents types d'émissions à l'aide de sources linéiques (représentant par exemple une voie de circulation) et de sources ponctuelles (par exemple une cheminée).

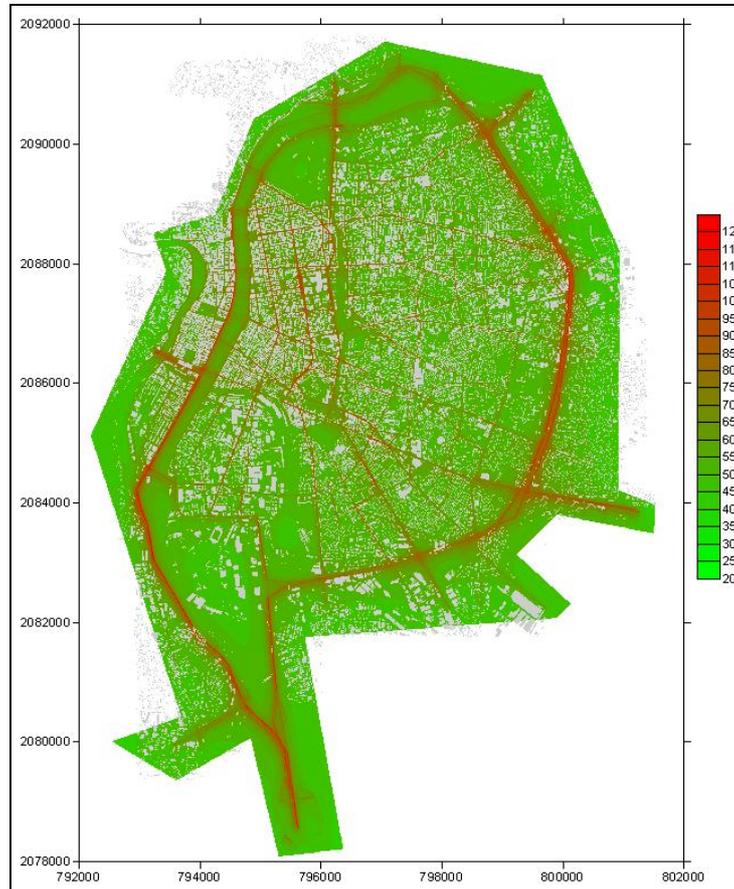


Figure 11 : exemple de cartographie de la concentration moyenne annuelle en NO2 ($\mu\text{g.m-3}$) sur le centre de l'agglomération de Lyon

Le modèle SIRANE permet de prendre en compte les principaux effets qui agissent sur la dispersion des polluants à l'échelle d'un quartier :

- Phénomènes de rue-canyon (confinement des polluants entre les bâtiments) ;
- Echange des polluants au niveau des carrefours ;
- Transport des polluants au-dessus des toits et des polluants issus de sources ponctuelles par dispersion gaussienne ;
- Prise en compte des caractéristiques du rejet (température et vitesse du rejet), calcul de surhauteur de panache ;
- Prise en compte des caractéristiques du vent extérieur (vitesse, direction, turbulence, stabilité thermique). Le vent est supposé uniforme sur la zone ;
- Modélisation de transformations chimiques simples (cycle de Chapman NO NO₂ O₃) ;
- Modélisation de la dispersion des particules ;

- Modélisation du lessivage par les précipitations ;

SIRANE est un outil « opérationnel », qui utilise des modèles théoriques et des formulations simplifiées des différents phénomènes. Il est donc adapté au traitement d'un grand nombre de rues dans un temps de calcul très limité. Le modèle a été validé par comparaison avec des simulations numériques plus détaillées et des expériences de terrain (Soulhac, 2003) [31].

6.3 Résultats

Les tests préliminaires ont porté sur une rue canyon (Schildhornstrasse). Les simulations ont été réalisées à l'aide de deux des quatre modèles cibles : OSPM et CALINE 4, sur les mesures de l'année 1995. Elles ont été conduites en continu à partir des informations recueillies dans la base de données référençant la manipulation. Aucune donnée complémentaire n'a été utilisée. Ces premiers calculs seront complétés par des simulations réalisées avec ADMS-Urban et SIRANE.

6.3.1 Modèle OSPM

La comparaison entre les mesures et les résultats du modèle OSPM porte sur les concentrations en NO₂ au niveau de la rue canyon. Le modèle se comporte de manière plutôt satisfaisante sur la moyenne annuelle, l'écart devenant très élevé sur les centiles 99. L'écart type reste équivalent à celui des mesures seul l'écart sur les maxima est très élevé (280 µg/m³ simulé pour une mesure maximale à 172 µg/m³) (Tableau 1 et Figure 12).

	Mesures En µg/m ³	OSPM En µg/m ³
Moyenne	52.7	52.9
Médiane	49.5	48.1
Ecart-type	27.6	33.1
Variance	759.9	1093.3
Intervalle	171.5	280.3
Minimum	1.0	0.0
Maximum	172.5	280.3
25	32.0	29.1
50	49.5	48.1
75	70.5	70.9
95	102.5	113.2
98	118.0	136.7
99	127.5	155.9

Tableau 1 : statistique de la simulation OSPM

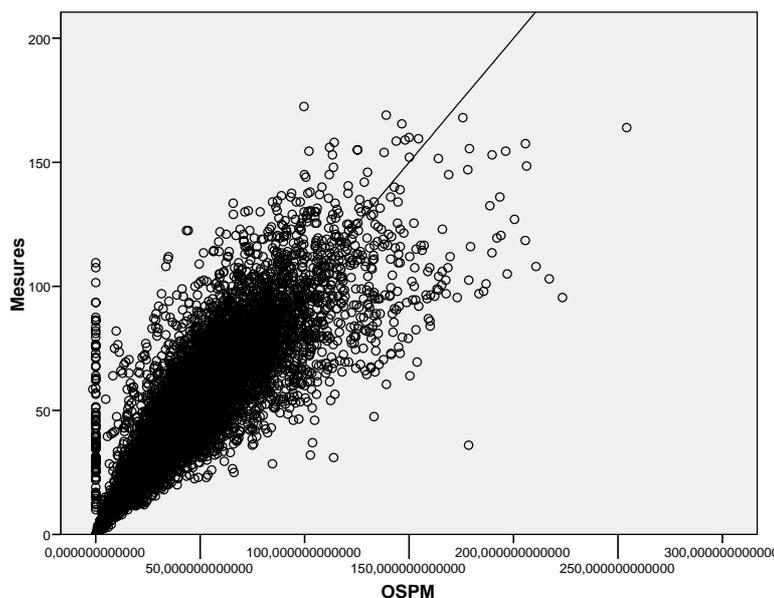


Figure 12 : comparaison mesures/calcul pour OSPM(En $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

6.3.2 Modèle CALINE 4

La comparaison entre les mesures et le modèle CALINE4 porte sur les concentrations de NO_2 au niveau de la rue canyon. La définition du polluant dans CALINE4 a été effectuée en considérant le composé NO_2 comme un gaz passif. Le modèle se comporte de manière satisfaisante sur la moyenne annuelle (environ 14% d'écart), l'écart devenant très élevé sur les centiles 99. L'écart type reste équivalent à celui des mesures ; seul l'écart sur les maxima est très élevé ($254 \mu\text{g}/\text{m}^3$ simulé pour une mesure maximale de $172 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Il faut noter quelques problèmes sur des valeurs négatives en condition de vent parallèle à la rue canyon (Tableau 2 et Figure 13), qui correspond à une condition de non validité du modèle.

	Mesures En $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Caline4 En $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Moyenne	52.7	48.3
Médiane	49.5	43.4
Ecart-type	27.6	30.2
Variance	759.9	915.3
Intervalle	171.5	357.7
Minimum	1.0	-103.5
Maximum	172.5	254.1
25	32.0	26.6
50	49.5	43.4
75	70.5	64.4
95	102.5	103.2
98	118.0	128.0
99	127.5	143.9

Tableau 2 : statistique de la simulation CALINE4

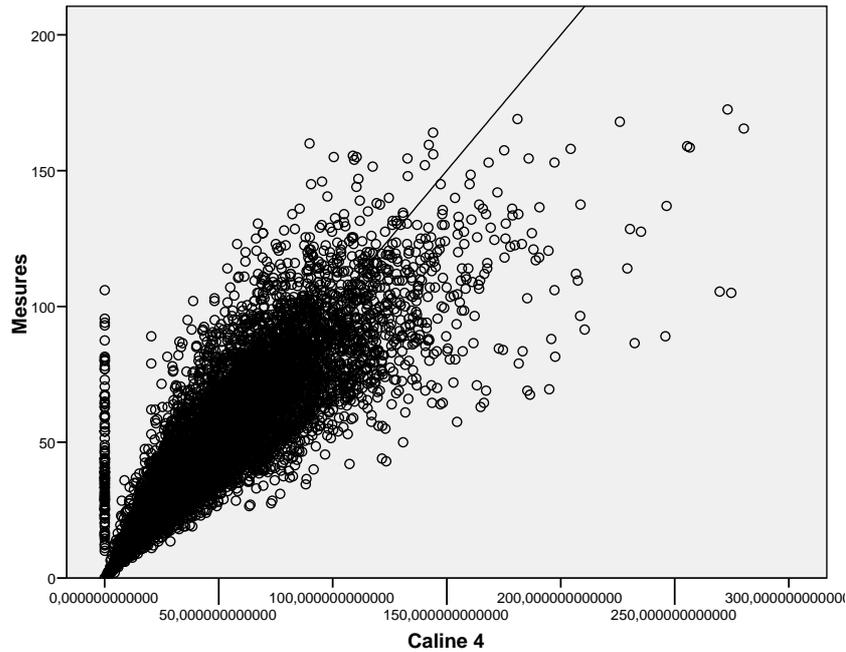


Figure 13 : comparaison mesures/calcul pour CALINE4 (En $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

6.3.3 Comparaison OSPM/CALINE4/ADMS-Urban

A partir des deux simulations réalisées sur les jeux de données « Schildhornstrasse », nous pouvons essayer une première comparaison entre OSPM et CALINE4. Cependant l'analyse de ces tests préliminaires doit être faite avec la plus grande prudence car elle ne porte que sur une seule campagne de mesure et sur une typologie spécifique de rue canyon.

Les écarts entre les deux modèles restent faibles en moyenne annuelle : $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour CALINE4 et $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour OSPM. L'écart-type des valeurs simulées est légèrement supérieur sur OSPM avec cependant un comportement cohérent des concentrations comprises entre 0 et $280 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La plage de concentration de CALINE4 comporte des valeurs négatives correspondant à des épisodes de vent parallèle à la rue canyon (Tableau 3 et Figure 14).

	Mesures En $\mu\text{g}/\text{m}^3$	OSPM En $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Caline4 En $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Moyenne	52.6	52.9	48.3
Médiane	49.5	48.1	43.4
Ecart-type	27.5	33.1	30.2
Variance	759.9	1093.3	915.3
Intervalle	171.5	280.3	357.7
Minimum	1.0	0.00	-103.6
Maximum	172.5	280.2	254.1
Centiles	25	32.0	26.6
	50	49.5	43.4
	75	70.5	64.4
	95	102.5	103.2
	98	118.0	128.0
	99	127.5	155.9

Tableau 3 : Comparaison OSPM/CALINE4

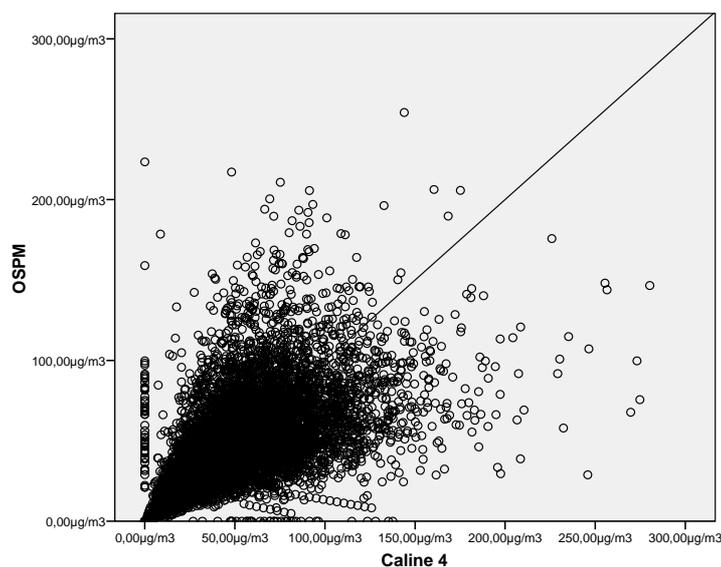


Figure 14 : comparaison calcul OSPM/calcul pour CALINE4 (En $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Les statistiques du tableau 3 sont dans l'ensemble plus favorables à OSPM. L'écart entre les deux modèles peut s'expliquer par des différences dans le traitement de la chimie - OSPM utilise une chimie simplifiée des NO_x alors que CALINE4 traite les polluants de manière complètement passive -, et par une description plus simplifiée des phénomènes dans CALINE4. Les tests complémentaires sur d'autres cas permettront d'approfondir cette comparaison.

7. CONCLUSION

Au terme de la première étape de cette étude pluri-annuelle qui vise à élaborer une base de connaissances et de méthodologies de référence pour l'évaluation de la qualité des modèles dédiés à la simulation de la pollution en proximité automobile, les conclusions et perspectives sont déclinées selon les quatre points qui avaient été proposés pour l'année 2007.

7.1 Recensement bibliographique

L'étude bibliographique a permis de recenser un grand nombre d'études en France et à l'étranger, réalisées en situation de proximité automobile et concernant des typologies variées. Dans l'optique de tester différents modèles sur des cas suffisamment bien caractérisés, une première exploitation de la bibliographie a conduit à l'élaboration de deux bases d'information, selon des critères liés à la nature et à la quantité des données fournies ou potentiellement récupérables auprès des organismes.

En 2008, les AASQA et les organismes étrangers seront contactés dans le but de rassembler les données nécessaires à une exploitation des campagnes de mesure et d'obtenir l'autorisation de les exploiter. En fonction des réponses obtenues, nous pourrons alors constituer une base exploitable.

7.2 Elaboration de la base de données

A partir des recensements d'études, des spécifications pour l'élaboration d'une base de connaissances en ligne disponible sur le site du LCSQA ont été produites. Le produit final compilera :

- la base de données exploitable, avec à terme, les données récupérées auprès des différents organismes et une fiche technique descriptive pour chaque campagne de mesures ;
- la base de données complémentaire ;
- des outils statistiques d'évaluation des modèles ;
- des fiches techniques sur les modèles,
- des cas de références afin de permettre aux utilisateurs de caler leurs propres travaux,
- un forum de discussion.

Tout ceci fait l'objet d'une maquette déjà disponible et présentée en annexe 3 de ce rapport.

7.3 Cahier des charges pour la mise en place de campagnes (en concertation avec les AASQA)

Les travaux de recensement réalisés cette année permettent de conclure sur la pertinence de réaliser une ou des campagnes de mesures complémentaires pour la pollution de proximité. En l'occurrence la richesse des données disponibles et la variété des situations déjà traitées par les AASQA ou les organismes de recherche ouvrent des perspectives suffisantes pour procéder à l'évaluation comparative des modèles que nous avons sélectionnés. Ainsi il n'est pas prévu de réaliser de nouvelle campagne de mesures.

7.4 Tests sur les modèles

Les résultats préliminaires obtenus pour deux modèles (OSPM et CALINE4) ont été présentés sur une rue de type « canyon », qui a fait l'objet d'investigations lors de la campagne TRAPOS. Les autres modèles en cours d'application ou qu'il est envisagé de mettre en œuvre sont ADMS-Urban, SIRANE et STREET.

Cette première comparaison des modèles porte sur des statistiques annuelles de concentration. Restent à approfondir l'analyse des séries chronologiques simulées et à conduire des tests de sensibilité, afin de déterminer les paramètres qui ont la plus grande influence sur les résultats de chaque modèle. Plusieurs AASQA ont déjà réalisé de telles études de sensibilité pour le modèle STREET.

Les conclusions issues de la comparaison entre les différents modèles seront validées sur d'autres rues. Idéalement, on souhaiterait pouvoir évaluer ces modèles pour des configurations de rues variées (rues canyons, rues ouvertes, intersections...). Plusieurs jeux de données d'AASQA ont été identifiés à cette fin. Selon la disponibilité des données, ils pourront permettre d'effectuer des tests complémentaires.

8. REFERENCES

- [1] Nanni A., Brusasca G., Calori G., Finardi S., Tinarelli G., Zublena M., Agnesod G. and Pession G., 1996. Integrated assessment of traffic impact in an Alpine region, Science of The Total Environment, Volumes 334-335, Highway and Urban Pollution, 1, Pages 465-471.
- [2] Borrego, C., Tchepel, O., Costa, A.M., Amorim, J.H., Miranda, A.I., « Emission and dispersion modelling of Lisbon air quality at local scale », Atmospheric Environment 37(37), 5197-5205, 2003.
- [3] Mumovic, D., Crowther, J.M., Stevanovic, Z., « Integrated air quality modelling for a designated air quality management area in Glasgow », Building and Environment 41(12), 1703-1712, 2006
- [4] Fouquet C.(de), Etude sur la réalisation de cartographies de la qualité de l'air dans les zones peu/pas couvertes par les réseaux de stations fixes à l'aide de méthodes géostatistiques (complément d'étude et synthèse), Rapport N-9/03/G, juin 2003, www.lcsqa.org.
- [5] Malherbe L., Cardenas G., 2005. Application de méthodes géostatistiques pour l'exploitation conjointe de mesures de fond et de proximité. Rapport LCSQA, www.lcsqa.org.
- [6] AIRPARIF, 2004. Caractérisation de la qualité de l'air au voisinage d'un échangeur autoroutier urbain. L'échangeur entre le boulevard périphérique et l'autoroute A3 au niveau de la Porte de Bagnolet. www.airparif.asso.fr.
- [7] AIRMARAIX, Géovariances, Numtech, 2006. Cartographie de la pollution à Toulon : approches géostatistique et déterministe. Rapport d'études AIR PROCHE (AFSSET). Report available at <http://www.airmaraix.org>.
- [8] ROUÏL, L., « Evaluation et contraintes d'application des modèles de rue », Rapport LCSQA, 37 pages, 2004. www.lcsqa.org
- [9] Yamartino, R.J., Wiegand, G., « Development and evaluation of simple models for the flow, turbulence and pollutant concentration fields within an urban street canyon », Atmospheric Environment, 20, 2137-2156, 1986.
- [10] Berkowicz, R., Hertel, O., Sorensen, N.N., Michelsen, J.A., « Modelling Air Pollution from Traffic in urban areas, Flow and dispersion through groups of obstacles », Ed. R.J. Perkins, S.E Belcher, Clarendon Press-Oxford, 1997.
- [11] Soulhac, L., « Modélisation de la dispersion atmosphérique à l'intérieur de la canopée urbaine », Rapport de thèse de l'Ecole Centrale de Lyon, 2002.
- [12] Lohmeyer, W.J., Mueller, W., Baechlin, A, « Comparison of street canyon concentration predictions by different modellers: final results now available from the Podbi-exercise », Atmospheric Environment 36, 157-158, 2002.
- [13] Louka, P., Vachon, G., Sini, J.F., Mestayer P.G., Rosant, J.M., « Thermal effects on the airflow in a street canyon - Nantes 99 experimental results and model simulations », Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 2(5-6), 351-364, 2002.
- [14] Schattaneck, G., Kahng, J., 1992. User's guide to CAL3QHC version 2.0: a modeling methodology for predicting pollutant concentrations near roadway intersections. EPA-454/R-92-006, US Environmental Protection Agency.
- [15] Luhar, A.K. and Patil, R.S., 1989. A general finite line source model for vehicular pollution prediction. Atmospheric Environment 23, pp. 555-562.

- [16] Sivacoumar, R., & Thanasekaran, K. (1999). Line source models for vehicular pollution prediction near roadways and model evaluation through statistical analysis. *Environmental Pollution*, 104, 389–395.
- [17] Härkönen, 2002. Regulatory dispersion modelling of traffic-originated pollution. Finnish Meteorological Institute, Contributions No. 38, FMI-CONT-38, ISSN 0782-6117, University Press, Helsinki, 103 p.
- [18] Held, T., Chang, D.P.Y. and Niemeier, D.A., 2003. UCD2001: An improved model to simulate pollutant dispersion from roadways. *Atmospheric Environment*, 37, 5325-5336.
- [19] « User's Guide for CL4: A User-friendly Interface for the CALINE4 Model for Transportation Project Impact Assessments », Guide de l'utilisateur, 1998. <http://aqp.engr.ucdavis.edu/Documents/Guide.pdf>
- [20] Levitin, J., Harkonen, J., Kukkonen, J., and Nikmo, J., 2005. Evaluation of the CALINE4 and CAR-FMI models against measurements near a major road, *Atmospheric Environment*, 39, n°25, 4439-4452.
- [21] Corsmeier, U., Kohler, M., Vogel, B., Vogel, H., Fiedler, F., 2005. BAB II: a project to evaluate the accuracy of real-world traffic emissions for a motorway. *Atmospheric Environment*, 39, n°31, 5627-5641.
- [22] Berkowicz, R., « Case Study of Traffic Pollution in Urban Streets in the Framework of AOPII. Application of the Operational Street Pollution Model (OSPM) for two streets in Milan and Berlin », Rapport final. NERI, 1999.
- [23] Berkowicz, R., « Street Scale Models », *Urban Air Pollution - European Aspects*, Kluwer Academic Publishers, pp. 223-251, 1999.
- [24] Benson, P.E., « A Review of the Development and Application of the CALINE3 and CALINE4 Models », *Atmospheric Environment* 26B (3), 379–390, 1992.
- [26] Venkatram, A., Karamchandani, P., Pai, P. and Golstein R. (1994), The development and Application of a simplified Ozone Modelling System. *Atmospheric Environment* 28, 3365-3678.
- [27] Derwen R.g. and Middleton, D.R. (1996) An empirical function for the ratio NO₂ :Nox. *Clean Air* 26, 206-224.
- [28] Owen B., Edmunds, H.A., carruthers D.J., Singles R.J., Prediction of total oxides of nitrogen and nitrogen dioxide concentrations in a large urban area using a nex generation urban scale dispersion model with integral chemistry model, *Atm. Env.* Vol 34, pp 397-406, 2000.
- [29] DEFRAa, Validation and sensitivity study of ADMS-Urban for London, CERC topic report n° FM489/R5/03, 2003
DEFRAb, Comparison of ADMS-Urban, NETCEN and ERG air quality predictions for London, CERC topic report n°FM489/R7/03, 2003.
- [30] Soulhac, 2000. Modélisation de la dispersion atmosphérique à l'intérieur de la canopée urbaine. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon.
- [31] Soulhac, L., Puel, C., Duclaux, O., Perkins, R.J., 2003, Simulations of atmospheric pollution in Greater Lyon an example of the use of nested models, *Atmospheric Environment*, 37, 5147-5156
- [32] AIR-PL, « Evaluation de la qualité de l'air en proximité automobile – rue Souchu Servinière – Laval – Campagne 2004 », Rapport d'étude E-BPn050120-FDz-BPn, 24 pages, mars 2005.

- [33] AIR-PL, « Evaluation de la qualité de l'air en proximité automobile durant l'année 2006 – rue Maréchal Joffre à Nantes, rue Nationale à Cholet – Rapport final mai 2007 », Rapport d'étude E-Etprd070062, 34 pages, mai 2007.
- [34] AIR-PL, « Evaluation de la qualité de l'air en proximité automobile (rue Crébillon – Quai de la Fosse à Nantes) – Mesures et modélisation, mai 2004-mai 2005 – rapport intermédiaire novembre 2005 », Rapport d'étude E-Etd050398-FDz-Ars-BPn, 46 pages, novembre 2005.
- [35] AIR-PL, « Mesure de la qualité de l'air en proximité automobile (rue Crébillon – Quai de la Fosse à Nantes) – juin 2006, rapport final », Rapport d'étude E-Etprd060203, 26 pages, juin 2006.
- [36] AIR-PL, « Mesure de la qualité de l'air en proximité automobile rue Paul Bellamy à Nantes – juillet 2007, rapport d'étape (10 janvier-15 juin 2007) », Rapport d'étude E-Etprd070187, 28 pages, juillet 2007.

9. ANNEXES

Les fichiers Excel correspondant à la base de données exploitable et à la base de données complémentaire sont mis à disposition sur le site du LCSQA (www.lcsqa.org).