

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة فرحات عباس-سétif 1

Université Ferhat Abbas Sétif-1

Institut d'optique et Mécanique de Précision

Thèse de Doctorat en Sciences

Présentée par

Fateh ALLAG

Thème

Contribution à l'étude de la dispersion des polluants

Présentée le: 25.03.2016

Devant le jury

SI-AMEUR Mohamed

Prof. Univ. Batna

Président

ZEGADI Rabah

Prof. UFA Sétif 1

Rapporteur

BENMOUSSA Hocine

Prof. Univ. Batna

Examineur

GUELLAL Messaoud

Prof. UFA Sétif 1

Examineur

Table des matières

RESUME	1
INTRODUCTION GENERALE.....	2
Définition de la pollution atmosphérique	4
Les sources de pollution	
Les principaux polluants et leurs effets sur la santé	

Chapitre I : Etat de d'art

- I.1. Historique de la pollution atmosphérique**
- I.2. Evolution de la recherche dans le domaine**

Chapitre II : PRESENTATION GENERALE DE LA STRUCTURE DE LA BASSE TROPOSPHERE

II. 1. INTRODUCTION

II.2. DEFINITIONS DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE ET DE SES DIFFERENTES ECHELLES D'ETUDE

II.2.1. Définition de la couche limite atmosphérique

II.2.2. Les échelles d'études dans la couche limite atmosphérique

II.3. PHENOMENES DE TRANSPORT DANS LA CLA

II.3.1. Le Vent moyen

II.3.2. Les flux turbulents

II.4. STRUCTURE DYNAMIQUE ET THERMIQUE DE LA TROPOSPHERE

II.4.1. Définition de la température potentielle.

II.4.2. Définition des états thermiques de la CLA

II.4. 3. Description de la couche limite instable (convective)

II.4. 3.1. Organisation de la couche limite convective

II.4. 3.1. 1. La couche de surface

II.4. 3.1. 2. La couche de mélange

II.4. 3.1. 3. La zone d'entraînement

II.4. 3.2. Evolution diurne de la couche limite convective

II.4. 4. Description de la couche limite stable

II.4.4.1. Structure de la couche limite dans le cas stable

- II.4.4.1.1. La couche limite stable
- II.4.4.1.2. La couche résiduelle
- II.4.4.2. Turbulence dans le cas stable

Chapitre III : EQUATIONS GENERALES DES ECOULEMENTS DANS LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE

III.1. Rappels des équations gouvernant les écoulements atmosphériques

- III.1.1. Hypothèses de Boussinesq
- III.1.2. Equations aux valeurs instantanées
- III.1.3. Equations aux valeurs moyennes
- III.1.4. Equations aux fluctuations

III.2. SIMULATION DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE

- III.2.1. Paramètres adimensionnels
- III.2.2. Similitude dans la couche de surface
 - III.2.2.1. Lois de paroi cinématique et thermique
- III.2.3. Equations relatives à une couche limite stratifiée pleinement développée en soufflerie.
 - III.2.3.1. Bilan d'énergie cinétique turbulente
 - III.2.3.2. Bilan d'énergie thermique turbulente

Chapitre IV. Approche expérimentale

IV.1. Dispositif expérimental

- IV.1.1. Caractéristiques de l'installation
 - IV.1.1.2- Le circuit aérodynamique
 - IV.1.1.3- La veine d'essai
 - IV.1.1.4. Chariot de mesure

IV.2. Techniques de mesures

- IV.2.1. Anémométrie fil chaud
 - IV.2.1.1.Principe de base
 - IV.2.1.2.Etalonnage
- IV.2.2.Anémométrie Laser Doppler
- IV.2.3.Vélocimétrie par Image de Particules
 - IV.2.3.1.Principe

IV.2.3.2. Méthode d'analyse de l'image

IV.2.4. Détecteur à Ionisation de Flamme (FID)

IV.3. Couche limite atmosphérique

IV.3.1. Description de la couche limite développée

IV.3.2. Champ de vitesse

IV.3.3. Caractéristiques de la couche

IV.3.4. loi de puissance

IV.3.5. Équilibre de la couche limite

IV.3.6. Coefficient de corrélation

IV.3.7. Profils transversaux de vitesse

IV.3.8. Comparaisons de différentes techniques de mesures (fil chaud et LDA).

IV.4. Écoulement tridimensionnel en présence d'un cube

IV.4.1. Objectifs

IV.4.2. Généralités

IV.4.2.1. Zone de déplacement

IV.4.2.2. Zone de recirculation

IV.4.2.3. Sillages

IV.4.3. Résultats expérimentaux

IV.4.3.1. Mesures par le système P I V

IV.4.3.2. Comparaisons diverses

IV.4.4. Conclusion

Chapitre V. APPROCHE D'ANALYSE NUMERIQUE

Application d'un cas réel sur l'effet de la dispersion des polluants sur la santé

V.1. INTRODUCTION

V.2. LA MODELISATION

V.2.1. Modèles proposés

V.2.2. Différents types de modélisation atmosphérique

V.2.3. Outils de modélisation de la turbulence

V.2.4. Caractéristiques des différents modèles de dispersion atmosphérique

V.2.5. Conclusion

V.3. Présentation générale de la zone d'étude

V.3.1. Présentation de la source de pollution

V.3.2. Localisation de la cimenterie

V.3.3. Réseaux hydrographiques

V.4. Climat

V.5. Les précipitations

V.5.1. Le régime pluviométrique

V.5.2. La neige et la gelée

V.6. La température

V.7. Le vent

V.8. Fiche signalétique de la cimenterie comme source polluante

V. 9. Produits fabriqués

V.10. APPLICATION DE L'INFERENCE FLOUE

V.10.1. Notions fondamentales

V.10.2. Modélisation par logique floue

V.11. APPLICATION AU CAS D'ETUDE

V.12. RESULTATS ET DISCUSSION

Conclusion générale

Remerciements

Ma reconnaissance et mes remerciements vont au Professeur Zegadi Rabah, qui a accepté la lourde responsabilité de diriger mes recherches et la confiance qu'il m'a accordée durant toutes ces années. Rabah a su créer une atmosphère de travail agréable que j'ai pu apprécier, tout au long de notre collaboration avec son sens très développé, sa rigueur dans l'accomplissement de chaque tâche, ses qualités humaines sans égal, son esprit très ouvert, sa sympathie couronnée d'une énorme modestie.

Ce travail a été réalisé avec le soutien du laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique de l'école centrale de Lyon au sein de l'équipe de recherche "Fluide Complexe" et équipe 'Mélange Turbulent" LMFA, UMR CNRS dirigée par le Directeur de recherche. Serge Simoëns auquel j'exprime mes remerciements et ma gratitude. Que l'ensemble du personnel du Laboratoire trouve ici l'expression de ma reconnaissance pour les marques de sympathie que j'ai reçues.

Je tiens également à remercier vivement pour l'honneur qu'ils me font, les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer le travail de ma thèse. Ainsi, je remercie très chaleureusement le président de ce jury, le Professeur Si-Ameur Mohamed. Je remercie également messieurs le Professeur Benmoussa Hocine et le Professeur Guellal Messaoud. Vous avez eu la lourde tâche de lire mon manuscrit ! Je vous remercie pour son enrichissement.

Mes remerciements vont également au Professeur Bouharati Saddek, Docteur Tedjar Lamri et Docteur Khenchouche Abdelhalim pour leur aide et soutien.

Enfin la difficulté tient plutôt dans le fait de n'oublier personne dans mes remerciements. C'est peut-être la tâche la plus difficile. J'exprime toute ma gratitude envers les personnes dont le nom n'apparaîtrait pas dans cette page et qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre. Ils se reconnaîtront : merci à tous et pour tout.

Notation

Lettres grecques

α :	Diffusivité thermique
α, β, γ :	Sensibilités des fils chauds aux fluctuations u , v ou w et θ
λ :	Conductibilité thermique
μ :	Viscosité dynamique
ν :	Viscosité cinématique
θ :	Fluctuation de température
ρ :	Densité
β :	Coefficient d'expansion thermique de l'air
ε et $\varepsilon\theta$:	Dissipation cinématique et thermique
δ :	Epaisseur de couche limite
Ω :	Vitesse angulaire de rotation
ε_{ijk}	Elément général du tenseur alternatif
δ_{ij}	Symbole de Kronecker
τ_{ij} :	Tenseur des contraintes
θ_p :	température potentielle

Lettres Latines

C _p :	Chaleur spécifique à pression constante
C _v :	Chaleur spécifique à volume constant
Fr:	Nombre de Froude
g :	Accélération de la pesanteur
H ₀ :	Flux de chaleur
L :	Longueur de Monin et Obukhov
p :	Pression
K :	Constante de Karman
Kh:	Coefficient de diffusivité thermique turbulente
K _m :	Coefficient de viscosité cinématique turbulente
(₀):	Indice de référence
P _r :	Nombre de Prandtl
P _d :	Production dynamique de turbulence
P _θ :	Production thermique de turbulence
q ² :	Energie cinétique turbulent = $\frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2})$
R _e :	Nombre de Reynolds
R _f :	Nombre de Richardson de Flux
R _i :	Nombre de Richardson de gradient
R _o :	Nombre de Rossby
T :	Température
T _f :	Température de frottement
U _i :	Vitesse caractéristique
U _f :	Vitesse de frottement
X,Y,Z:	Coordonnées horizontales, latérales, et verticales
Z ₀ :	Hauteur de rugosité
C:	Concentration instantanée
D :	Diffusivité moléculaire

Sigles

ADEME	Agence nationale pour le Développement de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFC	Chlorofluorocarbure
CLA	Couche Limite Atmosphérique
CLS	Couche Limite de Surface
COV	Composés Organiques Volatiles
COVNM	Composés Organiques Volatiles Non Méthanique
FID	Flame Ionization Detector
GOOS	Global Ozone Observation System
LES	Large Eddy Simulation
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
OCDE	Organisation de coopération de développement Economique

Liste des figures

Fig.1. Schéma de la basse troposphère

Fig.2: Schématisation des profils verticaux des grandeurs physiques moyennes de la couche limite convective.

Fig.3 : Représentation schématique de la zone d'entraînement

Fig.4 : Description schématique du phénomène d'entraînement

Fig.5. Illustration de l'évolution de la CLA mesurée par LIDAR « Région d'Oklahoma city, le 16 juin 1983.

Fig.6 : Schématique de la structure de la basse troposphère en situation stable (nocturne)

Fig.7: Vue générale de la soufflerie, circuit aérodynamique.

Fig.8 : Détail de la veine d'essai

Fig.9. Sonde composée de fils chauds croisés permettant les mesures de vitesse

Fig.10. Principe de fonctionnement du LDA

Fig.11. Principe de mesure de vitesse en PIV

Fig.12. Système de PIV

Fig.13. Méthode d'inter -corrélation spatiale

Fig.14.: Détecteur à Ionisation de Flamme (FID)

Fig. 15 : Vue du système de déclenchement de la couche limite

Fig.16. Évolution de la vitesse moyenne de la couche limite $U_\infty = 5\text{m/s}$

Fig.17. comparaison des profils de la vitesse moyenne en fonction de l'orientation de la sonde
fil chaud

Fig.18. comparaison des profils de l'intensité de turbulence en fonction de l'orientation de la sonde
fil chaud

Fig.19. Evaluation de l'intensité de turbulence $\sqrt{u^2}/U_\infty$

Fig.20. Evaluation de l'intensité de turbulence $\sqrt{w^2}/U_\infty$

Fig.21. Évolution de la corrélation - (uw)

Fig.22. Evaluation du coefficient de corrélation

Fig.23. Profil transversaux de la vitesse longitudinale moyenne

Fig. 24. Comparaison de différentes techniques de mesure : fils chaud et LDA

(a) U/U_∞ (b) $\sqrt{u^2}/U_\infty$

Fig.25. Comportement d'un écoulement de couche limite en présence d'un cube

Fig. 26. (a) Evolution du profil transversal de vitesse moyenne longitudinale en amont du cube
à $x/h = -1/2$

Fig. 26. (b) Evolution du profil transversal de vitesse moyenne longitudinale en amont du cube
à $x/h = -1$

Fig.27. Evolution du profil vertical de fluctuation longitudinale en amont du cube
a) $x/h = -1$; b) $x/h = -1/2$

Fig.28. Vitesse moyenne sur l'axe de la face supérieure

Fig. 29. Évolution du profil transversal de vitesse moyenne longitudinale en aval du cube
a) $x/h = 1.5$ b) $x/h = 2$ c) $x/h = 3$

Fig.30. Profils de vitesse moyenne longitudinale en aval du cube

Fig.31 : Topographie de la région d'étude

Fig. 32 .Vitesse mensuelle moyenne des vents de Ain El-Kebira (m/s) durant la période
2001-2005

Fig. 33 : Représentation des variables suivant la logique binaire

Fig. 34: Représentation des variables suivant la logique floue

Fig.35 : Illustration des raisonnements par mini-max

Fig.36. Structure du système flou avec cinq entrées et deux sorties

Fig.37: Fuzzyfication de la variable 'Zone géographique' en quatre intervalles flous

Fig. 38 : Fuzzyfication de la variable 'Poids' en trois intervalles flous

Fig.39: Fuzzyfication de la variable 'Taille' en trois intervalles flous

Fig. 40: Fuzzyfication de la variable 'Périmètre crânien' en trois intervalles flous

Fig.41 : Fuzzyfication de la variable 'Période' en trois intervalles flous

Fig.42: Fuzzyfication de la variable 'Nombre en trois intervalles flous

Fig. 43 : Exemple d'application

Fig. 44 : Résultat en fonction de deux paramètres d'entrée

Liste des tableaux

Tableau 1 : Echelles d'étude de la pollution.

Tableau 2: Caractéristiques d'évolution de la couche.

Tableau 3 : Nombre des nouveaux nés en fonction des zones géographiques et des paramètres anatomiques.

Résumé :

La dispersion des polluants dans l'atmosphère a été et est toujours une question primordiale. Les espèces polluantes émises ou transformées dans l'atmosphère sont très nombreuses. Même si leurs concentrations sont très faibles (mesurées en général en microgrammes par mètre cube), elles peuvent avoir des effets notamment sur la santé. Cette pollution atmosphérique est un enjeu de santé publique, au niveau mondial comme individuel. Préserver la santé c'est entre autre protéger l'individu des nuisances de la pollution atmosphérique. Une compréhension des paramètres et des mécanismes de la dispersion des polluants, qui sont des problèmes de la mécanique des fluides, devient ainsi indispensable.

L'étude du transport ou de la dispersion relèvent de processus qui sont en principe du ressort de la mécanique des fluides, seulement leur étude est complexe du fait de l'aspect aléatoire que revêt ce genre de phénomènes.

Dans le cadre de cette thèse, une étude primordiale s'impose celle de l'étude de la couche limite atmosphérique. Les mesures in situ sont très difficiles voire quasi impossible à cause du phénomène aléatoire de la turbulence d'une part et de la variation continue de la direction du vent d'autre part. Une simulation physique de la couche de surface en soufflerie s'impose ainsi.

Une première partie de cette étude est consacrée à l'aspect théorique des écoulements dans une couche limite atmosphérique. Une bibliographie détaillée relative est présentée.

Une deuxième partie traite des simulations de la couche limite en soufflerie, où une simulation physique de la couche de surface atmosphérique est réalisée dans la soufflerie de diffusion de l'Ecole Centrale de Lyon. Les champs de vitesse moyenne et fluctuante longitudinaux et transversaux sont obtenus dans une première phase en utilisant l'anémométrie à fils chauds. La sonde utilisée est une sonde à deux fils croisés qui permet la mesure simultanée de deux composantes de vitesse longitudinale et transversale, il suffit de la pivoter autour de son axe d'un angle $\pi/4$ pour avoir accès à la composante de vitesse longitudinale et verticale. Dans une seconde phase, une métrologie optique LDA tridimensionnelle a aussi été utilisée pour la mesure à la fois des trois composantes de la vitesse.

La rugosité du sol est obtenue en utilisant des écrous de 6mm de hauteur semés éparpillés aléatoirement le long de la veine sur son plancher. De plus cette rugosité a pour effet de stabiliser d'avantage la couche limite turbulent.

Le champ de concentration est obtenu à l'aide de la FID, détecteur à ionisation de flamme.

Nous avons présenté aussi une étude sur l'écoulement autour d'un cube en présence d'une couche limite. Pour cela nous avons utilisé deux techniques expérimentales, les mesures par LDA et par PIV.

Dans une troisième partie, des notions de base de la logique floue sont présentées dans le souci de cerner cette technique d'analyse dans le domaine de l'intelligence artificielle. L'application pour un cas réel de cette technique dans l'analyse des effets des polluants d'une cimenterie sur les nouveaux nés dans différentes zones environnantes a été réalisée.

Des mesures sur terrain sont effectuées sur l'effet de ces polluants sur les caractères morphologiques des nouveaux nés. Une base de données est construite en termes de poids, de taille et de périmètres crâniens des nouveau-nés à des distances différentes et à différentes directions de la source de pollution au cours de la dernière décennie. Le nombre de cas est considéré comme une variable de sortie. Le résultat est la prévention de l'apparition des malformations congénitales liées à cette pollution atmosphérique.

ملخص

إن تشتت الملوثات في الغلاف الجوي، كان ولا يزال مسألة أساسية. هذا التلوث الجوي يمثل خطر على الصحة العمومية سواء على الصعيد العالمي أو الفردي.

الحفاظ على الصحة يتمثل في حماية الفرد من التأثيرات السلبية للملوثات الجوية. في إطار هذه الأطروحة، تطرقت دراسة أولية إلى الطبقة الحدية.

إن القياسات في موقع التلوث تكون من الصعب إن لم تكن مستحيلة بسبب الظاهرة العشوائية التي تميز الإضطراب من جهة و التغيرات الهوائية من جهة أخرى.

تناولنا في الجزء الأول من هذه الدراسة إلى الدقائق في طبقة حدية جوية من الناحية النظرية معززة بمراجع مفصلة عن الظاهرة.

في الجزء الثاني تناولنا محاكاة الطبقة الحدية في نفق الرياح التجريبي في المدرسة المركزية في مدينة ليون الفرنسية.

مجالات السرعة المتوسطة و المتغيرة الطولية و العرضية تحصلنا عليها في مرحلة أولى باستعمال تقنية

(anémometrie à fils chauds) و في مرحلة ثانية استعملت تقنية القياسات الضوئية (LDA) من أجل قياس المركبات الثلاثة للسرعة. مجال التركيز تحصلنا عليه باستعمال تقنية (FID).

قدمنا أيضا دراسة الجريان حول مكعب في وجود طبقة حدية. من أجل هذا استعملنا تقنيتي (LDA) و (PIV).

في الجزء الثالث قدمنا المبادئ الأساسية للمنطق الغامض كتقنية من تقنيات الذكاء الإصطناعي و تم تطبيقها على حالة التأثيرات الناجمة عن الملوثات الجوية الناتجة عن مصنع اسمنت على الأطفال حديثي الولادة في مناطق محيطة مختلفة.

تناولت هذه الدراسة نشأ قاعدة بيانات تتعلق بالوزن، الطول و محيط الجمجمة للأطفال على أبعاد و جهات مختلفة من مركز التلوث خلال عشرية. و كانت النتيجة هي انشاء نموذج وقائي من حدوث ظهور تشوهات خلقية ناتجة عن هذا التلوث.

Abstract

The dispersion of the pollutants in the atmosphere was and is always a paramount question. This atmospheric pollution is a public health issue, both globally and individually. To preserve health is amongst other things to protect the individual from the nuisances of atmospheric pollution.

As part of this thesis, a primary study of the atmospheric boundary layer is essential. The in situ measurements are very difficult even almost impossible because of random phenomenon of turbulence on the one hand and the continuous variation of the direction of the wind on the other hand. A physical simulation of the surfacing out of blower is essential too.

A first part of this study is devoted to the theoretical aspect of the flows in an atmospheric boundary layer. A relative detailed bibliography is presented.

A second part treats simulations of the boundary layer out of blower, where a physical simulation of the atmospheric surfacing is carried out in the blower of diffusion of the Central School of Lyon. The longitudinal and transverse fields mean velocity and fluctuating are obtained in a first phase by using anemometry with hot sons. In a second phase, an optical metrology LDA three-dimensional was also used for the measurement at the same time of the three components speed.

The field of concentration is obtained using the FID, detector with ionization of flame.

We present also a study on the flow around a cube in the presence of a boundary layer. For that, we used two experimental techniques, measurements by LDA and PIV.

In a third part, basic notions of fuzzy logic are presented in order to identify this technique of analysis in the field of artificial intelligence. The application for a real case of this technique in the analysis of the effects of the pollutants of a cement factory on the new born ones in various surrounding areas was carried out.

Measures on ground are taken on the effect of these pollutants on the morphological characters of new born. A database is built in terms of weight, size and cranial perimeters of the new-born babies at different distances and with various directions from the source of pollution during the last decade. The number of cases is regarded as an output variable. The result is the prevention of the appearance of congenital malformations related to this atmospheric pollution.

Introduction générale

Le problème de la pollution atmosphérique a débuté au début de l'ère industrielle, avec l'usage du combustible fossile qu'est le charbon, il y a environ 150 ans. Les progrès technologiques suivant cette époque ont aidé à développer plusieurs substances toxiques contribuant à la contamination de l'air, de l'eau et parfois même du sol. Jusqu'à la deuxième guerre mondiale, ces problèmes n'étaient pas très préoccupants. Par contre, à l'époque après-guerre, avec son lot de technologie moderne, nous avons vu croître de façon très angoissante les émissions des foyers industriels et urbains, l'accumulation de déchets provenant de la consommation massive de la population et des industries chimiques et la libération de substances très toxiques et peu biodégradables, parfois même indestructibles.

Aujourd'hui, 80% de la population mondiale habite en zones urbaines ou périurbaines. Cette concentration dans les agglomérations provoque une abondance de pollution et de nuisance, mais son effet diffère selon les situations géographiques et le niveau de vie atteint dans chaque pays.

Outre la pollution chimique industrielle et d'automobiles, une menace non négligeable pour l'environnement est le risque de la pollution accidentelle industrielle ou nucléaire. Quelques spectaculaires affaires de pollution ont fait prendre conscience de la gravité des conséquences pouvant résulter de la contamination accidentelle ou chronique de l'environnement.

La pollution atmosphérique est donc un problème complexe qui dépend d'une multitude de processus s'étendant sur des échelles spatiales allant de quelques mètres à quelques centaines de kilomètres. Par exemple, une zone urbaine est le lieu de nombreux échanges s'effectuant à des échelles de temps et d'espace très variées : l'échelle régionale où les effets de relief ainsi que les effets globaux de la ville jouent un rôle prépondérant, à l'échelle locale de la rue ou du quartier où les effets topologiques dominent. Une telle variation d'échelle implique nécessairement une gamme très étendue du nombre de Reynolds. Ce qui, en termes d'utilisation de modèles numériques, n'est pas à l'heure actuelle envisageable.

Dans cette optique et comme les facteurs qui interviennent dans le processus sont très complexes, incertains et imprécis pour être pris en charge par des modèles numériques rigides, nous avons jugé utile d'analyser l'effet des polluants sur la santé publique dans une zone géographique par des techniques de l'intelligence artificielle notamment les principes de la logique floue.

Comme source de pollution, une cimenterie, comme polluants les gaz nocifs dégagés et comme impact, l'effet sur les nouveaux nés à différentes directions de la source de pollution. Cela doit prendre en considération les vents dispersants, la topographie du sol et donc son relief, les températures à différentes saisons. Tous ces facteurs et d'autres ont un impact direct sur l'écoulement atmosphérique des polluants au voisinage de la source.

Une première partie de cette étude est consacrée à l'aspect théorique des écoulements dans une couche limite atmosphérique. Une deuxième partie traite des simulations de la couche limite en soufflerie. La troisième partie de cette étude présente une application d'un cas réel sur l'effet de la dispersion des polluants sur la santé. Cela permet d'avoir une idée relativement précise sur l'impact des polluants et donc prévoir son effet et prendre les dispositions qui s'imposent.

Définition de la pollution atmosphérique

On définit la pollution de l'air lorsque la concentration d'une certaine substance est plus grande qu'en temps normal et que cela produit un effet nuisible sur l'être humain et son environnement qui l'entoure.

Les sources de pollution

Les sources de pollution sont soit d'origine naturelle, soit d'origine anthropique et peuvent être de différentes natures suivant la manière dont elles polluent l'atmosphère.

Les principales sources de pollution atmosphérique selon (Florian, 2011) sont :

- Les émissions naturelles :

Certains polluants atmosphériques sont d'origine naturelle. Ce sont essentiellement le dioxyde de soufre (SO_2) et le dioxyde d'azote (NO_2). Ces composés proviennent principalement des éruptions volcaniques, des décompositions organiques, des feux de forêt, ainsi que des océans. On peut aussi citer dans les sources naturelles de pollution les végétaux, dont le cycle de vie produit de nombreux composés toxiques (H_2S , CH_4).

- Les émissions d'origine agricole :

Le développement de l'agriculture intensive contribue à la pollution atmosphérique. Ses émissions (essentiellement l'ammoniac, le méthane, le protoxyde d'azote, le monoxyde de carbone et les pesticides) sont liées à la décomposition des matières organiques, aux animaux d'élevage et à l'utilisation massive d'engrais et de pesticides.

- **Les émissions industrielles :**

L'industrie est à l'origine des émissions spécifiques dues aux processus de traitement ou de fabrication employés. En quantités variables, selon les secteurs industriels, elle est émettrice de monoxyde et de dioxyde de carbone, de dioxyde de soufre, d'oxyde d'azote, de poussières, de composés organiques volatils (COV).

-**Les émissions domestiques :**

Au niveau individuel ou tertiaire (chauffage des logements ou des bureaux), la combustion de carburants fossiles (charbon, fioul lourd, etc.) produit d'importantes émissions polluantes. Le dioxyde de carbone (CO₂), produit inévitable de la combustion de matières organiques et dont la concentration croissante dans l'atmosphère contribue à l'effet de serre, le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azotes (NO_x), les poussières, les métaux lourds, etc. sont concernés ;

- **Les émissions dues aux transports :**

La pollution due aux transports est essentiellement perçue dans les villes en raison de la densité du trafic. La contribution des transports à la pollution ne cesse de s'accroître du fait de l'augmentation du trafic directement liée à l'activité économique.

Les principaux polluants et leurs effets sur la santé

•**Le dioxyde de soufre (SO₂):** le dioxyde de soufre a pour origine principale la combustion des énergies fossiles (fioul, charbon) qui libère du soufre. Les principales sources de SO₂ sont donc les installations de chauffage industriel, les raffineries de pétrole ainsi que certains procédés de fabrication.

Le SO₂ est un gaz irritant pour l'appareil respiratoire et sous l'action du rayonnement solaire, il peut s'oxyder puis, en présence d'eau se transformer en acide sulfurique (phénomène des pluies acides).

• **Les oxydes d'azote (NO_x) :** bien que majoritairement émis par le secteur des transports (52% des émissions dont près de 24% des NO_x sont émis par les poids lourds diesel (CITEPA, 2010), l'agriculture et l'industrie manufacturière représentent une part non négligeable des sources de NO_x.

Les effets des oxydes d'azote sont différents. Le dioxyde d'azote (NO₂) est un gaz irritant pour les bronches tandis que le protoxyde d'azote (N₂O) est classé gaz à effet de serre. Les oxydes d'azote constituent en outre l'un des principaux précurseurs de la pollution photochimique et contribuent au phénomène des pluies acides ;

- **les composés organiques volatils (COV)** : le terme générique de composés organiques volatils (COV) regroupe des milliers de composés aux caractéristiques très différentes (hydrocarbures, solvants...). La part des COV d'origine naturelle (essentiellement le méthane) n'est pas à négliger. Les COV non méthaniques (ou COVNM) proviennent notamment de procédés industriels.

Les **COV** peuvent avoir une action irritante et être à l'origine de troubles neuro-digestifs. Ils interviennent également dans le phénomène de pollution photochimique en réagissant avec les oxydes d'azote ;

- **Le monoxyde de carbone (CO)** : le monoxyde de carbone est formé par la combustion incomplète du carbone et provient essentiellement des moteurs des véhicules et des installations de combustion mal réglées.

Le **CO** perturbe le transport de l'oxygène dans le sang : peut provoquer des anémies, des vertiges, des migraines et peut être mortel à forte dose.

- **L'ozone (O₃)**: L'ozone résulte de la transformation photochimique de certains polluants dans l'atmosphère (NO_x et COV) en présence de rayonnements ultra-violetts solaires. C'est l'un des principaux polluants de la pollution dite «photo-oxydante». Ce gaz contribue également indirectement à l'effet de serre. L'**ozone** est un gaz agressif qui pénètre facilement jusqu'aux voies respiratoires les plus fines. Il provoque, dès une exposition prolongée à des concentrations de 150 à 200 µg/m³, de la toux et une altération pulmonaire, surtout chez les enfants et les asthmatiques.

- **Les autres polluants** : d'autres polluants sont émis par le secteur industriel en moindre quantité, mais leur présence dans l'atmosphère n'est pas sans conséquence sur l'environnement et la société. On pourra citer les poussières, particules très fines qui sont émises lors de certains procédés industriels, l'acide chlorhydrique dégagé entre autre lors des traitements des déchets industriels, les métaux lourds (mercure, plomb). Les **particules fines**, inférieures au micron, pénètrent au fond des voies respiratoires et contribuent aux irritations bronchiques.

I.1 Historique de la pollution atmosphérique

L'oxygène respirable est nécessaire à la vie de toute espèce animale sur terre. Les vivants épuisent ce gaz de l'atmosphère. L'atmosphère n'a jamais été absolument pure. Cependant, depuis l'intervention de l'homme par ses activités, il n'a cessé de la polluer, à commencer par l'invention du feu et son dégagement de gaz carbonique. L'ère industrielle a amplifié cette pollution par différentes substances chimiques jusqu'au point où la situation devient alarmante. Quelques repères historiques rappellent de l'intensification de cette pollution.

Dates importantes dans l'histoire de la pollution atmosphérique d'après

(Tuddenham, 2011)

- **1827** ➤ Première description du phénomène du réchauffement climatique par l'effet de serre : le mathématicien et physicien français Jean-Baptiste Fourier identifie la capacité de certains gaz présents dans l'atmosphère à retenir le rayonnement infrarouge. Est alors établi le comportement de l'atmosphère semblable au vitrage d'une serre.
- **1839** ➤ **Découverte de l'ozone** par le chimiste suisse-allemand Christian Friedrich Schönbein.
- **1852** ➤ **Robert Angus Smith**, chimiste écossais, démontre pour la première fois le lien entre les pluies acides et la pollution atmosphérique dans la ville de Manchester. Cette découverte lui vaut par la suite le sobriquet du « Père des pluies acides ».
- **1860** ➤ **Début de la mesure de la concentration d'ozone** en surface sur des centaines de sites.
- **1872** ➤ **Robert Angus Smith** publie son livre *Air and Rain: the beginnings of a Chemical Climatology*, présentant ses analyses de la chimie des pluies atmosphériques en utilisant pour la première fois le terme « pluies acides ».
- **1896** ➤ Le chimiste suédois Svante Arrhénius fait les premiers calculs de l'effet de serre.
- **1913** ➤ Mesures de l'ultraviolet prouvant formellement que l'ozone se trouve en majeure partie dans la stratosphère.
- **1920** ➤ Premières mesures quantitatives de la colonne atmosphérique d'ozone.
- **1930** ➤ Une équipe américaine de *Frigidaire Corporation*, dirigée par Thomas Midgley, met au point la production, par synthèse, des premiers frigorigènes fluorés.

➤ **Accident de la vallée de la Meuse**, provoquant des troubles respiratoires chez plus de 1000 personnes et entraînant une cinquantaine de **décès**.

- **1948** ➤ **Épisode de smog «tueur»** (*smoke*+ *fog* = *smog* ou **pollution photochimique**) en octobre à Donora, petite ville industrielle au sud de Pittsburgh (Pennsylvanie), provoquant la mort par asphyxie de 18 personnes. Au total, 6000 des 14000 habitants ont souffert de troubles respiratoires pendant les cinq jours de l'épisode.

- **1952** ➤ **Épisode du smog à Londres du 5 au 9 décembre**, provoquant la mort de plus de 4000 personnes dans les semaines qui suivent suite à ses effets nocifs sur les voies respiratoires. Il est jugé le pire épisode de pollution atmosphérique dans l'histoire du Royaume-Uni.

- **1956** ➤ Le physicien canadien Gilbert Plass prédit que le doublement des concentrations atmosphériques de CO₂ conduirait à une hausse de la température de 3,8 °C et que la réduction de moitié de ces concentrations conduirait à une baisse de 3,6 °C.

➤ Première loi sur l'air propre (*Clean Air Act*).

- **1957** ➤ Lancement de l'année géophysique internationale 1957/1958.

➤ Création par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) du Système mondial d'observation de l'ozone (*Global Ozone Observation System* ou GOOS).

- **1958** ➤ Début des mesures systématiques des concentrations atmosphériques de CO₂, à Hawaï (Mauna Loa).

- **1962** ➤ **Deuxième épisode de smog à Londres** (6 décembre) : 750 morts des suites de troubles respiratoires.

- **1966** ➤ Premières mesures de l'ozone par satellite.

- **1967** ➤ **Syukuro Manabe** et **Richard T. Wetherald**, météorologues japonais et américain respectivement, prédisent que le doublement des concentrations atmosphériques de CO₂ au début du XXI^{ème} siècle conduirait à une hausse des températures moyennes de la Terre (à la surface) de 2,3 °C.

➤ **Loi sur la qualité de l'air** (*Air Quality Act*) prévoyant le renforcement des activités de recherche sur les inventaires d'émission, des techniques de surveillance et de lutte contre la pollution atmosphérique.

- **1968** ➤ Le scientifique suédois **Svante Odén** conclut que les précipitations devenaient plus acides en Suède du fait d'une augmentation des émissions de SO₂ en provenance d'autres

pays, mettant ainsi en évidence, pour la première fois, le phénomène des pluies acides. Il fait le lien entre ces pluies et l'acidification des rivières observée en Norvège.

➤ Création par l'OMM du Réseau de surveillance de la pollution atmosphérique de fond (*Background Air Pollution Monitoring Network* ou BAPMoN).

• **1972** ➤ Lancement par l'OCDE d'un programme sur le transport à longue distance des polluants atmosphériques avec la participation de 11 pays membres.

➤ Lancement d'un ambitieux programme de recherche norvégien (SNFS) sur la précipitation acide et ses effets sur les forêts et les poissons.

• **1974** ➤ Deux chercheurs de l'Université de Californie, Frank Sherwood Rowland et Mario Molina, prouvent que les CFC produits par les activités humaines sont transportés dans la stratosphère par les mouvements convectifs de l'air et qu'ils dégagent du chlore libre qui peut y détruire l'ozone. Ils publient un article présentant les résultats de leurs recherches dans la revue américaine *Nature*.

➤ **Décret** n° 74-415 (du 13 mai 1974) relatif au contrôle des émissions polluantes dans l'atmosphère et à certaines utilisations de l'énergie thermique.

• **1975** ➤ Publication par l'OMM de la première déclaration scientifique intitulée « Modifications de la couche d'ozone résultant des activités de l'homme et leurs éventuelles conséquences géophysiques ». Il s'agit du premier avertissement international sur le risque d'une forte diminution de l'ozone.

• **1976** ➤ L'OMM lance le Projet mondial de surveillance et de recherche sur l'ozone (*Global Ozone Research and Monitoring Project*), constituant ainsi la première évaluation de l'état de la couche d'ozone.

➤ **Loi** 76-663 (du 19 juillet 1976) sur les installations classées pour la protection de l'environnement.

• **1977** ➤ **Réunion intergouvernementale d'experts** à Washington (États-Unis), organisée par le Programme mondial de l'environnement (PNUE) en collaboration avec l'OMM, et débouchant sur le premier Plan d'action mondial pour la couche d'ozone.

• **1979** ➤ **Première Conférence mondiale sur le climat**, organisée par l'OMM à Genève, débouchant sur la création du Programme climatologique mondial de l'OMM. Pour la première fois, la communauté internationale s'interroge sur les effets des émissions anthropiques du CO₂ sur le climat et les conséquences pour les activités humaines.

➤ **Convention sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance** (dite Convention de Genève), adoptée sous l'égide de la Commission Économique pour l'Europe des Nations unies (CEE-NU).

➤ Publication par l'OCDE du rapport final établi dans le cadre du programme sur le transport à longue distance des polluants atmosphériques, déterminant le rapport entre les émissions et les dépôts de composés soufrés.

- **1980** ➤ Directive 80/779/CEE concernant des valeurs limites et des valeurs guides de qualité atmosphérique pour le SO₂ et les particules en suspension.

➤ **Finalisation du programme de recherche norvégien SNFS** montrant l'acidification généralisée des rivières et des lacs en Norvège et une forte baisse des stocks de poissons dans ces écosystèmes aquatiques.

- **1981** ➤ Création de l'**Agence pour la Qualité de l'Air (AQA)**.

- **1982** ➤ Directive 82/884/CEE sur une valeur limite pour le plomb contenu dans l'atmosphère.

- **1984** ➤ Directive 84/360/CEE relative à la lutte contre la pollution atmosphérique en provenance des installations industrielles.

- **1985** ➤ **Convention pour la protection de la couche d'ozone** (dite Convention de Vienne).

➤ Premier **Protocole sur le soufre** (Protocole de Helsinki, adopté dans le cadre de la Convention de Genève)

➤ Publication de données relevées à la station en Antarctique du *British Antarctic Survey* à Halley Bay indiquant une forte déperdition d'ozone stratosphérique, entraînant l'apparition d'un « trou » dans la couche d'ozone.

- **1987** ➤ **Protocole de Montréal sur les substances qui appauvrissent la couche d'ozone.**

➤ Première édition des lignes directrices (*guidelines*) en matière de qualité de l'air pour l'Europe, publiée par l'OMS. Le rapport évalue les risques sanitaires de 28 polluants atmosphériques.

- **1988** ➤ Création du **Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat** (GIEC ou IPCC en anglais).

➤ **Résolution de l'Assemblée générale des Nations unies** (du 6 décembre) sur la protection du climat mondial pour les générations actuelles et futures de l'humanité reconnaissant que

« *Le changement climatique est une préoccupation commune de l'humanité* » et soulignant qu'une « *action opportune est nécessaire pour lutter contre le changement climatique au sein d'un cadre global* ».

➤ **Protocole sur les NO_x** (Protocole de Sofia, adopté dans le cadre de la Convention de Genève).

- ➤ Développement par des scientifiques suédois (J. Nilsson et P. Grennfelt) du concept de charge critique pour le soufre et l'azote afin de déterminer et de cartographier l'ampleur des dépôts acides.

- **1989** ➤ Découverte des premiers signes de l'appauvrissement de la couche d'ozone au-dessus de l'Arctique.

- **1990** ➤ **Deuxième Conférence mondiale sur le climat et la lutte contre l'effet de serre** (Genève) qui pose les bases du Système mondial d'observation du climat.

- **1991** ➤ **Protocole sur les COVNM** (Protocole de Genève, adopté dans le cadre de la Convention de Genève).

- **1994** ➤ **Deuxième Protocole sur le soufre** (Protocole d'Oslo, adopté dans le cadre de la Convention de Genève).

- **1997** ➤ **Protocole de Kyoto.**

➤ Protocole (**Annexe VI**) à la Convention MARPOL 73/78 fixant des règles pour la prévention de la pollution atmosphérique par les navires.

- **1998** ➤ **Protocoles d'Aarhus sur les métaux lourds et les polluants organiques persistants (POP).**

- **1999** ➤ Protocole sur la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique.

(**Protocole de Göteborg**, adopté dans le cadre de la Convention de Genève).

- **2000** ➤ Directive 2000/69/CE concernant les valeurs limites pour le benzène et le CO.

- **2001** ➤ **Accords de Marrakech** fixant les règles d'application du Protocole de Kyoto.

- **2002** ➤ Directive 2002/3/CE relative à l'ozone dans l'air ambiant.

➤ Stratégie pour réduire les émissions atmosphériques des navires de mer.

- **2003** ➤ **Protocole sur les registres des rejets et transferts de polluants** (dit Protocole PRTR), adopté dans le cadre de la Convention d'Aarhus.

➤ **Plan Air.**

➤ Lancement du système PREV' AIR visant à diffuser quotidiennement *via* Internet des prévisions et cartographies de la qualité de l'air établies à partir des simulations numériques.

- **2004** ➤ Lancement du Registre européen des émissions de polluants (EPER).
➤ Directive 2004/107/CE sur l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les HAP.
➤ **Plan Climat** (2004-2012).
- **2005** ➤ Entrée en vigueur du Protocole de Kyoto.
➤ Stratégie thématique sur la pollution de l'air.
- **2006** ➤ La destruction de l'ozone stratosphérique au-dessus de l'Antarctique atteint des niveaux record.
- **2007** ➤ **Quatrième rapport d'évaluation du GIEC.**
➤ Adoption, lors de la COP-13 (Bali, Indonésie), de la "Feuille de route de Bali" prévoyant de nouvelles négociations devant s'achever en 2009 et aboutir à un accord international sur les engagements post-2012.
- **2008** ➤ Directive 2008/50/CE sur la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe (directive CAPE).
- **2009** ➤ Accord de Copenhague.
➤ Publication des textes communautaires du paquet climat-énergie.
- **2010** ➤ Accords de Cancún.
- **2011** ➤ Feuille de route pour une UE sobre en carbone d'ici 2050.
➤ Premières Assises Nationales de la Qualité de l'Air (à Paris).
- **2012** ➤ Création de la coalition Climat et Air Propre (CCAC). Sa mission : accélérer la mise en œuvre des actions de réduction des émissions des forceurs climatiques à courte durée de vie.
➤ Protocole de Göteborg amendé
➤ Protocole d'Aarhus sur les métaux lourds amendés.
- **2013** ➤ Année européenne de l'air.
➤ Adoption de la convention Internationale de Minamata sur le mercure.

I.2. Evolution de la recherche dans le domaine

La pollution atmosphérique est un phénomène très complexe compte tenu de la diversité des polluants, de leur combinaison et de leur modification dans l'atmosphère. L'évolution de ces contaminants est difficile à comprendre avec rigueur, cette complexité contribue à renforcer les inquiétudes sur la qualité de l'air. Les émissions rejetées par les cheminées industrielles représentent une source majeure de la pollution atmosphérique. A l'issue d'une

étude bibliographique il paraît que plusieurs paramètres peuvent influencer leur dispersion telle que la présence des obstacles.

Arya et al. (1981) ont étudié la dispersion de polluants en présence d'un obstacle bidimensionnel triangulaire de hauteur (h) d'environ $1/10$ de l'épaisseur de la couche limite, placé perpendiculairement à l'écoulement. En plus des diverses mesures concernant l'écoulement, des observations ont été faites sur les profils verticaux et horizontaux de concentration dans un jet issu d'une cheminée dont la hauteur et la position relativement à l'obstacle sont variables. Les concentrations les plus élevées au niveau du sol sont observées lorsque la source est située dans une zone de fluide "mort". La concentration et la position de son maximum au niveau du sol sont considérablement influencées par l'obstacle, particulièrement quand la source est située à une distance de $15 h_b$ (h_b = hauteur de l'obstacle) sous le vent en aval de la crête de l'obstacle.

L'écoulement et la dispersion autour d'un obstacle unique ont été abondamment étudiés par Hunt et al. (1978), Plate (1982), et Thompson (1993). La modélisation des obstacles serrés peut, dans une certaine mesure, être rapprochée de celle utilisée pour des zones forestières. De nombreux travaux existent également sur ce type d'approche, comme par exemple, ceux de Plate et Quraishi (1965), Rotach (1993) et Gardiner (1994). En revanche il persiste des insuffisances concernant la modélisation des échelles intermédiaires (de l'ordre du quartier) situées entre l'échelle globale de l'agglomération et celle, locale de la rue. Ainsi une zone urbaine peut apparaître comme un groupe d'obstacles. Des études expérimentales et théoriques ont été consacrées à ce sujet. En effet, les expériences de Davidson et al. (1995b), Davidson et al. (1995a) et Macdonald et al. (1997) ou l'approche théorique de Fung et Hunt (1991) apparaissent comme des éléments clés.

Des expériences ont été conduites par M. H. Mirzai et al. (1994) dans une soufflerie sur l'écoulement et la dispersion des polluants autour d'un bâtiment isolé. Une atmosphère stable et neutre a été simulée. Une quantité substantielle des données expérimentales a été obtenue pour visualiser la concentration moyenne du polluant en fonction du temps dans un plan prédéterminé derrière les bâtiments. Les résultats sont obtenus pour des déviations dans la direction du vent de -10° , -5° , 0° , $+5^\circ$ et $+10^\circ$ et ils montrent que les concentrations de polluant sont affectées par la forme et l'orientation du bâtiment ainsi que par la nature et l'échelle de l'écoulement de la couche limite. La concentration moyenne résultante produite avec une source située près du bâtiment montre clairement que la trajectoire du panache passe autour des faces du bâtiment et près du sol. Ils ont montré également qu'il y a un transfert de

matière transversal considérable dans l'écoulement et qu'il en résulte un déplacement des polluants à travers le sillage vers le bâtiment.

Ayrault & Simoens (1995) et Ayrault, Simoens & Méjean (1998) ont étudié la dispersion de gaz neutre et lourd au passage d'un mur. La source d'injection est surfacique, située au sol et à l'aval de l'obstacle. Les méthodes de mesure utilisées font appel à des techniques de visualisation (tomographie laser). Les concentrations sont mesurées à l'aide de deux caméras CCD dont les champs des prises de vue se superposent en partie. Les auteurs obtiennent ainsi une visualisation et une mesure instantanée sur un champ relativement large et une meilleure dynamique de mesure qu'avec l'utilisation d'une seule caméra. Ils prennent ainsi en compte toutes les évolutions de la dispersion du panache depuis la zone de recirculation jusqu'à la zone de sillage.

On observe alors que dans le cas d'un scalaire sans effet de gravité, la présence du mur favorise la dispersion du panache et que le maximum de concentration moyenne se produit au-dessus de la paroi contrairement au cas d'une configuration sans obstacle. L'utilisation d'un gaz plus dense que l'air met en évidence un maximum de concentration au sol.

Le champ du flux autour des obstacles cylindriques placés normalement à l'entrée du canal a été visualisé par Graf et al (1998).

La technique de mesure utilisée est la vélocité doppler acoustique, le but est d'obtenir instantanément la vitesse de l'écoulement dans les trois directions.

Les résultats expérimentaux mettent en évidence l'apparition des tourbillons à vorticité négative dû à des retournements du flux. Ceci se développe en amont du cylindre et s'étend tout autour pour parvenir loin en aval.

Bournot et al. (2003) ont étudié expérimentalement la dispersion des polluants issus d'une cheminée. Les deux techniques de mesure adoptées sont la PIV qui permet la détermination de la vitesse et des champs de vorticité, et la tomographie laser qui permet dans un plan vertical ou horizontal la visualisation de l'évolution de plume le long d'une grande distance. Les paramètres expérimentaux sont la taille, le diamètre de la cheminée et le rapport des vitesses. L'installation expérimentale se compose d'un tunnel de vent atmosphérique, un système de PIV bidimensionnel et un dispositif de visualisation laser à argon. Un obstacle de forme parallélépipède est inséré à une distance variable en amont de la cheminée simulant par exemple les bâtiments, zone industrielle.

Les dispersions et les extensions plus ou moins importantes de plume sont généralement en aval de la cheminée.

Keser et al (2003) ont étudié l'écoulement en présence d'une plaque plane dont la base est à angle arrondi suivi d'un cylindre circulaire pour un nombre de Reynolds égale $1.46 \cdot 10^5$, $2.72 \cdot 10^5$ et $3.71 \cdot 10^5$. L'objet de ces expériences est d'observer l'influence de la distance longitudinale et verticale qui sépare la plaque et le cylindre sur la distribution de la pression autour de deux obstacles. Aussi bien pour l'arrangement en tandem que l'arrangement décalé la distribution de pression indique l'existence d'une distance critique.

Lorsque deux ou plusieurs cylindres sont situés très proche l'un de l'autre dans un écoulement amont transversal et stationnaire, le comportement du fluide est plus complexe que dans le cas d'un cylindre circulaire unique et isolé.

Pour plusieurs applications de l'ingénierie, le cylindre circulaire est généralement groupé avec des structures semblables de telle façon que le champ autour de chaque obstacle est influencé par la présence de ses voisins. Cet effet peut s'étendre jusqu'à la zone de séparation de la couche limite du cylindre.

Le comportement et l'interaction des couches de cisaillement libres, la formation et la déclinaison des tourbillons et le développement des zones de sillage du cylindre se trouvent dans la même zone comparée à un cylindre circulaire unique dans un écoulement transverse.

Une étude expérimentale du champ d'écoulement devant un cylindre carré pour un nombre de Reynolds compris entre 97 et 187 est analysée par Dutta et al (2004).

La technique de mesure adoptée est l'anémométrie laser à fil chaud. Ils ont prouvé qu'il existe un pic dominant des tourbillons dans la zone de sillage pour la gamme du nombre de Reynolds. La forme du profil de la vitesse moyenne et la vitesse fluctuante révèle une forte dépendance entre l'orientation du cylindre et les caractéristiques de l'écoulement dans la zone proche du sillage.

Études en laboratoire de la dispersion de polluants en canopée urbaine

Un nombre important d'études expérimentales ont été réalisées en soufflerie afin de mieux comprendre les différents phénomènes mis en jeu dans la dispersion de polluants en canopée urbaine. Cependant, en raison de la grande complexité de la géométrie des immeubles et du terrain, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices sont souvent employées.

Hoydysh & Dabberdt (1988) ont étudié les caractéristiques de la dispersion à l'échelle d'une rue. Plus tard, Dabberdt & Hoydysh (1991) ont caractérisé les propriétés d'un écoulement dans une rue avec des immeubles de forme carrés, rectangulaires et à espacement variable. Meroney et al. (1996) se sont intéressés à la dispersion d'une source linéique pour

différentes largeurs d'une rue. Ils n'ont utilisé que des immeubles de rapport de taille $W/H = 1$. Pavageau & Schatzmann (1999) ont étudié la distribution de la concentration d'un polluant dans une rue simulée en soufflerie avec une rugosité équivalente à celle d'une ville. KASTNER-KLEIN & Plate (1999) ont réalisé le même type d'étude pour différentes tailles et configurations d'immeubles et aussi pour différentes géométries de toits. Des expériences en soufflerie ont aussi été réalisées par Gerdes & Olivari (1999) afin de déterminer l'impact de la rugosité, de l'espacement et de la hauteur des immeubles sur le profil de vitesse et de concentration dans une rue.

Dans le but de quantifier les flux de masse entre l'intérieur d'une rue et l'écoulement externe, Barlow & Belcher (2002) ont étudié la dispersion de scalaires passifs au-dessus d'une canopée urbaine. L'intérieur d'une rue est recouvert de naphthalène qui peut subir une sublimation à température ambiante. En mesurant la quantité de naphthalène restant sur les parois, les auteurs ont pu évaluer le flux moyen surfacique de scalaire en sortie de la rue et une estimation du taux de ventilation.

Une étude détaillée de la dispersion d'un scalaire passif en amont d'un bâtiment a été réalisée par Vinçont (1999). Simoëns et al. (2003) ont fait le même type d'étude entre deux bâtiments d'espacement variable.

Une des hypothèses simplificatrices principales de la plupart des études citées ci-dessus, est l'utilisation des immeubles de même taille. Dans ce cas, la vitesse du vent au-dessus du toit des immeubles est toujours parallèle au sol et il y a formation d'un tourbillon. Celui-ci induit une forte concentration de polluants du côté du premier immeuble et une faible concentration du côté du deuxième immeuble si on se déplace dans le sens de l'écoulement perpendiculairement à la rue.

Modèles numériques

La modélisation de la pollution atmosphérique est un problème complexe et pluridisciplinaire.

Elle fait appel à la météorologie, à la mécanique des fluides ou à la chimie pour déterminer l'évolution de l'espèce polluante de son point de rejet jusqu'à la zone d'étude, mais aussi à la médecine permettant alors de créer un lien statistique entre la substance étudiée et son impact sur les populations. On retrouve ainsi la modélisation dans des domaines divers et variés que sont l'industrie, les transports en passant par la santé publique. Dans le monde industriel, la modélisation est utilisée pour diverses applications : le contrôle

des émissions, la surveillance des sites et la gestion de crise en cas d'accident. Chacune de ces approches possède sa propre gamme d'échelle de temps et d'espace permettant de prendre en compte les phénomènes physiques prépondérants. Ainsi, des modèles permettant de modéliser les grands mouvements de masse d'air seront utilisés pour la modélisation à l'échelle continentale, assurant alors le suivi de substances toxiques sur de longues distances (l'exemple de l'accident de Tchernobyl) alors que la surveillance des sites industriels demandera une prise en compte de structures turbulentes plus petites pour expliquer l'évolution de la concentration autour d'un site. Au final, il est impossible de représenter l'ensemble des échelles à l'intérieur d'un seul modèle. C'est pourquoi une large gamme de modèles a été développée afin de répondre aux différents problèmes de pollution que peuvent connaître les industriels.

Un nombre important de modèles existent, Perkins et al. (2005) en recensent plus de 80, qui peuvent être classés en trois familles selon une complexité croissante : les modèles de type gaussien, les modèles intégraux, et les modèles tridimensionnels CFD (Computational Fluid Dynamics).

Les modèles gaussiens sont basés sur une solution analytique de l'équation d'advection diffusion. Ils supposent donc que la répartition du polluant suit une loi gaussienne dont les écarts-types dépendent de la distance à la source (Briggs(1973), Islitzerand Dumbauld (1963), Turner(1997), Pasquill(1962)) ou du temps écoulé depuis l'émission (appelé aussi temps de transfert),Doury (1976, 1984), ainsi que des caractéristiques de la structure de l'atmosphère. Ces modèles s'appuient sur des paramétrisations semi-empiriques développées à partir de campagnes de mesures. On distingue les modèles de panaches stationnaires et les modèles à bouffées instationnaires. L'utilisation de code 1D de type gaussien permet la simulation de dispersion de gaz neutres ou passifs et de niasse volumique proche de celle de l'air. Ils fournissent des résultats acceptables dans les situations pour lesquelles ils ont été paramétrés, mais ne sont pas suffisants lorsque les géométries se complexifient, avec la présence de bâtiments ou de reliefs pouvant perturber la dispersion du polluant.

Des modèles de "nouvelles générations" fondés sur une formulation gaussienne ou une formulation intégrale ont été développés pour surmonter les limites des modèles gaussiens, en tenant compte par exemple des bâtiments (Robins and Apsley, 2009) et des reliefs modérés (Carruthers et al, 2009). Les modèles intégraux sont basés sur l'intégration d'équations simplifiées de la mécanique des fluides et permettent de modéliser certains phénomènes qui ne sont pas pris en compte par un modèle gaussien, par exemple les effets dynamiques du rejet pouvant engendrer une turbulence spécifique ou les effets de gravité sur les gaz légers ou

lourds (Robins et al. 2009). La simplification des équations se traduit par l'introduction de paramètres représentant les mécanismes non modélisés. Ces paramètres sont calés sur des expérimentations. On retrouve parmi ces modèles, le modèle ADMS (CEE C, 2001) et le modèle Aermot (Cimorelli et al. 2004) recommandé par l'USEPA (United States Environmental Protection Agency).

L'approche la plus générale est la résolution des équations tridimensionnelles gouvernant les écoulements et la dispersion des polluants. Depuis les dernières décennies, les outils CFD (*Computational Fluid Dynamics*) appliqués aux écoulements atmosphériques constituent un outil de modélisation pour décrire la dispersion en résolvant la dynamique de l'écoulement et les champs de grandeurs scalaires caractéristiques de la dispersion. Particulièrement adaptées aux géométries complexes (bâtiments et topographies accidentées), la résolution des équations de Navier Stokes régissant les écoulements atmosphériques permet d'obtenir un champ de vent turbulent tridimensionnel, à partir duquel est évalué le transport du polluant, par une approche Eulérienne, en résolvant numériquement l'équation d'advection diffusion sur un maillage de l'espace, ou par une approche Lagrangienne basée sur le calcul des trajectoires turbulentes d'un grand nombre de particules. De nombreux codes CFD sont adaptés à la simulation d'écoulements atmosphériques et à la dispersion de polluants. On peut citer entre autres, les codes commerciaux Star CD (Jicha et al. 2000) et Fluent (Sabatino et al. 2008), Flacs (Hanna et al. 2004), CFX (Chu et al. 2005), Fluidyn Panair (Mazzoldi et al. 2008), CFD URBAN (Coirier et al. 2006) ou le code Saturn développé depuis quelques années par EDF R&D (Demaël, 2007).

Modélisation de la dispersion atmosphérique par logique floue

Différents travaux qui traitaient de la modélisation des phénomènes de la dispersion atmosphérique ainsi que l'étude des écoulements de l'air au niveau de la couche limite ont été traités par logique floue. Nous présentons ici quelques exemples des dernières années.

- Hossein Fakhraee, Mohsen Saeedi, Mahmood Rezaei Sadrabadi, en 2007 ont publié une étude intitulée A fuzzy air pollution dispersion model dans un proceeding (ASM '07 The 16th IASTED *International Conference on Applied Simulation and Modelling*, Pages 137-142, ACTA Press Anaheim, CA, USA). Dans cette étude, un modèle de dispersion atmosphérique est développé pour calculer la variation de la concentration d'un polluant à différentes distances de la source. Le modèle flou proposé résout les problèmes qui en résultent du passage discret entre les classes de stabilité. L'efficacité du modèle proposé est représentée

par un exemple réel numérique et la comparaison des résultats avec d'autres modèles existants.

- Biman Chandra, Chetia. en 2010 ont publiés un livre intitulé : *Fuzzymodeling of the boundary-layer theory*. VDM Publishing House Edition No.1. de 192 pages. Dans ce livre, Une formulation mathématique de divers types d'incertitude peuvent être correctement caractérisée en termes de la théorie des ensembles et mesures floues. Ce livre donne le dernier développement dans l'application de la méthode floue d'analyse dimensionnelle et opération algébrique des intervalles flous comme forme explicite de principe d'extension de principe Max -Min de Zadeh (1965). Ce livre est destiné à fournir des systèmes experts pour la solution des problèmes critiques de la dynamique des fluides avancés.
- Angelo Ciaramella, Angelo Riccio, Stefano Galmarini, GiulioGiunta, SlawomirPotemski, dans une étude intitulée : Comparison of Dispersion Models by Using Fuzzy Similarity Relations, publiée en 2011 dans *The artificial intelligence, around man and beyond*, 6934 :57-67, ont présenté une méthodologie, basée sur la combinaison de plusieurs agglomérations hiérarchiques temporelles, pour les comparaisons de modèles dans un contexte d'ensemble multi-modèle. Les modèles sont des modèles opérationnels de transport à longue distance et de dispersion utilisés pour la simulation en temps réel de la dispersion des polluants ou le rejet accidentel de radionucléides dans l'atmosphère.
- Kemalettin Erbatur, Berk Çallien 2013 dans le journal de Fuzzy information and engineering, ont publié une etude intitulée: Fuzzy boundary layer tuning for sliding mode systems as applied to the control of a direct drive robot. Dans cette étude, ils proposent une méthode de réglage en ligne floue pour ajuster l'épaisseur de la couche limite pour la meilleure performance du système
- Rituparna Chutia, Supahi Mahanta et Datta, dans leur travail de 2013 publié dans le journal of intelligent and fuzzysystems intitulé : Uncertainty modelling of atmospheric dispersion model using fuzzy set and imprecise probability, ont effectué un modèle de dispersion atmosphérique des rejets industriels dans le but d'atténuer les conséquences nocives. L'analyse déterministe ne permet pas l'estimation correcte du moment que ses paramètres sont incertains. Alors, ils ont exploré une approche floue. Cela a constitué une nouvelle méthode de quantification des incertitudes relatives aux fuites d'ammoniac d'une installation industrielle.
- Le même auteur avait également effectué des travaux en 2013, publiés dans *The annals of fuzzy mathematics and informatics*, intitulé : Non-probabilistic sensitivity and uncertainty

analysis of atmospheric dispersion. Dans cette étude l'auteur traite du poids d'influence des paramètres de sédimentation des polluants en fonction de la vitesse des vents dans les basses couches atmosphériques (stable, instable et neutre). Un modèle informatique qui traite de ces paramètres imprécis est appliqué à base de logique floue.

II.1. Introduction

L'atmosphère dans sa structure est formée de plusieurs couches qui ont chacune des propriétés et des caractéristiques différentes. La distribution de la température donne le plus souvent la répartition des différentes couches de l'atmosphère. La troposphère, la stratosphère, mésosphère et la thermosphère sont les couches principales qui composent l'atmosphère. De toutes ces couches, la troposphère est la couche qui joue un rôle important dans la dispersion de polluants qui sont généralement émise tout près de la surface terrestre. C'est la couche qui est située juste au-dessus de la surface terrestre et qui s'étend en altitude sur 9 km à 16 km verticalement dépendamment de la latitude et dans laquelle la température décroît avec la hauteur (Fraigneau, 1996).

Le transport des polluants présents dans la basse troposphère est fortement conditionné par les caractéristiques dynamiques de la couche limite atmosphérique (CLA). En effet, il est assuré par le vent et par les propriétés dispersives de la CLA associées à la turbulence atmosphérique..

Dans ce chapitre, nous présentons quelques généralités sur la dynamique de la basse troposphère. Nous allons définir dans un premier temps, les différentes échelles spatiales caractéristiques de la CLA pour pouvoir situer les dimensions de notre domaine d'étude. Nous allons ensuite exposer les différents états thermiques de la CLA, à savoir stable et instable. Et enfin nous allons décrire les différentes phases d'évolution de la CLA en cours de la journée.

II.2. Définitions de la couche limite atmosphérique et de ses différentes échelles d'étude

II.2.1. Définition de la couche limite atmosphérique

La couche limite atmosphérique (CLA) est la partie de la troposphère qui, de par son contact avec le sol, est directement influencée par la surface terrestre et se trouve en régime turbulent. La variation de l'épaisseur de la CLA peut être assez conséquente au cours de la journée, suivant le site géographique et les conditions météorologiques. Cette épaisseur peut évoluer de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres. Les fortes variations diurnes que subit la CLA résultent principalement des conditions de forçage imposées par le sol et des conditions météorologiques.

La CLA est composée d'une sous partie directement en contact avec le sol, appelée la couche de surface. Elle se distingue du reste de la CLA par le fait que les flux turbulents des différentes grandeurs physiques (chaleur, quantité de mouvement...) sont considérés uniformes suivant l'altitude. Sa hauteur est considérée comme égale à environ un dixième de l'épaisseur totale de la CLA. Au-dessus se trouve la couche de mélange, aussi nommée la couche d'Eckman. La partie de la haute troposphère, l'atmosphère libre, est non-turbulente de par sa stabilité thermique, comme il est illustré sur la figure 1.

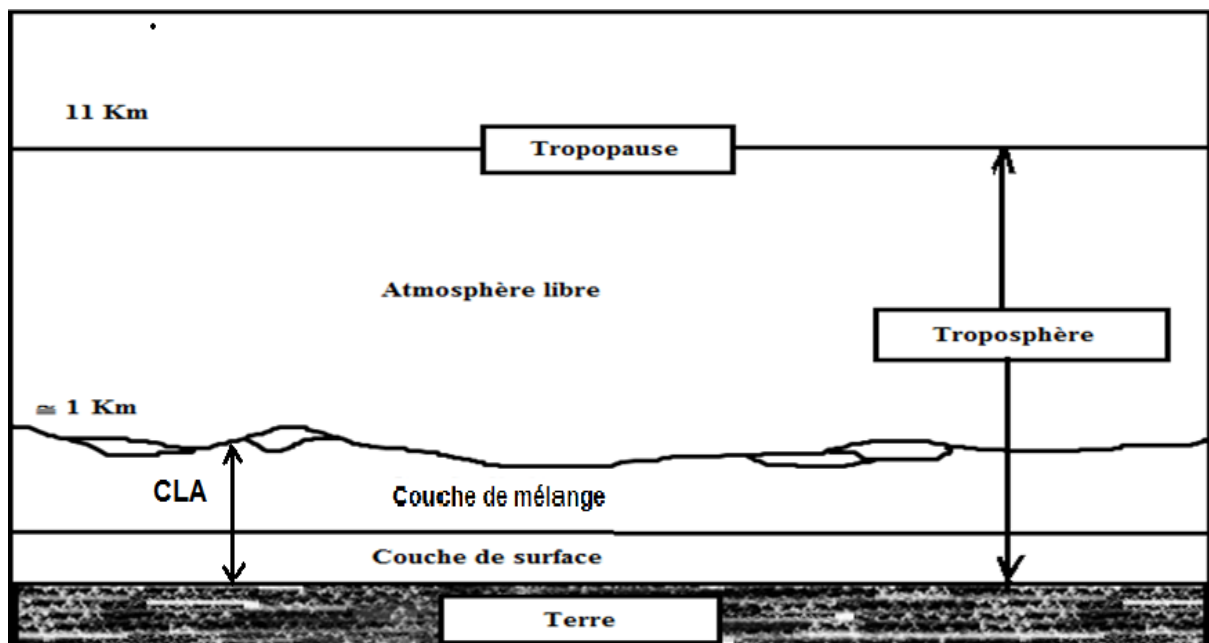


Fig.1: Schéma de la basse troposphère

II.2.2. Les échelles d'études dans la couche limite atmosphérique

Tout dépend de l'échelle dans laquelle nous sommes amenés à considérer dans l'étude des dispersions des polluants atmosphériques. Une échelle globale revient à étudier cette dispersion à un niveau continental. Une échelle qui se limite à un pays est régionale, alors que si celle-ci est à l'échelle de quelques kilomètres sera locale.

(Orlanski, 1975) propose une classification plus fine des échelles, elle est résumée dans le tableau 1.

Tableau 1 : Echelles d'étude de la pollution.

Macro échelle α	$>10\ 000\ \text{Km}$
Macro échelle β	$2000 < L < 10\ 000\ \text{Km}$
Méso échelle α	$200 < L < 2\ 000\ \text{Km}$
Méso échelle β	$20 < L < 200\ \text{Km}$
Méso échelle γ	$2 < L < 20\ \text{Km}$
Micro échelle α	$0,2 < L < 2\ \text{Km}$
Micro échelle β	$0,02 < L < 0,2\ \text{Km}$
Micro échelle γ	$2\ \text{m} < L < 20\ \text{m}$
Micro échelle δ	$2\ \text{mm} < L < 2\ \text{m}$

L'étude du transport des polluants à considérer dépend du domaine d'étude. Pour cela, si cela concerne une échelle macro, celle-ci doit prendre en compte les conditions météorologiques correspondantes à cette échelle. Les phénomènes locaux sont alors négligés. Par contre, une étude à échelle réduite (Micro- α) doit prendre en considération les caractéristiques dynamiques de la CLA et les différents facteurs qui la régissent. Dans ce type d'étude, et comme on est à une échelle réduite, les sources d'émissions de polluants sont prises en compte de manière suffisamment fine.

II.3. Phénomènes de transport dans la CLA

II.3.1. Le Vent moyen

Les caractéristiques du vent moyen sont sa composante horizontale qui admet une amplitude de l'ordre de 1 à 10 m/s à 10 m d'altitude, alors que la composante verticale ne dépassant pas des amplitudes de l'ordre de 1 cm/s. elle est alors négligée. Ce mode de transport assuré par le vent moyen est appelé l'advection.

Comme conséquence des forces de frottements résultant de l'interaction entre la surface terrestre et l'atmosphère, le profil de la composante horizontale du vent moyen en fonction de l'altitude adopte un caractère logarithmique, plus ou moins perturbé par les effets de flottabilité engendrés par les processus thermiques.

II.3.2. Les flux turbulents

La caractéristique principale de la CLA est en général fortement turbulente, notamment au cours de la journée. Les dimensions des structures turbulentes varient des plus grandes qui sont de l'ordre de l'épaisseur de la CLA ($\cong 1 \text{ Km}$) aux plus petites avec une taille d'environ quelques millimètres avant d'être dissipées par le phénomène de diffusion moléculaire. Dans l'atmosphère, le spectre des échelles des structures turbulentes est donc très large (Wyngaard, 1992).

Les origines des phénomènes turbulents de la CLA ont deux processus différents. Mécanique résultant des gradients de la vitesse moyenne du vent engendrés par l'interaction entre la surface terrestre et l'atmosphère et thermique résultant du réchauffement du sol par les rayons solaires. Suite à l'élévation de la température des masses d'air, il en résulte un mouvement ascensionnel de celles-ci sous l'action des forces de flottabilité ce qui provoque l'apparition de structures turbulentes dans la CLA.

II.4. Structure dynamique et thermique de la troposphère

II.4.1. Définition de la température potentielle

La température potentielle est définie par:

$$\theta_p = T(z) \left(\frac{P(z)}{P_0} \right)^{R/C_p}$$

Où $T(z)$ est la température absolue, $P(z)$ la pression atmosphérique à une altitude donnée. P_0 représente la pression atmosphérique au niveau du sol. R représente la constante des gaz parfaits et C_p la capacité calorifique massique de l'air.

En atmosphère sèche, $R/C_p = 2/7$

En atmosphère humide, $R/C_p = (2/7) (1 - 0,24\alpha')$

Où α' représente le rapport de mélange entre la vapeur d'eau et l'air.

La température potentielle correspond à la température qu'aurait une masse d'air s'élevant adiabatiquement dans la CLA. Elle permet de ne pas tenir compte de la variation de

température conditionnée par le changement de pression lorsqu'une masse d'air s'élève dans l'atmosphère de manière adiabatique.

II.4.2. Définition des états thermiques de la CLA

Le gradient de température potentielle donne l'écart à l'adiabaticité du gradient vertical de température absolue. Ceci permet alors de déterminer l'état thermique dans lequel se trouve la couche limite atmosphérique.

$$S_i \frac{\partial \theta_p}{\partial z} > 0$$

La CLA est dans un état thermiquement stable conduisant à une turbulence relativement peu développée. En effet, les forces de flottabilité vont s'opposer à toute élévation des masses d'air, les plus chaudes se trouvant à une altitude plus élevée que les plus froides. De ce fait, les effets thermiques vont contrer le développement des fluctuations turbulentes verticales engendrées par les contraintes de cisaillement du vent.

$$S_i \frac{\partial \theta_p}{\partial z} < 0$$

La CLA est instable, car les forces de flottabilités vont favoriser le transport vertical en provoquant l'ascension des masses d'air chaudes. Elles génèrent ainsi une turbulence d'origine convective.

$$S_i \frac{\partial \theta_p}{\partial z} = 0$$

La CLA est thermiquement neutre le profil de température est alors adiabatique. La turbulence atmosphérique est purement mécanique, les effets convectifs étant nuls.

II.4. 3. Description de la couche limite instable (convective)

II.4. 3.1. Organisation de la couche limite convective

La couche de surface, la couche de mélange et la zone d'entraînement sont les trois zones distinctes qui constituent les couches limites convectives. (Driedonks and Tennekes, 1984).

II.4. 3.1. 1. La couche de surface

C'est la première zone rencontrée, elle s'étend à partir du sol jusqu'à une centaine de mètre d'altitude et occupe en général 5 à 10% de l'épaisseur totale de la couche limite. Cette couche constitue l'interface qui assure le transfert d'information entre le sol et le reste de la CLA. Les flux turbulents y sont considérés en son sein. (Wyngaard, 1992).

La couche de surface instable se caractérise principalement par le gradient de température potentielle négatif ($S_i \frac{\partial \theta_p}{\partial z} < 0$). Cette zone est appelée la micro couche ou la sous-couche inertielle. Au-dessus de laquelle, le transport vertical est favorisé par la turbulence générée par la force flottabilité en proportions directes. Ainsi, les profils verticaux des grandeurs physiques moyennes telles que la température potentielle, la vitesse et l'humidité se stabilisent au sommet de la couche de surface et dans les zones supérieures de la couche limite (Figure 2).

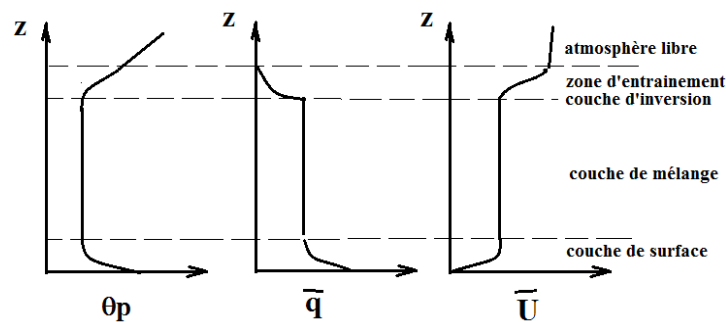


Fig.2: Schématisation des profils verticaux des grandeurs physiques moyennes de la couche limite convective.

II.4.3.1.2. La couche de mélange

Dite aussi la couche d'Eckman, elle recouvre la couche de surface. Son épaisseur et de l'ordre de kilomètre et représente 35 à 80% de l'épaisseur totale de la couche limite. Dans cette zone, les structures thermiques s'élargissent pour atteindre des dimensions maximales (de l'ordre du kilomètre). Le transport des différentes grandeurs physiques par diffusion turbulente devient plus intense et leur temps caractéristique de transport à travers la CLA est

assez limité (de l'ordre de 15 minutes – Stull, 1988). En conséquence, toute altération des conditions de forçage au niveau du sol sera communiquée sur toute l'épaisseur de la CLA au bout d'environ 15 minutes. Ces modifications sont associées aux variations de conditions météorologiques et à l'évolution diurne de l'éclairement solaire, qui influence les flux de chaleur entre le sol et l'atmosphère. Leur temps caractéristique d'évolution et généralement plus long que celui associé au transport par diffusion turbulente.

II.4.3.1.3. La zone d'entraînement

Elle se situe au sommet de la couche limite. C'est la zone d'interaction entre la couche de mélange fortement turbulente, et l'atmosphère libre (Figure 3) (Deardorff, 1980). Cette dernière est thermiquement stable et la turbulence y est très faible. Aussi, lorsque les masses d'air chaudes, soumises à un mouvement ascensionnel depuis la couche de surface, arrivent au sommet de la couche de mélange, leur progression est stoppée par la stabilité thermique. Toutefois, l'inertie acquise leur permet de pénétrer l'atmosphère libre avant de retourner dans la CLA sous l'action des forces de gravité (la température potentielle des masses pénétrant l'atmosphère libre étant alors inférieure à celle de leur environnement. Au cours de leur retour, les masses d'air originaires de la CLA entraînent à leur suite des masses d'air de l'atmosphère libre (Figure 4). Cet effet est appelé le phénomène d'entraînement (Carson, 1974). Il permet le développement de la CLA en cours de journée et génère un flux de chaleur tendant à la réchauffer (Deardorff et al. 1969 ; Ball, 1960). La zone d'entraînement est le siège de phénomènes turbulents intermittents. On y observe des poches thermiques résiduelles, la formation d'onde de Kelvin-Helmholtz générées par des phénomènes d'instabilité, la propagation d'ondes gravitationnelles (Rayment and Readings, 1973). L'épaisseur de la zone d'entraînement est variable et assez difficile à préciser. Elle varie entre 10 et 40 % de l'épaisseur totale de la couche limite convective.

De manière générale, la hauteur de couche limite Z_i est définie au centre de la zone d'entraînement. Elle définit la limite entre la couche de mélange et la couche d'inversion formant la base de l'atmosphère libre.

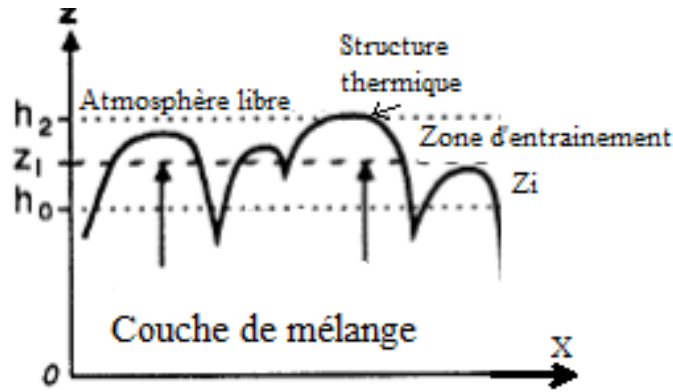


Fig. 3 : Représentation schématique de la zone d'entraînement

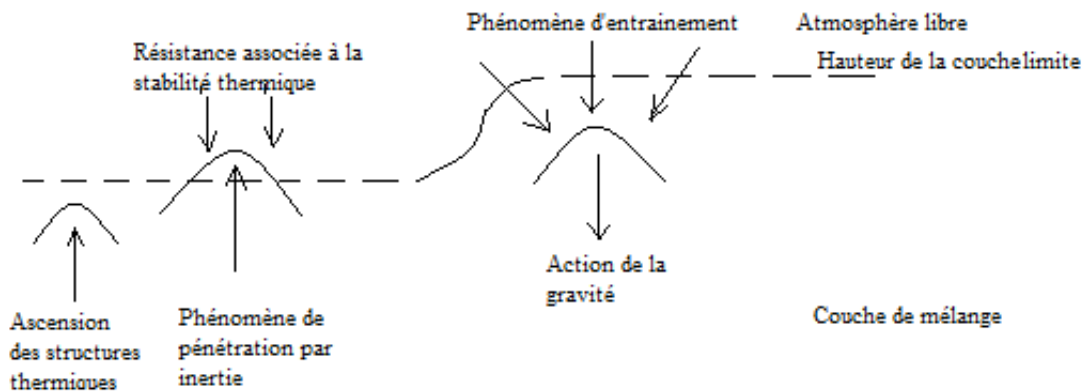


Fig. 4 : Description schématique du phénomène d'entraînement

II.4.3.2. Evolution de la couche limite convective pendant le jour

Le développement de la couche limite se décompose en quatre phases :
L'épaisseur de la couche limite reste pratiquement constante durant les premières heures suivant le lever du soleil. La durée de cette première phase est fortement liée aux conditions météorologiques. Cette phase est appelée la période de transition.

Les phénomènes convectifs s'intensifient et s'élèvent en altitude. Les structures thermiques pénètrent alors dans la couche résiduelle. Cette dernière est généralement dans un état quasi-neutre. Par conséquent, les structures convectives en élévation ne vont rencontrer aucune résistance thermique susceptible de s'opposer à leur ascension et à leur développement. Elles vont donc s'élever rapidement et l'épaisseur de la couche de mélange va se développer avec un fort taux de progression pouvant atteindre une vitesse de l'ordre de

1 m/s. Cette seconde phase s'observe en fin de matinée, début d'après-midi, sa durée est de l'ordre de l'heure. Elle correspond à la période de développement rapide de la CLA.

La troisième phase se déroule au cours de l'après-midi jusque dans la soirée. Durant cette période, l'épaisseur de la CLA subit de faible variation. Cette zone thermiquement stable va s'opposer à l'ascension des structures thermiques et au développement de la couche de mélange. Ce dernier va néanmoins se poursuivre sous l'action du phénomène d'entraînement. Toutefois, le taux d'accroissement de la CLA diminue rapidement au cours du temps pour devenir assez faible, marquant la fin de la période de développement rapide. L'épaisseur de la CLA varie alors lentement au cours de l'après-midi. Il résulte du mouvement latéral des masses d'air engendré par les zones hautes et basses pression de la CLA (Stull, 1988).

La dernière phase est la période de décroissance de la turbulence. Lorsque le flux de chaleur sensible à la surface du sol décroît en début de soirée, les effets convectifs s'amenuisent. Il en résulte une décroissance de la turbulence atmosphérique précédant l'apparition d'une stratification thermique stable au niveau du sol.

Les trois premières phases sont identifiées (Figure 5) qui illustre des mesures de l'évolution diurne de la CLA effectuées par LIDAR (Crum et Stull, 1987).

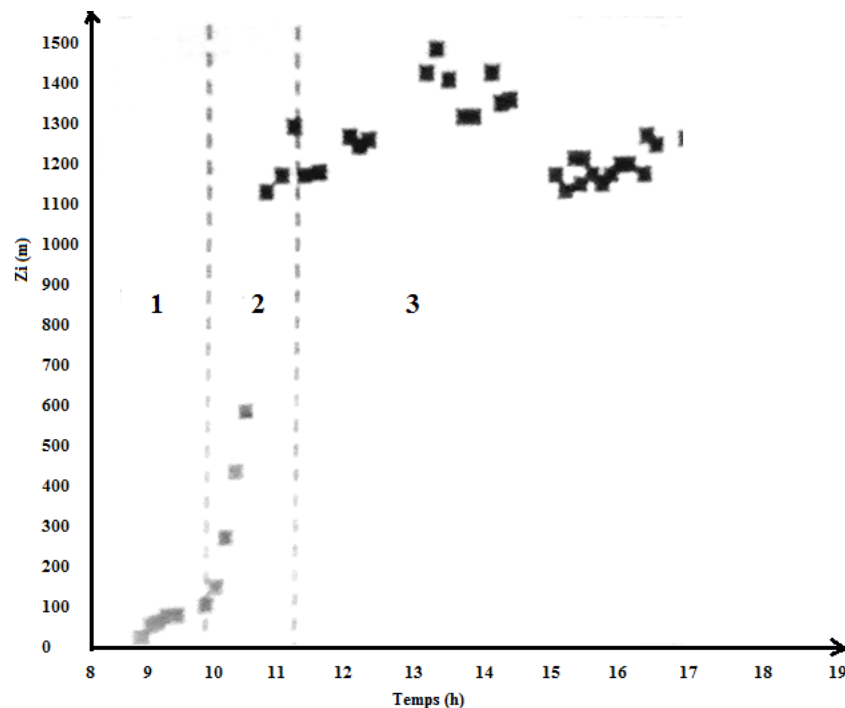


Fig.5. Illustration de l'évolution de la CLA mesurée par LIDAR « Région d'Oklahoma city, le 16 juin 1983 (Crum and Stull, 1987). Phase 1 : Période de transition, Phase 2 : période de développement rapide, Phase 3 : Période de faible variation de la CLA (la décroissance observée après 15h30 est provoquée par les effets de la subsidence).

II.4.4. Description de la couche limite stable

L'état de la basse troposphère est le résultat du gradient de température potentielle entre le sol et l'air ambiant. Ce phénomène d'inversion thermique au voisinage du sol peut être provoqué par le passage d'une masse d'air au-dessus d'un sol plus froid, ou encore par un taux de refroidissement du sol plus rapide que celui de l'air ambiant. Ces deux cas se présentent essentiellement durant la période d'hiver ou encore pendant la nuit, surtout lorsque l'absence de nuages favorise la perte de chaleur au sol par rayonnement. Le gradient thermique oriente les forces de flottabilités vers le sol, empêchant ainsi tout mouvement ascensionnel des masses d'air à partir du sol.

II.4.4.1. Structure de la couche limite dans le cas stable

Dans des conditions de stabilité thermique que l'on peut rencontrer la nuit, la basse troposphère se décompose en deux zones: la couche limite stable et la couche résiduelle (Figure 6) (SurrIDGE et *al.* 1987).

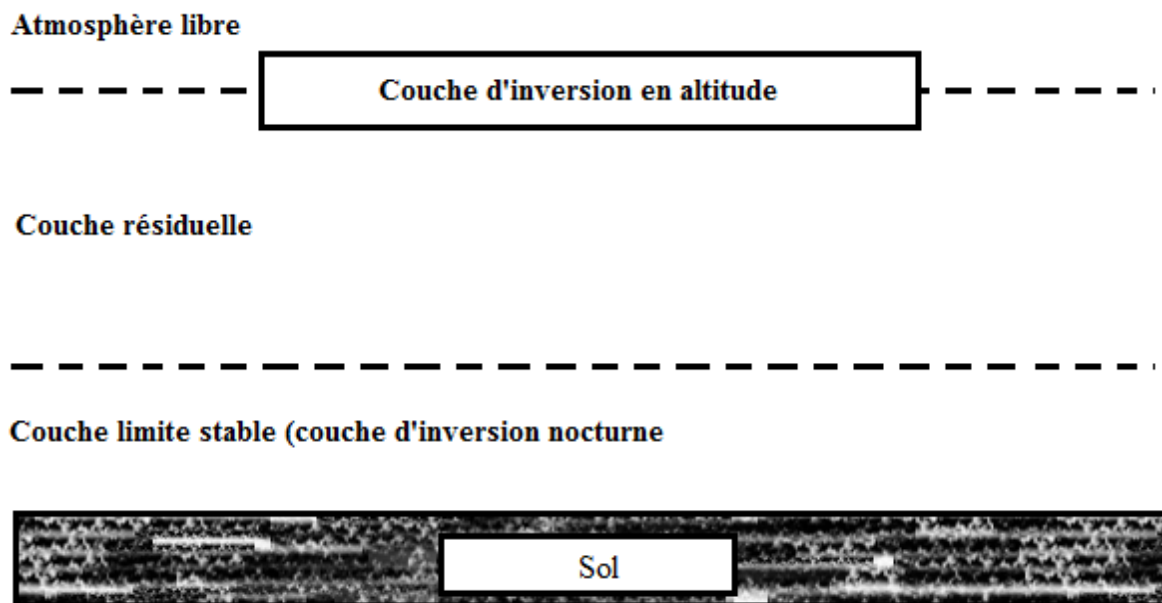


Fig. 6 : Schématique de la structure de la basse troposphère en situation stable (nocturne)

II.4.4.1.1. La couche limite stable

Cette couche en contact avec le sol, dont laquelle les effets de stratification thermique sont marqués. C'est près du sol que le gradient de température potentielle est le plus prononcé. Il décroît et tend vers zéro avec l'altitude, la couche limite s'oriente alors vers un état thermiquement neutre, à son sommet. Cette zone représente la couche d'inversion

nocturne lorsque les effets de stabilité sont générés pendant la nuit (différemment de la couche d'inversion en altitude qui constitue la base de l'atmosphère libre). L'épaisseur de la couche limite stable et le degré de stabilité thermique augmentent pendant la nuit. Cette croissance dépend des échanges thermiques entre le sol et l'air, de la turbulence de la subsidence – (phénomène existant aussi dans le cadre de la CLA stable)- et de l'advection (Carlson et al. 1985 ; Stull, 1983). Cette épaisseur peut varier de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. La couche limite stable se rencontre essentiellement dans les milieux ruraux, au cours de la nuit. Dans les milieux urbains, l'activité anthropogénique libère suffisamment de chaleur pour que le gradient de température potentielle reste négatif. Par conséquent, en ville l'air de la couche de surface reste en situation plus ou moins instable, en général.

II.4.4.1.2. La couche résiduelle

Cette couche se définit comme la zone délimitée par le sommet de la couche limite stable et la base de la couche d'inversion en altitude, marquant le début de l'atmosphère libre. Elle est caractérisée par un gradient de température potentielle pratiquement nul.

La turbulence de la couche résiduelle tend à devenir isotrope et à se rapprocher d'une situation neutre (Stull, 1988). Elle est indépendante des effets de sol et n'est entretenue que par les contraintes de cisaillement induites par le vent.

II.4.4.2. Turbulence dans le cas stable

Globalement, l'intensité turbulente gouvernée par les effets de contraintes mécaniques et par des effets de stabilité thermique demeure assez faible, ce qui limite l'intensité des phénomènes de transports verticaux dont elle est la source. Brost et Wyngaard (1978) définissent le temps caractéristique de transfert de l'information comme :

$$\tau_t = \frac{\delta_s}{0,01U_f}, \delta_s \text{ étant l'épaisseur de la couche limite stable et } U_f \text{ la vitesse de}$$

frottement, associé au flux turbulent de quantité de mouvement. De manière générale, ce temps caractéristique évolue entre 7h et 30h. La CLA n'est pas en équilibre avec la surface et on peut classer sa turbulence suivant trois catégories (Mahrt et Gamage, 1986).

La turbulence continue

Par vent fort ou faible, les contraintes de cisaillement génèrent suffisamment de turbulence pour vaincre la dissipation d'origine thermique. Dans ce cas, la turbulence est continue dans l'ensemble de la couche limite stable.

La turbulence intermittente

Lorsque la stabilité thermique est plus intense, les phénomènes turbulents deviennent sporadiques dans la couche limite (Mahrt, 1985). Aux endroits où il n'y a pas ou peu de turbulence, la diffusion turbulente de quantité de mouvement est réduite. En ce lieu, on observe une croissance locale de la vitesse du vent, ce qui induit des forces de cisaillement de plus en plus importantes. Des turbulences d'origine mécanique sont alors observées. Les flux turbulents s'accroissent et la quantité de mouvement se disperse dans le milieu. Les contraintes diminuent ce qui fait dissiper la turbulence sous les effets de la stabilité thermique. On assiste à une extinction de la turbulence et le cycle peut recommencer.

La turbulence discontinue

La turbulence produite par les contraintes de cisaillement devient discontinue dans le milieu, lorsque les effets de stabilité thermique sont fortement prononcés. La turbulence n'est soumise qu'à des conditions locales résultantes de la compétition des forces de cisaillement générées par les gradients de vitesse du vent et les effets de flottabilité issues de la stratification thermique. Les échelles de grandeurs associées à la turbulence ne sont définies que localement et complètement décorréliées des échelles associées aux conditions de forçages au niveau du sol (Nieuwstadt, 1984 ; Mahrt, 1985).

Le résultat est que la modélisation de la CLA stable devient assez difficile. Toutefois, il reste possible d'établir des relations semi-empiriques.

III.1.Rappels des équations gouvernant les écoulements atmosphériques

III.1.1.Hypothèses de Boussinesq

L'établissement des équations gouvernant les écoulements dans la couche de surface atmosphérique tient compte des hypothèses simplificatrices suivantes :

- Tout d'abord la viscosité dynamique μ et la conductivité thermique λ sont supposés constantes.
- L'air est un gaz parfait.
- Les effets d'humidité sont négligeables.
- le fluide est incompressible, la masse volumique ne varie qu'avec la température et uniquement dans le terme de gravité.
- L'écoulement est bidimensionnel.
- Les vitesses sont faibles devant la vitesse du son ce qui nous permettra d'admettre l'incompressibilité du fluide.
- Les seules forces extérieures sont les forces de gravité et de Coriolis.
- Les variations de pression de température et de masse sont petites devant les valeurs de référence. Nous étudierons plus loin ce qu'il convient d'utiliser comme état de référence.

Nous supposons donc :

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \ll 1, \quad \frac{P - P_0}{P_0} \ll 1, \quad \frac{T - T_0}{T_0} \ll 1$$

Nous voyons que, d'après ces hypothèses, l'air est supposé incompressible, mais sa masse volumique dépend de la température, et cette variation intervient dans le terme de production par gravité. Les limites de la validité de ces hypothèses formant l'approximation dite de Boussinesq, ainsi que ses conséquences dans certains cas idéalisés de turbulence, ont été étudiées par Favre et al (1976), Rey (1977) et Gence (1977).

Nous remarquons seulement que ces hypothèses donnent une description satisfaisante des phénomènes atmosphériques, si l'on évite les régimes fortement convectifs et les zones proches des parois.

Etats de références :

L'état de référence P_0, T_0, ρ_0 est complètement défini en choisissant deux des trois grandeurs à une hauteur de référence h_0 , la troisième découle de l'équation d'état :

$$\frac{P_0}{\rho_0} = RT_0 \quad (1)$$

où R est la constante universelle des gaz parfaits.

Les écarts P, T, ρ entre l'état réel de l'atmosphère et l'état de référence s'exprime par :

$$P = P_r - P_0$$

$$T = T_r - T_0$$

$$\rho = \rho_r - \rho_0$$

L'état de référence est gouverné par les équations d'équilibre hydrostatique et adiabatique.

Nous aurons donc :

$$\frac{\partial P_0}{\partial X_3} = -g\rho_0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_0}{\partial X_3} = -\frac{g}{C_p} \quad (3)$$

III.1.2. Equations aux valeurs instantanées

A l'aide des hypothèses précédentes nous pouvons alors écrire les équations gouvernants nos écoulements :

- **Equation de continuité**

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad (4)$$

- **Equation de conservation de quantité de mouvement**

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial X_i} + g \frac{T}{T_0} \delta_{i3} - 2\varepsilon_{ijk} \Omega n_j U_k + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial X_j \partial X_j} \quad (5)$$

- **Equation de conservation d'énergie**

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial X_j} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial X_j \partial X_j} \quad (6)$$

III.1.3. Equations aux valeurs moyennes

Afin de distinguer l'écoulement moyen de l'écoulement fluctuant, la décomposition selon Reynolds :

$$U_i = \bar{U}_i + u_i$$

$$T = \bar{T} + \theta$$

$$P = \bar{P} + p$$

Après avoir pris la moyenne statistique des équations (4 à 6) nous obtenons :

- **Equation de continuité**

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_i} = 0 \quad (7)$$

- **Equation de conservation de quantité de mouvement**

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} + \frac{\partial}{\partial X_j} \overline{u_i u_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{P}}{\partial X_i} + g \frac{\bar{T}}{T_0} \delta_{i3} - 2\varepsilon_{ijk} \Omega n_j \bar{U}_k + \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial X_j \partial X_j} \quad (8)$$

- **Equation de conservation d'énergie**

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial X_j} + \frac{\partial}{\partial X_j} \overline{u_j \theta} = \alpha \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial X_j^2} \quad (9)$$

III.1.4. Equations aux fluctuations

Par soustraction des équations (7 à 9) de (4 à 6), il résulte les équations aux fluctuations :

- **Equation de continuité**

$$\frac{\partial u_i}{\partial X_i} = 0 \quad (10)$$

- **Equation de conservation de quantité de mouvement**

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial X_j} + u_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} + \bar{U}_j \frac{\partial u_i}{\partial X_j} - \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial X_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial X_i} + g \frac{\theta}{T_0} \delta_{i3} - 2\Omega n_j \varepsilon_{ijk} u_k + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial X_j \partial X_j} \quad (11)$$

- **Equation de conservation d'énergie**

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_j \frac{\partial \theta}{\partial X_j} + u_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial X_j} + \bar{U}_j \frac{\partial \theta}{\partial X_j} - \frac{\partial}{\partial X_j} \overline{\theta u_j} = \alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial X_j \partial X_j} \quad (12)$$

III.2. Simulation de la couche limite atmosphérique

III.2.1. Paramètres adimensionnels

Rendre les équations de mouvement aux valeurs instantanées sous forme adimensionnelle relative à un fluide stratifié, en choisissant comme échelle de référence U pour la vitesse, L pour la longueur, ρ pour la masse volumique et ΔT pour l'écart de température fait apparaître les paramètres suivants :

$Re = U.L/\nu$ nombre de Reynolds, comparant les effets d'inertie et aux effets visqueux.

$Ro = U/L.\Omega$ nombre de Rossby, comparant les effets d'inertie et aux effets de Coriolis.

$Fr = U/(gL\beta T)^{1/2}$ nombre de Froude, rapport des effets d'inertie et des effets de gravité.

$Pr = \nu/\alpha$ nombre de Prandtl, rapport de diffusivité thermique et cinématique.

Une similitude stricte et complète de l'atmosphère en soufflerie devrait respecter ces quatre paramètres qui sont les seuls intervenants dans le cadre des hypothèses simplificatrices au début du § III.1.1. Il s'avère qu'il est impossible de respecter simultanément en simulation physique ces quatre paramètres. Il faudra donc se contenter de simulation approchée, respectant le ou les paramètres primordiaux.

Dans l'atmosphère, les nombres de Reynolds sont supérieurs à ceux de la soufflerie. Une similitude convenable des spectres d'énergie turbulente de l'écoulement atmosphérique et de l'écoulement en soufflerie serait souhaitable. Le spectre d'énergie des fluctuations de vitesse dans une couche limite de laboratoire, reproduit assez correctement la turbulence atmosphérique à petites échelles. Les fluctuations à plus grandes échelles ne sont pas reproduites ; mais dans l'atmosphère ces fluctuations sont découplées des fluctuations plus rapides. Les structures intermédiaires ne participent que très peu à l'énergie totale, on peut conclure que du point de vue du spectre d'énergie, la couche limite simulée constitue un modèle physique assez bien adapté à la simulation des phénomènes atmosphériques d'échelles micro météorologiques, bien qu'ils décroissent plus rapidement en soufflerie à cause d'une plus forte influence des effets visqueux. Une simulation convenable exige un nombre de Reynolds élevé et donc des souffleries de grandes dimensions.

La similitude du nombre de Prandtl est respectée par l'utilisation du même fluide, l'air dans les deux cas.

En dehors de la couche de surface atmosphérique, il paraît très difficile de reproduire en soufflerie certains effets atmosphériques, notamment ceux dus à la force de Coriolis. Les résultats expérimentaux de Busch (1973), Saab et al. (1975) ont montré que les forces de Coriolis sont négligeables dans les basses couches de l'atmosphère jusqu'à une hauteur

d'environ 100m. Notons toutefois que cette limite dépend fortement des conditions de stratification, par exemple en écoulement neutre et avec une forte turbulence, l'angle de rotation est faible.

Les propriétés de l'écoulement dans cette zone de l'atmosphère sont approximativement les mêmes que celles d'un écoulement de couche limite se développant sur plaque plane. Notre étude est limitée à la seule reproduction de la couche de surface (zone à tension constante).

III.2.2. Similitude dans la couche de surface

III.2.2.1. Lois de paroi cinématique et thermique

Dans cette couche, l'écoulement est supposé homogène et stationnaire dans le plan horizontal. Dans la zone à tension et flux pratiquement constants, nous pouvons écrire pour un écoulement neutre :

$$U = f(Z, \tau_p, \bar{\rho}, \nu)$$

Par définition $U_f^2 = \frac{\tau_p}{\rho}$; U_f : vitesse de frottement

En dehors de la sous-couche visqueuse $\tau_p = \tau_T$

$$\tau_p = -\overline{\rho u w} \text{ et } U_f^2 = -\overline{u w}$$

L'analyse dimensionnelle de l'équation de U fournit

$$\frac{\bar{U}}{U_f} = f\left(Z \frac{U_f}{\nu}\right) \Rightarrow \frac{\partial \bar{U}}{\partial Z} = \frac{U_f}{K \cdot Z}$$

où K est la constante de Von Karman.

Dans le cas d'une paroi lisse, on obtient un profil de vitesse logarithmique de la forme :

$$\frac{\bar{U}}{U_f} = \frac{1}{K} \ln\left(\frac{U_f \cdot Z}{\nu}\right) + C$$

La constante C est fonction du degré de stratification, d'après la théorie de Rotta (Hinze, 1975).

$$C = \frac{1}{K} \ln(4K - 1) + \frac{U_f \delta_v}{\nu}$$

Où δ_v désigne l'épaisseur de la couche visqueuse.

Dans le cas d'une paroi rugueuse en situation thermiquement stratifiée neutre .

Où Z_0 est la hauteur de rugosité.

Une température de frottement est définie de la même manière que la vitesse de frottement :

$$T_f = \frac{H_0}{\rho C_p U_f}$$

Le profil de température est de la forme :

$$\frac{T}{T_f} = \frac{1}{K_\theta} \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)$$

où K_θ est la constante de Von Karman relative à la température et elle est différente de celle relative à la vitesse.

Dans la couche à tension et flux constants, la relation suivante est valable :

$$U_f T_f = \overline{W\theta} \quad \longrightarrow \quad \text{Flux vertical de chaleur.}$$

III.2.3. Equations relatives à une couche limite stratifiée pleinement développée en soufflerie.

L'écoulement étudié étant considéré bidimensionnel et permanent en moyenne, si de plus les transferts d'énergie par viscosité moléculaire sont négligés, les équations des bilans d'énergie se réduisent à :

III.2.3.1. Bilan d'énergie cinétique turbulente

$$\underbrace{\overline{U} \frac{\partial \overline{q^2}}{\partial X}}_C + \underbrace{\overline{W} \frac{\partial \overline{q^2}}{\partial Z}}_P + \underbrace{\overline{uw} \frac{\partial \overline{U}}{\partial Z}}_{P_\theta} - \underbrace{\frac{g}{T_0} \overline{w\theta}}_{P_\theta} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial Z} \left[\overline{w} \left(\frac{\overline{p}}{\rho_0} + \overline{q^2} \right) \right]}_D + \varepsilon = 0$$

III.2.3.2. Bilan d'énergie thermique turbulente

$$\underbrace{\overline{U} \frac{\partial \overline{\theta^2}}{\partial X}}_C + \underbrace{\overline{W} \frac{\partial \overline{\theta^2}}{\partial Z}}_P + \underbrace{\overline{u\theta} \frac{\partial \overline{T}}{\partial X}}_P + \underbrace{\overline{w\theta} \frac{\partial \overline{T}}{\partial Z}}_P + \underbrace{\frac{\partial}{\partial X} \overline{u\theta^2} + \frac{\partial}{\partial Z} \overline{w\theta^2}}_D + \varepsilon_\theta = 0$$

où C, P, D, ε désignent respectivement la convection par le champ moyen, la production, la diffusion et la dissipation, P_θ étant la production par les forces de Buoyancy, cette quantité est négative dans le cas d'une stratification stable et positive pour une stratification instable. Notons que dans le bilan de la variance de température il n'y pas de production due à la flottabilité.

L'équation du bilan d'énergie cinétique turbulente met notamment en évidence les termes de production thermique P_θ et cinématique P_d , dont le rapport est le nombre de Richardson de flux. Ce nombre de Richardson permet de distinguer trois régimes :

- Régime neutre $\overline{w\theta} = 0$ mais $P_d \neq 0$, $R_f = 0$ la turbulence est entièrement d'origine dynamique.
- Régime instable $\overline{w\theta} > 0$ car $\frac{\partial T}{\partial Z} < 0$ dans ce cas $R_f \ll 0$ à limite quand $P_d > 0$, la turbulence est entièrement d'origine thermique.
- Régime stable $\overline{w\theta} < 0$ car $\frac{\partial T}{\partial Z} > 0$, dans ce cas $R_f > 0$.

- **Equation de concentration**

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_i \frac{\partial c}{\partial X_i} = D \frac{\partial^2 c}{\partial X_k \partial X_k}$$

Avec c : Concentration instantanée

D : Diffusivité moléculaire

Le choix d'une concentration de référence C_r nous permet d'obtenir l'équation adimensionnelle suivante, avec $c^+ = c/C_r$

$$\frac{\partial c^+}{\partial t^+} + U_i^+ \frac{\partial c^+}{\partial x_i^+} = \frac{1}{R_c S_c} \frac{\partial^2 c^+}{\partial x_k^+ \partial x_k^+}$$

Où apparaît S_c le nombre de Schmidt : $S_c = \frac{\nu}{D}$

Introduction à l'approche expérimentale

La dispersion atmosphérique d'un polluant peut être étudiée selon différentes approches avec :

- La réalisation d'essais en grandeur réelle ;
- La simulation sur maquette (hydraulique ou aéraulique) ;
- L'utilisation de codes de calcul mathématiques.

Les campagnes de mesures in situ sont souvent très coûteuses et demandent des délais de réalisation importants. Dans certains cas, la modélisation physique en soufflerie apporte une alternative intéressante. Elle permet également de comprendre des phénomènes inaccessibles par voie numérique. Nous avons utilisé la soufflerie de diffusion de l'Ecole Centrale de Lyon pour étudier une simulation physique de la couche de surface atmosphérique. Dans ce chapitre nous présenterons dans un premier temps les caractéristiques générales de l'installation, puis nous décrivons les diverses techniques de mesures utilisées dans le cadre de ce travail. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à deux cas d'étude, la simulation du développement d'une couche limite atmosphérique et l'écoulement autour d'un cube unique en présence de cette couche limite.

IV.1. Dispositif expérimental

IV.1.1. Caractéristiques de l'installation

L'installation comporte une soufflerie de grande taille destinée à des études de diffusion dans la couche de surface atmosphérique, un équipement de contrôle et de mesures, associé à un système digital de traitement de données.

IV.1.1.1. La soufflerie

La soufflerie utilisée est de type "à retour (Figure 7) dont les dimensions extérieures sont 24 m de longueur, 7,35 m de hauteur et de 7,2 m de largeur.

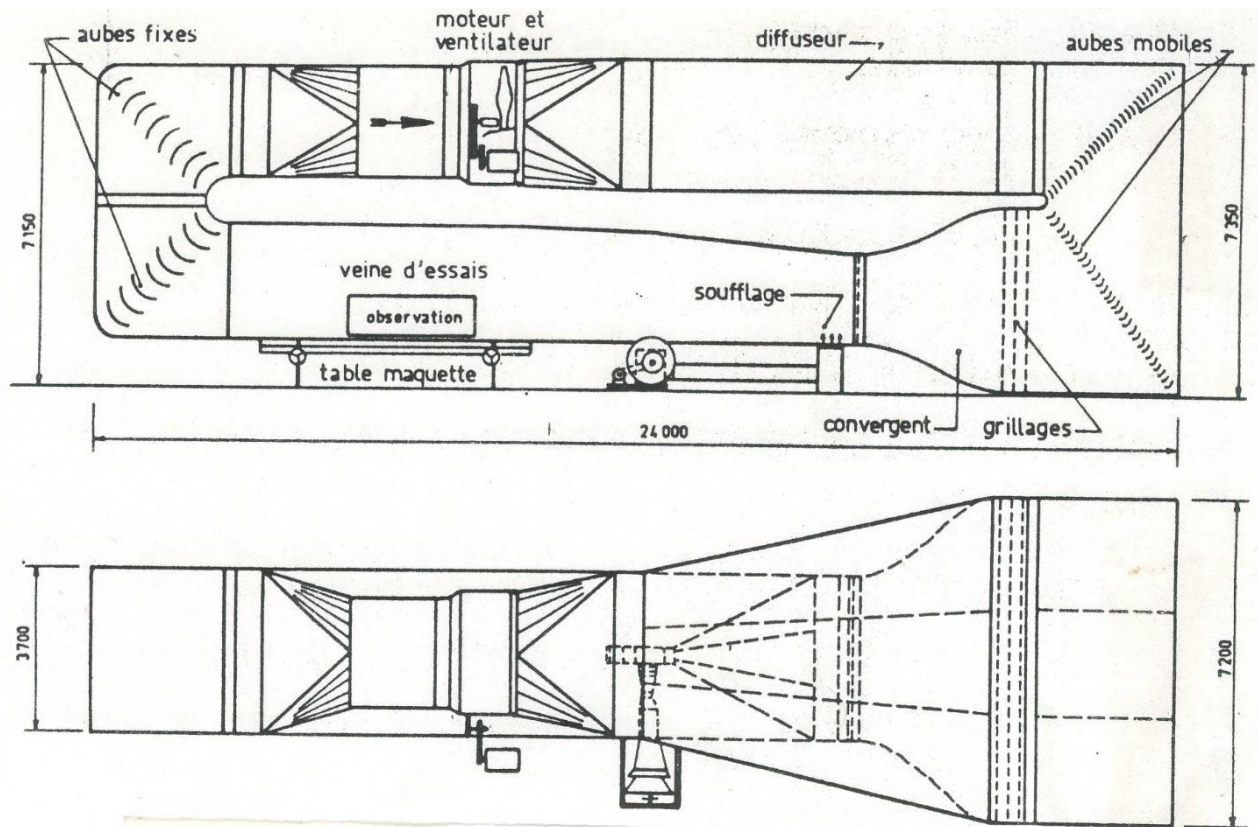


Fig.7: Vue générale de la soufflerie

IV.1.1.2- Le circuit aérodynamique

Les éléments composants le circuit aérodynamique permettent la régularisation de l'écoulement et la diminution des pertes de charge à l'entrée de la veine d'essai. Il comprend:

- un ventilateur axial qui assure une vitesse de l'écoulement continûment réglable de 0.5 à 10 m/s.
- un diffuseur et deux coudes à 90° équipés d'aubages mobiles.
- une chambre de tranquillisation munie de trois grillages, un écran grille pour atténuer la turbulence, un nid d'abeille limitant la rotation du fluide ainsi qu'un filtre anti poussière.
- un convergent de rapport de contraction 3.9.
- Une veine d'essai.
- Un système d'échangeurs thermiques destiné à réguler la température de l'air ambiant dans la veine d'essai à $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

IV.1.1.3- La veine d'essai

La veine d'essai (Figure 8) dont les dimensions géométriques sont de 14m de longueur, 3,7m de largeur et de 2,5m de hauteur est constituée d'une partie de 7m de longueur destinée à recevoir les maquettes. La paroi supérieure étant réglable de façon à annuler le gradient de pression longitudinal.

A la partie amont de la veine sont disposés successivement :

- une grille d'homogénéisation ayant une solidité de 0,17.
- un dispositif de soufflage pariétal permettant d'agir sur l'épaisseur de la couche limite.
- un peigne de déclenchement de la transition de la couche limite.

En aval de la veine, deux coudes d'aubes fixes suivis d'un échangeur thermique permettent le retour de l'écoulement vers le ventilateur.

Le refroidissement se fait par circulation d'eau (10 °C à l'entrée, 17 °C à la sortie) avec un débit de $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

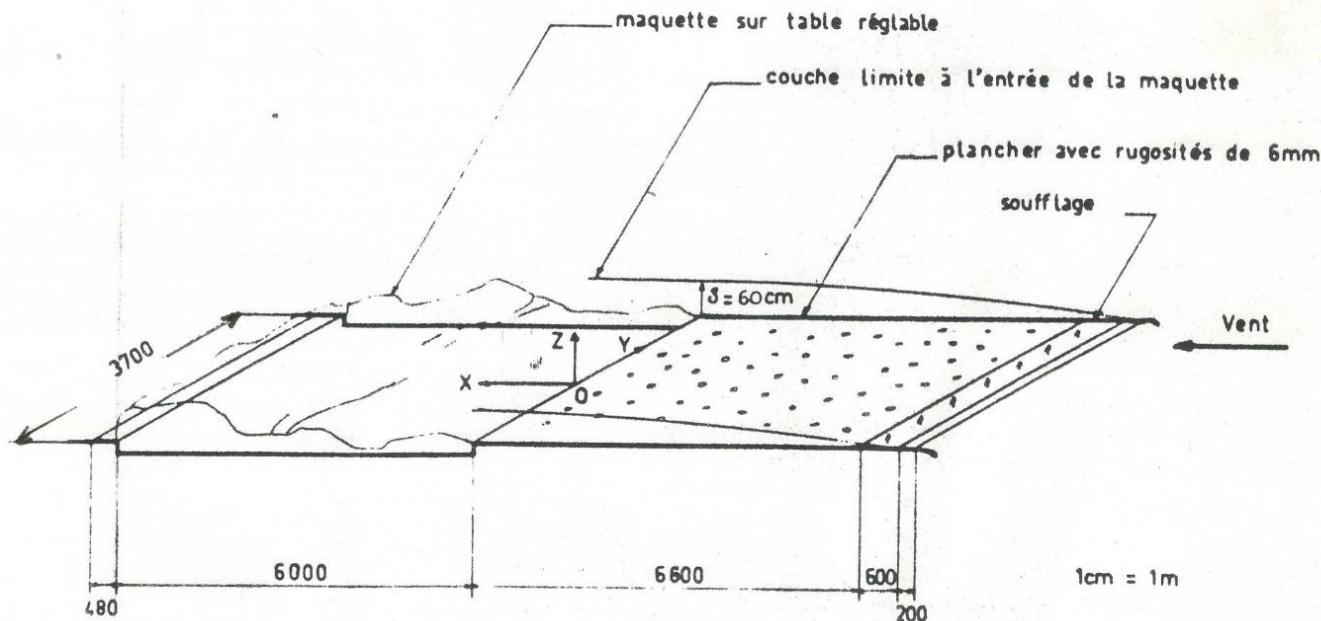


Fig.8:Détail de la veine d'essai

IV.1.1.4. Chariot de mesure

Le chariot à commande électrique est un élément important de la soufflerie. Il est conçu pour avoir une rigidité maximale afin d'éviter les vibrations du point de mesure.

Les déplacements selon les trois directions X, Y, Z sont effectués à l'aide de moteurs à courant continu. Le positionnement des capteurs est déterminé au moyen de codeurs optiques. Ainsi la sonde de mesure peut être déplacée dans la veine sur des distances, selon les axes X, Y, et Z, respectivement de 14 m, 3.3 m et 1.2 m avec une précision d'un dixième de millimètre.

IV.2. Techniques de mesures

Il existe en pratique différentes techniques utilisées pour la détermination de la vitesse dans les écoulements turbulents en présence d'obstacles rigides, c'est que l'on appelle l'anémométrie. Les techniques les plus courantes sont :

- L'Anémométrie à Fil Chaud
- L'Anémométrie Laser à effet Doppler (LDV)
- La Vélocimétrie par Imagerie de Particules (PIV)
- La Vélocimétrie Doppler Globale (DGV)

Les mesures de concentration sont généralement effectuées à l'aide de Détecteur à Ionisation de Flamme (FID)

Là, nous allons donner une brève description des trois premières techniques de mesure de vitesse que nous avons utilisé au cours de ce travail de recherche. Pour mesurer la concentration nous allons aussi présenter le FID utilisé.

IV.2.1. Anémométrie fil chaud

L'anémométrie à fil chaud est une technique classique de mesure de la vitesse d'un fluide en un point. Nous l'avons utilisé pour décrire l'évolution de la couche limite dans la soufflerie et elle fournira, par la suite, un cas de référence lors de l'utilisation des deux techniques optiques.

IV.2.1.1.Principe de base

L'anémométrie à fil chaud permet de mesurer les vitesses moyenne et turbulente d'un écoulement. Le principe de cette méthode (Comte-Bellot, 1976 ; Lomas, 1986; Bruun, 1995) repose sur le refroidissement par convection forcée d'un fil très fin (1 à 5 μm) et court (0,3 à 1mm) (Figure 9) chauffé par effet Joule. La température du fil, et donc sa résistance électrique, dépend de la vitesse locale du fluide. La mesure des caractéristiques électriques du fil fournit alors directement la composante de la vitesse normale au fil (loi de King, 1914). L'utilisation de plusieurs fils croisés permet de retrouver deux ou trois composantes de la vitesse. Le fil chaud permet d'obtenir une mesure en continu de la vitesse avec un temps de réponse très court, qui donne accès à des informations sur la turbulence. Dans notre cas, nous avons utilisé deux types de sondes :

- Une sonde à un fil pour les mesures unidimensionnelles (une seule composante de vitesse ou la mesure de la température)
- Une sonde 2 fils en X pour les mesures bi-composantes de la vitesse.

Les fils chauds sont d'un diamètre de 5 μm .

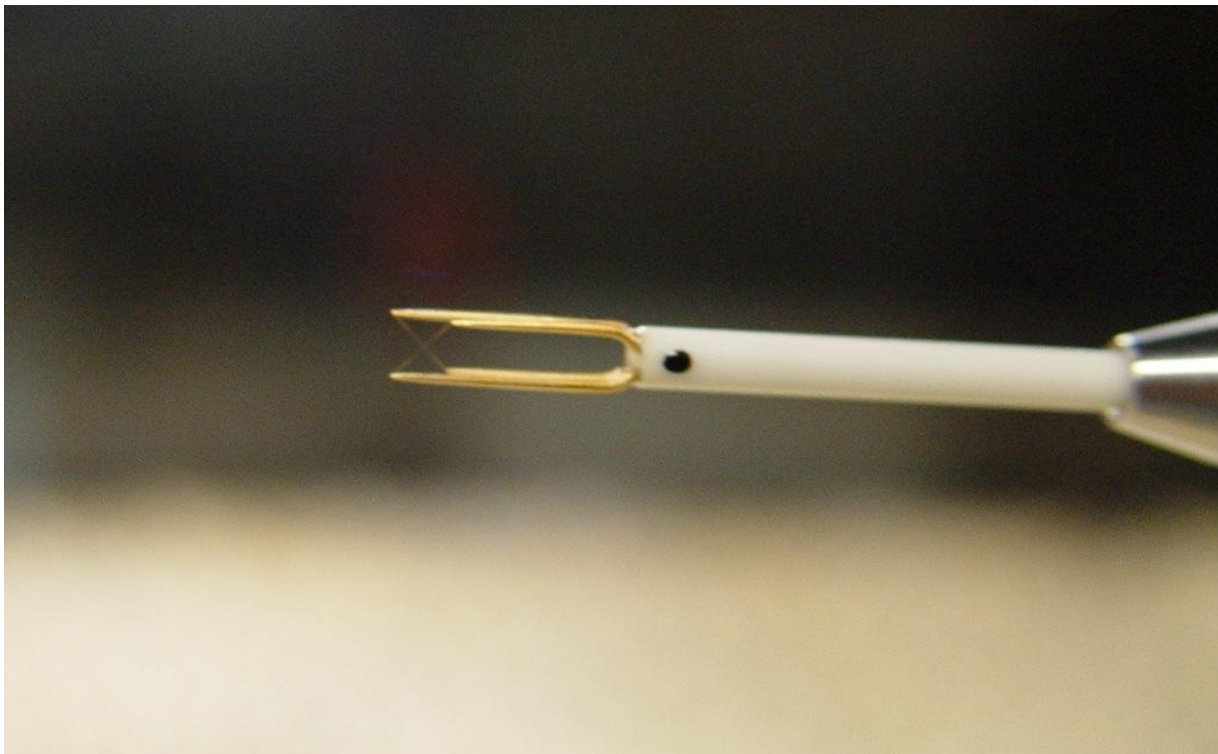


Fig.9. Sonde composée de fils chauds croisés permettant les mesures de vitesse

IV.2.1.2. Etalonnage

L'étalonnage d'un appareil de mesure est l'opération qui consiste à contrôler ses indications par comparaison avec un autre appareil dit « étalon ».

La précision de l'appareil à étalonner résulte de la méthode d'étalonnage utilisée et de la précision des appareils étalons employés

Le procédé d'étalonnage est une étape importante dans le mode opératoire d'une mesure expérimentale, car la pertinence des valeurs de vitesses relevées en dépend directement.

La méthode dite stationnaire est la méthode d'étalonnage la plus connue. Dans cette méthode le fil à calibrer est maintenu dans une position fixe alors que le fluide est en mouvement à une vitesse constante (Comte-Bellot, 1977).

En utilisant l'hypothèse que les données suivent la loi de *King* (1914), on obtient les courbes d'étalonnage.

$$\text{Cette loi s'écrit : } E^2 = \alpha + \beta U^n$$

Avec : E : tension de sortie de l'anémomètre

U : vitesse du fluide

α , β et n sont déterminés expérimentalement lors de l'étalonnage du fil chaud.

D'après *Perry et Morrison* (1971) le coefficient n est proche de 0.5.

IV.2.2. Anémométrie Laser Doppler

L'Anémomètre laser à effet Doppler (LDA) est une technique optique fondée sur la mesure du décalage en fréquence de faisceaux laser éclairant des particules très fines entraînées par un fluide (tel que l'air ou l'eau). Ainsi, en mesurant la vitesse des particules dans le fluide, on peut connaître la vitesse du fluide.

Le principe de fonctionnement (Figure 10) repose sur l'intersection des deux faisceaux laser faisant apparaître un réseau de franges (dû au phénomène d'interférence). Cette intersection définit le volume de mesure qui est de l'ordre du millimètre. La distance entre 2 franges

$d_{\text{inter frange}}$ est reliée à la longueur d'onde du laser λ_{laser} et à l'angle $\theta_{\text{faisceaux}}$ entre les deux

faisceaux, par la relation : $d_{\text{inter frange}} = \lambda_{\text{laser}} / 2\sin(\theta_{\text{faisceaux}} / 2)$

Chaque particule passant dans le volume de mesure, et donc par le réseau d'interfranges, émet une intensité lumineuse qui varie en fonction de la distance entre les franges. L'amplitude du signal varie donc à la fréquence $f_d = u/d_{\text{inter frange}}$, avec u la composante de l'écoulement perpendiculaire au réseau de franges. Le signal est ensuite récupéré par un photomultiplicateur qui convertit les fluctuations lumineuses en signal électrique. Ce signal est filtré, amplifié et finalement traité par analyse spectrale afin de déterminer f_d , et donc la vitesse u , pour chaque particule.

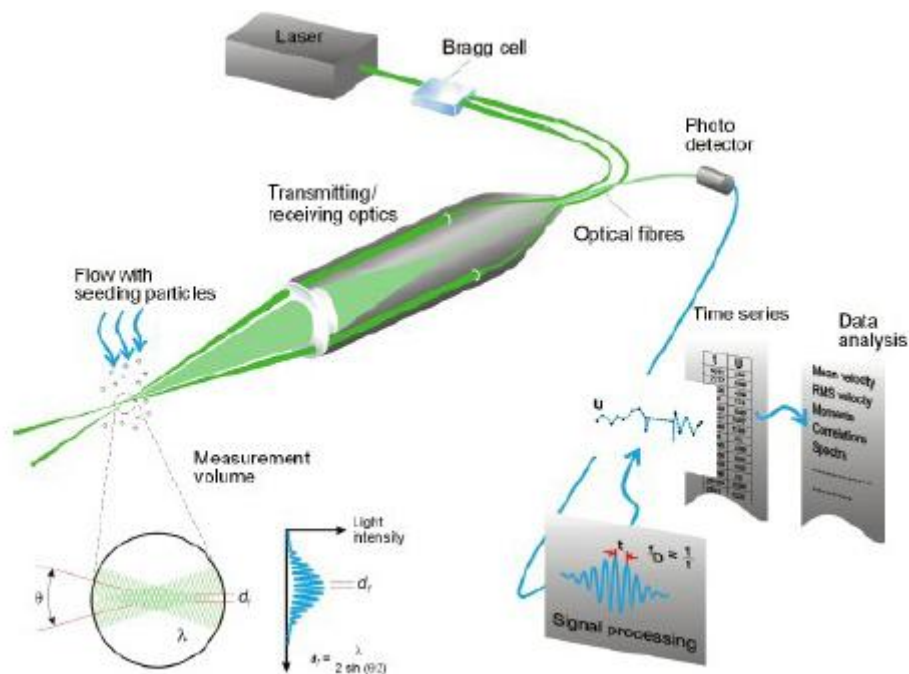


Fig.10. Principe de fonctionnement du LDA

IV.2.3. Vélocimétrie par Image de Particules

La vélocimétrie par Image de Particules (PIV), est une technique de visualisation quantitative. Elle est la synthèse des techniques de mesure quantitatives ponctuelles (L'anémométrie à fil chaud, vélocimétrie laser,...) et des techniques qualitatives globales de visualisation. Par conséquent, la PIV permet de mesurer le champ de vitesse instantané dans un plan éclairé. La PIV s'est développée à partir des années 80, les travaux d'Adrian (1984) ainsi que ceux de Pickering et Halliwell (1985) sont à la base de nombreux développements.

IV.2.3.1.Principe

Dans un écoulement, ensemençé avec des particules, on crée une tranche de lumière très fine à l'aide d'un faisceau laser ou d'une lumière blanche. En prenant deux photographies successives, séparées d'un intervalle de temps Δt petit et en mesurant le déplacement des particules, on en déduit les deux composantes de vitesse qui sont dans le plan de mesure (Figure 11) :

$$U(\vec{a}, t) = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

$$V(\vec{a}, t) = \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

L'avantage principal de cette technique est qu'elle permet d'obtenir le champ de vitesse instantané dans un plan (et non pas en un point comme les autres méthodes de vélocimétrie).

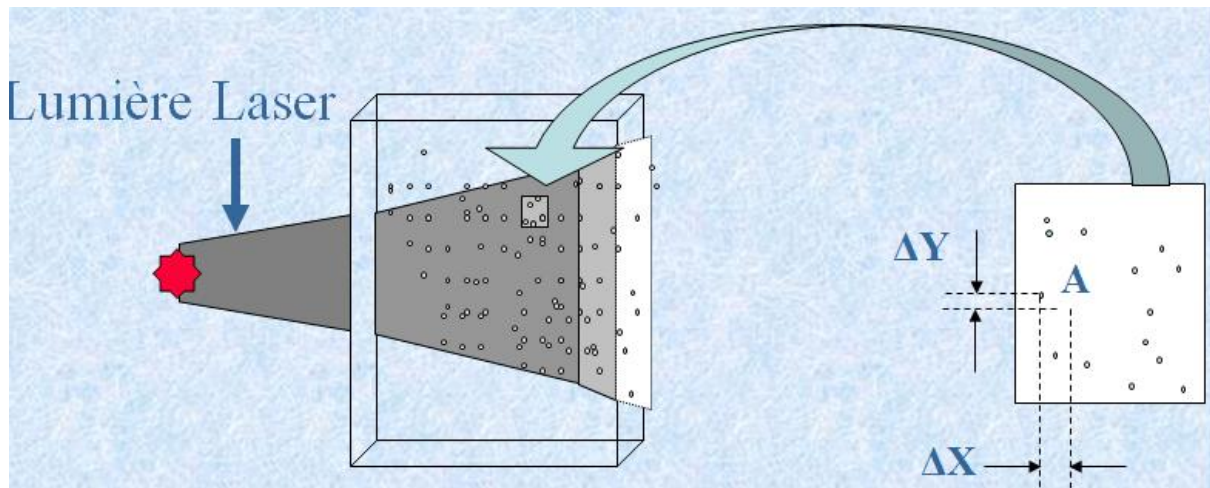


Fig.11. Principe de mesure de vitesse en PIV

Un système de PIV est composé (Figure 12):

- d'une source de lumière pulsée (laser YAG ou lampe stroboscopique) avec son optique;
 - d'une caméra KodakTM Mégaplus ES 1.0 pour la capture des images (résolution 1008 par 1018 pixels);
- d'un système de synchronisation caméra / laser ;
- d'un système d'acquisition et d'analyse des données.

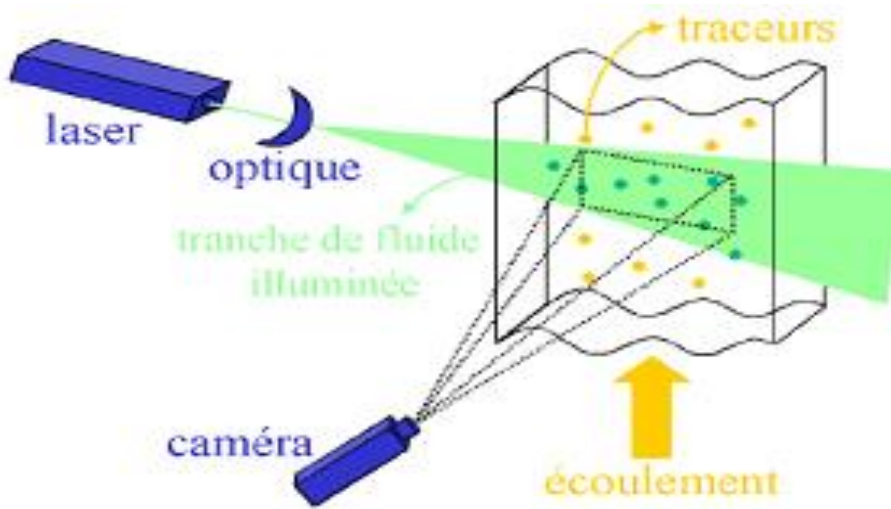


Fig.12. Système de PIV

IV.2.3.2. Méthode d'analyse de l'image

Si l'on désire observer l'activité des petites échelles de la turbulence, il faut augmenter la densité d'information de chaque image. Parmi les méthodes de traitement de l'image dans ce cas est la méthode d'inter- corrélation spatiale.

Inter- corrélation spatiale

- Chaque image correspond à une impulsion du laser (Δt connu entre deux impulsions),
- Absence d'ambiguïté de la direction de l'écoulement, car on connaît la séquence des images,
- Elle permet de détecter des signaux très faibles.

Pour chaque cellule élémentaire on réalise l'inter-corrélation des deux images. On obtient un pique correspondant au déplacement moyen des particules de la cellule (Figure 13).

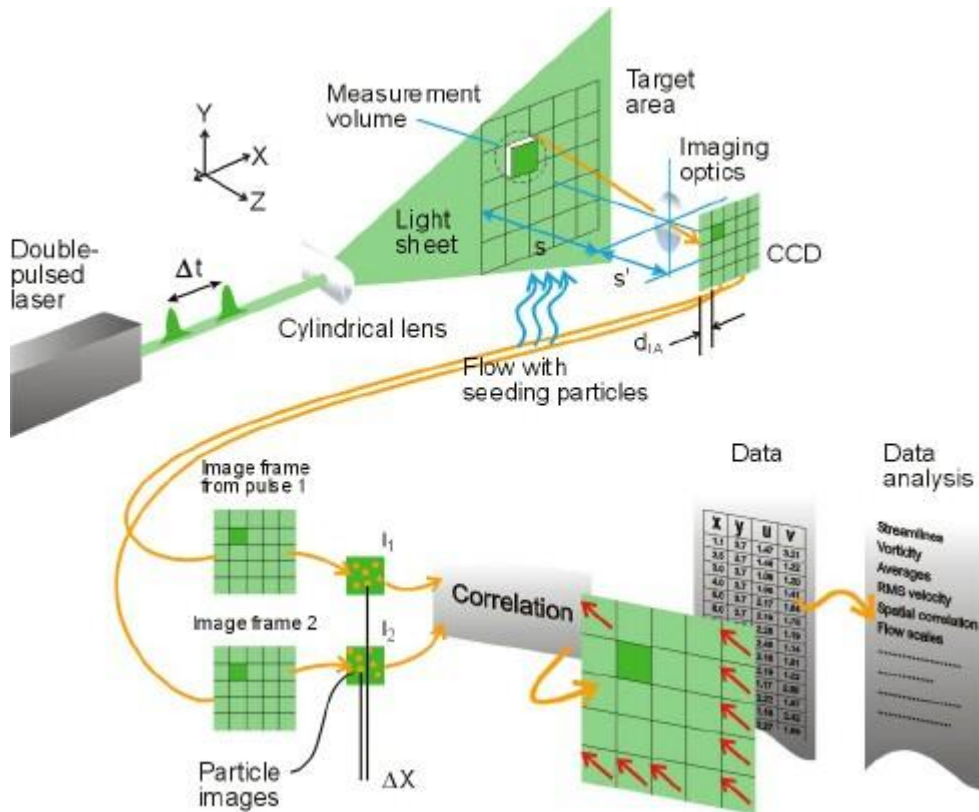


Fig.13. Méthode d'inter -corrélation

IV.2.4. Détecteur à Ionisation de Flamme (FID) :

Le Détecteur à Ionisation de Flamme (Figure 14) permet de mesurer la concentration en composés carbonés présents dans l'air. Le principe de la mesure est basé sur la formation d'ions lors de la combustion des hydrocarbures. La quantité d'ions produite est proportionnelle à la concentration en atomes de carbone.

Pour réaliser une mesure, on émet comme gaz traceur au niveau de la source un hydrocarbure gazeux. Nous avons choisi l'éthane (C_2H_6) car sa densité par rapport à l'air (environ 1,04) est proche de 1, ce qui lui confère un comportement passif du point de vue des effets de flottabilité. L'air contenant l'éthane est aspiré en continu au niveau du point de mesure, à l'aide d'un tube capillaire pour ne pas perturber l'écoulement. Le mélange est alors injecté dans une flamme non carbonée (flamme d'hydrogène) et les ions produits sont collectés au niveau d'une électrode. Le courant induit est directement proportionnel à la concentration en éthane dans l'air. La longueur du tube capillaire détermine la réponse en fréquence du capteur. Pour un tube d'une trentaine de centimètres, la fréquence de coupure du FID est d'environ 300 Hz.

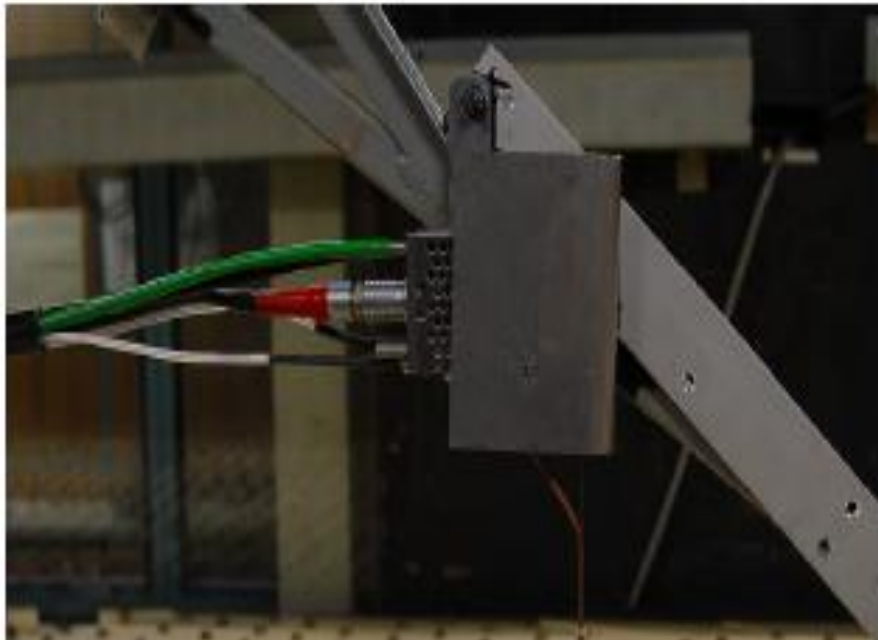


Fig.14.: Détecteur à Ionisation de Flamme (FID)

IV.3. Couche limite atmosphérique

IV.3.1. Description de la couche limite développée

La soufflerie et les techniques de mesures ainsi présentées, nous aborderons dans ce paragraphe la description de la couche limite qui sera développée dans la soufflerie. Modéliser la dispersion de polluants sur la maquette expérimentale passe par une prise en compte à l'échelle de la géométrie et des sources, mais aussi par une représentation réaliste de l'écoulement moyen sur le site.

Le développement naturel d'une couche limite turbulente nécessite des distances importantes pour son établissement. Si l'on souhaite simuler des couches de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur. On doit utiliser un système de déclenchement qui permet de développer et d'épaissir la couche sur des distances beaucoup plus courtes.



Fig. 15 : Vue du système de déclenchement de la couche limite

Klebanoff et Dielh (1952) sont les premiers à avoir proposé d'épaissir artificiellement une couche limite turbulente en plaçant des obstacles sur le sol. (McCarthy, 1964 ; Okamoto, 1987) ont développé des techniques différentes d'épaississement. Ces différentes études ont montré qu'il était possible d'utiliser de nombreux systèmes de déclenchement, chacun d'eux ayant des propriétés agissant soit sur le champ de vitesse moyen soit sur le développement de la turbulence. Pour nos essais nous avons utilisé des générateurs de tourbillons du type de Counihan (1969).

Ce système comporte deux parties distinctes, une barrière crénelée en amont puis une série d'ailerons elliptiques (voir Figure15).

Les caractéristiques géométriques des ailerons sont :

- Hauteur : 300 mm (noté H).
- Largeur : 150 mm
- Épaisseur : 15.8 mm

La forme d'un aileron est un quart d'ellipse. L'espacement transversal entre deux ailerons est de 150 mm. La barrière crénelée est placée à 250mm en amont des ailerons.

Le principe d'un système de déclenchement de couche limite de type de COUNIHAN consiste à produire artificiellement, dès l'entrée de la veine d'essai, des structures turbulentes représentatives de la proche paroi ainsi que de la partie supérieure.

IV.3.2. Champ de vitesse

Le développement de la couche le long de l'axe longitudinal de la veine est représenté sur la figure 16. Les champs de vitesse moyenne et fluctuante longitudinaux et transversaux sont obtenus dans une première phase en utilisant l'anémométrie à fils chauds, la sonde utilisée est une sonde à deux fils croisés qui permet la mesure simultanée de deux composants de vitesse longitudinale et transversale. Dans une seconde phase, une métrologie optique LDA tridimensionnelle a aussi été utilisée pour la mesure à la fois des trois composants de la vitesse. On observe que la vitesse moyenne (Figure 16) s'accorde avec une loi logarithmique sur toute l'épaisseur de la couche.

Les mesures sont obtenues pour une vitesse moyenne de l'écoulement non perturbée au-dessus de la couche limite de 5 m.s^{-1} . Les valeurs de la vitesse de frottement et de la rugosité, déduites des profils de vitesse moyenne, sont reportées dans le Tableau 2.

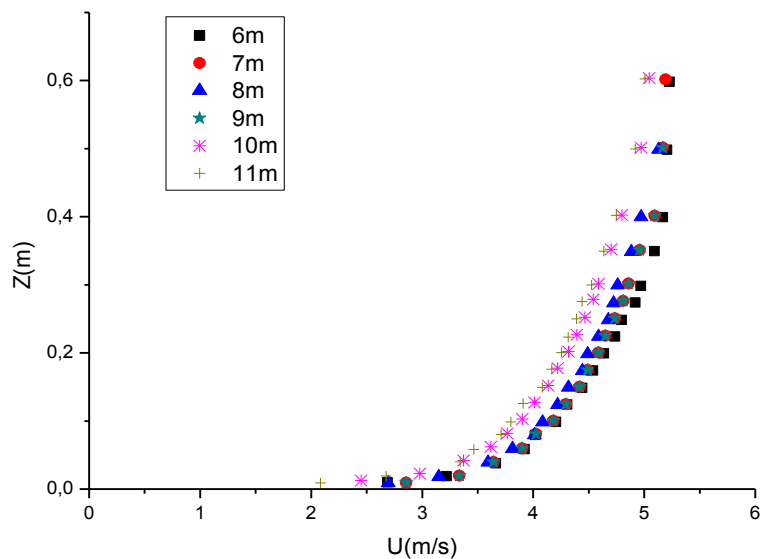


Fig.16. Évolution de la vitesse moyenne de la couche limite $U_\infty = 5\text{m/s}$

Sur les figures 17 et 18 on remarque que la comparaison des profils de vitesse et d'intensité de turbulence longitudinale pris à 8 m de la grille de turbulence est très satisfaisante. On voit que les intensités de turbulence longitudinale (Figure 18) diminuent avec l'altitude Z.

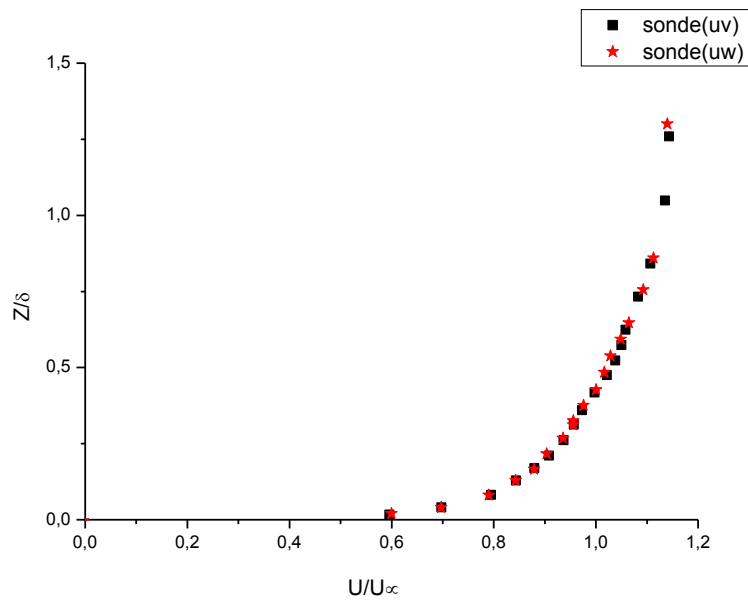


Fig.17. comparaison des profils de la vitesse moyenne en fonction de l'orientation de la sonde fil chaud

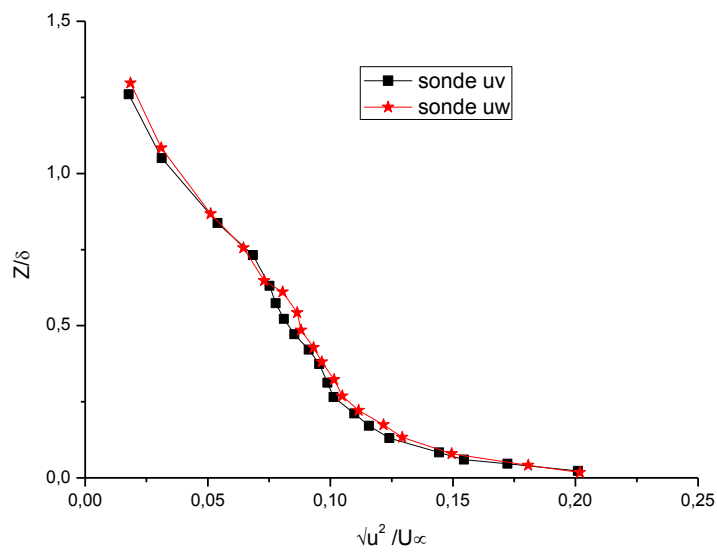


Fig.18. comparaison des profils de l'intensité de turbulence en fonction de l'orientation de la sonde fil chaud

IV.3.3. Caractéristiques de la couche

La rugosité du sol est obtenue en utilisant des écrous de 6mm de hauteur semés éparpillés aléatoirement le long de la veine sur son plancher. De plus cette rugosité a pour effet de stabiliser d'avantage la couche limite turbulent.

On remarque à partir du Tableau 2 que la valeur de la vitesse infinie décroît avec la distance, cela est dû à la présence d'un gradient de pression défavorable ($\frac{\partial P}{\partial X} > 0$).

Tableau 2 : Caractéristiques d'évolution de la couche

Position (m)	U_{∞} (m)	δ (m)	U_f (m/s)	1/n	Z_0 (mm)
6	5.11	0.43	0.25	0.15	0.106
7	5.08	0.46	0.23	0.14	0.065
8	5.04	0.48	0.23	0.14	0.085
9	4.98	0.51	0.24	0.15	0.132
10	4.95	0.54	0.24	0.15	0.138
11	4.9	0.55	0.25	0.16	0.187

IV.3.4. loi de puissance

Dans la littérature, il est communément utilisé une loi de puissance (déterminée de manière empirique en fonction du site étudié) pour représenter la variation de la vitesse moyenne dans l'ensemble de la couche limite (Pérez et al, 2005):

$$\frac{U}{U_{\infty}} = \left(\frac{z}{\delta}\right)^{\frac{1}{n}}$$

Où n est un coefficient qui dépend du type de rugosité employée, et qui varie entre 7 pour des terrains lisses et 10 pour les zones urbaines.

Le tableau récapitulatif (Tab.2) présente l'évolution de ce coefficient en fonction de la distance en aval de la grille de turbulence. Ces résultats montrent que la couche limite simulée est représentative d'une couche limite atmosphérique sur un terrain plat ouvert du type campagne (Davenport, 1965) (loi de puissance avec $1/n = 1/7 = 0.1428$).

IV.3.5.Équilibre de la couche limite

L'évolution des profils d'intensité de turbulence horizontale et verticale ont été représentés (respectivement) sur les figures (19 et 20). On constate que les deux profils à 6 et à 7 m de l'intensité turbulente horizontale et verticale présentent un excès d'énergie dans la partie basse de la couche, ce qui veut dire que la couche limite n'est pas encore en équilibre pour ces deux positions dans la veine. Mais au-delà de 7 m l'évolution de la couche reste en équilibre, ce qui est très important, puisque les modèles physiques seront placés après cette distance.

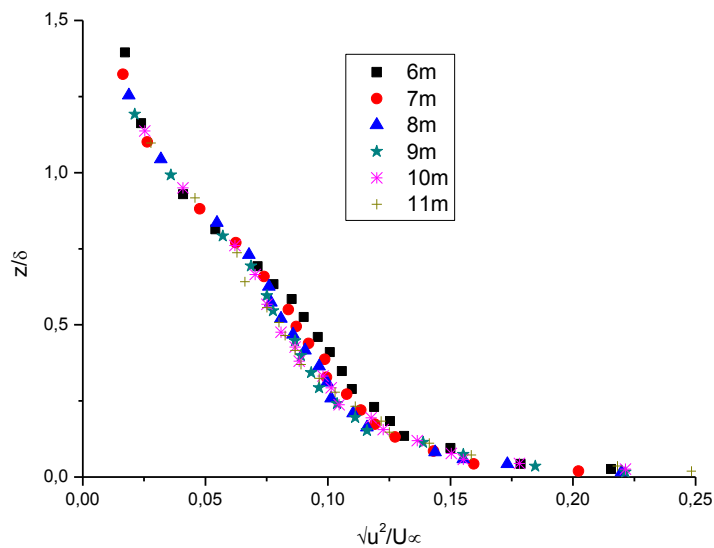


Fig.19. Evolution de l'intensité de turbulence $\sqrt{u^2}/U_\infty$

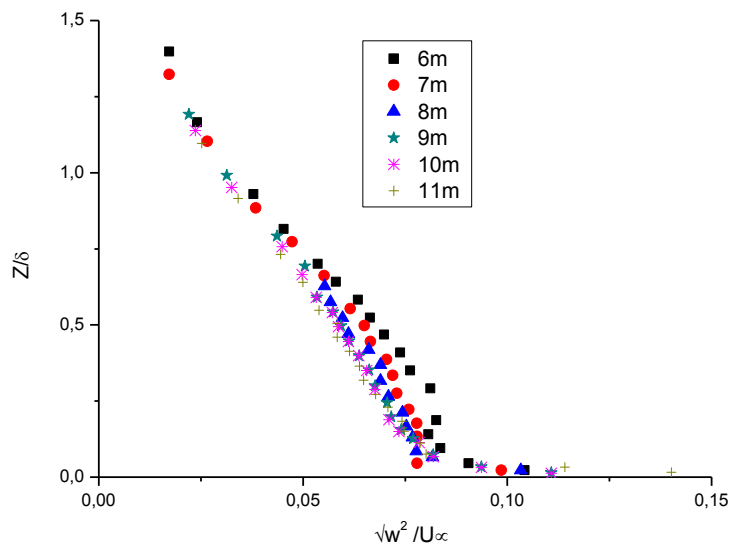


Fig.20. Evolution de l'intensité de turbulence $\sqrt{w^2}/U_\infty$

On remarque la même chose sur l'évolution du profil vertical de corrélation - $(u w)$ figure 21. L'épaisseur de la zone à tension constante occupe entre 10 et 20% de l'épaisseur totale de la couche.

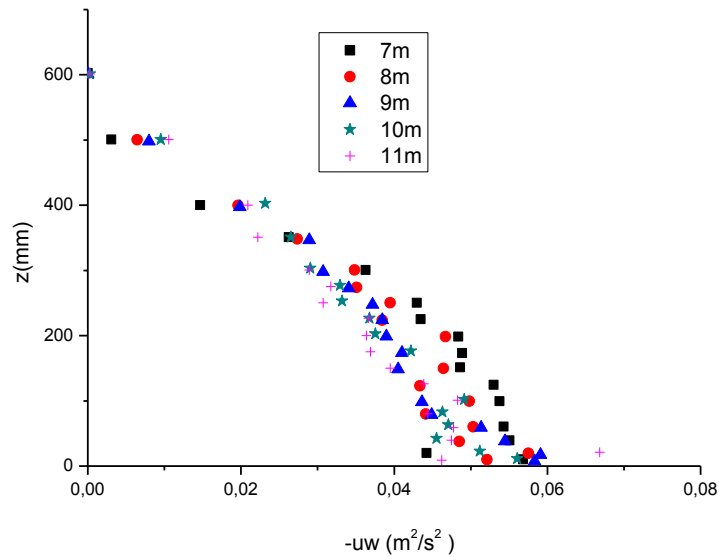


Fig.21. Évolution de la corrélation - (uw)

IV.3.6. Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation est à peu près constant sur toute la hauteur de la couche et vaut 0.36 Figure 22.

La valeur suggérée par Arnal et al. (1976), pour une couche lisse est plus proche de 0.45.

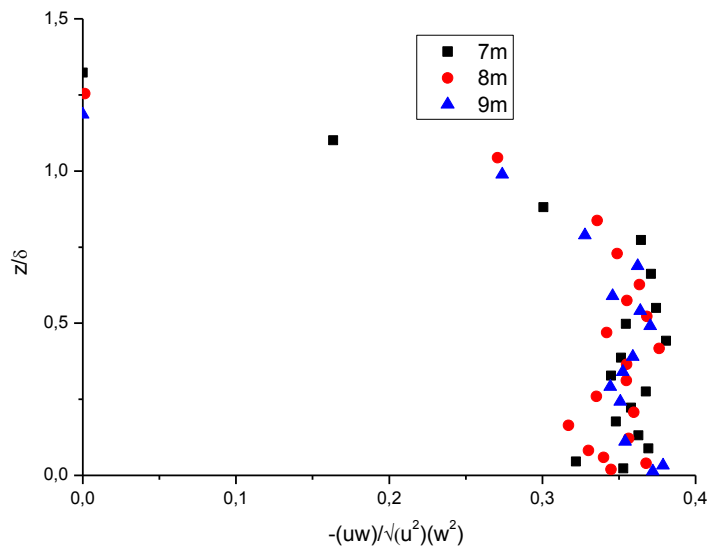


Fig.22. Evolution du coefficient de corrélation

IV.3.7. Profils transversaux de vitesse

Sur la figure 23 représentant les profils transversaux de la vitesse longitudinale moyenne (U), nous pouvons observer, quel que soit le plan de mesure, les variations de vitesse sont de l'ordre de 1 à 2 % de la vitesse infinie. Ces observations nous permettent donc de dire, qu'il existe une bonne homogénéité selon l'axe transversale (y).

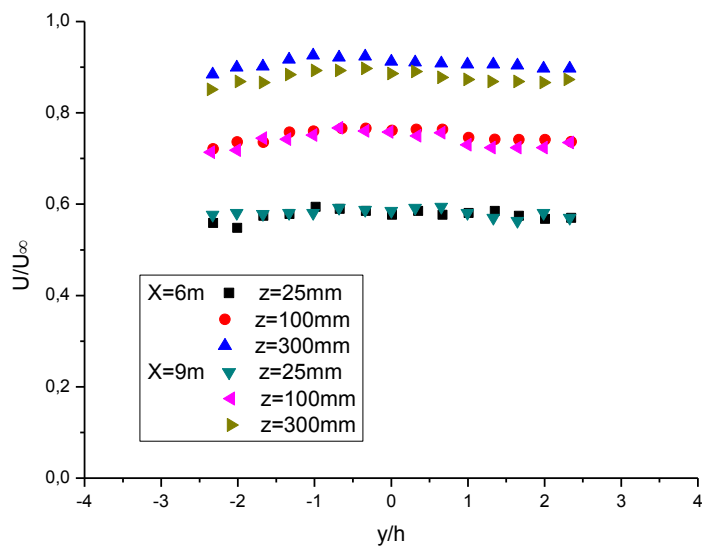


Fig.23. Profil transversaux de la vitesse longitudinale moyenne.

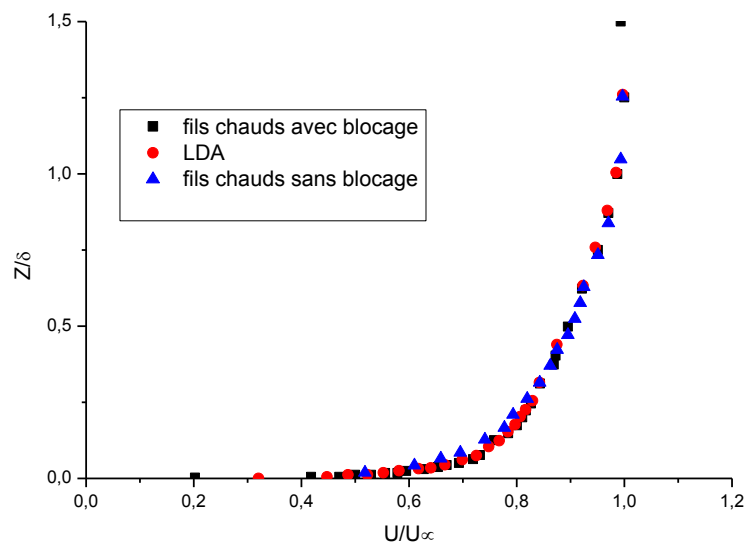
IV.3.8. Comparaisons de différentes techniques de mesures (fil chaud et LDA)

Les techniques de mesures comparées sont : mesure avec le système LDA et les deux cas de fils chauds, dans le premier cas le chariot de mesure est placé au fond de la veine (cas dit sans blocage) et dans le deuxième cas le chariot est placé au même niveau que le point de mesure (cas dit avec blocage).

La présence du chariot de mesure à l'intérieur de la soufflerie induit à un certain blocage de l'écoulement, se qui aide à accélérer la couche limite en partie basse (Figure 24.a).

On peut remarquer (Figure 24.b) que l'intensité de turbulence sans blocage est plus forte en partie basse et est légèrement plus faible en partie haute de la couche. Donc on peut conclure que les deux techniques de mesure (fils chauds avec blocage et le LDA) sont fiables, la couche limite a les mêmes caractéristiques moyennes et turbulentes.

a)



b)

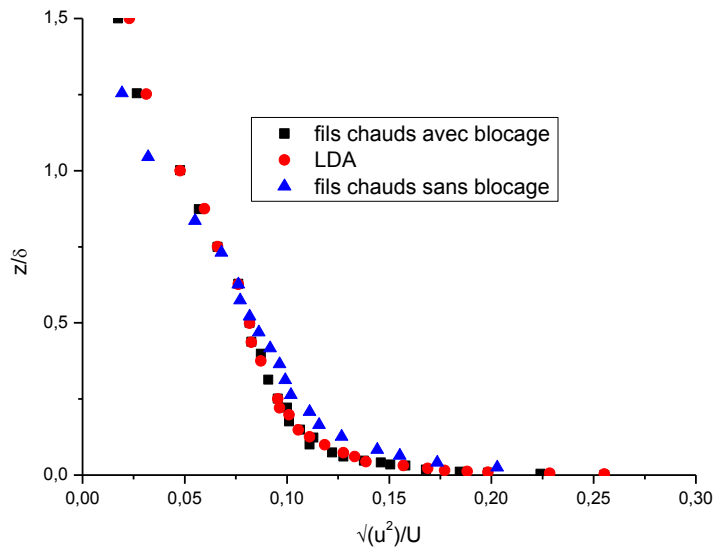


Fig. 24. Comparaison de différentes techniques de mesure : fils chaud et LDA

(a) U/U_∞

(b) $\sqrt{\langle u^2 \rangle}/U_\infty$

IV.4. Écoulement tridimensionnel en présence d'un cube

IV.4.1. Objectifs

Les écoulements de fluides en présence d'obstacles sont largement utilisés dans l'industrie et leurs applications sont extrêmement variées. On peut les rencontrer dans le cas des problèmes d'environnement liés à la dispersion des polluants à travers les agglomérations ainsi que les effets du vent sur les bâtiments, la ventilation des tunnels routiers, les ailettes de refroidissement des engins thermiques, les chicane des échangeurs de chaleur ou des capteurs solaires, les canalisations urbaines, etc.

En effet l'écoulement d'une CLA incident sur un obstacle est un cas qui a été largement étudié par le passé par de nombreux auteurs, on peut citer Castro et Robins (1977), Ogawa et Oikawa (1982), Hussein et Martinuzzi (1996) ; l'ensemble de la littérature consacrée à ce sujet constitue donc une base de données importante pour le développement de modèles physiques, numériques ou théoriques.

Dans ce paragraphe nous allons présenter le cas de l'écoulement autour d'un cube en

présence d'une couche limite. Pour cela nous avons utilisé deux techniques expérimentales, les mesures par LDA et par PIV.

IV.4.2. Généralités

L'étude de la dispersion de polluants est très complexe et nécessite, en premier lieu, de bien comprendre le comportement d'un écoulement en présence d'obstacle. En effet, l'étendue de la zone de recirculation, la nature de la couche cisailée, tout comme celle des tourbillons qui se détachent de l'obstacle, vont interagir avec le polluant et donc influencer sa dispersion.

D'une façon générale l'écoulement au voisinage d'un obstacle met en évidence essentiellement la présence de trois zones. Une zone de déplacement à l'amont de l'obstacle, puis une zone proche de l'obstacle définie par les décollements de couche limite et se forme la zone de recirculation en aval (Figure 25). Et enfin on peut définir une troisième en aval de la zone de recirculation dite (zone de sillage lointain).

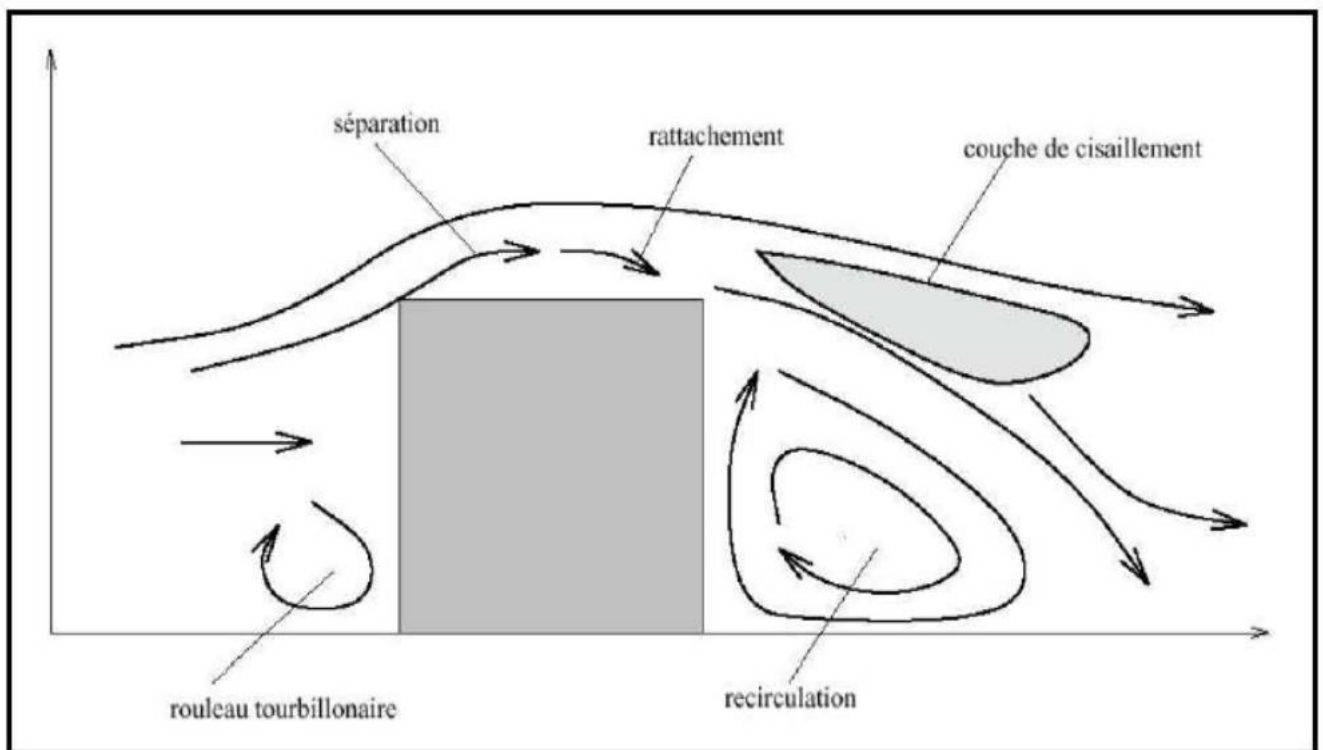


Fig.25. Comportement d'un écoulement de couche limite en présence d'un cube.

IV.4.2.1. Zone de déplacement

A l'arrivée de l'écoulement incident sur l'obstacle, le champ de pression induit par l'obstacle freine la base de la couche limite et provoque la séparation des filets fluides au voisinage de la face amont de l'obstacle.

L'écoulement décélère longitudinalement et accélère transversalement et verticalement pour pouvoir passer autour de l'obstacle. La décélération de la vitesse implique une augmentation du champ de pression à proximité de la face amont de l'obstacle ce qui produit un écoulement tourbillonnaire près du sol.

IV.4.2.2. Zone de recirculation

Les écoulements sur les côtes de l'obstacle interagissent avec l'écoulement au-dessus du toit et provoquent un réattachement de la zone décollée. Derrière l'obstacle se forme une zone de recirculation qui est caractérisée par un champ de vitesse moyen beaucoup plus faible que l'écoulement extérieur et une intensité de turbulence plus élevée.

IV.4.2.3. Sillages

La zone de recirculation aval est suivie d'une région de sillage jusqu'au retour à l'équilibre de l'écoulement incident perturbé par l'obstacle.

L'étude des sillages autour des obstacles est d'un intérêt très important dans la pratique. En effet la connaissance des structures turbulentes générées derrière ces obstacles et leurs différents régimes est d'une utilité primordiale dans la conception des ouvrages exposés aux écoulements de fluides.

IV.4.3. Résultats expérimentaux

L'analyse du comportement de la couche limite présentée auparavant en présence d'un cube de 80 mm de côté est l'objectif de ce paragraphe. Les mesures ont été effectuées à l'aide du système LDA. Les quantités mesurées sont U, V, W et u.

Les deux types de profils qui ont été mesurés sont : profils transversaux à une hauteur fixe de 40 mm ($h/2$) et profils verticaux, pris sur l'axe de l'écoulement ($y = 0$), axe de symétrie du cube.

La figure 26 représentant l'évolution du profil transversal de vitesse moyenne longitudinale en amont du cube, montre que la vitesse à $x/h = -1/2$ (figure 26.a) est plus petite que celle à $x/h = -1$ (figure 26.b) cela signifie que la vitesse diminue en s'approchant de l'obstacle. Donc on peut conclure que l'obstacle ralentit l'écoulement.

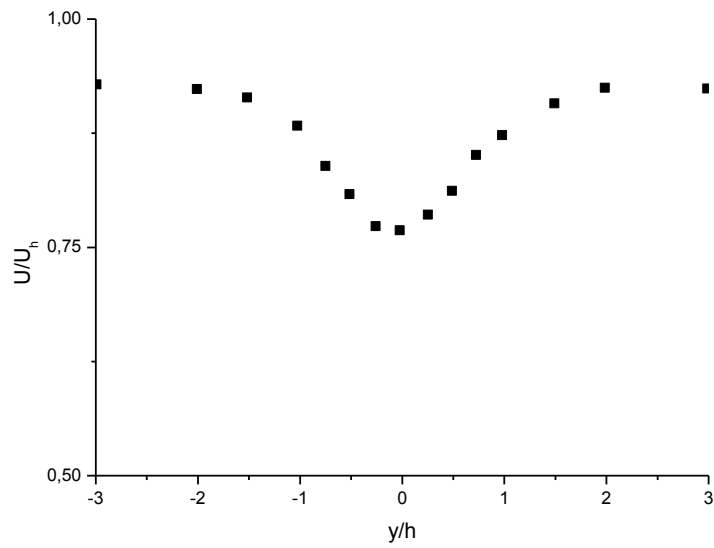


Fig. 26. (a) Evolution du profil transversal de vitesse moyenne longitudinale en amont du cube $x/h = -1$

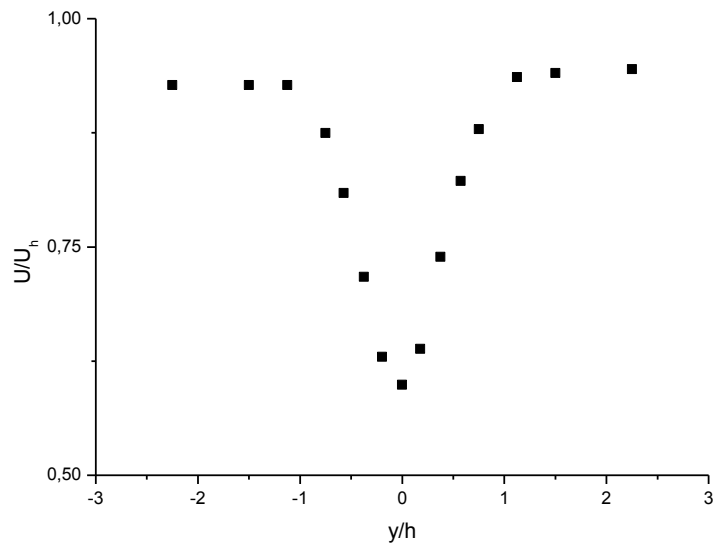
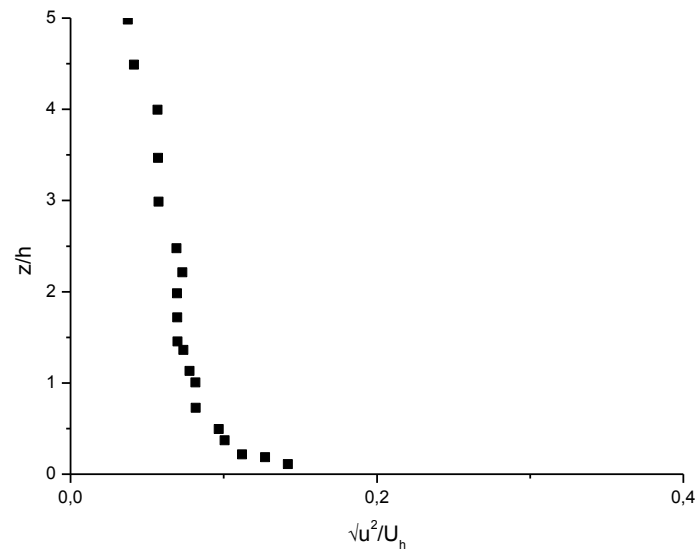


Fig. 26. (b) Evolution du profil transversal de vitesse moyenne longitudinale en amont du cube $x/h = -1/2$

Le profil vertical à $x/h = -1/2$ (Figure 27) montre que la vitesse est proche de zéro et on peut donc supposer qu'au-delà de ce point la vitesse est négative, ce qui confirme la présence d'un écoulement tourbillonnaire près du sol.

a)



b)

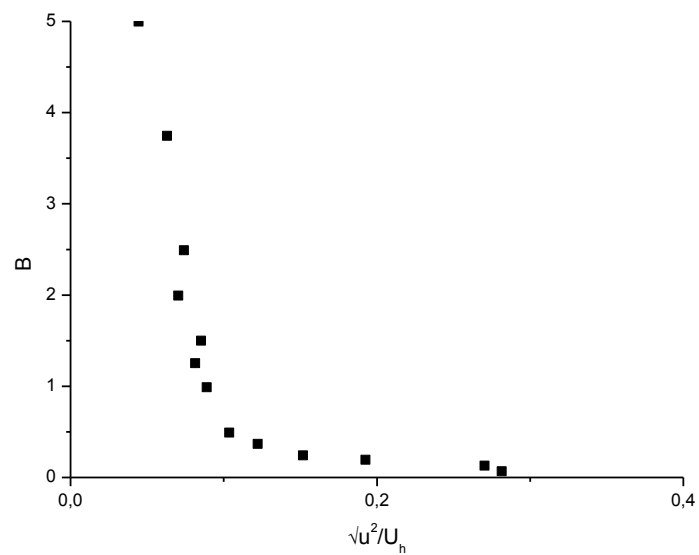


Fig.27. Evolution du profil vertical de fluctuation longitudinale en amont du cube

a) $x/h = -1$; b) $x/h = -1/2$

Sur la figure 28 représentant l'évolution de la vitesse longitudinale et verticale le long de la face supérieure du cube, à partir de $x/h = 0$, nous observons que la vitesse U est négative, elle augmente en norme puis diminue progressivement jusqu' à la position $x/h = 0.65$ où elle

s'annule. Au-delà de cette position l'écoulement accélère avec les deux vitesses, longitudinale (U) et verticale (W) positives ; ce qui provoque un décollement de la couche limite sur la face avale du cube. Nos résultats sont en accord ceux obtenus par Castro et Robins (1977).

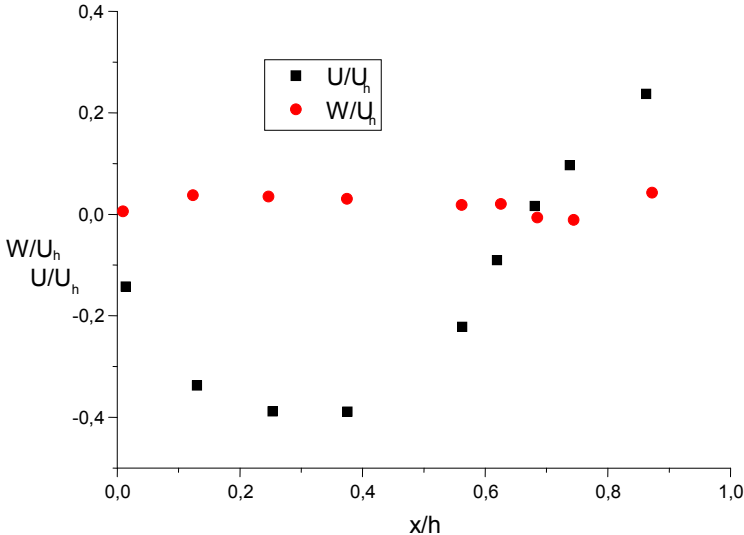
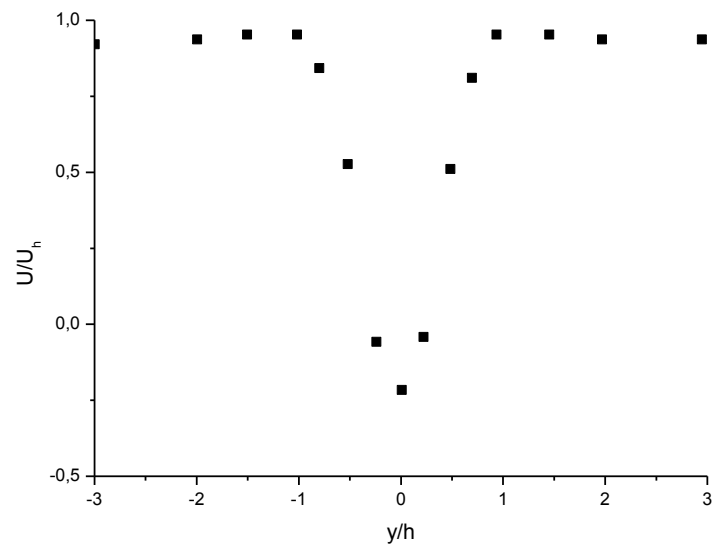


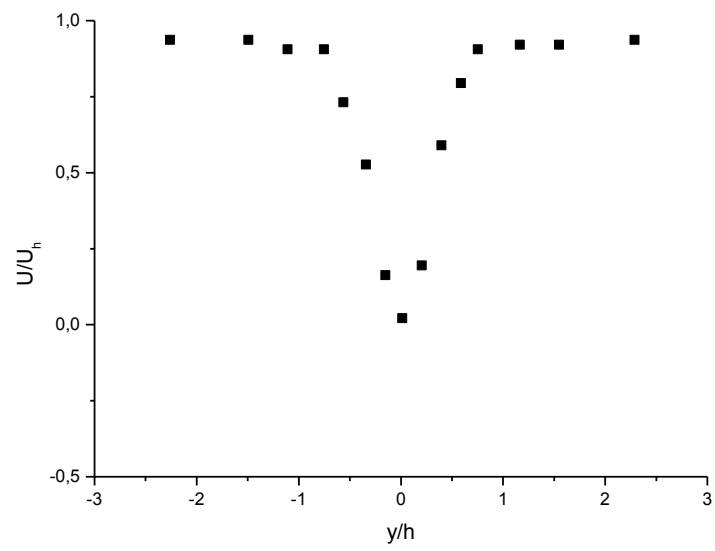
Fig.28. Vitesse moyenne sur l'axe de la face supérieure

La figure 29 représentant l'évolution du profil transversal de vitesse moyenne longitudinale en aval du cube, montre la zone de recirculation à $x/h = 3/2$ avec un écoulement moyen négatif.

a)



b)



c)

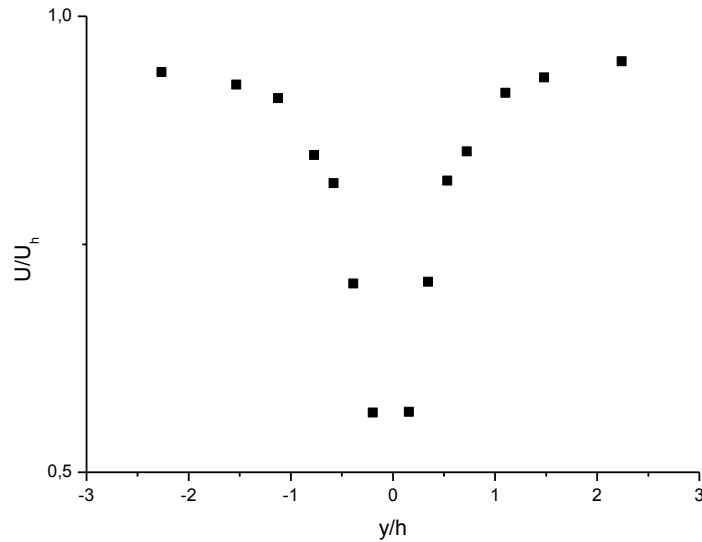


Fig. 29. Évolution du profil transversal de vitesse moyenne longitudinale en aval du cube

a) $x/h = 1.5$ b) $x/h = 2$ c) $x/h = 3$

IV.4.3.1. Mesures par le système P I V

L'avantage principal de cette technique est qu'elle permet d'obtenir le champ de vitesse instantané dans un plan (et non pas en un point comme les autres méthodes de vélocimétrie). A partir de plusieurs champs de vitesse, on réalise un traitement statistique afin d'obtenir les moyennes, écarts-types. Mais l'apport essentiel de la PIV est la visualisation des structures instantanées de l'écoulement (structures cohérentes, tourbillons) qui peuvent disparaître sous l'effet du traitement statistique.

Pour notre cas nous avons utilisé le système PIV pour examiner le champ de vitesse immédiatement en aval du cube, selon un plan vertical sur l'axe de symétrie et un plan horizontal à $z = 40 \text{ mm}$ ($h/2$).

IV.4.3.2. Comparaisons diverses

Dans cette partie, nous allons montrer la cohérence entre nos résultats issus des mesures LDA et PIV et ceux issus de Castro et Robins (1977).

Sur la figure 30 présentant ces différents profils verticaux expérimentaux en aval de l'obstacle, on peut voir une bonne cohérence entre les différents profils expérimentaux. Le

problème soulevé par la présence du chariot de mesure à l'intérieur de la soufflerie dans le cas des mesures par le système LDA est visible. En effet les profils issus des mesures PIV et celles de Castro et Robins présentent un léger déficit en partie supérieure, en dehors de la zone de recirculation.

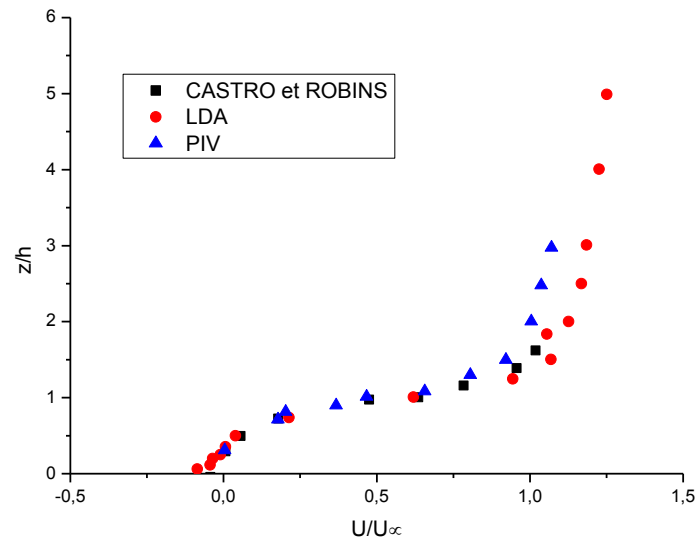


Fig.30. Profils de vitesse moyenne longitudinale en aval du cube

IV.4.4. Conclusion

Dans cette partie nous avons présenté dans un premier temps les caractéristiques générales de l'installation expérimentale, ainsi que les diverses techniques de mesures utilisées dans le cadre de ce travail. Ensuite une simulation physique de la couche de surface atmosphérique a été réalisée. L'anémométrie à fil chaud et l'anémométrie doppler laser (LDA) sont les deux techniques de mesures utilisées. Cette première série d'essai nous a permis de montrer qu'on peut simuler le développement d'une couche limite atmosphérique en équilibre à partir de 7 m par rapport à l'entrée de la veine.

La fin de cette partie a été consacrée à une étude sur l'écoulement autour d'un cube en présence d'une couche limite. Pour cela nous avons utilisé deux techniques expérimentales, les mesures par LDA et par PIV. Cette nouvelle configuration nous a permis de confronter nos résultats issus des mesures LDA et PIV et ceux issus de Castro et Robins (1977).

Nous avons trouvé une correspondance acceptable entre ces différents résultats.

V.1. Introduction

La pollution générée par la circulation automobile au cœur de la ville, par les activités industrielles à sa périphérie et par le chauffage domestique, est un problème important des grandes cites urbaines dans lesquelles nous vivons. Les véhicules émettent beaucoup de particules fines qu'on appelle les suies, qui ont une granulométrie très petite. Les particules pénètrent profondément dans le système respiratoire et causent beaucoup de dégâts. Et quelle que soit la quantité émise, elle est nocive pour l'être humain. Evidemment, le citadin et le montagnard ne sont pas exposés au même danger de pollution. Au centre-ville, où toutes les émissions des automobiles entrent par les fenêtres ouvertes en raison de la chaleur, toute la pollution s'introduit dans les appartements. Mais pour les montagnards la même nature de pollution peut provenir d'autres sources équivalentes ou parfois pires, l'exemple du cas d'étude de notre application. Les répercussions sur le bien-être de leurs habitants sont nombreuses mais, bien au-delà, ce sont ses conséquences sur la santé publique qui deviennent préoccupantes.

Toutes les études tendent à chercher les modes de la réduction de cette pollution. Cela, s'accompagne par la réduction des émissions industrielles et qui passe aussi par la surveillance continue des sources de pollution (sites industriels). Certains font recours au développement de réseaux de surveillance de la qualité de l'air et la mise en place de nombreux capteurs pour informer et prévenir les populations.

Une autre technique de suivi de l'évolution de la pollution atmosphérique s'oriente vers la modélisation. Grâce aux développements des ressources informatiques, cet aspect numérique a pris ces dernières années un poids de plus en plus important dans les systèmes de régulation de la pollution industrielle. La modélisation de la pollution atmosphérique est un problème complexe et pluridisciplinaire. Elle fait appel à la météorologie, à la mécanique des fluides ou à la chimie pour déterminer l'évolution de l'espèce polluante de son point de rejet jusqu'à la zone d'étude, mais aussi à la médecine permettant alors de créer un lien statistique entre la substance étudiée et son impact sur les populations.

La surveillance des sites industriels demandera une prise en compte de structures turbulentes plus petites pour expliquer l'évolution de la concentration autour d'un site. Au final, il est impossible de représenter l'ensemble des échelles à l'intérieur d'un seul modèle. C'est pourquoi une large gamme de modèles a été développée afin de répondre aux différents problèmes de pollution que peuvent connaître les industriels (Florian, 2011). C'est dans ce soucis et à cause des rejets particuliers d'une cimenterie; nous nous sommes intéressés avec

une équipe de biologistes aidés par des données de la direction de la santé de la wilaya, au site particulier de Ain elkbira comme source de pollution industrielle à petites particules pour analyser les effets de cette pollution sur un certain type d'individu "nouveaux née"

V.2.La modélisation

L'objectif de la modélisation de la dispersion atmosphérique est de connaître, en tout point de l'espace et à tous les instants, les concentrations en espèces relâchées. Il convient à ce niveau de distinguer deux types de dispersion atmosphérique :

- Celui qui fait suite à un incident ou un accident.
- Celui issu du fonctionnement normal d'une installation.

En modélisation, ces deux situations sont traitées de manières différentes car elles ne font pas appel aux mêmes types de données, notamment météorologiques. En effet, les rejets de routine sont modélisés à partir de statistiques météorologiques alors que les rejets accidentels sont modélisés à partir de données météorologiques locales observées ou prévues.

Le but de la modélisation est l'estimation de l'impact des polluants dispersés sur les populations. La modélisation permet de mieux comprendre les phénomènes physiques mis en jeu et constitue un outil indispensable pour concevoir les moyens de lutte contre la pollution. La modélisation permet alors la création d'outils assurant le suivi en temps réel des concentrations aux abords des sites mais aussi, en fonction des prévisions météorologiques et des activités du site, ces outils prévisionnels peuvent assurer le pilotage de la production en limitant cette dernière en cas de risque de pollution sur les villes limitrophes (Florian, 2011). Les méthodes de résolutions de la dispersion atmosphérique de polluants à ces échelles sont de deux types :

- d'une part, les méthodes expérimentales (simulation par traceur sur site ou à échelle réduite en laboratoire) ;
- d'autre part, les méthodes numériques.

Les méthodes numériques présentent l'avantage d'être moins lourdes à mettre en œuvre, d'un coût moins élevé, plus rapide et surtout offrant la possibilité d'envisager un grand nombre de situations différentes. Néanmoins, les méthodes expérimentales restent un support indispensable aux méthodes numériques (validation des outils de modélisation, détermination de constantes empiriques, traitement de cas complexes...).

V.2.1. Les modèles proposés

Il existe de nos jours une multitude de modèles, Ces modèles, pouvant se classer en deux catégories :

- Des modèles analytiques simples et rapides d'exécution, mais qui ne permettent pas la prise en compte des complexités géométriques.
- Des modèles plus complexes qui assurent une bonne représentativité de la géométrie des sites étudiés, mais avec des temps de calcul longs et inadaptés à la surveillance de sites.

En tout état de cause, il apparaît qu'il n'existe pas d'outil idéal permettant de traiter tous types de rejets. On s'oriente alors vers une combinaison des différents types de modélisation.

V.2.2. Les différents types de modélisation atmosphérique

- Les modèles gaussiens (Carruthers et al., 1994 ; Adms, 1999), Aria Impact: Ils sont basés sur des solutions analytiques de l'équation d'advection-diffusion.
- Les modèles lagrangiens (*Aria Technologies*), Flexpart, Hysplit, etc) : Ils sont basés sur le calcul des trajectoires turbulentes d'un grand nombre de particules représentant le polluant.
- Les modèles CFD (*Computational Fluid Dynamics*, FLUENT 6.3 (Doc FLUENT 6.3), Star CD, MERCURE (Doc. MERCURE), etc.) : Ils sont basés sur une résolution numérique de l'équation d'advection-diffusion sur un maillage de l'espace.

V.2.3. Les outils de modélisation de la turbulence

En mécanique des fluides, les équations du problème, sont les équations de Navier-Stokes et de part leur non-linéarité, la simulation numérique de la mécanique des fluides, et en particulier de la turbulence, constitue un problème complexe.

Depuis plusieurs décennies de nombreux modèles ont été développés de manière à résoudre ce problème des écoulements turbulents et on se propose dans cette introduction de présenter les différentes approches permettant la résolution des équations de Navier-Stokes.

La Simulation Numérique Directe (Direct Numerical Simulation ou DNS)

Cette méthode est certainement la plus proche d'une résolution exacte (Moser et al., 1999 ; Rodi et Mansour, 1993). La simulation numérique directe (DNS) est qui considérée comme une branche consacrée à la solution haute fidélité des écoulements turbulents. DNS diffère des simulations classiques en ce que la turbulence est explicitement résolu, plutôt que modélisé par une moyenne Reynolds Navier-Stokes (RANS). Elle diffère de la simulation des grandes

échelles (LES) en ce que toutes les échelles, y compris les très plus petits, sont capturés, supprimant la nécessité d'un modèle sous-maille. La DNS peut donc être considérée comme une expérience numérique produisant une série de solutions non-empiriques, à partir des premiers principes, pour un écoulement turbulent virtuel. Sa grande force est la capacité à fournir une connaissance complète, affecté par des approximations, à tous les points dans le flux, en tout temps pendant la période de simulation. La DNS est donc idéal pour aborder les questions de recherche de base concernant la turbulence de la physique et de la modélisation. Cette capacité, toutefois, vient à un prix élevé, ce qui empêche cette technique à être utilisée comme un outil de conception polyvalente.

Les caractéristiques déterminantes de la DNS sont déduites à partir des caractéristiques distinctives de la turbulence. Du moment que la turbulence est intrinsèquement instable et en trois dimensions, la DNS nécessite des calculs dépendant du temps dans un domaine tridimensionnel. Ces deux caractéristiques sont partagées avec les ERP (et donc LES / RANS stratégies hybrides telles que la simulation de Foucault individuelle (DES)). Les deux principaux inconvénients de la DNS - son coût de calcul extrême et sévère ainsi que la limitation du nombre maximum de Reynolds qui peut être considéré. (Gary et al., 2008).

La Simulation des Grandes Echelles (Large Eddy Simulation ou LES)

Cette approche est une méthode de simulation tridimensionnelle permettant d'obtenir une description non stationnaire fine des écoulements turbulents par résolution numérique des équations de Navier-Stokes filtrées. (Deardorff, 1970 ; Redelsperger et Sommeria, 1981). L'approche de la simulation des grandes échelles (LES) a été proposée dès 1963 par Smagorinsky. Dans la LES, les mouvements de grande envergure (grands tourbillons) de l'écoulement turbulent sont calculés directement et uniquement à petite échelle (échelle de sous-grille (SGS)) avec des motions qui sont modélisés, résultant en une réduction significative du coût de calcul par rapport à DNS. La LES est plus précise pour les grands tourbillons qui contiennent la plupart de l'énergie turbulente et qui sont responsables de la majeure partie du transfert de l'élan et le mélange turbulent, La LES traite ces turbulences en détail d'une manière directe. En outre, les petites échelles ont tendance à être plus isotropes et homogènes que les grandes, et leur modélisation devrait être plus facile que la modélisation à grandes échelles au sein d'un modèle unique comme dans l'approche RANS. Par conséquent, la LES est l'outil numérique le plus viable et le plus prometteur pour simuler les écoulements turbulents. Sous l'égide de la LES, d'autres approches peuvent être traitées telles que l'ILES

(implicite LES) ou appelé MILES (Monotone LES intégré), VLES (Very LES) et l'hybride LES approche/RANS. (Yang Z., 2015)

V.2.4. Caractéristiques des différents modèles de dispersion atmosphérique

Il existe de nombreux codes qui permettent le calcul de la dispersion atmosphérique et qui peuvent être utilisés pour la surveillance de sites industriels. Ces outils possèdent des caractéristiques bien spécifiques de manière à être optimum dans le rôle pour lequel ils ont été développés. Différentes approches pour modéliser l'écoulement et la dispersion. L'ensemble des codes de calcul de dispersion atmosphérique repose sur le principe que le polluant est entraîné par un écoulement moyen (vent) auquel s'ajoute un phénomène de dispersion, ce dernier étant la conséquence principale du caractère turbulent de l'atmosphère.

Par conséquent, pour assurer la représentation de ces deux phénomènes, les codes adoptent une première stratégie pour prendre en compte l'écoulement moyen du vent et une seconde pour représenter la dispersion. L'autre aspect pour représenter la dispersion atmosphérique dans son ensemble est de modéliser le champ de vent moyen sur lequel s'appuie la dispersion. (Florian, 2011).

V.2.5. Conclusion

De l'étude des différentes méthodes de modélisation, il apparaît clairement que le phénomène est très complexe. Il n'existe à ce jour aucun modèle parfait pouvant reproduire les conditions réelles avec exactitude. Cela s'explique justement par la nature des conditions météorologiques incertaines ainsi que celles du paysage dont la pollution se produit. Aussi, la nature du polluant lui-même joue un rôle dans l'évolution du phénomène.

Devant cette situation, nous avons jugé utile d'appliquer une technique de l'intelligence artificielle notamment les principes de la logique floue dans l'analyse des effets des polluants d'une cimenterie sur les nouveaux nées dans différentes zones environnantes.

V.3. Présentation générale de la zone d'étude

V.3.1. Présentation de la source de pollution

La société des ciments d'Ain El Kebira est une filiale du groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA).

V.3.2. Localisation de la cimenterie

La cimenterie est située à 320 Km à l'est d'Alger, à 20 Km au Nord - Est du chef-lieu de la wilaya de Sétif, à 7 Km au sud de la daïra d'Ain El Kebira et à l'Est de la commune de Ouled Adouane, dont les coordonnées géographiques sont :36°25'0" N et 5°30'0" E en DMS (degrés, minutes, secondes) ou 36.4167 et 5.5 (en degrés décimaux). La position UTM est GA23 et la référence Joint Operation Graphics est NJ31-16. Couvrant une superficie de 204 hectares. Elle tire ses principales matières premières à partir des gisements de calcaires (djebel Medjounes) et d'argile « marne » de (Theniet Mouloutou) (Fig.31).



Fig.31 : Topographie de la région d'étude (Google earth)

V.3.3. Réseaux hydrographiques

Les oueds se caractérisent par un écoulement irrégulier conséquence des données climatiques et des précipitations, ils sont dans la majorité secs en été et parcouru par des crues violentes et fréquentes pendant la saison pluviale. Parmi les principaux oueds : Oued Ez-zatine avec une altitude de 1100m et Oued Bou-Bellal.

V.4. Climat

Le climat de notre zone d'étude est de type méditerranéen continental semi-aride il s'étale vers le subhumide avec deux saisons : l'une hivernale pluvieuse et froide, l'autre estivale longue, sèche et chaude. Pour illustrer le climat de la zone d'étude nous avons retenu comme référence les données de la station météorologique de la ville de Sétif. Ces données portent sur la période 2000-2010, soit une durée de 10 années.

V.5. Les précipitations

Le sol et le régime hydrique sont directement influencés par les précipitations en particulier pendant la saison pluvieuse. A Ain El Kebira, le régime pluviométrique présente une grande variabilité inter-mensuelle et saisonnière.

V.5.1 Le régime pluviométrique

La pluviométrie est très irrégulière mais relativement importante. Les précipitations annuelles se situent autour de 700mm. Les précipitations mensuelles maximales sont enregistrées en Décembre et Janvier avec une pluviométrie mensuelle d'environ 260mm.

V.5.2. La neige et la gelée

La région de Ain El Kebira est une région montagneuse elle connaît un enneigement régulier pendant l'hiver avec environ 16 jours de neige/ans. Elle est connue aussi par ses gelées assez fréquentes, le mois de Janvier enregistre le plus grand nombre de jours de gelées. La moyenne annuelle est estimée à 47 jours de gelée par an environ.

V.6. La température

Les températures se distinguent par des variations fortes importantes pouvant aller jusqu'à 3,73°C en périodes hivernale et plus de 34°C en été. Les températures les plus basses s'observent durant le mois de Janvier, et les températures les plus élevées se manifestent durant les mois de Juillet, août.

V.7. Le vent

Le vent est l'élément du climat qui accentue les effets de la température par son rôle asséchant en augmentant l'évapotranspiration et intervient dans le transport des poussières des différents polluants. Les vents venant en prédominance du secteur Ouest pouvant être très

froids pendant l'hiver, dès le printemps et pendant l'été, la région subit des vents du sud secs et chauds influençant de manière négative la végétation locale et provoquant une érosion importante.

Aussi le Sirocco est fréquent en été et absent en Novembre jusqu'à Février, il est l'un des types de vent en Algérie, il se caractérise par des températures anormalement élevées et une humidité de l'air très faible (Fig.32).

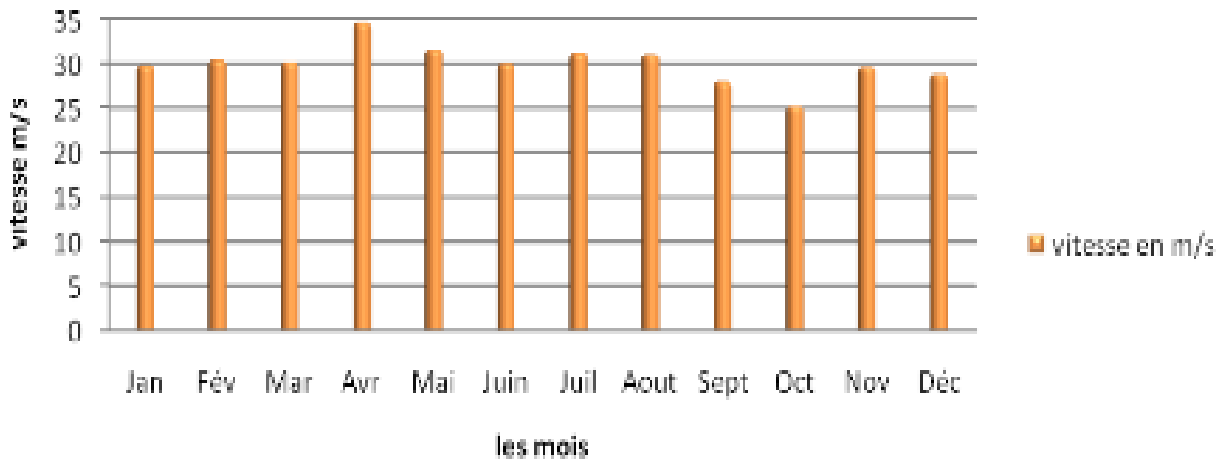


Fig. 32 .Vitesse mensuelle moyenne des vents de Ain El-Kebira (m/s) durant la période 2001-2005

V.8. Fiche signalétique de la cimenterie comme source polluante

Volume de production en 2011

- Ciments : 1 219 000 Tonne ;
- Clinker : 1 022 000 Tonnes ;

Volume de l'emploi :

- 356 agents permanents ;
- 17 agents contractuels.

V.9. Produits fabriqués

La société fabrique actuellement deux types de ciment :

Les Ciments Portland aux Ajouts : CPJ-CEM II/A 42.5 selon la norme NA 442/2000

Le Ciment Résistant aux Sulfates : CRS 400 selon la norme NA 443/2002.

L'exposition maternelle à la pollution de l'air a été liée à la croissance du fœtus dans un certain nombre d'études scientifiques récentes. L'objectif de cette application est d'évaluer

l'association entre l'exposition à la pollution de l'air pendant la grossesse et les mesures anthropométriques à la naissance. Les preuves accumulées indiquent que la santé des enfants est affectée par les niveaux de pollution de l'air.

Au cours des dernières années, un nombre croissant d'études épidémiologiques ont mis l'accent sur l'impact potentiel de l'exposition prénatale à la pollution de l'air. Plusieurs résultats ont été liés à l'exposition à la pollution atmosphérique pendant la grossesse, notamment un faible poids à la naissance, une diminution de la taille à la naissance, et le retard de croissance intra-utérine (Sram, 2005; Lacasana, 2005; Maisonet; 2004; Glinianaia; 2004). La relation entre l'exposition au NO₂ pendant le premier trimestre et le poids à la naissance et la taille et l'exposition au NO₂ pendant le deuxième trimestre ainsi que le périmètre crânien fait apparaître une corrélation évidente. Les résultats de l'analyse indiquent que l'exposition au NO₂ pendant le premier trimestre a été associée à une diminution de la taille à la naissance. Le poids du nouveau-né à la naissance était marginalement associé à l'exposition au NO₂. Également une diminution significative de la circonférence de la tête a été constatée chez les mères porteuses exposées durant toute la période de la grossesse. Ces nouveaux nés présentent le plus souvent un faible poids à la naissance et une petite circonférence de la tête (Barakat, 2002 ; Perera, 1998 ; Perera, 2003). Effet de l'exposition des mères à forte concentration de matières particulaires (au-dessus de la moyenne 36,3 g/m³) de particules fines se traduit par un poids du nouveau-né significativement plus faible que la moyenne (128.3g) et d' longueur (0.9cm) et le périmètre crânien moyen est plus faible (0,3) des nouveau-nés (Jędrychowski, 2004). Des recherches précédentes ont pu prélever une association entre le nombre de polluants atmosphériques et petit poids des naissances gestationnels ainsi que les naissances prématurées (avant 37 semaines) (Parker, 2005 ; Brauer, 2008).

Comme plusieurs facteurs affectent chaque valeur mesurée, aussi le terme de pollution est également relatif, il devient nécessaire d'analyser ces données avec les outils de l'intelligence artificielle particulièrement floue d'inférence logique.

V.10. Application de l'inférence floue

Comme les données qui interviennent dans le processus de la dispersion atmosphérique se trouvent dans un environnement incertain vu leur complexité, il devient nécessaire de disposer d'une méthodologie adaptée pour l'analyse de ces variables. Les principes de base de la logique floue qui se trouvent parfaitement adaptés à ce processus. Pour

cela, des notions de base de la logique floue sont présentés dans le souci de cerner cette technique d'analyse dans le domaine de l'intelligence artificielle.

V.10.1. Notions fondamentales

Nous avons jugé utile de donner un aperçu global sur certaines notions fondamentales de la logique floue. On ne retiendra que les éléments indispensables à la compréhension du principe de prévention par la logique floue. Ces éléments sont les variables floues et les règles d'inférences. L'utilisation d'un modèle à logique floue, démontre sa capacité de résolution des problèmes dont les données se trouvent dans un environnement incertain. Une base de données est construite à partir des valeurs réelles enregistrées en termes poids à la naissance, la taille à la naissance et le périmètre crânien des nouveau-nés à des distances différentes et à différentes directions de la source de pollution, la vitesse du vent, et des mois au cours des dix dernières en relation avec le nombre de cas est considéré comme une variable de sortie. Il est nécessaire de convertir ces grandeurs en variables floues. Pour ce faire on définit les deux notions:

- Les fonctions d'appartenances qui permettent de définir le degré de vérité de la variable floue en fonction de la grandeur d'entrée
- Les intervalles flous qui déterminent le nombre de variables floues

Ces paramètres sont traduits en fonctions d'appartenance. Il s'agit là d'établir une relation entre le degré de vérité de la variable floue et la grandeur d'entrée correspondante. Des intervalles flous sont définis en nombre de variables floues associées à une grandeur d'entrée. Dans le cas de notre analyse, des intervalles sont définies selon la variable traitée. De façon générale elles sont représentées en symboles. Le traitement des données s'opère suivant des règles permettant de relier les variables floues d'entrée aux variables floues de sortie à l'aide d'opérateur. Ces règles d'inférences font appel à l'opérateur «**ET**», qui s'applique aux variables floues. La variable floue de sortie doit être convertie en une grandeur de mesure afin d'être appliquée au système d'analyse comme étape de défuzzification. Il s'agit là de convertir cette information en une grandeur physique de lecture.

V.10.2. Modélisation par logique floue

Dans le cadre de la logique classique, une proposition est soit vraie, soit fausse, soit inconnue ou indéterminée par rapport à une théorie, Mais le raisonnement humain s'appuie fréquemment sur des connaissances et des données inexacts, incertaines ou bien imprécises.

D'ailleurs, le progrès continu dans tous les domaines de notre vie est accompagné par une complexité croissante, des applications de plus en plus complexes et des systèmes de plus en plus sophistiqués nous obligent à chercher des théories capables de traiter ces complexités. Cet environnement a précipité le besoin de traiter de propositions plus générales et de recueillir des données toujours plus loin d'être précises et définitives à cent pour cent. Dans notre cas d'étude, les sources d'information (poids à la naissance, la taille à la naissance et le périmètre crânien des nouveau-nés à des distances différentes et à différentes directions de la source de pollution, la vitesse du vent, et des mois au cours des dix dernières années ainsi que le nombre de cas) sont considérés comme une sortie et ne sont pas totalement fiables. Plusieurs facteurs physiologiques liés à la mère, au fœtus, aux conditions météorologiques et à la composition de l'air pollué interviennent dans le processus et leurs effets sont souvent ignorés (et donc introduisent de l'incertitude) et par leur nature, sont générateurs d'imprécision. L'application de la théorie de la logique floue devient alors un besoin (Sram, 2005).

Contrairement aux variables binaires qui sont définies par les deux états «vrai» ou «faux», les variables floues présentent toute une gradation entre la valeur «vrai» et la valeur «faux». Si l'on désire classer le nombre d'individus par exemple, en définissant (0 à 5) comme nombre faible, et (de 5 à 10) un nombre moyen. La logique binaire donne la représentation de la figure (Fig.33) pour les deux variables «faible», «moyen»

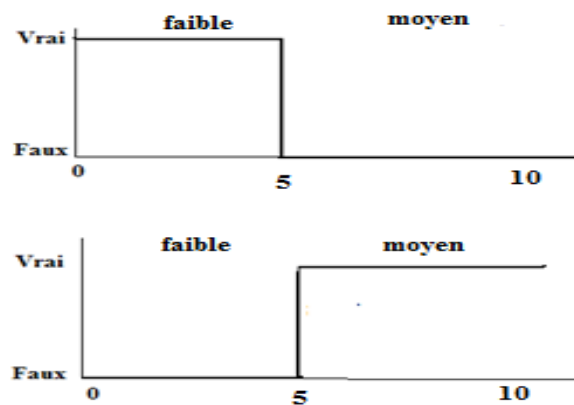


Fig. 33 : Représentation des variables suivant la logique binaire

Cette fonction peut être défini par :

$$\text{singleton}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = x_0 \\ 0 & \text{si } x \neq x_0 \end{cases}$$

Deux remarques s'imposent au sujet de cette représentation :

D'une part, on préfère représenter l'état de la variable à l'aide de son degré de vérité en associant la valeur 1 (degré de vérité de 100%) à la valeur «vrai» et le degré de vérité nul à la valeur «faux». D'autre part, on constate que cette façon de faire est très éloignée de ce que fait l'être humain lorsqu'il résout ce genre de problème. En effet, l'homme ne fait pas naturellement une distinction franche entre «faible» et «moyen» par exemple. Il utilise des expressions du genre «plutôt faible» pour qualifier une grande appartenance à faible, et «plutôt moyen» pour exprimer un rapprochement à la variable moyenne.

En conclusion, la logique binaire présente l'avantage de la simplicité mais est assez éloignée de la logique utilisée naturellement par l'être humain.

Si l'on représente le même problème à l'aide de la logique floue, les variables ne sont plus binaires mais présentent une infinité de valeurs possible entre le «faible» et le «moyen» figure (Fig. 34).

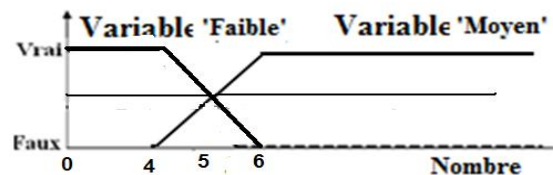


Fig. 34: Représentation des variables suivant la logique floue

On constate que cette représentation est beaucoup plus proche de la façon dont l'être humain raisonne puisqu'elle permet de faire intervenir des notions telles que «plutôt faible», «assez moyen»... Cet avantage se fait, évidemment, au détriment de la simplicité de la représentation. La logique floue présente alors un concept naturel pour la résolution des problèmes dont la source est caractérisée par l'imprécision et l'incertitude en l'absence même des formes définies et en présence des variables aléatoires (Bouharati, 2008).

Inférence floue

L'approche floue est un sous domaine des systèmes intelligents utilisés largement dans la solution de différents problèmes d'applications médicales, biologiques et environnementaux.

La logique floue utilise des informations sous forme de variables linguistique à partir de l'expertise humaine. Cette propriété lui confère son aptitude à résoudre différents problèmes liés à l'environnement où les données se caractérisent par leur complexité. L'approche floue concerne les cas où les variables linguistiques incertaines jouent le rôle du contrôle du mécanisme du système (Lacasana, 2005). Le système à inférence floue est un outil puissant dans la simulation du comportement des phénomènes non linéaires (Maisonet,

2004). Dans cette étude, nous élaborons un algorithme à règles communes associées à un vecteur d'observation.

$a = (a(1), a(2), \dots, a(n))$

avec (a) test, nous attribuons par la suite une forme générale du $K^{\text{ième}}$ règle dans le système.

($k = 1, 2, \dots, K$):

SI $a(1)$ est A_{1k} ET ...ET $a(n)$ est A_{nk} ALORS b est B_k

Où A_{ik} , sont des états flous (les fonctions d'appartenance sont désignées par $(\mu_{A_{i,k}})$ qui correspondent à la nature particulière de l'observation. (Pour des raisons de simplification, nous choisissons des fonctions triangulaires). La particularité des décisions algorithmiques utilisées dans l'analyse des facteurs intervenant dans le processus de pollution atmosphérique c'est qu'elles ont la possibilité d'inférer des procédures à partir des règles enregistrées sur terrain. Dans une déduction formelle, le syllogisme :

$Q_1 A$'s sont B 's ET $Q_2 (A \& B)$'s sont C 's ALORS $Q_1 Q_2 A$'s sont $(B \& C)$'s.

Exemple : Nombre élevé, (Précision) donne une grande probabilité de grand effet de pollution

Règles d'inférence

Une implication floue entre deux propositions élémentaires est une relation R entre les deux ensembles U_1 et U_2 , quantifiant le degré de vérité de la proposition :

$$si (x \text{ est } A) \text{ alors } (y \text{ est } B)$$

Où, A et B sont des sous-ensembles de U_1 et U_2 respectivement. En logique floue, il existe plusieurs manières pour générer les implications floues, les plus souvent utilisées sont celles de Mamdani. Les règles d'inférence sont l'ensemble des différentes règles reliant les variables floues d'entrée d'un système aux variables floues de sortie de ce système. Elles doivent être définies par l'expert à partir des résultats enregistrés sur terrains. Ces règles se présentent sous la forme :

SI condition 1 **ET/OU** condition 2 (**ET**)... **ALORS** action sur les sorties

Combinaison des règles

L'ensemble des règles se présente sous la forme d'une énumération du type :

SI condition 1 **ET** condition 2 (**ET**)... **ALORS** action sur les sorties

SI condition 3 **ET** condition 4 (**ET**)... **ALORS** action sur les sorties

SI condition 5 **ET** condition 6 (**ET**)... **ALORS** action sur les sorties

...

Ces règles permettent de relier les variables floues d'entrée aux variables floues de sortie à l'aide de différents opérateurs. Dans notre système d'étude, on peut citer l'exemple :

Lorsque l'on désire savoir quel nombre de nouveau-nés affectés par la pollution atmosphérique, un des problèmes qui se présente est de savoir si ce nombre est caractérisé par un poids faible à la naissance, par le périmètre crânien anormalement développé, ... ou par autres anomalies reliées à la pollution.

Raisonnement par inférence composée

Contrairement au raisonnement monotone, le raisonnement par inférence floue permet de raisonner à l'aide de plusieurs règles composées, et des variables linguistiques expliquant les états des systèmes, nous pouvons raisonner et évaluer les résultats. En effet toutes les règles floues sont évaluées en parallèle. Pour effectuer ce type de raisonnement, on utilise «la méthode du Min-Max» (Glinianaia, 2004).

La méthode d'inférence Mini-Max

La méthode Min-Max se décompose en deux étapes : pour chaque règle appliquée, le minimum de degré d'appartenance est retenu dans le résultat. Par contre, si plusieurs règles donnent un même résultat, le maximum de ces résultats est retenu (Ballester, 2010). Ces opérations sont expliquées par :

$$mrésultat = \text{Min} (mx_1, mx_2)$$

$$mrésultat\ finale = \text{Max} (mrésultat_1, mrésultat_2, \dots mrésultat_n) \text{ figure (Fig.35).}$$

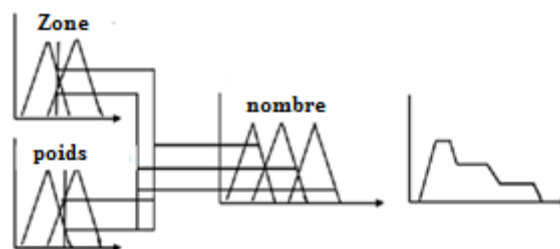


Fig.35 : Illustration des raisonnements par mini-max

L'opérateur choisi dans notre cas d'étude est l'opérateur [ET] réalisé par le calcul du minimum et représente l'intersection :

$$A \cap B = \{x / x \in A \wedge x \in B\}$$

Représenté par la fonction :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

V.11. Application au cas d'étude

L'analyse des données de départ a consisté au traitement des données relatives à l'effet de cette pollution sur les nouveaux nés de la région suivant différentes direction de la source. Les variables d'entrée sont les poids, les tailles et les circonférences de la boîte crânienne sur différentes années. Comme variable de sortie on considère le nombre de cas enregistré dans chaque région (Tableau4).

La structure du schéma bloc de notre système d'analyse figure (Fig.36) se compose de cinq entrées floues, Deux parties principales constituent la base des données qui renferme les données spécifiques des fonctions d'appartenances des variables d'entrée et une sorties. Quant à la base des règles elle renferme les règles qui permettent de définir la relation entre les prémisses et la conséquence en fonction des variables floues résultants de la fuzzification (Barakat, 2002).

Tableau 4. Nombre des nouveaux nés en fonction des zones géographiques et des paramètres anatomiques

Area			2000-2003	2004-2006	2008-2010
Ain Touilla	Poids (kg)	<3	56	35	24
		>3	117	38	104
	Taille (Cm)	<50	73	42	21
		>50	88	50	102
	Circonférence crânienne (Cm)	<35	82	51	72
		>35	72	41	51
El khareba	Poids (kg)	<3	41	27	25
		>3	89	141	69
	Taille (Cm)	<50	59	57	36
		>50	70	94	56
	Circonférence crânienne (Cm)	<35	45	76	55
		>35	75	77	36
OuledAdouene	Poids (kg)	<3	3	12	4
		>3	17	25	9
	Taille (Cm)	<50	12	13	2
		>50	8	17	9
	Circonférence crânienne (Cm)	<35	11	14	4
		>35	9	16	7
Ain Arnat	Poids (kg)	<3	11	9	8
		>3	91	87	96
	Taille (Cm)	<50	54	9	65
		>50	41	43	39
	Circonférence crânienne (Cm)	<35	31	32	35
		>35	73	70	71

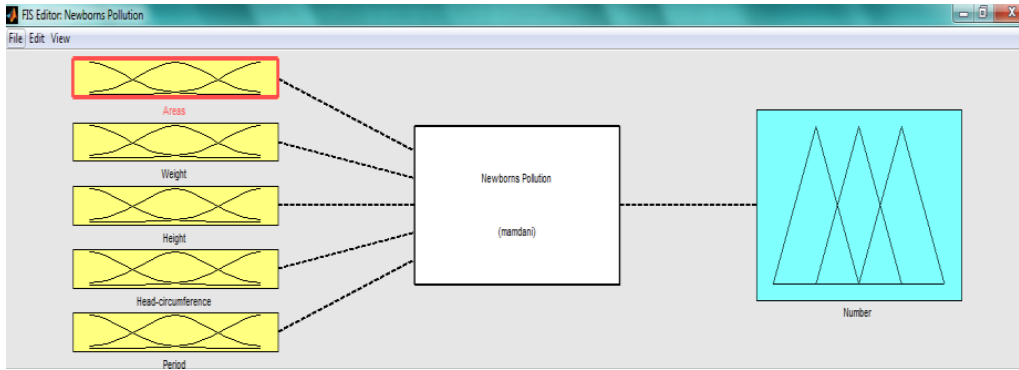


Fig.36. Structure du système flou avec cinq entrées et deux sorties

Fuzzyfication de la variable d'entrée « Zone géographique »

On choisit quatre intervalles flous et des fonctions d'appartenance de type triangulaire en les définissant comme suite : figure (Fig.37).

$$\text{Zone} \left\{ \begin{array}{l} \text{Ain Touila } (0 < AT \leq 3) \\ \text{El Khereba } (2 \leq EK \leq 5) \\ \text{Ouled Adouene } (4 \leq OA \leq 7) \\ \text{Ain Arnat } (6 \leq AR \leq 9) \end{array} \right\}$$

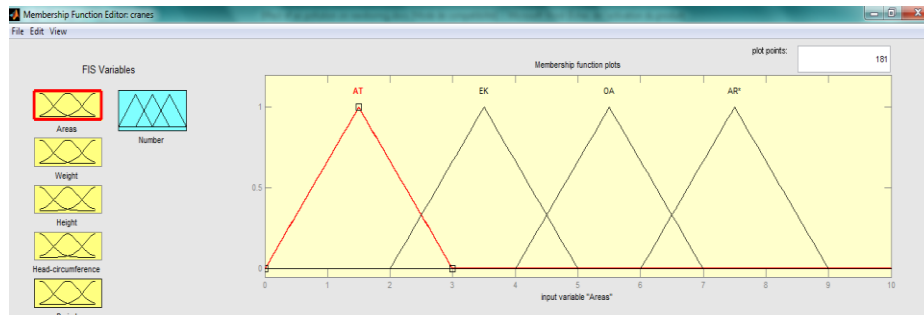


Fig.37: Fuzzyfication de la variable 'Zone géographique' en quatre intervalles flous

Fuzzyfication de la variable d'entrée « Poids »

On choisit trois intervalles flous et des fonctions d'appartenance de type triangulaire en les définissant comme suite: figure (Fig.38).

$$\text{Poids} \left\{ \begin{array}{l} \text{light } (0 < AT \leq 3) \\ \text{Medium } (2 \leq EK \leq 5) \\ \text{Heavy } (4 \leq OA \leq 7) \end{array} \right\}$$

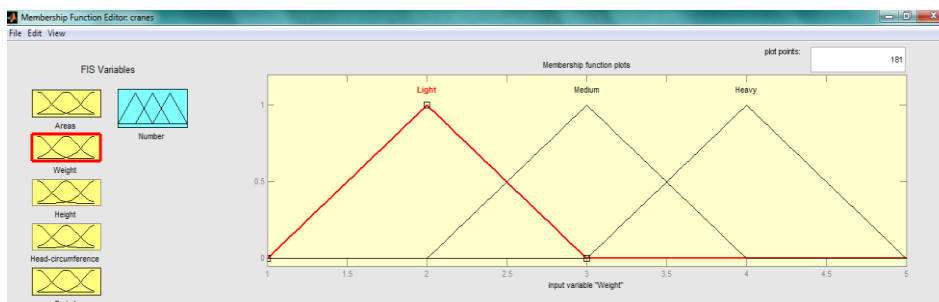


Fig. 38 : Fuzzyfication de la variable 'Poids' en trois intervalles flous

Fuzzyfication de la variable d'entrée « Taille »

On choisit trois intervalles flous et des fonctions d'appartenance de type triangulaire en les définissant comme suite: figure (Fig.39).

$$\text{Taille} \left\{ \begin{array}{l} \text{small } (30 < w \leq 50) \\ \text{Medium } (40 \leq w \leq 60) \\ \text{Great } (50 \leq w \leq 70) \end{array} \right\}$$

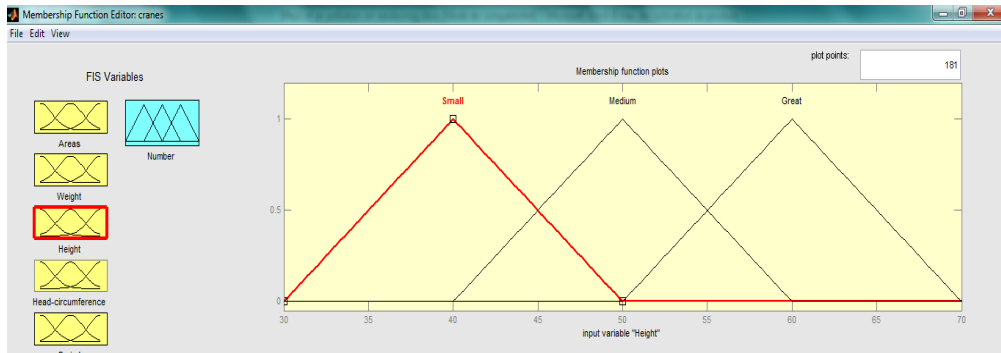


Fig.39: Fuzzyfication de la variable ‘Taille’ en trois intervalles flous

Fuzzyfication de la variable d'entrée « Circonférence du crâne »

On choisit trois intervalles flous et des fonctions d'appartenance de type triangulaire en les définissant comme suite: figure (Fig.40).

$$\text{Périmètre crânien (cm)} \left\{ \begin{array}{l} \text{small } (25 < w \leq 40) \\ \text{Medium } (30 \leq w \leq 45) \\ \text{Great } (35 \leq w \leq 50) \end{array} \right\}$$

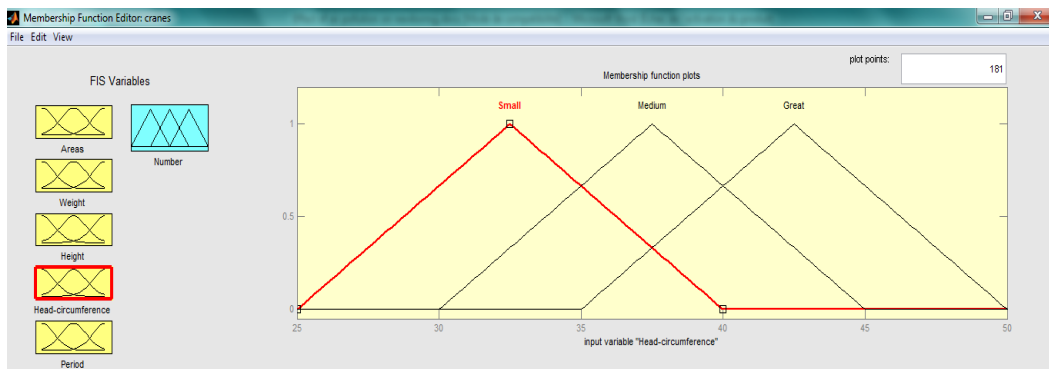


Fig. 40: Fuzzyfication de la variable ‘Périmètre crânien’ en trois intervalles flous

Fuzzyfication de la variable d'entrée « Période »

On choisit trois intervalles flous et des fonctions d'appartenance de type triangulaire en les définissant comme suite: figure (Fig.41).

$$\text{Période (Années)} \left\{ \begin{array}{l} \text{Period 1 } (2000 < P1 \leq 2004) \\ \text{Period 2 } (2003 \leq P2 \leq 2007) \\ \text{Period 3 } (2006 \leq P3 \leq 2010) \end{array} \right\}$$

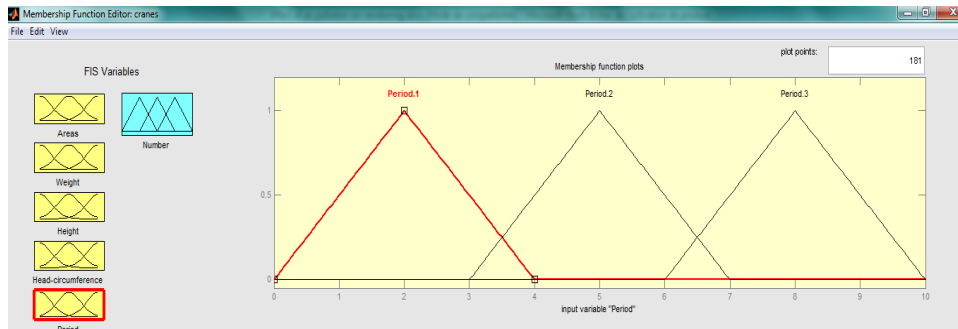


Fig.41 : Fuzzyfication de la variable ‘Période’ en trois intervalles flous

Variables de sortie

Comme variables de sortie, nous définissons le nombre des nouveaux nés présentant des affections liées à la pollution atmosphérique: figure (Fig.42).

$$\text{Nombre} \left\{ \begin{array}{l} \text{Small } (0 < S \leq 40) \\ \text{Medium } (30 \leq M \leq 80) \\ \text{Big } (70 \leq B \leq 110) \end{array} \right\}$$

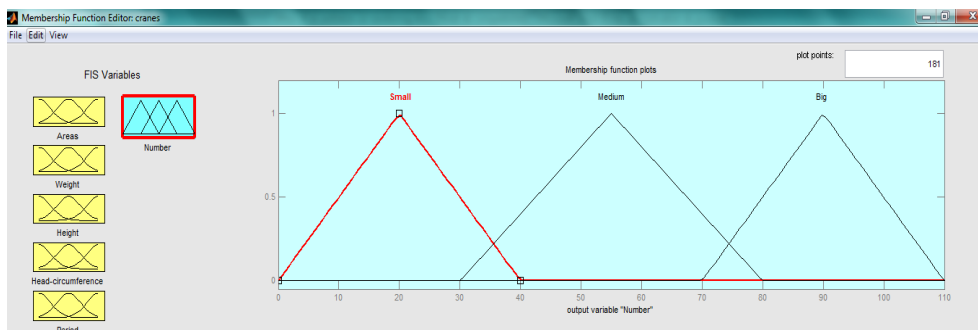


Fig.42: Fuzzyfication de la variable ‘Nombre en trois intervalles flous

Moteur d'inférence

Le moteur d'inférence comprend l'opérateur **ET**. En fait, cet opérateur sélectionne la valeur minimale d'entrée pour la sortie. Ce moteur d'inférence traite cinq variables d'entrées floues pour inférer sur la valeur de sortie comme résultat en fonction de la composition min-max. selon le tableau 4. Des règles floues sont établies. Selon les résultats de la fuzzyfication des variables d'entrée et de sortie, les règles doivent inclure toutes les combinaisons possibles. Comme toutes les variables sont indépendantes les unes des autres, par conséquent, toutes les variables peuvent se trouver dans l'une des régions et comme les variables d'entrée sont indépendantes, alors toutes les combinaisons doivent figurer. Chaque variable d'entrée comporte une inférence particulière sur la sortie.

Résultat

Une fois le système établi, cela permet d'affecter aléatoirement des variables à l'entrée pour identifier automatiquement et instantanément à la sortie l'espèce et la variété correspondante.

Hypothèse : Le nombre est 4 et la longueur du rameau principal est 17,5 et LFL est 4,36 et NFE est 49,1 et NFR est 78,2, alors cela correspond à la variété 3 et à l'espèce 2. figure (Fig.43).

Ces valeurs sont portées à titre d'exemple le système proposé accepte toutes les combinaisons possibles.

Defuzzifier

Notre système possède une seule sortie qui exprime le nombre de nouveaux nés affectés par la pollution. La valeur discrète exprimant ce nombre est obtenue par défuzzification. Dans notre cas, celle-ci est calculée par la méthode du centre de gravité. Mathématiquement elle est donnée par : $(\sum Si.Ri | \sum Ri)$

V.12. Résultats et discussion

Le système calculant l'effet de la pollution atmosphérique sur les nouveau-nés est basé sur un modèle de logique floue. Le résultat est obtenu à partir des mesures des différents paramètres d'entrée tels que le poids, la hauteur et le périmètre crânien des nouveau-nés en correspondance avec la source de pollution à différentes périodes avant et après l'installation du filtre de la cimenterie. Ce système se compose de cinq variables d'entrée. La base de règles de ce système est utilisée pour déterminer le nombre de cas concernés comme variable de sortie. Cinq fuzzyfiers et un defuzzyfier sont utilisées dans ce système. Une simulation par MATLAB10 est utilisée par l'application des règles.

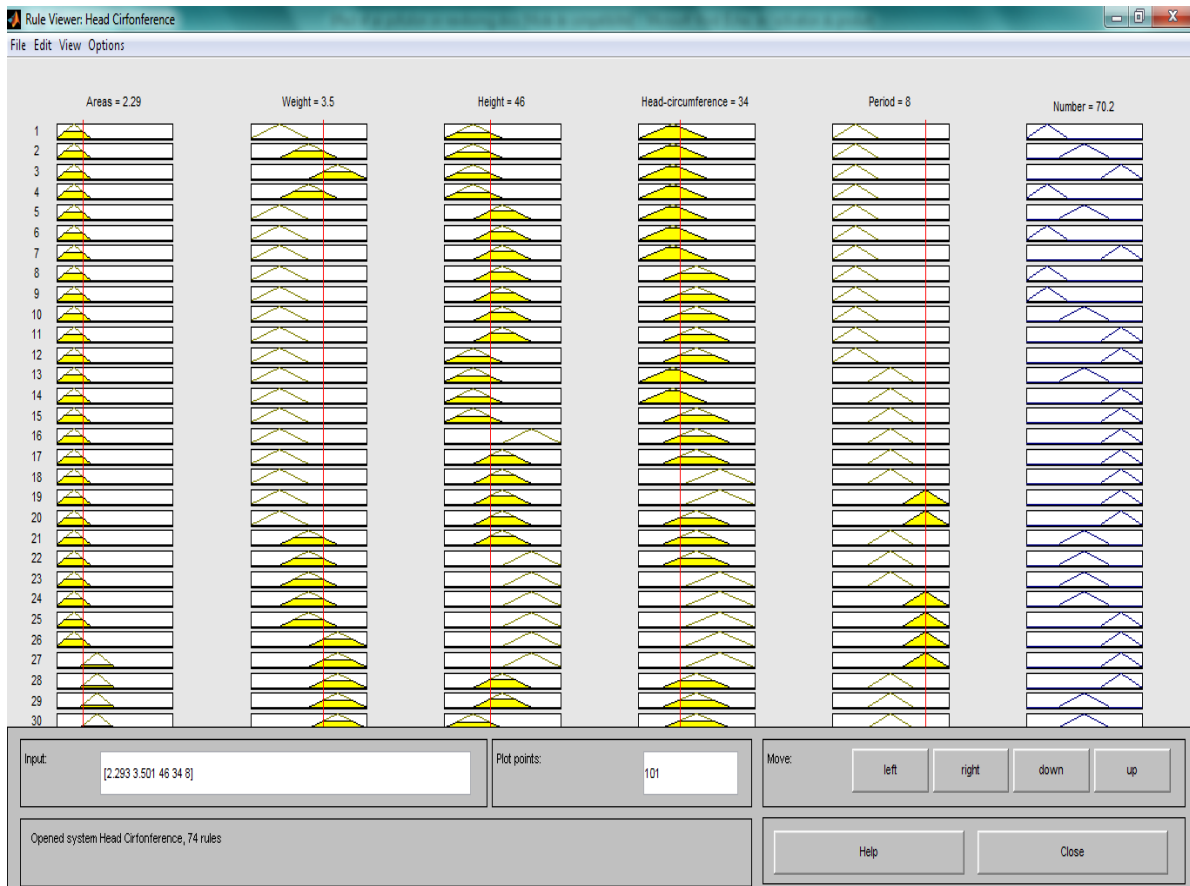


Fig. 43 : Exemple d'application

Une représentation de l'application du résultat démontre la relation entre les cinq entrées et la sortie figure (Fig.44). Le nombre des nouveau-nés est fonction des valeurs fixées à l'entrée. Le système est conçu peut être extensible aux autres éventuelles entrées qui ne sont pas prise en considération dans cette étude pour plus de précision. Comme les entrées sont les zones, les périodes, les poids, les tailles et les périmètres crâniens des nouveau-nés comme entrées, de même, nous pouvons définir d'autres variables pour agir sur la valeur de la sortie. Ce travail peut être envisagé dans une étude future en utilisant les réseaux de neurones artificiels dans un premier temps, pour envisager ultérieurement l'application d'un système hybride (neuro-flou).

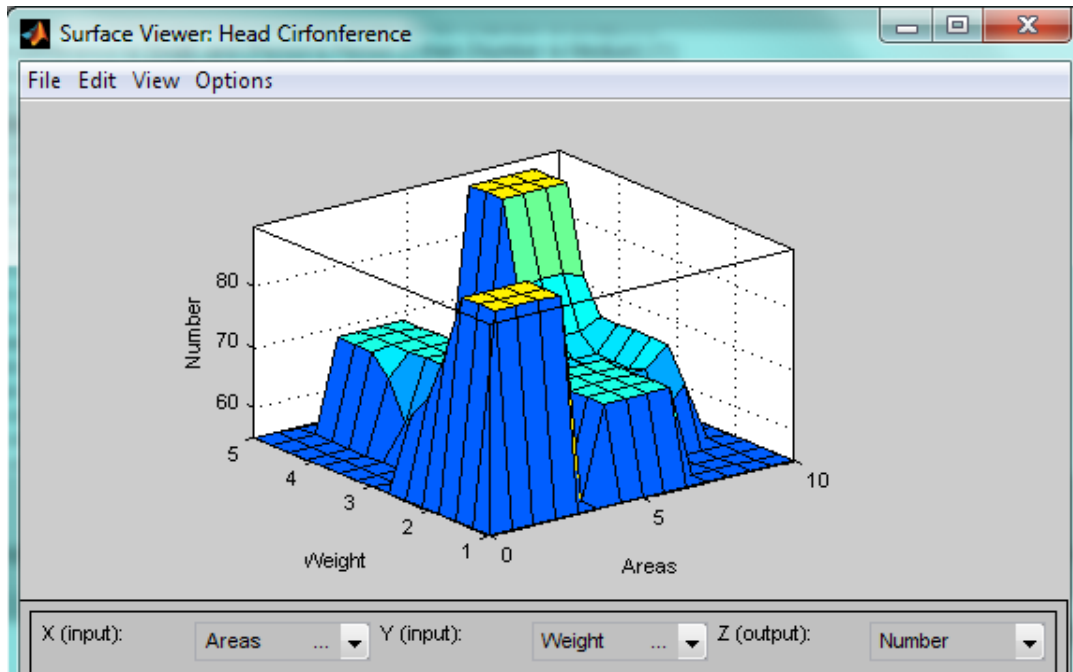


Fig. 44 : Résultat en fonction de deux paramètres d'entrée

Un des problèmes de modélisation de la qualité de la pollution atmosphérique est l'imprécision dans les valeurs caractérisant la source des polluants naturellement aléatoire dans l'espace et dans le temps. Dans cette étude, nous avons utilisé différentes zones à différentes directions de la source de pollution. Les données ont été analysées par la technique de modélisation de la logique floue dans le but de prédire l'effet et le niveau de. Avec la modélisation floue, on peut représenter des données imprécises et obtenir une sortie précise non floue. D'après les résultats obtenus par cette étude, il nous semble que cet outil est parfaitement applicable et adéquat pour l'analyse de la pollution de l'air. Une profonde analyse de la composition chimique des polluants permet également d'élaborer un système analogue en vue de l'identification de cette pollution ainsi que son seuil qui ne doit pas dépasser théoriquement 10 mg/m^3 dans le cas de la cimenterie d'Ain El-Kebira. Rappelant que la norme internationale dans ce domaine est de 150 mg/m^3 . Cela permet l'élaboration système d'alerte précoce concernant la qualité de l'air.

Le résultat de l'algorithme flou est exprimé par des termes numériques et symboliques de cette pollution.

Au cours de ce travail, nous avons discuté de plusieurs aspects concernant la dispersion des polluants dans l'atmosphère. D'une part, nous avons parlé du problème de pollution atmosphérique. Celui-ci est dû aux différents types de polluants émis des sources naturelles et anthropiques ayant des effets néfastes sur l'être humain et son environnement.

Pour contrer ces problèmes plusieurs organisations ont imposé des contrôles et des normes standards, mais plusieurs de ces problèmes subsistent encore.

D'autre part, nous avons constaté que la dispersion est régie par les différents systèmes météorologiques couvrant tout le spectre des échelles de grandeurs. Nous sommes parvenus à conclure que les phénomènes se produisant dans la couche limite planétaire sont les plus importants et les plus impliquées dans la dispersion des polluants en atmosphère. Donc, l'étude de la couche limite atmosphérique est primordiale.

Les mesures in situ sont très difficiles voire quasi impossible à cause du phénomène aléatoire de la turbulence d'une part et de la variation continue de la direction du vent d'autre part. Une simulation physique de couche de surface en soufflerie s'impose ainsi.

Une première partie de cette étude est consacrée à l'aspect théorique des écoulements dans une couche limite atmosphérique. Une bibliographie détaillée relative est présentée.

Une deuxième partie traite des simulations de la couche limite en soufflerie, ou une simulation physique de la couche de surface atmosphérique a été réalisée dans la soufflerie de diffusion de l'Ecole Centrale de Lyon.

Les champs de vitesse moyenne et fluctuante longitudinaux et transversaux sont obtenus dans une première phase en utilisant l'anémométrie à fils chauds, la sonde utilisée est une sonde à deux fils croisés qui permet la mesure simultanée de deux composantes de vitesse longitudinale et transversale, il suffit de la pivoter autour de son axe d'un angle $\pi/4$ pour avoir accès à la composante de vitesse longitudinale et verticale. Dans une seconde phase, une métrologie optique LDA tridimensionnelle a aussi été utilisée pour la mesure à la fois des trois composantes de la vitesse.

La rugosité du sol est obtenue en utilisant des écrous de 6mm de hauteur semés éparpillés aléatoirement le long de la veine sur son plancher. De plus cette rugosité a pour effet de stabiliser d'avantage la couche limite turbulent.

Le champ de concentration est obtenu à l'aide de la FID, détecteur à ionisation de flamme.

L'évolution de la vitesse moyenne montre le développement de la couche le long de l'axe longitudinal de la veine (toutes les distances sont exprimées à partir de la grille de turbulence). On remarque que la valeur de la vitesse infinie décroît avec la distance (de l'ordre

de 2% par rapport à la vitesse infinie moyenne le long de la veine), ceci est dû à la présence d'un léger gradient longitudinal de pression (de l'ordre de 0.3 Pa/m).

Les figures présentant l'évolution des profils d'intensité de turbulence horizontale et verticale montrent que les deux profils à 6 et 7 m de l'intensité turbulente longitudinale présentent un excès d'énergie dans la partie basse de la couche, il en est de même pour les deux premiers profils d'intensité turbulente verticale, ce qui signifie que la couche limite n'est pas encore en équilibre pour ces deux positions dans la veine. Par contre la suite de l'évolution de la couche (au-delà de 7 m), reste en équilibre, ce qui est particulièrement important sachant que les modèles physiques seront placés après cette distance. On peut observer le même phénomène sur l'évolution du profil vertical de corrélation - ($u w$).

Les différents profils de corrélation que nous avons mesurés montrent que, dans notre cas, ce rapport vaut approximativement 0.19. Cette valeur plus faible est sûrement due au fait que nous développons une couche limite turbulente sur une paroi rugueuse et non lisse comme dans le cas d'Arnal et al. (1976) ou de Klebanoff (1954). De même le coefficient de corrélation est à peu près constant sur toute la hauteur de la couche et vaut 0.36. La valeur suggérée par Arnal et al. (1976), pour une couche lisse est plus proche de 0.45.

Concernant la comparaison des mesures par LDA et deux cas de fils chauds (avec et sans blocage). La présence du chariot de mesure à l'intérieur de la soufflerie induit à un certain blocage de l'écoulement, se qui aide à accélérer la couche limite en partie basse.

On a remarqué que l'intensité de turbulence sans blocage est plus forte en partie basse et est légèrement plus faible en partie haute de la couche. Donc on peut conclure que les deux techniques de mesure (fils chauds avec blocage et le LDA) sont fiables, la couche limite a les mêmes caractéristiques moyennes et turbulentes.

Une troisième partie est consacrée à une étude sur l'écoulement autour d'un cube en présence d'une couche limite. Pour cela nous avons utilisé deux techniques expérimentales, les mesures par LDA et par PIV. On a analysé le comportement de la couche limite en présence d'un cube de 80 mm de côté. Les mesures ont été effectuées à l'aide du système LDA décrit précédemment dans une configuration tridimensionnelle. Pour cette expérience, deux types de profils ont été mesurés. Une première série dans la direction transversale (y) à l'écoulement à une hauteur fixe de 40 mm ($h/2$) ; la deuxième série de profils verticaux, pris sur l'axe de l'écoulement ($y = 0$), axe de symétrie du cube.

L'évolution du profil transversal de vitesse moyenne longitudinale en amont du cube, montre que la vitesse diminue en s'approchant de l'obstacle. Donc on peut conclure que l'obstacle ralentit l'écoulement.

Le profil vertical à $x/h = -1/2$ montre que la vitesse est proche de zéro et on peut donc supposer qu'au-delà de ce point la vitesse est négative, ce qui confirme la présence d'un écoulement tourbillonnaire près du sol.

L'évolution du profil transversal de vitesse moyenne longitudinale en aval du cube, montre la zone de recirculation à $x/h = 3/2$ avec un écoulement moyen négatif.

A la fin de cette troisième partie, trois types de mesures ont été confrontés : celles de CASTRO et ROBINS (1977), celles faites dans la soufflerie à l'aide du système PIV et celles faites à l'aide du LDA. Nous avons trouvé une correspondance acceptable en ces différents résultats.

Vu la complexité de la dispersion atmosphérique des polluants, sa modélisation s'avère très difficile. Englober toutes les variables qui interviennent dans le processus dans une équation différentielle par exemple relève parfois de l'impossibilité. Une quatrième partie de cette étude est consacrée à l'analyse des paramètres relatifs à l'effet des polluants sur les nouveaux nés dans différentes zones et à différentes directions de la source de pollution relèvent de l'imprécis, ajouter à cela, les effets des variations des vents en intensité et en direction, les variations de température...etc. Tout cela se caractérise par la complexité et l'incertitude. La modélisation floue de nos résultats obtenus se trouve parfaitement adéquate, car les principes de la logique floue traitent des données dans un environnement incertain et imprécis. Ce mode de traitement des données nous a permis d'extraire de l'imprécis une sortie précise non floue. D'après les résultats obtenus par cette étude, il nous semble que cet outil est parfaitement applicable et adéquat pour l'analyse de l'impact de cette pollution. Le système proposé offre également l'avantage de rester extensible aux autres facteurs qui interviennent et qui ne sont pas pris en charge dans cette étude. En incluant d'autres données relatives aux conséquences sur la santé publique, cela permet l'élaboration d'un système d'alerte précoce préventif des effets de la pollution atmosphérique.

Pour ce qui est des modèles de dispersion, on notera que les essais de terrain et ceux à l'échelle réduite sont très coûteux et nécessitent énormément de moyens financiers et humains. Mais ils restent les plus réalistes, et ils servent comme repères pour les modèles numériques.

Finalement le problème de la pollution de l'air est un problème multidisciplinaire qui requiert l'effort des chercheurs scientifiques, d'ingénieurs, de médecins, d'agences de protection environnementale et des politiciens.

Références bibliographiques

ADEME : <http://www2.ademe.fr/>

ADMS 3 User Guide, CERC Limited, 3 King's Parade, Cambridge, England CB2 1SJ. 1999.

Adrian R.J. Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow: speckle velocimetry vs particle image velocimetry. *Appl. Optics*, 1984, **23**:1690-1.

Arnal D., Cousteix J. and Michel R. Couche limite se développant avec gradient de pression positif dans un écoulement turbulent. *La Rech. Aérop.* 1976, 1976-1.

Arya S. P. S. and Shipman M. S. An experimental investigation of flow and diffusion in the disturbed boundary layer over a ridge-I. Mean flow and turbulence structure. *Atmosph. Envir.*, 1981, **15**: 1173-84.

Arya S. P. S. Shipman M. S. and Courtney L. Y. An experimental investigation of flow and diffusion in the disturbed boundary layer over a ridge-II. Diffusion from a continuous point source. *Atmosph. Envir.*, 1981, **15**:1185-94.

Ayrault M. and Simoëns S. Turbulent concentration determination in gas flow using multiple CCD cameras. *J. Flow Visual. Im. Proces.* 1995, **2**: 195-208.

Ayrault, M., Simoëns, S. and Méjean, P. Negative buoyancy effects on the dispersion of continuous gas plumes downwind solid obstacles. *J. Hazardous materials* 1998 **57**, 79-103.

Ball F. K., Control of inversion height by surface heating. *Quart. J. Roy. Soc.*, 1960, **86** : 483-94.

Ballester F., Estarlich M., Iñiguez C., Llop S., Ramón R., Esplugues A., Lacasaña M. et Rebagliato M. Environmental Health. <http://www.ehjournal.net/content/9/1/6>. 2010, **9**:6

Barakat A.O. PAHs and petroleum biomarkers in the atmospheric environment of Alexandria City, Egypt. *Water Air Soil Pollut.* 2002, **139**: 289–310.

Bouharati S., Benmahammed K., Harzallah D. and El-Assaf Y.M. Application of artificial neuro-fuzzy logic inference system for predicting the microbiological pollution in fresh water. *J. Appl. Sci.* 2008, **8**(2): 309-15.

Bournot P, Caminat P. Mahjoub N., and Stefani J. Experimental study of the plume emitted by a smokestack. Proceeding of PSFVIP.4 June 3-5, 2003 Chamonix, France.

Brauer M, Lencar C, Tamburic L, Koehoorn M, Demers P, and Karr C. A cohort study of traffic related air pollution impacts on birth outcomes. *Environ. Health Perspect.*, 2008, **116**(5): 680- 686.

Briggs, G. Diffusion estimation for small emissions. Preliminary report. Technical report, National Oceanic and Atmospheric Administration, Oak Ridge, Tenn. (USA). Atmospheric Turbulence and Diffusion Lab. 1973.

Brost R. A. and Wyngaard J. C., A model study of the stably stratified planetary boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35** :1427-40.

Brun H.H. 1995. Hot wire anemometry, principles and signal analysis. *Oxford Science Publications.* 532 p.

Busch N.S. The surface boundary layer. *B.L.M.* 1973, **4**: 213-40.

Carlson M. A. and Stull R. B., Subsidence in the nocturnal Boundary layer, *J. Clim. Appl. Meteor.* 1985, **25**:1088-99.

Carruthers, D. J., Holroyd, R.J., Hunt, J. C. R., Weng, W. S., Robins, A. G., Thomson, D. J., and Smith, F. B., UK-ADMS, a new approach to modelling dispersion in the earth's atmospheric boundary layer. *J. Wind Engineer. Indust. Aerodyn.*, 1994, **52**: 139-53.

Carruthers, D. J., Weng, W. S., Dyster, S. J., Singles, R., and Higson, H. Complex terrain module. Technical report, CERC. 2009.

Castro I.P. and Robins A.G. The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams. *J. Fluid Mech.*, 1977, **79**: 307-35.

CERC. Adms user guide. Technical report, Cambridge Environmental Research Consultants. 2001.

Chetia B.C. Fuzzy Modeling of the Boundary-Layer Theory. *VDM Publishing*, 2010. 192 p.

Chu, A., Kwok, R., and Yu, K. Study of pollution dispersion in urban areas using computational fluid dynamics (cfd) and geographic information system (gis). *Environ. Model. Software*, 2005, **20** (3):273 — 277.

Chutia R., Mahanta S. and Datta D, Uncertainty modelling of atmospheric dispersion model using fuzzy set and imprecise probability. *J. Intelligent fuzzy syst.*, 2013, **25**: 737-46.

Ciaramella A., Riccio A., Galmarini S., Giunta G., Giunta G., and Potempski S. Comparison of dispersion models by using fuzzy similarity relations. Proceeding of the 12th international conference on Artificial intelligence around man and beyond. *Springer-Verlag* Berlin, Heidelberg, 2011, **6934**: 57-67.

Cimorelli, A. J., Perry, S. G., Venkatram, A., Weil, J. C., Paine, R. J., Wilson, R. B., Lee, R. F., Peters, W. D., Brode, R. W., and Paumier, J. O. Description of model formulation. Technical report, U S. Environmental Protection Agency, 2004.

CITEPA: <http://www.citepa.org/>

Coirier, W., Fricker, D., Furmanczyk, M., and Kim, S. A computational fluid dynamics approach for urban area transport and dispersion modeling. *Env. Fluid Dynamics*, 2006, **5**: 443-479.

Comte-Bellot G. Hot wire and hot film anemometers. pp 123-162: B.E. Richard (ed), Measurement of Unsteady Fluid Dynamic Phenomena. *Hemisphere Publishing Corporation, USA*, 1977.

Comte-Bellot G. Hot-Wire anemometry. *Annu. Rev. of Fluid Mech.*, 1976, **8**: 209-31.

Counihan J. An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel. *Atmos. Env.*, 1969, **3** :197-214.

Crum T. D. et Stull R. B., Field measurements of the amount of surface layer air versus height in the entrainment zone, *J. Atmos. Sci.*, (1987), 44, pp 2743-2753

Dabberdt, W. F. and Hoydysh, W. G. Street canyon dispersion: sensitivity to blockshape and entrainment. *Atmosph. Envir.* 1991, **25**: 1143-53.

Davenport A.G. The Relationship of Wind Structure to Wind Loading. 54-102: Wind Effects on Building and Structures. Nat. Phys. Lab. Symp., Teddington, England, juin 1965.

Davidson M.J., Mylne K.R, Jones C.D., Phillips J.C., Perkins R. J., Fung J.C.H. and Hunt J.C.R. Plume dispersion through large groups of obstacles - A field investigation. *Atmos. Env.*, 1995b, **29** (22): 3245-57.

Davidson M.J., Snyder W.H., Lawson R.E. and Hunt J.C.R. Plume dispersion through large group of obstacles - wind tunnel simulations. *Atmos. Env.*, 1995a, **30** (22): 3715-31.

Deardorff J. W., Willis G. E. and Lilly D. K., Laboratory investigation of non-steady penetrative convection, *J. Fluid Mech.*, 1969, **35** : 7-31.

Deardorff J. W., Willis G. E. and Stockton B. H. Laboratory studies of the entrainment zone of a convectively mixed layer, *J. Fluid Mech.*, 1980, **100** (1): 41-64.

Deardorff, J. W. A numerical study of the three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds Numbers. *J. Fluid Mech.*, 1970, **41**(2): 453-80.

Demaël, E. (2007). *Modélisation de la dispersion atmosphérique en milieu complexe et incertitudes associées*. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Doc. FLUENT 6.3: <http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/index.htm>

Doury, A. Une méthode de calcul pratique et générale pour la prévision des pollutions véhiculées par l'atmosphère. Technical report, CEA, 1976, R.M280.

Doury, A. Une méthode d'approximation instantanée de la dispersion atmosphérique. Technical report, 1984, DAS n 52-CEA/IPSN.

Driedonks A.G.M. and Tennekes H., Entrainment effects in the well-mixed atmospheric boundary layer, *Bound. Layer Meteor.*, 1984; **30**: 75-105.

Dutta, S.; Paniarahi, P K; and Muralidhar, K., 2004, Effect of Orientation on the Wake of a Square Cylinder at Low Reynolds Numbers. *Indian J. Engin. Materials Sci.*, 2004, **11** (6): 447-59.

Erbatur K. and Çallı B. Fuzzy boundary layer tuning for sliding mode systems as applied to the control of a direct drive robot. *Soft Computing*, 2009; **13**(11):1099-1111.

Erbatur K., and Çallı B. Fuzzy boundary layer tuning for sliding mode systems as applied to the control of a direct drive robot. *Fuzzy Inform. Engin.*, 2013, **5** :359-71

Fakhraee H. , Saeedi M., and Sadrabadi M. R. A fuzzy air pollution dispersion model (proceeding: ASM '07 The 16th IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, 2007, Pages 137-142, ACTA Press Anaheim, CA, USA).

Favre A., Kovasznay L.S.G., Dumas R., Gaviglio J. and Coantic M.: la turbulence en mécanique des fluides, *Gauthier-Villars*, Paris, 1976.

Ferrugia N., Kanne S. and Greenhalgh D.A. 3-pulse digital particle image velocimetry. *Optics Letters*, 1995, **20**: 1827-9.

Fraigneau Yann C. Etudes numériques de l'évolution diurne de l'ozone dans la région d'une agglomération. Thèse de doctorat de l'université de ROUEN, 1996.

Fung J.C.H. and Hunt J.C.R. Modelling flow and dispersion through groups of building Final Report to MOD Part I. DAMTP University of Cambridge. 1991.

Gardiner B.A. Wind and wind forces in a plantation spruce forest. *Boundary-Layer Meteorol.*, 1994, **67** :161-186

Gary N. Coleman and Richard D. Sandberg. A Primer on Direct Numerical Simulation of Turbulence –Methods, Procedures and Guidelines. Technical Report AFM-09/01a (March 2010). Aerodynamics & Flight Mechanics Research Group School of Engineering Sciences, University of Southampton, SO17 1BJ, UK

Gence J.N. : Turbulence homogène associée à des effets de gravité, Thèse de Docteur Ingénieur Univ. Lyon. 1977.

Gerdes F. and Olivari D. Analysis of pollutant dispersion in an urban street canyon. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* 1999, **82**: 105-124.

Glinianaia SV, Rankin J, Bell R, Pless-Mulloli T, and Howel D. Particulate air pollution and fetal health: a systematic review of the epidemiologic evidence. *Epidemiology*, 2004, **15**: 36-45.

Graf, WH; and Yulistiyanto, B. Experiments on Flow Around a Cylinder; The Velocity and Vorticity fields. *J. Hydraul. Res*, 1998, **36** (4): 637-54

Hanna, S. R., Hansen, O. R., and Dharmavaram, S. FLACS air quality CFD model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations. *Atmos. Environ.* 2004; **38**: 4675-87.

Hinze J.O.: Turbulence, series in mechanical engineering, second edition, *McGraw-Hill*, 1975.

Hoydysh W. G. and Dabberdt W. F. Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons. *Atmos. Environment*, 1988, **22**, 2677-2689

Hunt J.C.R., Abell C.J., Peterka J.A. and Woo H. Kinematical studies of the flows around free or surface-mounted obstacles; applying topology to flow visualization. *J. Fluid Mech*, 1978, **86** 179-200.

Hussein H.J. and Martinuzzi R.J. Energy balance for turbulent flow around a surface mounted cube placed in a channel. *Phys. Fluids*, 1996, **8** (3) : 764-780.

Jeandel D., Gay B., Mathieu J. and Spettel F. Méthode de détermination d'un convergent. *C. R. Acad. Sc.*, 1971, **272**: 1662-5.

Jędrychowski W, Bendkowska I, Flak E, Penar A., Jacek R., Kaim I, Spengler J.D., Camann D., and Perera F.D. Estimated risk for altered fetal growth resulting from exposure to fine particles during pregnancy: an epidemiologic prospective cohort study in Poland. *Environ Health Perspect.*, 2004, **112**(14): 1398-1402.

Jicha, M., Pospisil, J., and Katolicky, J. Dispersion of pollutants in street canyon under traffic induced flow and turbulence. *Environ. Monit. Assess.*, 2000, **65**(1): 343-351.

Kastner-Klein, P. and Plate, E.J. Wind-tunnel study of concentration fields in street canyons. *Atmos. Environ.*, 1999, **33**, 3973-9.

- Keser H.I.; and Uenal M.F.** Flow around a Circular Cylinder Downstream of a Blunt-Based Flat Plate in Tandem and Staggered Arrangements. *J. Fluids Struct.*, 2003, **17** (6): 783-91.
- Klebanoff P.S. and DielhZ.W.** Some features of artificially thickened fully developed turbulent boundary layers with zero pressure gradient. *NACA TR*, 1952, **1110**:1165-91.
- Klebanoff P.S.** Characteristics of turbulence in a boundary layer with zero pressure gradient. *NACA TN*, 1954, **3178**: 25-50.
- Lacasana M, Esplugues A, Ballester F:** Exposure to ambient air pollution and prenatal and early childhood health effects. *Eur. J. Epidemiol.*, 2005, **20**:183-99.
- Lomas C.G.** Fundamentals of Hot Wire Anemometry. *Cambridge University Press*. New York, USA, 1986.
- Macdonald R.W., Griffiths R.F. and CheahS.C.** Field experiments of dispersion through regular arrays of cubic structures. *Atmos. Envir.*, 1997, **31** (6): 783-795.
- Mahrt L. and Gamage N.**, Observations of turbulence stratified flow, *J. Atmos. Sci.*, 1986, **44**:1106-21.
- Mahrt L.**, Vertical structure and turbulence in the very stable Boundary layer, *Atmos. Sci*, 1985, **42**: 2202-16.
- Maisonet M, Correa A, Misra D, and Jaakkola JJ:** A review of the literature on the effects of ambient air pollution on fetal growth. *Environ. Res.*, 2004, **95**:106-15.
- Mazzoldi, A., Hill, T., and Colls, J. J.** Cfd and gaussian atmospheric dispersion models: A comparison for leak from carbon dioxide transportation and storage facilities. *Atmos. Envir.*, 2008, **42**(34): 8046-54.
- McCarthy J.H.** Steady flow past non-uniform wire grids. *J. Fluid Mech.*, 1964, **19**: 491-512.
- Meroney, R. N., Pavageau, M., Rafailidis, S. and Schatzmann, M.** 1996 Study of line source characteristics for 2-D physical modelling of pollutant dispersion in street canyons. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* **62**:37-56.
- Mirzai M., H. Harvey J. K., and Jones C. D.** Wind tunnel investigation of dispersion of pollutants due to wind flow around a small building, *Atmos. Envir.*, 1994, **28** (11): 1819-1826.

Moser R. D., Kim J. and Mansour N. N. Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re = 590$, *Physics Fluid*, 1999, **11**(4): 943-5.

Nieuwstadt F. T. M., The turbulence structure of stable nocturnal Bound Layer, *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 2202-16.

Ogawa Y. and Oikawa S. A field investigation of the flow and diffusion around a model cube. *Atmos. Envir.*, 1982, **16** (2): 207-22.

Okamoto S. Turbulent shear flow behind a single row of bluff obstacles placed on plane boundary. *Atmos. Envir.*, 1987, **21** (6):1295-303.

Orlanski I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1975, **56** :529-530.

Parker JD, Woodruff TJ, Basu R, and Schoendorf KC. Air pollution and birth weight among term infants in California. *Pediatrics* (2005). 115(1): 121-128

Pasquill, F. Atmospheric diffusion: the dispersion of windborne material from industrial and other sources. *Van Nostrand*, Princeton, London, N.J., 1962.

Pavageau, M. and Schatzmann, M. Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon. *Atmos. Envir.*; 1999, **33**: 3961-71.

Perera FP, Rauh V, Tsai WY, Kinney P, Camann D, Barr D, Bernert T, Garfinkel R, Tu YH, Diaz D, Dietrich J, and Whyatt RM. Effects of transplacental exposure to environmental pollutants on birth outcomes in a multi-ethnic population. *Environ Health Perspect.*, 2003, **111**: 201-5.

Perera, F.P., Whyatt, R.M., Jedrychowski, W., Rauh, V., Manchester, D., Santella, R.M., Recent Developments in Molecular Epidemiology: A Study of the Effects of Environmental Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on Birth Outcomes in Poland. *Am. J. Epidemiol.*, 1998, **147**: 309-14.

Pérez, I. A., Garcia, M. A., Sanchez, M. L., et de Torre B., Analysis and parameterisation of wind profiles in the low atmosphere. *Solar Energy*, 2005.**78**, 809-821.

Perkins, R., Souhac, L., Mejean, P., and Rios, I. Modélisation de la dispersion des émissions atmosphériques d'un site industriel : vers un guide de l'utilisateur. Technical report, LMFA - Ecole Centrale de Lyon, 2005.

Perry A.E. and Morrison G.L. A study of the constant-temperature hot-wire anemometer. *J. Fluid Mech.*, 1971, **47**:577-99.

Pickering C.J.D. and Halliwell N.A. Particle image velocimetry: fringe visibility and pedestal removal. *Appl. optics*, 1985, **24** (16): 2474-6.

Plate E.J. and Quraishi A.A. Modeling of velocity distribution inside and above tall crop. *J. Appl. Meteorol.*, 1965 **4**: 400-8.

Plate E.J. *Engineering Meteorology*. Elsevier, 1982

Rayment R. and Readings C. J., A case study of the structure and energetics of an inversion, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 1974, **100**: 221-33.

Redelsperger, J. L., and Sommeria, G., Méthode de représentation de la turbulence d'échelle inférieure à la maille pour un modèle tridimensionnel de convection nuageuse. *Boundary-Layer Meteorol.*, 1981, **21** (4): 509-30.

Rituparna Chutia, Supahi Mahanta, D. Datta. Non-probabilistic sensitivity and uncertainty analysis of atmospheric dispersion. *Ann. Fuzzy Math. Inform.*, 2013, **5** (1): 213-28.

Robins, A. and Apsley, D. Modelling of building effects in adms. Technical report, University of Surrey, National Power and CERC. 2009.

Robins, A., Apsley, D., Carruthers, D., McHugh, C., and Dyster, S. Plume rise model specification. Technical report, University of Surrey, National Power and CERC, 2009.

Rodi W. and Mansour N. N. Low Reynolds Number k-modeling with the aid of direct simulation data. *J. Fluid Mech.*, 1993, **250**: 509.

Rotach M.W. Turbulence close to a rough urban surface. Part I: Reynolds stress. *Boundary-Layer Meteorol.*, 1993, **65**:1-28.

Sabatino, S., Buccolieri, R., Pulvirenti, B., and Britter, R. (). Flow and pollutant dispersion in street canyons using fluent and adms-urban. *Environ. Modeling Ass.*, 2008, **13**(3): 369-81.

Schlichting H. Boundary-Layer Theory. McGraw-Hill, 1968.

Spalart PR, Coleman GN & Johnstone R. Direct numerical simulation of the Ekman layer: a step in Reynolds number, and cautious support for a log law with a shifted origin. *Phys. Fluids* 2008; 20:101507. (See also Retraction in *Phys. Fluids* 2009; 21:109901.)

Sram R.J., Binkova B., Dejmek J., and Bobak M. Ambient air pollution and pregnancy outcomes: a review of the literature. *Environ. Health Perspect.*, 2005, **113**: 375-82.

Stull R. B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology, *Kluwer Academic Publishers*, 1988.

Stull R. B. Integral scales for the nocturnal boundary layer. Part 1. Empirical depth relationship, *J. Clim. Appl. Meteor.*, 1983, **22**: 673-86.

Stull R. B., Field measurements of the amount of surface layer air versus height in the entrainment zone, *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**: 2743-53.

Stull R.B and Driedonks A. G. M. Applications of the transient turbulence parametrization to atmospheric boundary layer simulations. *Bound. Layer Meteor.*, 1987, **40**: 209-39.

SurrIDGE A. D. and Swanepoel D. J. On the evolution of the height and temperature difference across the nocturnal stable boundary layer, *Bound. Layer Meteor.*, 1987, **40**: 87-98.

Thompson R.S. Building amplification factor for sources near buildings: a wind-tunnel study. *Atmos. Envir.*, 1993, **27** (15): 2313-25.

Thompson R.S. Building amplification factor for sources near buildings: a wind-tunnel study. *Atmos. Env.*, 1993, **27**(15): 2313-25.

Tuddenham M. Dates marquantes dans l'histoire de la pollution atmosphérique, pollution atmosphérique, 2011, n° 212, pp 377-384.

Turner, D. B. The long lifetime of the dispersion methods of Pasquill in US regulatory air modeling. *J. Applied Meteorol.*, 1997, **36**: 1016-20.

Vendel F. Modélisation de la dispersion atmosphérique en présence d'obstacles complexes : application à l'étude de sites industriels Thèse de Doctorat de l'Université de Lyon, 2011.

Vincont, J. Y. Détermination des flux turbulents de masse dans le sillage d'un obstacle : Application à l'intérieur de la canopée urbaine. Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, 1999.

Wyngaard J. C. , Atmosphérique turbulence, Annual Rev. Fluid. Mech., 1992, **24**, pp 101-149.

Yang Z. Large-eddy simulation: Past, present and the future. Chinese Journal of Aeronautics Volume 28, Issue 1, February 2015, Pages 11–24

Références bibliographiques

ADEME : <http://www2.ademe.fr/>

ADMS 3 User Guide, CERC Limited, 3 King's Parade, Cambridge, England CB2 1SJ. 1999.

Adrian R.J. Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow: speckle velocimetry vs particle image velocimetry. *Appl. Optics*, 1984, **23**:1690-1.

Arnal D., Cousteix J. and Michel R. Couche limite se développant avec gradient de pression positif dans un écoulement turbulent. *La Rech. Aérop.* 1976, 1976-1.

Arya S. P. S. and Shipman M. S. An experimental investigation of flow and diffusion in the disturbed boundary layer over a ridge-I. Mean flow and turbulence structure. *Atmosph. Envir.*, 1981, **15**: 1173-84.

Arya S. P. S. Shipman M. S. and Courtney L. Y. An experimental investigation of flow and diffusion in the disturbed boundary layer over a ridge-II. Diffusion from a continuous point source. *Atmosph. Envir.*, 1981, **15**:1185-94.

Ayrault M. and Simoëns S. Turbulent concentration determination in gas flow using multiple CCD cameras. *J. Flow Visual. Im. Proces.* 1995, **2**: 195-208.

Ayrault, M., Simoëns, S. and Méjean, P. Negative buoyancy effects on the dispersion of continuous gas plumes downwind solid obstacles. *J. Hazardous materials* 1998 **57**, 79-103.

Ball F. K., Control of inversion height by surface heating. *Quart. J. Roy. Soc.*, 1960, **86** : 483-94.

Ballester F., Estarlich M., Iñiguez C., Llop S., Ramón R., Esplugues A., Lacasaña M. et Rebagliato M. Environmental Health. <http://www.ehjournal.net/content/9/1/6>. 2010, **9**:6

Barakat A.O. PAHs and petroleum biomarkers in the atmospheric environment of Alexandria City, Egypt. *Water Air Soil Pollut.* 2002, **139**: 289–310.

Bouharati S., Benmahammed K., Harzallah D. and El-Assaf Y.M. Application of artificial neuro-fuzzy logic inference system for predicting the microbiological pollution in fresh water. *J. Appl. Sci.* 2008, **8**(2): 309-15.

Bournot P, Caminat P. Mahjoub N., and Stefani J. Experimental study of the plume emitted by a smokestack. Proceeding of PSFVIP.4 June 3-5, 2003 Chamonix, France.

Brauer M, Lencar C, Tamburic L, Koehoorn M, Demers P, and Karr C. A cohort study of traffic related air pollution impacts on birth outcomes. *Environ. Health Perspect.*, 2008, **116**(5): 680- 686.

Briggs, G. Diffusion estimation for small emissions. Preliminary report. Technical report, National Oceanic and Atmospheric Administration, Oak Ridge, Tenn. (USA). Atmospheric Turbulence and Diffusion Lab. 1973.

Brost R. A. and Wyngaard J. C., A model study of the stably stratified planetary boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35** :1427-40.

Brun H.H. 1995. Hot wire anemometry, principles and signal analysis. *Oxford Science Publications.* 532 p.

Busch N.S. The surface boundary layer. *B.L.M.* 1973, **4**: 213-40.

Carlson M. A. and Stull R. B., Subsidence in the nocturnal Boundary layer, *J. Clim. Appl. Meteor.* 1985, **25**:1088-99.

Carruthers, D. J., Holroyd, R.J., Hunt, J. C. R., Weng, W. S., Robins, A. G., Thomson, D. J., and Smith, F. B., UK-ADMS, a new approach to modelling dispersion in the earth's atmospheric boundary layer. *J. Wind Engineer. Indust. Aerodyn.*, 1994, **52**: 139-53.

Carruthers, D. J., Weng, W. S., Dyster, S. J., Singles, R., and Higson, H. Complex terrain module. Technical report, CERC. 2009.

Castro I.P. and Robins A.G. The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams. *J. Fluid Mech.*, 1977, **79**: 307-35.

CERC. Adms user guide. Technical report, Cambridge Environmental Research Consultants. 2001.

Chetia B.C. Fuzzy Modeling of the Boundary-Layer Theory. *VDM Publishing*, 2010. 192 p.

Chu, A., Kwok, R., and Yu, K. Study of pollution dispersion in urban areas using computational fluid dynamics (cfd) and geographic information system (gis). *Environ. Model. Software*, 2005, **20** (3):273 — 277.

Chutia R., Mahanta S. and Datta D, Uncertainty modelling of atmospheric dispersion model using fuzzy set and imprecise probability. *J. Intelligent fuzzy syst.*, 2013, **25**: 737-46.

Ciaramella A., Riccio A., Galmarini S., Giunta G., Giunta G., and Potempski S. Comparison of dispersion models by using fuzzy similarity relations. Proceeding of the 12th international conference on Artificial intelligence around man and beyond. *Springer-Verlag* Berlin, Heidelberg, 2011, **6934**: 57-67.

Cimorelli, A. J., Perry, S. G., Venkatram, A., Weil, J. C., Paine, R. J., Wilson, R. B., Lee, R. F., Peters, W. D., Brode, R. W., and Paumier, J. O. Description of model formulation. Technical report, U S. Environmental Protection Agency, 2004.

CITEPA: <http://www.citepa.org/>

Coirier, W., Fricker, D., Furmanczyk, M., and Kim, S. A computational fluid dynamics approach for urban area transport and dispersion modeling. *Env. Fluid Dynamics*, 2006, **5**: 443-479.

Comte-Bellot G. Hot wire and hot film anemometers. pp 123-162: B.E. Richard (ed), Measurement of Unsteady Fluid Dynamic Phenomena. *Hemisphere Publishing Corporation, USA*, 1977.

Comte-Bellot G. Hot-Wire anemometry. *Annu. Rev. of Fluid Mech.*, 1976, **8**: 209-31.

Counihan J. An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel. *Atmos. Env.*, 1969, **3** :197-214.

Crum T. D. et Stull R. B., Field measurements of the amount of surface layer air versus height in the entrainment zone, *J. Atmos. Sci.*, (1987), 44, pp 2743-2753

Dabberdt, W. F. and Hoydysh, W. G. Street canyon dispersion: sensitivity to blockshape and entrainment. *Atmosph. Envir.* 1991, **25**: 1143-53.

Davenport A.G. The Relationship of Wind Structure to Wind Loading. 54-102: Wind Effects on Building and Structures. Nat. Phys. Lab. Symp., Teddington, England, juin 1965.

Davidson M.J., Mylne K.R, Jones C.D., Phillips J.C., Perkins R. J., Fung J.C.H. and Hunt J.C.R. Plume dispersion through large groups of obstacles - A field investigation. *Atmos. Env.*, 1995b, **29** (22): 3245-57.

Davidson M.J., Snyder W.H., Lawson R.E. and Hunt J.C.R. Plume dispersion through large group of obstacles - wind tunnel simulations. *Atmos. Env.*, 1995a, **30** (22): 3715-31.

Deardorff J. W., Willis G. E. and Lilly D. K., Laboratory investigation of non-steady penetrative convection, *J. Fluid Mech.*, 1969, **35** : 7-31.

Deardorff J. W., Willis G. E. and Stockton B. H. Laboratory studies of the entrainment zone of a convectively mixed layer, *J. Fluid Mech.*, 1980, **100** (1): 41-64.

Deardorff, J. W. A numerical study of the three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds Numbers. *J. Fluid Mech.*, 1970, **41**(2): 453-80.

Demaël, E. (2007). *Modélisation de la dispersion atmosphérique en milieu complexe et incertitudes associées*. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Doc. FLUENT 6.3: <http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/index.htm>

Doury, A. Une méthode de calcul pratique et générale pour la prévision des pollutions véhiculées par l'atmosphère. Technical report, CEA, 1976, R.M280.

Doury, A. Une méthode d'approximation instantanée de la dispersion atmosphérique. Technical report, 1984, DAS n 52-CEA/IPSN.

Driedonks A.G.M. and Tennekes H., Entrainment effects in the well-mixed atmospheric boundary layer, *Bound. Layer Meteor.*, 1984; **30**: 75-105.

Dutta, S.; Paniarahi, P K; and Muralidhar, K., 2004, Effect of Orientation on the Wake of a Square Cylinder at Low Reynolds Numbers. *Indian J. Engin. Materials Sci.*, 2004, **11** (6): 447-59.

Erbatur K. and Çallı B. Fuzzy boundary layer tuning for sliding mode systems as applied to the control of a direct drive robot. *Soft Computing*, 2009; **13**(11):1099-1111.

[Erbatur K.](#), and [Çallı B.](#) Fuzzy boundary layer tuning for sliding mode systems as applied to the control of a direct drive robot. *Fuzzy Inform. Engin.*, 2013, **5** :359-71

Fakhræe H. , Saeedi M., and SadrabadiM. R. A fuzzy air pollution dispersion model (proceeding: ASM '07 The 16th IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, 2007,Pages 137-142, ACTA Press Anaheim, CA, USA).

Favre A., Kovaszny L.S.G., Dumas R., Gaviglio J. and Coantic M.: la turbulence en mécanique des fluides, *Gauthier-Villars*, Paris, 1976.

Ferrugia N., Kanne S. and GreenhalghD.A. 3-pulse digital particle image velocimetry. *Optics Letters*, 1995, **20**: 1827-9.

Fraigneau Yann C. Etudes numériques de l'évolution diurne de l'ozone dans la région d'une agglomération. Thèse de doctorat de l'université de ROUEN, 1996.

Fung J.C.H. and Hunt J.C.R. Modelling flow and dispersion through groups of building Final Report to MOD Part I. DAMTP University of Cambridge. 1991.

Gardiner B.A. Wind and wind forces in a plantation spruce forest. *Boundary-Layer Meteorol.*, 1994, **67** :161-186

Gary N. Coleman and Richard D. Sandberg. A Primer on Direct Numerical Simulation of Turbulence –Methods, Procedures and Guidelines. Technical Report AFM-09/01a (March 2010). Aerodynamics & Flight Mechanics Research Group School of Engineering Sciences, University of Southampton, SO17 1BJ, UK

Gence J.N. : Turbulence homogène associée à des effets de gravité, Thèse de Docteur Ingénieur Univ. Lyon. 1977.

Gerdes F. and Olivari D. Analysis of pollutant dispersion in an urban street canyon. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* 1999, **82**: 105-124.

Glinianaia SV, Rankin J, Bell R, Pless-Mulloli T, and Howel D. Particulate air pollution and fetal health: a systematic review of the epidemiologic evidence. *Epidemiology*, 2004, **15**: 36-45.

Graf, WH; and Yulistiyanto, B. Experiments on Flow Around a Cylinder; The Velocity and Vorticity fields. *J. Hydraul. Res*, 1998, **36** (4): 637-54

Hanna, S. R., Hansen, O. R., and Dharmavaram, S. FLACS air quality CFD model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations. *Atmos. Environ.* 2004; **38**: 4675-87.

Hinze J.O.: Turbulence, series in mechanical engineering, second edition, *McGraw-Hill*, 1975.

Hoydysh W. G. and Dabberdt W. F. Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons. *Atmos. Environment*, 1988, **22**, 2677-2689

Hunt J.C.R., Abell C.J., Peterka J.A. and Woo H. Kinematical studies of the flows around free or surface-mounted obstacles; applying topology to flow visualization. *J. Fluid Mech*, 1978, **86** 179-200.

Hussein H.J. and Martinuzzi R.J. Energy balance for turbulent flow around a surface mounted cube placed in a channel. *Phys. Fluids*, 1996, **8** (3) : 764-780.

Jeandel D., Gay B., Mathieu J. and Spettel F. Méthode de détermination d'un convergent. *C. R. Acad. Sc.*, 1971, **272**: 1662-5.

Jędrychowski W, Bendkowska I, Flak E, Penar A., Jacek R., Kaim I, Spengler J.D., Camann D., and Perera F.D. Estimated risk for altered fetal growth resulting from exposure to fine particles during pregnancy: an epidemiologic prospective cohort study in Poland. *Environ Health Perspect.*, 2004, **112**(14): 1398-1402.

Jicha, M., Pospisil, J., and Katolicky, J. Dispersion of pollutants in street canyon under traffic induced flow and turbulence. *Environ. Monit. Assess.*, 2000, **65**(1): 343-351.

Kastner-Klein, P. and Plate, E.J. Wind-tunnel study of concentration fields in street canyons. *Atmos. Environ.*, 1999, **33**, 3973-9.

Keser H.I.; and Uenal M.F. Flow around a Circular Cylinder Downstream of a Blunt-Based Flat Plate in Tandem and Staggered Arrangements. *J. Fluids Struct.*, 2003, **17** (6): 783-91.

Klebanoff P.S. and DielhZ.W. Some features of artificially thickened fully developed turbulent boundary layers with zero pressure gradient. *NACA TR*, 1952, **1110**:1165-91.

Klebanoff P.S. Characteristics of turbulence in a boundary layer with zero pressure gradient. *NACA TN*, 1954, **3178**: 25-50.

Lacasana M, Esplugues A, Ballester F: Exposure to ambient air pollution and prenatal and early childhood health effects. *Eur. J. Epidemiol.*, 2005, **20**:183-99.

Lomas C.G. Fundamentals of Hot Wire Anemometry. *Cambridge University Press*. New York, USA, 1986.

Macdonald R.W., Griffiths R.F. and CheahS.C. Field experiments of dispersion through regular arrays of cubic structures. *Atmos. Envir.*, 1997, **31** (6): 783-795.

Mahrt L. and Gamage N., Observations of turbulence stratified flow, *J. Atmos. Sci.*, 1986, **44**:1106-21.

Mahrt L., Vertical structure and turbulence in the very stable Boundary layer, *Atmos. Sci*, 1985, **42**: 2202-16.

Maisonet M, Correa A, Misra D, and Jaakkola JJ: A review of the literature on the effects of ambient air pollution on fetal growth. *Environ. Res.*, 2004, **95**:106-15.

Mazzoldi, A., Hill, T., and Colls, J. J. Cfd and gaussian atmospheric dispersion models: A comparison for leak from carbon dioxide transportation and storage facilities. *Atmos. Envir.*, 2008, **42**(34): 8046-54.

McCarthy J.H. Steady flow past non-uniform wire grids. *J. Fluid Mech.*, 1964, **19**: 491-512.

Meroney, R. N., Pavageau, M., Rafailidis, S. and Schatzmann, M. 1996 Study of line source characteristics for 2-D physical modelling of pollutant dispersion in street canyons. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* **62**:37-56.

Mirzai M., H. Harvey J. K., and Jones C. D. Wind tunnel investigation of dispersion of pollutants due to wind flow around a small building, *Atmos. Envir.*, 1994, **28** (11): 1819-1826.

Moser R. D., Kim J. and Mansour N. N. Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re = 590$, *Physics Fluid*, 1999, **11**(4): 943-5.

Nieuwstadt F. T. M., The turbulence structure of stable nocturnal Boundary Layer, *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 2202-16.

Ogawa Y. and Oikawa S. A field investigation of the flow and diffusion around a model cube. *Atmos. Envir.*, 1982, **16** (2): 207-22.

Okamoto S. Turbulent shear flow behind a single row of bluff obstacles placed on plane boundary. *Atmos. Envir.*, 1987, **21** (6):1295-303.

Orlanski I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1975, **56** :529-530.

Parker JD, Woodruff TJ, Basu R, and Schoendorf KC. Air pollution and birth weight among term infants in California. *Pediatrics* (2005). 115(1): 121-128

Pasquill, F. Atmospheric diffusion: the dispersion of windborne material from industrial and other sources. *Van Nostrand*, Princeton, London, N.J., 1962.

Pavageau, M. and Schatzmann, M. Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon. *Atmos. Envir.*; 1999, **33**: 3961-71.

Perera FP, Rauh V, Tsai WY, Kinney P, Camann D, Barr D, Bernert T, Garfinkel R, Tu YH, Diaz D, Dietrich J, and Whyatt RM. Effects of transplacental exposure to environmental pollutants on birth outcomes in a multi-ethnic population. *Environ Health Perspect.*, 2003, **111**: 201-5.

Perera, F.P., Whyatt, R.M., Jedrychowski, W., Rauh, V., Manchester, D., Santella, R.M., Recent Developments in Molecular Epidemiology: A Study of the Effects of Environmental Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on Birth Outcomes in Poland. *Am. J. Epidemiol.*, 1998, **147**: 309-14.

Pérez, I. A., Garcia, M. A., Sanchez, M. L., et de Torre B., Analysis and parameterisation of wind profiles in the low atmosphere. *Solar Energy*, 2005.**78**, 809-821.

Perkins, R., Souhac, L., Mejean, P., and Rios, I. Modélisation de la dispersion des émissions atmosphériques d'un site industriel : vers un guide de l'utilisateur. Technical report, LMFA - Ecole Centrale de Lyon, 2005.

Perry A.E. and Morrison G.L. A study of the constant-temperature hot-wire anemometer. *J. Fluid Mech.*, 1971, **47**:577-99.

Pickering C.J.D. and Halliwell N.A. Particle image velocimetry: fringe visibility and pedestal removal. *Appl. optics*, 1985, **24** (16): 2474-6.

Plate E.J. and Quraishi A.A. Modeling of velocity distribution inside and above tall crop. *J. Appl. Meteorol.*, 1965 **4**: 400-8.

Plate E.J. *Engineering Meteorology*. Elsevier, 1982

Rayment R. and Readings C. J., A case study of the structure and energetics of an inversion, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 1974, **100**: 221-33.

Redelsperger, J. L., and Sommeria, G., Méthode de représentation de la turbulence d'échelle inférieure à la maille pour un modèle tridimensionnel de convection nuageuse. *Boundary-Layer Meteorol.*, 1981, **21** (4): 509-30.

Rituparna Chutia, Supahi Mahanta, D. Datta. Non-probabilistic sensitivity and uncertainty analysis of atmospheric dispersion. *Ann. Fuzzy Math. Inform.*, 2013, **5** (1): 213-28.

Robins, A. and Apsley, D. Modelling of building effects in adms. Technical report, University of Surrey, National Power and CERC. 2009.

Robins, A., Apsley, D., Carruthers, D., McHugh, C., and Dyster, S. Plume rise model specification. Technical report, University of Surrey, National Power and CERC, 2009.

Rodi W. and Mansour N. N. Low Reynolds Number k-modeling with the aid of direct simulation data. *J. Fluid Mech.*, 1993, **250**: 509.

Rotach M.W. Turbulence close to a rough urban surface. Part I: Reynolds stress. *Boundary-Layer Meteorol.*, 1993, **65**:1-28.

Sabatino, S., Buccolieri, R., Pulvirenti, B., and Britter, R. (). Flow and pollutant dispersion in street canyons using fluent and adms-urban. *Environ. Modeling Ass.*, 2008, **13**(3): 369-81.

Schlichting H. Boundary-Layer Theory. McGraw-Hill, 1968.

Spalart PR, Coleman GN & Johnstone R. Direct numerical simulation of the Ekman layer: a step in Reynolds number, and cautious support for a log law with a shifted origin. *Phys. Fluids* 2008; 20:101507. (See also Retraction in *Phys. Fluids* 2009; 21:109901.)

Sram R.J., Binkova B., Dejmek J., and Bobak M. Ambient air pollution and pregnancy outcomes: a review of the literature. *Environ. Health Perspect.*, 2005, **113**: 375-82.

Stull R. B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology, *Kluwer Academic Publishers*, 1988.

Stull R. B. Integral scales for the nocturnal boundary layer. Part 1. Empirical depth relationship, *J. Clim. Appl. Meteor.*, 1983, **22**: 673-86.

Stull R. B., Field measurements of the amount of surface layer air versus height in the entrainment zone, *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**: 2743-53.

Stull R.B and Driedonks A. G. M. Applications of the transient turbulence parametrization to atmospheric boundary layer simulations. *Bound. Layer Meteor.*, 1987, **40**: 209-39.

SurrIDGE A. D. and Swanepoel D. J. On the evolution of the height and temperature difference across the nocturnal stable boundary layer, *Bound. Layer Meteor.*, 1987, **40**: 87-98.

Thompson R.S. Building amplification factor for sources near buildings: a wind-tunnel study. *Atmos. Envir.*, 1993, **27** (15): 2313-25.

Thompson R.S. Building amplification factor for sources near buildings: a wind-tunnel study. *Atmos. Env.*, 1993, **27**(15): 2313-25.

Tuddenham M. Dates marquantes dans l'histoire de la pollution atmosphérique, pollution atmosphérique, 2011, n° 212, pp 377-384.

Turner, D. B. The long lifetime of the dispersion methods of Pasquill in US regulatory air modeling. *J. Applied Meteorol.*, 1997, **36**: 1016-20.

Vendel F. Modélisation de la dispersion atmosphérique en présence d'obstacles complexes : application à l'étude de sites industriels Thèse de Doctorat de l'Université de Lyon, 2011.

Vincont, J. Y. Détermination des flux turbulents de masse dans le sillage d'un obstacle : Application à l'intérieur de la canopée urbaine. Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, 1999.

Wyngaard J. C. , Atmosphérique turbulence, Annual Rev. Fluid. Mech., 1992, **24**, pp 101-149.

Yang Z. Large-eddy simulation: Past, present and the future. Chinese Journal of Aeronautics Volume 28, Issue 1, February 2015, Pages 11–24