

N° : 2000-07

Année 2000

THÈSE

présentée devant

L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON

École doctorale : Mécanique-Énergétique

pour obtenir

le titre de DOCTEUR

Spécialité : Mécanique

par Lionel SOULHAC

**Modélisation de la dispersion atmosphérique
à l'intérieur de la canopée urbaine**

Soutenue le 3 Mars 2000 devant la Commission d'Examen :

Jury : MM. J. BATAILLE
R. BERKOWICZ
B. CARISSIMO
J. FABRE
J. C. R. HUNT – *rapporteur*
D. JEANDEL
R. J. PERKINS
J.-F. SINI – *rapporteur*

*Le commencement de toutes les sciences, c'est
l'étonnement de ce que les choses sont ce qu'elles
sont.*

ARISTOTE

Remerciements

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique de l'École Centrale de Lyon. J'adresse en premier lieu mes plus vifs remerciements au Professeur D. JEANDEL pour m'avoir accueilli dans son laboratoire, pour avoir soutenu ce sujet de recherche et pour avoir accepté d'être membre du jury.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance aux Professeurs J.C.R. HUNT et J.-F. SINI qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail, en acceptant d'en être rapporteurs.

Je veux également remercier les Professeurs J. BATAILLE et J. FABRE, ainsi que messieurs R. BERKOWICZ et B. CARISSIMO, qui ont bien voulu être membres du jury.

J'exprime ma profonde gratitude au Professeur Richard PERKINS, qui a dirigé mon travail de thèse. Au cours de ces années, j'ai beaucoup appris en côtoyant le savant mélange qu'il représente, entre un pragmatisme "britannique" et une grande culture scientifique. Je tiens également à le remercier pour la confiance qu'il m'a accordée au cours des différents projets que nous avons réalisés.

Je voudrais particulièrement remercier Monsieur Patrick MÉJEAN, avec qui j'ai travaillé en étroite collaboration durant ces trois années. Il a su me faire profiter de sa grande expérience des phénomènes de dispersion atmosphérique et de la modélisation en soufflerie. Son soutien et ses conseils quotidiens ont fortement contribué à la valorisation de ce travail.

Je souhaite également remercier la Direction Recherche et Développement d'EDF et la Communauté Urbaine de Lyon, qui ont soutenu ce travail à travers plusieurs contrats de recherche, ainsi que le personnel de ces organismes pour leur aide et leur disponibilité.

Je remercie chaleureusement mes compagnons de travail, Claire, Manu et Manu, Jean-Mi, pour leur collaboration et leur bonne humeur durant ces trois années. J'adresse des remerciements plus particuliers à Olivier ISNARD, avec qui j'ai partagé les subtilités des écoulements potentiels, et dont l'aide m'a bien souvent facilité la tâche. Ce travail n'aurait pas été possible sans l'appui du personnel du laboratoire à qui j'adresse ici ma plus vive reconnaissance. Je tiens en particulier à remercier Pascale, pour son aide et sa gentillesse en toutes occasions.

Je voudrais également exprimer ma gratitude aux personnes qui ont bien voulu relire et enrichir mon manuscrit et en particulier à Stéphane, pour son regard curieux sur les écoulements atmosphériques et pour ses corrections minutieuses.

Je tiens à remercier affectueusement mes parents, mes sœurs et toute ma famille pour le soutien qu'ils ont su m'apporter.

Enfin, je remercie tendrement Véronique pour sa patience, son aide et ses conseils durant tout ce travail, ainsi que Valentin pour ses nombreux sourires d'encouragement.

Résumé

Afin d'évaluer les conséquences de la pollution atmosphérique sur la santé et l'environnement, les pouvoirs publics ont souvent besoin d'outils de modélisation fine, permettant d'appréhender l'impact d'un aménagement local, de prévoir les niveaux de concentration et d'informer la population. Le problème, posé par la simulation de la dispersion des polluants à l'échelle locale, est de parvenir à étudier beaucoup de scénarios en prenant en compte un très grand nombre de bâtiments complexes. Pour cela, il est souvent indispensable de développer des approches simplifiées, dans lesquelles seuls les phénomènes physiques prépondérants sont représentés.

Dans cet esprit, la modélisation de la canopée urbaine s'appuie généralement sur la notion élémentaire de *rue-canyon*. Si ce sujet a fait l'objet de nombreuses études dans le passé, plusieurs interrogations subsistent encore concernant les phénomènes mis en jeu à l'intérieur d'une rue et les interactions entre plusieurs rues. Les objectifs de cette étude sont de mieux comprendre les mécanismes fondamentaux qui régissent l'écoulement et la dispersion dans une rue et d'en proposer une représentation simplifiée à travers des modélisations opérationnelles.

Pour cela, nous avons utilisé des techniques de modélisation numérique et expérimentale. L'approche numérique a été basée sur le code de calcul *MERCURE* (RANS, du type $k-\varepsilon$), adapté à la simulation tridimensionnelle des écoulements atmosphériques. L'approche expérimentale a été mise en œuvre dans la soufflerie atmosphérique de l'École Centrale de Lyon. Les techniques de mesures utilisées (LDA, FID) ont permis de décrire avec précision les champs de vitesse et de concentration à l'échelle d'une rue.

Afin d'évaluer l'influence de la géométrie de la rue (rapport d'aspect, dissymétrie) sur la dispersion par vent perpendiculaire, nous avons développé un modèle, basé sur une résolution analytique de l'équation d'advection-diffusion dans un écoulement potentiel. Les comparaisons avec les simulations numériques et expérimentales fournissent des résultats encourageants. Pour décrire le cas d'un vent d'orientation quelconque, nous proposons une décomposition de l'écoulement par rapport aux composantes longitudinales et transversales. Cette décomposition s'avère réaliste dans le cas d'une rue infinie, mais elle est mise en défaut pour une rue de longueur finie. Nous avons ensuite étudié et paramétré les échanges de matière au niveau des intersections en fonction de la géométrie des rues et de la direction du vent. Les résultats indiquent une interaction importante entre l'écoulement dans la rue et dans l'intersection. Enfin, nous avons proposé un modèle permettant d'étendre l'approche rue-canyon à la simulation d'un *réseau de rues* interconnectées, afin de pouvoir étudier la dispersion des polluants à l'échelle d'un quartier.

Une première application du modèle de dispersion dans un réseau de rues a été réalisée pour étudier la pollution dans un quartier de la ville de Lyon. Les comparaisons effectuées avec des mesures de terrain permettent de confirmer le bon comportement du modèle et illustrent les différentes potentialités de cette approche.

Abstract

There are many practical situations in which it is necessary to evaluate the impact of urban air pollution on health and the environment. Often, this demands rather fine scale modelling of air flow and dispersion, at the scale of the street or the *quartier*. In such cases it is usually necessary to include the influence of a large number of irregularly-shaped buildings. This requires the development and application of simplified, practical models, which are based on the main underlying physical phenomena.

One approach which is commonly used to estimate pollutant concentrations in an isolated street is the street canyon model. Although flow and dispersion in an isolated street have been the subject of many investigations in the past, and several practical models have been proposed for idealised configurations, many questions remain unanswered. The aims of this investigation are therefore to improve our understanding of the fundamental processes which govern flow and dispersion in a single street or a group of streets, and to develop simple, operational models for these situations.

The research has been carried out using numerical and experimental techniques. Numerical simulations have been carried out using the three-dimensional atmospheric boundary layer code MERCURE (a RANS model with a k - ε closure) and the experiments were performed in the atmospheric wind tunnel at the Ecole Centrale de Lyon. Fluid velocities and gas concentrations were measured using LDA and FID.

Initially, we studied the influence of street geometry (aspect ratio, asymmetry) on flow and dispersion within the street, when the wind blows perpendicular to the street. We have developed a model for pollutant concentrations, based on a solution of the advection-diffusion equation in a potential flow. Next we studied the influence of the direction of the wind relative to the axis of the street, and we show that the problem can be decomposed into flow parallel and perpendicular to the street. In the third part of the study we investigated the influence of street geometry and wind direction on flow and dispersion at street intersections; we show that the flow within the streets plays an important role in determining the exchange of material within the intersection. Based on these results, we then develop a model which extends the street canyon concept to a network of connected streets. This makes it possible to study the atmospheric dispersion of pollutants at the scale of the *quartier*.

All the models developed during this work have been compared with the results from numerical simulations and experiments, and the agreement is generally good. As a final test of the models, we have used them to simulate dispersion in part of the 6th *arrondissement* of Lyon; the calculated concentrations show surprisingly good agreement with concentrations measured by an atmospheric pollution monitor located there.

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	5
Abstract	7
Liste des symboles	13
Introduction	17
I Généralités	21
I.1 La pollution atmosphérique	23
I.1.1 Qu'est-ce que la pollution atmosphérique?	23
I.1.2 Les sources	24
I.1.3 Les conséquences	25
I.1.4 Les solutions	26
I.1.5 Conclusion	31
I.2 La couche limite atmosphérique	33
I.2.1 L'atmosphère	33
I.2.2 La couche limite atmosphérique	36
I.2.3 La canopée urbaine	41
I.2.4 Conclusion	42
I.3 La dispersion turbulente	43
I.3.1 Approche eulérienne	43
I.3.2 Théorie statistique de la diffusion	45
I.3.3 Paramétrisation empirique de la diffusion atmosphérique	48
I.3.4 Conclusion	50
I.4 Les outils de modélisation	51
I.4.1 Modélisation numérique	51
I.4.2 Modélisation expérimentale en soufflerie	57
I.4.3 Conclusion	62

I.5	Présentation générale de l'étude	63
I.5.1	La problématique	63
I.5.2	Introduction à l'approche rue-canyon	64
I.5.3	La démarche adoptée	69
II	Écoulement et dispersion à l'échelle d'une rue	77
II.1	Modélisation des flux turbulents à l'interface rue-atmosphère	79
II.1.1	Introduction	79
II.1.2	Modélisation des flux turbulents à travers une couche de mélange	81
II.1.3	Application à la dispersion d'un scalaire au voisinage d'un obstacle	90
II.1.4	Application à la modélisation du transfert turbulent à l'interface rue-atmosphère.	93
II.1.5	Conclusion	99
II.2	Écoulement et dispersion perpendiculaire à la rue	101
II.2.1	Phénoménologie	101
II.2.2	Modèle d'écoulement	110
II.2.3	Modèle de dispersion	123
II.2.4	Étude numérique et expérimentale	129
II.2.5	Conclusion	159
II.3	Écoulement et dispersion parallèle à la rue	163
II.3.1	Introduction	163
II.3.2	Modèle d'écoulement	165
II.3.3	Modèle de dispersion	177
II.3.4	Conclusion	180
II.4	Vent d'incidence quelconque par rapport à la rue	183
II.4.1	Introduction	183
II.4.2	Écoulement	185
II.4.3	Dispersion	192
II.4.4	Conclusion	197
III	Écoulement et dispersion à l'échelle d'un quartier	203
III.1	Intersection entre plusieurs rues	205
III.1.1	Généralités	205
III.1.2	Modèle de transport des polluants dans une intersection	207
III.1.3	Variation de section d'une rue	218
III.1.4	Intersection entre deux rues perpendiculaires	222
III.1.5	Intersection avec place	241
III.1.6	Conclusion	246
III.2	Modèle d'écoulement et de dispersion dans un réseau de rues	247
III.2.1	Introduction	247
III.2.2	Présentation du modèle	248
III.2.3	Étude numérique de la dispersion dans un réseau de rues	258
III.2.4	Conclusion	266

IV	Application à l'agglomération lyonnaise	271
IV.1	Les données de la pollution atmosphérique à Lyon	273
IV.1.1	Introduction	273
IV.1.2	La topographie urbaine	274
IV.1.3	La météorologie	280
IV.1.4	Les émissions	282
IV.1.5	La pollution	287
IV.1.6	Conclusion	290
IV.2	Modélisation d'un quartier de Lyon	291
IV.2.1	Introduction	291
IV.2.2	Comparaison modèle-mesures	292
IV.2.3	Exploitation des simulations	299
IV.2.4	Conclusion	306
	Conclusion et perspectives	311
	Annexes	315
A	Solutions analytiques de l'équation d'advection-diffusion	317
A.1	Équation d'advection-diffusion	317
A.2	Solutions pour un fluide au repos	317
A.3	Solutions pour un fluide en écoulement uniforme	319
A.4	Autres formulations des solutions	320
B	Conditions de calcul des simulations numériques	321
B.1	Conditions de vent en entrée du domaine de calcul	321
B.2	Caractéristiques des maillages	321
C	Conditions expérimentales	325
C.1	Couches limites incidentes	325
C.2	Rue bidimensionnelle perpendiculaire au vent	327
C.3	Rue bidimensionnelle parallèle au vent	327
C.4	Rue de longueur finie et intersection de rues	328
D	Intégrale elliptique de deuxième espèce en argument complexe	329
E	Modélisation de la transformation chimique NO-NO₂ à l'échelle de la rue	331
	Bibliographie	335

Liste des symboles

Opérateurs

Symbole	Définition
G	Grandeur scalaire
\mathbf{G}	Grandeur vectorielle (en gras)
\mathbb{G}	Grandeur tensorielle
G^+	Grandeur adimensionnée
$[G]$	Concentration molaire
\overline{G}	Moyenne de REYNOLDS
\tilde{G}	Moyenne de FAVRE
∇	Opérateur de gradient
Δ	Opérateur de LAPLACE
\times	Produit vectoriel

Lettres latines

Symbole	Définition
\mathbf{A}	Vecteur potentiel
c	Concentration
C_D	Coefficient de frottement
C_p	Chaleur massique à pression constante (= $1005 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ pour l'air sec)
$C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$..	Constantes du modèle $k-\varepsilon$
d	Épaisseur de déplacement
D	Coefficient de diffusion moléculaire
\mathcal{D}	Terme de destruction (de matière, d'énergie)
E	Énergie totale
	Intégrale elliptique de deuxième espèce
E_1	Fonction exponentielle intégrale d'ordre 1
f	Paramètre de CORIOLIS
\mathbf{f}	Forces volumiques extérieures
\mathbf{F}	Forces extérieures
F	Intégrale elliptique de première espèce
$\mathbf{g} = -g \mathbf{i}_z$	Accélération de la pesanteur

Symbole	Définition
H	Hauteur de la rue
H_0	Flux de chaleur au sol
\mathcal{H}	Terme source de chaleur
$\mathbf{i}_x, \mathbf{i}_y, \mathbf{i}_z$	Vecteurs directeurs unitaires
\mathbf{i}_r	Vecteur directeur unitaire dans la direction r
I	Échelle de longueur intégrale
J_0, J_1	Fonctions de BESSEL
k	Énergie cinétique turbulente
k_i	Constante de réaction chimique
K_0	Fonction de BESSEL modifiée
κ_G	Coefficient de diffusion turbulente de la variable G
\mathbb{K}	Tenseur de diffusivité turbulente
l	Taille caractéristique des structures turbulentes
L	Longueur de la rue
P	Pression
\mathcal{P}	Terme de production (de matière, d'énergie)
\mathbf{q}	Flux de chaleur
\mathcal{Q}	Flux de polluants
R	Constante spécifique de l'air sec = $287,05 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
	Coefficient de corrélation
s	Variable complexe
S	Surface
	Terme source de matière
t	Temps
T	Température
\mathbb{T}	Tenseur des contraintes de REYNOLDS
\mathbf{u}	Vecteur vitesse
u, v, w	Composantes de la vitesse
u_*	Vitesse de frottement
\dot{V}	Débit volumique
W	Largeur de la rue
x, y, z	Coordonnées cartésiennes
Y_0, Y_1	Fonctions de BESSEL
z_0	rugosité aérodynamique

Lettres grecques

Symbole	Définition
α	Coefficient de dilatation à pression constante
\mathcal{A}	Tenseur d'échange convectif
$\widehat{\mathcal{A}}$	Tenseur d'échange turbulent
γ	Constante d'EULER
Γ	Circulation
δ	Épaisseur de la couche limite
δ_{ij}	Indice de KRONECKER
ϵ	Hauteur effective de rugosité
ε	Dissipation de l'énergie cinétique turbulente
ζ	Variable complexe

Symbole	Définition
η	Échelle de KOLMOGOROV Ordonnée de l'espace complexe
θ	Température potentielle Orientation du vent
θ_*	Température de frottement
κ	Constante de KARMAN
λ	Conductivité thermique
λ_G	Écart relatif de la variable G (couche de mélange)
Λ	Paramètre de turbulence
μ	Viscosité dynamique
ν	Viscosité cinématique
ξ	Abscisse de l'espace complexe
π	Nombre pi
ρ	Masse volumique
σ_0, σ	Paramètres de GOERTLER
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Constantes du modèle $k-\varepsilon$
σ_G	Écart-type de la variable G
\mathcal{T}	Tenseur des contraintes visqueuses
τ	Contrainte de cisaillement Temps caractéristique
ϕ	Fonction potentielle Latitude
φ_m	Flux adimensionné de quantité de mouvement
ψ	Fonction de courant
ω	Vorticité
$\mathbf{\Omega} = \Omega_0 \mathbf{i}_\Omega$	Vitesse angulaire de rotation de la Terre ($7,29 \cdot 10^{-5}$ rad/s)

Sigles

Symbole	Définition
AIRPARIF ...	Réseau de surveillance de la qualité de l'air en Île-de-France
APPA	Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique
CLA	Couche Limite Atmosphérique
CLS	Couche Limite de Surface
COPARLY ...	Comité de Coordination pour le Contrôle de la Pollution Atmosphérique dans la Région Lyonnaise
COST	European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research
COURLY	Communauté Urbaine de Lyon
COV	Composés Organiques Volatils
CREDOC ...	Centre de Recherche pour l'Étude et l'Observation des Conditions de vie
EDF	Électricité de France
EPA	Environmental Protection Agency
LES	Large Eddy Simulation
MEET	Methodologies to Estimate Emissions from Transport
RANS	REYNOLDS Averaged NAVIER-STOKES (equations)
SIG	Système d'Information Géographique
SUR	Système Urbain de Référence (COURLY)

Introduction

La pollution atmosphérique constitue aujourd'hui une des préoccupations prioritaires de la population et des autorités politiques en matière d'environnement. Si cet intérêt s'est particulièrement accru au cours des dernières décennies, la pollution atmosphérique constitue néanmoins un problème ancien, dont l'apparition remonte à l'époque de la Préhistoire et de l'Antiquité. Du Moyen-Âge jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle, la pollution était principalement causée par l'utilisation massive du charbon dans l'industrie ou le chauffage domestique. Au cours du XX^{ème} siècle, le développement des industries chimiques et pétrolières a conduit à une diversification des polluants, tandis que l'explosion démographique entraînait une hausse considérable des besoins énergétiques et donc de la pollution occasionnée par la production de cette énergie. De plus, l'apparition de l'automobile a généré de nouvelles émissions qui allaient devenir, un siècle plus tard, la principale cause de pollution urbaine.

Cette aggravation de la situation a provoqué une prise de conscience des pouvoirs publics et de la population. Des mesures réglementaires de plus en plus sévères ont été adoptées pour limiter les émissions de polluants, en particulier celles d'origine industrielle. Ces dispositions ont permis d'infléchir sensiblement l'évolution des niveaux de pollution, mais elles s'avèrent aujourd'hui peu efficaces face à un développement démesuré de l'usage de l'automobile dans les grandes agglomérations. En effet, chaque citoyen se trouve alors face à ses responsabilités de pollueur et doit participer à l'effort de réduction des rejets. Pour faire accepter par chacun des réglementations contraignantes et peu populaires (circulation alternée, taxes sur les essences les plus polluantes), il est nécessaire de mieux informer la population sur les niveaux de pollution à laquelle elle est effectivement exposée et sur les effets bénéfiques attendus de ces réglementations.

Afin de répondre à cette attente, les réseaux de surveillance de la qualité de l'air se sont fortement développés. Pour pouvoir conseiller les autorités et informer la population, ces réseaux ont besoin d'outils permettant de comprendre les mécanismes de la pollution et d'en prévoir l'évolution. À ce titre, la modélisation présente un intérêt tout particulier.

La modélisation de la pollution atmosphérique est un problème très complexe, impliquant de nombreuses spécialités scientifiques, comme la météorologie, la mécanique des fluides, la chimie, la médecine, et de nombreux domaines d'application, tels que les transports, l'urbanisme ou la santé publique. Chacune de ces disciplines n'aborde qu'une petite partie de la problématique et il peut être intéressant, afin d'avoir une vue plus générale, de décomposer le problème de la pollution en trois grandes phases. La première phase concerne l'ensemble des mécanismes et des comportements qui sont à l'origine de l'émission de substances toxiques dans l'atmosphère.

À l'autre extrémité de la chaîne, la dernière phase concerne tous les phénomènes physiques ou biologiques affectés ou provoqués par la présence dans l'air d'une substance toxique. Entre ces deux phases, les polluants sont transportés et dispersés par les écoulements atmosphériques. Cette troisième phase joue un rôle fondamental dans la relation qui existe entre les causes de la pollution et ses conséquences sur la santé ou l'environnement. Or la principale attente des pouvoirs publics est justement de pouvoir connaître les conséquences induites par une modification des causes du problème. C'est pourquoi la modélisation du transport et de la dispersion atmosphérique des polluants est à la base de l'étude de la pollution de l'air.

Pour modéliser l'atmosphère, une des contraintes fondamentales à prendre en compte est le caractère fortement turbulent des écoulements mis en jeu. En effet, le spectre d'énergie de la turbulence atmosphérique s'étend sur une très large gamme d'échelles et il est impossible de représenter l'ensemble de ces échelles à l'intérieur d'un seul modèle. C'est pourquoi il est nécessaire de développer une suite de modèles différents, permettant de représenter toute la gamme d'échelles.

Au-delà de cette décomposition, il existe une grande diversité d'approches pour traiter le transport et la dispersion des polluants dans l'atmosphère. Les approches diffèrent par leurs concepts théoriques (résolution eulérienne de la dispersion, modèle stochastique lagrangien, ...), par leur complexité (des modèles analytiques jusqu'à la simulation directe) ou par leurs applications (outils de recherche, modèles de terrain, ...). Parmi ces différentes approches, il en est une qui suscite aujourd'hui un intérêt croissant auprès des organismes chargés d'étudier la qualité de l'air. Il s'agit des *modèles appliqués*, conçus sur des bases théoriques, et qui nécessitent peu de ressources informatiques. Ces modèles s'avèrent en effet très utiles dans la pratique pour simuler de nombreux scénarios en prenant en compte toute la complexité du problème.

Parmi les échelles importantes dans l'étude de la pollution atmosphérique, l'échelle locale de la rue présente un intérêt particulier. C'est en effet à ce niveau que les conséquences de la pollution automobile sont les plus sérieuses, en raison de la proximité et du confinement des sources d'émission (véhicules) et des récepteurs potentiels (population). La présence de bâtiments de part et d'autre de la rue est à l'origine de phénomènes aérodynamiques spécifiques – écoulements de recirculation, canalisation – qui génèrent des niveaux de concentration très élevés, avec une forte hétérogénéité spatiale. Le rôle joué par la géométrie de la rue sur ces mécanismes a conduit à introduire la notion de *rue-canyon*, qui fait référence à la forme caractéristique d'une rue délimitée par deux bâtiments.

Pour comprendre et modéliser l'écoulement et la dispersion à l'intérieur d'une rue-canyon, de nombreux travaux ont été réalisés depuis les années 70. En particulier, la réalisation de plusieurs expériences de terrain (JOURMARD et VIDON, 1980 ; DEPAUL et SHEIH, 1986 ; NAKAMURA et OKE, 1988), généralement très coûteuses, témoigne de l'importance attribuée à ces phénomènes par la communauté scientifique. Les expériences en soufflerie (HOYDYSH et DABBERDT, 1988 ; RAFAILIDIS, 1997 ; KASTNER-KLEIN et PLATE, 1998) et les simulations numériques (HUNTER *et al.*, 1990 ; JOHNSON et HUNTER, 1995 ; SINI *et al.*, 1996) qui ont été effectuées ont permis essentiellement de décrire les comportements apparaissant lorsque le vent extérieur est perpendiculaire à l'axe de la rue. Dans cette situation, il se forme une ou plusieurs recirculations à l'intérieur de la rue, qui ont pour effet de transporter les polluants, émis par les véhicules, vers une des parois. Des modèles appliqués plus ou moins complexes ont été développés pour décrire ces mécanismes (HOTCHKISS et HARLOW, 1973 ; JOHNSON *et al.*, 1973 ; YAMARTINO et WIEGAND, 1986 ; EERENS *et al.*, 1993 ; BERKOWICZ *et al.*, 1997) et l'utilisation de ces modèles est aujourd'hui assez répandue.

Pour autant, les modèles existants ne permettent pas de traiter toutes les configurations rencontrées et un certain nombre de problèmes restent à aborder. Les effets d'une direction de vent quelconque ou de bâtiments de géométrie complexe sont aujourd'hui assez peu connus. La présence des intersections, et les interactions qui en résultent, ne sont quasiment pas prises en

compte dans les modèles. C'est pourquoi il est nécessaire de poursuivre l'étude des mécanismes de transport et de dispersion à l'échelle d'une rue, afin de proposer de nouveaux outils de modélisation plus performants.

Le but de ce projet de recherche est de développer un modèle appliqué de dispersion des polluants à l'échelle d'une rue et d'étendre l'approche rue-canyon à la modélisation d'un ensemble de plusieurs rues constituant un quartier.

D'un point de vue fondamental, le problème scientifique sous-jacent est de savoir comment représenter un écoulement très complexe lorsqu'il n'est pas possible de décrire chaque détail de cet écoulement. La réponse à cette question réside bien évidemment dans une *simplification du problème* mais toute la question est de savoir ce que l'on peut effectivement simplifier et au contraire, ce qu'il faut absolument conserver, compte tenu de la physique des phénomènes et compte tenu de l'utilisation que l'on souhaite faire du modèle. En d'autres termes, il est nécessaire de rechercher les phénomènes fondamentaux qui caractérisent l'écoulement, mais également de "filtrer" les phénomènes secondaires, afin de construire un *modèle simplifié*.

C'est dans cet esprit que nous abordons la modélisation de la canopée urbaine. L'objectif de notre travail n'est donc pas de construire un catalogue de toutes les configurations possibles d'écoulement à l'intérieur d'une rue. Il s'agit plutôt d'identifier les principaux mécanismes qui régissent la dispersion des polluants à cette échelle, afin de proposer une modélisation adaptée aux contraintes réelles. Cette démarche va nous conduire à étudier les caractéristiques de l'écoulement dans une rue. Parmi les questions concrètes qui seront abordées au cours de cette étude, on peut mentionner en particulier :

- Comment représenter l'échange turbulent entre une rue et l'atmosphère extérieure?
- Quelle est l'influence de la géométrie des bâtiments qui bordent la rue (rapport hauteur/largeur, dissymétrie, rugosité des parois)?
- Quelle est l'influence de la direction du vent extérieur? Peut-on toujours considérer qu'il existe une recirculation dans la rue?
- Quelle est la différence entre une rue de longueur infinie (configuration généralement étudiée) et un tronçon de rue de longueur finie, délimité par des intersections?
- Comment modéliser les échanges au niveau de ces intersections?
- Comment simuler les interactions entre les nombreuses rues qui forment un quartier?

Afin de répondre à ces questions, il est nécessaire de mettre en œuvre des techniques de simulation performantes, permettant d'identifier les mécanismes de dispersion à cette échelle. Pour cela, nous utiliserons différents types d'approches. Les modèles proposés seront généralement basés sur des approches théoriques, qui offrent souvent des solutions analytiques rapides à calculer. Pour comprendre les mécanismes étudiés et faire des comparaisons avec les modèles, des expériences en soufflerie seront réalisées en association avec des simulations numériques bi- et tridimensionnelles (modèle RANS, du type $k-\varepsilon$). L'utilisation de ces trois approches complémentaires nous permettra d'obtenir des informations relativement fiables sur l'écoulement.

La présentation de ce travail se décompose en quatre parties. Au cours de la première partie, nous situons la problématique abordée dans le contexte plus général de la *pollution atmosphérique*. Nous rappelons plusieurs notions essentielles concernant la *couche limite atmosphérique* et la *dispersion turbulente*. Nous présentons ensuite les *outils de modélisation* numérique et expérimentale qui sont utilisés dans la suite de ce travail. Enfin, nous effectuons une *présentation générale de l'étude* et de la démarche que nous avons adoptée.

La deuxième partie est consacrée à l'étude de l'écoulement et de la dispersion à l'intérieur d'une rue isolée. Nous nous intéressons tout d'abord à la *modélisation des échanges à l'interface rue-atmosphère*, en utilisant le concept de couche de mélange. Dans les chapitres suivants, nous présentons en détail les modélisations et les résultats obtenus dans les cas d'un vent *perpendiculaire*, *parallèle* et d'*orientation quelconque* par rapport à l'axe de la rue.

Dans la troisième partie, nous abordons le problème de la généralisation de l'approche rue-canyon à un ensemble de plusieurs rues. Dans un premier temps, nous étudions les phénomènes qui se développent au niveau des *intersections*. Dans un deuxième temps, nous présentons un nouveau modèle pour traiter le transport des polluants à l'intérieur d'un *réseau de rues*.

Enfin, au cours de la quatrième partie, une application du modèle de réseau de rues est effectuée pour un quartier de la ville de Lyon. Le premier chapitre décrit l'ensemble des *données* utilisées lors de cette simulation. Dans le deuxième chapitre, nous comparons les résultats de la *modélisation du quartier* avec les données mesurées et nous présentons quelques applications possibles de la méthode.

Conclusions et perspectives

Conclusions

L'approche rue-canyon est aujourd'hui couramment utilisée pour modéliser la dispersion des polluants à l'échelle de la rue. Si les mécanismes qui se développent dans le cas d'une rue isolée, infinie, symétrique et perpendiculaire à la direction du vent, sont assez bien connus, ce n'est pas le cas des configurations plus générales, rencontrées dans la pratique. Le premier objectif de notre travail a donc été d'identifier et d'étudier les phénomènes associés à ce type de situations. Parallèlement, notre deuxième objectif a été de développer des outils de modélisation opérationnelle, capables de représenter ces "nouveaux" phénomènes dans le cadre d'une application de terrain.

Pour réaliser ce projet, nous nous sommes appuyés sur de nombreuses simulations expérimentales et numériques. Les expériences ont été réalisées dans la soufflerie atmosphérique de l'École Centrale de Lyon. Les simulations numériques ont été effectuées avec les codes de calcul *MERCURE* et *CHENSI*.

Au cours de la première partie, nous avons situé le sujet de cette étude dans le contexte plus général de la pollution atmosphérique. Les notions fondamentales concernant la couche limite atmosphérique, la dispersion turbulente et les outils de modélisation ont ensuite été rappelées. Puis nous avons présenté la démarche adoptée dans la suite de ce travail.

Dans la deuxième partie, nous nous sommes intéressés à la dispersion des polluants à l'échelle d'une rue isolée. Les deux mécanismes qui contrôlent le niveau de concentration dans la rue sont l'échange turbulent, entre la rue et l'atmosphère extérieure, et l'advection-diffusion des polluants à l'intérieur de la rue. Pour modéliser le premier mécanisme, nous avons utilisé le concept de couche de mélange turbulente, qui nous a permis de relier le flux vertical de matière à travers l'interface située au sommet de la rue, avec l'intensité de turbulence au niveau de cette interface. Le deuxième mécanisme dépend de la topologie de l'écoulement à l'intérieur de la rue, qui elle-même dépend de la direction du vent extérieur. Nous avons donc étudié successivement les cas d'un vent perpendiculaire, parallèle et d'orientation quelconque par rapport à l'axe de la rue.

Pour un vent perpendiculaire, nous avons proposé un nouveau modèle de dispersion, basé sur une résolution analytique de l'équation d'advection-diffusion dans un écoulement potentiel. Ce modèle permet en particulier de modéliser des géométries de rues où interviennent le rapport d'aspect ou la dissymétrie des bâtiments. Des expériences en soufflerie et des simulations

numériques ont été réalisées sur ce type de configurations. Les résultats obtenus illustrent les modifications de la topologie de l'écoulement et leur influence sur la répartition de la concentration dans la rue. Le modèle développé reproduit les principaux comportements observés, même si plusieurs phénomènes restent encore à paramétrer.

Dans le cas d'un vent parallèle à la rue, les recirculations disparaissent et le mouvement longitudinal résulte alors d'un équilibre entre l'entraînement par l'écoulement extérieur et le frottement sur les parois. Cet équilibre nous a conduits à distinguer deux régimes d'écoulement selon la valeur du rapport d'aspect H/W . Un modèle analytique est proposé pour déterminer la vitesse longitudinale en fonction de l'écoulement extérieur et des caractéristiques géométriques de la rue (dimensions, rugosité des parois). Le modèle est en accord avec les simulations numériques et les expériences en soufflerie que nous avons réalisées. En utilisant un modèle gaussien pour la dispersion, nous avons déterminé l'évolution longitudinale de la concentration le long d'une rue. Nous avons ainsi mis en évidence l'absence d'état stationnaire dans le cas d'une source linéique infinie.

Lorsque l'orientation du vent est quelconque, il se forme un mouvement hélicoïdal à l'intérieur de la rue. Afin de comprendre les caractéristiques de cet écoulement, nous avons effectué une décomposition du champ de vitesse selon les deux directions principales. Il apparaît que la composante transversale est indépendante de la composante longitudinale et ne dépend que de la projection du vent extérieur selon la perpendiculaire à la rue. Par contre, la composante longitudinale semble être affectée par la direction du vent. Nous avons également mis en évidence que la vitesse longitudinale moyenne est proportionnelle à la projection longitudinale du vent extérieur. Lorsque la rue est de longueur finie, les résultats obtenus montrent que ce comportement est affecté par l'effet des intersections. La dispersion dans ce type d'écoulement est relativement complexe. Nous avons proposé quelques approches simples pour comprendre et modéliser les phénomènes mais de plus amples développements s'avèrent d'ores et déjà nécessaires.

Les mécanismes décrits dans la deuxième partie se rapportent à l'hypothèse simplificatrice d'une rue infinie isolée. Au cours de la troisième partie, nous nous sommes intéressés aux interactions entre plusieurs rues. À l'intérieur de la canopée urbaine, les échanges entre rues s'effectuent essentiellement au niveau des intersections. Pour modéliser ces échanges, nous avons présenté une approche basée sur le bilan des flux entrant et sortant de l'intersection. En supposant que l'écoulement dans la rue est indépendant de la présence de l'intersection, il est possible de voir apparaître un mouvement vertical résultant d'un déséquilibre des flux entre l'amont et l'aval. La présence de ce mouvement vertical a été vérifiée lors de simulations numériques sur un rétrécissement ou un élargissement de rue. Les flux horizontaux dans l'intersection s'organisent approximativement de façon bidimensionnelle. Cela implique que la fluctuation de la direction du vent extérieur génère un flux turbulent horizontal qui favorise la dispersion des polluants. Les simulations et les expériences effectuées ont cependant montré l'intérêt d'améliorer à l'avenir le couplage entre l'écoulement dans la rue et dans l'intersection.

Afin de traiter toutes les interactions qui existent entre les nombreuses rues connectées sous forme de réseau à l'intérieur d'un quartier, nous avons développé un nouveau modèle, appelé *SIRANE*. Dans ce modèle, chaque segment de rue et chaque nœud d'intersection sont représentés à l'aide d'un modèle de boîte. Le modèle est comparé à des simulations numériques effectuées sur un quartier idéalisé et les résultats sont en bon accord. Outre son intérêt pour modéliser la pollution dans chaque rue d'un réseau, le modèle *SIRANE* s'avère intéressant pour simuler l'effet de l'organisation topologique d'un quartier sur la dispersion et l'étalement d'un panache de polluants.

Pour illustrer l'intérêt pratique des outils développés, nous avons présenté, dans la quatrième partie, un cas d'application du modèle *SIRANE* à un quartier de Lyon. L'analyse des données

nécessaires à la simulation a été l'occasion d'identifier ou de rappeler un certain nombre de comportements caractéristiques. Nous avons en particulier déterminé les propriétés géométriques "moyennes" des rues de l'agglomération.

La simulation d'un quartier de Lyon, effectuée avec le modèle *SIRANE*, a été comparée avec les données mesurées par le réseau COPARLY. Le modèle s'accorde assez bien avec les mesures, même si des écarts importants sont parfois observés. Ces écarts semblent en grande partie attribuables à la qualité des données de trafic utilisées pour la simulation. Plusieurs exemples d'application du modèle ont ensuite été présentés, afin d'illustrer les potentialités offertes par cette nouvelle approche.

Perspectives

À travers les résultats obtenus ou les problèmes rencontrés au cours de ce travail, nous avons pu mettre en évidence un certain nombre de thèmes intéressants pour des recherches futures.

Durant cette étude, nous avons tout d'abord montré l'intérêt des modèles proposés pour décrire la pollution à l'échelle d'une rue ou d'un réseau de rues. Il nous semble donc important de poursuivre le développement et la validation de ces modèles, afin d'étendre leur champ d'application et d'améliorer la qualité des résultats. Dans cette optique, il serait très intéressant de pouvoir effectuer des comparaisons avec des expériences de terrain. Dans la quatrième partie, nous avons présenté une première étude de ce type, réalisée avec le modèle *SIRANE* à l'échelle d'un quartier. Une étude similaire devra être menée pour évaluer le comportement des modèles de dispersion à l'échelle de la rue.

Pour poursuivre le développement de ces modèles, de nombreux problèmes restent encore à résoudre. L'un des problèmes les plus importants, dont les enjeux dépassent le cadre de l'échelle locale, concerne la description des situations de vent très faible. En effet, ces situations sont généralement propices à l'apparition de pics de pollution et malheureusement, la plupart des modèles de dispersion sont très mal adaptés pour traiter ce type de conditions. À l'échelle d'une rue, plusieurs expériences in situ ont déjà mis en évidence la disparition du tourbillon caractéristique en-deçà d'une certaine vitesse du vent. Il serait alors intéressant d'identifier les mécanismes prépondérants dans la dispersion (turbulence thermique, mouvement des véhicules) et de proposer de nouvelles approches de modélisation.

La difficulté que l'on rencontre dans le développement de modèles appliqués consiste à mettre au point un modèle rapide à utiliser, tout en prenant en compte le maximum de phénomènes. Malheureusement, tous les phénomènes ne peuvent pas être considérés explicitement et quelques-uns doivent être paramétrés. C'est en particulier le cas de plusieurs phénomènes complexes, qui ne se manifestent pas par un comportement bien identifié, modélisable simplement (à travers l'écoulement moyen, par exemple). Citons entre autres les effets thermiques, la turbulence induite par les véhicules, la présence d'arbres, de véhicules en stationnement, de rugosités sur les parois. Il est bien évident que chacun de ces phénomènes a un effet aérodynamique propre, mais de tels détails ne présentent pas d'intérêt dans le cadre d'un modèle appliqué. Par contre, la multiplication de ces phénomènes secondaires peut accroître la turbulence et le mélange des polluants à l'intérieur de la rue. C'est pourquoi il serait plus intéressant de réfléchir à une paramétrisation de ces effets en terme de turbulence induite. L'étude détaillée de ces mécanismes,

en vue de leur paramétrisation, constituerait certainement un sujet de recherche intéressant.

Un autre axe de recherche à envisager concerne l'étude et la modélisation des intersections de rues et des places de grande taille. Au cours de notre travail, nous avons proposé un modèle d'échange au niveau d'une intersection simple. Il serait intéressant de poursuivre cette étude et de construire un modèle de dispersion permettant de déterminer la répartition de concentration dans l'intersection. Par ailleurs, la modélisation des grandes places devra faire l'objet d'une étude spécifique, dans laquelle on considérera l'interaction avec l'écoulement extérieur.

En permettant de modéliser tout un quartier, l'approche "réseau de rues" utilisée dans le modèle *SIRANE* offre la possibilité d'étudier l'influence de la topologie et de l'organisation d'un quartier sur la dispersion d'un panache de polluants. Il serait alors intéressant d'établir des lois d'évolution de l'étalement d'un panache au-dessus d'un quartier (évolution de σ_y), en fonction des paramètres géométriques de ce quartier (directions caractéristiques, densité du réseau, rapport d'aspect des rues). On pourrait alors définir des typologies de quartier, à prendre en compte différemment dans une modélisation à l'échelle de l'agglomération. Dans ce cadre, il serait également très utile de réaliser des expériences – en soufflerie ou in situ – sur l'écoulement et la dispersion dans un quartier, permettant de comprendre les phénomènes physiques et de valider les modèles.

Par ailleurs, l'analyse des données du cadastre de l'agglomération lyonnaise a permis de montrer la complexité des géométries réelles des bâtiments. Il apparaît que les notions de rue-canyon ou de réseau de rues ne sont parfois pas adaptées pour représenter le bâti réel (bâtiments de forme complexe, cours intérieures, ...). Il nous semble donc important de réfléchir à de nouveaux concepts qui permettraient de décrire un plus grand nombre de configurations.

Au-delà de ces thèmes de recherche spécifiques, il est important de rappeler la nécessité de construire un système intégré de modélisation, comprenant une hiérarchie de modèles couplés, adaptés aux différentes échelles. Nous avons mis en évidence, au cours de notre travail, les difficultés que l'on rencontre lorsque l'on cherche à modéliser une configuration réelle à l'aide d'un seul modèle. L'utilisation d'un système intégré permettra, à terme, d'améliorer la qualité des résultats de chacun des modèles.

Enfin, en ce qui concerne les applications concrètes des modèles développés au cours de ce travail, nous avons évoqué dans la quatrième partie les possibilités offertes en terme de cartographie de la pollution, de représentativité des mesures ou d'exposition de la population. La rapidité de fonctionnement de ces modèles permet également d'envisager un couplage en temps réel avec des systèmes d'information et de mesure. À partir d'une estimation des conditions météorologiques pour les heures qui suivent, il sera alors possible de *prévoir* les niveaux de pollution et, en cas de dépassement d'un seuil, d'évaluer très rapidement l'impact que pourrait avoir une décision préfectorale de réduction de la circulation automobile.

Annexes

A Solutions analytiques de l'équation d'advection-diffusion

A.1 Équation d'advection-diffusion

Considérons le problème de diffusion turbulente de FICK modélisée par l'équation d'advection-diffusion :

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \bar{c} = \kappa \Delta \bar{c} + \bar{S} \quad (\text{A.1})$$

dans laquelle la diffusivité turbulente κ est supposée isotrope et constante. La résolution de cette équation dépend du champ de vitesse $\bar{\mathbf{u}}$. Nous présentons quelques solutions exactes du problème dans le cas d'une fluide au repos ($\bar{\mathbf{u}} = 0$) et d'un fluide en mouvement uniforme ($\bar{\mathbf{u}} = U \mathbf{i}_x$).

A.2 Solutions pour un fluide au repos

A.2.1 Fluide au repos – Source ponctuelle – Rejet instantané

Une quantité Q de polluants est rejetée à l'instant $t = 0$ à l'origine du repère. La concentration est fournie par :

$$\bar{c}(x,y,z,t) = \frac{Q}{8(\pi \kappa t)^{3/2}} \exp\left(-\frac{(x^2 + y^2 + z^2)}{4\kappa t}\right) \text{ avec } \begin{cases} \bar{c} \text{ en } kg/m^3 \\ Q \text{ en } kg \\ \kappa \text{ en } m^2/s \\ t \text{ en } s \\ x,y,z \text{ en } m \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

L'équation précédente est la solution de base de l'équation d'advection-diffusion. Toutes les solutions suivantes sont obtenues par intégration dans le temps ou dans l'espace de cette relation.

A.2.2 Fluide au repos – Source ponctuelle – Rejet continu

À partir de l'instant $t = 0$, une source de débit Q émet à l'origine du repère. Le passage d'un rejet instantané à un rejet continu s'effectue par intégration en fonction du temps :

$$\bar{c}(x,y,z,t)_{continu} = \int_0^t \bar{c}(x,y,z,t-t')_{inst}. dt' \quad (\text{A.3})$$

On obtient ainsi :

$$\bar{c}(x,y,z,t) = \frac{\mathcal{Q}}{4\pi K(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}} \operatorname{erfc} \left(\frac{(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}}{2(Kt)^{1/2}} \right) \text{ avec } \begin{cases} \bar{c} \text{ en } kg/m^3 \\ \mathcal{Q} \text{ en } kg/s \\ K \text{ en } m^2/s \\ t \text{ en } s \\ x,y,z \text{ en } m \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

À l'état stationnaire, la répartition spatiale de concentration est :

$$\bar{c}(x,y,z) = \frac{\mathcal{Q}}{4\pi K(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}} \quad (\text{A.5})$$

A.2.3 Fluide au repos – Source linéique infinie selon y – Rejet instantané

Une certaine quantité de polluants est rejetée à l'instant $t = 0$ le long d'une ligne infinie définie par ($x = z = 0$). On note \mathcal{Q} la masse de polluants rejetée par unité de longueur. Pour calculer le champ de concentration, on intègre la solution A.2 selon la direction y :

$$\bar{c}(x,z,t)_{\text{ligne}} = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{c}(x,y-y',z,t)_{\text{point}} dy' \quad (\text{A.6})$$

La distribution de la concentration dans l'espace est alors fournie par :

$$\bar{c}(x,y,z,t) = \frac{\mathcal{Q}}{4\pi Kt} \exp \left(-\frac{x^2 + z^2}{4Kt} \right) \text{ avec } \begin{cases} \bar{c} \text{ en } kg/m^3 \\ \mathcal{Q} \text{ en } kg/m \\ K \text{ en } m^2/s \\ t \text{ en } s \\ x,z \text{ en } m \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

A.2.4 Fluide au repos – Source linéique infinie selon y – Rejet continu

À partir de l'instant $t = 0$, une source linéique de débit \mathcal{Q} , placée sur la droite ($x = z = 0$), émet en continu. Le champ de concentration est fourni par la relation :

$$\bar{c}(x,y,z,t) = \frac{\mathcal{Q}}{4\pi K} E_1 \left(\frac{x^2 + z^2}{4Kt} \right) \text{ avec } \begin{cases} \bar{c} \text{ en } kg/m^3 \\ \mathcal{Q} \text{ en } kg/m/s \\ K \text{ en } m^2/s \\ t \text{ en } s \\ x,z \text{ en } m \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

où E_1 est la fonction *exponentielle intégrale* d'ordre un. En raison de l'absence de convection, cette solution ne converge jamais vers un état stationnaire, si bien que la concentration augmente indéfiniment dans le domaine. Il existe une forme simplifiée de cette solution, obtenue pour des temps de diffusion importants :

$$\bar{c}(x,y,z,t) = \frac{\mathcal{Q}}{4\pi K} \left[\ln \left(\frac{4Kt}{x^2 + z^2} \right) - \gamma \right] \text{ si } \frac{x^2 + z^2}{4Kt} \ll 1 \quad (\text{A.9})$$

où γ est la constante d'EULER ($\gamma \simeq 0,577$).

A.3 Solutions pour un fluide en écoulement uniforme

A.3.1 Écoulement uniforme – Source ponctuelle – Rejet instantané

Une quantité \mathcal{Q} de polluants est rejetée à l'instant $t = 0$ à l'origine du repère. Le champ de concentration est obtenu de façon triviale, à partir de la relation A.2, en advection le centre de la bouffée à la vitesse U :

$$\bar{c}(x,y,z,t) = \frac{\mathcal{Q}}{8(\pi\kappa t)^{3/2}} \exp\left(-\frac{(x-Ut)^2 + y^2 + z^2}{4\kappa t}\right) \text{ avec } \begin{cases} \bar{c} \text{ en } kg/m^3 \\ \mathcal{Q} \text{ en } kg \\ \kappa \text{ en } m^2/s \\ U \text{ en } m/s \\ x,y,z \text{ en } m \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

A.3.2 Écoulement uniforme – Source ponctuelle – Rejet continu

Une source ponctuelle de débit \mathcal{Q} émet en continu à l'origine du repère. Le champ de concentration s'écrit :

$$\bar{c}(x,y,z) = \frac{\mathcal{Q}}{4\pi\kappa(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{U}{2\kappa}[(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} - x]\right) \text{ avec } \begin{cases} \bar{c} \text{ en } kg/m^3 \\ \mathcal{Q} \text{ en } kg/s \\ \kappa \text{ en } m^2/s \\ U \text{ en } m/s \\ x,y,z \text{ en } m \end{cases} \quad (\text{A.11})$$

Il existe une forme simplifiée de cette équation, obtenue lorsque l'on néglige la diffusion longitudinale (selon x) devant la diffusion transversale et l'advection :

$$\bar{c}(x,y,z) = \frac{\mathcal{Q}}{4\pi\kappa x} \exp\left(-\frac{U}{4\kappa x}(y^2 + z^2)\right) \text{ si } y^2 + z^2 \ll x^2 \quad (\text{A.12})$$

A.3.3 Écoulement uniforme – Source linéique infinie selon y – Rejet instantané

Une certaine quantité de polluants est rejetée à l'instant $t = 0$ le long d'une ligne infinie définie par ($x = z = 0$). On note \mathcal{Q} la masse de polluants rejetée par unité de longueur. L'évolution de la concentration dans l'écoulement est fournie par :

$$\bar{c}(x,y,z,t) = \frac{\mathcal{Q}}{4\pi\kappa t} \exp\left(-\frac{(x-Ut)^2 + z^2}{4\kappa t}\right) \text{ avec } \begin{cases} \bar{c} \text{ en } kg/m^3 \\ \mathcal{Q} \text{ en } kg/m \\ \kappa \text{ en } m^2/s \\ U \text{ en } m/s \\ t \text{ en } s \\ x,z \text{ en } m \end{cases} \quad (\text{A.13})$$

A.3.4 Écoulement uniforme – Source linéique infinie selon y – Rejet continu

Une source linéique de débit \mathcal{Q} placée sur la droite ($x = z = 0$) émet en continu. Le champ de concentration est décrit par :

$$\bar{c}(x,z) = \frac{\mathcal{Q}}{2\pi\kappa} \exp\left(\frac{Ux}{2\kappa}\right) K_0\left(\frac{U(x^2 + z^2)^{1/2}}{2\kappa}\right) \text{ avec } \begin{cases} \bar{c} \text{ en } kg/m^3 \\ \mathcal{Q} \text{ en } kg/m/s \\ \kappa \text{ en } m^2/s \\ U \text{ en } m/s \\ x,z \text{ en } m \end{cases} \quad (\text{A.14})$$

où K_0 est une fonction de BESSEL modifiée. Il existe une forme simplifiée de cette équation, obtenue lorsque l'on néglige la diffusion longitudinale (selon x) devant la diffusion transversale et l'advection :

$$\bar{c}(x,z) = \frac{Q}{2(\pi K U x)^{1/2}} \exp\left(-\frac{U z^2}{4Kx}\right) \text{ si } \begin{cases} \frac{U(x^2 + z^2)^{1/2}}{2K} \gg 1 \\ z^2 \ll x^2 \end{cases} \quad (\text{A.15})$$

A.4 Autres formulations des solutions

A.4.1 Diffusivité turbulente anisotrope

Lorsque la diffusivité turbulente est anisotrope, on remplace la grandeur scalaire κ par le tenseur diagonal \mathbb{K} . La solution élémentaire, dans le cas d'un rejet ponctuel instantané dans un fluide au repos, devient alors :

$$\bar{c}(x,y,z,t) = \frac{Q}{8(\pi t)^{3/2}(\kappa_x \kappa_y \kappa_z)^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{4t} \left(\frac{x^2}{\kappa_x} + \frac{y^2}{\kappa_y} + \frac{z^2}{\kappa_z}\right)\right) \text{ avec } \begin{cases} \bar{c} \text{ en } kg/m^3 \\ Q \text{ en } kg \\ \kappa_i \text{ en } m^2/s \\ t \text{ en } s \\ x,y,z \text{ en } m \end{cases} \quad (\text{A.16})$$

Comme pour la forme isotrope, il est possible d'en déduire par intégration toutes les autres solutions.

A.4.2 Formulation utilisant les écarts-types de diffusion

Dans de nombreux cas, il est utile de remplacer les coefficients de diffusivité turbulente κ_i par les écarts-types de diffusion σ_i . La solution élémentaire, dans le cas d'un rejet ponctuel instantané dans un fluide au repos, devient alors :

$$\bar{c}(x,y,z,t) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right) \text{ avec } \begin{cases} \bar{c} \text{ en } kg/m^3 \\ Q \text{ en } kg \\ \sigma_i \text{ en } m \\ t \text{ en } s \\ x,y,z \text{ en } m \end{cases} \quad (\text{A.17})$$

Comme pour la forme utilisant la diffusivité turbulente, il est possible d'en déduire par intégration toutes les autres solutions.

B Conditions de calcul des simulations numériques

B.1 Conditions de vent en entrée du domaine de calcul

Dans les simulations numériques, il est nécessaire d'imposer des conditions aux limites pour définir les profils verticaux de vitesse et de turbulence en entrée du domaine de calcul. Pour cela, nous avons utilisé les profils théoriques obtenus pour une couche limite logarithmique en atmosphère neutre. Ces profils sont définis par :

$$\begin{cases} \bar{u} = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \\ k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \\ \varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z} \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

Pour l'étude des rues infinies perpendiculaires au vent extérieur, nous avons utilisé les mêmes valeurs de u_* et de z_0 qu'en soufflerie, afin de pouvoir effectuer des comparaisons. Ces valeurs sont $u_* = 0,23$ m/s et $z_0 = 15$ cm (cf. annexe C). Dans les autres cas, nous avons utilisé les valeurs $u_* = 0,27$ m/s et $z_0 = 5$ cm, ce qui correspond sensiblement aux paramètres utilisés par SINI *et al.* (1996) dans des simulations numériques avec le code *CHENSI*.

B.2 Caractéristiques des maillages

Les maillages utilisés lors des différents calculs numériques sont décrits dans les tableaux suivants. Il s'agit de maillages cartésiens structurés, dont le pas est variable afin d'augmenter la résolution à l'intérieur de la rue. Dans chaque cas, nous avons indiqué les dimensions des obstacles, le nombre total de mailles, le nombre de mailles utilisées pour représenter l'intérieur de la rue et la résolution du maillage au niveau de la paroi. Il faut noter que dans les configurations où il existait une symétrie dans l'écoulement, nous n'avons simulé que la moitié du domaine de calcul en utilisant une condition limite spécifique. Les dimensions des maillages sont fournies sans tenir compte de cette simplification.

Configuration	rue carrée	rue ascendante	rue descendante	rue étroite
Hauteur du bâtiment amont	20 m	20 m	40 m	40 m
Hauteur du bâtiment aval	20 m	40 m	20 m	40 m
Largeur de la rue	20 m	20 m	20 m	13,3 m
Nbre de mailles suivant x (nbre dans la rue)	133 (27)	157 (27)	157 (27)	124 (20)
Nbre de mailles suivant y (nbre dans la rue)	3 (3)	3 (3)	3 (3)	3 (3)
Nbre de mailles suivant z (nbre dans la rue)	62 (27)	99 (27 amont-42 aval)	99 (42 amont-27 aval)	68 (41)
Taille de la maille en paroi	50 cm	50 cm	50 cm	60 cm

Tableau B.1 – **Rue perpendiculaire au vent** : *Caractéristiques des maillages.*

H/W	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4
Hauteur des bâtiments	20 m	20 m	20 m	20 m	20 m	20 m	20 m
Largeur de la rue	80 m	60 m	40 m	20 m	10 m	6,6 m	5 m
Nbre de mailles suivant x	26	26	26	26	26	26	26
Nbre de mailles suivant y (nbre dans la rue)	141 (73)	117 (55)	113 (55)	121 (61)	99 (31)	99 (29)	93 (21)
Nbre de mailles suivant z (nbre dans la rue)	67 (27)	62 (27)	62 (27)	86 (51)	86 (51)	86 (51)	86 (51)
Taille de la maille en paroi	50 cm	50 cm	50 cm	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm

Tableau B.2 – **Rue parallèle au vent** : *Caractéristiques des maillages.*

H/W	1
Hauteur des bâtiments	20 m
Largeur de la rue	20 m
Nbre de mailles suivant x	51
Nbre de mailles suivant y (nbre dans la rue)	69 (27)
Nbre de mailles suivant z (nbre dans la rue)	57 (27)
Taille de la maille en paroi	50 cm

Tableau B.3 – **Rue d'orientation quelconque** : *Caractéristiques des maillages.*

Rue	étroite	large
Hauteur des bâtiments	20 m	20 m
Largeur de la rue	20 m	40 m
Nbre de mailles suivant x	59	59
Nbre de mailles suivant y (nbre dans la rue)	67 (21)	67 (41)
Nbre de mailles suivant z (nbre dans la rue)	44 (17)	44 (17)
Taille de la maille en paroi	1 m	1 m

Tableau B.4 – **Intersections avec variation de section** : *Caractéristiques des maillages.*

Configuration	Rues identiques selon x et y	Rues différentes selon x et y
Hauteur des bâtiments	20 m	20 m
Largeur des rues	20 m	10-20 m
Nbre de mailles suivant x (nbre dans la rue)	61 (17)	61 (27, rue large)
Nbre de mailles suivant y (nbre dans la rue)	61 (17)	57 (11, rue étroite)
Nbre de mailles suivant z (nbre dans la rue)	31 (17)	31 (17)
Taille de la maille en paroi	1 m	1 m

Tableau B.5 – **Carrefours entre deux rues** : *Caractéristiques des maillages.*

Configuration	petite place	grande place
Hauteur des bâtiments	20 m	20 m
Largeur de la rue	20 m	20 m
Taille de la place	60 m	100 m
Nbre de mailles suivant x	99	115
Nbre de mailles suivant y	99	115
Nbre de mailles suivant z	31	31
Taille de la maille en paroi	1 m	1 m

Tableau B.6 – **Places** : *Caractéristiques des maillages.*

Configuration	Rues identiques selon x et y	Rues différentes selon x et y
Hauteur des bâtiments	20 m	20 m
Largeur des rues	20 m	10-20 m
Nbre de mailles suivant x (nbre dans chaque rue)	161 (11)	161 (11, rue large)
Nbre de mailles suivant y (nbre dans chaque rue)	161 (11)	197 (11, rue étroite)
Nbre de mailles suivant z (nbre dans chaque rue)	22 (11)	22 (11)
Taille de la maille en paroi	2 m	1-2 m

Tableau B.7 – **Réseau de rues** : *Caractéristiques des maillages.*

C Conditions expérimentales

C.1 Couches limites incidentes

Au cours des expériences réalisées en soufflerie, deux couches limites différentes ont été utilisées pour simuler le vent extérieur.

C.1.1 Couche limite n° 1 peu rugueuse

La première couche limite, caractérisée par une faible rugosité, a été utilisée dans la deuxième partie pour étudier des rues bidimensionnelles. Cette couche a été générée par un système de déclenchement de type COUNIHAN (ailerons de 300 mm, représentés sur la figure C.2-a), associé à des éléments de rugosité (écrous de 6 mm, distants en moyenne de 10 cm). La longueur de développement de la couche est de 7 m. À cette distance, la couche limite est caractérisée par une vitesse de frottement $u_* = 0,23$ m/s et une rugosité aérodynamique $z_0 = 0,075$ mm (obtenues par régression par rapport à un profil logarithmique).

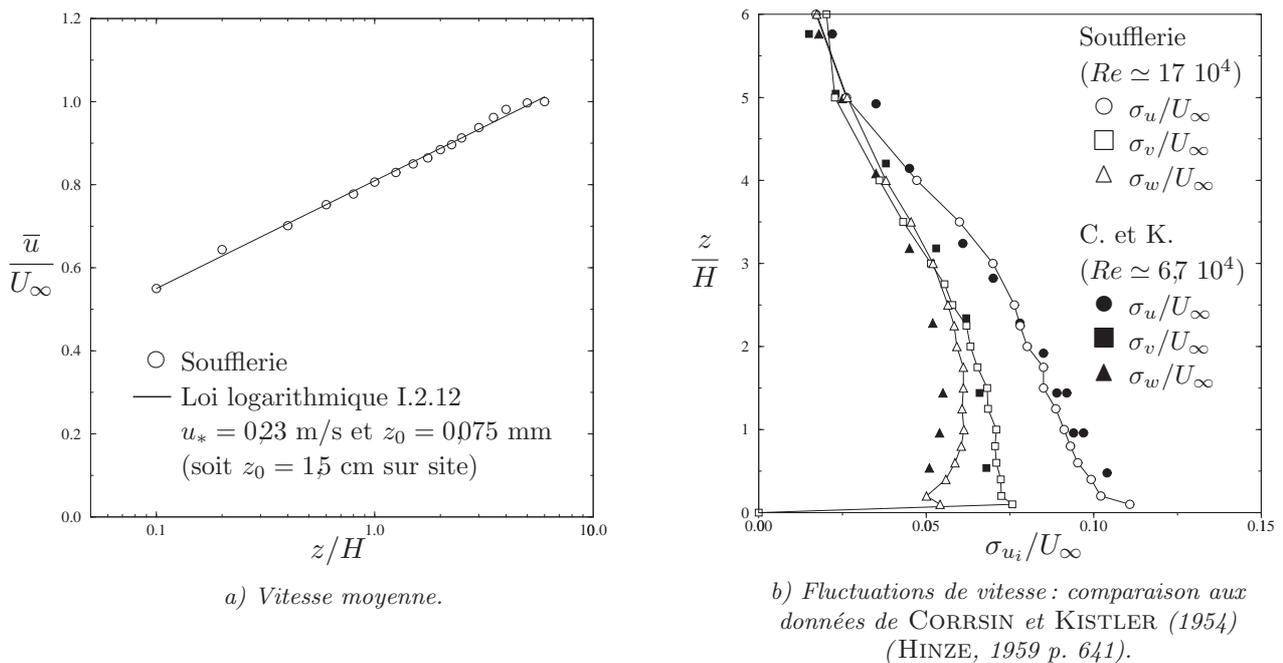


Figure C.1 – Couche limite peu rugueuse.

Les profils de vitesse et de fluctuations ont été représentés sur la figure C.1. On observe que la

vitesse moyenne s'accorde avec une loi logarithmique sur toute l'épaisseur de la couche. Les profils de fluctuation illustrent l'anisotropie de la turbulence au sein de la couche limite. La distribution d'énergie cinétique turbulente sur les trois composantes est en accord avec les données de CORRISIN et KISTLER (1954) présentées dans l'ouvrage de HINZE (1959).

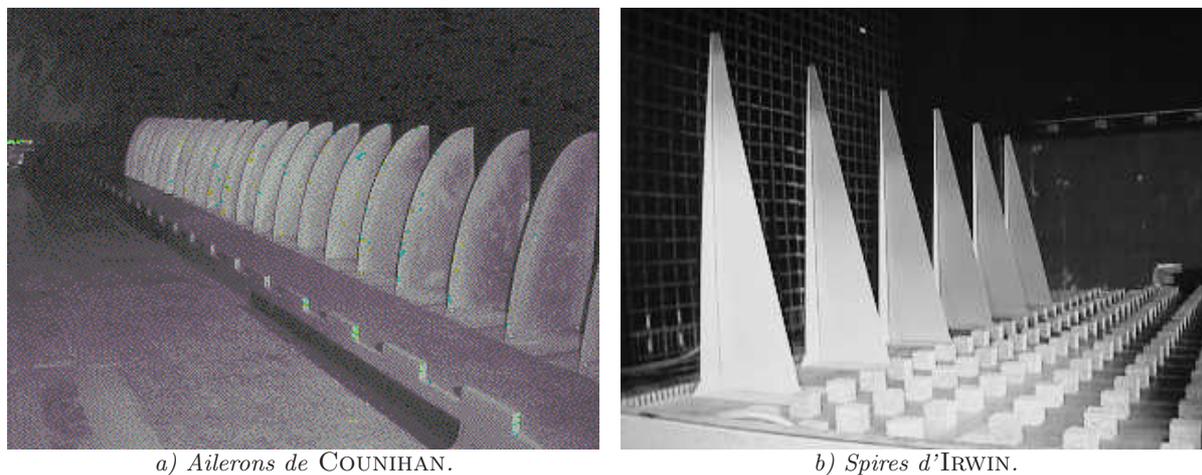


Figure C.2 – Différents systèmes de déclenchement.

C.1.2 Couche limite n° 2 rugueuse

La couche limite *fortement rugueuse* a été utilisée pour étudier un tronçon de rue et les phénomènes intervenant aux intersections. Pour générer les caractéristiques de cette couche, nous avons eu recours à des *spires* d'IRWIN de 1 mètre (représentés sur la figure C.2-b), associés à des éléments de rugosité cubiques de 5 cm distants de 16 cm (cf. figure C.3). La vitesse de frottement du profil de vitesse moyenne est de 0,27 m/s et la rugosité aérodynamique z_0 est de 2,7 mm (obtenues par régression par rapport à un profil logarithmique).

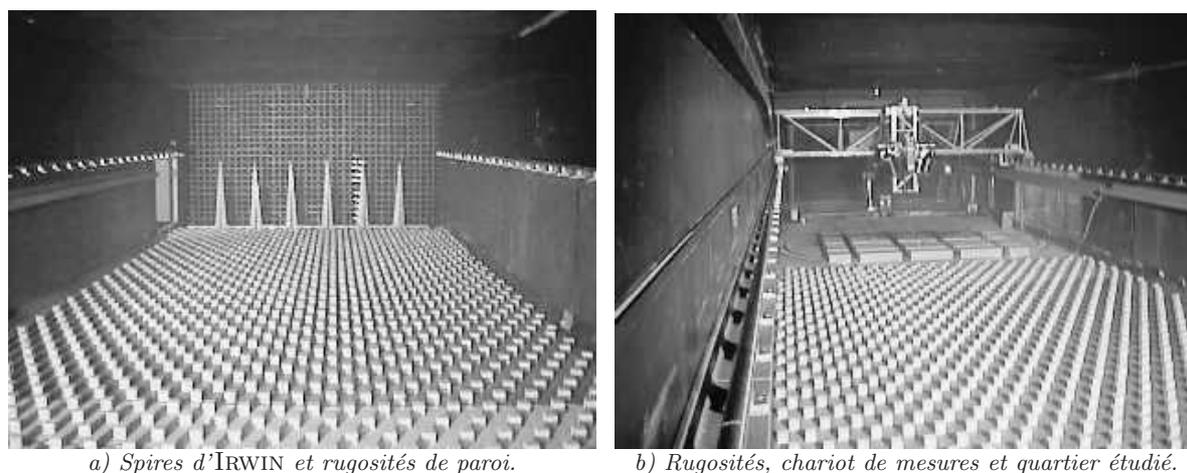


Figure C.3 – Couche limite rugueuse.

Les profils des vitesses moyenne et fluctuante ont été représentés sur la figure C.4. On constate que la zone logarithmique à tension constante occupe entre 10 et 20 % de l'épaisseur de la couche limite.

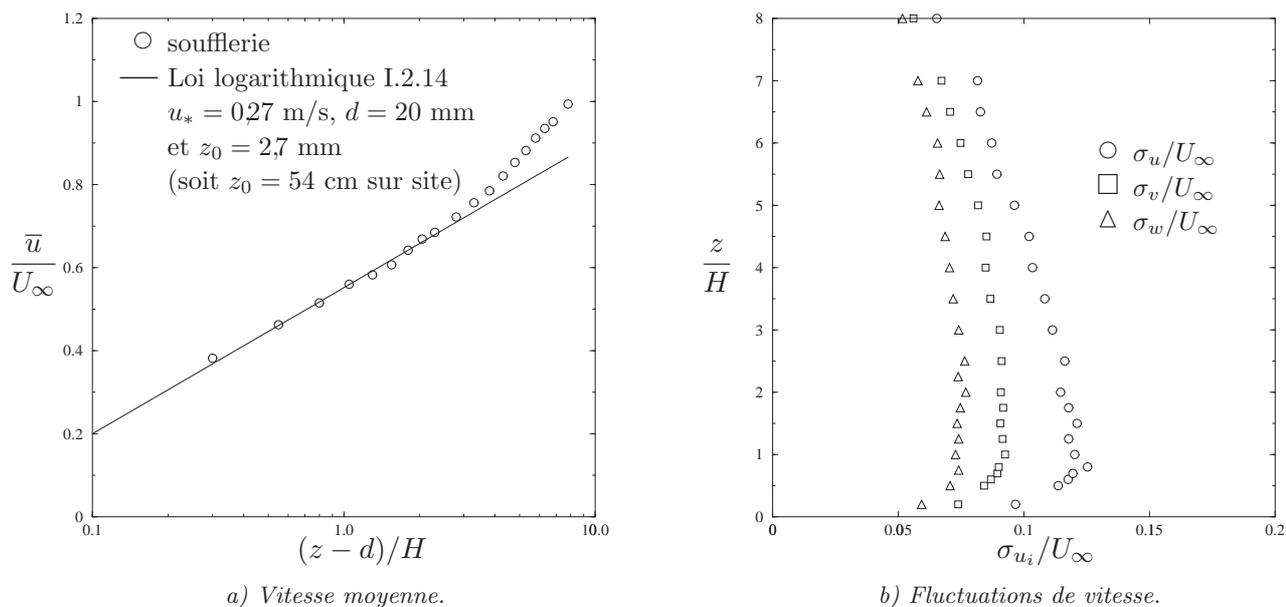


Figure C.4 – Couche limite rugueuse.

C.2 Rue bidimensionnelle perpendiculaire au vent

Les caractéristiques géométriques des maquettes utilisées pour simuler les rues bidimensionnelles perpendiculaires au vent (cf. chapitre II.2) sont résumées ci-dessous :

	rue carrée	rue ascendante	rue descendante	rue étroite
Hauteur du bât. amont	10 cm	10 cm	20 cm	20 cm
Hauteur du bât. aval	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm
Largeur de la rue	10 cm	10 cm	10 cm	6,7 cm
Longueur de la rue	50 cm	50 cm	50 cm	100 cm

Tableau C.1 – Caractéristiques des maquettes.

C.3 Rue bidimensionnelle parallèle au vent

Dans le cas d'un vent parallèle à la rue (cf. chapitre II.3), les deux configurations étudiées sont décrites ci-dessous :

	$H/W = 1$	$H/W = 2$
Hauteur des bâtiments	10 cm	10 cm
Largeur de la rue	10 cm	5 cm
Longueur de la rue	200 cm	200 cm

Tableau C.2 – Caractéristiques des maquettes.

C.4 Rue de longueur finie et intersection de rues

Afin d'étudier une rue de longueur finie pour différentes directions de vent (cf. chapitre II.4) ou pour étudier une intersection de rues (cf. chapitre III.1), nous avons utilisé un petit quartier de quelques rues. La maquette de ce quartier est illustrée sur la figure C.5. La largeur W et la hauteur H des rues sont de 10 cm, tandis que la longueur L est de 50 cm.

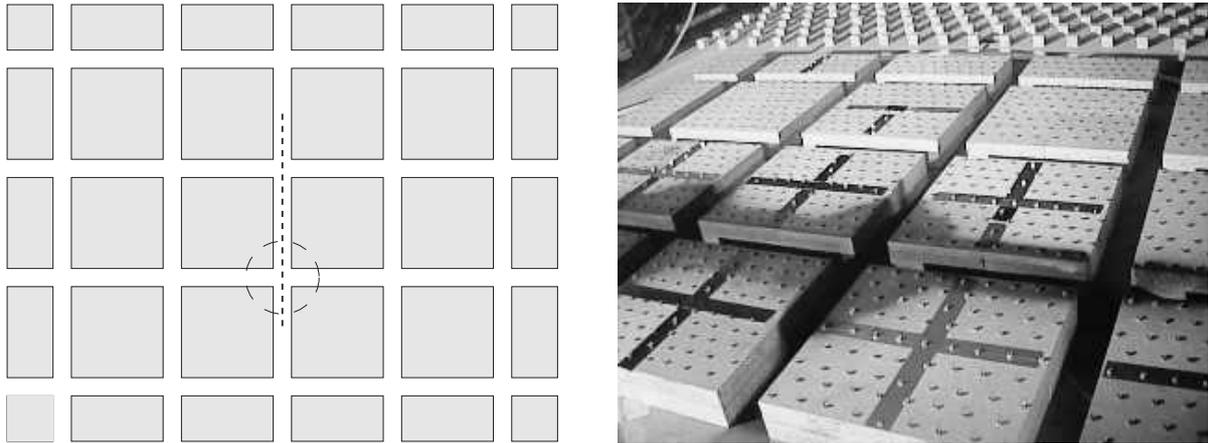


Figure C.5 – Géométrie utilisée en soufflerie. La source est symbolisée en pointillés. L'intersection étudiée est entourée par un cercle.

D Intégrale elliptique de deuxième espèce en argument complexe

Les intégrales elliptiques de première et deuxième espèce, respectivement F et E , sont définies par les relations :

$$F(\varphi \setminus \alpha) = \int_0^\varphi (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \theta)^{-\frac{1}{2}} d\theta \quad (\text{D.1})$$

$$E(\varphi \setminus \alpha) = \int_0^\varphi (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}} d\theta \quad (\text{D.2})$$

Le calcul de ces fonctions est particulièrement difficile pour un argument complexe. Les étapes du calcul sont détaillées ci-dessous.

Soit $m = \sin^2 \alpha$ et $m_1 = 1 - m$. La fonction E , exprimée pour un argument complexe, s'écrit (ABRAMOWITZ et STEGUN, 1965 p. 592–593) :

$$E(\varphi + i\psi \setminus \alpha) = E(\lambda \setminus \alpha) - iE(\mu \setminus 90^\circ - \alpha) + iF(\mu \setminus 90^\circ - \alpha) + \frac{b_1 + ib_2}{b_3} \quad (\text{D.3})$$

où $\cot^2 \lambda$ est la racine positive de l'équation :

$$x^2 - [\cot^2 \varphi + m \sinh^2 \psi \csc^2 \varphi - m_1] x - m_1 \cot^2 \varphi = 0 \quad (\text{D.4})$$

et μ est défini par :

$$m \tan^2 \mu = \tan^2 \varphi \cot^2 \lambda - 1 \quad (\text{D.5})$$

Les constantes b_1 , b_2 et b_3 sont données par :

$$b_1 = \sin^2 \alpha \sin \lambda \cos \lambda \sin^2 \mu (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \lambda)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{D.6})$$

$$b_2 = (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \lambda) (1 - \cos^2 \alpha \sin^2 \mu)^{\frac{1}{2}} \sin \mu \cos \mu \quad (\text{D.7})$$

$$b_3 = \cos^2 \mu + \sin^2 \alpha \sin^2 \lambda \sin^2 \mu \quad (\text{D.8})$$

E Modélisation de la transformation chimique NO-NO₂ à l'échelle de la rue

Si les processus de transport et de dispersion jouent un rôle essentiel sur la pollution atmosphérique, il peut également être important de considérer les transformations chimiques des polluants étudiés. Dans le cadre de la modélisation de la pollution à l'échelle d'une agglomération, les durées de transport des substances chimiques sont de plusieurs dizaines d'heures si bien qu'un grand nombre de réactions chimiques doivent être prises en compte. À l'échelle plus locale d'un quartier ou d'une rue, les temps de séjour sont suffisamment courts pour pouvoir supposer que la plupart des polluants sont transportés dans l'écoulement de façon passive. Il existe cependant quelques réactions assez rapides pour se développer à cette échelle et modifier la concentration des grandeurs mises en jeu. C'est en particulier le cas des oxydes d'azote.

Les oxydes d'azote, principalement NO et NO₂, sont émis au cours des mécanismes de combustion, en particulier par les moteurs des véhicules automobiles. On considère généralement que la répartition des NO_x à l'émission est de 5 à 10 % de NO₂ pour 90 à 95 % de NO. Le monoxyde d'azote NO est beaucoup moins toxique que le NO₂. Malheureusement, des transformations chimiques permettent de convertir NO en NO₂. Il est donc essentiel de prendre en compte ces phénomènes.

Les réactions chimiques faisant intervenir les oxydes d'azote sont nombreuses et complexes (SEINFELD, 1986) mais compte tenu des échelles de temps considérées, il est possible de se limiter au schéma suivant :



La réactivité du radical O[•] est très importante, si bien que le temps caractéristique de la réaction E.2 est négligeable devant celui des autres réactions ($k_2 \gg k_1$ et k_3). Afin de pouvoir modéliser l'interaction entre la chimie et le transport-dispersion de ces substances, il est nécessaire d'exprimer les termes de production chimique \mathcal{P} et de destruction chimique \mathcal{D} qui interviennent dans le bilan de polluants à l'échelle d'une rue (équation I.5.11). Ces termes, exprimés en kg/s, peuvent être reliés aux concentrations molaires par les expressions :

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{\text{NO}} &= M_{\text{NO}} \cdot k_1[\text{NO}_2] & \mathcal{D}_{\text{NO}} &= M_{\text{NO}} \cdot k_3[\text{NO}][\text{O}_3] \\ \mathcal{P}_{\text{NO}_2} &= M_{\text{NO}_2} \cdot k_3[\text{NO}][\text{O}_3] & \mathcal{D}_{\text{NO}_2} &= M_{\text{NO}_2} \cdot k_1[\text{NO}_2] \\ \mathcal{P}_{\text{O}_3} &= M_{\text{O}_3} \cdot k_1[\text{NO}_2] & \mathcal{D}_{\text{O}_3} &= M_{\text{O}_3} \cdot k_3[\text{NO}][\text{O}_3] \end{aligned} \quad (\text{E.4})$$

où M_G et $[G]$ représentent respectivement la masse molaire (en kg/mole) et la concentration molaire (en mole/m³) du composé G.

La résolution de l'équation I.5.11 pour une rue fait donc intervenir un système de trois équations couplées reliant les concentrations en oxydes d'azote et en ozone. Ce système est assez simple à résoudre dans le cas d'une rue isolée (PALMGREN *et al.*, 1996) mais devient beaucoup plus complexe lorsque la rue est située à l'intérieur d'un réseau et que des flux de polluants proviennent des rues voisines. Pour simplifier la résolution du problème, nous avons donc effectué une hypothèse simplificatrice, qui consiste à supposer que le temps caractéristique des réactions chimiques est petit devant le temps de résidence des polluants à l'intérieur de la rue. On peut alors considérer qu'un régime *photo-stationnaire* est atteint à tout instant. Ce régime est caractérisé par l'équilibre entre les termes de production et de destruction chimique des polluants. Cette hypothèse nous permet alors d'écrire la relation simple :

$$\frac{[\text{NO}][\text{O}_3]}{[\text{NO}_2]} = \frac{k_1}{k_3} \quad (\text{E.5})$$

La valeur de k_1 est assez variable car elle dépend du degré d'ensoleillement. Cependant, d'après SEINFELD (1986), on peut utiliser 0,01 ppm comme valeur typique du rapport k_1/k_3 .

En réalité, l'hypothèse précédente est exagérée dans la mesure où les temps de réaction chimique sont comparables aux temps de résidence des polluants dans la rue. Par comparaison à une résolution complète dans le cas d'une rue isolée, BERKOWICZ *et al.* (1997) ont montré que cette approche surestime la concentration en NO₂. Cet écart est cependant d'autant plus faible que le niveau de concentration est important. L'erreur commise est donc faible lorsque la pollution est importante. Cette observation permet de justifier notre hypothèse en tant que première approximation. On peut d'ailleurs noter que cette hypothèse a été utilisée par YAMARTINO et WIEGAND (1986) dans le modèle CPBM ; l'étude de sensibilité effectuée par ces auteurs ne montre pas un besoin d'utiliser des approches plus détaillées.

L'hypothèse de photo-stationnarité permet de décomposer la résolution du problème en deux étapes. Avant la première étape, la concentration dans le domaine est uniquement égale à la concentration de fond ($[\text{NO}]_b$, $[\text{NO}_2]_b$ et $[\text{O}_3]_b$), supposée uniforme et connue. Dans une première étape, le modèle de dispersion est utilisé pour déterminer la concentration en NO_x à l'intérieur de chaque rue. En effet, l'espèce NO_x – somme de NO et de NO₂ – peut être considérée comme une grandeur inerte transportée par l'écoulement. À l'issue de cette étape de dispersion, on obtient la concentration $[\text{NO}_x]_d$ dans chaque rue, qui constitue la contribution des sources situées dans le domaine. Cette concentration n'ayant pas encore "subi" de réactions chimiques, elle se répartit entre NO et NO₂ selon les proportions correspondant à l'émission ($f \simeq 10 - 20\%$) :

$$[\text{NO}]_d = (1 - f) [\text{NO}_x]_d \quad (\text{E.6})$$

$$[\text{NO}_2]_d = f [\text{NO}_x]_d \quad (\text{E.7})$$

Par ailleurs, comme il n'existe pas de source d'ozone, on peut admettre que $[\text{O}_3]_d = 0$. La deuxième étape correspond aux transformations chimiques E.1 à E.3. Les concentrations finales $[\text{NO}]$, $[\text{NO}_2]$ et $[\text{O}_3]$ sont reliées par la relation d'équilibre E.5. La conservation de l'azote nous permet d'écrire :

$$[\text{NO}] + [\text{NO}_2] = [\text{NO}]_b + [\text{NO}]_d + [\text{NO}_2]_b + [\text{NO}_2]_d \quad (\text{E.8})$$

Enfin, on constate que la variation d'ozone doit être égale à la variation de NO :

$$[\text{O}_3] - [\text{O}_3]_b = [\text{NO}] - [\text{NO}]_b - [\text{NO}]_d \quad (\text{E.9})$$

En combinant les équations E.5, E.8 et E.9, il est possible d'exprimer la concentration en dioxyde d'azote, en fonction de la concentration en NO_x et des paramètres du problème :

$$[\text{NO}_2] = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2} \quad (\text{E.10})$$

avec :

$$\begin{cases} b = \frac{k_1}{k_3} + [\text{O}_3]_b + [\text{NO}]_b + 2[\text{NO}_2]_b + (1 + f)[\text{NO}_x]_d \\ c = ([\text{O}_3]_b + [\text{NO}_2]_b + f[\text{NO}_x]_d) ([\text{NO}]_b + [\text{NO}_2]_b + [\text{NO}_x]_d) \end{cases}$$

La relation précédente a été illustrée sur la figure E.1 pour différents niveaux de fond d'ozone.

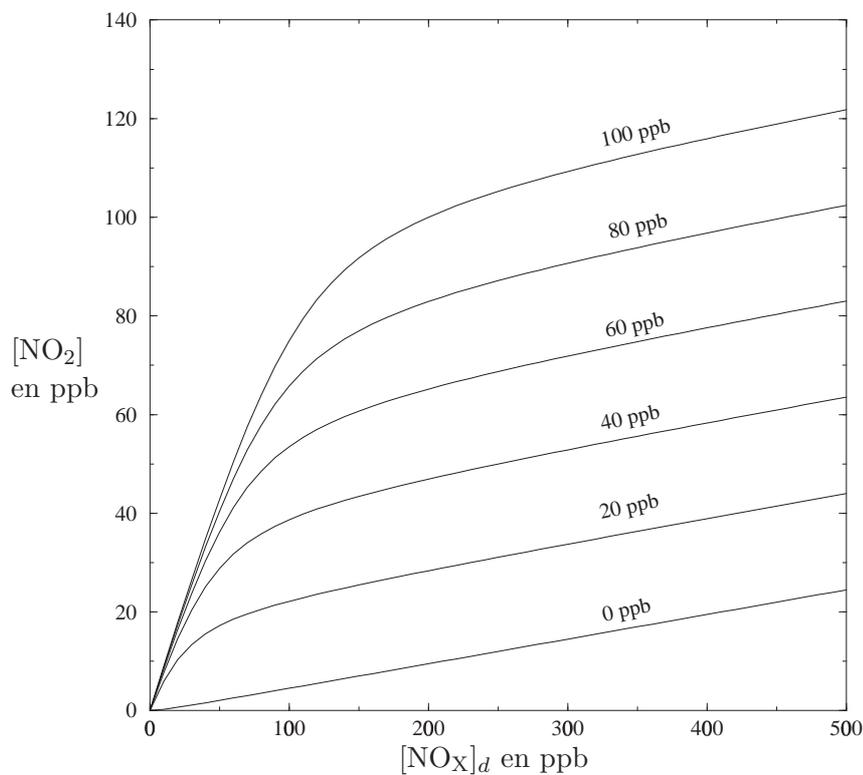


Figure E.1 – Concentration en dioxyde d'azote en fonction de la concentration en NO_x calculée avec le modèle de dispersion. L'évolution est représentée pour différentes valeurs de la concentration de fond en ozone, en supposant que $[\text{NO}]_b = [\text{NO}_2]_b = 0$.

Bibliographie

1992. *POLYEN – Analyse des émissions de pollution liées à l'énergie dans l'agglomération lyonnaise*. COURLY/Rhône-Alpénergie.
- ABADIE, P., et SCHIESTEL, R. 1986. Numerical prediction of turbulent forced heat convection in a bidimensional driven cavity flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **29**, 417–427.
- ABRAMOWITZ, M., et STEGUN, I. A. 1965. *Handbook of mathematical functions*. Dover.
- AHLVIK, P., EGGLESTON, S., GORISEN, N., HASSEL, D., HICKMAN, A.-J., JOUMARD, R., NTZIACHRISTOS, L., RIJKEBOER, R., SAMARAS, Z., et ZIEROCK, K.-H. 1997. *COPERT II - Methodology and emission factors*. European Environment Agency.
- AIRPARIF. 1999. L'exposition potentielle des franciliens à la pollution atmosphérique. *Airparif actualité*, **8**.
- ALBERGEL, A., et JASMIN, F. 1998. 3D simulations of local-scale traffic pollution at local scale. *International Journal of Vehicle Design*, **20 - 1–4**, 79–87.
- ALBRECHT, F. 1933. Untersuchungen der vertikalen Luftzirkulation in der Grosstadt. *Met. Zt.*, **50**, 93–98.
- ASHURST, W. T. 1979. Numerical simulation of turbulent mixing layers via vortex dynamics. *Pages 402–413 de: Turbulent Shear Flows, vol. I*. Springer-Verlag, New-york.
- BARANGER, P. 1986. *Influence des conditions microclimatologiques sur la pollution d'une rue*. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse.
- BÄRRING, L., et MATTSSON, J. O. 1985. Canyon geometry, street temperatures and urban heat island in Malmö, Sweden. *Journal of Climatology*, **5**, 433–444.
- BARRY, P. J. 1964. *Estimation of downwind concentration of airborne effluents discharged in the neighbourhood of buildings*. Atomic Energy of Canada Limited, Report No. AECL-2043.
- BATCHELOR, G. K. 1956. On steady laminar flow with closed streamlines at large Reynolds number. *J. Fluid Mech.*, **1**, 177–190.
- BENESH, F. 1978. *Carbon monoxide hot spot guidelines, Volume V: User's manual for Interaction-Midblock Model*. EPA-450/3-78-037.

- BENSON, P. E. 1979. *CALINE3 - A versatile dispersion model for predicting air pollutant levels near highways and arterial streets*. Federal Highway Administration.
- BENSON, P. E. 1984. *CALINE4 - A dispersion model for predicting air pollutant concentrations near roadways*. Federal Highway Administration.
- BERAL-GUYONNET, I. 1996. Influence des facteurs météorologiques sur la pollution atmosphérique: le cas de l'agglomération lyonnaise. *Revue de géographie de Lyon*, **71** - **1**, 71–77.
- BERKOWICZ, R., HERTEL, O., SORENSEN, N. N., et MICHELSEN, J. A. 1994. Modelling air pollution from traffic in urban areas. *IMA Conference on Flow and Dispersion Through Groups of Obstacles*.
- BERKOWICZ, R., PALMGREN, F., HERTEL, O., et VIGNATI, E. 1996. Using measurements of air pollution in streets for evaluation of urban air quality - meteorological analysis and model calculations. *Science of the Total Environment*, **189/190**, 259–265.
- BERKOWICZ, R., HERTEL, O., LARSEN, S. E., SORENSEN, N. N., et NIELSEN, M. 1997. *Modelling traffic pollution in streets*. National Environmental Research Institute.
- BLACKADAR, A. K. 1997. *Turbulence and diffusion in the atmosphere*. Springer.
- BLEVINS, R. D. 1984. *Applied fluid dynamics handbook*. Van Nostrand Reinhold Company.
- BOUSSINESQ, J. 1897. *Théorie de l'écoulement tourbillonnant et tumultueux des liquides*. Gauthier-Villars, Paris.
- BOUSSINESQ, J. 1905. Sur le pouvoir refroidissant d'un courant liquide ou gazeux. *J. de Math.*, **1**, 285–.
- BRADSHAW, P. 1994. *Collaborative testing of turbulence models*. Stanford Univ. ME Dept, MD-73.
- BRIGGS, G. A. 1973. *Diffusion estimation for small emissions*. Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory.
- BRIMBLECOMBE, P. 1987. *The big smoke*. Routledge.
- BROWN, G. L., et ROSHKO, A. 1974. On density effects and large structure in turbulent mixing layers. *J. Fluid Mech.*, **64**, 775–816.
- BROYDEN, C. G. 1965. A class of methods for solving nonlinear simultaneous equations. *Mathematics of Computation*, **19**, 577–593.
- BRUUN, H. H. 1995. *Hot-wire anemometry. Principles and signal analysis*. Oxford Science Publications.
- BUCHHAVE, P., GEORGE, W. K., et LUMLEY, J. L. 1979. The measurement of turbulence with the Laser-Doppler anemometer. *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, **11**, 505–540.
- BUCKLAND, A. T. 1998. Validation of a street canyon model in two cities. *Environmental Monitoring and Assessment*, **52** - **1–2**, 255–267.
- BUCKLAND, A. T., et MIDDLETON, D. R. 1999. Nomograms for calculating pollution within street canyons. *Atmos. Env.*, **33** - **7**, 1017–1036.

-
- BULLIN, J. A., HINZ, M., et BOWER, S. C. 1982. *Vehicle emissions from intersections*. Texas Transportation Institute, FHWA/SDHPT Project 2250.
- BURGGRAF, O. R. 1966. Analytical and numerical studies of the structure of steady separated flows. *J. Fluid Mech.*, **24** - 1, 113–151.
- BUSINGER, J. A., WYNGAARD, J. C., IZUMI, Y., et BRADLEY, E. F. 1971. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **28**, 181–189.
- BUTY, D. 1988. *Paramétrisation de la turbulence atmosphérique dans un code méso-météorologique tridimensionnel et non-hydrostatique*. Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon.
- CA, V. T., ASAEDA, T., et ARMPFIELD, S. 1995. Characteristics of wind field in a street canyon. *Jour. of Wind Eng. and Indust. Aerod.*, **57** - 1, 63–80.
- CARISSIMO, B., DUPONT, E., MUSSON-GENON, L., et MARCHAND, O. 1995. *Note de principe du code MERCURE version 3.1*. EDF-DER, HE-3395007B.
- CASTRO, I. P., et ROBINS, A. G. 1977. The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams. *J. Fluid Mech.*, **79**, 307–335.
- CHABNI, A., LE QUERE, P., TENAUD, C., et LAATAR, H. 1998. Modelling of pollutant dispersion in urban street canyons by means of a large-eddy simulation approach. *International Journal of Vehicle Design*, **20** - 1–4, 88–95.
- CHARPENTIER, C. 1967. *Étude de la stabilité d'un gradient thermique produit artificiellement dans un écoulement à basse vitesse au moyen d'une grille d'éléments chauffants*. Rapport interne EDF.
- CHARPENTIER, C., ALCARAZ, E., MOREL, R., et MEJEAN, P. 1986. La soufflerie de diffusion d'Électricité de France. *La Technique Moderne*.
- CHERDRON, W., DURST, F., et WHITELAW, J. H. 1978. Asymmetric flows and instabilities in symmetric ducts with sudden expansions. *J. Fluid Mech.*, **84**, 13–31.
- CHOCK, D. 1977. General Motors sulfate dispersion experiment – An overview of the wind, temperature and concentration fields. *Atmos. Env.*, **11**, 553–559.
- CIONCO, R. 1965. A mathematical model for air flow in a vegetative canopy. *J. Appl. Met.*, **4**, 517–522.
- COMTE-BELLOT, G. 1976. Hot-wire anemometry. *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, **8**, 209–231.
- CORRSIN, S. 1963. Turbulence: Experimental Methods. *Pages 524–590 de: S. FLUGGE, Freiburg (ed), Handbuch der Physik, Encyclopedia of Physics, vol. VIII/2*.
- CORRSIN, S., et KISTLER, A. L. 1954. *Natl. Advisory Comm. Aeronaut. Tech. Notes*, 3133–.
- COSTES, J-P. 1996. *Simulations numériques des écoulements atmosphériques sur sols fortement hétérogènes*. Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes.
- COUNIHAN, J. 1969. An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel. *Atmos. Env.*, **3**, 197–214.
- CROXFORD, B. 1996. *Effects of street grid configuration on pedestrian exposure to vehicular pollution: civilising urban traffic*. EPSRC.

- CROXFORD, B., et PENN, A. 1998. Siting considerations for urban pollution monitors. *Atmos. Env.*, **32 - 6**, 1049–1057.
- CROXFORD, B., PENN, A., et HILLIER, B. 1995. Spatial distribution of urban pollution : civilizing urban traffic. *Fifth Symposium on Highway and Urban Pollution*.
- DABBERDT, W. F., et DAVIS, P. A. 1978. Determination of energetic characteristics of urban-rural surfaces in the Greater St. Louis area. *Boundary-Layer Meteorol.*, **14**, 105.
- DABBERDT, W. F., et HOYDYSH, W. G. 1991. Street canyon dispersion : sensitivity to block shape and entrainment. *Atmos. Env.*, **25 - 7**, 1143–1153.
- DAVIDSON, M. J., SNYDER, W. H., LAWSON, R. E., et HUNT, J. C. R. 1996. Wind tunnel simulations of plume dispersion through groups of obstacles. *Atmos. Env.*, **30 - 22**, 3715–3731.
- DEARDORFF, J. W. 1970. A numerical study of the three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds Numbers. *J. Fluid Mech.*, **41 - 2**, 453–480.
- DELAUNAY, D. 1997. *Calcul numérique des écoulements en rue-canyon : effets de maillage*. CSTB EN-AEC 97.106 C.
- DELAUNAY, D., et HOUSEAUX, N. 1997. *Turbulence et quantité de mouvement induites par les véhicules à proximité d'une voie urbaine : mesures in situ*. CSTB EN-AEC 97.68 C.
- DEPAUL, F. T., et SHEIH, C. M. 1985. A tracer study of dispersion in an urban street canyon. *Atmos. Env.*, **19 - 4**, 555–559.
- DEPAUL, F. T., et SHEIH, C. M. 1986. Measurements of wind velocities in a street canyon. *Atmos. Env.*, **20 - 3**, 455–459.
- DOCKERY, D. W., POPE, A., et XU, X. 1993. An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *The New England Journal of Medicine*, **329 - 24**, 1753–1759.
- DORAN, J. C., HORST, T. W., et NICKOLA, P. W. 1978. Variations in measured values of lateral diffusion parameters. *J. Appl. Met.*, **17 - 6**, 825–831.
- DRAXLER, R. R. 1976. Determination of atmospheric diffusion parameters. *Atmos. Env.*, **10**, 99–105.
- DRISCOLL, T. A. 1996. *A MATLAB Toolbox for Schwarz-Christoffel mapping*. Cornell University.
- DRISCOLL, T. A., et VAVASIS, S. A. 1996. *Numerical conformal mapping using cross-ratios and Delaunay triangulation*. Cornell University.
- DUYNKERKE, P. G. 1988. Application of the E- ϵ turbulence closure model to the neutral and stable atmospheric boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **45 - 5**, 865–880.
- DYER, A. J. 1974. A review of flux-profile relationships. *Boundary-Layer Meteorol.*, **7**, 363–372.
- EERENS, H. C., SLIGGERS, C. J., et VAN DEN HOUT, K. D. 1993. The CAR model : the Dutch method to determine city street air quality. *Atmos. Env.*, **27 - 4**, 389–399.
- EFROS, D. A. 1946. *Doklady Akad. Nauk. USSR*, **51**, 267–270.
- EKMAN, V. W. 1905. On the influence of the earth's rotation on ocean currents. *Arkiv. Matematik Astron. Fysik, Stockholm*, **2 - 11**, 1–52.

-
- ESKRIDGE, R. E., et HUNT, J. R. C. 1979. Highway modeling – Part I. Prediction of velocity and turbulence fields in the wakes of vehicles. *J. Appl. Met.*, **18**, 387–400.
- ESKRIDGE, R. E., et PETERSEN, W. B. 1991. Turbulent diffusion behind vehicles: effect of traffic speed on pollutant concentrations. *Journal of Air and Waste Management Association*, **41**, 312–317.
- ESKRIDGE, R. E., et RAO, S. T. 1983. Measurement and prediction of traffic-induced turbulence and velocity fields near roadways. *J. Climate Appl. Meteorol.*, **22**, 1431–1443.
- ESKRIDGE, R. E., et RAO, S. T. 1986. Turbulent diffusion behind vehicles: experimentally determined turbulent mixing parameters. *Atmos. Env.*, **20**, 851–860.
- ESKRIDGE, R. E., et THOMPSON, R. S. 1982. Experimental and theoretical study of the wake of a block shaped vehicle in a shear free boundary flow. *Atmos. Env.*, **16**, 2821–2836.
- ESKRIDGE, R. E., BINKOWSKI, F. S., HUNT, J. R. C., CLARCK, T. L., et DEMERJIAN, K. L. 1979. Highway modeling – Part II. Advection and diffusion of SF₆ tracer gas. *J. Appl. Met.*, **18**, 401–412.
- EVANS, B. H. 1957. *Natural air flow around buildings*. Texas Engineering Experiment Station Research Report No 59, Texas A&M University, College Station, Tex.
- FACKRELL, J. E. 1984. Parameters characterising dispersion in the near wake of buildings. *Jour. of Wind Eng. and Indust. Aerod.*, **16**, 97–118.
- FOLCHER, A. 1989. *Contribution à l'étude de la modification de la structure du vent dans une zone de changement de nature de sol*. Thèse de Doctorat, Université de Nantes.
- FOX, J. 1965. Heat transfer and air flow in a transverse rectangular notch. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **8**, 269–279.
- FRISCH, U. 1995. *Turbulence*. Cambridge University Press.
- FUNG, J. C. H., et HUNT, J. C. R. 1991. *Modelling flow and dispersion through groups of buildings. Final Report to MOD Part I*. DAMTP University of Cambridge.
- GADILHE, A., JANVIER, L., et BARNAUD, G. 1993. Numerical and experimental modelling of the three-dimensional turbulent wind flow through an urban square. *Jour. of Wind Eng. and Indust. Aerod.*, vol **46-47**, pp 755–763.
- GANDEMER, J., et GUYOT, A. 1978. *Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti*. Groupe central des villes nouvelles, Ministère de la qualité de la vie.
- GARRATT, J. R. 1992. *The atmospheric boundary layer*. Cambridge Univ. Press.
- GEORGII, H. W., BUSH, H. W., et WEBER, E. 1967. Untersuchung über die zeitliche und räumliche Verteilung der Immissions-Konzentration des Kohlenmonoxid in Frankfurt am Main. *Berichte des Institutes für Meteorol. und Geophys.*, **11**.
- GOERTLER, H. 1942. Berechnung von aufgaben der freien turbulenz auf grund eines neuen naherungsansatzes. *Z.A.M.M.*, **22**, 244–254.
- GOLDCHTIK, M. A. 1962. Matematicheskaya model otrivnikh techeneey neszheemaemoy zheed-kostee. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **147 - 7**, 1310–1313.

- GOLDEN, J. 1961. *Scale model techniques*. M.S. Thesis, College of Engr., New York Univ., NY, 48 p.
- GRAND, D. 1975. *Contribution à l'étude des courants de recirculation*. Thèse de Doctorat, Univ. Scientifique et Médicale – Inst. Nat. Polytech., Grenoble.
- GRIFFIN. 1983. *An air quality intersection model*. FHWA Report No. FHWA-CO-RD-83-14, Colorado Department of Highways, Denver, CO.
- GRONSKEL, K. 1988. Influence of car speed on dispersion of car exhaust gases. *Atmos. Env.*, **22**, 273–281.
- GROSJEAN, N., GRAFTIAUX, L., MICHARD, M., HUBNER, W., TROPEA, C., et VOLKERT, J. 1997. Combining LDA and PIV for turbulence measurements in unsteady swirling flows. *Measurement Science and Technology*, **7 - 12**, 1523–1544.
- HAMILTON, R. S., et DUNSBY, R. 1984. Levels of vehicles-generated air pollutants in a street canyon. *Environmental and Technology Letters*, **5**, 349–358.
- HARDY-CROSS. 1936. Analysis of flow in networks of conduits or conductors. *Univ. Illinois Bull.*, 286–.
- HARGREAVES, D. M., et BAKER, C. J. 1997. Gaussian puff model of an urban street canyon. *Jour. of Wind Eng. and Indust. Aerod.*, **71**, 927–939.
- HASSAN, A. A., et CROWTHER, J. M. 1998a. Modelling of fluid flow and pollutant dispersion in a street canyon. *Environmental Monitoring and Assessment*, **52 - 1–2**, 281–297.
- HASSAN, A. A., et CROWTHER, J. M. 1998b. A simple model of pollutant concentrations in a street canyon. *Environmental Monitoring and Assessment*, **52 - 1–2**, 269–280.
- HERTEL, O., et BERKOWICZ, R. 1989. *Modelling pollution from traffic in a street canyon. Evaluation of data and model development*. DMU Luft A-129, NERI.
- HICKMAN, A. J., ANDRÉ, M., HAMMARSTROM, U., et KYRIAKIS, N. 1997. *Road traffic characteristics for estimating pollutant emissions*. TRL.
- HINZE, J. O. 1959. *Turbulence*. McGraw-Hill, New York.
- HIRT, C. W., NICHOLS, B. D., et ROMERO, N. C. 1975. *Sola: a numerical solution for transient fluid flows*. Los Alamos Laboratory, Report LA5852, University of California, New Mexico 87544.
- HO, C. H., et HUERRE, P. 1984. Perturbed free shear layers. *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, **16**, 365–424.
- HOSKER, R. P. 1982. *Methods for estimating wake flow and effluent dispersion near simple block-like buildings*. National Oceanic and Atmospheric Administration, Oak Ridge, TN.
- HOTCHKISS, R. S., et HARLOW, F. H. 1973. Air pollution transport in street canyons. *Environmental Protection Agency*, 1–128.
- HOYDYSH, W. G., et DABBERDT, W. F. 1988. Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons. *Atmos. Env.*, **22 - 12**, 2677–2689.
- HOYDYSH, W. G., et DABBERDT, W. F. 1994. Concentration fields at urban intersections: fluid modeling studies. *Atmos. Env.*, **28 - 11**, 1849–1860.

-
- HOYDYSH, W. G., DABBERDT, W. F., SCHORLING, M., YANG, F., et HOLYNSKYJ, O. 1995. Dispersion modeling at urban intersections. *Science of the Total Environment*, **169**, 93–102.
- HUMPHRIES, W., et VINCENT, J. H. 1976a. An experimental investigation of the detention of airborne smoke in the wake bubble behind a disk. *J. Fluid Mech.*, **73 - 3**, 453–464.
- HUMPHRIES, W., et VINCENT, J. H. 1976b. Experiments to investigate transport processes in the near wakes of disks in turbulent air flow. *J. Fluid Mech.*, **75 - 4**, 737–749.
- HUNT, A., et CASTRO, I. P. 1984. Scalar dispersion in model building wakes. *Jour. of Wind Eng. and Indust. Aerod.*, **17**, 89–115.
- HUNT, J. C. R., et MULHEARN, P. J. 1973. Turbulent dispersion from sources near two-dimensional obstacles. *J. Fluid Mech.*, **61**, 245–274.
- HUNT, J. C. R., ABELL, C. J., PETERKA, J. A., et WOO, H. 1978. Kinematical studies of the flows around free or surface-mounted obstacles; applying topology to flow visualization. *J. Fluid Mech.*, **86**, 179–200.
- HUNTER, L. J., WATSON, I. D., et JOHNSON, G. T. 1990. Modelling air flow regimes in urban canyons. *Energy and Buildings*, **15 - 3**, 315–324.
- HUNTER, L. J., JOHNSON, G. T., et WATSON, I. D. 1992. An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon. *Atmos. Env.*, **26 - 4**, 425–432.
- HUSSAIN, M., et LEE, B. E. 1980. *An investigation of wind forces on three dimensional roughness elements in a simulated atmospheric boundary layer flow. Part II: flow over large arrays of identical roughness elements and the effect of frontal and side aspect ratio variations.* Dept. of Build. Sce, Univ. of Sheffield.
- INOUE, E. 1963. On the turbulent structure of air flow within crop canopies. *J. Met. Soc. Jap. Ser.*, **41 - 11**, 317–326.
- IRWIN, H. P. A. H. 1981. The design of spires for wind simulation. *Jour. of Wind Eng. and Indust. Aerod.*, **7**, 361–366.
- IRWIN, J. S. 1979. Estimating plume dispersion – A recommended generalized scheme. *Pages 62–69 de: Fourth Symposium on Turbulence, Diffusion, and Air Pollution, Reno, Nev.*
- ISNARD, O. 1999. *Dispersion atmosphérique en présence de groupes d'obstacles.* Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon.
- JERRAM, N., BELCHER, S. E., et HUNT, J. C. R. 1996. *Turbulent flow through a distributed force - a model for the wind within and above an urban canopy.* DAMTP.
- JOHNSON, G. T., et HUNTER, L. J. 1995. A Numerical Study of Dispersion of Passive Scalars in City Canyons. *Boundary-Layer Meteorol.*, **75**, 235–262.
- JOHNSON, G. T., et WATSON, I. D. 1984. The determination of view-factors in urban canyons. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **23**, 329–335.
- JOHNSON, G. T., HUNTER, L. J., et ARNFIELD, A. J. 1990. Preliminary field test of an urban canyon wind flow model. *Energy and Buildings*, **15 - 3**, 325–332.

- JOHNSON, W. B., LUDWIG, F. L., DABBERDT, W. F., et ALLEN, R. J. 1973. An urban diffusion simulation model for carbon monoxide. *Journal of Air Pollution Control Association*, **23**, 490–498.
- JONES, O. C. 1976. An improvement in the calculation of turbulent friction in rectangular ducts. *J. Fluids Eng.*, **98**, 173–180.
- JOUMARD, R. 1999. *Methods of estimation of atmospheric emissions from transport: European scientific network and scientific state-of-the-art – Action COST 319 final report*. INRETS-LTE 9901.
- JOUMARD, R., et VIDON, R. 1980. *Dispersion de polluants dans une rue en U*. AER n° IV.3(7210). IRT-CERN.
- KAMENETSKY, E., et VIERU, N. 1995. Model of air flow and air pollution concentration in urban canyons. *Boundary-Layer Meteorol.*, **73**, 203–206.
- KAMPÉ DE FÉRIET, M. J. 1939. Les fonctions aléatoires stationnaires et la théorie statistique de la turbulence homogène. *Ann. Soc. Sci. Brux.*, **59**, 145.
- KASTNER-KLEIN, P., et PLATE, E. J. 1998. *Windkanalversuche zur Verbesserung der Ermittlung von KFZ-bedingten Konzentrationsverteilungen in Stadtgebieten*. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe.
- KASTNER-KLEIN, P., PLATE, E., et FEDOROVICH, E. 1997. Gaseous pollutant dispersion around urban-canopy elements: wind tunnel case studies. *International Journal of Environment and Pollution*, **8**, 727–737.
- KASTNER-KLEIN, P., BERKOWICZ, R., RASTETTER, A., et PLATE, E. J. 1998. Modelling of vehicle induced turbulence in air pollution studies for streets. *5th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 18-21 May 1998, Rhodes, Greece*.
- KASTNER-KLEIN, P., FEDOROVITCH, E., SINI, J.-F., et MESTAYER, P. G. 1999a. Experimental and numerical verification of similarity concept for diffusion of car exhaust gases in urban street canyons. *6th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Rouen France*.
- KASTNER-KLEIN, P., FEDOROVITCH, E., et ROTACH, M. W. 1999b. Organised and turbulent air motions in a wind tunnel model of a street canyon with and without moving vehicles. *6th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Rouen France*.
- KENNEDY, I. M., et KENT, J. H. 1977. Wind tunnel modeling of CO dispersion in city streets. *Atmos. Env.*, **11**, 541–547.
- KETZEL, M., BERKOWICZ, R., et MÜLLER, W. 1999. Dependence of street canyon concentrations on above roof wind speed - implications for numerical modelling. *6th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Rouen France*.
- KIM, S., BRANDT, H., et WHITE, B. R. 1990. An experimental-study of 2-dimensional atmospheric gas dispersion near 2 objects. *Boundary-Layer Meteorol.*, **52**, 1–16.

- KING, L. V. 1914. On the convection of the heat from small cylinder in a stream of fluid: determination of the convection constants of small platinum wires with applications to hot-wire anemometry. *Phil. Trans. Roy. Soc. (London), Ser. A*, **214**, 373–432.
- KLEBANOFF, P. S., et DIEHL, Z. W. 1952. Some features of artificially thickened fully developed turbulent boundary layers with zero pressure gradient. *NACA TR 1110*, 1165–1191.
- KLINE, S. J., CANTWELL, B. J., et LILLEY, G. M. (eds). 1981. *The 1980-81 AFOSR-HTTM Stanford Conference on complex turbulent flows*. Stanford University, California.
- KOSEFF, J. R., et STREET, R. L. 1984a. On end wall effects in a lid-driven cavity flow. *J. Fluids Eng.*, **106**, 385–389.
- KOSEFF, J. R., et STREET, R. L. 1984b. Visualization studies of a shear driven 3-dimensional recirculating flow. *J. Fluids Eng.*, **106**, 21–29.
- KOUSHKI, P. A. 1991. Evaluation of street-canyon carbon monoxide-dispersion simulation model. *Journal of Transportation Engineering*, **117**, 444–456.
- LANDSBERG, H. E. 1981. The urban climate. *Int. Geophys. Series*, **28**, 275 pp.
- LANZANI, G., et TAMPONI, M. 1995. A microscale Lagrangian particle model for the dispersion of primary pollutants in a street canyon. Sensitivity analysis and first validation trials. *Atmos. Env.*, **29 - 23**, 3465–3475.
- LARCHEVÊQUE, L. 1998. *Modèle de recirculation derrière un obstacle au sein d'un écoulement potentiel. Solution analytique de l'équation d'advection-diffusion*. École Centrale de Lyon.
- LAUNDER, B. E., et SPALDING, D. B. 1972. *Mathematical models of turbulence*. Academic Press, London.
- LAVRENTIEV, M., et CHABAT, B. 1980. *Effets hydrodynamiques et modèles mathématiques*. Ed. Mir.
- LEE, I. Y., et PARK, H. M. 1994. Parameterization of the pollutant transport and dispersion in urban street canyons. *Atmos. Env.*, **28 - 14**, 2343–2349.
- LEITL, B. M., et MERONEY, R. N. 1997. Car exhaust dispersion in a street canyon. Numerical critique of a wind tunnel experiment. *Jour. of Wind Eng. and Indust. Aerod.*, **67 - 8**, 293–304.
- LETTAU, H. H. 1970. Physical and meteorological basis for mathematical models of urban diffusion processes. *Symposium on multiple-source urban diffusion models*. U.S. EPA No. AP-86.
- LETTAU, H. H. 1972. *Class notes (unpublished) from Meteorology 403, Micrometeorology, at the University of Wisconsin, Madison*.
- LEVI ALVARES, S. 1993. *Simulation numérique des écoulements urbains à l'échelle d'une rue à l'aide d'un modèle $k-\varepsilon$* . Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes.
- LIEPMANN, H. W., et LAUFER, J. 1947. *Investigations of free turbulent mixing*. N.A.C.A. Tech. Note n° 1257, California Institute of Technology.
- LOCK, R. C. 1951. The velocity distribution in the laminar boundary layer between parallel streams. *Quart. J. Mech. Appl. Math.*, **4**, 42–63.

- LOUIS, J-F. 1979. A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorol.*, **17**, 187–202.
- LOUKA, P., BELCHER, S. E., et HARRISON, R. G. 1998. Modified street canyon flow. *Jour. of Wind Eng. and Indust. Aerod.*, **74–76**, 485–493.
- MACDONALD, R. W., GRIFFITHS, R. F., et CHEAH, S. C. 1997. Field experiments of dispersion through regular arrays of cubic structures. *Atmos. Env.*, **31 - 6**, 783–795.
- MATTEI, J. D., et RUPP, I. 1993. *Notice d'utilisation du code ESTET version 3.1*. EDF-DER HE-4493-21B.
- MATTEI, J. D., et SIMONIN, O. 1992. *Logiciel ESTET – Manuel théorique de la version 3.1 Tome I – Modélisations physiques*. EDF-DER HE-4492-38B.
- MEHTA, U. B., et LAVAN, Z. 1969. Flow in a two dimensional channel with a rectangular cavity. *Journal of Applied Mechanics*, **36**, 897–901.
- MEI-KAO, L, et ROTH, P. M. 1973. *Urban airshed photochemical simulation model study*. EPA-R4-73-030d, NTIS n° PB-234 976. US EPA.
- MEINDERS, E. R. 1998. *Experimental study of heat transfer in turbulent flows over wall-mounted cubes*. Thèse de Doctorat, Faculty of Applied Physics, Delft University of Technology.
- MENSINK, C., BOMANS, B., et JANSSEN, L. 1999. An assessment of urban VOC emissions and concentrations by comparing model results and measurements. *6th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Rouen France*.
- MERONEY, R. N., RAFAILIDIS, S., et PAVAGEAU, M. 1995. Dispersion in idealized urban street canyons. *3rd International Conference on Air Pollution*, vol. 2.
- MERONEY, R. N., PAVAGEAU, M., RAFAILIDIS, S., et SCHATZMANN, M. 1996. Study of line source characteristics for 2-D physical modelling of pollutant dispersion in street canyons. *Jour. of Wind Eng. and Indust. Aerod.*, **62 - 1**, 37–56.
- MERY, P. 1969. *Note relative à la réalisation d'une soufflerie de grandes dimensions adaptée à la simulation des problèmes de diffusion turbulente dans les basses couches atmosphériques*. Rapport interne EDF.
- MESSINA, A. 1983. *Estimates of air pollution near signalized intersections*. Federal Highway Administration.
- MESTAYER, P. G., SINI, J-F., et JOBERT, M. 1995. Simulation of the wall temperature influence on flows and dispersion within street canyons. *3rd International Conference on Air Pollution*, vol. 2.
- MILLS, A. F., et HANG, X. 1983. On the skin friction coefficient for a fully rough flat plate. *J. Fluids Eng.*, **105**, 364–365.
- MILLS, G. M. 1993. Simulation of the energy budget of an urban canyon - I. Model structure and sensitivity test. *Atmos. Env.*, **27 - 2**, 157–170.
- MILLS, R. D. 1965. On the closed motion of fluid in a square cavity. *J. Roy. Aeronaut. Soc.*, **69**, 116–120.

-
- MILLS, R. D. 1968. Numerical and experimental investigations of the shear layer between two parallel streams. *J. Fluid Mech.*, **33**, 591–616.
- MILNE-THOMSON, L. M. 1947. *Theoretical hydrodynamics*. Mac Millan.
- MONIN, A. S., et OBUKHOV, A. M. 1954. Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere. *Trans. Geophys. Inst. Akad. Nauk, USSR*, **151**, 163–187.
- MONIN, A. S., et YAGLOM, A. M. 1971. *Statistical Fluid Mechanics*. Vol. 1. MIT Press, Cambridge.
- MOON, L. F., et RUDINGER, G. 1977. Velocity distribution in an abruptly expanding circular duct. *J. Fluids Eng.*, **99**, 226–230.
- MORIGUCHI, Y., et UEHARA, K. 1993. Numerical and experimental simulation of vehicle exhaust-gas dispersion for complex urban roadways and their surroundings. *Jour. of Wind Eng. and Indust. Aerod.*, **46 - 7**, 689–695.
- MURAKAMI, S., et MOCHIDA, A. 1988. 3-D numerical simulation of airflow around a cubic model by means of k-e model. *Jour. of Wind Eng. and Indust. Aerod.*, **31**, 283–303.
- MUSSON-GENON, L. 1993. *Paramétrisation du rayonnement infra-rouge dans le code atmosphérique MERCURE (version 3.1)*. EDF-DER HE-3393-012.
- MUSSON-GENON, L. 1994. *Paramétrisation du rayonnement solaire dans le code atmosphérique MERCURE (version 3.1)*. EDF-DER HE-3394-009.
- NAKAMURA, Y., et OKE, T.R. 1988. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmos. Env.*, **22 - 12**, 2691–2700.
- NAMDEO, A. K., et COLLS, J. J. 1996. Development and evaluation of SBLINE, a suite of models for the prediction of pollution concentrations from vehicles in urban areas. *Science of the Total Environment*, **189–90**, 311–320.
- NICHOLSON, S. E. 1975. A pollution model for street level air. *Atmos. Env.*, **9**, 19–31.
- NIKURADSE, J. 1933. Strömungsgesetze in rauhen Röhren. *Forschg. Arb. Ing.-Wes.*, **361**.
- NOPPE, J. 1998. *Émissions de polluants et consommation liées à la circulation routière*. ADEME.
- NUNEZ, M., et OKE, T. R. 1977. The energy balance of an urban canyon. *J. Appl. Met.*, **16**.
- OKE, T. R. 1979. *Review of urban climatology. 1973 – 1976*. WMO T.N. n° 169.
- OKE, T. R. 1981. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, **1**, 237–254.
- OKE, T. R. 1987. *Boundary layer climates*. 2nd ed., Methuen, London.
- OKE, T. R. 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, **11**, 103–113.
- OKE, T. R., TAESLER, R., et OLSSON, L. E. 1990. The Tropical Urban Climate Experiment (TRUCE). *Energy and Buildings*, **15 - 1**, 67–.
- O'TOOLE, D. M., HILFIKER, R. C., et MULDOON, G. 1975. *Evaluation of air quality in the vicinity of the intersection of Wisconsin and Western Avenues N. W.* FHWA Final Report FHWA/DC/OTPP-75/1.

- OTT, W. R. 1977. Development of criteria for siting air monitoring stations. *Journal of Air Pollution Control Association*, **27 - 6**, 543–547.
- PALMGREN, F., BERKOWICZ, R., HERTEL, O., et VIGNATI, E. 1996. Effects of reduction of NO_x on the NO₂ levels in urban streets. *Science of the Total Environment*, **189/190**, 409–415.
- PAN, F., et ACRIVOS, A. 1967. Steady flows in rectangular cavities. *J. Fluid Mech.*, **28 - 4**, 643–655.
- PANOFSKY, H. A., TENNEKES, H., LENSCHOW, D. H., et WYNGAARD, J. C. 1977. The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions. *Boundary-Layer Meteorol.*, **11**, 355–361.
- PASQUILL, F. 1961. The estimation of the dispersion of windborne material. *Met. Mag.*, **90 - 1063**, 33–49.
- PASQUILL, F. 1976. *Atmospheric dispersion parameters in gaussian plume modeling: Part II. Possible requirements for change in the Turner workbook values.* EPA-600/4-760306. US EPA.
- PASQUILL, F., et SMITH, F. B. 1983. *Atmospheric diffusion.* third. John Wiley & sons.
- PATEL, V. C., RODI, W., et SCHEUERER, G. 1985. Turbulence models for near wall low Reynolds number flows: a review. *AIAA J.*, **23 - 9**, 1308–1319.
- PATERSON, D. A., et APELT, C. J. 1986. Computation of wind flows over three-dimensional buildings. *Jour. of Wind Eng. and Indust. Aerod.*, **24**, 193–213.
- PATERSON, D. A., et APELT, C. J. 1989. Simulation of wind flow around three-dimensional buildings. *Building and Environment*, **24 - 1**, 39–50.
- PEARCE, W., et BAKER, C. J. 1997. Wind-tunnel investigation of the effect of vehicle motion on dispersion in urban canyons. *Jour. of Wind Eng. and Indust. Aerod.*, **71**, 915–926.
- PETERSEN, W. B. 1980. *User's guide for Highway-2 a Highway air pollution model.* Environmental Protection Agency.
- PETERSEN, W. B., et RUMSEY, E. D. 1987. *User's guide for PAL 2.0, a gaussian-plume algorithm for point, area, and line sources.* Environmental Protection Agency.
- PHILLIPS, P., et PANOFSKY, H. A. 1982. A re-examination of lateral dispersion from continuous sources. *Atmos. Env.*, **16**, 1851–1859.
- PLATE, E. J. 1982. *Windkanalmodellierung von Ausbreitungsvorgängen in Stadtgebieten.* Kolloquiumsbericht Abgasbelastungen durch den Straßenverkehr, Verlag TÜV Rheinland.
- PRANDTL, L. 1932. Meteorologische Anwendung der Strömungslehre. *Beitr. Phys. Atm.*, **19**, 188–202.
- QIN, Y., et KOT, S. C. 1993. Dispersion of vehicular emission in street canyons, Guangzhou City, South China (P.R.C.). *Atmos. Env.*, **27 - 3**, 283–291.
- QUÉNEL, P., ZMIROU, D., et LE TERTRE, A. 1995. Impact de la pollution atmosphérique urbaine de type acido-particulaire sur la mortalité quotidienne à Lyon et sur l'agglomération parisienne. *Santé publique*, **4**, 363–376.

- RAFAILIDIS, S. 1997. Influence of building areal density and roof shape on the wind characteristics above a town. *Boundary-Layer Meteorol.*, **85**, 255–271.
- RAFAILIDIS, S., et SCHATZMANN, M. 1995. Physical modelling of car exhaust dispersion in urban street canyons - the effects of slanted roofs. *Pages 235–242 de: 3rd International Conference on Air Pollution*, vol. 2.
- RAJARATNAM, N. 1976. *Turbulent jets*. Elsevier.
- RAUPACH, M. R., THOM, A. S., et EDWARDS, I. 1980. A wind-tunnel study of turbulent flow close to regularly arrayed rough surfaces. *Boundary-Layer Meteorol.*, **18**, 373–397.
- REDELSPERGER, J. L., et SOMMERIA, G. 1981. Méthode de représentation de la turbulence d'échelle inférieure à la maille pour un modèle tridimensionnel de convection nuageuse. *Boundary-Layer Meteorol.*, **21 - 4**, 509–530.
- RIABOUCHINSKI, D. 1921. On steady fluid motion with free surface. *Proc. London Math. Soc.*, **19**, 206–215.
- ROBERTS, O. F. T. 1923. The theoretical scattering of smoke in a turbulent atmosphere. *Proc. R. Soc. Lond., Ser. A*, **104**, 640–654.
- RODI, W. 1976. A new algebraic relation for calculating the Reynolds stresses. *Z.A.M.M.*, **56**, 219–221.
- ROSAS, B., PAINE, B., WOODRUFF, J., HALVORSON, J., et BERKA, J. 1980. *Measuring and modeling carbon monoxide at a high volume intersection*. Federal Highway Administration and Minnesota Department of Transportation.
- ROSCHKE, E. J., et BLACK, L. H. 1976. The influence of upstream conditions on flow reattachment lengths downstream of an abrupt circular channel expansion. *J. Biomechanics*, **9**, 481–483.
- ROTACH, M. W. 1993a. Turbulence Close to a Rough Urban Surface. Part I: Reynolds Stress. *Boundary-Layer Meteorol.*, **65**, 1–28.
- ROTACH, M. W. 1993b. Turbulence Close to a Rough Urban Surface. Part II: Variances and Gradients. *Boundary-Layer Meteorol.*, **66**, 75–92.
- ROTACH, M. W. 1995. Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon. *Atmos. Env.*, **29 - 13**, 1473–1486.
- ROTH, M., et OKE, T. R. 1993. Turbulent transfer relationships over an urban surface. I: Spectral characteristics. *Quart. Jour. of Roy. Met. Soc.*, **119 - 513**, 1071–1104.
- RYAN, P. B., SPENGLER, J. D., et LETZ, R. 1986. Estimating personal exposures to NO₂. *Env. Int.*, **12**, 395–400.
- SABIN, C. M. 1965. An analytical and experimental study of the plane incompressible turbulent free shear layer with arbitrary velocity ratio and pressure gradient. *Trans. A.S.M.E., J. Basic Eng.*, 421–428.
- SACRÉ, C., CHIRON, M., et FLORI, J-P. 1995. Development of an index of air-pollution from traffic using epidemiologic studies. *Science of the Total Environment*, **169 - 1-3**, 63–69.

- SCAPERDAS, A., et COLVILE, R. N. 1999. Assessing the representativeness of monitoring data from an urban intersection site in central London, UK. *Atmos. Env.*, **33** - **4**, 661–674.
- SCHLICHTING, H. 1960. *Boundary Layer Theory*. McGraw-Hill, New-York.
- SEINFELD, J. H. 1986. *Atmospheric chemistry and physics of air pollution*. John Wiley & Sons.
- SHAO, L. 1992. *Étude d'une couche de mélange turbulente non cisailée par simulation des grandes échelles*. Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon.
- SIEVERS, U., et ZDUNKOWSKI, W. G. 1986. A microscale urban climate model. *Beitr. Phys. Atmosph.*, **59** - **1**, 13–40.
- SINI, J-F., ANQUETIN, S., et MESTAYER, P. G. 1996. Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmos. Env.*, **30** - **15**, 2659–2677.
- SMAGORINSKY, J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations, part I: The basic experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **91**, 99–.
- SNYDER, W. H. 1981. *Guideline for fluid modeling of atmospheric diffusion*. EPA.
- SOBOTTKA, H. 1977. *Messtechnische erfassung von immissionsituationen in verkehrsreichen strassenschluchten*. Ministère de la Recherche et de la Technologie TÜV Rheinland.
- SOUFFLAND, D. 1985. *Développement et validation d'un modèle tridimensionnel non-hydrostatique d'écoulements méso-météorologiques en terrain complexe. Le code MERCURE*. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble.
- STEIN, A. F., et TOSELLI, B. M. 1996. Street level air pollution in Cordoba city, Argentina. *Atmos. Env.*, **30** - **20**, 3491–3495.
- STOER, J., et BULIRSCH, R. 1980. *Introduction to numerical analysis*. Springer-Verlag, New York, §7.2.14.
- STULL, R. B. 1988. *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers.
- SWAID, H. 1993. The role of radiative-convective interaction in creating the microclimate of urban street canyons. *Boundary-Layer Meteorol.*, **64**, 231–259.
- TAKAHASHI, H., TEJIMA, M., NAKAZATO, M., et FUKUOKA, Y. 1996. Measurement of air circulation in an urban canyon by means of interval shooting of tracer balloons. *Japanese Progress in Climatology*, 129–134.
- TAYLOR, G. I. 1915. Eddy motion in the atmosphere. *Phil. Trans. Roy. Soc. (London), Ser. A*, **215**, 1–26.
- TAYLOR, G. I. 1921. Diffusion by continuous movements. *Proc. London Math. Soc.*, **20**, 196–212.
- TAYLOR, G. I. 1935. Statistical theory of turbulence, Part I. *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, **105**, 421–444.
- TING, L. 1959. On the mixing of two parallel streams. *J. Math. Phys.*, **38**, 153–165.
- TIRABASSI, T., FORTEZZA, F., BASSANINO, M., et LAVECCHIA, C. 1998. Carbon monoxide concentrations evaluated by traffic noise data in urban areas. *Il Nuovo cimento. C.*, **21** - **2**, 149–159.

- TODHUNTER, P. E. 1990. Microclimatic Variations Attributable to Urban-Canyon Asymmetry and Orientation. *Physical Geography*, **11** - **2**, 131–141.
- TOLLIEN, W. 1926. Berechnung turbulenter ausbreitungsvorgänge. *Z.A.M.M.*, **6**, 468–478.
- TREFETHEN, L. N. 1980. Numerical computation of the Schwarz-Christoffel transformation. *SIAM J. Sci. Stat. Comput.*, **1** - **1**, 82–102.
- TURNER, D. B. 1967. *Workbook of atmospheric dispersion estimates*. Publication 999-AP-26. Robert A. Taft Sanitary Engineering Center. Cincinnati, Ohio. Public Health Service.
- VÄKEVÄ, M., HÄMERI, K., KULMALA, M., LAHDES, R., RUUSKANEN, J., et LAITINEN, T. 1999. Street level versus rooftop concentrations of submicron aerosol particles and gaseous pollutants in an urban street canyon. *Atmos. Env.*, **33** - **9**, 1385–1397.
- VAN DER HOVEN, I. 1957. Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. *J. Meteorol.*, **14**, 150–154.
- VINCENT, J. H. 1977. Model experiments on the nature of air pollution transport near buildings. *Atmos. Env.*, **11**, 765–774.
- VINCONT, J-Y. 1999. *Détermination des flux turbulents de masse dans le sillage d'un obstacle. Application à l'écoulement à l'intérieur de la canopée urbaine*. Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon.
- WATT, W. E. 1967. *The velocity temperature mixing layer*. Rep. 6705, Department of Mechanical Engineering, Univ. of Toronto.
- WEDDING, J. B., LOMBARDI, D. J., et CERMAK, J. E. 1977. A wind tunnel study of gaseous pollutants in city street canyons. *Journal of Air Pollution Control Association*, **27** - **6**, 557–566.
- WIERINGA, J. 1993. Representative roughness parameters for homogeneous terrain. *Boundary-Layer Meteorol.*, **63**, 323–363.
- YAMARTINO, R. J., et WIEGAND, G. 1986. Development and evaluation of simple models for the flow, turbulence and pollutant concentration fields within an urban street canyon. *Atmos. Env.*, **20** - **11**, 2137–2156.
- ZAMURS, J. 1990. Intersection carbon monoxide modeling. *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **40** - **5**, 769–771.
- ZAMURS, J., et PIRACCI, R. J. 1982. Modelling of carbon monoxide hot spots. *Journal of Air Pollution Control Association*, **32** - **9**, 947–953.
- ZHANG, C. X. 1991. *Simulation numérique d'écoulements turbulents autour d'un obstacle*. Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes.
- ZOUMAKIS, N. M. 1995. A note on average vertical profiles of vehicular pollutant concentrations in urban street canyons. *Atmos. Env.*, **29** - **24**, 3719–3725.
- ZWILLINGER, D. 1989. *Handbook of differential equations*. Academic Press.