

N° D'ORDRE : D.../2017

# THESE

Présentée pour obtenir

LE DIPLOME DE DOCTORAT EN-SCIENCES  
SPECIALITE: GENIE Mécanique Option : Energétique

Par

**MEDJAHED BENDIDA**

**ETUDE NUMERIQUE DE LA DISPERSION D'UN SCALAIRE  
PASSIF EN MILIEU URBAIN SIMPLIFIE**

Soutenue le **03/07/ 2017** devant le jury composé de :

**Président:** ZENASNI Ramadan Professeur Université de Mostaganem

**Examineurs:** YUCEFI Abelkader Professeur Université de  
USTO Oran

NEHARI Driss Professeur Centre Université de Ain  
Témouchent

BENTOUAMI Abdelhadi Professeur Université de  
Mostaganem

**Rapporteur:** BOUZIT Mohamed Professeur Université de USTO  
Oran

**Co-Encadreur:** HOUAT Samir Maître de conférences A Université  
de Mostaganem

## Remerciements

Au Nom de Dieu Clément et Miséricordieux

Je remercie ALLAH de m'avoir donné la volonté, la patience et le courage pour la réalisation de ce modeste travail.

Tout d'abord, je tiens à remercier plus particulièrement mon encadreur feu Professeur Miloud ABIDAT qu'Allah ait son âme et l'accueille dans son vaste paradis pour sa patience, ses conseils précieux et pour m'avoir guidé tout au long de la réalisation de ce modeste travail.

Un grand remerciement à mon encadreur Monsieur Mohamed BOUZIT, Professeur à l'Université des Sciences et de Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (USTOMB), pour sa patience et son assistance sans limites et ses conseils valeureux et prodigieux.

Mes remerciements à mon Co-encadreur Monsieur Samir HOUAT, Maître de conférences à l'université d'Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, pour son aide et sa contribution dans la réalisation de cette thèse.

Je remercie particulièrement Monsieur Ramdane ZENASNI, Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, d'avoir accepté de présider le Jury d'évaluation de ce travail.

Que les membres du Jury ; Abdelkader YUCEFI, Professeur à l'USTOMB, Mr Driss NEHARI, professeur à Centre Université de Ain Témouchent, Mr Abdelhadi BENTOUAMI, Professeur à l'université d'Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, trouvent l'expression de ma sympathie et ma gratitude d'avoir consacré un temps précieux pour lire, évaluer et juger ce travail. Je ne saurais oublier les services du Directeur de laboratoire de MADEPODIM-USTO Abbès AZZI, Professeur à l'USTOMB et tous les membres du laboratoire de mécanique appliquée (LMA USTO) ainsi que les membres du laboratoire de Modélisation Numérique et Expérimentale des Phénomènes Mécaniques (LMNEPM) pour leurs accueils.

Je remercie Monsieur Mohamed MECHMACHE, Professeur Contractuel à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, pour sa contribution dans la rédaction de ma thèse de doctorat.

Mes sincères reconnaissances à l'équipe de la « dynamique de l'atmosphère habitée » de l'École Centrale de Nantes ECN, pour l'appui scientifique et la collaboration qui m'ont été octroyés lors de mes séjours de stage dans leur établissement.

Finalement, je remercie toutes les personnes qui de loin ou de près ont contribué à l'élaboration de ce travail et plus particulièrement mes amis et collègues Benlefki, Abdelhak, Yacine, Naili Said et surtout Monsieur Saidani Djamel Eddine pour les discussions fructueuses des sujets scientifiques que nous avons eues et la bonne humeur. Un remerciement particulier à tout le personnel de la Faculté des Sciences et de Technologie et celui du département de Génie Mécanique de l'université de Mostaganem.

**MEDJAHED BENDIDA**

## **Dédicaces**

*A mes chers parents*

*A ma grande famille*

*A ma chère femme et ma fille Belkais Meriem  
et à tous ceux qui me connaissent.*

***MEDJAHED BENDIDA***

## Résumé

L'objectif de ce travail de thèse est l'étude numérique de la dispersion d'un scalaire passif en milieu urbain simplifié à l'aide du code de calcul CHENSI en les confrontant aux résultats expérimentaux de l'université Hambourg (Expérience dans le domaine MUST (Mock Urban Setting Test)). Le travail consiste à exploiter les données expérimentales obtenues en soufflerie atmosphérique sur un modèle physique du site de la campagne MUST (Mock Urban Setting Test), dans le but d'évaluer le modèle de calcul CHENSI en 3D, développé par l'équipe Dynamique de l'Atmosphère Habitée du LMF/ ECN. Le code est basé sur le modèle standard (k- $\epsilon$ ) de Launder et Spalding [1]. Pour l'intégration des Equations Différentielles Potentielles (EDP) constituant le modèle mathématique, la méthode des volumes finis de Periclet Ferziger [2] a été utilisée avec la disposition décalée des inconnues MAC (Marker And Cell) de Harlow et Welch [3] pour la discrétisation des termes des EDP. Les conditions aux limites sont imposées selon des lois de paroi (au sol et sur les bâtiments) ou en condition de Dirichlet (frontières d'entrée) ou de Neuman (frontière de sortie ou limite supérieure). Le domaine numérique utilisé est comparable à celui de l'expérience de soufflerie avec un maillage cartésien tridimensionnel. Les résultats numériques présentés sont relatifs aux caractéristiques de l'écoulement moyen (U, W), à l'énergie cinétique de turbulence (TKE) et au champ de concentration d'un scalaire passif (C), suivant deux directions d'incidence du vent (0° et - 45° par rapport à l'axe des rues). Afin de comparer de façon objective les performances du modèle CHENSI à celles d'autres codes européens également utilisés pour simuler la configuration MUST, les indicateurs statistiques proposés par Chang et Hanna [4] ont été calculés. Pour les deux directions du vent incident, l'analyse montre que les résultats pour l'écoulement moyen, reflètent assez bien la réalité physique. On note cependant que l'énergie cinétique de turbulence est sous estimées par rapport aux valeurs mesurées en soufflerie. Le champ moyen de concentration est en bon accord avec celui obtenu expérimentalement.

**Most-cls:** Pollution, MUST, COST732, Code CHENSI, Milieu Urbain, dynamique, concentration

## **Abstract**

The objective of this thesis is the numerical study of the dispersion of a passive scalar urban simplifies using the Shensi computer code by comparing the experimental results from the University Hamburg (Experience in MUST (Mock Urban Setting Test)). The work is to exploit the experimental data obtained in atmospheric wind tunnel on a physical model of the site of the campaign MUST (Mock Urban Setting Test) in order to assess the CHENSI calculation model in 3D, developed by the team dynamics Atmospheric Inhabited LMF / ECN. The code is based on the standard model (k-ε) of Launder and Spalding [1]. For the integration of Equations Differentials Potential (EDP) forming the mathematical model, the finite volume method Peric and Ferziger [2] was used with the offset arrangement of unknown MAC (Marker And Cell) Harlow and Welch [3] Discretize terms PDE. The boundary conditions are imposed according to wall laws (ground and on buildings) or Dirichlet condition (entry borders) or Neuman (output border or upper limit). The digital domain used is comparable to that of the blower of experience with a three-dimensional Cartesian grid. Numerical results are presented for the characteristics of the medium flow (U, W), to the turbulence of kinetic energy (TKE) and the concentration field of a passive scalar (C), along two directions of incidence of wind (0 ° - 45 ° relative to the axis of the street). To compare objectively the performance of Shensi model with those of other European codes also used to simulate MUST configuration, statistical indicators proposed by Chang and Hanna [4] were calculated. For both directions of the incident wind, the analysis shows that the results for the mean flow fairly reflect physical reality. It notes, however, that the kinetic energy of turbulence is underestimated compared to values measured in the wind tunnel. The average field concentration is in good agreement with that obtained experimentally.

Most key: Pollution, MUST, COST732, Shensi Code, Urban Environment, dynamic, concentration

## ملخص:

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة عددية لتشتت الملوثات في المناطق الحضرية بدون تفاعلات كيميائية باستخدام الرمز شنسي بمقارنة النتائج التجريبية لخبرة في إعداد اختبار في المناطق الحضرية (MUST) من طرف جامعة هامبورغ. الهدف من هذا العمل هو استغلال البيانات التجريبية التي تم الحصول عليها في نفق الرياح لإعداد اختبار في المناطق الحضرية (MUST) من طرف جامعة هامبورغ ، من أجل تقييم نموذج حساب شنسي ذو ثلاث أبعاد، والتي تم تطويره في مخبر ديناميك الموائع بالمدرسة المركزية لنانت بفرنسا. ويستند هذا الرمز على النموذج القياسي (ك-ε) للندر وسبالدينج [1] . لدمج المعادلات التفاضلية المحتملة (EDP) وتشكيل نموذج رياضي، تم استخدام أسلوب حجم محدود لبريك وفرزيجر [2] مع ترتيب إزاحة المجهولة لهارلو وولش [3] لتقدير حجم شروط طلب تقديم العروض المعادلات التفاضلية المحتملة (EDP). شروط الحدود التي تفرضها قوانين جدار (الأراضي والمباني) أو حالة ديرينثليت (الحدود المدخلات) أو نيومن (الانتاج الحدود أو الحد الأعلى).

إن المجال الرقمي المستخدم هو مماثل لتلك التجربة نفق الرياح مع شبكة الديكارتية ثلاثية الأبعاد. النتائج الرقمية المعروضة تتعلق بخصائص متوسط التدفق العمودي للسرعة، و الطاقة الحركية المضطربة (ك) ومجال تركيز العددية السليبي (C)، وفقا لاتجاهين حدوث الرياح (0 درجة و - 45 درجة بالنسبة إلى محور الشوارع) لثلاث ارتفاعات مختلفة. لمقارنة موضوعية وصحة أداء نموذج شنسي مع تلك الرموز أوروبية الأخرى تستخدم أيضا لمحاكاة (MUST)، وقد تم حساب المؤشرات الإحصائية التي اقترحها تشانغ وحنا [4]. وفقا لاتجاهين حدوث الرياح (0 درجة و - 45 درجة)، يبين التحليل أن النتائج لتدفق متوسط، ومستويات ارتفاع ثلاثة، تعكس إلى حد ما نتائج إيجابية في الواقع المادي. نلاحظ، مع ذلك، أن نتائج الطاقة الحركية مقارنة مع القيم المقاسة في نفق الرياح متوسطة. أما نتائج متوسط تركيز الحقل هي جيد مع تلك التي تحصلوا عليها تجريبيا.

**كلمات البحث:** التلوث، إعداد اختبار في المناطق الحضرية، COST732 ، الرمز شنسي، البيئة الحضرية، الدينامكية، تركيز.

**COST732:** هي الإطار الأوروبي حكومي دولي للتعاون الدولي بين الأنشطة البحثية موحدة على الصعيد الوطني، يخلق الشبكات العلمية وتمكن العلماء للتعاون في طائفة واسعة من الأنشطة في مجال البحوث والتكنولوجيا.

## Sommaire

<i>Remerciements</i> .....	<i>ii</i>
<i>Dédicaces</i> .....	<i>iii</i>
<i>Résumé</i> .....	<i>- 1 -</i>
<i>Abstract</i> .....	<i>- 2 -</i>
<i>ملخص:</i> .....	<i>- 3 -</i>
<i>Nomenclature:</i> .....	<i>- 7 -</i>
<i>1. Introduction générale :</i> .....	<i>- 11 -</i>
<i>1.1 Motivation</i> .....	<i>- 11 -</i>
<i>1.2 Objectifs de la Thèse</i> .....	<i>- 11 -</i>
<i>1.3 Structure du manuscrit</i> .....	<i>- 12 -</i>
<i>Ch. I : Étude bibliographique.</i> .....	<i>- 13 -</i>
<i>I. Étude bibliographique :</i> .....	<i>- 13 -</i>
<i>Ch. II : Présentation de l'expérience étudiée MUST :(Mock Urban Setting Test) :</i> .....	<i>- 19 -</i>
<i>II.1 Introduction:</i> .....	<i>- 19 -</i>
<i>II.2 La première expérience présentée par Bilstoft [11] et Yee [12] :</i> .....	<i>- 20 -</i>
<i>II.2.1 La campagne de mesures MUST: (Mock Urban Setting Test).</i> .....	<i>- 20 -</i>
<i>II.2.2 Objectifs et description de l'expérience:</i> .....	<i>- 20 -</i>
<i>II.3 La deuxième expérience présentée par Frank Harms et Klára Bezpalcová (2005), Yee et al. (2006) :</i> .....	<i>- 25 -</i>
<i>II.3.1 La campagne de mesures de champ dans un tunnel du vent.</i> .....	<i>- 25 -</i>
<i>II.3.2 Mesure du courant</i> .....	<i>- 27 -</i>
<i>Ch.III : Écoulements moyens et turbulents dans la couche de surface :</i> .....	<i>- 29 -</i>
<i>III.1 Les équations fondamentales dans la couche de surface:</i> .....	<i>- 29 -</i>
<i>III.1.1 Equation de Conservation de la masse:</i> .....	<i>- 29 -</i>
<i>III.1.2 Equations de La conservation de la quantité de mouvement:</i> .....	<i>- 29 -</i>
<i>III.1.3 Equation d'état:</i> .....	<i>- 30 -</i>
<i>III.1.4 Equation de conservation d'énergie :</i> .....	<i>- 31 -</i>
<i>III.1.5 Equation de transport d'un polluant:</i> .....	<i>- 31 -</i>
<i>III.2 Prise en compte de la turbulence:</i> .....	<i>- 31 -</i>
<i>III.3 Equations moyennées:</i> .....	<i>- 33 -</i>
<i>III.3.1 Equation de Conservation de la masse:</i> .....	<i>- 33 -</i>
<i>III.3.2 Equations de la conservation de la quantité de mouvement:</i> .....	<i>- 33 -</i>
<i>III.3.3 Equation de conservation de l'énergie:</i> .....	<i>- 33 -</i>
<i>III.3.4 Equation de transport d'un scalaire:</i> .....	<i>- 34 -</i>
<i>III.4 Approches de fermeture des écoulements turbulents:</i> .....	<i>- 34 -</i>
<i>III.5 Modélisation numérique des écoulements turbulents:</i> .....	<i>- 35 -</i>
<i>III.5.1 Simulation numérique directe – Direct Numerical Simulation (DNS):</i> .....	<i>- 36 -</i>
<i>III.5.2 Large Eddy Simulation (LES):</i> .....	<i>- 36 -</i>
<i>III.5.3 Reynolds Average Navier Stokes (RANS):</i> .....	<i>- 37 -</i>
<i>III.5.3.1 Le modèle de longueur de mélange:</i> .....	<i>- 38 -</i>
<i>III.5.2 Le modèle de Louis:</i> .....	<i>- 38 -</i>
<i>III.5.3 Le modèle k-l:</i> .....	<i>- 39 -</i>
<i>III.5.4 Le modèle <math>k - \varepsilon</math> :</i> .....	<i>- 40 -</i>
<i>Ch. IV : Code de CHENSI :</i> .....	<i>- 43 -</i>
<i>IV.1 Introduction :</i> .....	<i>- 43 -</i>
<i>IV.2 Le Modèle de Turbulence</i> .....	<i>- 44 -</i>
<i>IV.3 Le Modèle Numérique</i> .....	<i>- 49 -</i>
<i>IV.3.1 La méthode des volumes finis</i> .....	<i>- 49 -</i>

<i>IV.3.2 La disposition des inconnues</i> .....	- 51 -
<i>IV.4 Les Conditions aux limites</i> .....	- 53 -
<i>IV.4.1 La loi de paroi</i> .....	- 53 -
<i>IV.4.2 Les autres conditions aux limites</i> .....	- 56 -
<i>Ch.V : Procédure de la simulation numérique</i> :	- 59 -
<i>V.1 Contexte</i> : .....	- 59 -
<i>V.2 La campagne expérimentale</i> .....	- 59 -
<i>V.2.1 Description de la campagne de mesures</i> .....	- 59 -
<i>V.2.2 Données expérimentales disponibles</i> :.....	- 60 -
<i>V.2.2.a Données mesurées</i> .....	- 60 -
<i>V.2.2.b. Données interprétées</i> .....	- 61 -
<i>V.2.3 Outils de calcul</i> : .....	- 61 -
<i>V.3 Mise en place des simulations Code CHENSI</i> :	- 62 -
<i>V.3.1. Le maillage</i> .....	- 62 -
<i>V.3.2 Conditions de rejet</i> .....	- 63 -
<i>V.3.3 Les conditions aux limites et initiales</i> .....	- 63 -
<i>V.3.4 Les conditions aux limites</i> .....	- 64 -
<i>V.3.5 Conditions de paroi rugueuse</i> : .....	- 64 -
<i>V.3.6 Conditions d'entrée</i> : .....	- 65 -
<i>V.3.7 Paramètres de calculs</i> .....	- 66 -
<i>V.3.8 Aspects numériques</i> : .....	- 67 -
<i>Ch.VI : Résultats et discussion</i> :.....	- 69 -
<i>VI.1 Comparaison des modèles numériques et CHENSI avec les données expérimentales (MUST) dans le cas de 0°</i> .....	- 69 -
<i>VI.1.1 Le composant U</i> :.....	- 70 -
<i>VI.1.2 Le composant W</i> : .....	- 71 -
<i>VI.1.3 Le composant TKE</i> : .....	- 71 -
<i>VI.1.4 Variations de concentration</i> .....	- 90 -
<i>VI.1.5 Conclusions</i> : .....	- 91 -
<i>VI.2 Comparaison entre les modèles numériques et CHENSI avec les données expérimentales (MUST) dans le cas de -45°</i> .....	- 93 -
<i>VI.2.1 Les composants U et W</i> : .....	- 93 -
<i>VI.2.2 Composant TKE</i> : .....	- 94 -
<i>VI.2.3 Variations de concentration</i> .....	- 108 -
<i>VI.2.4 Conclusions</i> .....	- 111 -
<i>VI.3 Comparaison et validation statistique entre les résultats obtenus par simulation numérique en les confrontant aux résultats expérimentaux pour les deux cas 0° et -45°</i> -	112 -
<i>VI.3.1 Méthode de validation statistique</i> : .....	- 112 -
<i>VI.3.1.a Mesures</i> .....	- 112 -
<i>VI.3.1.b Indicateurs statistiques</i> :.....	- 113 -
<i>VI.3.1.b.1. Le biais fractionnel FB ('Fractionnal Bias')</i> : .....	- 113 -
<i>VI.3.1.b.2 L'erreur quadratique moyen normalisée NMSE ('Normalized Mean Square Error')</i> :.....	- 113 -
<i>VI.3.1.b.3 Le facteur 2 FAC2</i> : .....	- 113 -
<i>VI.3.2 Résultat des analyses Statistique</i> :.....	- 115 -
<i>VI.3.2.1 Les parcelles et les mesures pour le cas d'écoulement de 0°</i> : .....	- 115 -
<i>VI.3.2.2 Les parcelles et les mesures pour le cas de -45°</i> : .....	- 120 -
<i>VI.3.2.3 Champ de concentration à -45°</i> : .....	- 125 -
<i>Ch. Conclusion générale</i> :.....	- 127 -
<i>Conclusion générale</i> .....	- 127 -

<i>Références bibliographiques</i> .....	- 129 -
<i>Liste des figures</i> .....	- 135 -
<i>Liste des tableaux</i> .....	- 138 -
<i>Annexe</i> :.....	- 139 -
<i>Annexe 1: Liste des publications</i> .....	- 139 -
<i>Annexe 2: Article 01</i> .....	- 140 -
<i>Annexe 3: Article 02</i> .....	- 146 -
<i>Annexe 4: Article 03</i> .....	- 154 -
<i>Annexe 5: Article 04</i> .....	- 166 -
<i>Annexe 6: Article 05</i> .....	- 177 -

## Nomenclature:

$\alpha$  : Le coefficient de diffusion.

$\alpha$  : Le coefficient de décentrement compris entre **0** et **1**.

$\alpha_e, \alpha_w, \alpha_t$  et  $\alpha_b$  : centres des facettes.

$\eta_0$  et  $\beta_0$  : Constantes.

$\rho_r$  : La masse volumique de l'air sec à l'état de référence.

$\nu$  : La viscosité cinématique de l'air sec

$C_p$  : La capacité calorifique massique à pression constante de l'air sec.

$\lambda$  : La conductivité thermique de l'air sec.

$\lambda_t$  : La conductivité thermique turbulente.

$\bar{\theta}$  : La température potentielle moyenne.

$\theta$  : La température potentielle.

$\sigma_k$  : La constante de modélisation du terme de diffusion de l'énergie cinétique de turbulence.

$\sigma_\varepsilon$  : La constante de la modélisation du terme de diffusion du taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence.

$\varepsilon$  : Le taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence.

$\nu_t$  : La viscosité turbulente ( $m^2 s^{-1}$ ).

$\Omega$  : Le volume d'intégration.

$\overline{\Omega_{ij}}$  : Le tenseur de verticité.

$\Omega_j$  : Volume de contrôle élémentaire.

$\Gamma_j$  : Normale extérieure unitaire  $\vec{n}_j$ .

$\Gamma$  et  $\vec{n}$  : respectivement le contour et la normale extérieure unitaire du volume d'intégration

$\varphi$  : Représente la valeur moyenne de cette grandeur sur la maille.

$\beta$  : Coefficient de compressibilité.

$\rho_{ri}$  : La masse volumique par interpolation linéaire.

$\nu_s$  : Viscosité sous – maille.

$C_p$  : La capacité calorifique massique à pression constante de l'air sec.

$C_S$  : Le coefficient de Smagorinsky.

$C_{lk}$  et  $C_{l\epsilon}$  : Constante.

$C_{\epsilon 1}$  et  $C_{\epsilon 2}$  : les constantes de modélisation du terme de production-destruction du taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence.

$C_\mu$  : Une constante empirique  $C_\mu = 0.09$ .

$d$  : La distance.

$D_i$  : Le coefficient de diffusion moléculaire massique.

$F_m$  et  $F_h$  : Les fonctions qui dépendent de la stabilité de l'atmosphère.

$g_i$  : L'ième composante cartésienne de l'accélération de la pesanteur.

$h_{dp}$  : La hauteur de déplacement de la surface.

$H_S$  : Flux de chaleur à la paroi.

$i$  : Indice.

$K$  : la constante de **Von Karman**,  $K = 0,40$ .

$k$  : L'énergie cinétique de turbulence ( $m^2 s^{-2}$ ).

$l_s$  : L'échelle de longueur de **Smagorinsky**.

$\vec{n}$  : La normale unitaire extérieure de la surface.

$P_{rt}$  : Le nombre de **Prandtl** de la turbulence.

$p_s$  : La pression de référence prise à 1000 mb.

$Re$  : Le nombre de Reynolds de l'écoulement.

$R_i$  : Terme source ou puits par réaction chimique avec  $N$  autres constituants.

$R^*$  : La constante des gaz parfaits pour l'air sec.

$S_i$  : Terme source additionnel.

$t$  : Le temps.

$\Delta t$  : Pas de temps.

$T$  : La température de parcelle d'air.

$T_r$  : Température à l'état de référence.

$T_s$  : Température à la paroi.

$T_v$  : La température virtuelle.

$T_1'$  : La fluctuation de température par rapport à l'état de référence.

$\bar{U}$  : Le module de la vitesse moyenne tangentielle à la distance  $d$ .

$v_1'$  : La  $i$ ème composante cartésienne de la fluctuation de la vitesse autour de sa valeur moyenne.

$\overline{v_i' v_j'}$  : Les tensions de Reynold

$\bar{V}$  : La vitesse moyenne ( $m s^{-1}$ ).

$\bar{V}_i$  : La  $i$ ème composante cartésienne de la vitesse moyenne.

$x_i$  : La  $i$ ème composante cartésienne.

$z_{0mp}$  : La longueur de rugosité dynamique.

---

## ACRONYMES

### Espèces chimiques:

CO: monoxyde de carbone.

CO<sub>2</sub>: dioxyde de carbone.

NO: monoxyde d'azote.

NO<sub>2</sub>: dioxyde d'azote.

NO<sub>x</sub>:  $NO+NO_2$ .

O<sub>2</sub>: oxygène.

O<sub>3</sub>: ozone.

SO<sub>2</sub>: dioxyde de soufre.

### Abréviations:

MUST: Mock Urban Setting Test.

CLA: Couche Limite Atmosphérique.

CLS: Couche Limite de Surface.

CSU: Couche de Surface Urbaine.

CLU: Couche Limite Urbaine.

DNS: Direct Numerical Simulation.

LES: Large Eddy Simulation.

RANS: Reynolds Average Navier Stokes.

ARL: Army Research Laboratory.

DSTL: Defence Science and Technology Laboratory.

WMD: Weapons of mass destruction.

# **1. Introduction générale :**

## **1.1 Motivation**

Les principales sources des zones de pollution urbaines sont les véhicules et les chauffages domestiques, aux quels il faut ajouter les émissions des activités artisanales et de la petite industrie. Ce sont des sources proches du sol, souvent à l'intérieur de la canopée urbaine ou juste au dessus. Les polluants émis sont le plus souvent chimiquement réactifs et constituent les polluants primaires de la photochimie urbaine. Certains composants des émissions sont dangereux, pour les végétaux, la santé humaine et celle des animaux, ou pour les bâtiments et les objets. La plupart d'entre de ces produits sont les polluants secondaires issus des réactions chimiques qui sont les plus dangereux, par leur caractère acide ou oxydant. Dans ce cas les études d'impact sont plus complexes et les relations source-cible doivent prendre en compte la présence de l'ensemble des polluants disponibles sur le site et susceptibles d'avoir des interactions avec la source étudiée. Ces études d'impact doivent être réalisées par des simulations "compréhensives", de type scénario alternatif, faisant intervenir des modèles spatialisés incluant à la fois les transformations photochimiques des émissions étudiées mais aussi, la totalité des sources intervenant sur la zone d'étude ; celle-ci est en fait déterminée par les mouvements de l'air, la comparaison des temps de transport des polluants et de leur durée de vie et de transformation chimique.

## **1.2 Objectifs de la Thèse**

Dans le cadre de ce travail, on traite la dispersion d'un scalaire passif en milieu urbain simplifié. L'objectif principal est l'étude détaillée de l'écoulement et de la dispersion des polluants dans une ville en modélisant à la fois l'écoulement moyen, la turbulence et les concentrations. Des simulations numériques ont été entreprises à l'aide d'un modèle CFD (Computational Fluid Dynamics) ; le code utilisé dans notre cas pour le calcul est le code CHENSI. On a, en effet, présenté le cas de l'étude expérimentale en soufflerie de l'expérience de terrain MUST (Mock Urban Setting Test), qui sera utilisée par la suite pour valider notre code de calcul et de comparer les performances globales à celles obtenues par le biais d'autres codes européens.

Le "COST" est une structure européenne intergouvernementale pour la coopération internationale entre les activités de la recherche nationalement consolidées. Le COST a créé des réseaux scientifiques et permet aux scientifiques de collaborer dans un spectre large d'activités dans la recherche et la technologie.

Le "COST 732" comprend des scientifiques de 22 pays européens dont leur objectif est l'améliorer et d'assurer la qualité de micro échelle modèles météorologiques qui sont sollicités pour prédire le courant et le processus de transport dans les environnements urbains ou industriels.

Le "COST 732" basé sur l'expérience du courant de la micro-échelle et modèles de la dispersion qui sont largement utilisés dans les estimations mais dont la validation est encore limitée. "COST 732" fourni une documentation de l'évaluation du modèle de Britter et Schatzmann [5] qui sont les principaux promoteurs de ce modèle dont la validation est adéquate. En revanche, le "COST 732" donne aussi des recommandations sur l'organisation du modèle pour les utilisateurs de CFD en microscopie météorologique et ce, avec une directive complète, Franke et al., [6]. Accentuer la nécessité de données de la validation applicables met, le "COST 732" recommandera et publier plusieurs données mettent à sa fin en 2009. Mock Urban Setting Test (MUST) qui a aussi été enquêtée sur largement dans tunnel du vent (Leitl et al., [7]) et a déjà été couru par beaucoup de modèles pendant le "COST 732", y compris aussi MISKAM 5.01 simulations de Goricán et al. [8]. a résumé les résultats ont été présentés par exemple par Franke et al. [9] et Olesen et al. [10].

### **1.3 Structure du manuscrit**

Le contexte et les résultats de cette étude sont présentés ici en détails. Le premier chapitre a été réservé à la présentation de l'étude bibliographique détaillée, le deuxième chapitre presente l'expérience étudiée MUST. Une étude détaillée sur les écoulements moyens et turbulents dans la couche de surface est présentée dans le troisième chapitre. Le quatrième chapitre a été réservé à la présentation le code de calcul utilisé (CHENSI). Le cinquième chapitre présente la procédure de simulation numérique et les conditions initiales et aux limites des modèles. Le sixième chapitre est consacré à la discussion des résultats de calcul en les confrontant avec les résultats expérimentaux disponibles tout en établissant une étude statistique pour valider le modèle. Une conclusion générale est donnée à la fin de ce document.



---

---

## **Ch. I : Étude bibliographique.**

### **I. Étude bibliographique :**

En septembre 2001, l'armée américaine "Defence Threat Reduction Agency (DTRA) " a organisée une expérience à grandeur échelle réelle dont l'objectif était des essais expérimentaux afin d'aboutir à des données météorologiques. La méthodologie des expériences et les résultats sont détaillés dans les articles de Bilstoft [11] et Yee et Bilstoft [12]. En Décembre 2006, Maya Milliez [13] a soutenu un travail de thèse de doctorat à l'école nationale des ponts et chaussées en France dont le thème est la modélisation micro-météorologique à l'intérieur de la ville, elle a présenté deux objectifs principaux parmi lesquels une étude de l'écoulement et de la dispersion des polluants dans les villes, en modélisant à la fois les concentrations moyennes et leurs fluctuations à l'aide d'un modèle de CFD (Computational Fluid Dynamics) qui utilise le code Mercure.

Ralph Gailis [14] a développé une procédure et une analyse des données expérimentale de l'expérience (MUST). Dans un autre travail, Steve Warner [15] a fait une comparaison des transports et des dispersions (model prédictions) de l'expérience (MUST). Dans la même année, Bezpalcova [16] a étudié le passage de polluants passif dans une canopée urbaine idéalisée.

D'autres auteurs [17], ont utilisé un code de calcul pour faire des simulations numériques de la dispersion des polluants dans une zone urbaine idéalisée, pour différentes conditions météorologique. Maya, [18], en 2008 a fait un autre travail de modélisation dynamique des fluctuations de concentration dans un secteur urbain idéalisé par le même code de calcul.

En 2005, une autre équipe de recherche de Camelli Fernando et autres [19], a réalisé une étude sur la dispersion des polluants dans un quartier hétérogène urbain et en 2007, Andrew Keats [20], a procédé a une étude pour la détermination de la source avec des applications à un environnement urbain complexe et 2009, Bing-Chen Wang [21], a utilisé un code de calcul pour faire une étude numérique de la dispersion des nuages de polluants dans un environnement bâti, dans cet article, il a étudié numériquement la dispersion d'un scalaire passif libéré d'une source ponctuelle instantanée dans un environnement bâti (urbain) en utilisant une méthode de Navier-Stokes Reynolds moyenne.

---

---

Le "COST 732" (2005-2009) a été lancée dans le but d'améliorer et d'assurer la qualité des micro-échelles des modèles météorologiques qui sont utilisés pour prédire l'écoulement et la dispersion dans des environnements urbains ou industriels. 'COST 732' a débuté en Juillet 2005 pour l'exploration de l'assurance qualité des modèles météorologiques Micro-échelle tenue à l'université de Hambourg. L'impact éventuel de la COST 732 était de savoir si les procédures d'évaluation proposées par l'action sont largement acceptées par la communauté scientifique des développeurs et les réalisateurs du modèle. En mai 2007, la première version de la procédure d'évaluation a été publiée dans le but de fournir une base pour les discussions au sein de la communauté européenne. L'un des principaux objectifs de la COST 732 est celui d'établir les meilleures méthodes pratiques et une standardisation des CFD de modélisation lors de leur utilisation pour des applications météorologiques dans les zones urbaines. La procédure d'évaluation proposée par COST 732 est présentée dans trois documents qui sont accessibles au public en ligne à (<http://www.mi.uni-hamburg.de/Official-Documents.5849.0.html>)

- Contexte et justification du document pour soutenir le modèle d'orientation de l'évaluation et du Protocole, Version 1, mai 2007 [5].
- Modèle d'orientation et d'évaluation Protocole Document, Version 1, mai 2007 - un document autonome pour aider la mise en place et l'exécution d'un exercice d'évaluation du modèle [22].
- Principe de meilleure pratique pour la simulation CFD des écoulements dans l'environnement urbain, version 1, mai 2007 - basé sur les directives et recommandations publiées, qui traitent principalement avec la prédiction du débit moyen statistiquement stable et la turbulence dans les zones urbaines dans des conditions de neutralité stratification de densité [23].

Les recommandations formulées dans les documents énumérés ci-dessus ont été testés par COST 732 lui-même. Mock Urban Setting Test (MUST), ([11]; [12]), qui comprend des expériences sur le terrain et en soufflerie d'écoulement et de dispersion des expériences réalisées au sein et au-dessus d'un milieu urbain simulé composé de 120 conteneurs d'expédition standard de taille, a été sélectionné pour les études initiales. Les mesures en soufflerie dans un modèle à l'échelle (1: 75) de cette configuration ont été effectuées à l'Université de Hambourg [24] ; jusqu'à présent, plusieurs modélisations numériques (avec la plupart utilisant des modèles CFD) ont simulé les expériences MUST en soufflerie suivant la ligne directrice de l'évaluation du modèle. Les expériences utilisées ont deux principales directions du vent, 0 ° et -45 ° de l'écoulement du vent. Cette étude a été lancée à Athènes en

---

---

Octobre 2006 et elle est la base de COST 732 pour tester les procédures d'évaluation des modèles d'écoulement et de transport urbain. L'attention est accordée à la détermination de la qualité du modèle.

Plusieurs modèles CFD ont été utilisés par différents groupes de nombreux pays européens, notamment MISKAM, FLUENT, ADREA, Star-CD, FINFLO, CFX, MITRAS, TSU / M2UE, VADIS, Code\_SATURNE. Aussi les modèles non-CFD, comme Lasat, ADMS-Urban, RAMS, OML, ESCAPE, CALPUFF, ont reçu une attention au sein de COST 732. Pour la comparaison des résultats numériques avec des mesures expérimentales, les approches qualitatives et quantitatives ont été choisies, il y a une compréhension l'analyse des données commune qualitative et exploratoire en utilisant une comparaison graphique entre le modèle et les données. Cette comparaison entre les modèles est un moyen simple pour donner les avantages et les inconvénients des modèles.

Pour l'évaluation d'un modèle à la fois qualitative (par le biais des profils et des contours) et quantitative (par l'analyse statistique) des approches sont nécessaires, sinon les paramètres statistiques seuls pourraient négliger les lacunes du modèle.

Dans les résultats de notre modèle de la méthodologie proposé doit être analysé de manière combinée au moyen de :

- contours des composantes de la vitesse et l'énergie cinétique turbulente (TKE);
- profilés verticaux et horizontaux des composantes de vitesse et de TKE ;
- Les profils de concentration adimensionnelle ( $C^*$ ).

L'équipe de recherche européenne utilise seulement le cas d'écoulement à  $-45^\circ$  d'approche des mesures de concentration, le cas d'écoulement à  $0^\circ$  n'est pas disponible.

Plusieurs chercheurs ont utilisé des codes de calcul pour réaliser des simulations numériques pour les mesures de l'expérience MUST en soufflerie suivant la ligne directrice de l'évaluation du modèle. Les expériences effectuées à l'université de Hambourg ont utilisé deux principales directions du vent  $0^\circ$  et  $-45^\circ$ .

En 2009, Donnelly [25] a évalué des résultats d'une simulation numérique de la dispersion dans une zone urbaine idéalisée pour la modélisation d'intervention d'urgence dans le but d'évaluer les résultats d'une simulation numérique de la dispersion dans une région urbaine idéalisée a utilisé un code de calcul MISKAM, et il a obtenu des résultats dans le but d'une intervention d'urgence. Des comparaisons ont été faites entre les concentrations au niveau des sols observés au cours de l'expérience Mock Urban Setting Test (MUST), et dans la même année Márton Balczó [26], [27] a fait deux études ; la première pour modéliser numériquement l'écoulement et la dispersion des polluants dans les canyons de la rue avec la

---

---

plantation d'arbres, les simulations numérique avaient un impact sur la circulation de l'air et la dispersion des polluants dans la canopée urbaine de la rue après avoir été effectuées en utilisant le code de calcul MISKAM. La deuxième étude a utilisé le même code que précédemment pour réaliser une simulation numérique de Mock Urban MUST.

En 2010, Jörg Franke [6], a évalué l'étude des cas des modèles CFD RANS appliqués à MUST et les données de (Oklahoma City), l'accent est mis sur la partie de la validation du protocole, qui forme le noyau d'une évaluation quantitative. Deux cas de test de complexité ont été utilisés pour la validation, un réseau régulier de blocs dans le "Mock Urban Setting Test (MUST)" et le centre de (Oklahoma City (OKC)), à la fois comme objet d'une enquête dans un tunnel de vent. La même année Jörg Franke [28], a présenté un résumé du document « meilleur guide de pratique » produit dans le cadre de la "assurance de la qualité et de l'amélioration de la micro-échelle des modèles météorologiques" l'action COST européenne 732. La même année 2010, Aniko Rakai [29], a réalisé une simulation de CFD de flux sur un Mock Urban Setting Test ayant pour but de fournir une analyse des données sur l'utilisation de OpenFOAM pour modéliser les flux atmosphériques, avec l'aide de données obtenues dans le cadre COST 732 (assurance de la qualité et l'amélioration des modèles Microscale météorologiques). Les expériences ont été réalisées avec Open FOAM, par rapport à la soufflerie, FLUENT et les données de MISKAM, ont montré que Open FOAM peut être un outil approprié pour la modélisation de l'écoulement atmosphérique.

En 2011, Plusieurs chercheurs ont travaillé sur le COST 732. Silvana Di Sabatino [30], a publié un travail sur les fluctuations de concentration de modélisation et de l'exposition individuelle dans des environnements urbains complexes ; l'un des principaux problèmes à faire face à des rejets atmosphériques délibérés ou accidentels, qui dans de nombreux cas sont courts et ou qui donnent lieu à des concentrations élevées.

István Goricsán [8], a simulé le flux dans une ville idéalisée en utilisant différents codes CFD. Ce document est soumis à la session extraordinaire du séminaire HARMO11.

Silvana Di Sabatino [30], a publié un article sur le "COST 732" en pratique: exercice d'évaluation MUST, le but de cet article est de décrire l'utilisation d'une méthodologie générale adaptée à l'évaluation des modèles météorologiques micro-échelles appliqués à l'écoulement et des simulations de dispersion dans les zones urbaines.

Yongfeng QU et al. [31]. Ont procédé à la modélisation de radiatifs et convectifs effets avec une résolution du code du bâtiment. Dans de nombreuses études micro météorologiques avec la dynamique des fluides, la construction de la résolution de modèles supposent généralement

---

---

une atmosphère neutre. Néanmoins, les transferts radiatifs urbains jouent un rôle important en raison de leur influence sur le budget de l'énergie.

En 2012 Yongfeng QU et al. [31], ont réalisé un travail de thèse de doctorat sur la modélisation tridimensionnelle des échanges radiatifs et convectifs dans l'atmosphère urbaine. Dans le troisième chapitre il présenté une validation du modèle radiative dynamique avec les observations (expérience sur le terrain MUST) et compare trois systèmes de complexité croissante pour prédire le flux convectif.

En 2013 Silvana Di Sabatino et al. [32], ont présenté un travail sur les récents progrès dans la modélisation numérique de l'écoulement et de la dispersion dans les zones urbaines: Il s'agit d'un bref examen pour détecter les risques sanitaires associés à l'exposition à des concentrations élevées de polluants dans les villes, cette étude a motivé les recherches à améliorer les modèles numériques de la circulation à l'échelle locale et de dispersion. La modélisation numérique à rencontre certaines difficultés à cause de la complexite de la forme urbaine.



---

---

## **Ch. II : Présentation de l'expérience étudiée MUST :(Mock Urban Setting Test) :**

### **II.1 Introduction:**

Dans ce chapitre, on présente deux expériences étudiées MUST (Mock Urban Setting Test) ; la première expérience était la reproduction et l'extension du doit présenté (Biltoft [11], Yee [12]). Cette expérience a été effectuée en septembre 2001 à Grille Horizontale par l'Armée Américaine Dugway Proving Terre, localisée dans le Grand Désert de la Cuvette d'Utah nord de l'ouest des états unis d'Amérique (USA). Le doit présenté le site a été construit comme un baldaquin urbain idéalisé qui consiste en 120 récipients de la navigation placé dans collection de l'habitué (12 lignes de 10 obstacles). A Obtenu le dataset est assez unique à cause de haut spatial et résolution du temps données de la concentration du polluant passives.

Les raisons pour répéter cette campagne de champ dans un tunnel du vent c.-à-d. la deuxième expérience était la reproduction et l'extension d'ensemble de données existants. La première partie n'était pas une seule reproduction des dimensions de champ, mais aussi une variation légère des conditions de la mesure qui a montré une sensibilité et une incertitude des dimensions de champ. Les extensions de la mesure devraient montrer comment représentatif les dimensions du point sont pour behaviour de la totalité idéalisé le baldaquin urbain.

La mesure du champ du courant était principalement concentrée sur comme la collection de récipient guide le courant, c.-à-d. influencer le champ de la concentration du polluant passif. La première partie a consisté en grille de la mesure plutôt grossière pour trois directions du vent à altitudes différentes. La deuxième partie s'est concentrée sur beaucoup de plus petite région et l'a couvert avec beaucoup de maille dense de points de la mesure pour montrer en détail influence des récipients. La dernière partie de mesure du courant était mesure des profils verticale (u et composants w, la vitesse particulièrement verticale fond) et leur développement à travers la collection de récipient à places différentes envers récipients individuels (canyon de rue, canyon de rue le long de-vent, rue qui traverse).

Les données de champ fournissent la haute résolution du temps simultanée (50 ou 100 Hz) série du temps de concentration du polluant passive de tous les détecteurs dans le site (72 détecteurs). Ces données peuvent faire usage pour calculer des corrélations de la concentration spatiale dans la plume et estimation de polluant qui voyage temps dans ceci a idéalisé le baldaquin urbain. Cette mesure a aussi été répétée, validée et étendue pendant campagne du tunnel du vent (seulement 2 dimensions simultanées).

---

---

La dernière partie de la mesure de la concentration était la validation de souffle (parution instantanée) de campagnes. Nous répétions on répète à chaque parution du souffle individuel plusieurs fois (approximativement 70 fois) montré la variation de résultats obtenus dans conditions inchangées. Les variations du temps de la parution et le vent se hâtent a été exécuté pour vérifier Reynolds comptez l'indépendance. Le voyageant temps peut aussi être estimé de ces dimensions et il peut être comparé avec les résultats obtenus de dimensions de la corrélation de la concentration spatiale.

## **II.2 La première expérience présentée par Bilstoft [11] et Yee [12] :**

### **II.2.1 La campagne de mesures MUST: (Mock Urban Setting Test).**

MUST est une expérience de terrain, à échelle quasi réelle, organisée par “la Defence Threat Reduction Agency“, (DTRA) américaine, début septembre 2001. Elle a été conçue pour aider au développement et à la validation des modèles numériques, tout en évitant les problèmes d'échelles des expériences en soufflerie ou en veine hydraulique. L'expérience et les analyses des résultats sont décrites en détails dans Bilstoft [11] et Yee et Bilstoft [12].

### **II.2.2 Objectifs et description de l'expérience:**

Dans MUST, la canopée urbaine est représentée par des containers de transport, disposés régulièrement en 12 rangées de 10 containers, sur le terrain expérimental de l'armée américaine ‘US Army Dugway Proving Ground’, situé dans le désert de l'Utah aux Etats- unis, (les coordonnées de site étant  $40^{\circ} 12.606'N$ ,  $113^{\circ} 10.635W$ , à une altitude de 1310 m au dessus du niveau de la mer). Le terrain est plat et parsemé de buissons d'une hauteur de 50cm à 1m. La rugosité en amont de la canopée est estimée à  $z_0=0,04$  m (Yee et Bilstoft, 2004[12]). Les dimensions des obstacles sont 2,54 m de haut, 12,2 m de long et 2,42 m de large, l'espacement entre les lignes est de 12,9 m et entre les rangées est de 7,9 m, la surface totale de la grille ainsi formée étant d'environ  $(200 \times 200)$  m<sup>2</sup>. Sur la figure3.1 sont présentées les différentes vues de l'expérience.

L'expérience consiste en 63 rejets, dont 58 continus et 5 en bouffées, d'un gaz non réactif, le propylène ( $C_3H_6$ ), dont la masse volumique est proche de celle de l'air ( $\rho_g = 1,75 \text{ kg/m}^3$  pour une température de  $20^{\circ}C$ ), pour différentes conditions de vent (différents angles d'incidence, vitesse, turbulences, températures de l'air et condition de stabilités...) et différentes positions pour les rejets à l'intérieur ou à l'extérieur de la canopée (dépendant

---

---

principalement de la direction du vent), à différentes hauteurs: 0,15 m, 1,3 m, 1,8 m, 2,6 m et 5,2 m.

De nombreux organismes ont participé à cette expérience, permettant une instrumentation très riche: l'Army Research Laboratory (ARL), l'Université d'Arizona (ASU), le Dugway Proving Ground (DPG), la Defence Science Technology Laboratory (DSTL), le laboratoire Los Alamos National Laboratory (LANL) et l'Université de l'Utah (UU). La figure 3.2 représente une photo du dispositif expérimental comprenant la localisation des différents instruments de mesures qu'on utilise pour notre étude ainsi que les noms par lesquels on y fera référence par la suite:

Pour les mesures de vent, de turbulence et de température, des anémomètres/ thermomètres 3D et 2D de type soniques ont été placés en amont (sur le mat S à 30 m en amont et devant la première rangée d'obstacles) et à l'intérieur de la canopée (après la première rangée, sur la tour centrale de 32 m et sur les quatre mats de 8 m (A, B, C, D), à différents niveaux au-dessus et en dessous de la hauteur des bâtiments (voir figure 3.2 pour les détails).

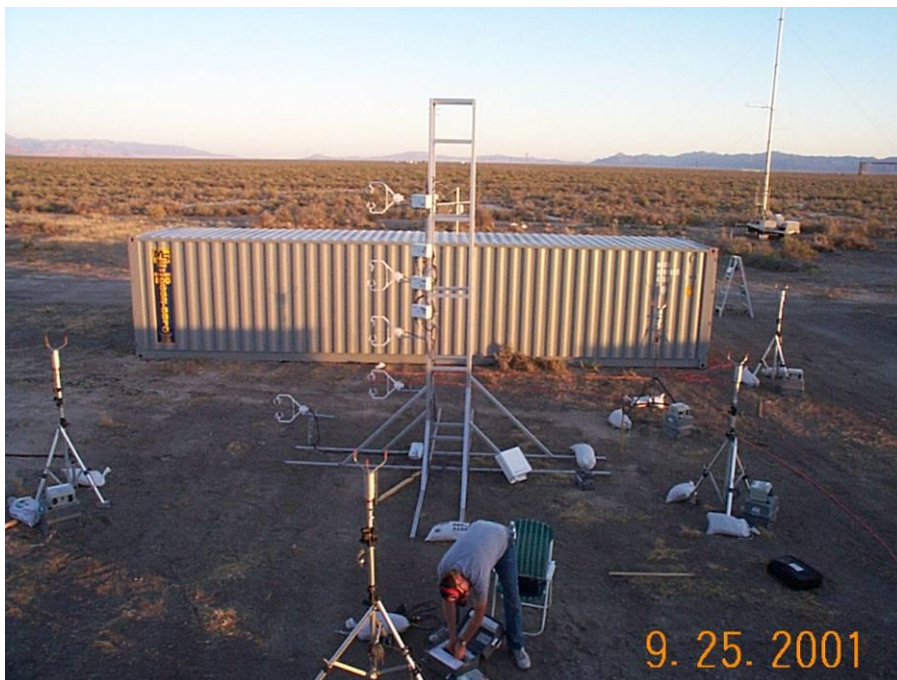
Les concentrations de gaz sont mesurées par des détecteurs à photo-ionisation (PIDS) placés sur quatre lignes horizontales (lignes 1 à 4 dans la figure 3.2) à une hauteur  $z = 1,6\text{m}$ . Des détecteurs PIDS sont également installés sur les mats de mesures: sur 8 niveaux sur la tour centrale de 32m et sur les mats de 8 m (A, B, C, D).

Le profil de température est mesuré en amont de la canopée (près du mat S) entre le sol et une hauteur de 2m par des thermomètres à fibre optique, avec des mesures sur 8 niveaux,  $z = (0, 0,01, 0,05, 0,10, 0,25, 0,5, 1 \text{ et } 2) \text{ m}$ .

Les températures de parois des bâtiments sont mesurées par des thermocouples placés sur les 5 surfaces exposées (le toit et les 4 murs) de quatre containers au milieu de la grille près du mat T de 32 m.

Les flux radiatifs solaires et terrestres sont mesurés par des actinomètres situés à 30 m en amont: des pyranomètres mesurent les flux incidents et réfléchis de grandes longueurs d'onde, des pyr géomètres pour les flux incidents et réfléchis de courtes longueurs d'onde.

Tout autour du site, des instruments permettent l'accès aux mesures météorologiques à méso-échelle: téthersonde, sodar, radar, plates-formes météorologiques méso-échelle.



**Figure II.1:** Photos des expériences MUST (Mock Urban Setting Test).



**Figure II.2:** Jeune Yee avec DSTL Gil Wind master sonique sur la tour de 6 m (photo par SAM Chang, ARL).



**Figure II.3:** La pipe de diffusion de propylène (photo par Chris Biltoft, WDTC).



**Figure II.4:** Les collecteurs ultra-violetés d'ion (UVIC) ont monté sur une tour de 6 m (photo par SAM Chang, ARL).

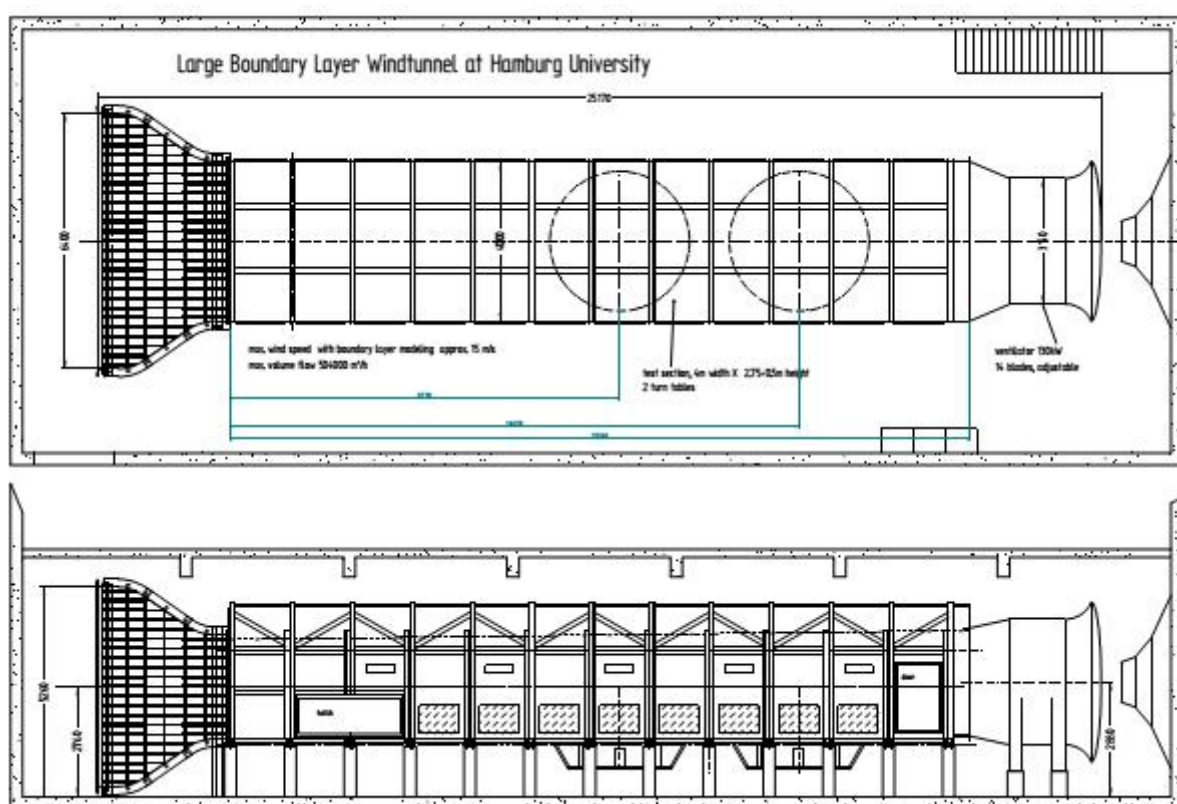
Les rejets de gaz ont été effectués le soir, la nuit ou à l'aube, sous des conditions de ciel clair, c'est-à-dire dans des conditions de stratification allant de stable à neutre à l'extérieur de la canopée, la durée de chaque expérience de rejet est de 15 min. Pour chaque cas, des mesures de concentration à l'intervalle de 15min, sont donc disponibles, alors que les mesures dynamiques sont faites en continu sur des périodes de plusieurs heures.

Outre l'analyse détaillée des résultats (Yee et Bilstoft [12] qui s'intéressent tout particulièrement aux fluctuations des concentrations), l'expérience MUST a déjà été exploitée pour des simulations numériques ou expérimentales: Hanna et al. [33] qui ont réalisé des simulations numériques avec leur modèle CFD FLACS, Camelli et al. [19] avec leur modèle VLES.

## II.3 La deuxième expérience présentée par Frank Harms et Klára Bezpalcová (2005), Yee et al. (2006) :

### II.3.1 La campagne de mesures de champ dans un tunnel du vent.

Les expériences ont été effectuées dans le Grand Tunnel du Vent de la Couche de la Limite 'WOTAN' à Université de Hambourg (Figure II.5). La facilité longue de 25 m fournit une section de l'épreuve longue de 18 m équipée avec deux platines et un plafond réglable. La section en colère du tunnel mesure 4 m de largeur et 2.75 à 3.25 m de hauteur, selon l'ajustement du plafond variable.

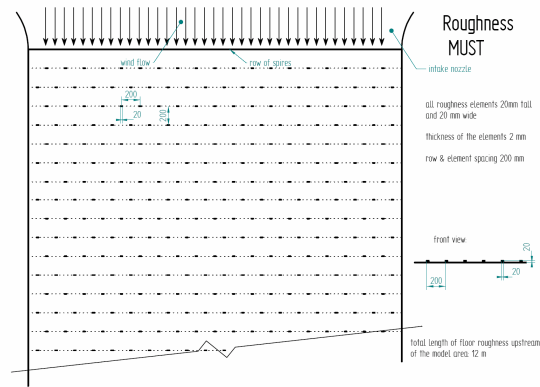


**Figure II.5:** Grand tunnel du vent de la couche de la limite WOTAN à Université de Hambourg. Le modèle a été placé sur la seconde (sous le vent) platine.

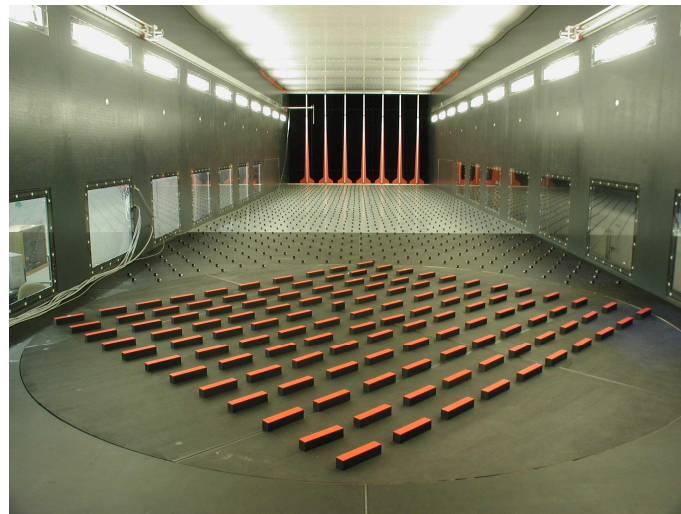
Les flèches de la figure II.6 et les éléments de la rugosité de la figure II.7 ont été utilisés pour développer la couche de la limite dans l'échelle 1:75.

Le plafond du tunnel du vent a été ajusté pour inclinaison de la pression négligeable le long de section de l'épreuve du tunnel du vent.





**Figure II.7:** Organisation de la rugosité.



**Figure II.8:** Modèle (-45° direction du vent) sur le tour t capable, les éléments de la rugosité, flèches et Prandtl tubent (entre premier et deuxième flèche) à l'intérieur de WOTAN enroulez le tunnel.

### II.3.2 Mesure du courant

Le système des coordonnées et son orientation sont représentés sur la figure II.9. Les Réceptifs ont été placés sur la platine et le centre de la platine a des coordonnées  $x = 0$ ,  $y = 0$  mm avec  $z = 0$  mm sur le pare terre et le titre du z-axe vers le haut (système droit). Ce système de la coordonnée est aussi dans le "coordinates\_overview.xls" appelé le "nouveau système de la coordonnée de l'échelle du modèle. Une lettre a été assignée à Chaque réceptif à la campagne de champ et nombre (0 à travers 9) définir sa place dans la collection. L'orientation de collection de réceptif et un vent approchant est montrée dans figure II.9. Cette direction du vent a été dénotée comme un cas du 0°. Autres orientations (rotations de la direction du vent) est dénoté d'après manière standard (l'angle négatif correspond pour tourner comme les aiguilles d'une montre de la direction du vent, c.-à-d. tourner dans le sens inverse des aiguilles d'une montre du modèle sur la table du tour).

La direction du vent est le même comme la x-axe direction pour toute l'exportation (cru) dossiers de données. Donc, le système de la coordonnée pour les directions du vent différentes que le 0° est tourné. Deux stratégies peuvent être appliquées sur ces données: pour tourner les coordonnées de points mesurés, c.-à-d. l'orientation du champ de récipient restera comme dans figure II.10 et direction du vent ne sera pas parallèle avec le x axe (il est appelé "système de la coordonnée de la nature" ou "nouveau "système de la coordonnée de l'échelle du modèle); ou tourner la collection de récipient pour l'angle inverse et la direction du vent restera parallèle avec le x axe, mais le récipient présente aura orientation différente pour chaque direction du vent (cela est appelé le système de la coordonnée" tourné").

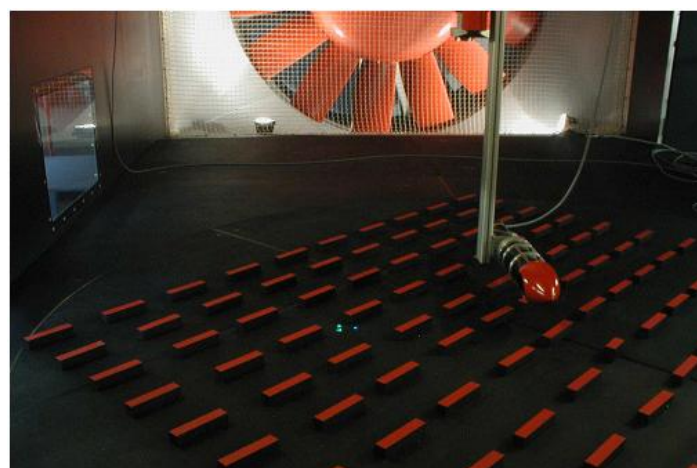
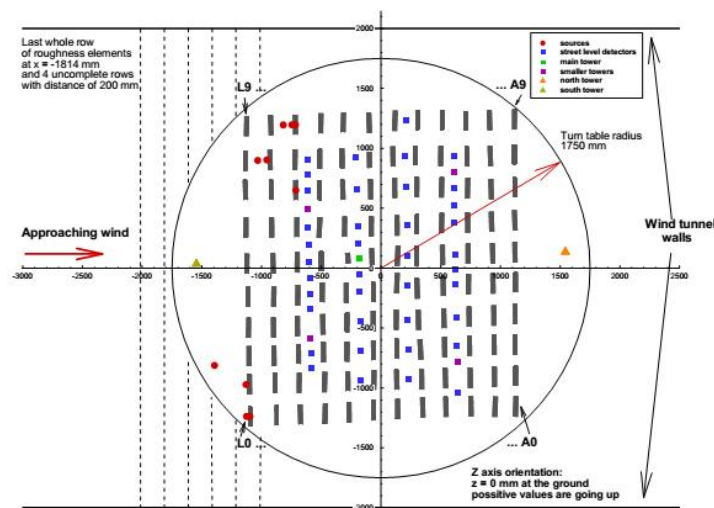


Figure II.9: Système des coordonnées et places des dimensions.

### Ch.III : Écoulements moyens et turbulents dans la couche de surface :

#### III.1 Les équations fondamentales dans la couche de surface:

Dans le formalisme eulérien, les écoulements dans la couche de surface sont décrits par les équations fondamentales de la dynamique des fluides (Stull, [34] ; Garratt, [35]), adaptées à l'échelle de la partie basse de l'atmosphère. Ce sont celles qui sont utilisées dans des applications à petite échelle.

##### III.1.1 Equation de Conservation de la masse:

L'équation de conservation de la masse (équation de continuité) s'écrit pour un fluide compressible:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{III.1})$$

A l'échelle de la couche de surface les variations temporelles  $\partial\rho/\partial t$  sont souvent négligées. C'est l'hypothèse anélastique qui permet de filtrer les ondes acoustiques tout en maintenant l'hypothèse de compressibilité. L'équation de continuité s'écrit alors:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{III.2})$$

##### III.1.2 Equations de La conservation de la quantité de mouvement:

La conservation de la quantité de mouvement est décrite par les équations de Navier – Stokes adaptées à la CSU (Couche de Surface Urbaine), les forces de Coriolis étant donc négligées et l'écoulement étant considéré dans un plan tangent à la sphère (c'est – à – dire que l'on néglige les termes de sphéricité):

$$\underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial t}}_{(I)} + \underbrace{u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_{(II)} = - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}}_{(III)} - \underbrace{\delta_{i3} g}_{(IV)} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}}_{(V)} \quad (\text{III.3})$$

- . (I) terme de variation transitoire.
- . (II) terme d'advection.
- . (III) terme forces de pression.
- . (IV) terme de gravité.
- . (V) représente les effets visqueux de l'air.

On peut considérer l'air atmosphérique comme un fluide newtonien, c'est-à-dire que les forces de cisaillements sont proportionnelles au gradient de vitesse. Le terme (V) s'écrit alors:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \mu \left[ \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \delta_{ij} \right\} \quad (\text{III.4})$$

où  $\mu$  est la viscosité dynamique ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ).

En considérant que la viscosité dynamique est homogène spatialement, on fait apparaître la viscosité cinématique  $\nu = \mu/\rho$  ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ).

### III.1.3 Equation d'état:

Pour tenir compte de la **teneur en vapeur d'eau d'une parcelle d'air**, l'équation d'état d'un gaz parfait s'écrit pour une parcelle d'air humide:

$$p = \rho R^* T_v \quad (\text{III.5})$$

où  $p$  est la pression de l'air,

$\rho$  la masse volumique

$R^*$  la constante des gaz parfaits pour l'air sec

$T_v$  la température virtuelle définie par:

$$T_v = T(1 + 0.61q) \quad (\text{III.6})$$

où  $q$  est l'humidité spécifique.

La variable thermique usuellement utilisée dans l'atmosphère est la température potentielle  $\theta$ , définie comme la température d'une parcelle d'air amenée adiabatiquement de sa position initiale à la pression de référence du niveau de la mer.

$$\theta = T \left( \frac{p_s}{p} \right)^{(R^*/C_p)} \quad (\text{III.7})$$

avec  $T$  la température de la parcelle d'air

$p_s$  la pression de référence au niveau de la mer prise égale à 1000 mb

$C_p$  la capacité calorifique du fluide à pression constante.

La température potentielle virtuelle est définie de même:

$$\theta_v = T_v \left( \frac{p_s}{p} \right)^{(R^*/C_p)} \quad (\text{III.8})$$

### III.1.4 Equation de conservation d'énergie :

L'équation de l'énergie (conservation de l'enthalpie) inclut les contributions du transport de la chaleur sensible, mais aussi de la chaleur latente est donnée par:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) + S_\theta \quad (\text{III.9})$$

où  $\lambda$  est la conductivité thermique moléculaire

$S_\theta$  un terme source additionnel qui peut inclure la chaleur latente lors des éventuels changements de phases ainsi que la divergence des fluides radiatifs.

### III.1.5 Equation de transport d'un polluant:

La dispersion d'un polluant (i) de concentration  $c_i$  est décrite par l'équation d'advection–diffusion:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial c_i}{\partial x_j} = D_i \frac{\partial^2 c_i}{\partial x_j \partial x_j} + R_i(c_1, c_2, \dots, c_N, T) + S_i \quad (\text{III.10})$$

où  $D_i$  est le coefficient de diffusion moléculaire massique

$R_i$  est le terme source ou puits par réaction chimique avec N autres constituants (qui dépend de la température T)

$S_i$  est un terme source additionnel, comme par exemple l'injection de polluant dans le milieu ou encore la décroissance radioactive.

### III.2 Prise en compte de la turbulence:

Dans la couche de surface urbaine, les écoulements sont fortement turbulents. Les variables varient en temps et en espace, de manière irrégulière, autour d'une valeur moyenne. Il existe plusieurs approches pour prendre en compte la turbulence, certaines d'entre elles seront présentées dans le cadre de la revue des différentes méthodes de modélisation. Une description de tels écoulements, (celle qui est celle adoptée dans le cadre de cette étude) et qui a été largement utilisée pour la description des écoulements atmosphériques, suite au formalisme de Reynolds (qui date de 1894) et qui décompose chaque variable en, la somme d'une valeur moyenne et d'une valeur turbulente:

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (\text{III.11a})$$

$$\rho = \bar{\rho} + \rho' \quad (\text{III.11b})$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (\text{III.11c})$$

$$\theta = \bar{\theta} + \theta' \quad (\text{III.11d})$$

$$c_i = \bar{c}_i + c_i' \quad (\text{III.11e})$$

avec les propriétés suivantes pour toute variable  $v$ ,  $w$  et toute constante  $a$ :

$$\overline{v'} = 0 \quad (\text{III.12a})$$

$$\overline{vw} = \bar{v}\bar{w} + \overline{v'w'} \quad (\text{III.12b})$$

$$\overline{v+w} = \bar{v} + \bar{w} \quad (\text{III.12c})$$

$$\overline{av} = a\bar{v} \quad (\text{III.12d})$$

$$\overline{\frac{\partial v}{\partial x_i}} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_i} \quad (\text{III.12e})$$

La valeur moyenne d'une variable peut être définie de différentes manières (Arya, [38]): la moyenne temporelle, spatiale et d'ensemble. La moyenne temporelle est la plus utilisée dans l'analyse d'observations à partir d'un point fixe: elle est la moyenne arithmétique d'une grandeur discrète observée un certain nombre de fois sur une période  $T$  ou l'intégrale d'une grandeur continue divisée par  $T$ . La moyenne spatiale est de même obtenue par la moyenne arithmétique d'un nombre fini d'observations sur un certain espace. Les moyennes temporelle et spatiale ainsi définies sont subjectives, dans la mesure où doivent être choisies, une période  $T$  ou une échelle spatiale  $L$ . C'est pourquoi la moyenne la plus couramment utilisée dans la théorie est la moyenne d'ensemble. Elle est définie comme la moyenne arithmétique d'un grand nombre de réalisations, répétées dans les mêmes conditions expérimentales. Pour un champ turbulent météorologique, respecter les mêmes conditions expérimentales est impossible en pratique et les moyennes utilisées sont les moyennes spatiale et temporelle.

### III.3 Equations moyennées:

#### III.3.1 Equation de Conservation de la masse:

En décomposant la vitesse selon (III.11a) dans l'équation de conservation de la masse (III.2), en utilisant pour  $\rho$  l'approximation de Boussinesq (qui considère que la variation de la masse volumique est faible dans la CLA et approxime  $\rho$  par  $\bar{\rho}$ , sauf pour les termes de flottabilité) et en moyennant l'équation ainsi obtenue en utilisant les propriétés (III.12), on obtient pour la valeur moyenne:

$$\frac{\partial \bar{\rho} u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{III.13})$$

#### III.3.2 Equations de la conservation de la quantité de mouvement:

De manière similaire, en décomposant dans (III.3)  $u_i$  et  $p$  selon (III.11a) et (III.11c), en utilisant pour  $\rho$  l'approximation de Boussinesq et en moyennant l'équation ainsi obtenue, l'équation moyennée de conservation de quantité de mouvement s'écrit:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \delta_{i3} g + \nu \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_j u_i}}{\partial x_j} \quad (\text{III.14})$$

La prise en compte de la turbulence fait ainsi apparaître des termes supplémentaires  $\overline{u_j u_i}$  qui représentent le flux turbulent de mouvement ou cisaillement de Reynolds. Pour la composante verticale, ce sont les termes de gravité et de gradient de pression et si on peut considérer l'état moyen en équilibre hydrostatique:

$$\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} = -g \quad (\text{III.15})$$

#### III.3.3 Equation de conservation de l'énergie:

En utilisant les décompositions (III.11a) et (III.11d), l'équation de l'énergie pour la valeur moyenne s'écrit:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_j \theta}}{\partial x_j} \right) + \overline{S_\theta} \quad (\text{III.16})$$

Le terme  $\overline{u_j \theta'}$  est le terme de flux turbulent de chaleur et le terme source  $\overline{S_\theta}$  tient compte des effets moyens des transferts radiatifs et de chaleur latente.

### III.3.4 Equation de transport d'un scalaire:

De même, en utilisant (III.11e) et en moyennant (III.10), on obtient:

$$\frac{\partial \overline{c_i}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \overline{c_i}}{\partial x_j} = D_i \frac{\partial^2 \overline{c_i}}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j c_i'}}{\partial x_j} + \overline{S_i} \quad (\text{III.17})$$

### III.4 Approches de fermeture des écoulements turbulents:

Le formalisme de statistique de Reynolds présenté dans cette section fait apparaître des termes de flux turbulents inconnus  $\overline{u_j u_i'}$ ,  $\overline{u_j \theta'}$ ,  $\overline{u_j c_i'}$ . Des équations du second ordre peuvent être établies afin de déterminer ces termes, mais font elles-mêmes apparaître de nouveaux termes du troisième degré. Le problème turbulent révèle ainsi un problème de fermeture. Une solution consiste à paramétrer les termes inconnus d'ordres supérieurs à l'aide de quantités connues. Dans la CLA, on utilise principalement des fermetures du premier et second ordre. Un schéma de fermeture du premier ordre, utilisé pour de nombreuses applications dans la CLA est présenté ici.

Ce schéma du premier ordre consiste à exprimer des flux turbulents selon le modèle de diffusivité proposé par Boussinesq [39, 40]. Ce modèle repose sur l'idée que le frottement turbulent est responsable d'échanges de quantité de mouvement de l'écoulement moyen et consiste à traiter les mouvements turbulents comme des mouvements moléculaires et à exprimer les flux turbulents en fonction des gradients moyens:

$$\overline{u_j u_i'} = -\nu_t \left[ \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \overline{u_k}}{\partial x_k} \right] \quad (\text{III.18a})$$

$$\overline{u_j \theta'} = -\frac{\lambda_t}{\rho C_p} \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial x_j} \quad (\text{III.18b})$$

$$\overline{u_j c_i'} = -K_t \frac{\partial \overline{c_i}}{\partial x_k} \quad (\text{III.18c})$$

avec  $\nu_t$  la viscosité turbulente cinématique et

$\lambda_t$  la conductivité thermique turbulente, avec  $\lambda_t/(\bar{\rho}C_p) = \nu_t/P_{rt}$ ,

$P_{rt}$  étant le nombre de Prandtl turbulent

$K_t$  la diffusivité turbulente, avec  $K_t = \nu_t/Sc_t$ ,

$Sc_t$  étant le nombre de Schmidt turbulent.

Les équations de la conservation du mouvement, de l'énergie et de transport d'un scalaire (III.14), (III.16) et (III.17) s'écrivent alors:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \delta_{i3} g - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\nu + \nu_t) \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (\text{III .19})$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{1}{\bar{\rho}C_p} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\lambda + \lambda_t) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} \right) + \bar{S}_\theta \quad (\text{III .20})$$

$$\frac{\partial \bar{c}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{c}_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (D_i + \frac{\nu_t}{Sc_t}) \frac{\partial \bar{c}_i}{\partial x_j} \right) + \bar{S}_i \quad (\text{III .21})$$

Reste alors à modéliser les coefficients de fermeture turbulente. Dans la revue de différentes approches pour modéliser les écoulements turbulents, il faut noter que ces relations ne reposent pas sur une théorie rigoureuse mais sur une simple analogie et si  $\nu, \lambda$  et  $D_i$  définissent des propriétés du fluide,  $\nu_t, \lambda_t$  et  $K_t$  définissent des propriétés de l'écoulement turbulent et dépendent donc du frottement et des conditions de l'écoulement (Arya, [38]).

Il existe en outre des cas connus où ce type de fermeture n'est pas applicable (e.g ; les flux à contre-gradient) et pour lesquels il faut prendre une fermeture d'ordre plus élevé comme Rij- $\epsilon$  ou une approche LES.

### III.5 Modélisation numérique des écoulements turbulents:

La difficulté de la modélisation des écoulements turbulents réside dans le fait qu'il n'y a pas de séparation entre les grandes échelles et les petites échelles: on ne peut pas traiter le comportement à grande échelle sans tenir compte des petites échelles et inversement. Si les

---

---

mouvements de grande échelle contiennent l'essentiel de l'énergie cinétique et sont responsables des échanges turbulents de quantité de mouvement, de chaleur et de masse, les mouvements de petite échelle sont principalement responsables de la dissipation de l'énergie cinétique turbulente, le transfert de l'énergie des grandes échelles vers les petites échelles se fait par un processus de cascade (Arya, [38]). Ce système d'équations, fortement non-linéaire, ne présente pas en pratique de solutions analytiques. Il existe néanmoins différentes méthodes numériques qui permettent de modéliser ces écoulements.

Je présente dans cette section différents outils numériques pour modéliser les écoulements turbulents avant de décrire plus en détails l'approche que nous avons choisie.

### **III.5.1 Simulation numérique directe – Direct Numerical Simulation (DNS):**

La simulation numérique directe consiste à résoudre les équations de Navier-Stokes en tenant compte de toutes les échelles du mouvement. D'après la théorie de Kolmogorov [41, 42], le rapport des échelles de longueur entre les plus grands et les plus petits tourbillons, est proportionnelle à  $Re^{3/4}$ ,  $Re$  étant le nombre de Reynolds de l'écoulement. On comprend alors les limites d'une telle approche lorsque l'on veut modéliser des phénomènes de grandes échelles. A titre indicatif, pour résoudre des phénomènes à l'échelle d'une centaine de mètres, pour des vitesses d'environ 1 m/s, et avec un nombre de Reynolds de l'ordre  $10^6$ , le rapport entre les plus grandes et les plus petites échelles est alors compris entre  $10^4$  et  $10^5$ , ce qui signifie que pour capturer toutes les échelles, il faut que les plus petites mailles aient une résolution de 1 à 10mm.

Une modélisation tridimensionnelle nécessiterait alors un nombre de mailles de  $10^{12}$  à  $10^{15}$ . Pendant longtemps, l'insuffisance des moyens informatiques interdisait toute approche de type DNS. Cependant aujourd'hui, avec l'apparition des super calculateurs et en exploitant le calcul parallèle, la DNS peut être envisagée. Comme nous le verrons dans la section suivante, cette méthode est encore réservée à des études à très petites échelles, un nombre de mailles de l'ordre de  $10^{12}$  étant encore largement irréaliste.

### **III.5.2 Large Eddy Simulation (LES):**

Afin de pallier à ces limites, dans la simulation des grandes échelles (Large Eddy Simulation), les mouvements de grandes échelles sont résolus explicitement, tandis que les effets des plus petites échelles sont représentés par les modèles simples. Cela permet de réduire considérablement le coût de calcul exigé par une approche DNS. De plus, la résolution explicite des grandes échelles fait de la LES une approche plus précise et plus fiable que l'approche des moyennes de Reynolds. Une modélisation LES consiste donc à

décomposer la vitesse  $u(x,t)$  en une composante résolue  $\bar{u}(x,t)$  et une composante résiduelle (ou composante sous-maille)  $u'(x,t)$ . Les équations de Navier Stokes ainsi 'filtrées' s'obtiennent à partir des équations standard (III.2 – III.3). L'équation de la conservation du mouvement comprend alors un terme  $\tau'_{ij}$  qui est le tenseur sous-maille de cisaillement, provenant des processus de petites échelles. La fermeture des équations s'obtient alors en modélisant le tenseur résiduel, le modèle le plus classiquement utilisé étant celui proposé par Smagorinsky [43]: le terme  $\tau'_{ij}$  est exprimé comme le produit du tenseur des contraintes de l'écoulement filtré  $\bar{S}_{ij}$  et d'une viscosité sous maille  $\nu_s$ :

$$\tau'_{ij} = 2\nu_s \bar{S}_{ij} = 2\nu_s \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{III.22})$$

La viscosité sous-maille est modélisée par:

$$\nu_s = l_s^2 \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}, \quad (\text{III.23})$$

où  $l_s$  est l'échelle de longueur de **Smagorinsky** donnée par:

$$l_s = C_s \Delta \quad (\text{III.24})$$

avec  $C_s$  le coefficient de Smagorinsky et  $\Delta = (\Delta_{x_1}\Delta_{x_2}\Delta_{x_3})^{1/3}$  la largeur du filtre (Pope, [44]).

Si l'approche LES est largement utilisée pour des études de petites échelles, elle est également utilisée pour les études de la couche limite atmosphérique de plus grande échelle: Beare et Macvean [45] utilisent ainsi des simulations LES pour des études de la couche limite stable en introduisant dans l'expression de la viscosité sous-maille  $\nu_s$  une fonction dépendant du nombre de Richardson.

### III.5.3 Reynolds Average Navier Stokes (RANS):

Une troisième approche pour modéliser les écoulements turbulents est l'approche statistique de Reynolds appliquée aux équations de Navier Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes). Si l'approche RANS donne des résultats moins fiables que les modèles de LES ou DNS, nous l'avons choisie car elle a l'avantage d'être moins coûteuse. Nous faisons en effet des simulations numériques à échelle réelle et malgré les avancées informatiques, une approche DNS n'est pas encore concevable, même à échelle locale.

Elle consiste à décomposer les variables en une valeur moyenne et une valeur fluctuante et mène au système d'équations (III.13)- (III.14)- (III.16), fermé par des relations de clôture turbulente (III.18a) à (III.18b). Reste alors à modéliser les coefficients de diffusion turbulente. Il existe pour cela plusieurs modèles:

### III.5.3.1 Le modèle de longueur de mélange:

Cette première formulation introduite par Prandtl [46] est un schéma à zéro équation de transport qui consiste à exprimer les coefficients de diffusion turbulente en fonction des paramètres de l'écoulement et de la géométrie:

$$\nu_t = l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right| \quad (\text{III .25a})$$

$$\frac{\nu_t}{P_{rt}} = l_m l_h \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right| \quad (\text{III .25b})$$

où l'on rappelle que  $P_{rt}$  est le nombre de Prandtl turbulent.

Les longueurs introduites  $l_m$  et  $l_h$  sont les longueurs de mélange pour le mouvement et la chaleur, qui sont choisies empiriquement. Près de la surface et dans un cas de couche limite stable,  $l_m$  est souvent estimée par  $l_m = k z$ . Si l'hypothèse de longueur de mélange a l'avantage de proposer une formulation simple, les relations empiriques sur lesquelles elle repose en préfigurent des limitations (Arya, [38]).

### III.5.2 Le modèle de Louis:

Ce modèle proposé par Louis [47] est souvent utilisé dans les systèmes de prévision météorologique. Il suit une formulation analogue à celle de Prandtl: les coefficients de diffusion turbulente sont calculés en fonction de la longueur de mélange  $l$  et du nombre de Richardson de gradient (Musson – Genon, [48]):

$$\nu_t = l^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right| F_m(R_i) \quad (\text{III .26a})$$

$$\frac{\nu_t}{P_{rt}} = l^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right| F_h(R_i) \quad (\text{III .26b})$$

où  $F_m$  et  $F_h$  sont des fonctions qui dépendent de la stabilité de l'atmosphère. Pour un cas stable:

$$F_m(R_i) = [1 + x_m b R_i (1 + d R_i)^{-1/2}]^{-1} \quad (\text{III .27a})$$

$$F_h(R_i) = [1 + x_h b R_i (1 + d R_i)^{1/2}]^{-1} \quad (\text{III .27b})$$

et pour un cas instable:

$$F_{m,h}(R_i) = \left[ 1 - (x_{m,h} b R_i) \left( 1 + 3bc \left( \frac{l^2}{z^2} \right) \left( \frac{|R_i|}{27} \right)^{1/2} \right) \right]^{-1} \quad (\text{III .28})$$

avec  $b = c = d = 5$ ,  $x_m = 2$  et  $x_h = 3$ .

### III.5.3 Le modèle k-l:

Afin de pallier à l'empirisme de relation (III.25a) et (III.25b) la viscosité turbulente est exprimée en fonction de l'énergie cinétique turbulente ( $k$ ) et une longueur de mélange  $l_m$ :

$$\nu_t = C_{lk} l_m k^{1/2} \quad (\text{III .29})$$

où  $C_{lk}$  est une constante.

Ce modèle est dit à une équation de transport, car il nécessite l'équation de transport de l'énergie cinétique turbulente qui peut s'écrire, en utilisant les relations (III.18a) et (III.18b) (Garratt, [37]):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -\frac{g}{\theta_v} \frac{\nu_t}{P_{rt}} \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial x_i} \delta_{i3} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (\text{III .30})$$

Dans le modèle  $k - l$ , le terme de dissipation de cette équation est paramétré en utilisant la relation de Kolmogorov (e. g. Musson – Genon, [48]):

$$\varepsilon = C_{l\varepsilon} \frac{k^{3/2}}{l_m} \quad (\text{III .31})$$

où  $C_{l\varepsilon}$  est une constante.

Les constantes,  $C_{lk}$  et  $C_{l\varepsilon}$  des équations (III.29) (III.31) et  $\sigma_k$  de l'équation (III.30) dans la couche de surface sont données dans les modèles classiques par le tableau III.1 (Pielke, [49]).

$\sigma_k$	$C_{lk}$	$C_{l\varepsilon}$
1.66	0.54	0.16

**Tableau III.1:** Constantes pour le modèle k-l (Pielke, [49]).

Le problème de fermeture consiste alors à déterminer la longueur de mélange.

### III.5.4 Le modèle $k - \varepsilon$ :

Si le modèle k - l est simple à mettre en œuvre, une limitation, à l'instar du modèle à zéro équation de transport, réside dans la détermination de la longueur de mélange. C'est pourquoi nous avons choisi le modèle de fermeture ( $k - \varepsilon$ ) à deux équations de transport (Launder et Spalding, [1]). Il consiste en effet à établir une équation non pas pour  $l_m$ , mais pour l'expression  $\frac{k^{3/2}}{l_m}$ , proportionnelle au taux de dissipation (équation III.31), ce qui fait

disparaître la longueur de mélange du modèle. La viscosité turbulente s'exprime alors par:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (\text{III. 32})$$

où  $C_\mu$  est une constante. Reste alors à établir l'équation pour la dissipation. Cette dernière s'obtient à partir de l'expression de la dissipation (III.31) et de l'équation de la composante fluctuante de vitesse:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{u_i} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (\text{III. 33})$$

où  $P$  est le terme de production par le cisaillement moyen et les forces de flottabilité donné par:

$$P = \nu_t \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - C_{3\varepsilon} \frac{g}{\theta_v} \frac{\nu_t}{P_{rt}} \frac{\partial \overline{\theta_v}}{\partial z} \quad (\text{III. 34})$$

avec, afin de ne tenir compte que de la contribution positive des termes de flottabilité:  $C_{3\varepsilon} = 0$  en atmosphère stable et  $C_{3\varepsilon} = 1$  en atmosphère instable (Viollet, [50]). Les autres constantes du modèle ( $k - \varepsilon$ ) proposés par Launder et Spalding [1] sont données dans le Tableau III.2.

$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$C_\mu$	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$
1	1.3	0.09	1.44	1.92

**Tableau III.2:** Constantes pour le modèle  $k - \varepsilon$  (Launder et Spalding , [1]).

Le modèle  $k - \varepsilon$  est largement utilisé dans la modélisation numérique des écoulements turbulents. Néanmoins, certaines applications en ont révélées des faiblesses. Ainsi, Byrne et Holdo [51] ont mis en évidence une surévaluation par le modèle du terme de dissipation de l'énergie cinétique turbulente. En présence d'obstacles, il a été également observé l'apparition d'un point de stagnation à proximité des parois, où l'énergie cinétique turbulente et la viscosité turbulente sont surévaluées (Kato, [52] ; Lien et Yee, [53]). Afin de pallier à ces faiblesses, plusieurs modèles ont été dérivés du modèle d'origine de Launder et Spalding [1].

Afin de compenser la surestimation du terme de dissipation, le modèle  $RNG - k - \varepsilon$  (pour 'renormalisation group') proposé par Yakhot et al. [54, 55] consiste à introduire un terme puits dans l'équation de la dissipation:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{u_i} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (\text{III. 35})$$

où  $R$  rend compte du non-équilibre du taux de contraintes de cisaillement de l'écoulement:

$$R = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{(1 + \beta_0 \eta^3) k} \quad (\text{III. 36a})$$

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon} \left[ \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right]^2 \quad (\text{III. 36b})$$

où  $\eta_0$  et  $\beta_0$  sont des constantes. Afin de contourner l'anomalie liée à l'apparition d'un point de stagnation près des parois, le terme de production être modifié par Kato [52], Lien et Yee, [53].

Si dans le modèle classique le terme de production  $P$  peut s'écrire sous la forme

$$P = C_\mu \varepsilon |\overline{S}|^2 \quad (\text{III. 37})$$

avec

$$|\overline{S}| = \frac{k}{\varepsilon} (2\overline{S_{ij}S_{ij}})^{1/2}, \quad \overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (\text{III. 38})$$

Il est modifié dans le modèle pour K- L par:

$$P = C_\mu \varepsilon |\overline{S}| |\overline{\Omega}| \quad (\text{III. 39})$$

avec:

$$|\overline{\Omega}| = \frac{k}{\varepsilon} (2\overline{\Omega_{ij}\Omega_{ij}})^{1/2}, \quad \overline{\Omega_{ij}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (\text{III. 40})$$

$\overline{\Omega_{ij}}$  Étant le tenseur de vorticité. Dans les zones où les contraintes sont irrotationnelles, typiquement près des parois où apparaît un point de stagnation  $|\overline{\Omega}| \approx 0$ , ce qui élimine la surproduction de  $k$ .

Si le modèle  $(k - \varepsilon)$  standard a été testé dans de nombreuses situations différentes, ce n'est pas le cas pour les modèles  $k - \Omega$  et  $\text{RNG}k - \varepsilon$ , dont les résultats peuvent être tributaires d'applications particulières.

Un point important à souligner est que les constantes des modèles  $k - l$  et  $k - \varepsilon$  proposées dans les tableaux III.1 et III.2 sont celles utilisées dans les modèles classiques. Elle sont cependant loin d'être universelles: dans les différentes études des écoulements atmosphériques, les jeux de constantes varient en fonction des conditions d'application des modèles; par exemple, pour les modèle  $(k - l)$ , s'ajoutent les constantes proposées par Bougeault et Lacarrère [56] ou Musson – Genon [48] et pour le modèle  $(k - \varepsilon)$ , les constantes utilisées par Duynkerke [57, 58], Musson – Genon [48] ou Kim et Baik [59], ces derniers appliquant le modèle  $\text{RNG} - \varepsilon$ .

**Ch. IV : Code de CHENSI :****IV.1 Introduction :**

L'objectif de ce code de calcul est de simuler les écoulements atmosphériques dans la couche limite de surface urbaine. On considère que tous les obstacles de la couche limite urbaine sont constitués de parallélépipèdes rectangulaire, ce qui conduit à ne considérer que des maillages tridimensionnels cartésiens, et éventuellement non homogènes c'est-à-dire dont la taille des mailles n'est pas constante dans chacune des trois directions.

Dans ce chapitre, nous exposons succinctement les choix que nous avons effectués lors de l'élaboration de ce code :

- Le modèle de turbulence adopté : le modèle du premier ordre à deux équations de Chen & Kim [60].
- Le modèle numérique utilisé : la méthode des volumes finis avec la disposition décalée des inconnues, également appelée méthode MAC (Marker And Cell) de Harlow & Welch [3].
- Le couplage vitesse – pression résolu par la méthode de compressibilité artificielle développée par Viecegli [61].
- Le conditionnement ou en particulier, le conditionnement en présence de paroi inspirée de la loi de paroi développée par Launder & Spalding [1].
- La discrétisation des différents termes et, en particulier, la discrétisation du terme d'advection par le schéma Hybrid de Spalding [62].

Le code de calcul CHENSI existe déjà sous différentes versions (Lévi-Alvarés, [63]; Costes, [64]). Celles-ci utilisent la méthode de discrétisation des différences finies avec la formulation advective des équations (IV-A). Ceci, associé au schéma de discrétisation du terme advectif de Peyret & Taylor [65], précis au premier ordre, pouvait occasionner des problèmes de conservation de la masse. C'est la raison pour laquelle il a été choisi d'écrire les

équations sous la forme conservative (IV-A), de les discrétiser par la méthode des volumes finis et d'utiliser le schéma Hybrid de Spalding [62], (précis à l'ordre 1 ou 2

selon le nombre de Péclet) pour discrétiser le terme advective. De plus, le modèle de turbulence de Chen & Kim [60] a été préféré par rapport au modèle  $\kappa-\varepsilon$  standard car il est plus adapté aux écoulements moyens distordus. D'autre part, il a fallu adapter la résolution du couplage vitesse- pression à la discrétisation par la méthode des volumes finis.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (\text{IV-A})$$

## IV.2 Le Modèle de Turbulence

Du fait qu'on effectue des simulations de la couche limite urbaine essentiellement en cycle diurne, on néglige l'humidité de l'air et les effets dus à la rotation de la Terre (force de Coriolis). Cependant, en adoptant la convention de sommation d'Einstein sur les indices grecs, les équations en moyenne de Reynolds deviennent :

$$\frac{\partial \overline{V_\alpha}}{\partial x_\alpha} = 0$$

$$\frac{\partial \overline{V_i}}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{V_\alpha V_i})}{\partial x_\alpha} = -\frac{\overline{T_1}}{T_r} g_i - \frac{1}{\rho_r} \frac{\partial \overline{p_1}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{V_i}}{\partial x_\alpha \partial x_\alpha} - \frac{\partial (\overline{v'_\alpha v'_i})}{\partial x_\alpha}$$

$$\frac{\partial \overline{T_1}}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{V_\alpha T_1})}{\partial x_\alpha} = \frac{\lambda}{\rho_r C_p} \frac{\partial^2 \overline{T_1}}{\partial x_\alpha \partial x_\alpha} - \frac{\partial (\overline{v'_\alpha T'_1})}{\partial x_\alpha}$$

Ou l'indice  $i$  varie de 1 à 3,  $x_i$  représente la  $i$ ème composante cartésienne,  $t$  le temps,  $\overline{V_i}$  la  $i$ ème composante cartésienne de la vitesse moyenne,  $v'_i$  la  $i$ ème composante cartésienne de la fluctuation de la vitesse autour de sa valeur moyenne,  $\overline{p_1}$  l'écart moyen entre la pression et la pression à l'état de référence supposé hydrostatique et adiabatique,  $\overline{T_1}$  l'écart moyen entre la température et la température à l'état de référence  $T_r$ ,  $T'_1$  la fluctuation autour de sa valeur

moyenne de l'écart entre la température et la température à l'état de référence,  $\rho_r$  la masse volumique de l'air sec à l'état de référence,  $g_i$  la ième composante cartésienne de l'accélération de la pesanteur,  $\nu$  la viscosité cinématique de l'air sec,  $\lambda$  la conductivité thermique de l'air sec et  $C_p$  la capacité calorifique massique à pression constante de l'air sec .

Il est à noter que l'on peut aussi travailler avec la température potentielle moyenne  $\bar{\theta}$ , en se servant de la relation (IV-B) reliant la température potentielle  $\theta$  à l'écart à la température de référence  $T_1$ . On constate alors que, du fait que ces deux grandeurs ne diffèrent que d'une constante additive, les équations restent quasiment les mêmes, seul le terme de flottabilité dans les équations de conservation de quantité de mouvement est modifié.

$$\theta(z) = T_1(z) + T_1(h_0) \quad (IV-B)$$

On voit donc apparaître de nouvelles inconnues : les tensions de Reynold  $\overline{v_i'v_j'}$  et les flux turbulents de chaleur  $\overline{v_i'T_1}$ . Le système à résoudre est donc ouvert, c'est -à- dire qu'il y a plus d'inconnues que d'équations. Le modèle de fermeture choisi est un modèle du premier ordre à deux équations appelé modèle K -  $\varepsilon$  (Launder & Spalding, [1]). Ce modèle relie les corrélations inconnues  $\overline{v_i'v_j'}$  au taux moyen de déformation et  $\overline{v_i'T_1}$  au gradient de température par l'intermédiaire de deux coefficients  $\nu_t$  et  $P_{rt}$ , appelés respectivement viscosité turbulente et nombre de Prandtl de la turbulent. Ces relations sont les suivantes

$$\overline{v_i'v_j'} = -\nu_t \left( \frac{\partial \overline{V_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{V_j}}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} k$$

$$\overline{v_i'T_1} = -\frac{\nu_t}{P_{rt}} \frac{\partial \overline{T_1}}{\partial x_i}$$

Avec  $k = \frac{1}{2} \overline{v_\alpha v_\alpha}$  l'énergie cinétique de turbulence et  $\delta_{ij}$  le symbole de Kronecker.

L'évolution de l'énergie cinétique de turbulence est donnée par l'équation modélisée suivante

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{V_\alpha k})}{\partial x_\alpha} = \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left( \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_\alpha} \right) + \nu_t \left( \frac{\partial \overline{V_\alpha}}{\partial x_\beta} + \frac{\partial \overline{V_\beta}}{\partial x_\alpha} \right) \frac{\partial \overline{V_\alpha}}{\partial x_\beta} + \frac{\nu_t}{P_{rt} T_r} \left( g_\alpha \frac{\partial \overline{T_1}}{\partial x_\alpha} \right) - \varepsilon \quad (IV.1)$$

Avec  $\varepsilon = \nu \frac{\partial \overline{v_\alpha}}{\partial x_\beta} \frac{\partial \overline{v_\beta}}{\partial x_\alpha}$  le taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence et  $\sigma_k$

la constante de modélisation du terme de diffusion de l'énergie cinétique de turbulence. Le

terme  $P = -\overline{v_\alpha v_\beta} \frac{\partial \overline{V_\alpha}}{\partial x_\beta}$ , modélisé par :  $P = \nu_t \left( \frac{\partial \overline{V_\alpha}}{\partial x_\beta} + \frac{\partial \overline{V_\beta}}{\partial x_\alpha} \right) \frac{\partial \overline{V_\alpha}}{\partial x_\beta}$ , représente la production d'origine dynamique de l'énergie cinétique de turbulence et le terme

$G = \overline{v'_\alpha T'_1} / T_r$  , modélisé par  $G = v_t (g_\alpha \partial \overline{T_1} / \partial x_\alpha) / (P_{rt} T_r)$  , représente la production d'origine thermique de l'énergie cinétique de turbulence.

Une nouvelle inconnue, à savoir le taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence, est apparue. Il faut donc une nouvelle équation.

L'équation la plus utilisée est l'équation modélisée suivante :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{V_\alpha \cdot \varepsilon})}{\partial x_\alpha} = \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left( \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_\alpha} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (P + G) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{IV.2})$$

Avec  $\sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}$  et  $C_{\varepsilon 2}$  : Constantes du modèle.

Et enfin, la viscosité turbulente est donnée par la relation

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{IV.3})$$

avec  $C_\mu$  une constante empirique, et le nombre de Prandtl turbulent  $P_{rt}$  est supposé constant et égal à 0,95.

Les relations (IV .1), (IV.2) et (IV .3) forment le modèle  $k - \varepsilon$  , dit standard, avec les valeurs des constantes figurant dans le tableau IV.1.

La valeur de constante  $C_{\varepsilon 2}$  est déduite de la décroissance d'une turbulence de grille, celle de  $C_{\varepsilon 1}$  est déduite de la zone à cisaillement constant d'un écoulement turbulent sur plaque plane. La valeur de la constante  $C_\mu$  est déduite de mesures dans des écoulements

$C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
0,09	1,44	1,92	1,0	1,3

**Tableau IV.1:**valeurs des constantes du modèle  $k - \varepsilon$  standard.

L'équilibre local (compensation entre production et dissipation) est à peu près réalisé en régime établi. Les valeurs des constantes  $\sigma_k$  et  $\sigma_\varepsilon$  sont celles recommandées par Launder et al [66].

**Castro & Apsley** [67] apportent une légère modification à ces constantes afin que le modèle soit totalement consistant avec les profils de la couche limite de surface. Dans ce cas, l'équation du taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence  $\varepsilon$  est vérifiée si l'on a

$$C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1} = \frac{k^2}{\sigma_\varepsilon \sqrt{C_\mu}} \quad (\text{IV.4})$$

avec  $k = 0,40$  la constante de Von Karman.

Le modèle étant très sensible à la valeur de la constante  $C_\mu$ , qui règle le niveau de turbulence, et à la valeur de  $C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1}$ , qui détermine l'équilibre entre production et destruction dans l'équation du taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence, la modification ne s'effectue donc que sur la valeur de la constante  $\sigma_\varepsilon$  qui est passée de 1,3 à 1,1, ce qui augmente la diffusion du taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence.

Raithby et Al. [68] ont montré que, pour une couche limite sur plaque plane rugueuse, la constante  $C_\mu$  valait 0,033. Comme Castro & Apsley [67], on conserve tout de même la valeur 0,09 pour la constante  $C_\mu$  car un changement de cette valeur nécessiterait un "recalibrage" numérique pour déterminer les nouvelles valeurs des constantes.

L'une des principales approches que l'on fait au modèle  $k-\varepsilon$  standard est sa surestimation de la production d'énergie cinétique de turbulence près des points d'arrêt. Hanjalic & Launder [69] ont montré que les constantes dans le sens de l'écoulement favorisent plus le transfert d'énergie des grandes échelles vers les petites que le simple cisaillement, ce qui augmente, par conséquent, le taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence.

L'équation du taux de dissipation d'énergie cinétique de turbulence doit donc être modifiée afin d'améliorer son comportement. Parmi toutes les modifications existantes, on adopte celle proposée par Chen & Kim [60] qui introduisent une seconde échelle de temps de production d'énergie cinétique de turbulence dans l'équation du taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence. Ceci permet au transfert d'énergie de répondre plus efficacement aux distorsions d'écoulement moyen dû, par exemple, aux points d'arrêt des écoulements importants, ce qui nous concerne particulièrement. Cette modification se résume au simple ajout d'un terme dans l'équation du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulence.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{V_\alpha \varepsilon})}{\partial x_\alpha} = \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left( \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_\alpha} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (P + G) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{C_{\varepsilon 3}}{k} (P + G)^2$$

Chen & Kim [60] déterminent les valeurs de constantes (Tableau IV.2) par optimisation numérique et comparaison avec des expériences :

$C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
0,09	1,15	1,9	0,25	0,75	1,15

**Tableau IV.2:**valeurs des constantes du modèle de Chen & Kim [60].

Cette amélioration de la prédiction du taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence permet ainsi un meilleur contrôle du développement de l'énergie cinétique de turbulence.

Dans le cas du modèle  $k - \varepsilon$  de Chen & Kim [60], la relation équivalente à la relation (IV.4) est :

$$C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1} - C_{\varepsilon 3} = \frac{k^2}{\sigma_\varepsilon \sqrt{C_\mu}}$$

On va modifier légèrement le jeu de constantes afin que cette relation soit vérifiée (Tableau IV.3).

$C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
0,09	1,15	1,9	0,25	0,75	1,07

**Tableau IV.3:**valeurs modifiées des constantes du modèle de Chen & Kim [60].

Il est à noter que l'on peut facilement revenir au modèle  $k - \varepsilon$  standard en annulant  $C_{\varepsilon 3}$  et en affectant les valeurs du modèle standard aux autres constantes.

Le système final à résoudre est donc le suivant :

$$\frac{\partial \overline{V_\alpha}}{\partial x_\alpha} = 0 \quad (IV.5)$$

$$\frac{\partial \overline{V_i}}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{V_\alpha V_i})}{\partial x_\alpha} = -\frac{\overline{T_1}}{T_r} g_i - \frac{1}{\rho_r} \frac{\partial \overline{p_1}}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \overline{k}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{V_i}}{\partial x_\alpha \partial x_\alpha} + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left( \nu_t \left( \frac{\partial \overline{V_\alpha}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{V_i}}{\partial x_\alpha} \right) \right) \quad (IV.6)$$

$$\frac{\partial \overline{T_1}}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{V_\alpha T_1})}{\partial x_\alpha} = \frac{\nu}{P_r} \frac{\partial^2 \overline{T_1}}{\partial x_\alpha \partial x_\alpha} + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left( \frac{\nu_t}{P_{rt}} \frac{\partial \overline{T_1}}{\partial x_\alpha} \right) \quad (IV.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{V_\alpha k})}{\partial x_\alpha} &= \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left( \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_\alpha} \right) \\ &+ v_t \left( \frac{\partial \overline{V_\alpha}}{\partial x_\beta} + \frac{\partial \overline{V_\beta}}{\partial x_\alpha} \right) \frac{\partial \overline{V_\alpha}}{\partial x_\beta} + \frac{v_t}{P_{rt} T_r} \left( g_\alpha \frac{\partial \overline{T_1}}{\partial x_\alpha} \right) - \varepsilon \end{aligned} \quad (IV.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{V_\alpha \varepsilon})}{\partial x_\alpha} &= \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left( \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_\alpha} \right) \\ &+ C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left( v_t \left( \frac{\partial \overline{V_\alpha}}{\partial x_\beta} + \frac{\partial \overline{V_\beta}}{\partial x_\alpha} \right) \frac{\partial \overline{V_\alpha}}{\partial x_\beta} + \frac{v_t}{P_{rt} T_r} \left( g_\alpha \frac{\partial \overline{T_1}}{\partial x_\alpha} \right) \right) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \\ &+ \frac{C_{\varepsilon 3}}{k} \left( v_t \left( \frac{\partial \overline{V_\alpha}}{\partial x_\beta} + \frac{\partial \overline{V_\beta}}{\partial x_\alpha} \right) \frac{\partial \overline{V_\alpha}}{\partial x_\beta} + \frac{v_t}{P_{rt} T_r} \left( g_\alpha \frac{\partial \overline{T_1}}{\partial x_\alpha} \right) \right)^2 \end{aligned} \quad (IV.9)$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (IV.10)$$

avec les valeurs des constantes sont celles données dans le Tableau IV.3.

Le système donné par les relations (IV.8), (IV.9) et (IV.10) est fermé. En effet, on a 8 équations pour 8 inconnues qui sont l'écart moyen entre la pression et la pression à l'état de référence  $\overline{p_1}$ , les trois composantes de la vitesse moyenne  $\overline{V}$ , l'écart moyen entre la température et la température à l'état de référence  $\overline{T_1}$ , l'énergie cinétique de turbulence  $k$ , le taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence  $\varepsilon$  et la viscosité turbulente  $v_t$ .

Par la suite et par souci de simplification des écritures, les grandeurs moyennes seront notées  $\phi$  au lieu de  $\overline{\phi}$

### IV.3 Le Modèle Numérique

#### IV.3.1 La méthode des volumes finis

Les quatre équations (IV.6), (IV.7), (IV.8) et (IV.9) écrites en formulation conservative peuvent se mettre sous la forme

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \text{div} \left( \overrightarrow{V} \phi \right) = \text{div} \left( \alpha \overrightarrow{\text{grad}} \phi \right) + S \quad (IV.11)$$

Ou  $\alpha$  représente un coefficient de diffusion et  $S$  le terme de production- destruction.

La méthode de discrétisation la plus adaptée à cette formulation conservative est la méthode des volumes finis (Peric and Ferziger, [70]). Cette méthode utilise la forme intégrale de la relation (IV.11), qui donne après application du théorème de Green –Ostrogradski.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \phi d\Omega + \int_{\Gamma} \phi \vec{V} \cdot \vec{n} d\Gamma = \int_{\Gamma} \alpha \overrightarrow{\text{grad}} \phi \cdot \vec{n} d\Gamma + \int_{\Omega} S d\Omega$$

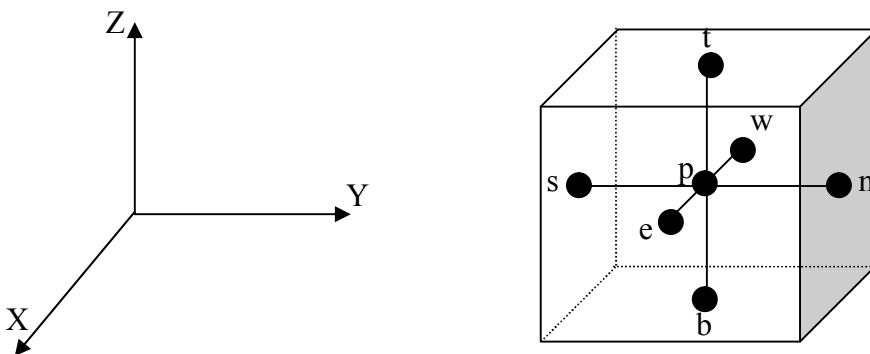
avec  $\Omega$  le volume d'intégration, aussi appelé volume de contrôle,  $\Gamma$  et  $\vec{n}$  respectivement le contour et la normale extérieure unitaire du volume d'intégration.

Le domaine  $D$  est entièrement décomposé en volume de contrôle élémentaires  $\Omega_j$ , appelés mailles, ne se chevauchant pas les uns les autres afin de préserver le principe de conservation de la grandeur  $\phi$ . La Figure IV.1 représente un volume de contrôle élémentaire et les notations utilisées dans le cas tridimensionnel cartésien. Le point  $P$  représente un nœud de calcul et les centres des facettes sont repérés par les lettres minuscules (e pour east, w pour west, n pour north, s pour south, t pour top et b pour bottom). Les lettres majuscules correspondantes représentent les nœuds de calcul voisins du point  $P$  dans la direction considérée.

L'intégrale d'une quantité  $f$  sur le volume de contrôle élémentaire  $\Omega_j$  est estimée par

$$\int_{\Omega_j} f d\Omega = f_P \omega_j$$

ou  $f_P$  représente la valeur de  $f$  au point  $P$  et  $\omega_j$  le volume de  $\Omega_j$ .



**Figure IV.1** : Volume de contrôle élémentaire et notations dans le cas tridimensionnel cartésien.

L'intégrale d'une quantité  $\vec{f}$  sur la surface  $\Gamma_j = \bigcup_{i \in \{e, w, n, s, t, b\}} S_{ij}$  contour du volume de contrôle élémentaire  $\Omega_j$  et de normale extérieure unitaire  $\vec{n}_j$ , est estimée par

$$\int_{\Gamma_j} \vec{f} \cdot \vec{n}_j d\Gamma_j = \sum_{i \in \{e, w, n, s, t, b\}} \int_{S_{ji}} \vec{f} \cdot \vec{n}_{ji} dS_{ji} = \sum_{i \in \{e, w, n, s, t, b\}} f_{ji} \gamma_{ji}$$

Où  $f_{ji}$  est la valeur de  $\vec{f} \cdot \vec{n}_{ji}$  au centre de la facette  $S_{ji}$  du volume de contrôle élémentaire  $\Omega_j$  et  $\gamma_{ji}$  est l'aire de la facette  $S_{ji}$ .

Dans le cas tridimensionnel cartésien, la valeur  $f_{ji}$  est obtenue par simple interpolation linéaire entre le nœud P et le nœud I voisin, à savoir E, W, N, S, T, ou B.

### IV.3.2 La disposition des inconnues

La disposition des inconnues est de type décalé, encore appelée méthode Marker and Cell (Harlow & Welch, [3]) :

- les grandeurs scalaires  $\varphi$ , telles que l'écart moyen entre la pression et la pression à l'état de référence  $p_1$ , l'écart moyen entre la température et la température à l'état de référence  $T_1$ , l'énergie cinétique de turbulence  $k$ , le taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence  $\mathcal{E}$ , la viscosité turbulente  $\nu_t$ , sont localisées au centre de chaque maille.
- Les composantes cartésiennes de la vitesse sont localisées au centre des facettes à normale extérieure positive (Figure IV.2)

Un premier avantage de cette disposition est que la valeur des grandeurs scalaires  $\varphi$  représente la valeur moyenne de cette grandeur sur la maille et que chaque composante de la vitesse représente le flux volumique moyen à travers la facette. Cette absence d'interpolation pour calculer le flux à travers une maille est très bénéfique pour l'équation de conservation de la masse. Un autre avantage de cette disposition est que cela simplifie l'expression des termes de diffusion et de pression, tout en gardant une bonne précision du schéma. Un dernier avantage, et non des moindres, de cette disposition est que la localisation des nœuds.

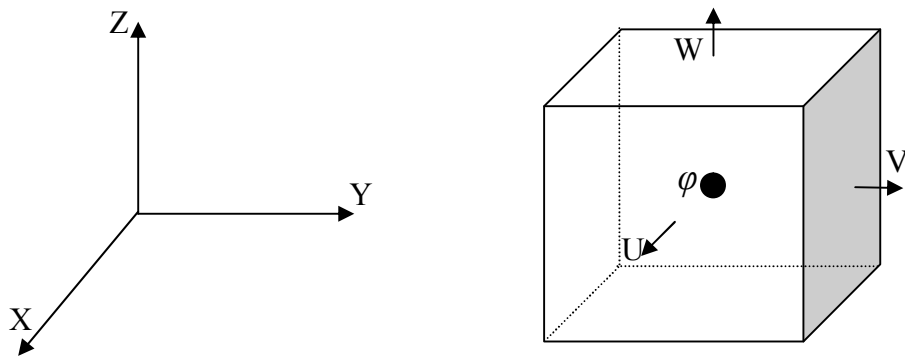


Figure IV.2 : Disposition décalée des inconnues dans le cas tridimensionnel cartésien.

De pression entre les nœuds de vitesse assure un fort couplage vitesse- pression, ce qui permet d'éviter des oscillations sur les champs de pression et de vitesse. En effet, la différence de pression entre deux nœuds "scalaires" adjacents représente la "force motrice" pour la composante de la vitesse située entre ces deux nœuds.

Du fait de l'utilisation d'un maillage décalé, les volumes de contrôle élémentaire dépendent de la variable considérée (Figure IV.3).

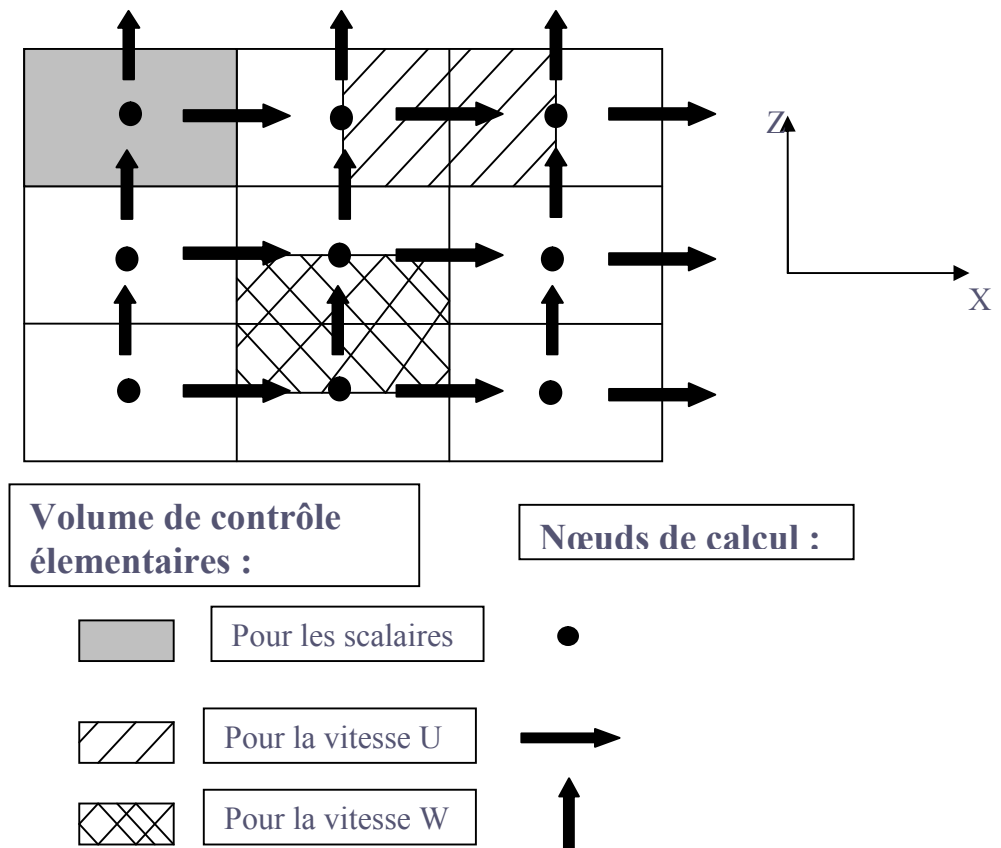


Figure IV.3 : Volumes de contrôle élémentaires dans le cas bidimensionnel.

On ne constate donc que les volumes de contrôle élémentaires pour les scalaires correspondant aux mailles, alors que pour les composantes des vitesses, ce sont deux demi – mailles adjacentes.

## IV.4 Les Conditions aux limites

### IV.4.1 La loi de paroi

Deux méthodes sont essentiellement utilisées pour la mise en œuvre des conditions limite en présence d'une paroi :

- adopter un système d'équations adapté à la zone proche de la paroi, c'est-à-dire résoudre explicitement l'écoulement jusqu'à la paroi, tel que le modèle à bas nombre de Reynolds de Launder & Sharma[1].
- adopter une modélisation globale de l'écoulement près de la paroi, appelée loi de paroi (Launder & Spalding, [1]).

Le code de calcul CHENSI-Volumes Finis est un outil devant permettre la simulation des écoulements dans la couche limite urbaine. Les parois rencontrées sont donc fortement rugueuses et non homogènes. Les écoulements très proches de la paroi sont très perturbés, donc très difficiles à simuler. Par conséquent, l'utilisation des lois de paroi semble s'imposer.

Dans une couche limite pleinement développée sur une plaque plane, il existe près de la paroi une zone dans laquelle le flux de quantité de mouvement normal à la paroi est indépendant de la distance à cette paroi, et dans laquelle le profil de vitesse moyenne tangentielle est logarithmique. En supposant que l'écoulement est localement en équilibre, c'est-à-dire que la production et la dissipation se compensent, on obtient la relation suivante entre l'énergie cinétique de turbulence  $k$  et la vitesse de frottement  $u^*$ .

$$u^* = C \frac{1}{\mu}^{1/4} \sqrt{k} \quad (\text{IV.21})$$

Par conséquent, le flux de quantité de mouvement normal à la paroi peut s'écrire

$$\tau = \rho u_*^2 = \rho C \frac{1}{\mu}^{1/4} \sqrt{k} \cdot k \bar{U} / \ln \frac{d}{z_{0mp}}$$

Où  $\bar{U}$  représente le module de la vitesse moyenne tangentielle à la distance  $d$  de la paroi dont la longueur de rugosité dynamique est  $z_{0mp}$ . Cette distance doit bien évidemment être telle qu'on se situe effectivement dans la zone logarithmique. Ceci constitue la condition

limite en présence d'une paroi rugueuse pour le champ de vitesse moyenne et introduit un couplage entre la dynamique et la turbulence.

Dans le cas de la prise en compte des effets thermiques, deux possibilités de conditions limites de paroi se présentent : température imposée ou flux normal imposé. Dans le cas d'un flux de chaleur à la paroi connu et égale à  $H_S$ , le flux de chaleur normal à la paroi s'écrit simplement  $H = H_S$ .

Dans le cas d'une température à la paroi connue et égale à  $T_s$ , le flux de chaleur normal à la paroi s'écrit alors en utilisant l'hypothèse d'équilibre local (relation IV.21)

$$H = -\rho C_p \mathbf{u}^* \theta^* = -\rho C_p C_\mu^{1/4} \sqrt{k} \frac{T - T_s}{P_{rt} \left( \frac{1}{k} \ln \frac{d}{z_{0mp}} + P_{rug} \right)}$$

Ou la résistance au transfert de chaleur dans le cas d'une surface rugueuse

$$P_{rug} = 3,15 P_r^{0,695} \left( \frac{1}{E_{rug}} - \frac{1}{E_{lis}} \right)^{0,359} + 0,274 E_{rug}^{0,6} P_{lis}$$

On rappelle que, pour l'air, on a  $P_r = 0,71$ ,  $P_{rt} = 0,95$ ,  $E_{lis} = 8,6$  et  $P_{lis} = -2,32$ . On suppose, de plus, que le régime est dynamiquement complètement rugueux.

Par conséquent, en utilisant toujours l'hypothèse d'équilibre local, on a :

$$E_{rug} = \frac{30 z^*}{h_s} = \frac{z^*}{z_{omp}} = \frac{v}{\mathbf{u}^* z_{omp}} = \frac{v}{C_\mu^{1/4} \sqrt{k} z_{omp}}$$

Quant aux quantités turbulentes, on utilise encore l'hypothèse d'équilibre local. Ainsi, le flux de quantité de mouvement normal à la paroi  $\tau$  étant indépendant de la distance à la paroi, on en déduit que l'énergie cinétique de turbulence ( $k$ ) est constante selon la normale à la paroi, ce qui se traduit par :

$$\frac{dk}{dn} = 0.$$

D'autre part, du fait de l'hypothèse d'homogénéité spatiale de la couche limite pleinement développée sur une plaque plan, le terme de production d'origine dynamique de l'énergie cinétique turbulence  $P = -\overline{v'_\alpha v'_\beta} \partial V_\alpha / \partial x_\beta$  s'écrit :

$$P = \frac{\tau}{\rho} \frac{\partial \bar{U}}{\partial n}$$

Quant au terme de production d'origine thermique de l'énergie cinétique de turbulence

$$G = -\overline{v'_\alpha T'_1} g_\alpha / T_r, \text{ il s'écrit : } G = \frac{-\vec{g} \cdot \vec{n}}{T_r} \frac{H}{\rho C_p}$$

avec  $\vec{n}$  la normal unitaire extérieur de la surface. Enfin, l'hypothèse d'équilibre local conduit à écrire la dissipation d'énergie cinétique de turbulence sous la forme :

$$\varepsilon \approx P = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{U}}{\partial n} \right)^2 = \frac{u^{*3}}{kd} = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{kd}$$

Il est à noter que des problèmes peuvent se présenter dans les zones de séparation ou d'attachement car les hypothèses de couche limite pleinement développée n'y sont évidemment pas vérifiées. On note, d'autre part, que toutes ces expressions de conditions limites de paroi restent valables dans le cas de parois dynamiquement lisses à condition de

remplacer :  $Z_{0m}$  par  $\frac{Z^*}{E_{lis}} = \frac{\nu}{\left( C_\mu^{1/4} E_{lis} \sqrt{k} \right)}$ .

Chaque paroi est caractérisée par :

- Une couche de mailles, dans laquelle et appliquée la loi de paroi (Figure IV.4).
- La normale extérieure à cette paroi.
- Les paramètres physiques, tels que la longueur de rugosité dynamique de la paroi, la température ou le flux de chaleur à la paroi.

Un bâtiment représenté par une juxtaposition de parallélépipèdes rectangles, est donc un ensemble de surfaces orientées à l'intérieur duquel tous les champs sont annulés.

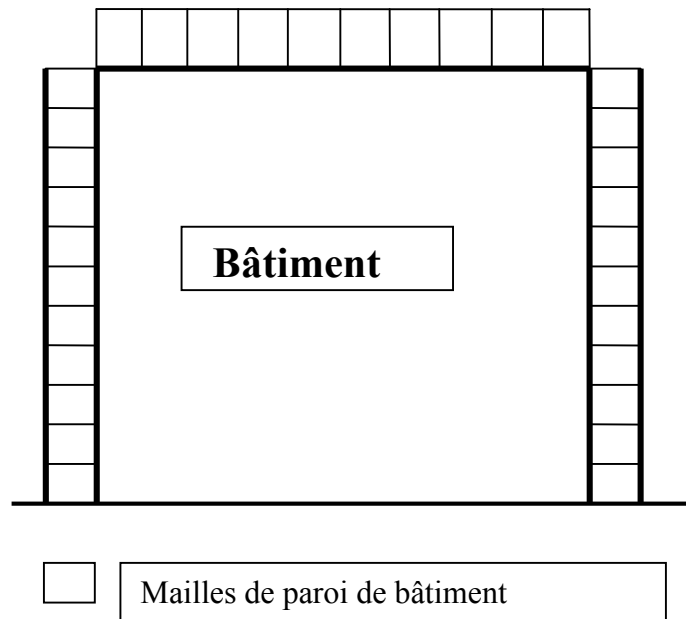


Figure IV.4 : Mailles de paroi.

#### IV.4.2 Les autres conditions aux limites

Les conditions d'entrée sont représentées par des conditions aux limites de type Dirichlet : la valeur de la variable est imposée sur la face du domaine de calcul.

Les frontières dites libres sont traitées par des conditions limites de type Neuman : le gradient de la variable selon la normale à la face du domaine de calcul est nul.

Lorsque l'écoulement présente un plan de symétrie, on ne considère qu'un demi- domaine de calcul on impose au champ de vitesse d'être dans le plan de symétrie en annulant la composante de la vitesse normale au plan et en appliquant des conditions limites de type Neuman sur les deux autres composantes.

Dans le cas d'un écoulement bidimensionnel, la condition limite de type Neuman sur la composante longitudinale de la vitesse sur la face de sortie  $\partial U / \partial x = 0$  est impliquée, du fait que l'écoulement est incompressible  $\partial W / \partial z = 0$ . Or, si à la base du domaine se trouve une paroi ou  $U = 0$ , cette condition impose une vitesse verticale nulle sur toute la face de sortie, ce qui peut entraîner un redressement non physique de l'écoulement. Il peut donc être préférable d'appliquer une condition moins contraignante du type  $\partial^2 U / \partial x^2 = 0$ .

Dans la simulation de couches limites de surface, les conditions limites de type Neuman ne sont pas satisfaisantes au sommet du domaine (Costes, [64]). En effet, elles ne sont pas compatibles avec une couche à flux constant, qui a pour caractéristique

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{u^*}{k(z - h_{dp})} \quad (\text{IV.22})$$

$$\frac{\partial k}{\partial z} = 0 \quad (\text{IV.23})$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{-u^{*3}}{k(z - h_{dp})^2} \quad (\text{IV.24})$$

avec  $h_{dp}$  la hauteur de déplacement de la surface. En fait, en prenant pour  $U^*$  la valeur de la vitesse de frottement amont et pour  $h_{dp}$  la hauteur de déplacement de la surface amont, ces trois relations fournissent des conditions limites de sommet de domaine compatibles avec une couche limite de surface, à condition de prendre soin de placer la limite supérieur du domaine de calcul suffisamment haut pour que les perturbations engendrées par le sol sur la couche limite en amont ne l'atteignent pas.



---

---

## **Ch.V : Procédure de la simulation numérique :**

### **V.1 Contexte :**

La dispersion de pollution atmosphérique d'un produit peut être étudiée selon différents aspects:

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

L'emploi de modèles numériques pour l'évaluation de la dispersion des polluants d'un produit présente de nombreux avantages par rapport à des expérimentations : la rapidité de l'étude et la possibilité d'envisager un grand nombre de cas. Toutefois, les essais à grande échelle ou sur maquette permettent aussi de connaître les phénomènes à modéliser et par conséquent de participer au développement des outils de calcul.

Dans le présent chapitre, on s'attachera à présenter la campagne expérimentale MUST l'université de Hambourg (Bezpalcova and Harms, [24]) qui servira de cas-test pour la validation de Code CHENSI. On insistera sur les données disponibles, paramètres qui nous permettront de mettre en place les différentes simulations sous Code CHENSI. Le but de la simulation numérique effectuée est d'évaluer les performances du modèle en comparant les résultats numérique obtenus par ce dernier avec les résultats expérimentaux obtenus d'après l'étude de la dispersion d'un scalaire passif en milieu urbain simplifié et de comparer les performances globales à celles obtenues par le biais d'autres codes européens.

### **V.2 La campagne expérimentale**

#### **V.2.1 Description de la campagne de mesures**

Un exercice numérique détaillé basé sur la configuration de MUST (Mock Urban Setting Test), l'ensemble de données a été réalisé par les participants de l'action COST 732 Le MUST (Mock Urban Setting Test) était une campagne de mesure à grande échelle sur un arrangement de conteneurs de 40 pieds dans l'Utah comme décrit par Yee et Bilstoft, [12] essais en soufflerie de la même disposition ont été effectuées à Hambourg (Leitl et al., [7]).

Dans cette étude, les simulations sont répétées en utilisant le code de calcul CHENSI, la même grille de calcul pour vérifier l'amélioration du modèle décrit dans la section précédente.

Pour expérience MUST (Mock Urban Setting Test) en soufflerie, les 120 obstacles de l'expérience à grande échelle ont été modélisés à l'échelle 1:75 et positionnés sur les souffleries au tour d'une table comme le montre la figure 1. Les dimensions des obstacles sont 2,54 m de haut, 12,2 m de long et 2,42 m de large, l'espacement entre les lignes est de 12,9 m et entre les rangées est de 7,9 m, la surface totale de la grille ainsi formée étant d'environ  $(100 \times 100) \text{ m}^2$ .

Les conditions d'écoulement d'approche dans la soufflerie ont été ajustées pour répondre à l'écoulement d'approche mesurée en pleine échelle pour deux cas à  $0^\circ$  et à  $-45^\circ$ .

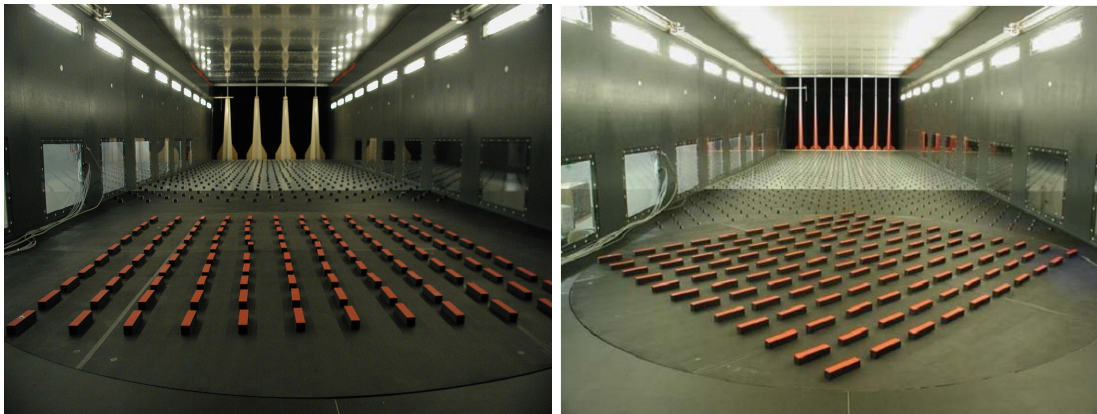


Figure V.1: Situation pour MUST expérience du tunnel du vent (Bezpalcova and Harms, [24]).

## V.2.2 Données expérimentales disponibles:

### V.2.2.a Données mesurées

La campagne expérimentale réalisée par les participants de COST 732. Le MUST (Mock Urban Setting Test) était une campagne de mesure à grande échelle sur un arrangement de conteneurs de 40 pieds dans l'Utah comme décrit par Yee et Bilstoft,[12]. Les essais en soufflerie de la même disposition ont été effectués à Hambourg (Leitl et al. ,[7]). Différentes sources de données sont disponibles dans la littérature scientifique, sans pour autant arriver un véritable consensus. Pour l'étude présentée, on utilisera les données de (Olesen et Berkowicz, [10]).

### **V.2.2.b. Données interprétées**

Un nombre très élevé d'exploitations a été réalisé de ces jeux de données, en particulier l'importance de ces données turbulentes dans les conditions aux limites du modèle Code CHENSI. Les données issues de (Olesen et Berkowicz,[10]) seront exploitées ainsi que celles qu'on a obtenues par une méthode itérative, basée sur les gradients de vitesse, l'énergie cinétique turbulente et de concentration. Les données mesurées et interprétées utilisées pour la mise en place des simulations Code CHENSI sont regroupées dans les résultats finaux.

### **V.2.3 Outils de calcul :**

La modélisation numérique présente a priori des avantages certains par rapport aux techniques physiques qui sont les essais in situ ou à échelle réduite, ceci réside dans:

- Rapidité de l'étude
- ;
- Possibilité d'envisager un grand nombre de situations.

L'évolution des outils numériques de dispersion s'est faite parallèlement à la capacité des ordinateurs, même si certaines techniques de calcul sophistiquées ont des origines assez anciennes.

Les modèles numériques de dispersion peuvent se ranger par ordre de complexité croissante en trois principales familles :

- 1- les modèles gaussiens ;
- 2- les modèles intégraux ;
- 3- les modèles CFD (Computational Fluid Dynamics).

Globalement, les deux premiers types d'outils s'attachent à modéliser la dispersion à partir d'équations paramétrées et simplifiées. Les temps de calcul sont courts, de l'ordre de la minute. Ils peuvent être mis en œuvre à partir d'un matériel informatique de type PC.

La troisième famille résout directement le système d'équation décrivant les mécanismes physiques de la dispersion. Les temps de calcul sont plus longs, de l'ordre de l'heure, voire de la journée. Ce type d'outil fonctionne généralement sous station de calcul.

### V.3 Mise en place des simulations Code CHENSI :

Pour mener à bien la comparaison entre observations et prévisions, on tâchera de reproduire les conditions expérimentales et micro-météorologiques caractéristiques de chaque expérience de la campagne COST 732 (MUST). Ceci concerne notamment le maillage, les conditions de rejet ainsi que les conditions initiales et aux limites du domaine.

#### V.3.1. Le maillage

- ❖ Le but de la génération du maillage est de définir l'ensemble d'éléments ou de nœuds dans lesquels notre code va calculer les paramètres de l'écoulement, en se basant sur la résolution des équations de Navier-Stokes par la méthode des volumes finis.
- ❖ La génération du maillage du domaine de calcul (figure V.2): maillage raffiné à proximité des bâtiments et du sol.
- ❖ Le type de maillage choisi est le maillage inhomogène à progression arithmétique.

#### Fichier de définition du maillage:

- Le nombre maximal des mailles dans chaque direction (x, y, z) est:

$N_x = 299$  mailles.

$N_y = 330$  mailles.

$N_z = 19$  mailles.

$N_{\text{tot}}$  (nœuds) = 1761110 nœuds, au total.

- Raison minimale de la progression arithmétique de la taille des mailles: 1.011.

- Raison maximale de la progression arithmétique de la taille des mailles: 1.27.

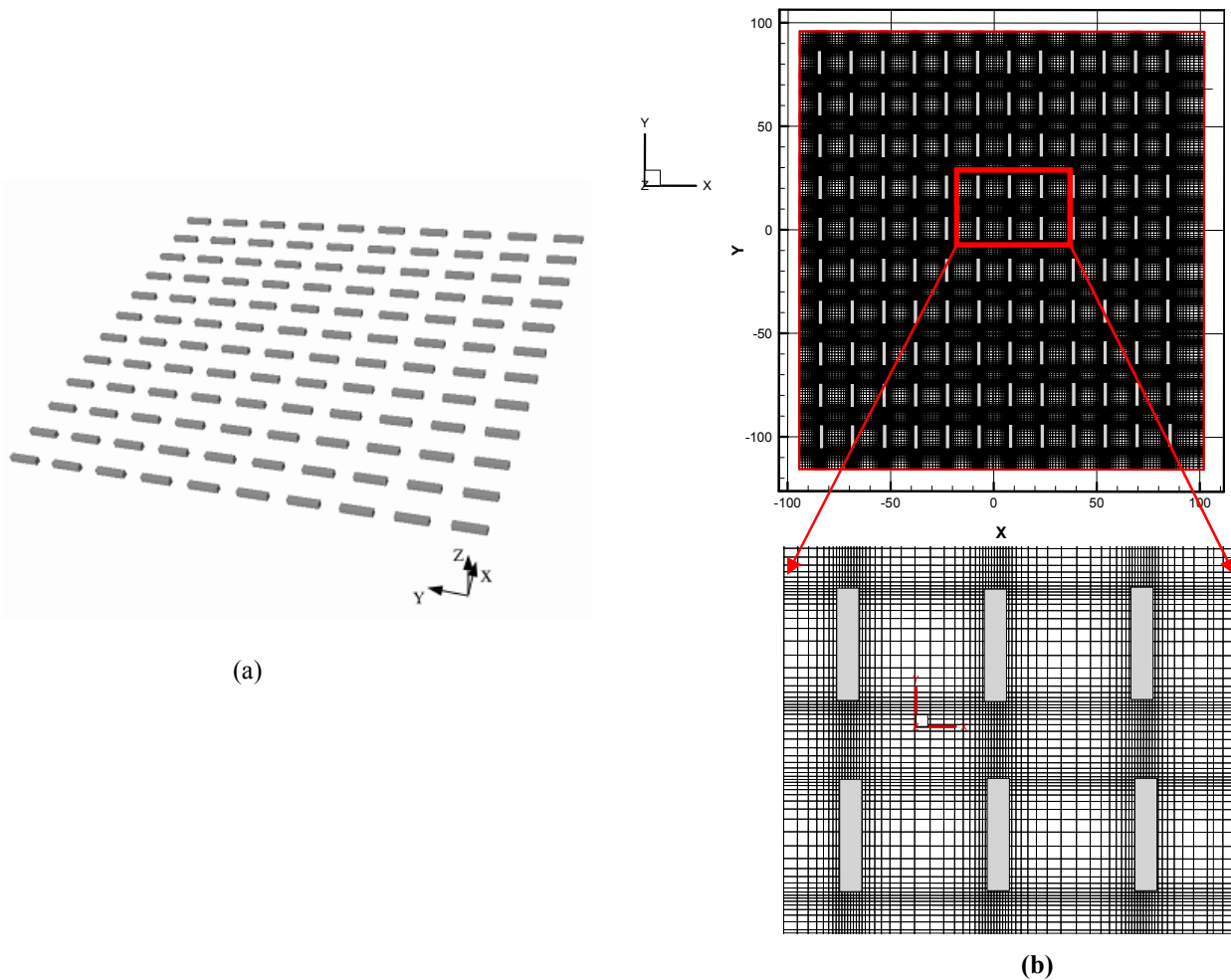
#### ❖ Maillage dans le plan (x, y)

\* Le nombre des mailles de chaque containers sur l'axe (x): 8mailles ; pour l'axe (y): 16 mailles.

\* Pour la rue sur l'axe (x): 16mailles ; pour l'axe(y): 14mailles.

#### ❖ Maillage dans le plan (y, z):

Le nombre des mailles de chaque container sur l'axe (z): 8 mailles.



**Figure V.2:** Domaine de la simulation a) domaine tridimensionnelle b) coupe horizontale (maillage de calcul utilisé pour les simulations numériques).

### V.3.2 Conditions de rejet

Pour toutes les expériences « Prairie Grass modélisées », on considèrera dans la suite de l'étude une vitesse de rejet ainsi que des paramètres turbulents ( $k$ ,  $\varepsilon$ ), correspondant à un rejet passif sans effet d'écoulement. Le débit massique rejeté sera adapté selon les conditions expérimentales propres à chaque cas.

### V.3.3 Les conditions aux limites et initiales

Implémenter des conditions aux limites et initiales est fondamental dans le processus de

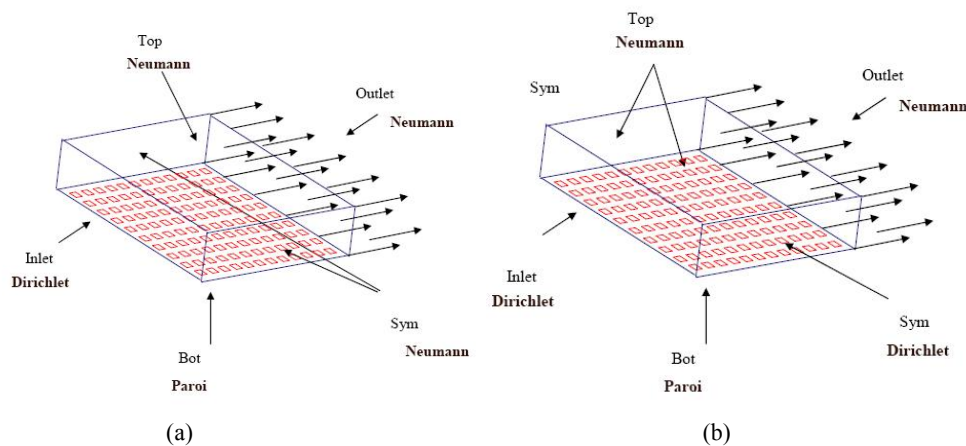
modélisation numérique en ce qu'elles alimentent les calculs, à l'instant initial et tout au long de la période de simulation.

### V.3.4 Les conditions aux limites

Fixer des conditions aux limites et initiales est fondamental dans le processus de modélisation numérique, elles alimentent les calculs, à l'instant initial et tout au long de la période de simulation. Les conditions aux limites sur les variables principales diffèrent selon les frontières du domaine considéré comme le montre la figure V.3. Les conditions aux limites latérales sont fixées par la direction du vent.

Pour le cas du vent à incidence  $0^\circ$  décrit à la figure V.3.a, sur la face d'entrée [plan (y-z) pour lequel  $x = 0$ ] et la face de la condition de Dirichlet a été imposée pour le profil de vitesse d'entrée pour l'énergie cinétique turbulente. Au niveau du sol, les conditions classiques à la paroi ont été utilisées, et pour les autres faces, la condition de Neumann a été imposée.

Pour le cas du vent à incidence  $-45^\circ$  décrit à la figure V.3.b, sur la face d'entrée [plan (y-z) pour lequel  $x = 0$ ] et la face de symétrie [plan (x-z) pour lequel  $y = 0$ ], la condition de Dirichlet a été imposée pour le profil de vitesse d'entrée pour l'énergie cinétique turbulente. Au niveau du sol, les conditions classiques à la paroi ont été utilisées, et pour les autres faces, la condition de Neumann a été imposée.



**Figure V.3 :** Conditions aux limites pour les deux cas implémentés dans Code\_CHENSI a)  $0^\circ$  et b)  $-45^\circ$ .

### V.3.5 Conditions de paroi rugueuse :

La paroi inférieure est la seule frontière réellement physique du domaine discrétisé. Caractérisé par sa longueur de rugosité dynamique  $z_0$ , le sol est supposé imperméable au fluide : une contrainte tangentielle est imposée pour la vitesse et les autres scalaires

reçoivent une condition de flux nuls (condition de type Neumann homogène). Même pour le deuxième cas (-45).

### V.3.6 Conditions d'entrée :

La vitesse du vent en terrain ouvert suit généralement un profil en loi logarithmique:

$$U(z) = \frac{U^*}{K} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{V.1})$$

tels que

$$\left\{ \begin{array}{l} U^* = 0,192 \text{ m/s} \text{ est la vitesse de frottement,} \\ K = 0,4 \text{ est la constante de Von Karman,} \\ z \text{ est l'altitude et} \\ z_0 = 0,017 \text{ m est la longueur de rugosité.} \end{array} \right.$$

avec:

$$U^* = \frac{k U_{ref}}{\ln(z_{ref}/z_0)} \quad (\text{V.2})$$

où  $U_{ref} = 3 \text{ m/s}$  est la vitesse de référence,  $z_{ref} = 8,78 \text{ m}$  la hauteur de référence et  $k$  est l'énergie cinétique turbulente est donnée par :

$$k = \frac{U_*^2}{C_\mu^{1/2}} \quad (\text{V.3})$$

où  $C_\mu = 0,09$  est une constante du modèle  $k - \varepsilon$ .

Pour calculer le taux de dissipation la formule suivante a été utilisée.

$$\varepsilon = \frac{U_*^3}{K \cdot z} \quad (\text{V.4})$$

Ainsi, les profils d'entrée adoptés en utilisant le code CHENSI, sont représentés sur les figures ci-dessous (figure V.4 et figure V.5).

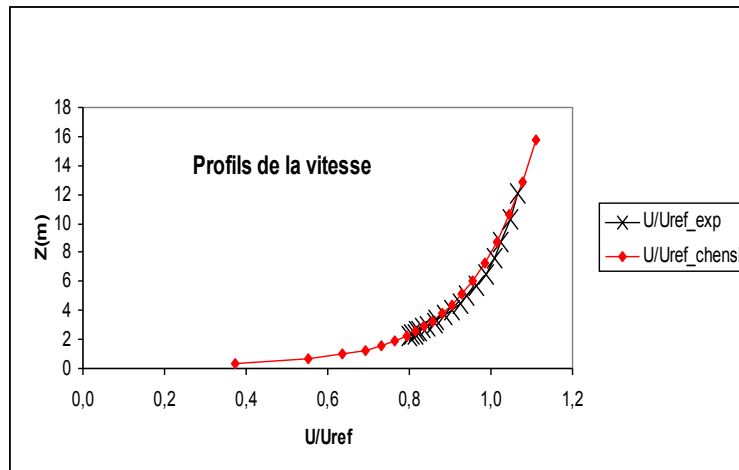


Figure V.4: profil de vitesse d'entrée.

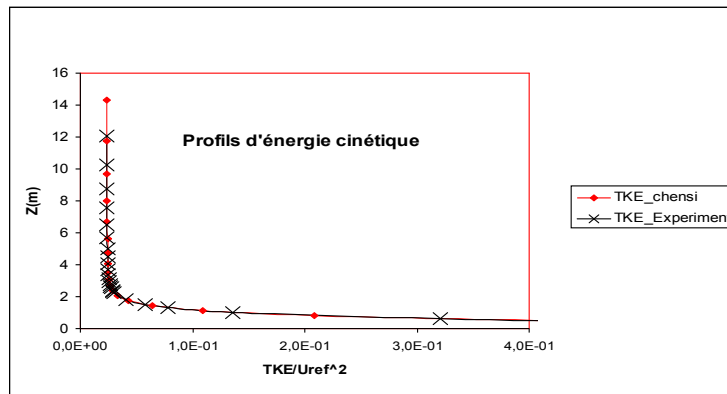


Figure V.5 : Profil d'entrée de l'énergie cinétique de turbulente.

### V.3.7 Paramètres de calculs

Certains paramètres ou propriétés physiques sont introduits par défaut dans le code\_CHENSI. On ne cite ici que ceux qui peuvent influencer notre étude de validation du modèle. Par défaut, l'atmosphère est caractérisée par une pression de référence  $P_0 = 1013.25$  Pa, une température de référence  $T_0 = 288.15$  °K et un débit massique  $Q = 1.66 \cdot 10^{-6}$  kg/s. Ce débit massique est aussi celui imposé au traceur passif. L'humidité de l'atmosphère n'étant pas un paramètre influent sur notre étude, nous considérerons son effet nul.

**V.3.8 Aspects numériques :**

La résolution de l'écoulement est menée et décrite par les équations en instationnaire, sur un nombre d'itérations suffisant pour satisfaire la convergence temporelle des calculs. De ce fait, les simulations effectuées compteront généralement 50000 itérations pour un nombre égal à 1761110 nœuds, au total, variable en temps et en espace, d'environ 1s pour l'itération. La durée totale d'une simulation, est de l'ordre de 15heurs 30 minutes, sera cependant réduite par la parallélisations des calculs sur plusieurs processeurs.

## Ch.VI : Résultats et discussion:

L'ensemble des données a été réalisé par les participants de l'action COST 732 dans le but de détailler un exercice dont la configuration était MUST (Mock Urban Setting Test) qui est une campagne de mesure à grande échelle comme elle a été décrite par Yee et Bilitoft [12], en 2004. Les essais ont été réalisés en soufflerie dont la disposition des canopées est indiquée à cette de l'équipe de recherche de l'université de Hambourg (Leitl et al. [7]), en 2007.

Dans le cadre de cette étude, on présente contribution ayant 'étude numérique de la dispersion d'un scalaire passif en milieux urbains simplifiés' en utilisant le code de calcul CHENSI développé par Jean François Sini [71]. On a utilisé la même grille de calcul adoptée par CHENSI pour vérifier l'amélioration du modèle.

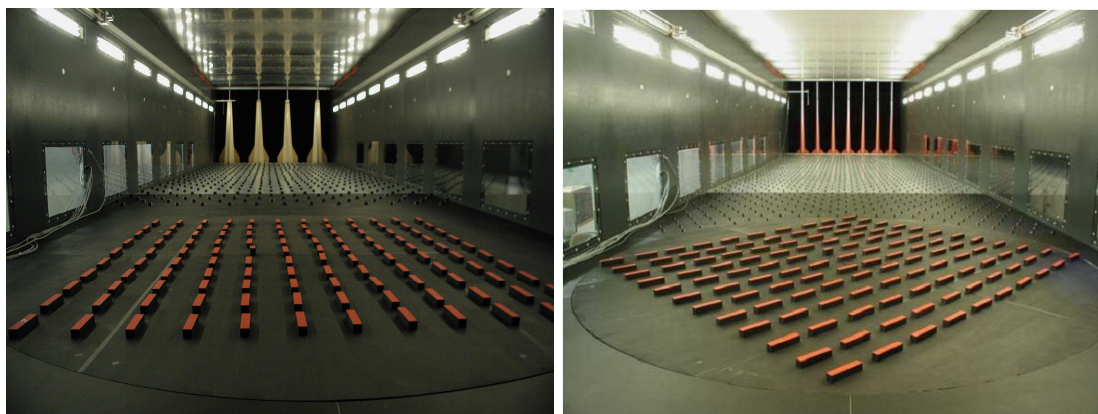
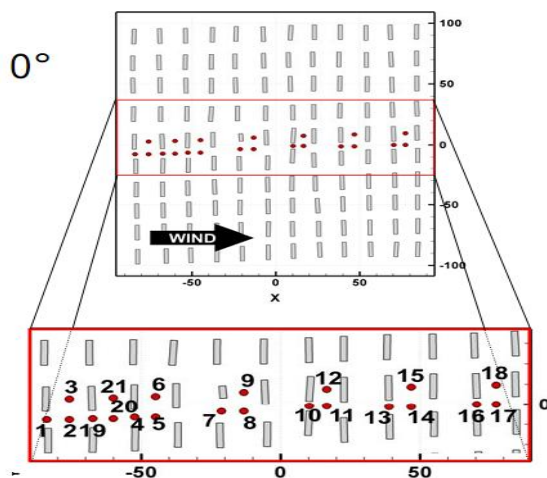


Figure VI.1: Expérience du tunnel du vent MUST (Bezpalcova and Harms, [24]).

### VI.1 Comparaison des modèles numériques et CHENSI avec les données expérimentales (MUST) dans le cas de $0^\circ$ .

Trois modèles CHENSI, MISKAM et FLUENT ont été validés en considérant les conditions d'admission non uniformes. Il a été procédé à une comparaison directe des champs dynamiques entre les mesures en soufflerie et les simulations numériques.

Dans les figures VI.3, VI.4 et VI.5, sont représentées les vitesses moyennes et de l'énergie cinétique turbulente calculée sur les trois grilles pour 21 tours, qui sont représentatives des «ruelles», «Rue étroite» (tour 1, 4, 7, 10, 13, 16 et 19), «Croisement de quatre obstacles» (tour 2, 5, 8, 11, 14, 17 et 20) et «entre deux obstacles (rues larges)» (tour 3, 6, 9, 12, 15, 18 et 21), comme le montre la figure VI.2.



**Figure VI.2:** Les points peuvent être classés en trois groupes de sorte que la tour 1 représente un «rue étroite», tour 20 un «croisement», et la tour 21 une «rue large» pour le cas de  $0^\circ$ .

### VI.1.1 Le composant U:

L'accord entre observé et modélisé des données du rapport des vitesses ( $U/U_{ref}$ ) en amont de l'obstacle a été très satisfaisant, cependant, tous les modèles sont en bonne concordance les uns avec les autres et les mesures expérimentales à l'exception des tours T04, T07, T08, T10, T11 et T12 comme le montre la figure VI.3.

Dans la figure VI.3.a tous les modèles dans des tours de «rues étroites» à l'exception des tours T04, T07 et T10 ont surestimé de vitesse ( $U/U_{ref}$ ) près de l'obstacle au vent. Tous les modèles dans les tours de «croisements» à l'exception des tours T08 et T11 ont surestimé la composante de vitesse près de l'obstacle au vent (Figure VI.3.b). CHENSI, MISKAM et FLUENT ont publié des résultats très similaires pour les profils des composants de flux de vent au niveau du plan de centre d'obstacles. En termes de vitesse longitudinale  $U$  représentée sur les profils verticaux, l'accord entre les modèles et l'expérience a été très satisfaisante, sauf en aval de canopée. Les résultats de la figure VI.3.c montrent que tous les modèles dans les tours de «rues larges» à l'exception de la tour T12 ont surestimé la composante de vitesse près de l'obstacle au vent. Tous les modèles utilisés ont plus ou moins abouti aux mêmes résultats que ceux obtenus par expérimentation pour le profil de vitesse  $U$ . Enfin, les profils de  $U$  sont presque en bonne concordance avec les mesures en soufflerie, dans de nombreux cas ont sous-

---

---

estimés et il n'ya pas de différences remarquables avec CHENSI et les deux codes (MISKAM, FLUENT).

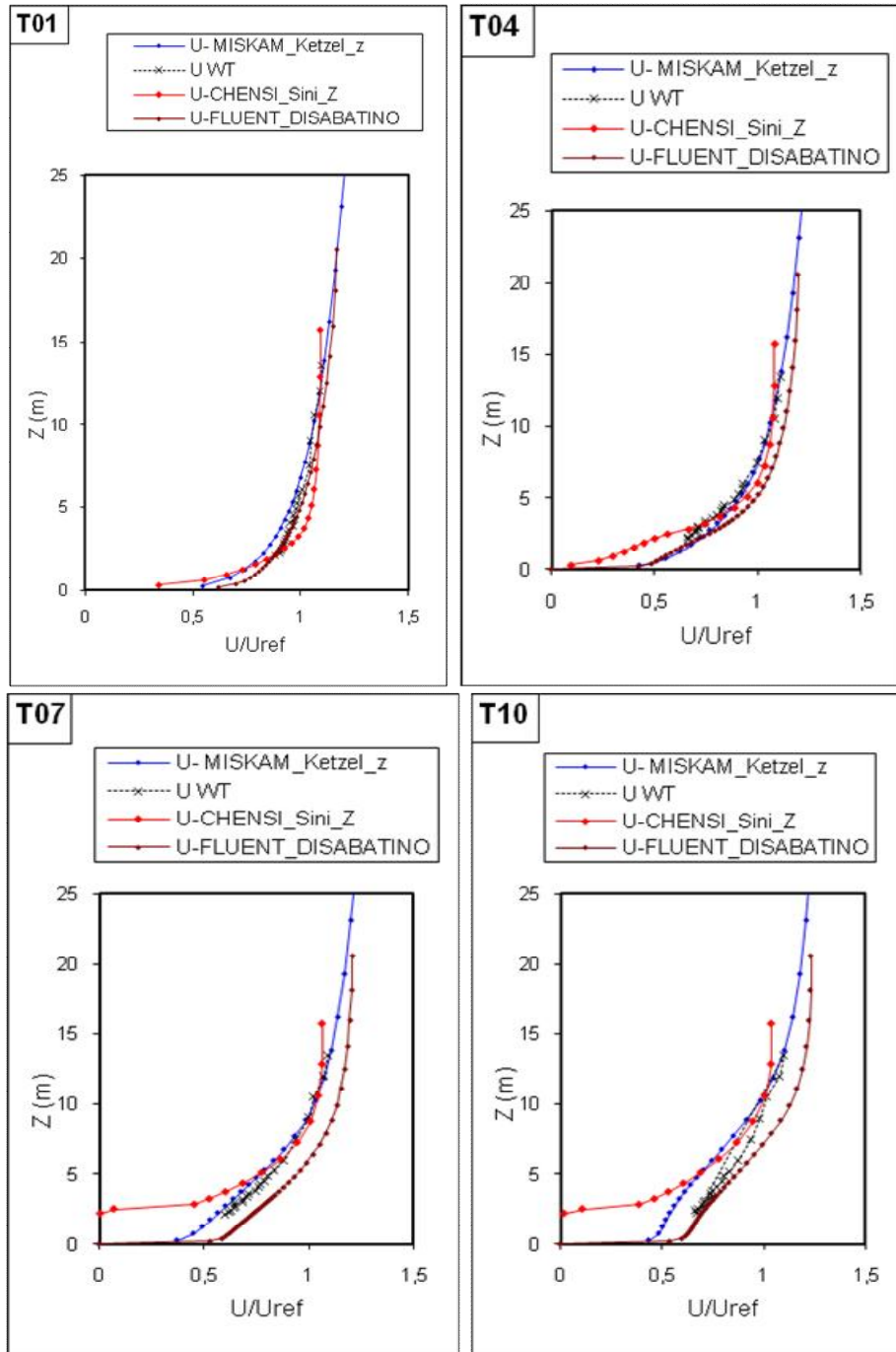
### **VI.1.2 Le composant W:**

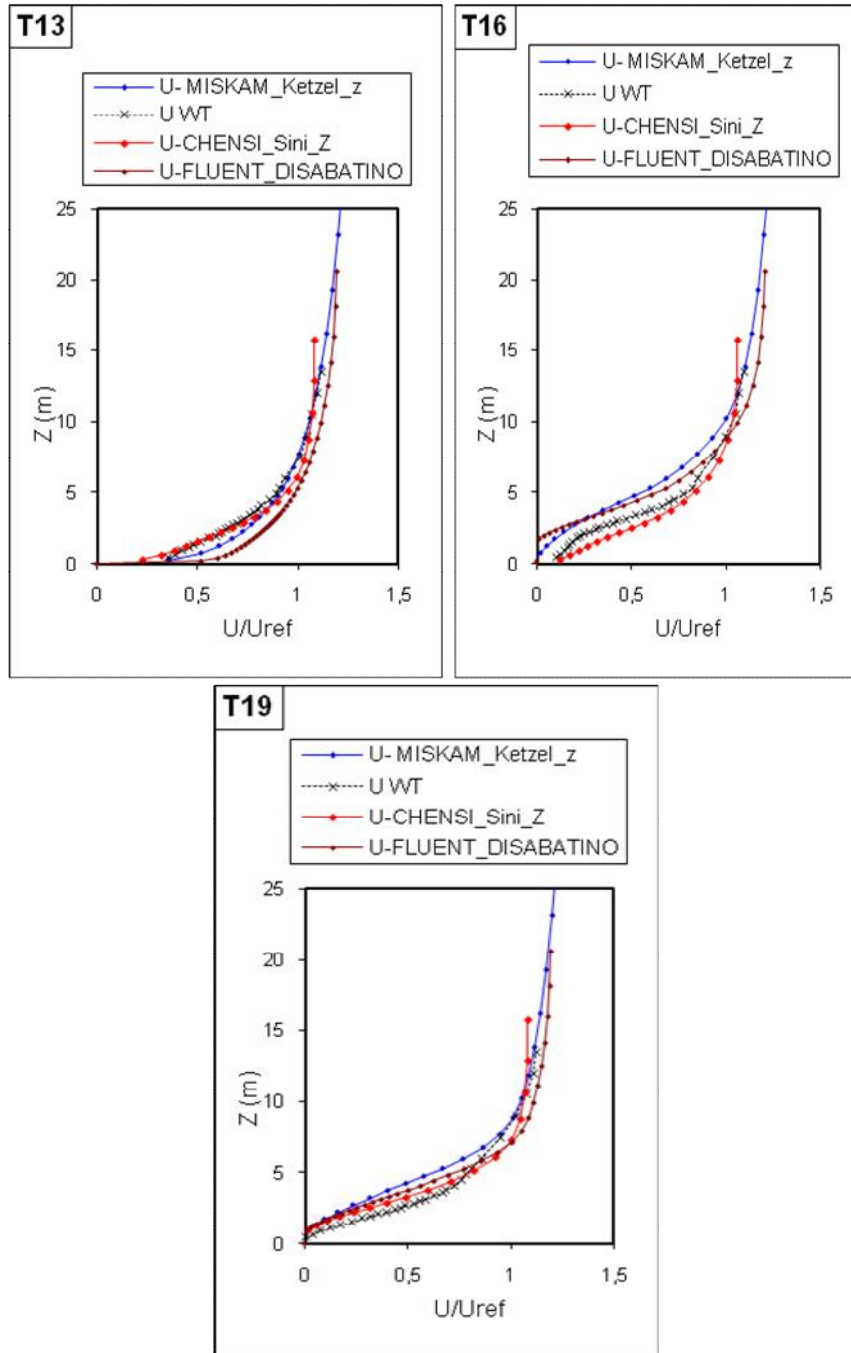
Dans les profils de vitesse verticale ( $W$ ), tous les modèles ont surestimé la composante de vitesse ( $W/U_{ref}$ ) près de la face d'obstacles au vent comme produit sur la figure VI.4. En aval de l'obstacle, CHENSI, MISKAM et FLUENT ont simulé la vitesse ( $W$ ) et ont obtenu des résultats proches des données expérimentales. En utilisant le rapport de la vitesse ( $W/U_{ref}$ ), CHENSI obtenant des résultats beaucoup plus éloignés des résultats expérimentaux et de simulation en haut de l'arrière de l'obstacle. Tous les modèles aboutissent a un résultat négatif de modèles sans-vitesse près du sol  $H < 2,5$  m à l'exception des tours T01, T07, T10 et T15 pour les quelles la vitesse est positive. Pour tours T02, T08 et T11 CHENSI produit des valeurs négatives de la vitesse, tandis que MISKAM et FLUENT obtiennent des valeurs positives par rapport aux données expérimentales, ce qui indique que les différentes positions des tourbillons circulation comme prévus.

Enfin, pour les tours T04 et T11, les résultats obtenus par calcul de simulation sont des valeurs positives par rapport aux autres modèles de calcul, comme le montre la figure VI.4.

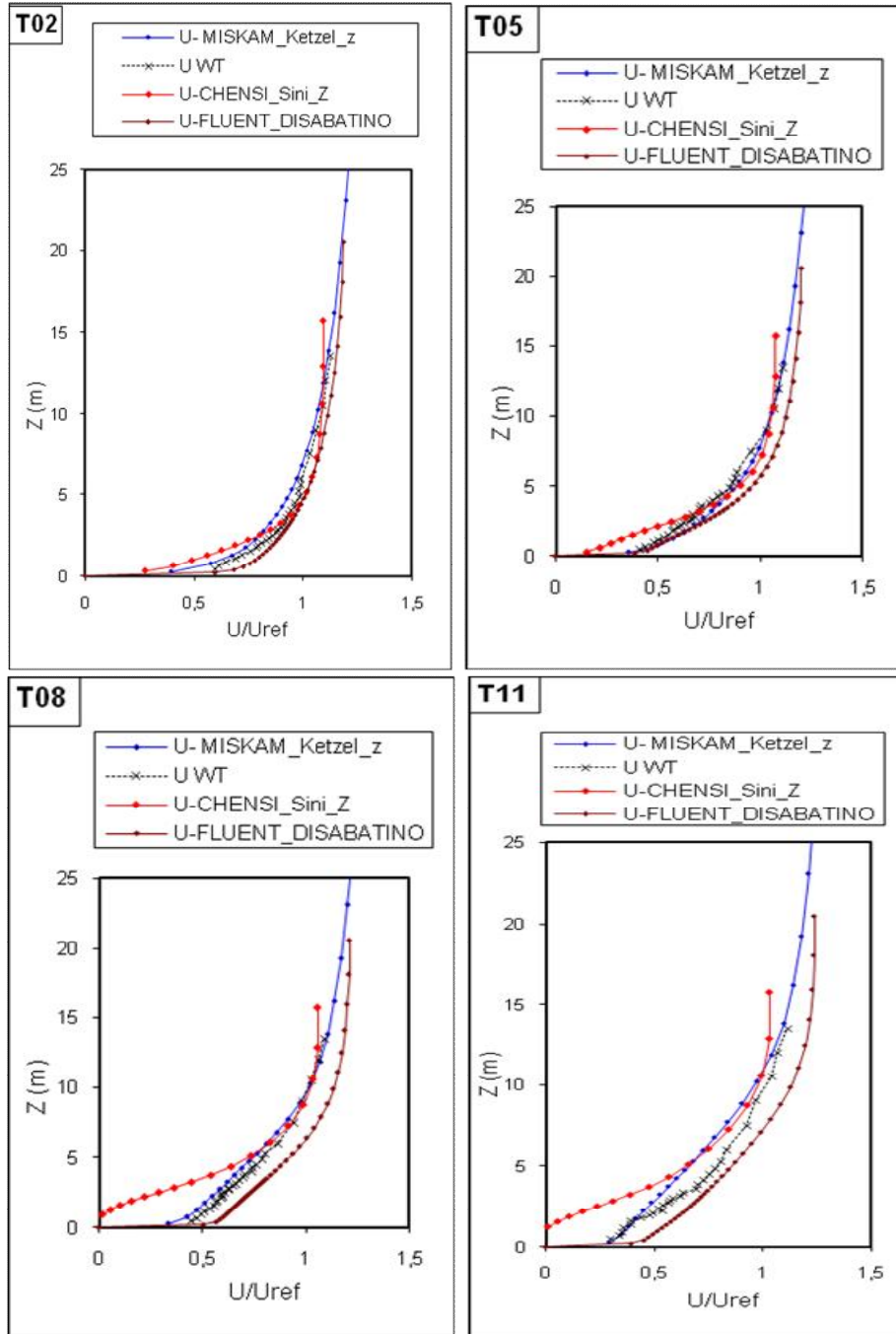
### **VI.1.3 Le composant TKE:**

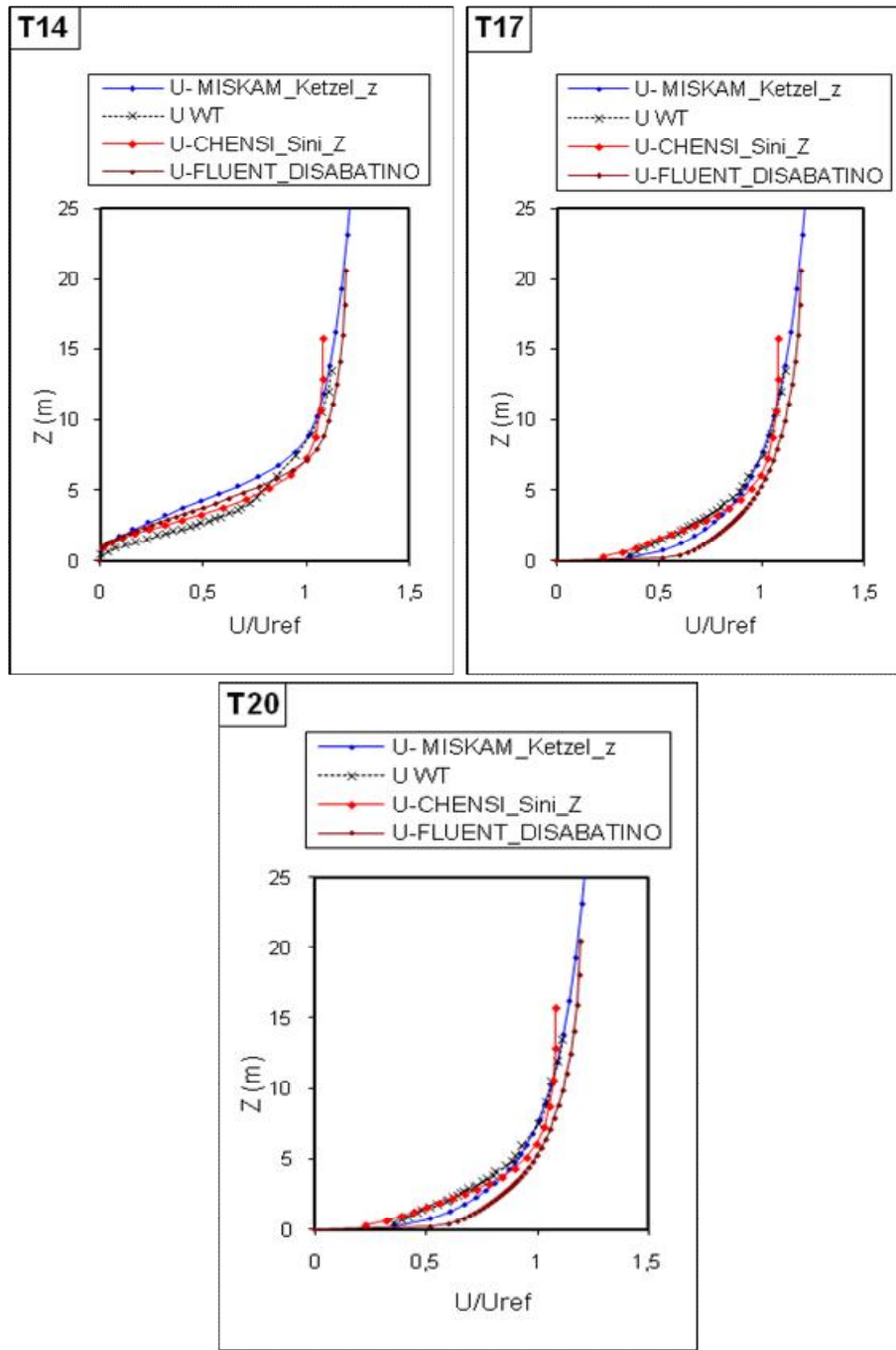
Tous les modèles arrivent avec difficultés a simuler l'énergie cinétique turbulente ( $TKE/U_{ref}^2$ ) à proximité de la place face au vent. Les obstacles dans les trois grilles représentent 21 tours qui sont des «ruelles», «rues étroites» (tour 1, 4, 7, 10, 13, 16 et 19), «croisements» (tour 2, 5, 8, 11, 14, 17 et 20) et «rues larges» (tour 3, 6, 9, 12, 15, 18 et 21), comme reproduit par la figure VI.2. Dans ce cas, CHENSI s'approchait le plus des données observées. Cependant, il est clair que les trois modèles surestiment le TKE dans la zone d'impact près du mur au vent, ce qui est un problème commun avec les modèles utilisés. Plus en aval de la concordance des résultats est assez bonne, sauf que CHENSI pour TKE prédit des résultats juste derrière l'obstacle, tandis que les trois autres modèles produit des résultats satisfaisants comme le montre la figure VI.5.



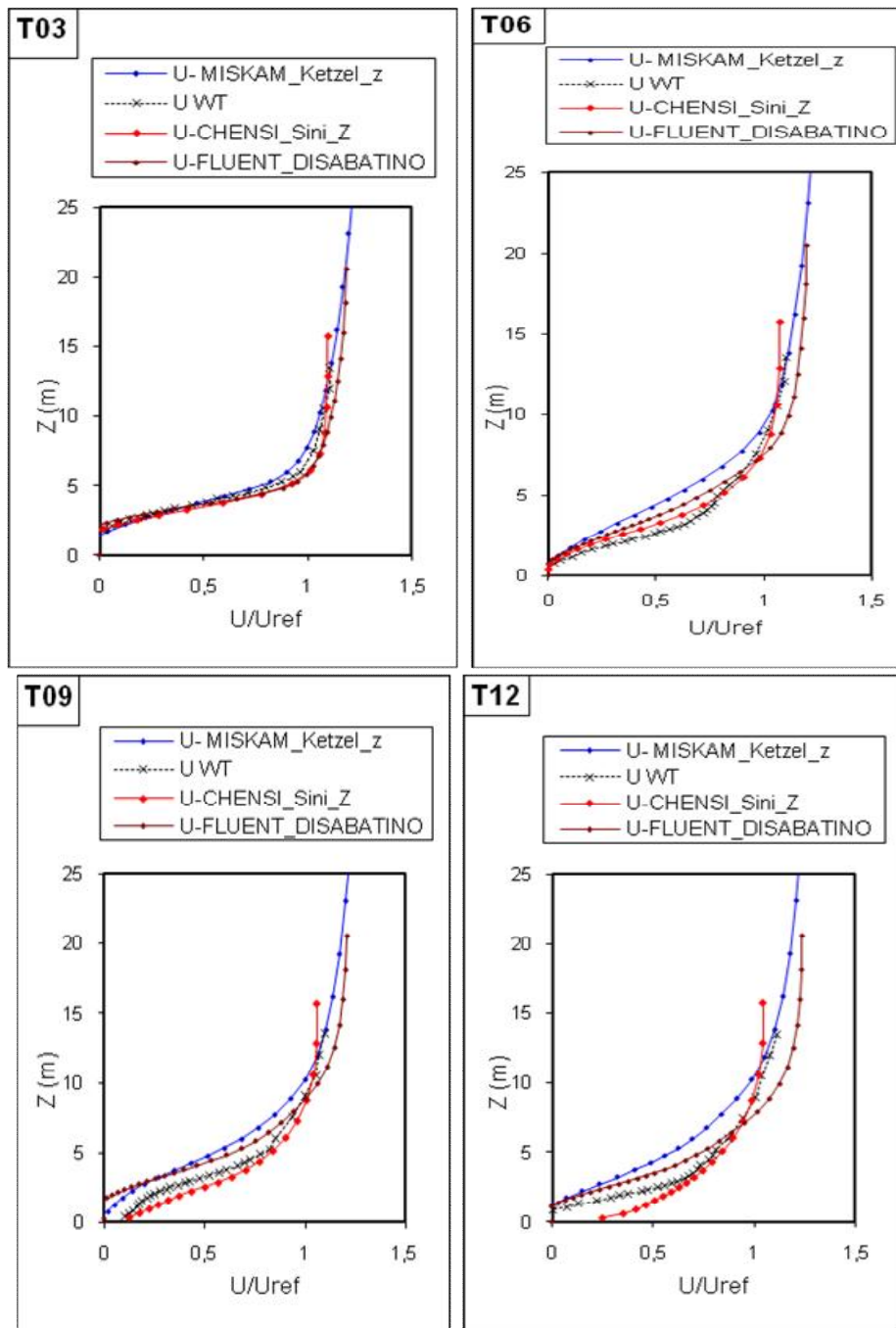


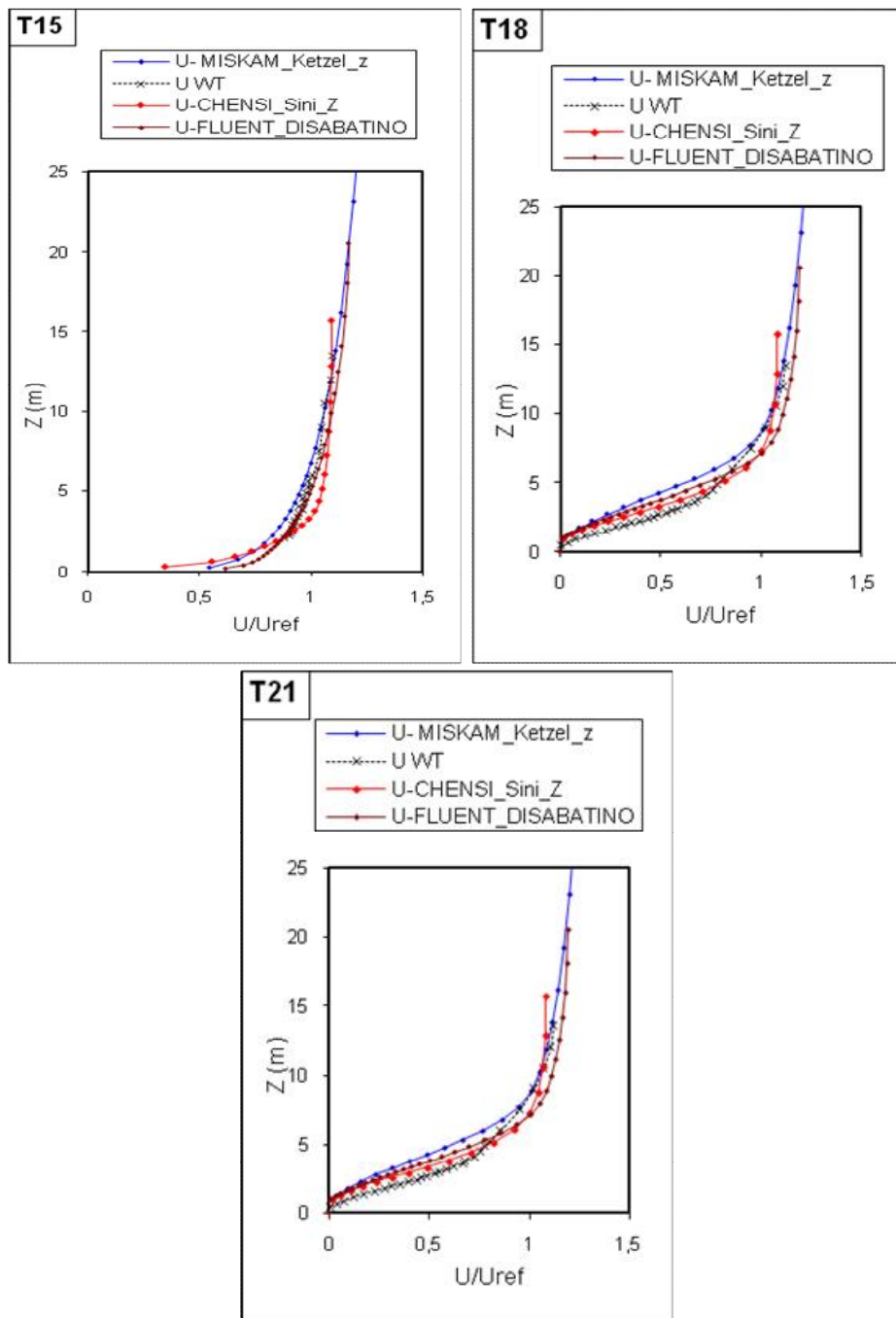
(a)





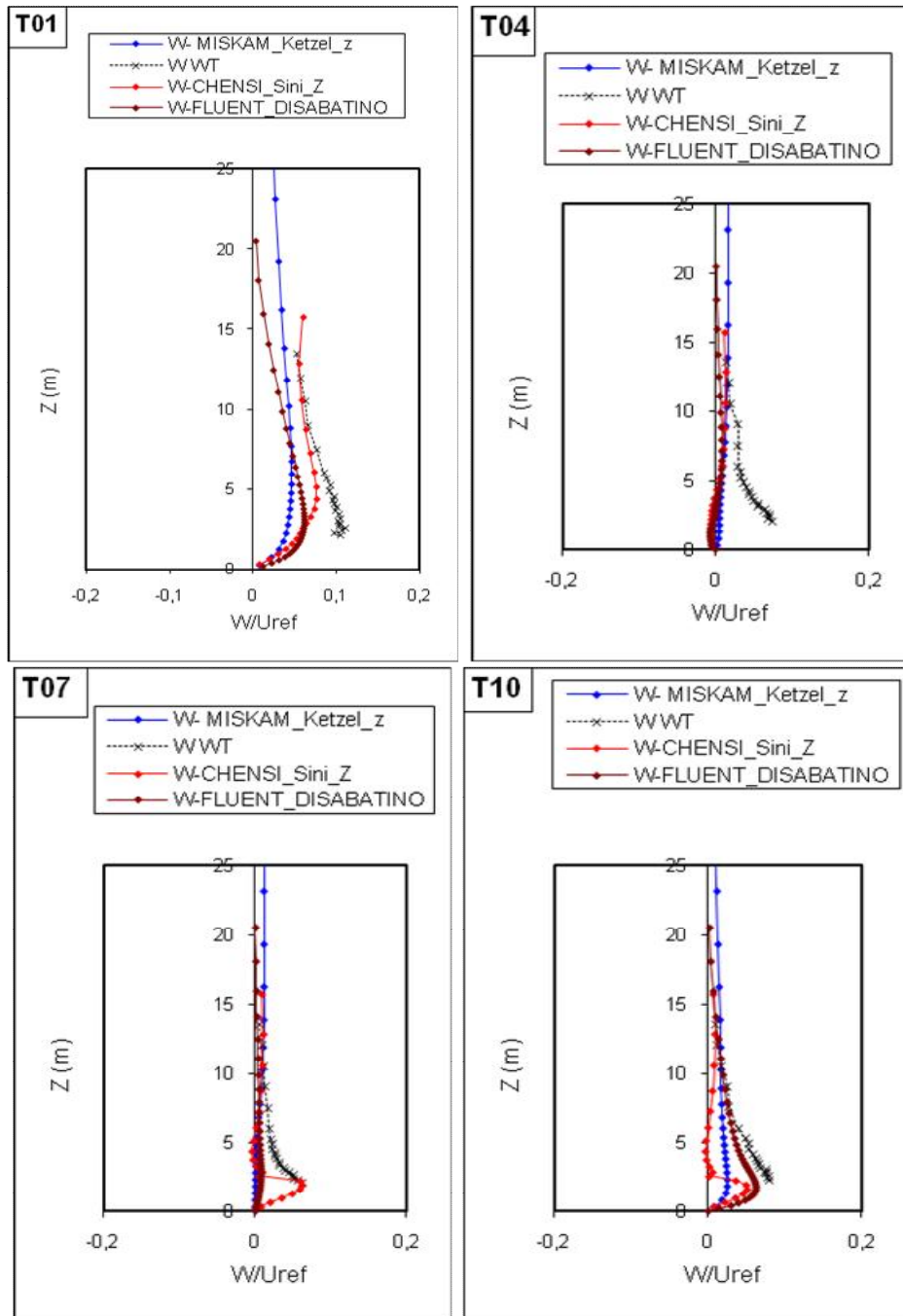
(b)

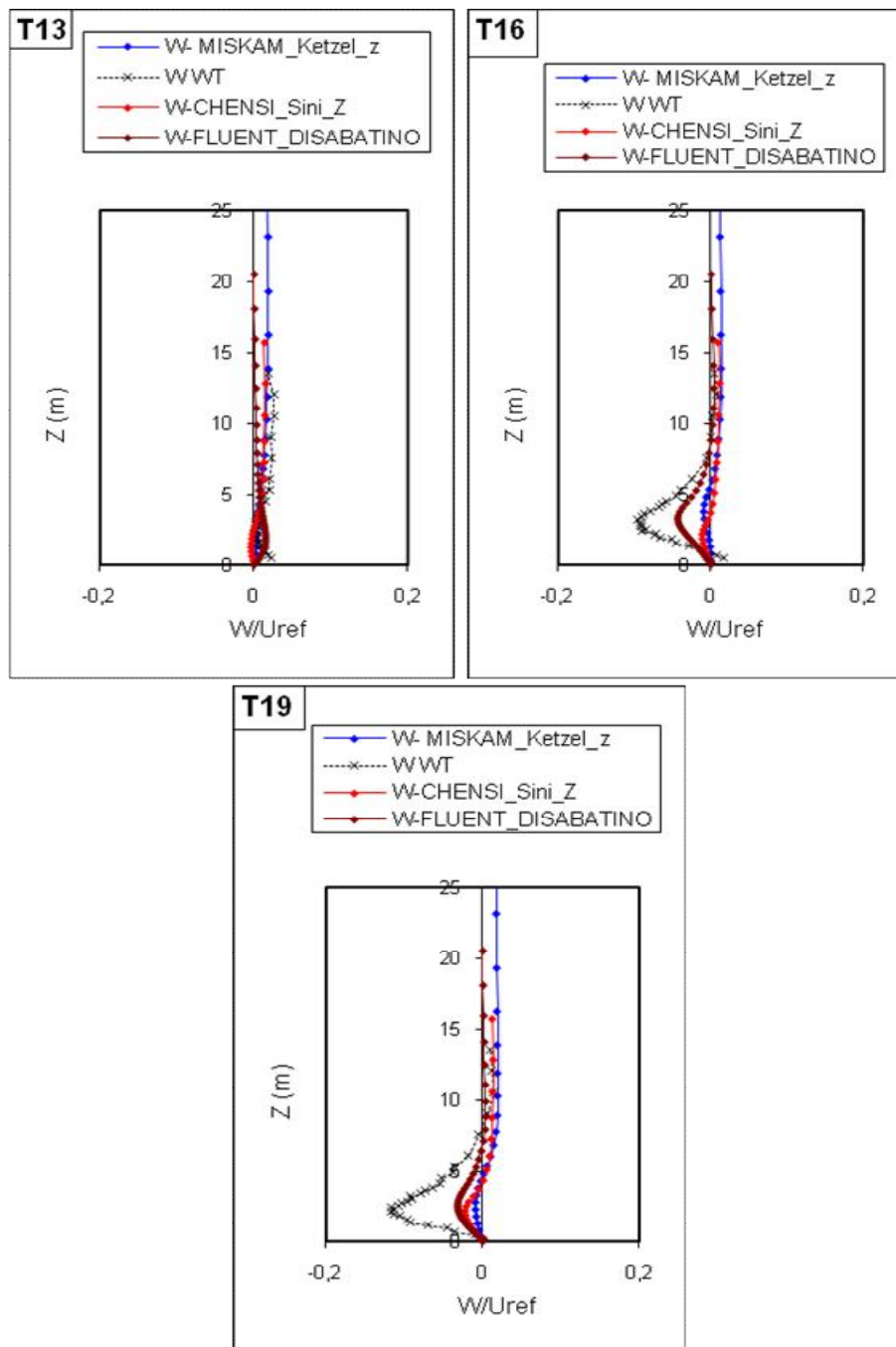




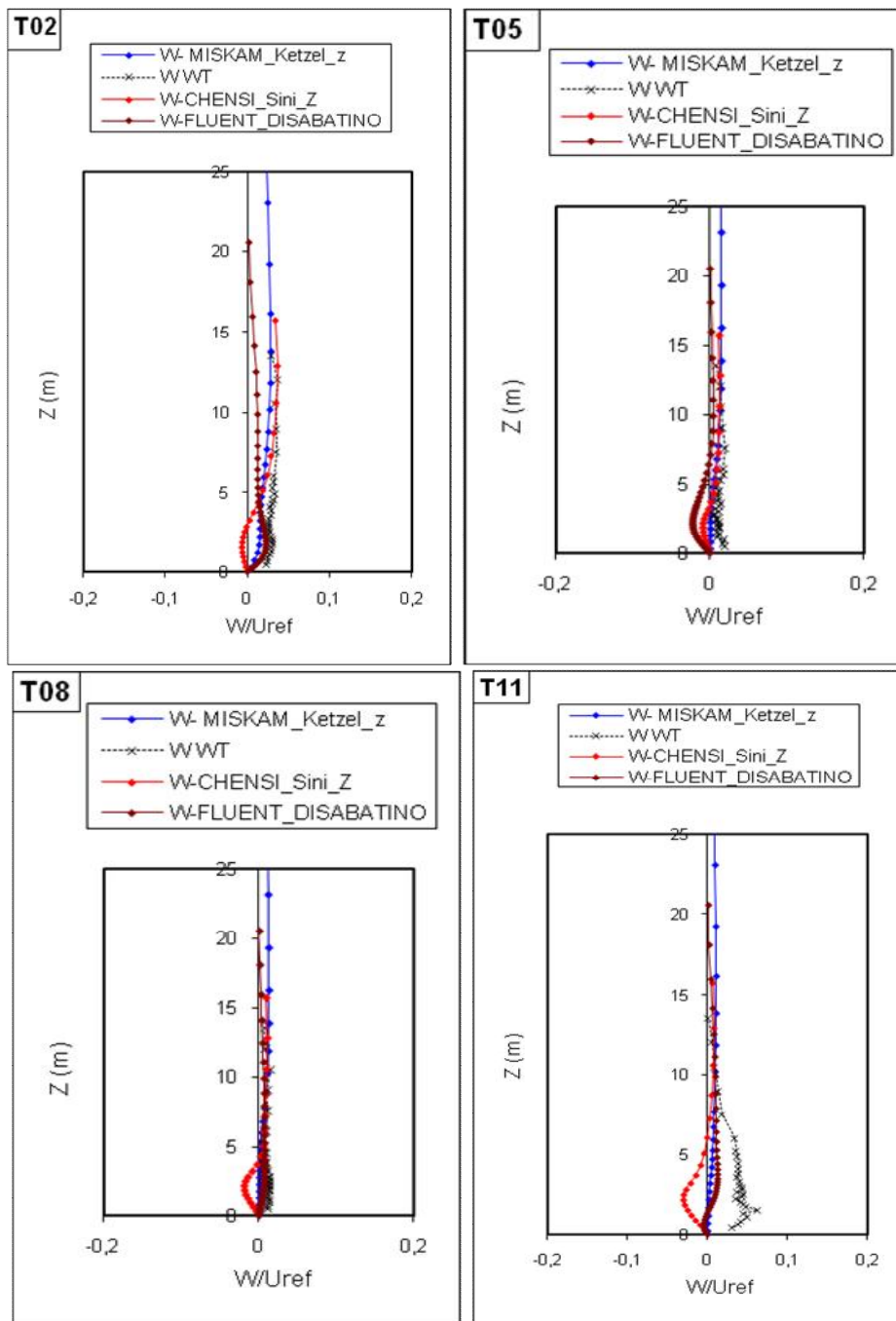
(c)

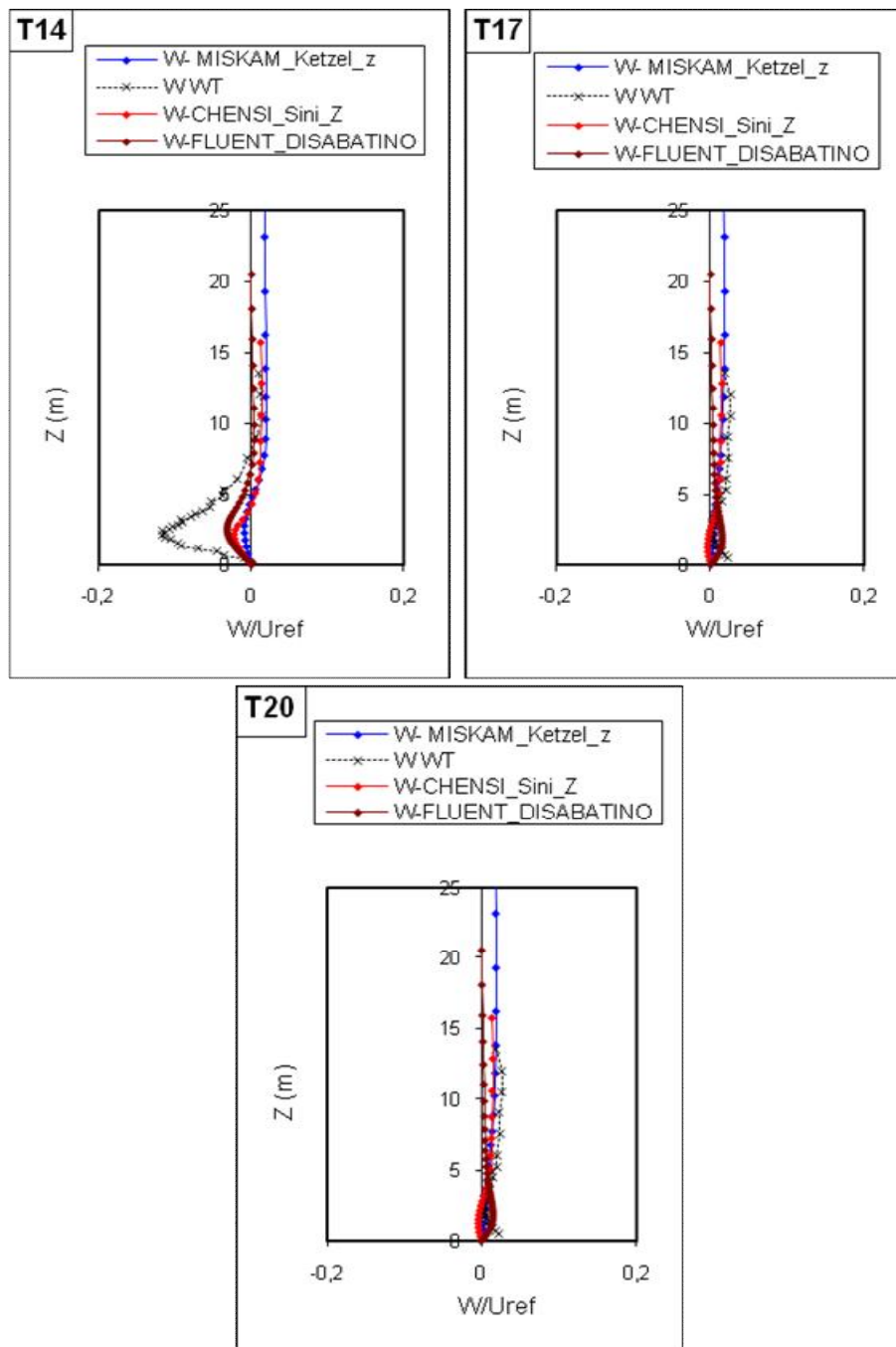
**Figure VI.3:** Comparaison des expérimentale et de la vitesse longitudinale modélisée (U) Profils normalisés par la vitesse du courant libre, sur les trois grilles sont présentés à 21 tours, qui sont représentatifs de a) «rues étroites» (Tour 1, 4, 7, 10, 13, 16 et 19), b) «croisements» (Tour 2, 5, 8, 11, 14, 17 et 20) et c) «rues larges» (Tour 3, 6, 9, 12, 15, 18 et 21), voir figure VI.2 comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]).



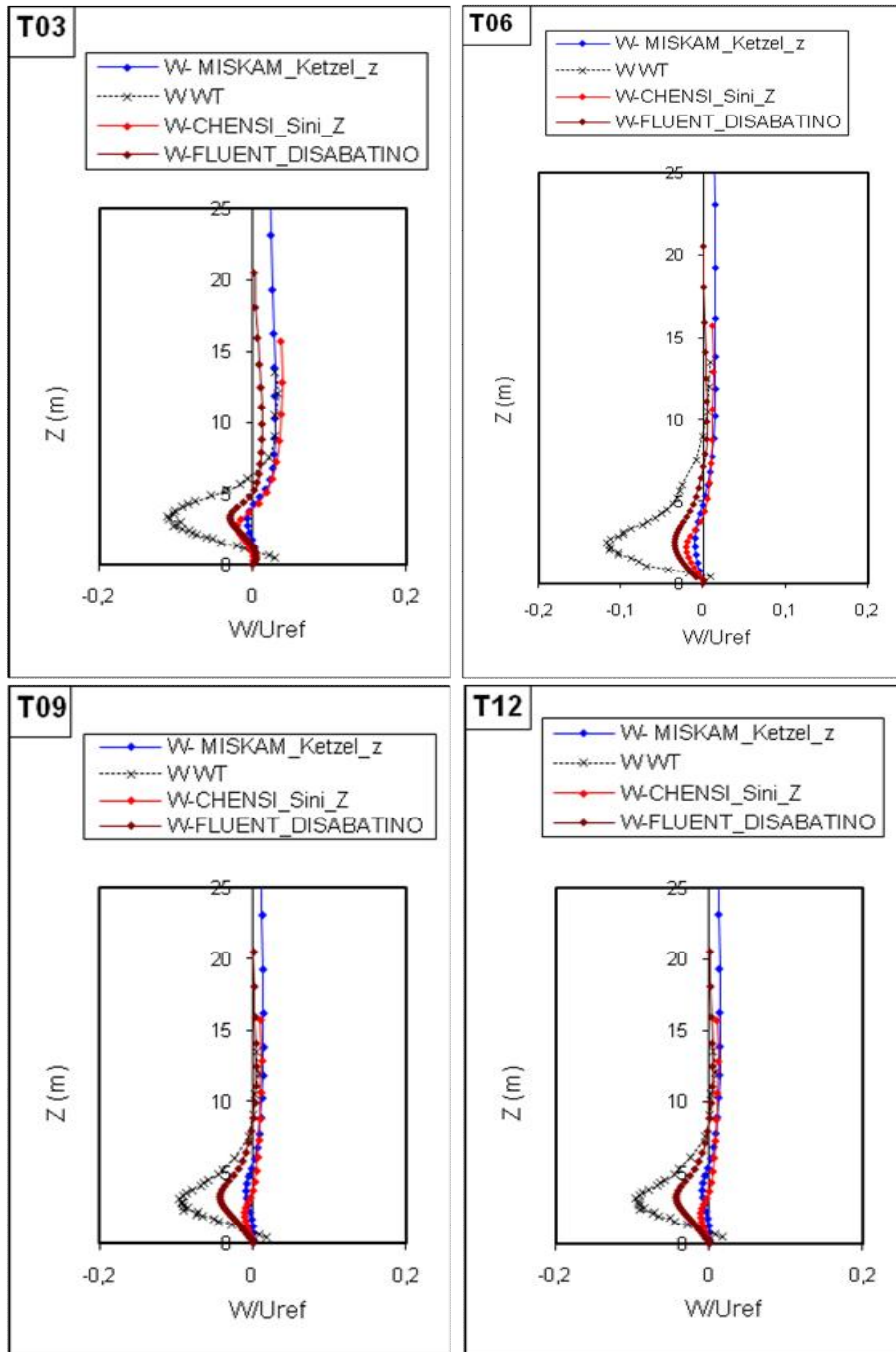


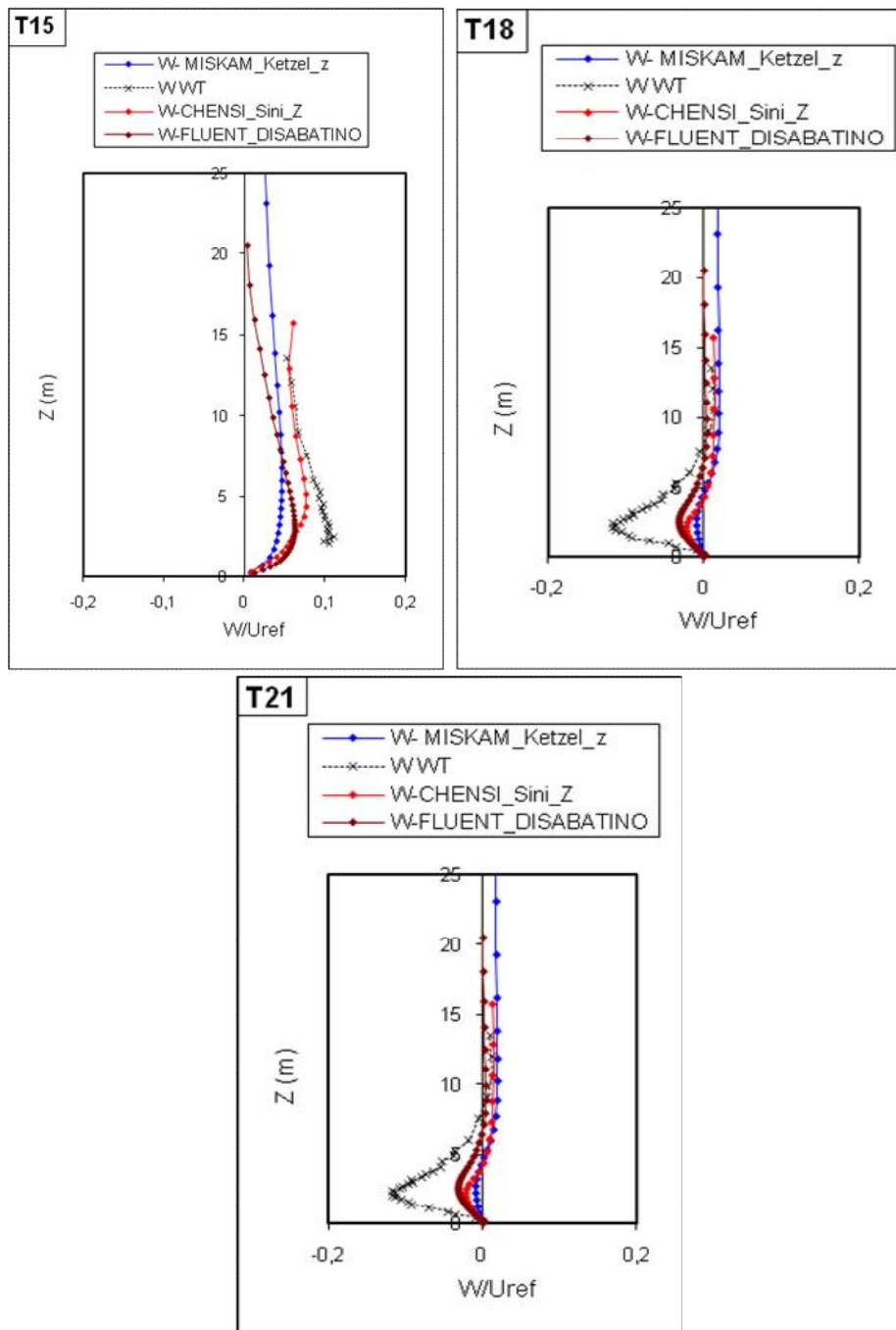
(a)





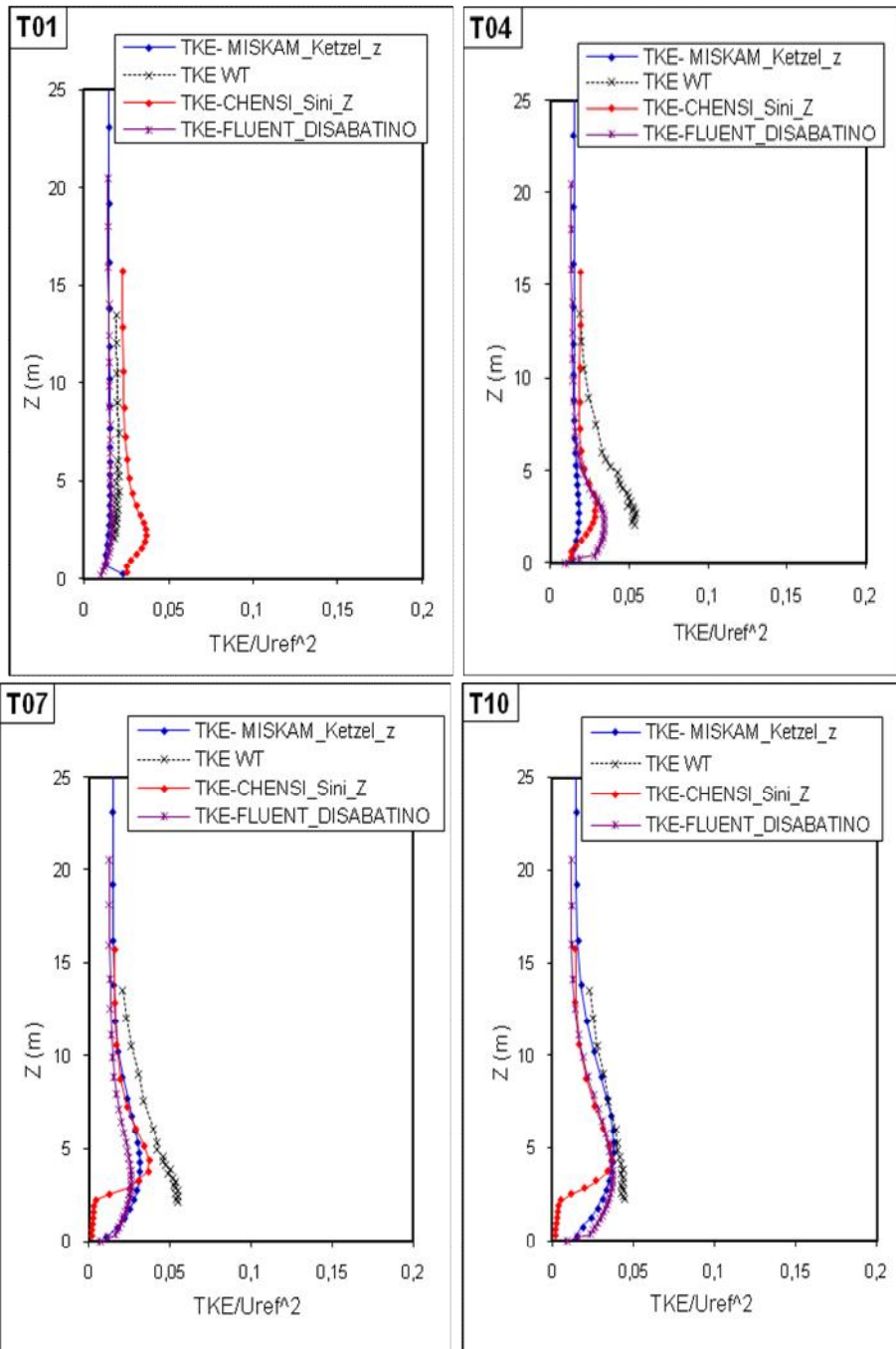
(b)

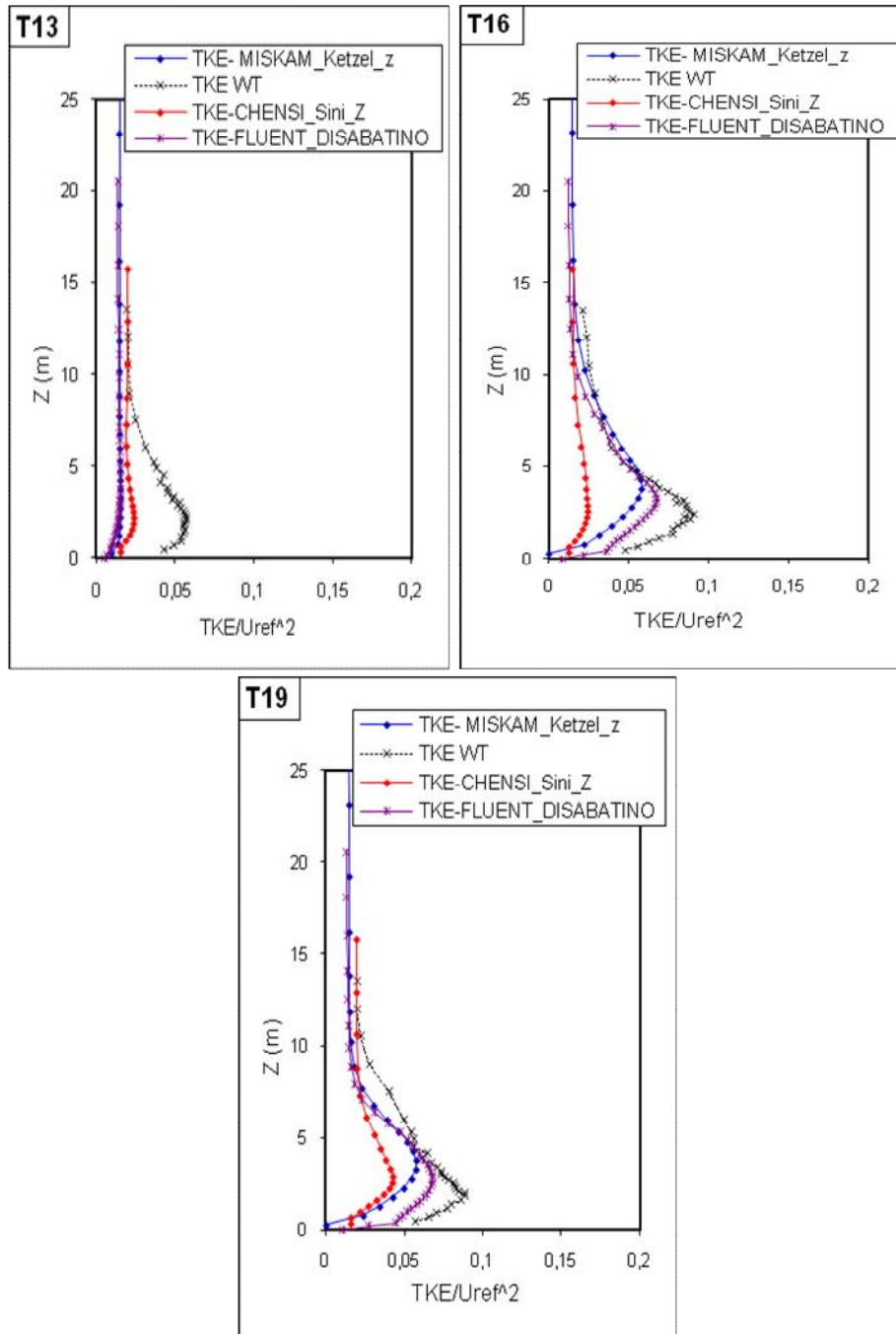




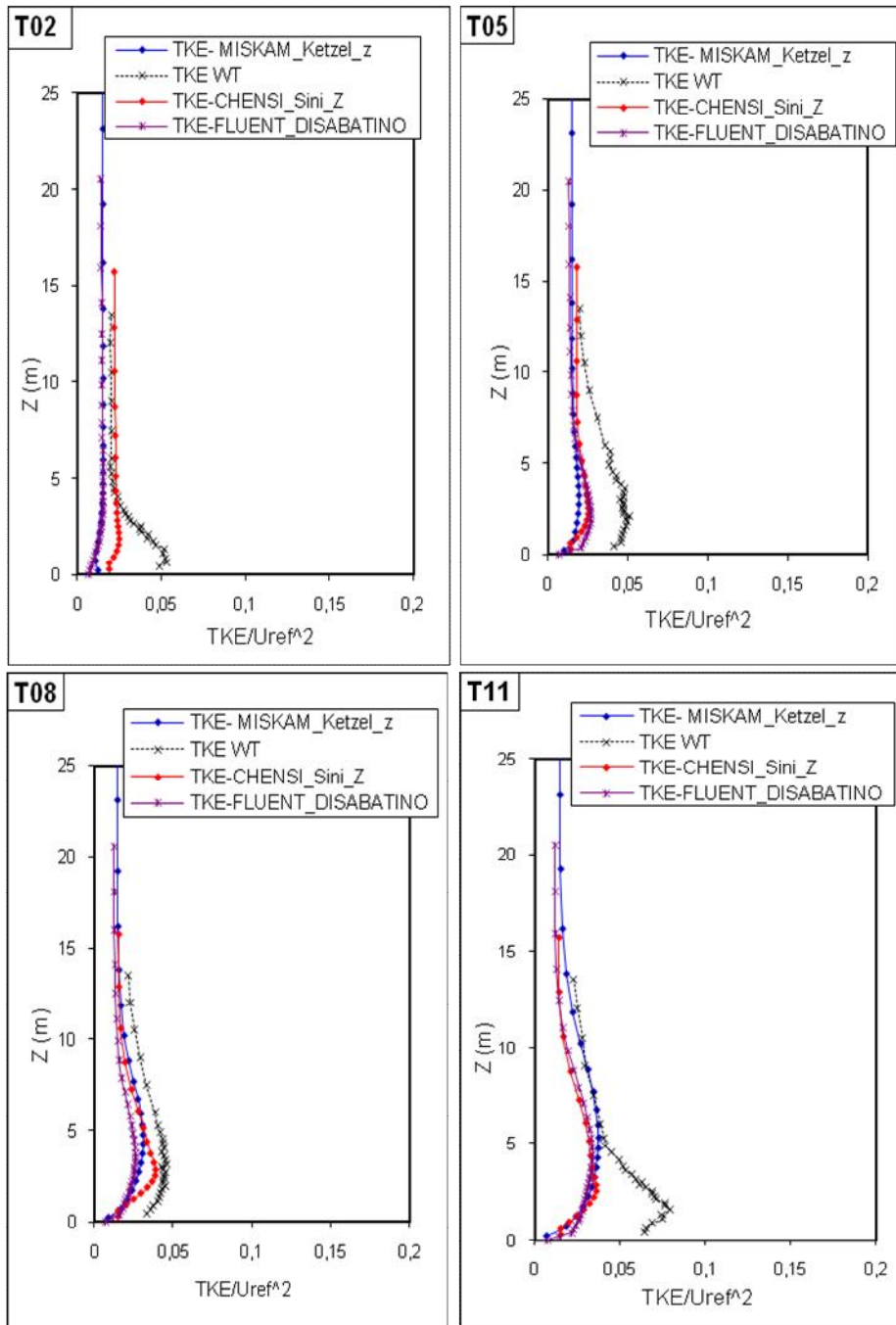
(c)

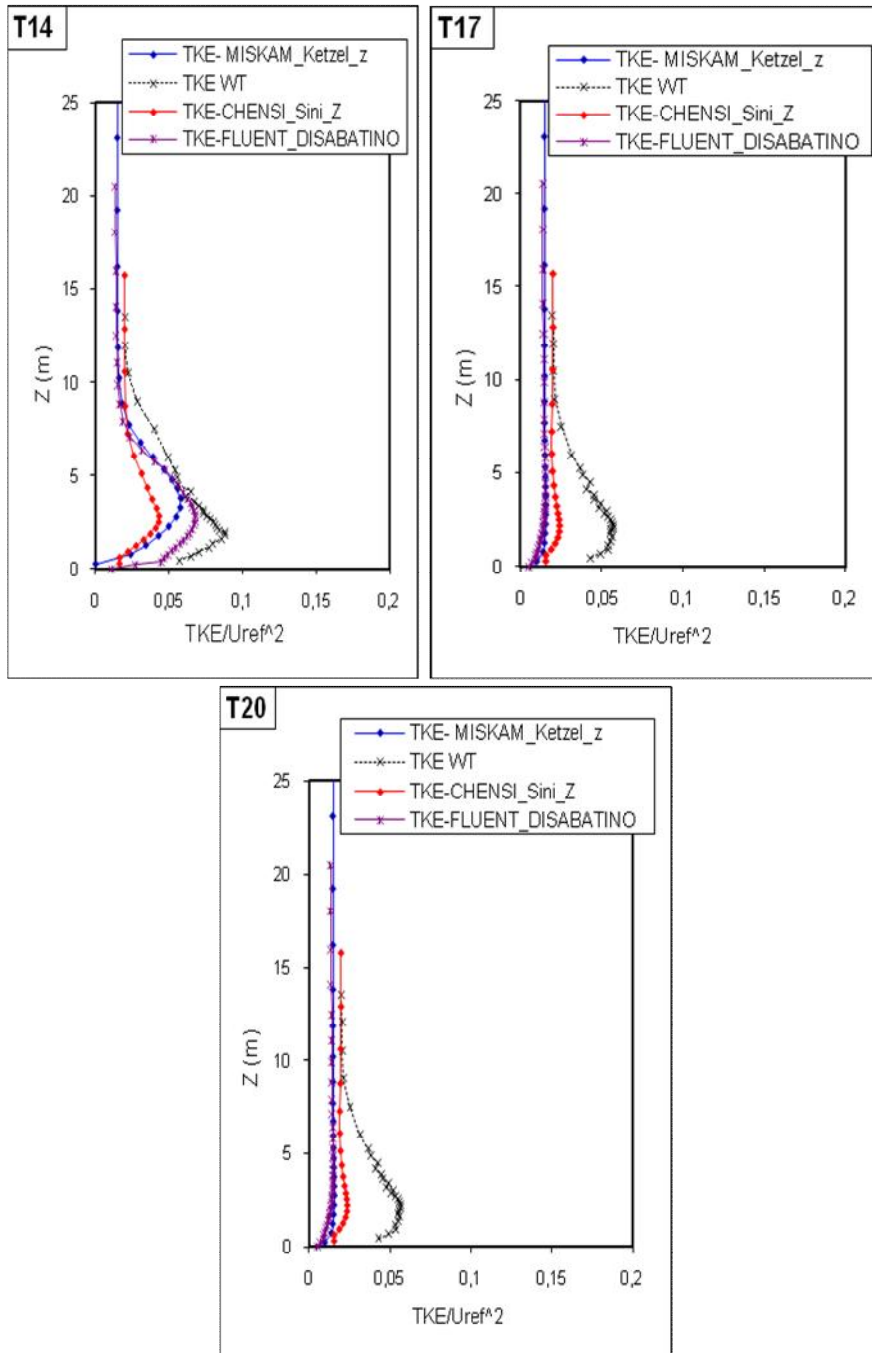
**Figure VI.4:** Comparaison des expérimentale et la vitesse verticale modélisée ( $W$ ) Profils normalisés par la vitesse du courant libre, sur les trois grilles sont présentés à 21 tours, qui sont représentatifs de a) «rues étroites» (Tour 1, 4, 7, 10, 13, 16 et 19), b) «croisements» (Tour 2, 5, 8, 11, 14, 17 et 20) et c) «rues larges» (Tour 3, 6, 9, 12, 15, 18 et 21), voir figure VI.2 comme expliqué par (Olesen et Berkowicz,[10]).



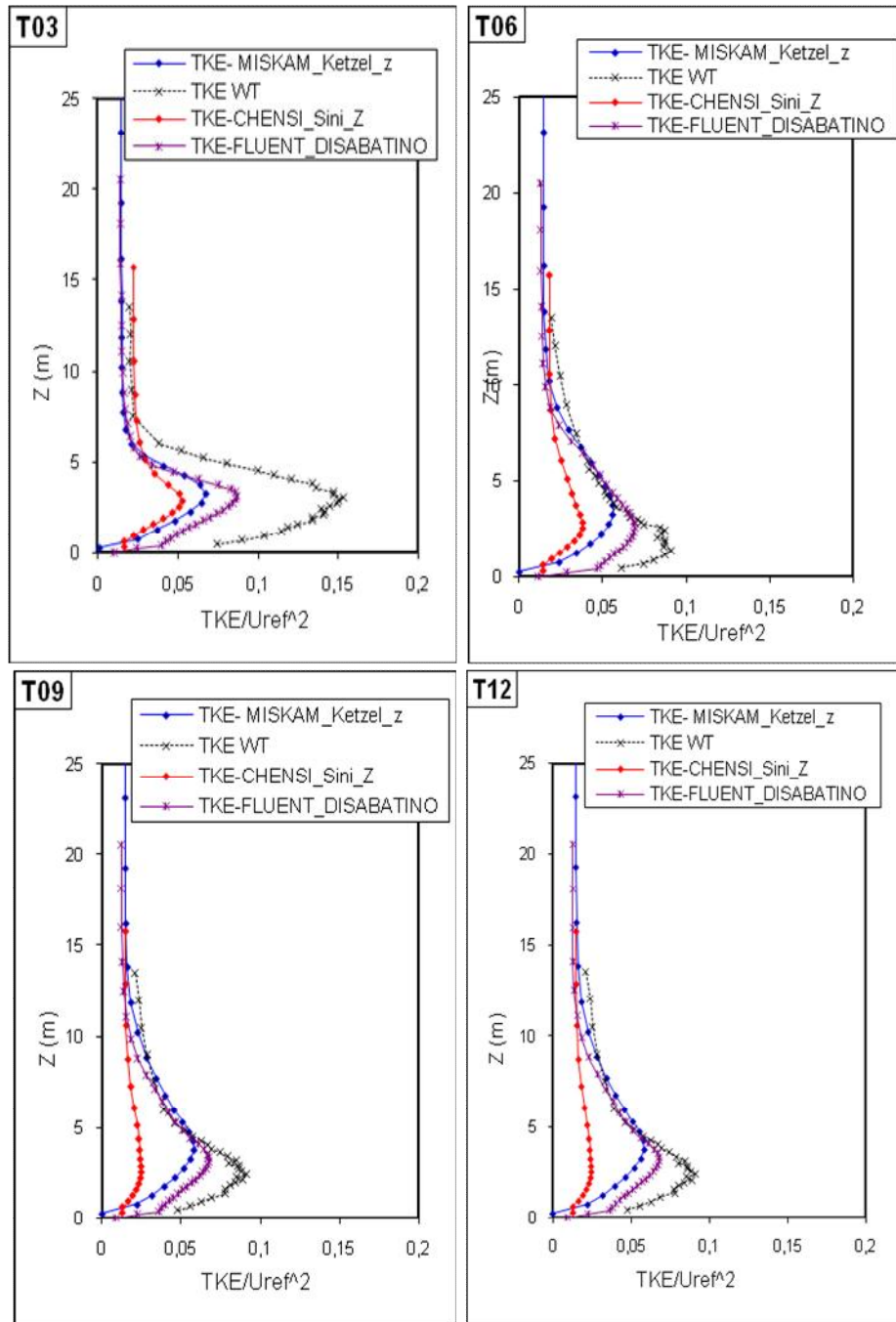


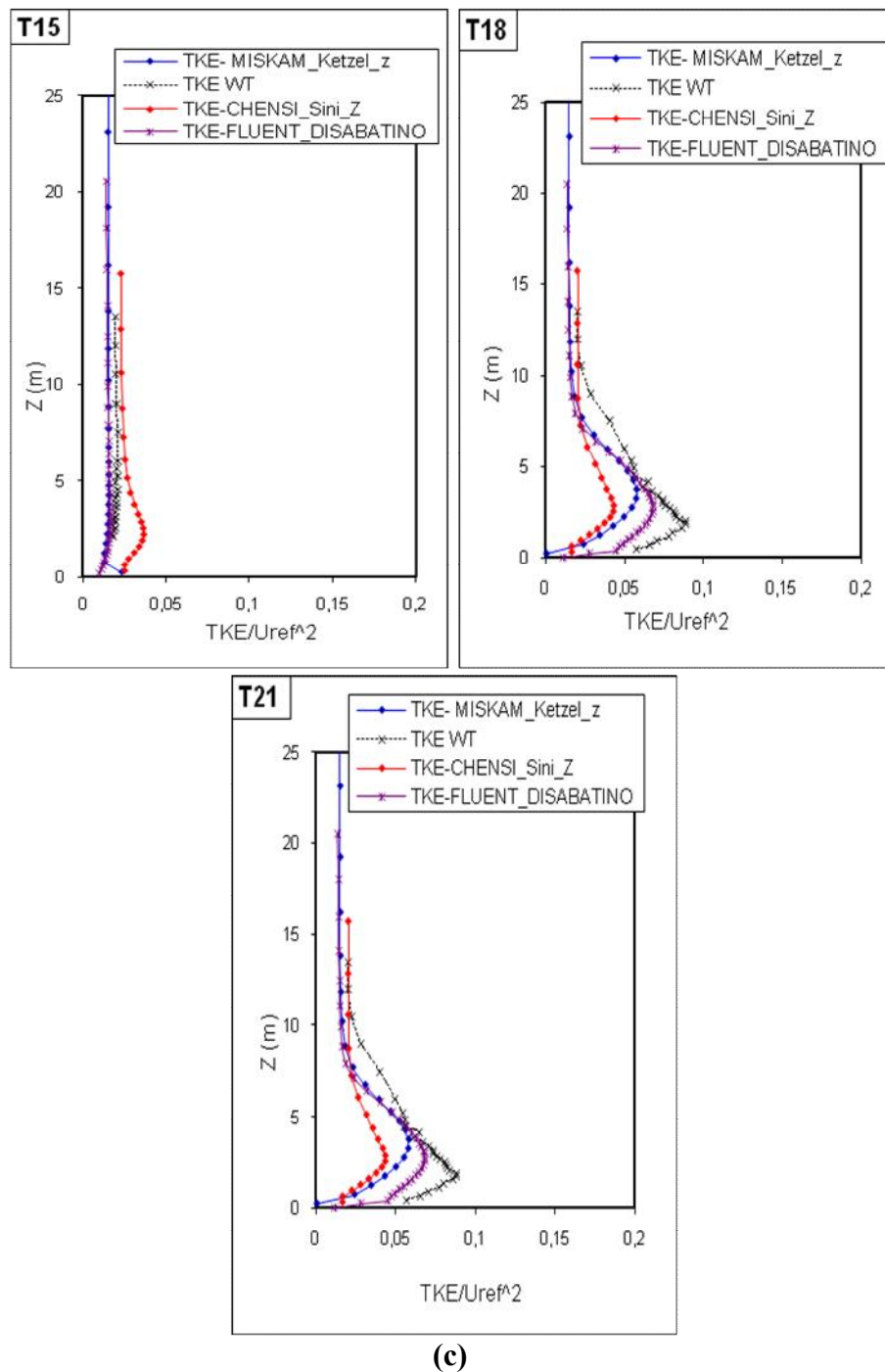
(a)





(b)



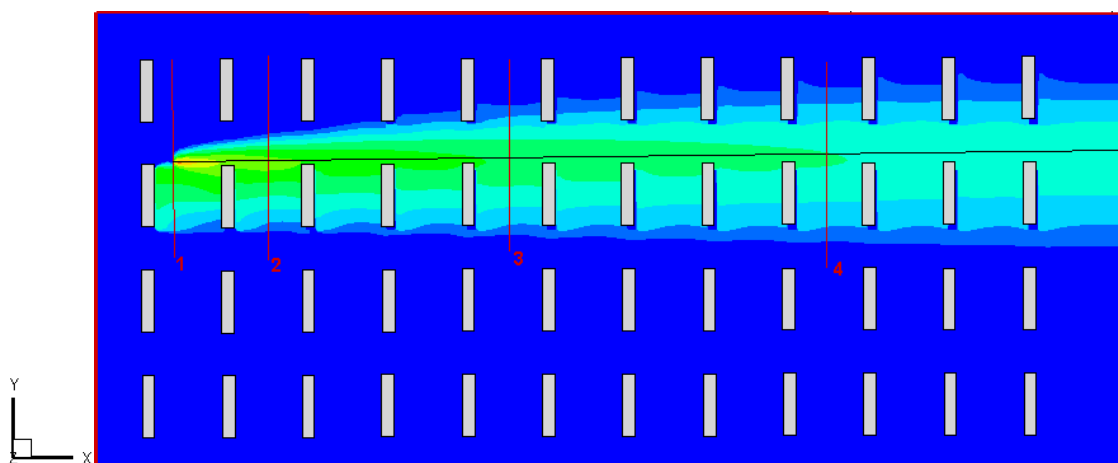


**Figure VI.5:** Comparaison de l'énergie cinétique turbulente expérimentales et modélisées (TKE) Profils normalisés par la vitesse du courant libre, sur les trois grilles sont présentés à 21 tours, qui sont représentatifs de a) «rues étroites» (Tour 1, 4, 7, 10, 13, 16 et 19), b) «croisements» (Tour 2, 5, 8, 11, 14, 17 et 20) et c) «rues larges» (Tour 3, 6, 9, 12, 15, 18 et 21), voir figure VI.2 comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]).

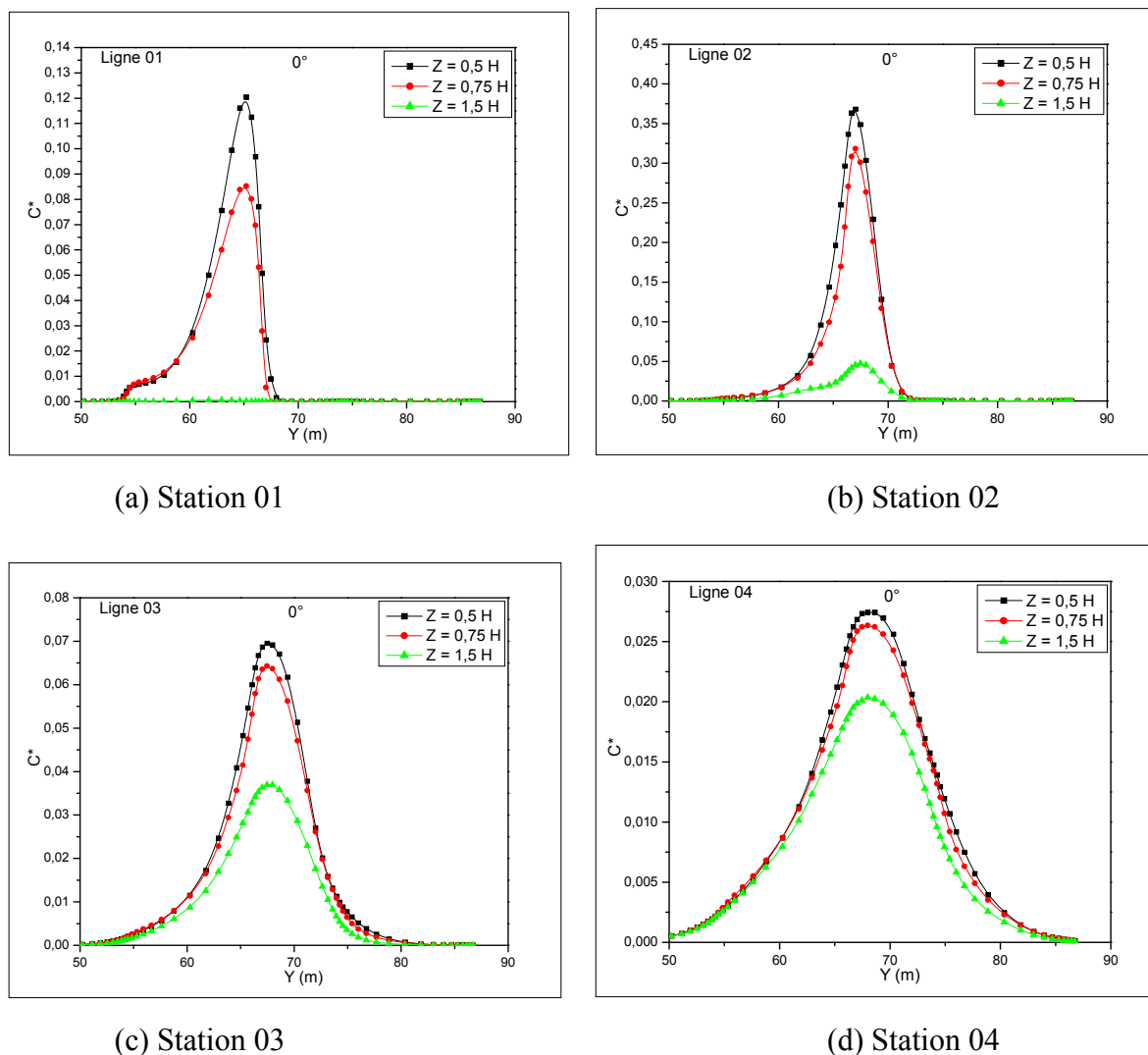
### VI.1.4 Variations de concentration

Dans la figure VI. 6 sont présentées des coupes de champs de concentrations horizontaux du gaz choisi pour simuler l'effet d'un polluant pour un angle d'incidence de  $0^\circ$ , quatre stations différentes ont été choisies; la première station est située entre les rangées (1) et (2), la deuxième station entre les rangées (2) et (3), la troisième station entre les rangées (5) et (6) et la quatrième station entre les rangées (9) et (10). Les courbes de concentration ont été tracées dans chacune des stations pour trois niveaux ; le premier à ( $z = 0.5H$  inférieur à la hauteur des containers), le deuxième à ( $z = 0.75H$  m, au niveau de la source, point 29) et le troisième à ( $z = 1.5H$  m supérieur à la hauteur des containers).

. La figure VI.7 représente les profils de concentration du polluant (éthane) pour le cas  $0^\circ$  pour les quatre stations, on voit que la concentration de l'éthane augmente en passant de la station 1 (située juste en amont de la source) vers la station 2 (située en aval de la source), les concentrations maximales se déplacent alors vers une position où la valeur de  $y$  est plus grande. Pour les stations suivantes, la valeur de la concentration maximale diminue de plus en plus en s'éloignant de la source d'émission, alors que la valeur de  $y$  correspondant à la concentration maximale reste sans changement, plus on se déplace vers le haut, plus la concentration diminue, mais la différence de concentration entre les trois hauteurs en chaque station diminue en s'éloignant de la source.



**Figure VI.6:** Positions de stations relatives aux profils horizontaux de concentration (cas de  $0^\circ$ ).



**Figure VI.7:** Profils horizontaux des concentrations en quatre niveaux de hauteur [1,27 m (0,5 H), 1.905m (0,75H) et 4.359m (1,5 H)] pour le cas  $0^\circ$ .

### VI.1.5 Conclusions:

Le présent travail a été réalisé au sein du réseau COST (créé des réseaux scientifiques et permet aux scientifiques de collaborer dans un large éventail d'activités dans la recherche et la technologie), afin d'assurer la qualité des modèles de flux dans les zones urbaines et industrielles, une initiative européenne COST (voir <http://www.cost.esf.org>) a été lancée. COST est un cadre européen intergouvernemental pour la coopération internationale entre les activités de recherche financées au niveau national.

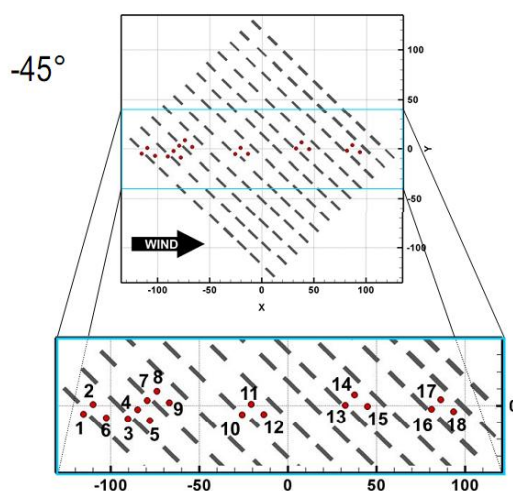
---

---

Les résultats numériques sont en bon accord avec les données de soufflerie, ce qui donne une représentation raisonnable de la circulation générale. Le flux en sens inverse présente une zone d'impact sur le côté au vent de l'obstacle.

L'étude comparative a été effectuée au sein de l'action COST 732 réseau afin d'évaluer la capacité des trois modèles CFD (CHENSI, MISKAM et FLUENT) pour simuler l'écoulement du vent autour simplifiée pour le MUST soufflerie expérimenter les 120 obstacles. Bien que les modèles reproduisent assez bien les tendances générales de flux autour des obstacles, certaines divergences entre les données calculées et expérimentales ont été identifiées, en particulier, les trois modèles ont surestimé l'énergie cinétique turbulente générée dans la zone d'impact de vent ; en outre, CHENSI, MISKAM et FLUENT ont surestimé la longueur de la zone de recirculation sur le côté sous le vent des obstacles. Ces résultats indiquent généralement un comportement cohérent des modèles à l'exception FLUENT. Malgré certains écarts par rapport aux données expérimentales qui sont principalement en raison des limites du modèle standard de turbulence  $k-\varepsilon$ , certaines divergences observées entre FLUENT et les autres codes CFD persistent.

## VI.2 Comparaison entre les modèles numériques et CHENSI avec les données expérimentales (MUST) dans le cas de $-45^\circ$ .



**Figure VI.8:** Les points peuvent être classés en trois groupes, de sorte que la tour 1 représente une «rue étroite», tour 11 un «croisement», et de la tour 6 une «rue large» pour le cas de  $-45^\circ$ .

### VI.2.1 Les composants U et W:

Les observations sur le champ d'écoulement ont été faites sur la base de diagrammes des profils verticaux. Des exemples typiques sont présentés dans les figures VI.7, VI.8 et VI.9. Alors que les profils de CHENSI pour les Tours : a) «rues étroites» (Tour 1, 3, 7, 10, 13 et 16), «croisements» (Tour 2, 4, 8, 11, 14 et 17) et c) «rues larges» (Tour 5, 6, 9, 12, 15 et 18), comme le montre la figure VI.6, ne diffèrent pas de manière significative l'amélioration par rapport à le cas  $0^\circ$  peut être remarqué. Par rapport aux données de soufflerie, la composante longitudinale U est encore sous-estimée dans les hauteurs inférieures. Séparation d'écoulement à U- dessus et l'écoulement vers le bas derrière les récipients induits ne semble pas correctement résolue par CHENSI, ce qui explique la sous- ou même l'absence de la composante verticale de la vitesse W, dans de nombreux tours de mesure. Des observations similaires ont été faites par Olesen et al. [10] dans d'autres modèles participants doivent faire preuve de la COST 732.

Conclusion similaire peut être faite pour le cas de  $-45^\circ$  (figure VI.9, VI.10 et VI.11).

- La direction de l'écoulement ne permet pas de distinction entre les profils comme à  $0^\circ$ , mais on peut affirmer que les profilés inférieurs loin derrière ont montré des vitesses de U par

---

---

rapport à la mesure que dans les premières rangées d'obstacles. Des valeurs plus faibles pour la composante U sont particulièrement typique des niveaux plus bas.

- A la différence des mesures, la composante verticale simulée est proche de zéro, en particulier dans les régions éloignées du vent.

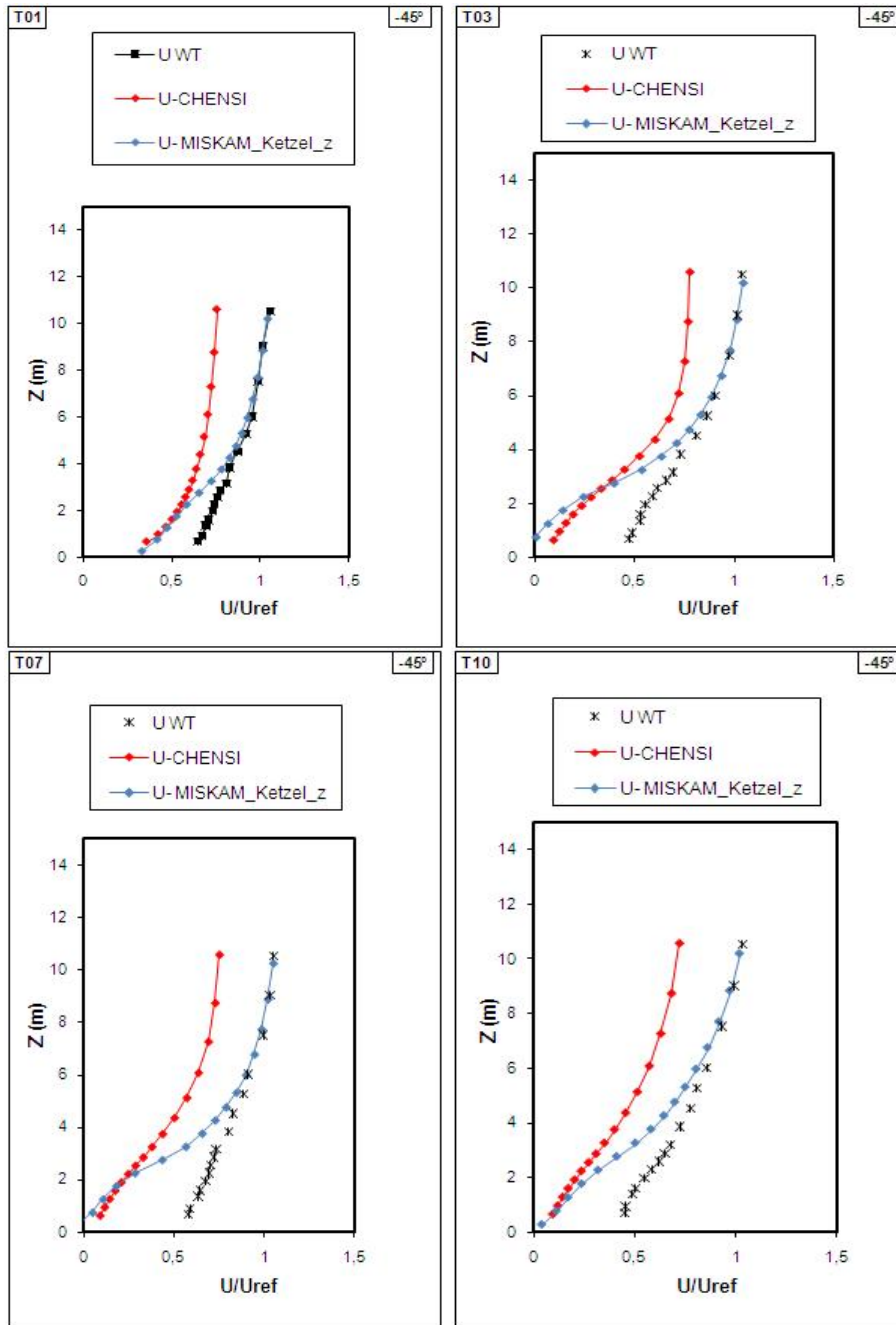
### **VI.2.2 Composant TKE:**

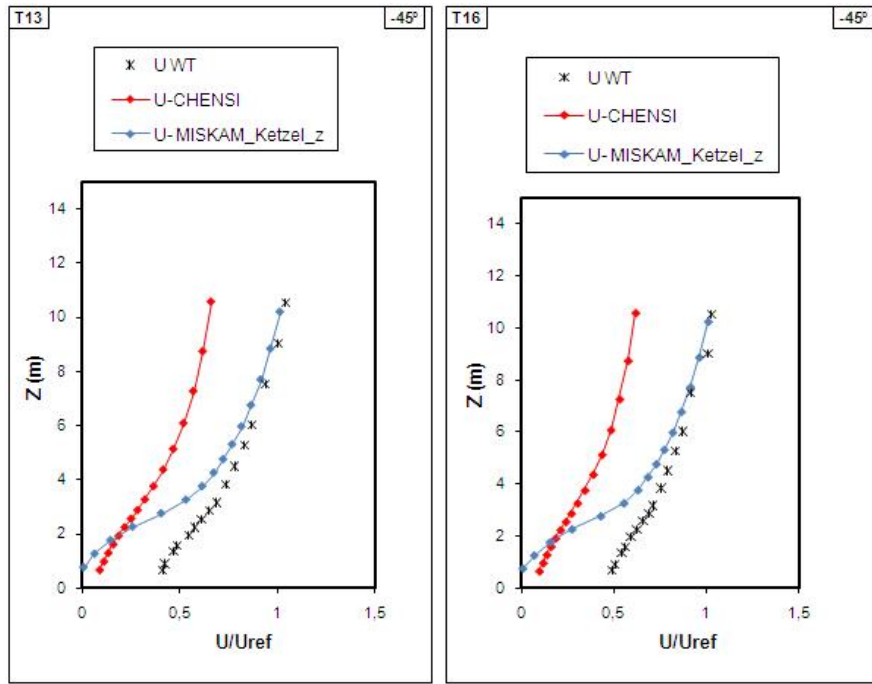
La figure VI.11 représenté la comparaison de l'énergie cinétique turbulente expérimentales et modélisées (TKE) Profils normalisés par la vitesse du courant libre,

Enfin, tous les modèles ont eu des difficultés simulant l'énergie cinétique turbulente ( $TKE/U_{ref}^2$ ) à proximité de la place face vent des obstacles dans les trois grilles sont présentés à 18 tours, qui sont représentatifs de a) «rues étroites» (Tour 1, 3, 7, 10, 13 et 16), b) «croisements» (Tour 2, 4, 8, 11, 14 et 17) et c) «rues larges» (Tour 5, 6, 9, 12, 15 et 18), voir figure VI.8 comme expliqué par Olesen et Berkowicz, [10] pour le cas  $-45^\circ$ .

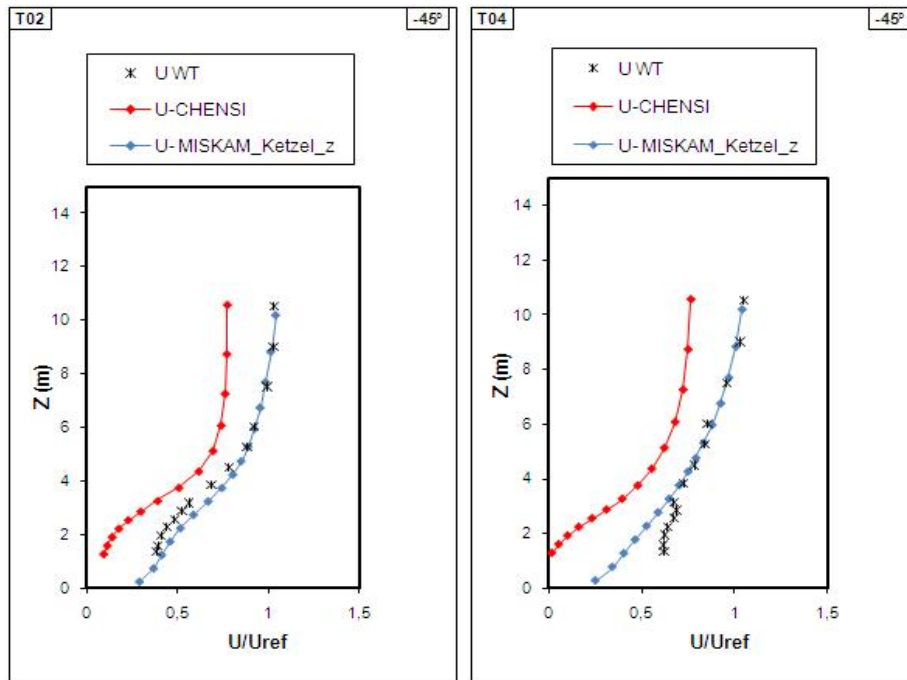
Les figures, de l'énergie cinétique turbulent ( $TKE/U_{ref}^2$ ), montre qu'il y'a une sous estimation observée pour les valeurs calculées par CHENSI surtout près du sol et les valeurs maximales sont enregistrées à des hauteurs différentes. Le code de calcul CHENSI donne des valeurs supérieurs que celles obtenues par MISKAM, et sont en plus proche de l'expérimental en allure et en valeurs.

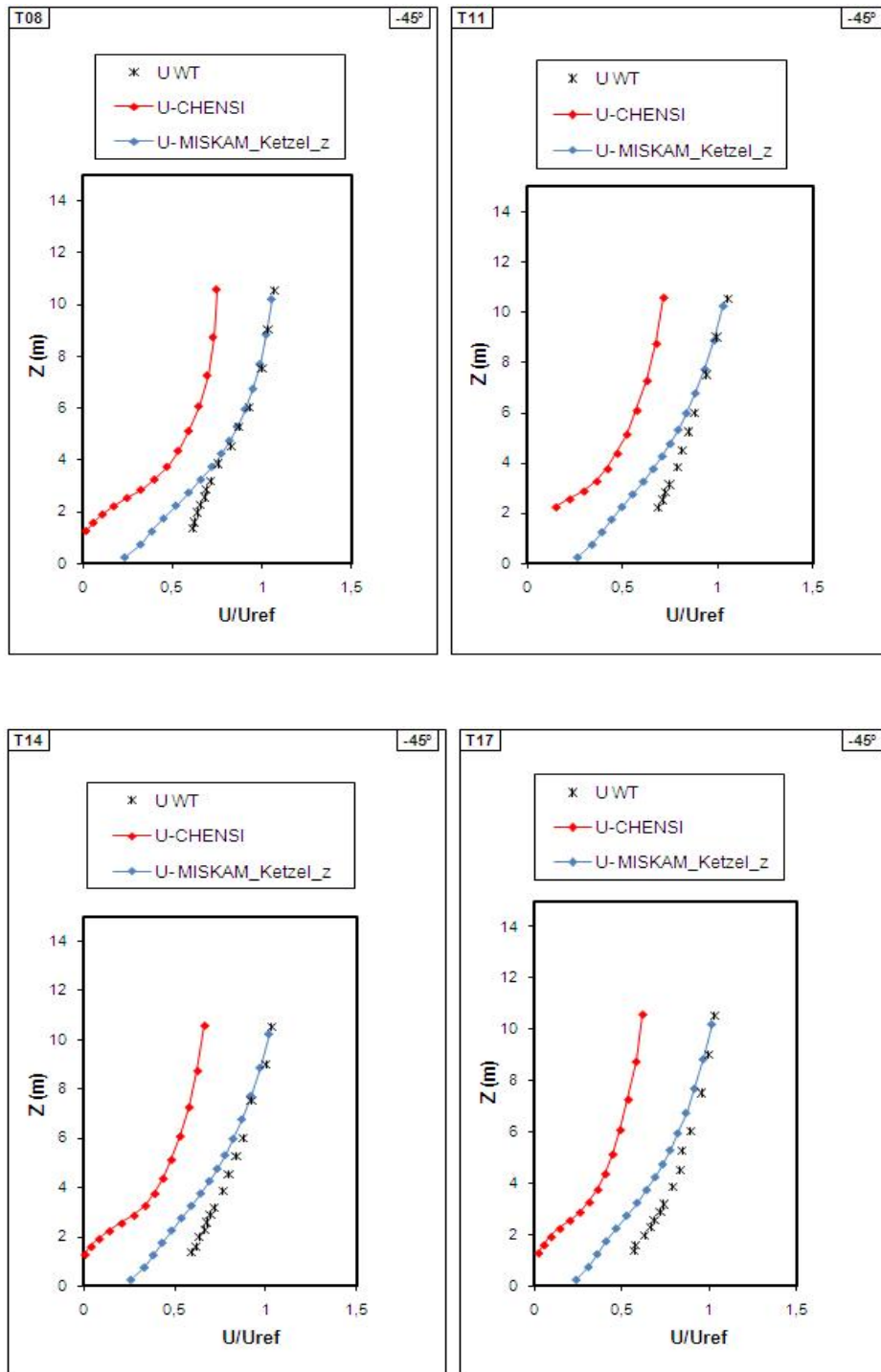
Dans ce cas, CHENSI s'approchait le plus de prédire les données observées. Cependant, il est clair que les trois modèles grandement surestimé le TKE dans la zone d'impact, près du mur au vent d'obstacles, ce qui est un problème commun avec les modèles utilisant. Plus en aval de l'accord était bon, sauf que CHENSI sur TKE prédit juste derrière l'obstacle, tandis que les trois autres modèles produit des résultats satisfaisants voir la figure VI.11.



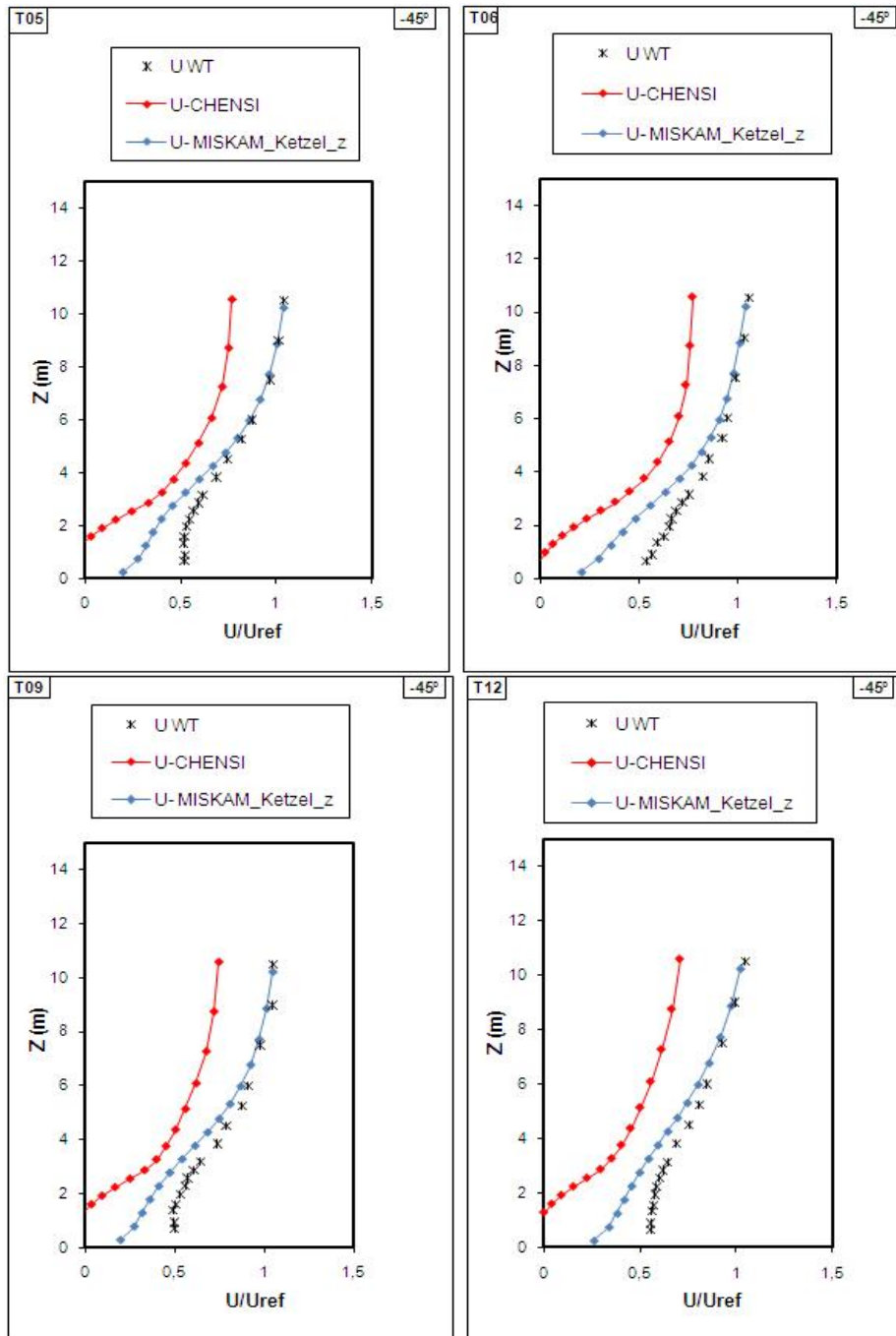


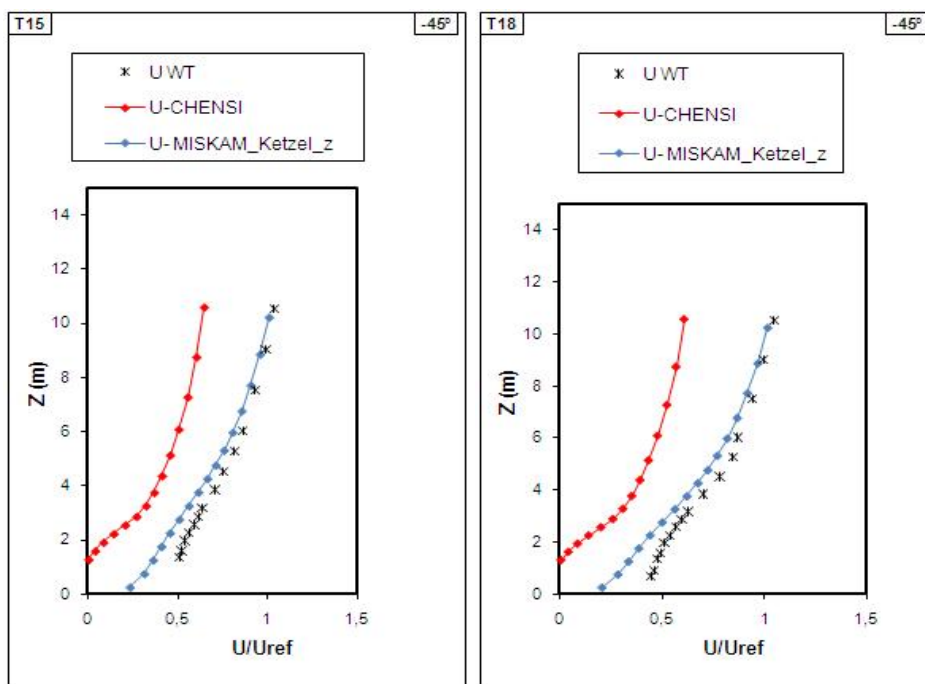
(a)





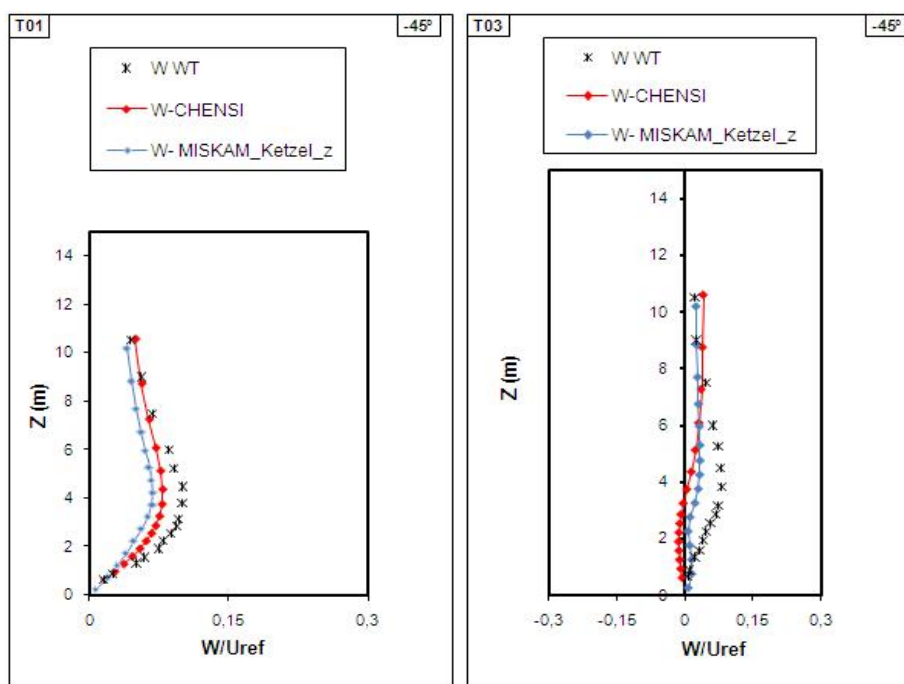
(b)

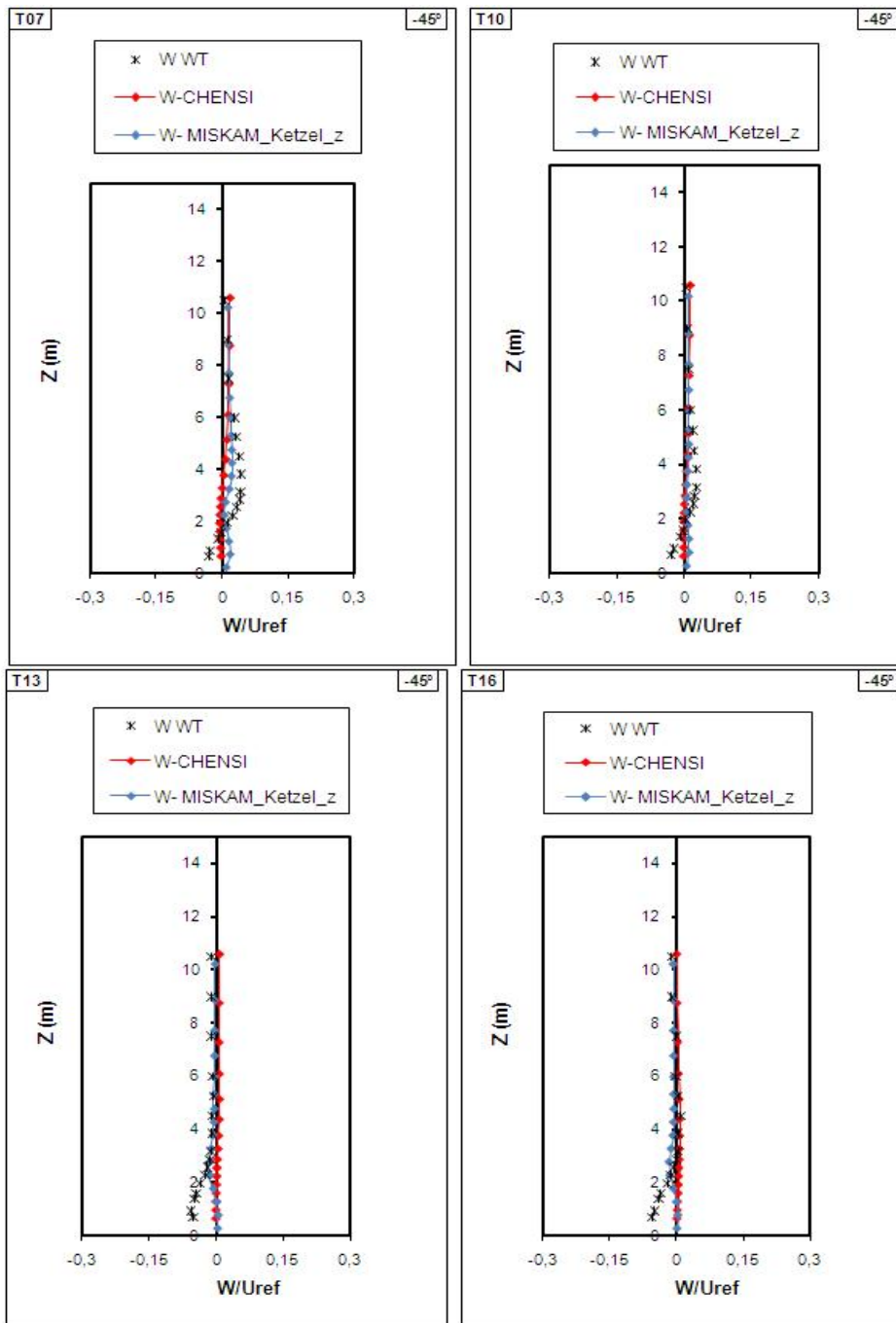




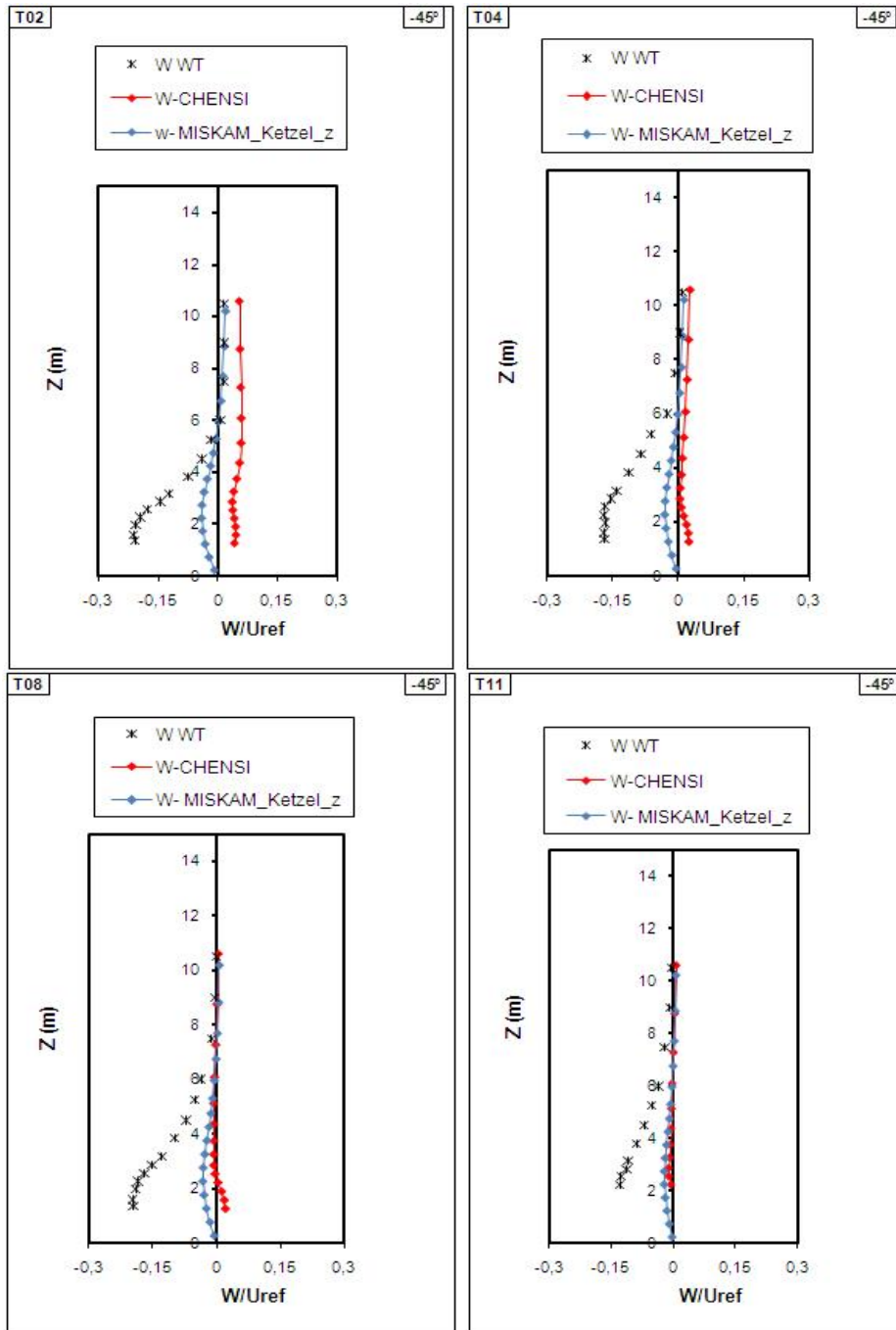
(c)

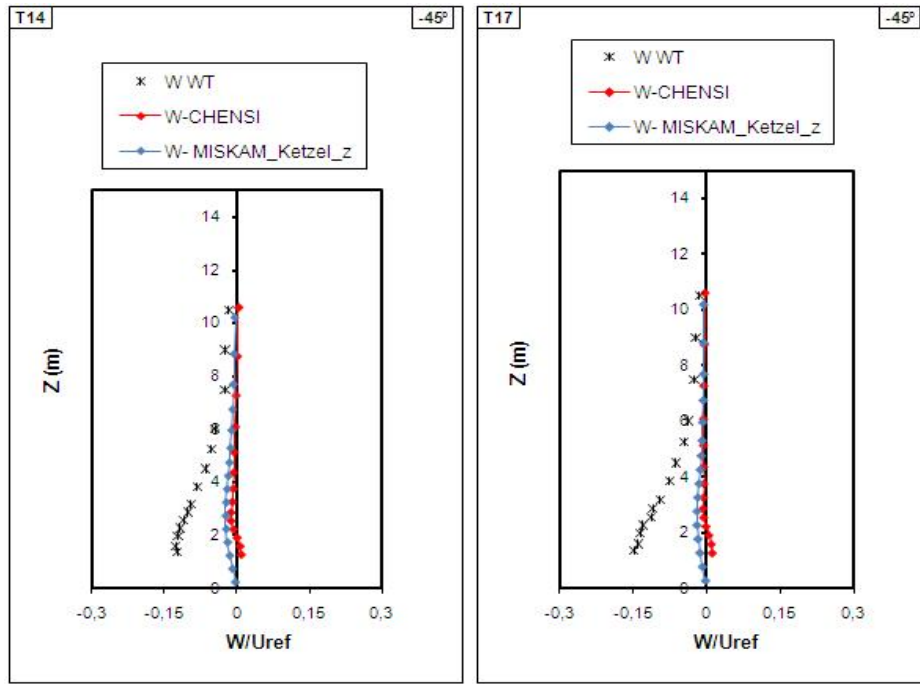
**Figure VI.9:** Comparaison des résultats expérimentaux et de la vitesse longitudinale modélisée (U) Profils normalisés par la vitesse du courant libre, sur les trois grilles sont présentés à 18 tours qui sont représentatifs de a) «rues étroites» (Tour 1, 3, 7, 10, 13 et 16), b) «croisements» (Tour 2, 4, 8, 11, 14 et 17) et c) «rues larges» (Tour 5, 6, 9, 12, 15 et 18), voir figure VI.8 comme indiqué par (Olesen et Berkowicz, [10]) pour le cas-45 °.



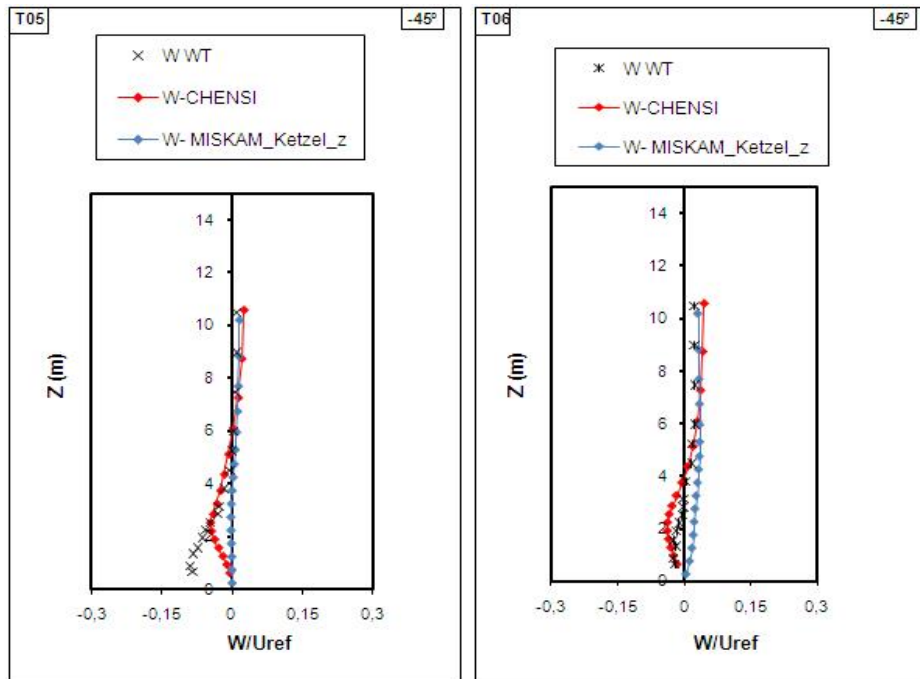


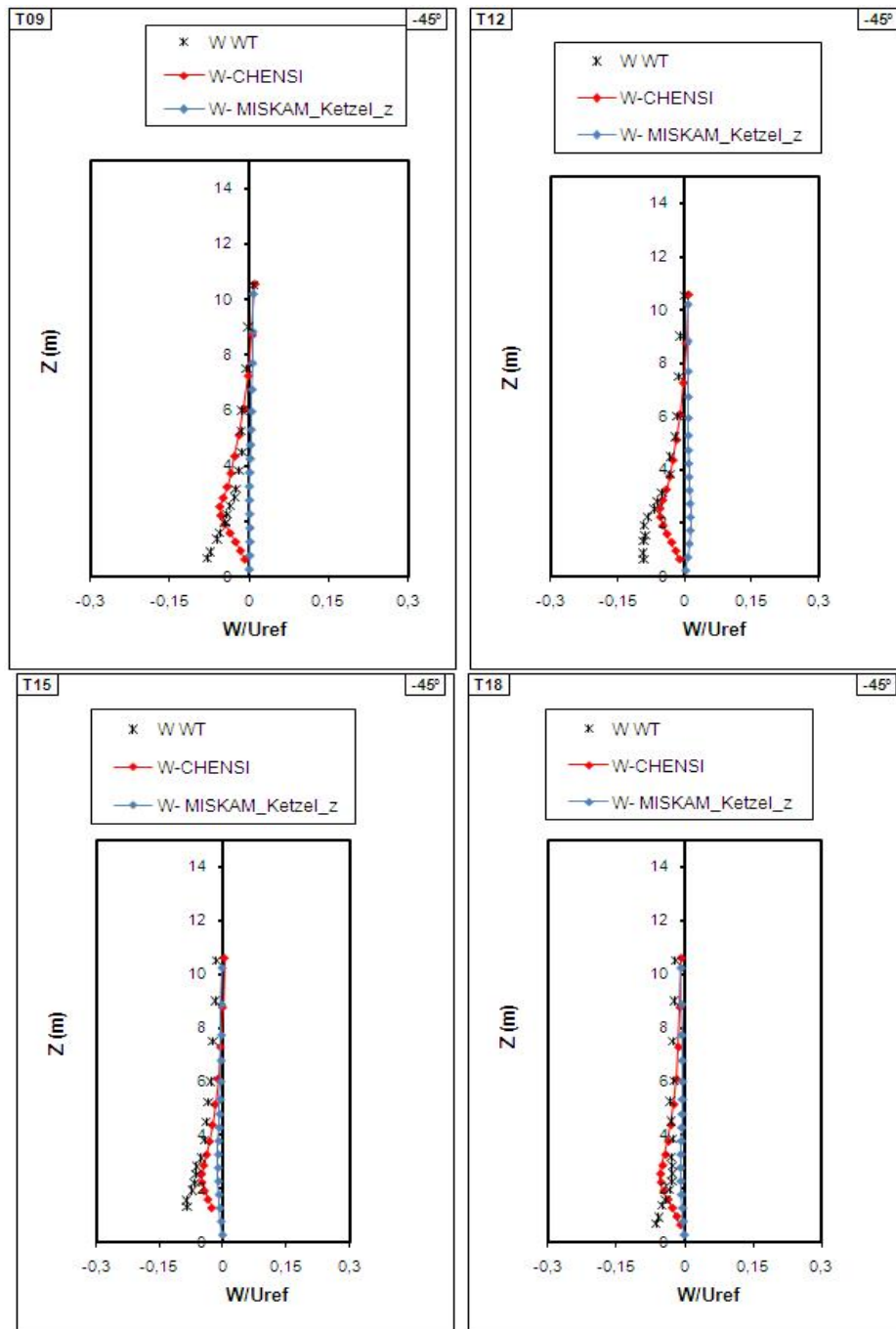
(a)





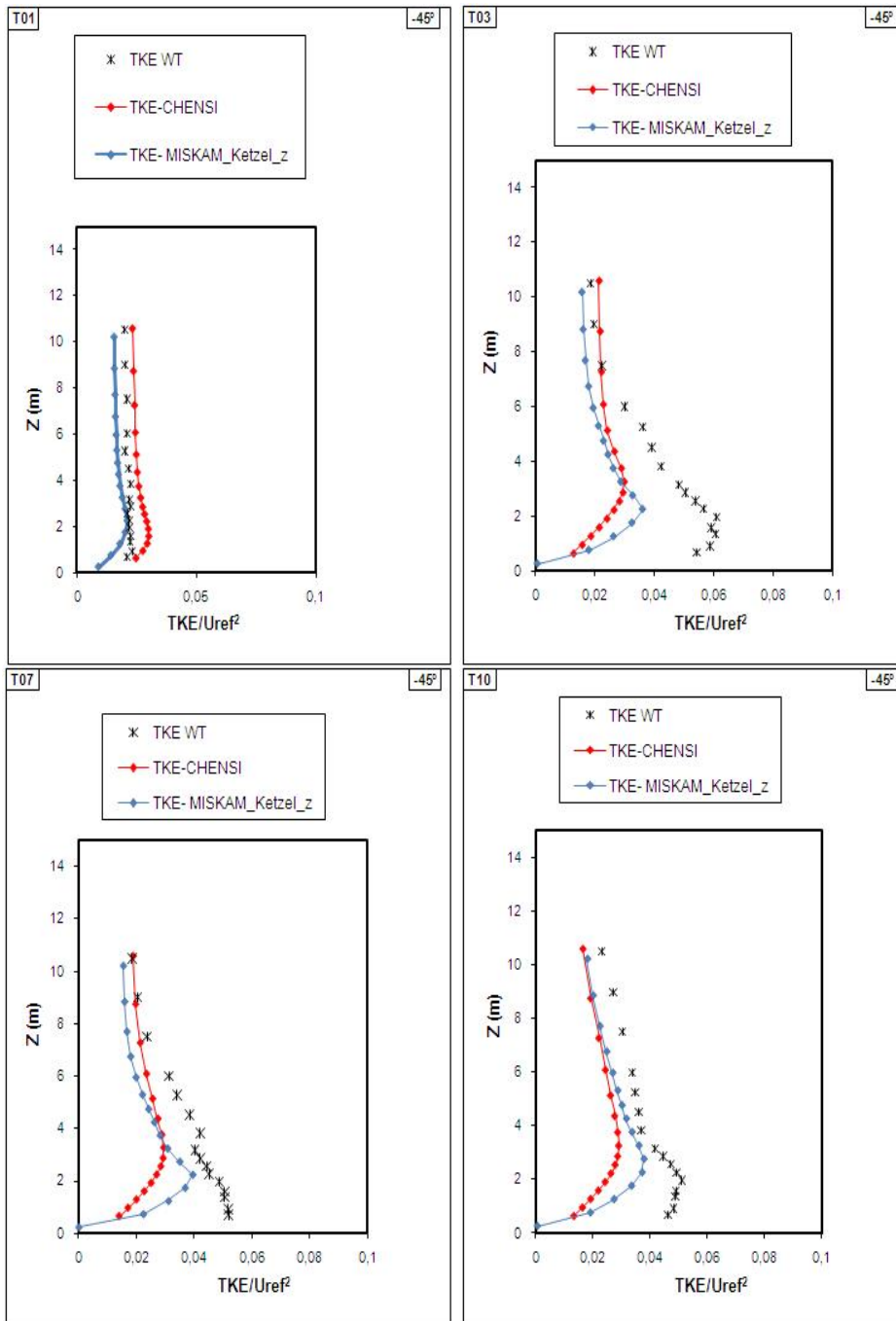
(b)

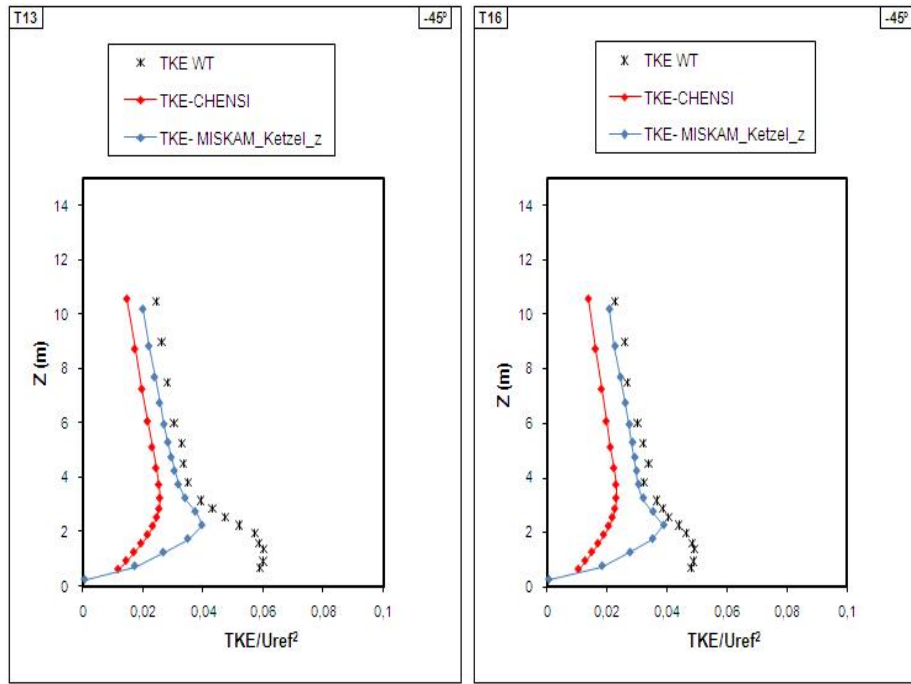




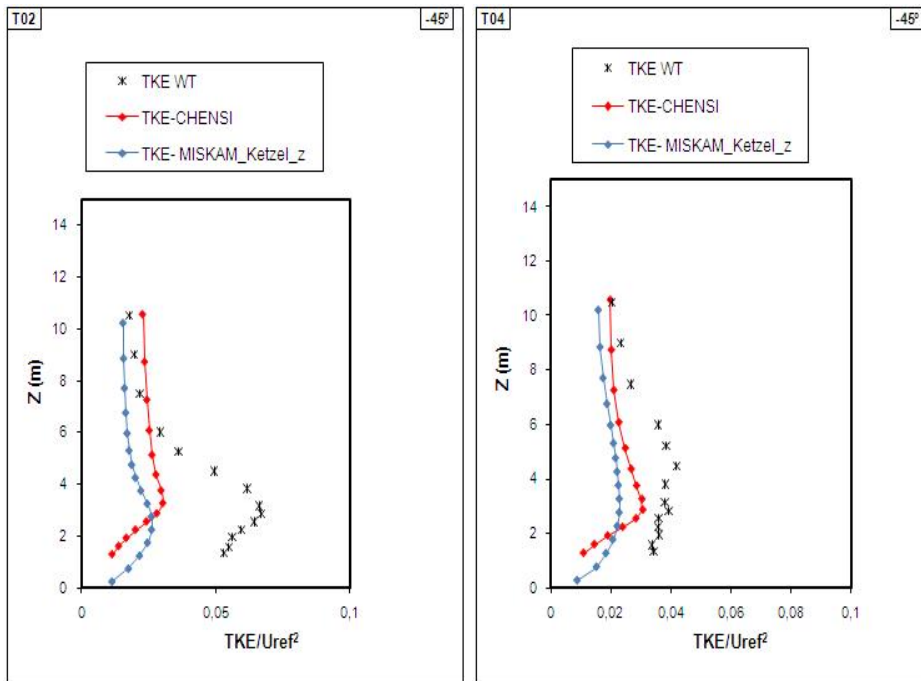
(c)

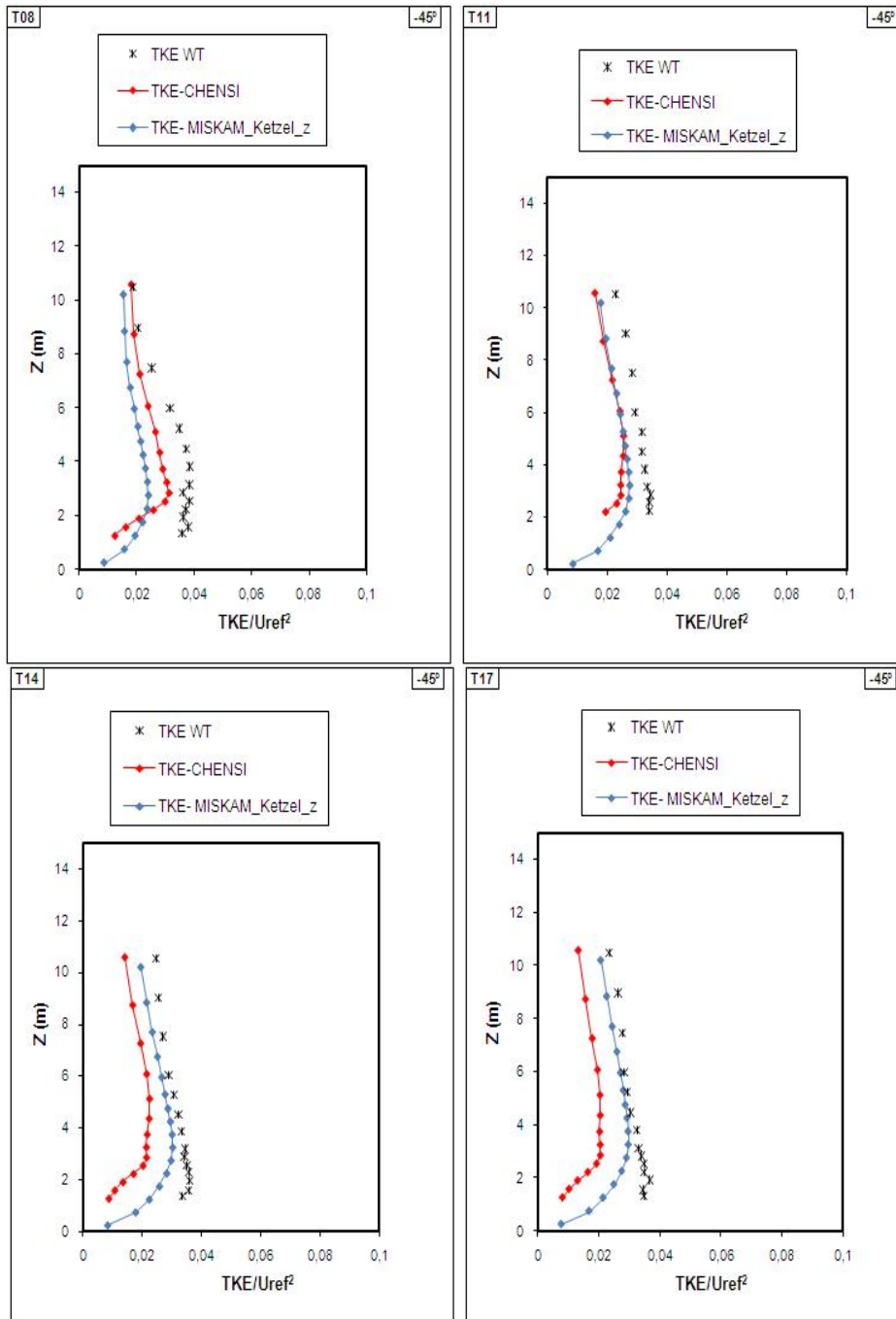
**Figure VI.10:** Comparaison des résultats expérimentaux et de la vitesse longitudinale modélisée ( $W$ ) Profils normalisés par la vitesse du courant libre, sur les trois grilles sont présentés à 18 tours qui sont représentatifs de a) «rues étroites» (Tour 1, 3, 7, 10, 13 et 16), b) «croisements» (Tour 2, 4, 8, 11, 14 et 17) et c) «rues larges» (Tour 5, 6, 9, 12, 15 et 18), voir figure VI.8 comme indiqué par (Olesen et Berkowicz, [10]) pour le cas  $-45^\circ$ .



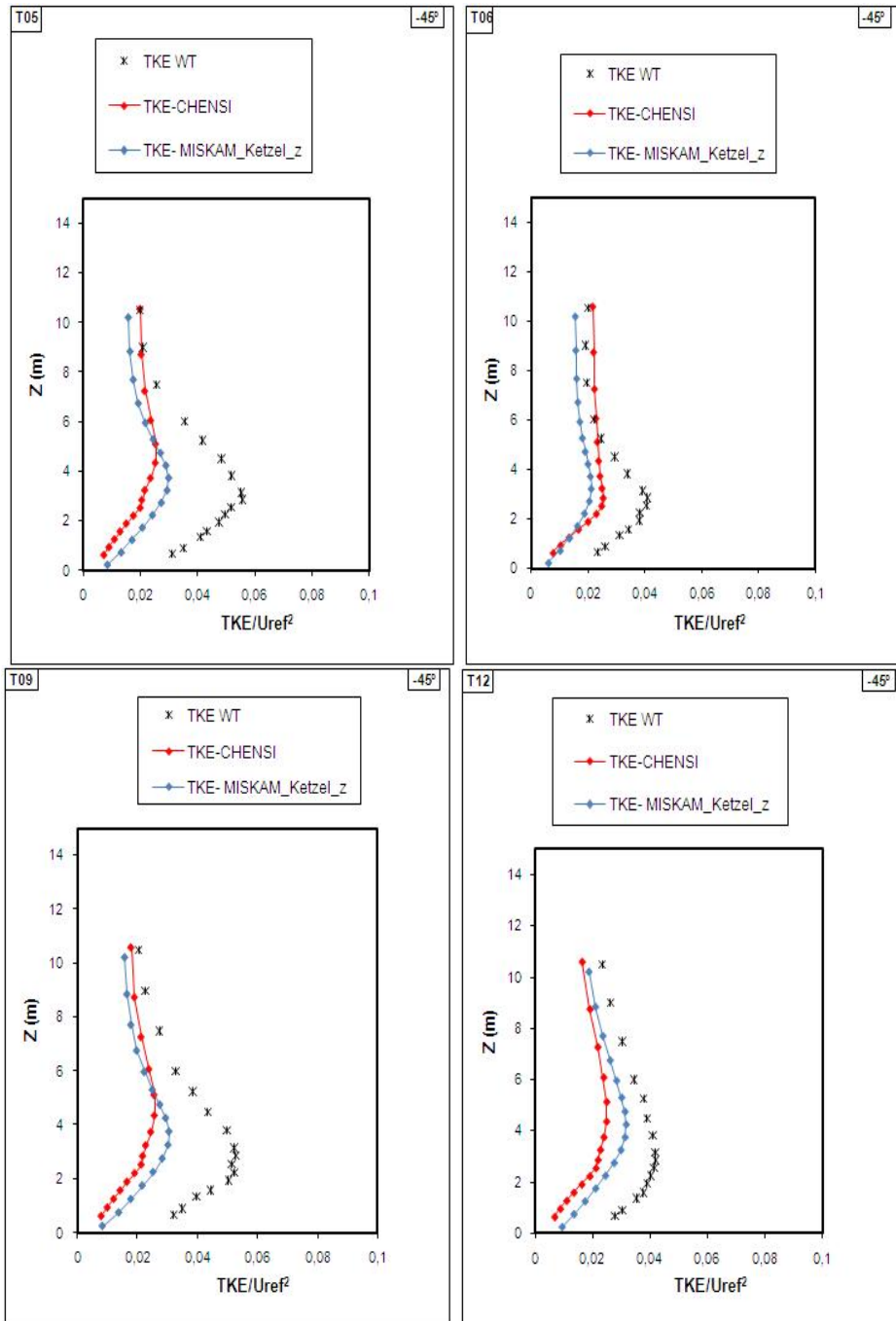


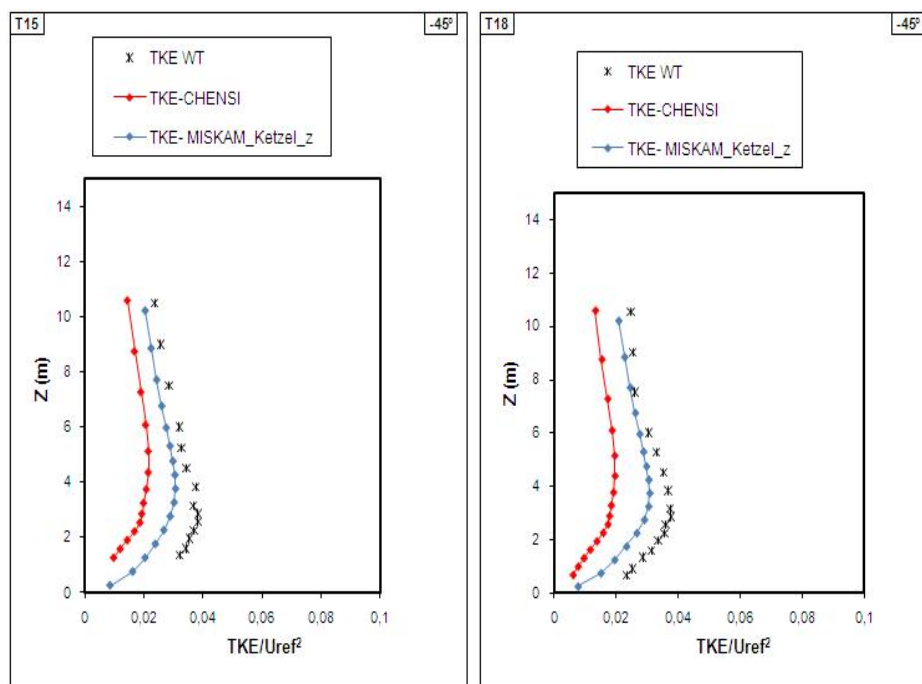
(a)





(b)





(c)

**Figure VI.11:** Comparaison de l'énergie cinétique turbulente expérimentale et modélisée (TKE) Profils normalisés par la vitesse du courant libre sur les trois grilles sont présentés à 18 tours, qui sont représentatifs de a) «rues étroites» (Tour 1, 3, 7, 10, 13 et 16), b) «croisements» (Tour 2, 4, 8, 11, 14 et 17) et c) «rues larges» (Tour 5, 6, 9, 12, 15 et 18), voir figure VI.8 comme indiqué par (Olesen et Berkowicz, [10]) pour le cas  $-45^\circ$ .

### VI.2.3 Variations de concentration

Dans la figure VI.12 : On présente des coupes de champs de concentrations moyennes sur un plan horizontal à quatre hauteurs différentes ( $z = 0,5 H$ ,  $z = 0,75 H$ ,  $z = H$  et  $z = 1,5 H$  avec  $H = 2.5$  m) pour un angle d'incidence du vent à  $-45^\circ$ . Les concentrations moyennes proches de la source diminuent rapidement, par rapport à la hauteur, après deux rangs, les concentrations moyennes diminuent plus rapidement. Ainsi, au moment où le panache des concentrations moyennes agrandit, ces dernières sont plus homogènes et le gradient diminue. La forme longitudinale des obstacles entraîne une déviation de l'axe de la plume par rapport à la direction du vent, lorsque l'angle du vent incident est suffisamment grand, le polluant est transporté par l'écoulement dans les rues perpendiculaires. La figure VI.13 représente les profils de concentration du polluant (Méthane  $CH_4$ ) pour le cas  $-45^\circ$  pour les quatre stations, on voit que la concentration de l'éthane augmente en passant de la station 1 (située juste en amont de la source) vers la station 2 (située en aval de la source), les concentrations maximales se déplacent alors vers une position où la valeur de  $y$  est plus grande. Pour les

stations suivantes, la valeur de la concentration maximale diminue de plus en plus en s'éloignant de la source d'émission, alors que la valeur de  $y$  correspondant à la concentration maximale reste sans changement, plus on se déplace vers le haut, plus la concentration diminue, mais la différence de concentration entre les trois hauteurs en chaque station diminue en s'éloignant de la source.

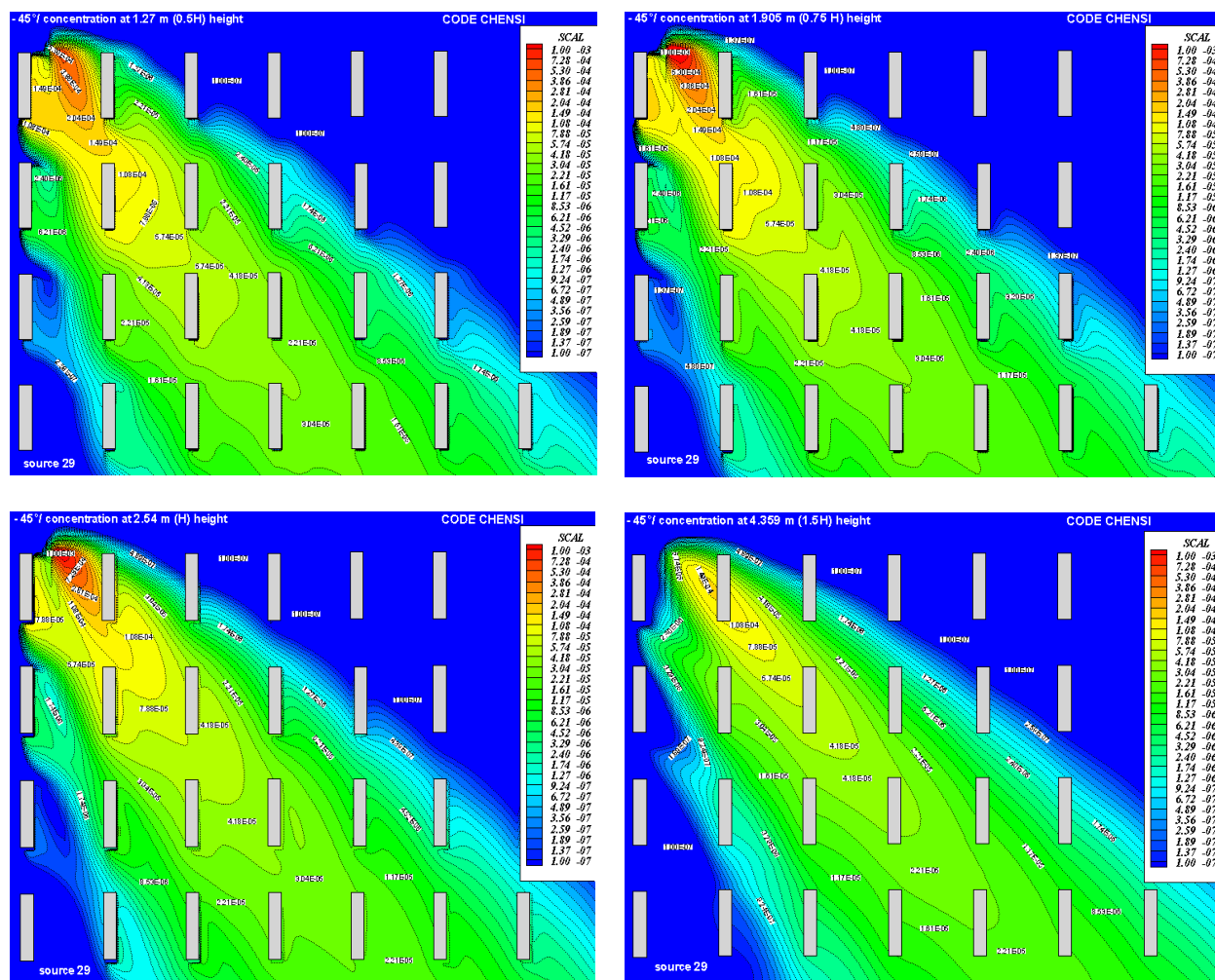
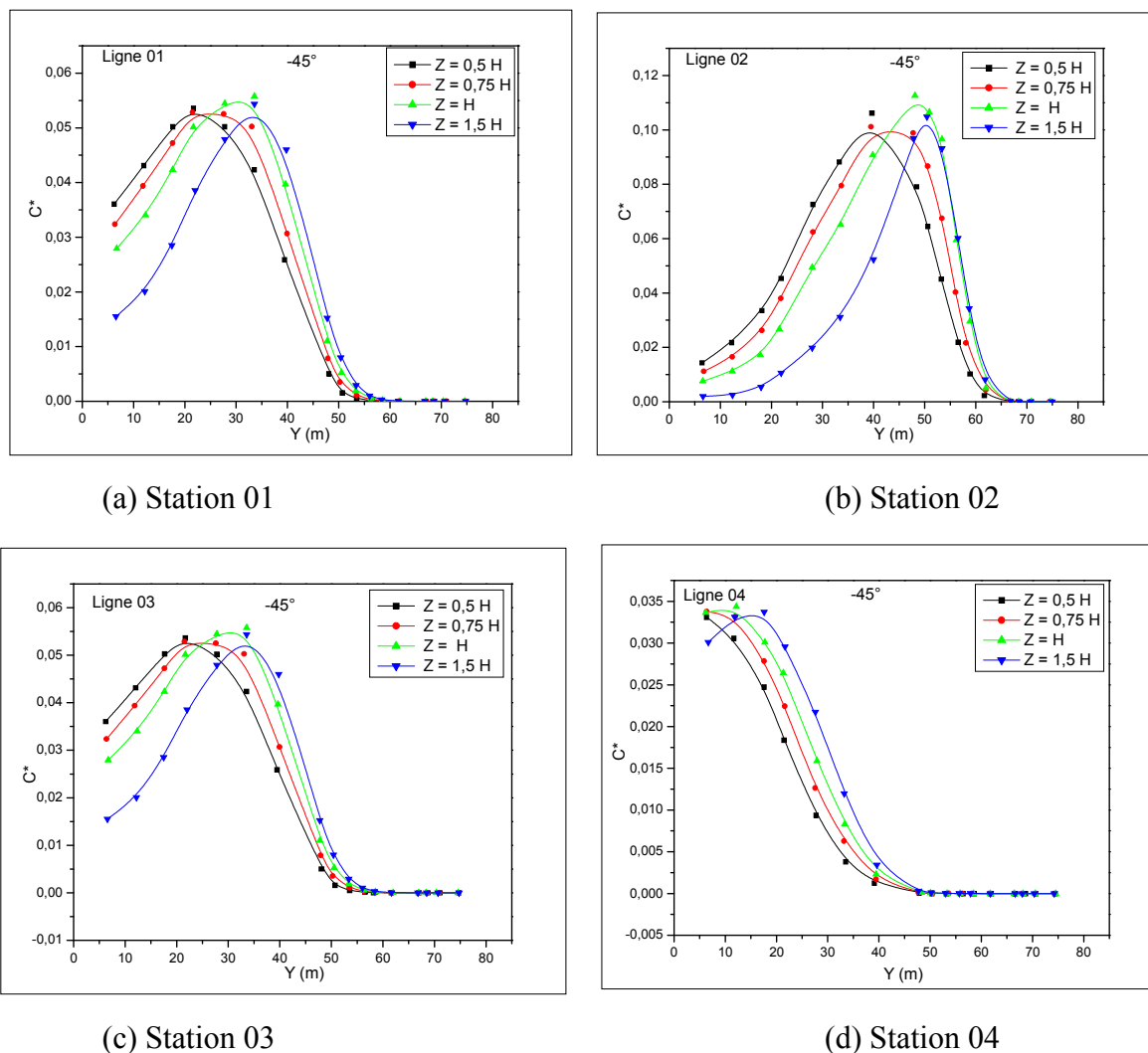


Figure VI.12: Comparaison de la distribution de concentration en quatre niveaux de hauteur [1,27 m (0,5 h), 1.905m (0,75H), 2.54m (H) et 4.359m (1,5 H)] pour le cas -45 °.



**Figure VI.13:** Profils horizontaux des concentrations en quatre niveaux de hauteur [1,27 m (0,5 H), 1.905m (0,75H), 2.54m (H) et 4.359m (1,5 H)] pour le cas -45 °.

Dans la figure VI.14 : On présente les profils adimensionnels de concentrations ( $C^*$ ) pour le cas d'incidence à -45 °, ceux calculés par le code CHENSI et les profils expérimentaux issus de Olesen et Berkowicz,[10]. Sur les profils adimensionnels de concentrations ( $C^*$ ), on constate une bonne concordance entre le profil expérimental et celui obtenu par calcul numérique par le code CHENSI ; d'autre part, les profils expérimentaux représentés dans la figure VI.8 donnent un aperçu d'évaluation assez remarquable. La taille des valeurs des concentrations moyenne indique que les profils de code CHENSI par rapport à ceux d'expérimentation donnent des valeurs beaucoup plus faibles.

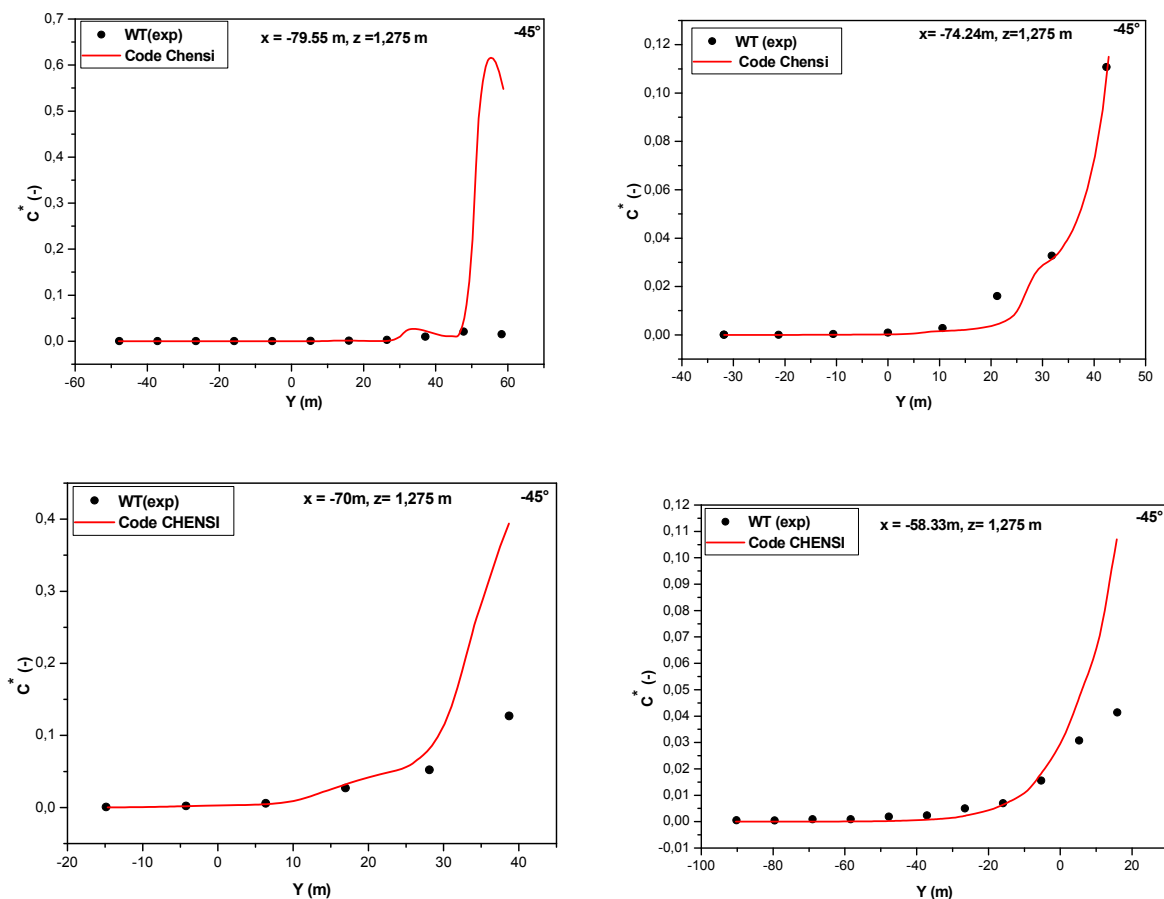


Figure VI.14: Profils de concentration le long de la direction  $y$  à  $z = 1.275$  m.

## VI.2.4 Conclusions

Les simulations du cas de validation de MUST utilisant CHENSI avec schémas numériques révisés ont donné des améliorations dans les deux mesures de validation d'écoulement et de dispersion. Les principales caractéristiques d'écoulement sont bien résolues, résultant dans un champ de concentration avec des métriques près ou au-dessus limite d'acceptation. Les petites structures à proximité des conteneurs ne s'affichent pas correctement, ce qui est une observation générale dans les modèles RANS testé dans le MUST exercice COST 732. C'est ce qui explique les mesures insuffisantes des composants latéraux et verticaux de la vitesse. Les utilisateurs du modèle sont invités à utiliser les programmes révisés, une grille de calcul bien soignée à fin de définir le meilleur choix des paramètres du modèle, par exemple le profil de turbulence entrée, car il peut influencer remarquablement sur les résultats d'ensemble. L'ensemble des données de MUST a été fourni par l'Agence de réduction de la menace de la Défense (DTRA) pour une utilisation dans COST732.

---

---

### **VI.3 Comparaison et validation statistique entre les résultats obtenus par simulation numérique en les confrontant aux résultats expérimentaux pour les deux cas 0° et -45°**

#### **VI.3.1 Méthode de validation statistique:**

Les performances des modèles sont évaluées selon la méthodologie suggérée par Hanna et al. [72] et résumée dans Chang & Hanna [4]. Cette méthodologie permet d'une manière générale de traiter un ensemble de mesures à la fois dans le temps et dans l'espace. Les paramètres statistiques introduits sont les suivants : le biais fractionnel FB (Fractional bias), l'erreur quadratique moyenne normalisée NMSE (Normalized mean square error) et le facteur 2 FAC2 aussi la moyenne (Average), le coefficient de corrélation  $R^2$  (il est écrit sur chaque figure avec l'équation linéaire correspondante; droite en rouge) et les hits on compare chaque point calculé avec celui mesuré. Ces paramètres sont définis par :

- Analyse des simulations.

##### **VI.3.1.a Mesures**

Pour chaque cas simulé, une analyse dynamique précèdera celle basée sur les concentrations. Le transport de polluant étant assuré par l'écoulement dynamique, il est en effet nécessaire de vérifier la concordance entre les comportements simulés et expérimentaux. Les profils verticaux de vitesse, énergie cinétique de turbulence et concentration seront ainsi établis pour chaque simulation, aux distances expérimentales des positions, suivant l'axe de l'écoulement. Il s'agira de comparer ces résultats aux données expérimentales et s'assurer qu'il n'existe pas de différence notable.

Cette première vérification faite, l'étude se penchera sur les profils verticaux de vitesse, énergie cinétique de turbulence et concentration obtenues par Code\_CHENSI en moyenne sur toute la durée de la simulation. Notre analyse sera principalement faite selon l'axe de l'écoulement, où les profils sont attendus. Pour chaque cas simulé, les profils verticaux de vitesse, énergie cinétique de turbulence seront tracés pour les deux cas (0° et -45°).

Outre ces différents profils qui permettent de juger visuellement du bien-fondé ou non de la simulation réalisée, on basera aussi notre analyse sur un ensemble de paramètres statistiques définis ci-après.

### VI.3.1.b Indicateurs statistiques :

L'utilisation d'indicateurs statistiques rend objective et fondée la comparaison entre les résultats obtenus par Code\_CHENSI, et les mesures expérimentales. Pour chaque cas ( $0^\circ$  et  $-45^\circ$ ) reproduit, les statistiques porteront ainsi sur les prédictions faites par les différents modèles en termes de vitesse, énergie cinétique de turbulence et concentration globale ou maximale, par point de mesure ou pour tous les points.

Les paramètres statistiques utilisés sont définis par les formulations suivantes, où  $C_0$  et  $C_p$  sont respectivement les observations expérimentales et les prédictions des modèles (Code\_CHENSI), l'opérateur de moyenne s'opérant ensuite sur l'ensemble des données.

#### VI.3.1.b.1. Le biais fractionnel FB ('Fractional Bias') :

$$FB = 2 \times \left( \frac{\overline{C_0} - \overline{C_p}}{\overline{C_0} + \overline{C_p}} \right) \quad (VI.1)$$

#### VI.3.1.b.2 L'erreur quadratique moyen normalisée NMSE ('Normalized Mean Square Error') :

$$NMSE = \frac{\overline{(C_0 - C_p)^2}}{\overline{C_0} \times \overline{C_p}} \quad (VI.2)$$

#### VI.3.1.b.3 Le facteur 2 FAC2 :

$$FAC2 = \frac{C_p}{C_0} \quad (VI.3)$$

Où  $C_0$  et  $C_p$  sont respectivement les observations et les prédictions des modèles, l'opérateur de moyenne s'exerçant sur l'ensemble des données.

Ces différents paramètres statistiques ne fournissent pas les mêmes informations en vue de l'évaluation des performances du modèle. Le biais fractionnel FB rend compte de

l'erreur systématique globale commise, et non pas des écarts ponctuels importants qui peuvent se compenser et faire en sorte d'obtenir un biais fractionnel quasi nul. L'intérêt de ce paramètre réside dans le fait qu'il ne privilégie pas les valeurs élevées par rapport aux valeurs plus faibles, contrairement aux autres paramètres calculés de manière linéaire. L'erreur locale peut être estimée à la fois par l'erreur quadratique moyenne normalisée NMSE.

Enfin, le "facteur 2" FAC2 est un paramètre classiquement utilisé permettant d'avoir une estimation brute des performances du modèle.

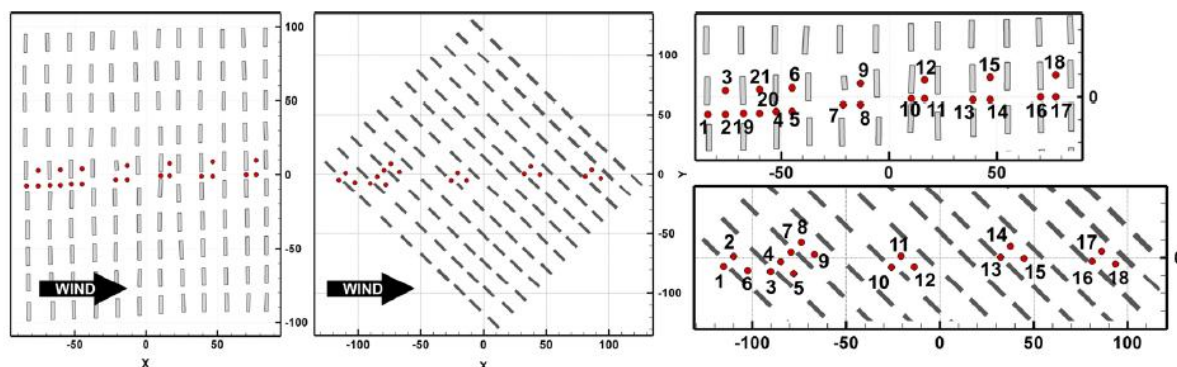
Un modèle parfait obtiendrait les performances suivantes :  $FB = NMSE = 0$  et  $FAC2 = 1$ . Dans la pratique, Chang et Hanna ont défini des intervalles de "bonnes" performances, même si ce n'est à prendre qu'à titre indicatif (Chang & Hanna, [4]). Un modèle sera ainsi jugé suffisamment performant s'il ne s'éloigne pas des critères suivants : ( $-0.3 < FB < 0.3$ ,  $NMSE < 4$  et  $FAC2 > 0.5$ ).

Nom	Définition	Modèle parfait	modèle acceptable
FB	$FB = 2 \times \left( \frac{\overline{C_0} - \overline{C_p}}{\overline{C_0} + \overline{C_p}} \right)$	0	$-0.3 < FB < 0.3$
NMSE	$NMSE = \frac{(\overline{C_0} - \overline{C_p})^2}{\overline{C_0} \times \overline{C_p}}$	0	$NMSE < 4$
FAC2	$FAC2 = \frac{\overline{C_p}}{\overline{C_0}}$	1	$FAC2 > 0.5$

**Tableau VI.1:** Outils statistiques d'estimation d'un modèle numérique.

L'ensemble de ces analyses, tant graphiques que statistiques, seront mises à profit dans l'évaluation de Code\_CHENSI par comparaison à l'expérience du tunnel du vent (MUST) à l'université de Hambourg (Bezpalcova and Harms, [24]).

### VI.3.2 Résultat des analyses Statistique :



**Figure VI.15:** Disposition des mesures et les bâtiments pour les cas d'écoulement. Les profils verticaux de vent et de turbulence composants sont les endroits mesurés («tours») montré. Le vent soufflé de la gauche.

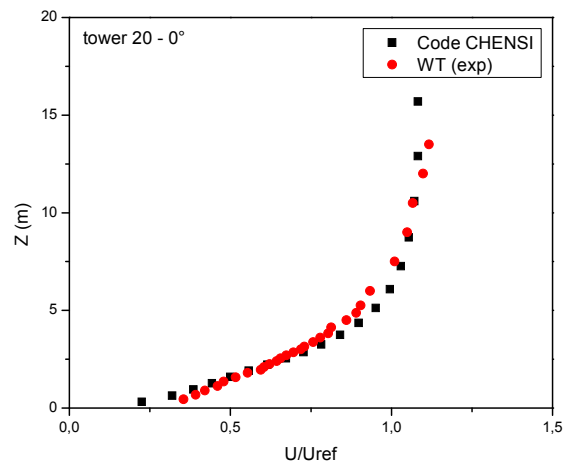
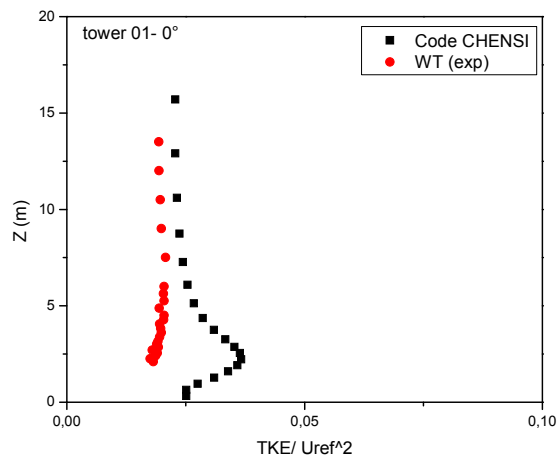
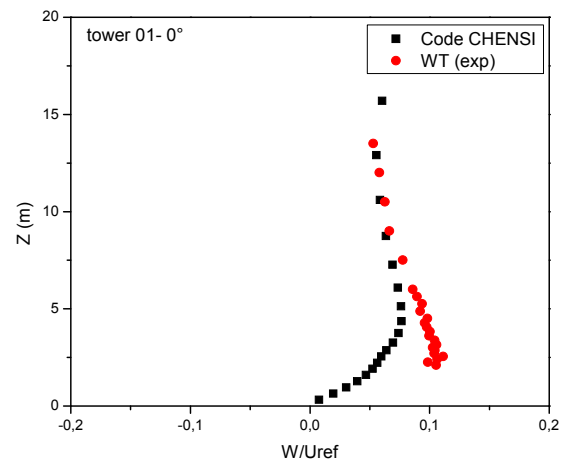
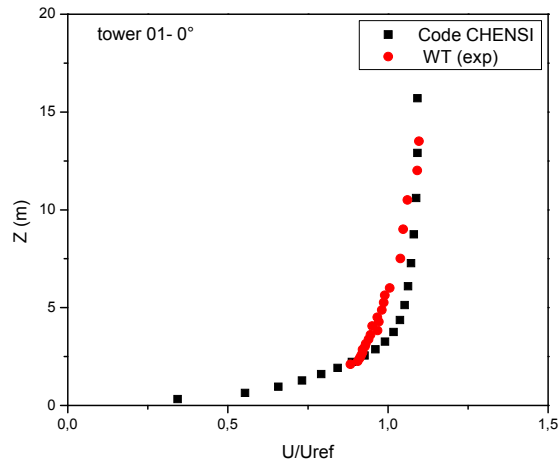
**Top:** le cas de  $0^\circ$ . Les points peuvent être classés en trois groupes, de sorte que la tour 1 représente un «Rue étroite», Tour 20 un« Croisement », et de la Tour 21 une« Rue large ».

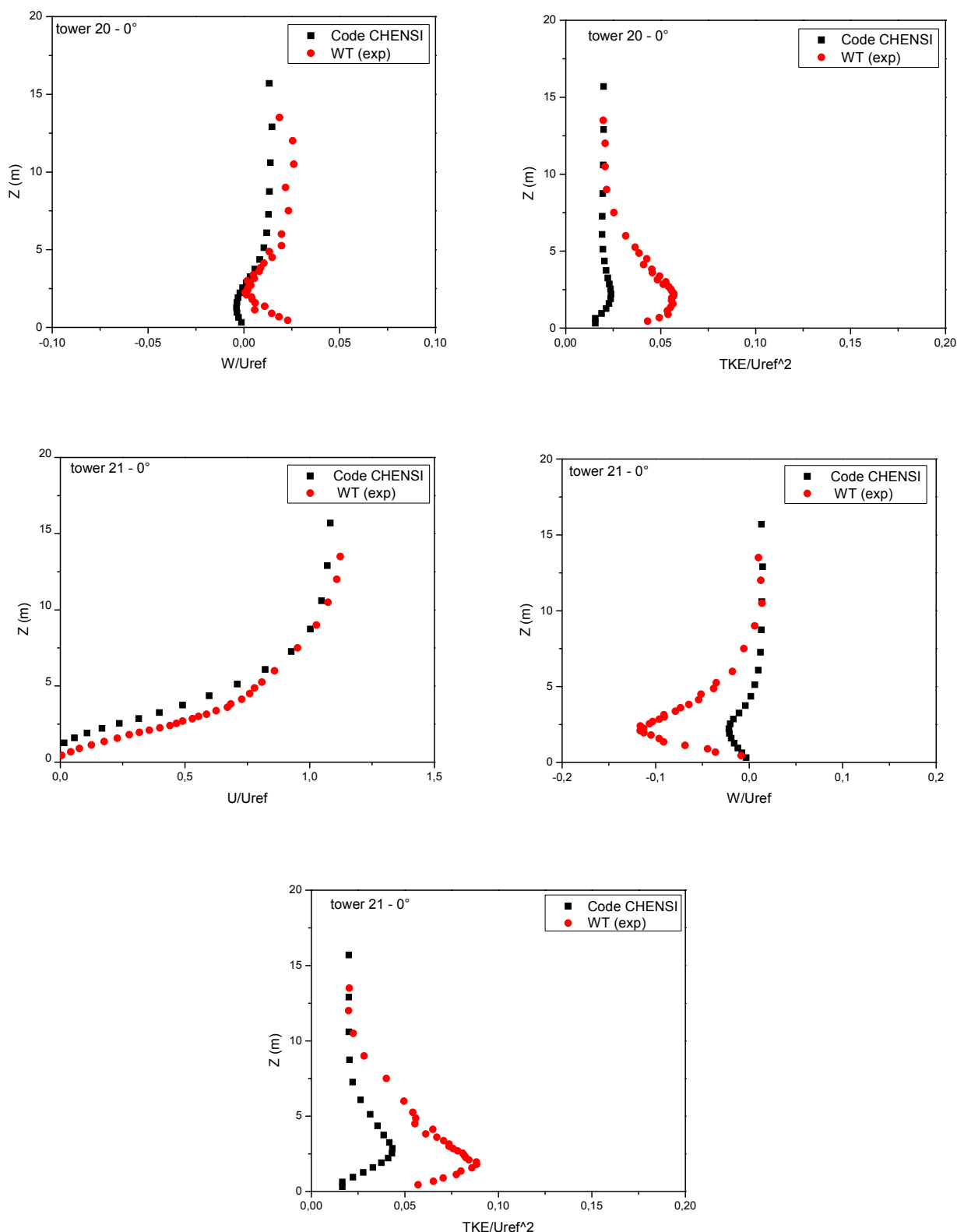
**En bas:** le cas  $-45^\circ$ . Tour 1 représente une «Rue étroite», Tour 11 un «Croisement», et de la Tour 6 une «Rue large».

#### VI.3.2.1 Les parcelles et les mesures pour le cas d'écoulement de $0^\circ$ :

Dans la figure VI.16 les vitesses moyennes et l'énergie cinétique turbulente calculés sur les trois grilles sont présentés à trois tours, qui sont représentatifs des «ruelles» Tour 1 représente un «Rue étroite», Tour 20 un« Croisement », et de la Tour 21 une« Rue large », voir la figure VI.15. Pour le rapport  $U / U_{ref}$  toutes les simulations sont très proches, en particulier au-dessus de 2,5 fois les intervalles de conteneurs sont également faibles. Les plus grandes incertitudes sont ici toutefois obtenues pour un tour dans la «hauteur H étroite ». L'incertitude correspondant est également faible. Ci-dessous  $2,5H$ , l'erreur augmente, bien que les simulations aussi ne diffèrent pas beaucoup. Les plus grandes incertitudes sont obtenues dans les «rues larges» où existent des régions de recirculation derrière les conteneurs. Les différences de vitesse ( $W/U_{ref}$ ) et de la rue de l'incertitude. Au tour 21, existent les plus grandes différences entre la simulation et l'expérimentation, la solution sur la grille fine est légèrement plus près des expériences, mais l'incertitude indique qu'une nouvelle amélioration ne conduira pas à des améliorations substantielles. Pour les profils verticaux d'énergie cinétique turbulente est :  $(TKE/U_{ref}^2)$ . En général, les niveaux d'énergie de turbulence sont prévus à l'intérieur sous la canopée urbaine par le modèle k- $\epsilon$  standard. Néanmoins, à noter

que la position du grand pic observé en TKE à tour 21 «Rue large » est bien prédite en utilisant le modèle k-ε standard. Ce grand pic observé dans la TKE résulte d'une oscillation de la couche de cisaillement élevée par la turbulence à grande échelle en amont, en améliorant la direction du flux du vent, on attend la valeur maximale de TKE à la tour 21 «Rue large », ceci se produit au niveau près du sommet de la canopée ou'  $z / H = 1$ ) et diminue de façon monotone dans la direction du premier canyon de la rue.

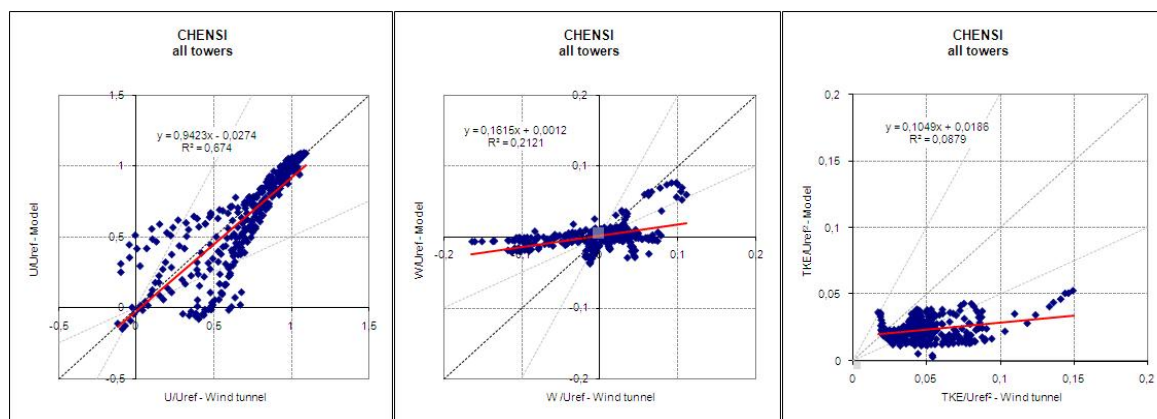




**Figure. VI.16:** La vitesse moyenne ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$ ) et de l'énergie cinétique turbulente ( $TKE/U_{ref}^2$ ) observée dans le tunnel du vent avec celle prédite par le code numérique (CHENSI) calculées sur les trois grilles sont présentés à trois tours, qui sont représentatifs des «ruelles», Tour 1 représente un «Rue étroite», Tour 20 un« Croisement », et de la Tour 21 une« Rue large », voir Figure VI.15 comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]).

Les résultats sous-jacents la figure doivent être examinée plus en détail. Pour les paramètres ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  et  $TKE/U_{ref}^2$ ) dans la figure VI.16: qui montre les mêmes données que la figure VI.15, mais divisée en trois catégories de données: «Rues étroites », «croisements», «Rues larges». Le modèle semble avoir beaucoup moins de succès dans l'exercice de vitesse ( $U$ ) pour les rues étroites que pour les autres sites. Près du sol le modèle ( $U$ ) se rapproche de zéro. On considère que ce n'est pas le cas pour les valeurs mesurées.

Les outils statistiques d'estimation d'un modèle numérique recommandé par Chang et Hanna [4] sont le biais fractionné (FB), l'erreur quadratique moyenne normalisée, (NMSE), le coefficient de corrélation ( $R^2$ ) et la fraction des prévisions dans un facteur de deux des observations (FAC2), ils sont reproduits dans le tableau (VI.1) pour le profil de vitesse de ( $U$ ,  $W$ ) et de l'énergie cinétique turbulente (TKE). Dans la figure VI.17, on montre un exemple, en se référant au cas de  $0^\circ$  de modèle CHENSI pour toutes les tours. En somme, il ya 21 tours avec au total 566 points de données (observés et mesurés) pour les paramètres ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  et  $TKE/U_{ref}^2$ ). On a calculé les mesures statistiques correspondantes comme le montre le tableau VI.2. Comme il a été signalé auparavant par CHENSI qui donne un bon accord dans  $R^2$  et FAC2, avec des résultats satisfaisants pour profil vertical avec les paramètres ( $U/U_{ref}$  et  $TKE/U_{ref}^2$ ) respectivement (FAC2 = 79% et FAC2 = 52%) pour tous les 21 tours. Pour l'erreur quadratique moyenne normalisée (NMSE), le modèle donne des résultats globalement satisfaisants, tant pour la vitesse de vent (avec un NMSE = 0,01) et pour l'énergie cinétique turbulente (avec un NMSE = 0,99). CHENSI présente des résultats, non acceptables pour la vitesse par rapport à l'axe z ( $W$ ) et l'énergie cinétique turbulente (TKE) respectivement (FB = 1,09, 0,72 > 0,3) par contre, les résultats de la vitesse par rapport à l'axe x ( $U$ ) sont acceptable pour le biais fractionnel FB = 0,01 < 0,3.

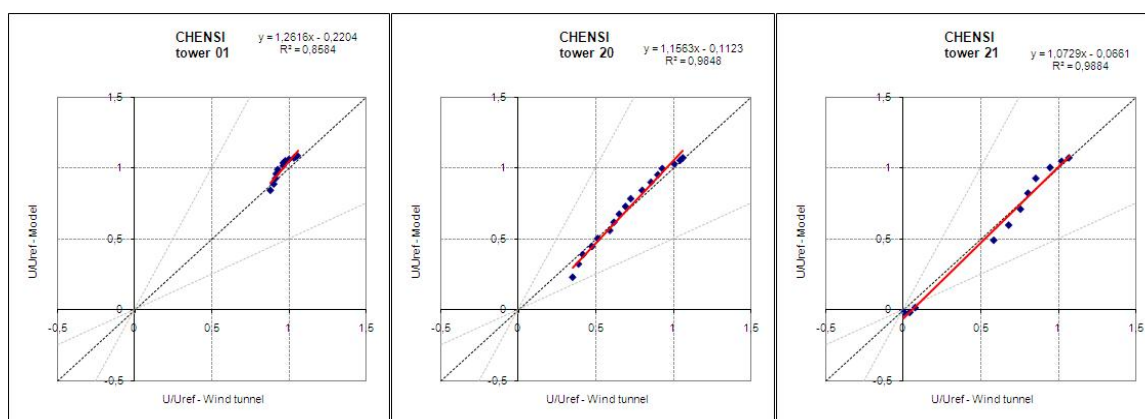


**Figure VI.17:** Cas de  $0^\circ$ . Les diagrammes de dispersion pour les composants de vitesse  $U/U_{ref}$  (à gauche),  $W/U_{ref}$  (au centre) et  $TKE/U_{ref}^2$  (à droite) pour un modèle particulier (CHENSI) comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]).

0 degre		All towers			
		R2	FB	NMSE	FAC2
CHENSI-Medjahed	U/Uref	0.67	0.01	0.01	0.79
	W/Uref	0.21	1.09	4.31	0.303
	TKE/U <sup>2</sup> ref	0.08	0.72	0.99	0.52

**Tableau VI.2:** mesures statistiques pour les paramètres ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  et  $TKE/U_{ref}^2$ ) pour toutes les tours simulés (21 tours), cas de  $0^\circ$ .

La figure VI.18 montre un exemple en se référant au cas de  $0^\circ$ . Le modèle de CHENSI, divisé en 3 classes de données: «rues étroites» (Tour 1), «croisement» (Tour 20), «rue large» (Tour 21), comme le montre la figure VI.15, au total 13 points de données (observés et mesurés) pour les paramètres ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  et  $TKE/U_{ref}^2$ ). On a calculera les valeurs statistiques correspondantes, elles sont reprises dans le tableau VI.3. Comme on la souligné avant, CHENSI donne un bon accord, avec de meilleurs résultats pour les tours verticales T01, T20 et T21 avec les paramètres ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  et  $TKE/U_{ref}^2$ ) respectivement (FAC2 = 100%, FAC2 = 91,7% et FAC2 = 91,7%). Pour la tour 01 «rues étroites», (FAC2 = 100%, FAC2 = 58% et FAC2 = 29%) pour la tour 20 «croissent» et (FAC2 = 72%, FAC2 = 18% et FAC2 = 72%), pour la tour 21 «rue large». Dans le tableau VI.3, l'erreur quadratique moyenne normalisée NMSE, CHENSI donne des résultats globalement très satisfaisants, tant sur la vitesse de vent (avec un NMSE = 0,002), que sur l'énergie cinétique turbulente (avec un NMSE = 0,24), notamment sur les mesures prises loin des obstacles ou au-dessus de la canopée. Au- biais fractionnel, les résultats présentent une petite prédiction sur des observations avec le paramètre de la vitesse U ( $|FB| < 0,3$ ). Mais les résultats obtenus pour la vitesse W et de l'énergie cinétique turbulente TKE, le biais fractionné (FB) est supérieur à 0.3 ceci implique que ces résultats ne sont pas acceptables.



**Figure VI.18 :** Cas  $0^\circ$ . Mêmes données que la figure VI.17 pour les paramètres ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  et  $TKE/U_{ref}^2$ ), mais divisé en 3 classes de données: "rue étroite" (Tour 1), "croisement" (Tour 20), "rue larges" (Tour 21), voir figure VI.15 comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]).

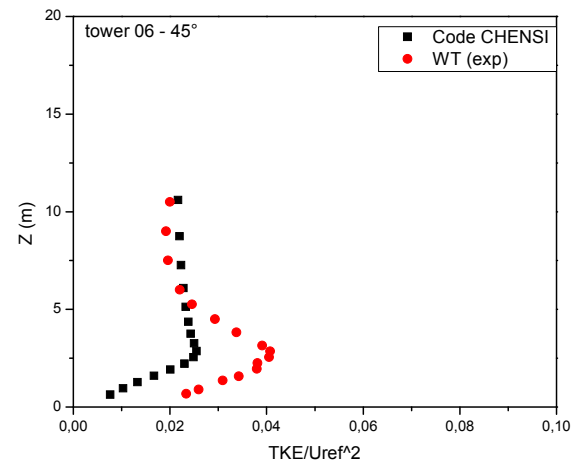
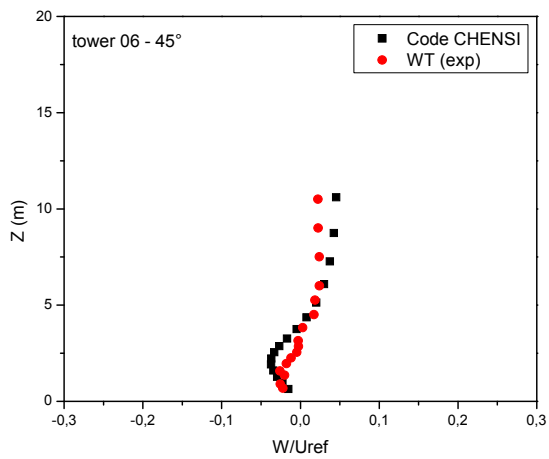
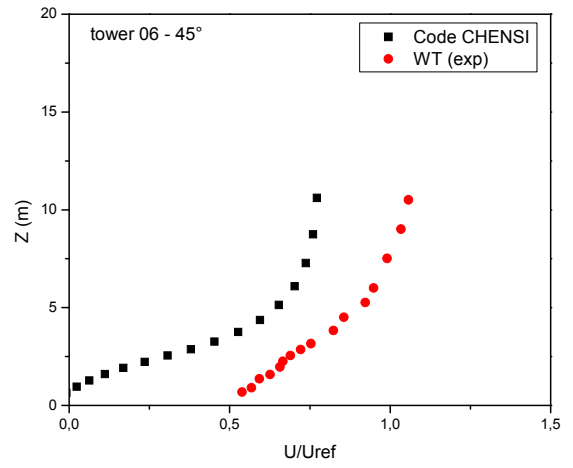
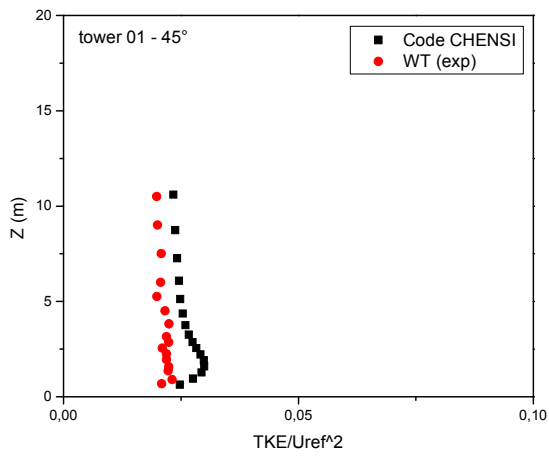
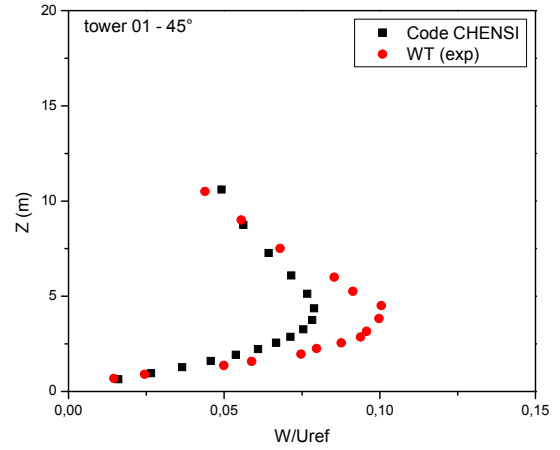
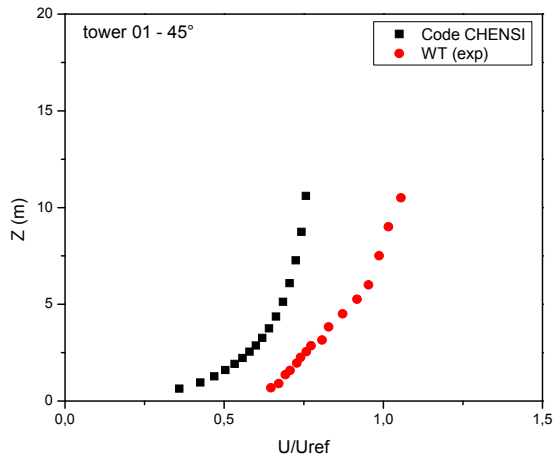
0degre	Tower 1 (Narrow Street)				Tower 20 (Crossing)				Tower 21(Wide Street)			
	R2	FB	NMSE	FAC2	R2	FB	NMSE	FAC2	R2	FB	NMSE	FAC2
U/Uref	0.85	-0.03	0.002	1	0.98	0.001	0.004	1	0.98	0.02	0.007	0.72
W/Uref	00	0.30	0.16	0.917	0.39	0.74	1.08	0.58	0.58	1.19	4.81	0.18
TKE/U <sup>2</sup> ref	0.58	-0.42	0.24	0.917	0.20	0.72	0.75	0.29	0.17	0.65	0.63	0.72

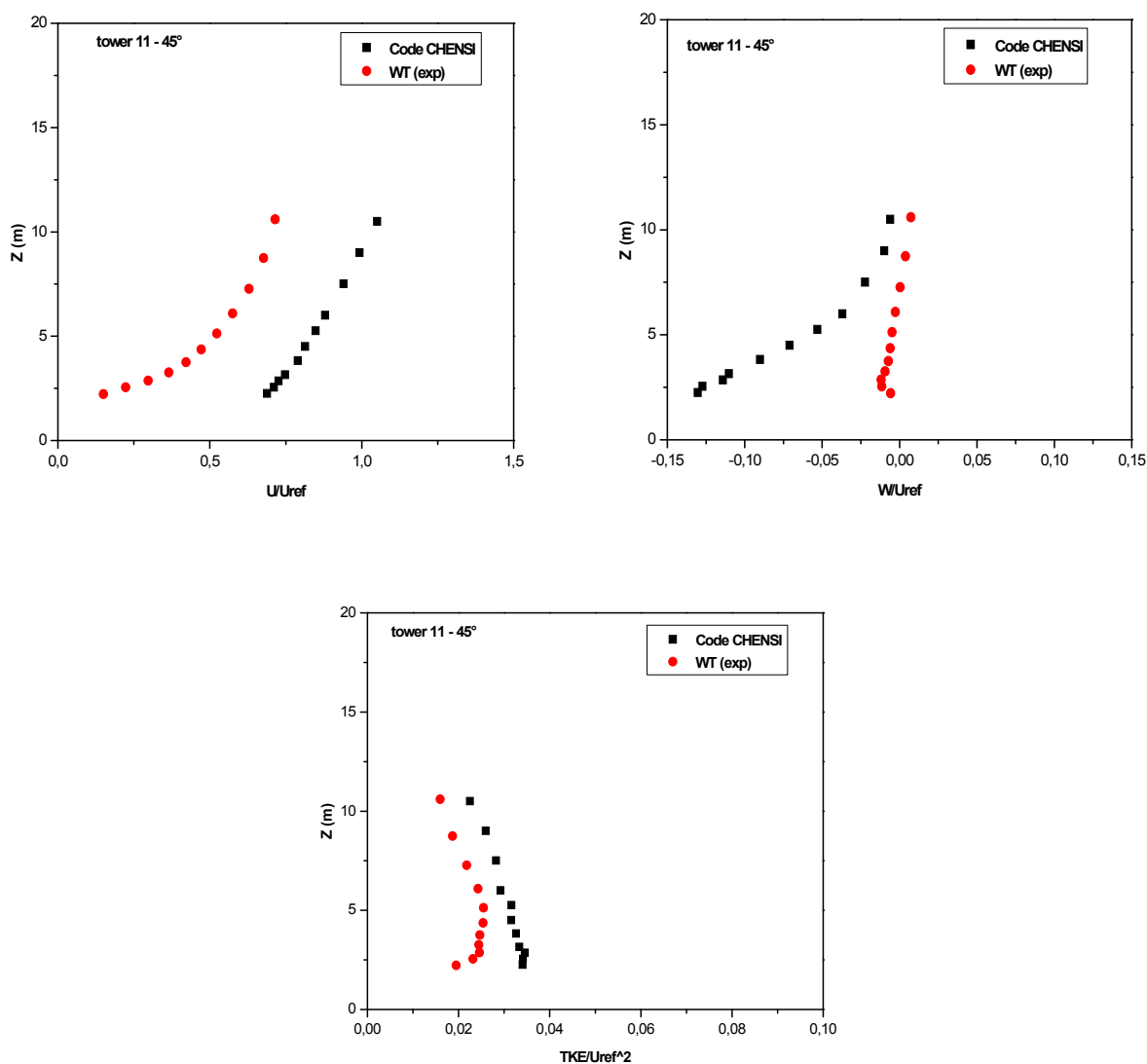
**Tableau VI.3:** mesures statistiques pour les paramètres ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  et  $TKE/U_{ref}^2$ ), mais divisé en 3 classes de données: "Rue étroite" (Tour 1), "croisement" (Tour 20), "rue large "(Tour 21), voir figure VI.15, cas 0°.

### VI.3.2.2 Les parcelles et les mesures pour le cas de -45° :

Dans la figure VI.19, les vitesses moyennes et l'énergie cinétique turbulente calculées sur les trois grilles sont présentées à trois tours, qui sont des ruelles : «rues étroites » pour (tour 1), «Croisements» (tour 11) et «rues larges» (tour 6) comme indiquée sur la figure VI.15. Le profil du vent simulé affiche des valeurs supérieures aux données observées, en particulier dans les hauteurs moyennes. La différence peut être reliée à l'entrée de profil du vent dans le modèle initial, ce qui semble être le meilleur représentant pour le cas de 0° par rapport au cas de -45°. La comparaison de TKE confirme les résultats pour le cas 0°.

Pour le cas  $U/U_{ref}$ , les résultats sont similaires à ceux du cas de 0° comme le montre la figure VI.15. L'incertitude de  $W/U_{ref}$  est beaucoup plus grande que dans le cas de 0°, en particulier pour les «croisements» (tour 11) et des rues larges» (tour 6).





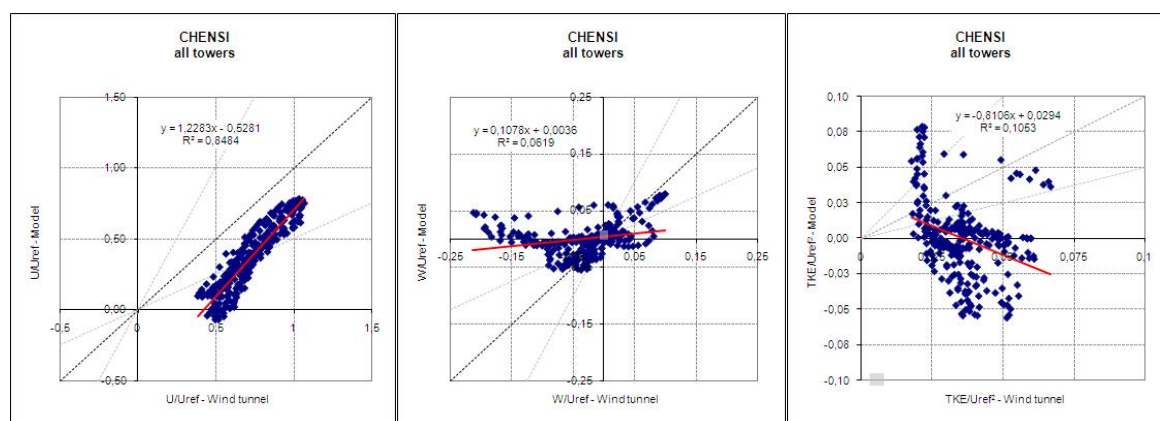
Tour 11

**Figure VI.19:** La vitesse moyenne ( $U/U_{ref}$ ,  $W/W_{ref}$ ) et de l'énergie cinétique turbulente ( $TKE/U_{ref}^2$ ) observée dans le tunnel du vent avec celle prédite par les modèles numériques (CHENSI) calculées sur les trois grilles sont présentés à trois tours, qui sont représentatifs des «ruelles»: "rue étroite" pour (tour 1), «croisement» (tour 11) et «rue large» (Tour 6), voir figure VI.15 comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]).

Les résultats repris dans la figure sous-jacents la figure VI.19 doivent être examinés plus en détail. Pour les paramètres ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  et  $TKE /U_{ref}^2$ ), les valeurs sont identiques que celles représentées dans la figure VI.15, mais divisée en trois catégories de données: «rues larges», «croisements» et «rues étroites». Le modèle semble avoir beaucoup moins de succès dans l'exercice de la vitesse ( $U$ ) pour les rues étroites que pour les autres sites. Près du sol, les résultats du modèle pour la vitesse ( $U/U_{ref}$ ) se rapprochent de zéro, alors que ce n'est pas le cas pour les valeurs mesurées.

La figure VI.19 est obtenue pour la vitesse verticale ( $W/U_{ref}$ ) et l'énergie cinétique turbulente ( $TKE/U_{ref}^2$ ) qui montre que la gamme des valeurs modélisées est inférieure à celle des valeurs mesurées. En particulier, la baisse des vitesses prédites sont numériquement beaucoup plus petite que mesurée. Le matériau permet de déterminer si cette vitesse de  $W$  est propre au modèle examiné ou si elle est une caractéristique commune à de nombreux modèles.

La figure VI.20 montre un exemple, en se référant pour le cas  $-45^\circ$  de modèle CHENSI pour toutes les tours. Il ya 18 tours, avec au total 497 points de données (observés et mesurés) pour les paramètres ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  et  $TKE/U_{ref}^2$ ). On a calculé les valeurs statistiques correspondantes comme indiquées dans le tableau VI.4. En somme, même à des vitesses moyennes les résultats d'énergie cinétique turbulente, le modèle prédit bien les observations ( $FAC2 = 54\%$  à  $66\%$ ), plus élevée que la limite ( $50\%$ ). En outre, il ya une donnée ( $NMSE = 0,47$  à  $3,38 < 4$ ) qui présente également un sommet pour le biais fractionnel ( $FB = 0,54$  à  $0,89 > 0,3$ ). Il est évident que pour les mesures de ce cas de calcul remplissent bien les critères d'acceptation de qualité.



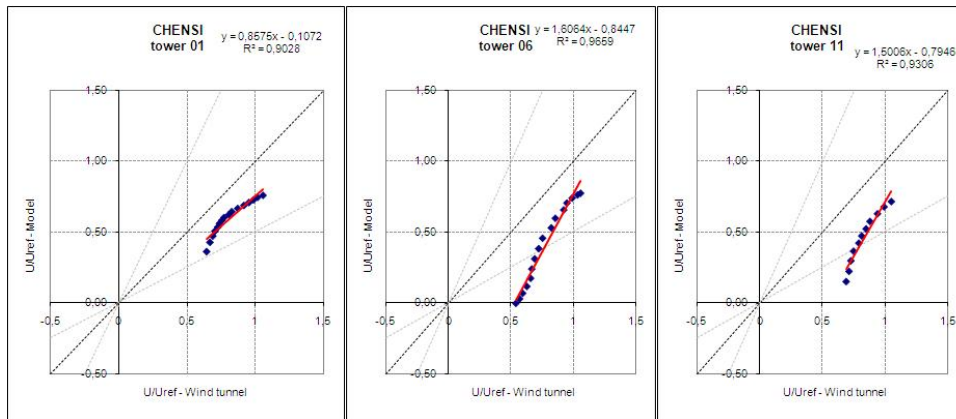
**Figure VI.20:** Cas de  $-45^\circ$ . Les diagrammes de dispersion pour les composants de vitesse  $U/U_{ref}$  (à gauche),  $W/U_{ref}$  (au centre) et  $TKE/U_{ref}^2$  (à droite) pour un modèle particulier (CHENSI) comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]).

		-45 degre			
		All towers			
CHENSI-Medjahed	U/Uref	R2	FB	NMSE	FAC2
	W/Uref	0.84	0.63	0.47	0.54
	TKE/U <sup>2</sup> ref	0.06	0.89	3.38	0.37
		0.105	0.54	0.51	0.66

**Tableau VI.4:** mesures statistiques pour les paramètres ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  et  $TKE/U_{ref}^2$ ) pour tous les tours simulés (18 tours), cas de  $-45^\circ$ .

La figure VI.21 montre un exemple qui se réfère au cas  $-45^\circ$  par le modèle CHENSI, mais divisé en trois classes de données: «rue étroite» (tour 1), «croisement» (tour 11) et «rue large» (tour 6), comme indiqués dans la figure VI.15, avec en tout 16 points de données

(observés et mesurés) pour les paramètres ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  et  $TKE/U_{ref}^2$ ). On a calculé les valeurs statistiques correspondantes reprises dans le tableau VI.5. Le calcul montre une bonne performance du modèle en trois classes de données: (ruelles, croisement à niveau, des rue large) pour les valeurs statistiques. Comme il a été cité auparavant par CHENSI qui donne un coefficient de corrélation assez élevé ( $R^2 = 93\%$ ) et surtout, il présente également une FAC2 pour la tour 1 «rue étroite» (100%), la tour de 11 «croisement» (100%) et la tour 6 «rue large» (75%), supérieure à la limite (50%), de plus, le modèle actuel présente de petites valeurs pour la tour 1 et la tour 6 en fonction de la NMSE. En ce qui concerne le FB, les résultats des calculs présentent des valeurs acceptables pour les rues étroites ( $|FB| = 0,19 < 0,3$ ), mais pour le croisement ( $|FB| = 0,58 \text{ à } 1,67 > 0,3$ ) et la rue large ( $|FB| = 0,37 \text{ à } 0,62 > 0,3$ ), les résultats sont élevés et supérieurs à 0,3.



**Figure VI.21:** Cas de  $-45^\circ$ . Mêmes données que la figure 6.20 pour les paramètres ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  et  $TKE/U_{ref}^2$ ), mais divisé en 3 classes de données: "rue étroite" (Tour 1), "croisement" (Tour 11), "rue large" (Tour 6), voir figure VI.15 comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]).

-45 degre	Tower 1 (Narrow Street)				Tower 11 (Crossing)				Tower 06 (Wide Street)			
	R2	FB	NMSE	FAC2	R2	FB	NMSE	FAC2	R2	FB	NMSE	FAC2
$U/U_{ref}$	0.90	0.30	1.06	1	0.93	0.58	0.38	0.63	0.96	0.62	0.47	0.56
$W/U_{ref}$	0.92	0.19	0.059	1	0.81	1.67	13.1	0.09	0.79	-0.5	0.55	0.56
$TKE/U_{ref}^2$	0.52	-0.21	0.05	1	0.49	0.30	0.106	1	0.08	0.37	0.25	0.75

**Tableau VI.5:** mesures statistiques pour les paramètres ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  et  $TKE/U_{ref}^2$ ), mais divisé en trois classes de données: "Rue étroite" (Tour 1), "croisement" (Tour 11), "rue large" (Tour 6), voir Figure VI.15, cas  $-45^\circ$ .

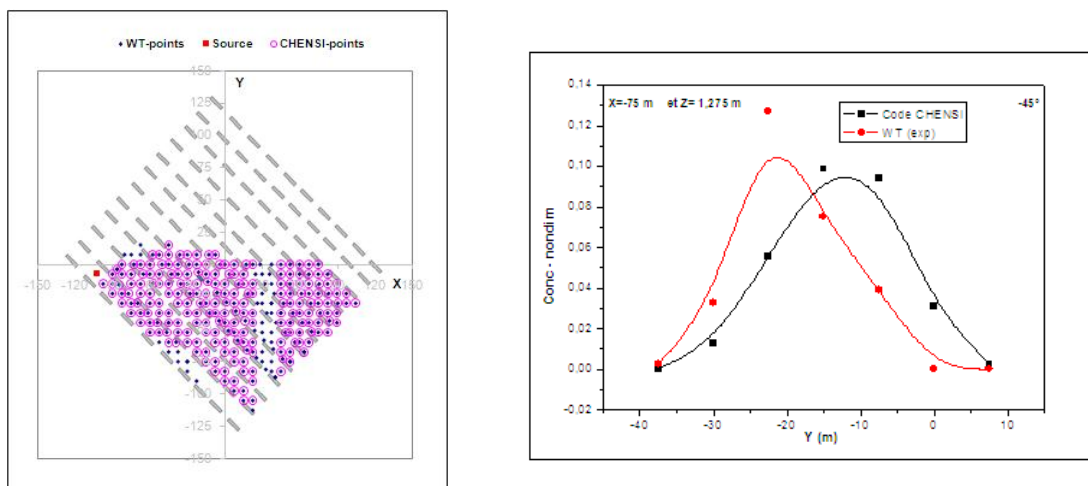
### VI.3.2.3 Champ de concentration à -45 °:

Les concentrations normalisées indiquées ci-après sont définies comme suit:

$$C^* = \frac{C U_{ref} H^2}{Q} \quad (VI.4)$$

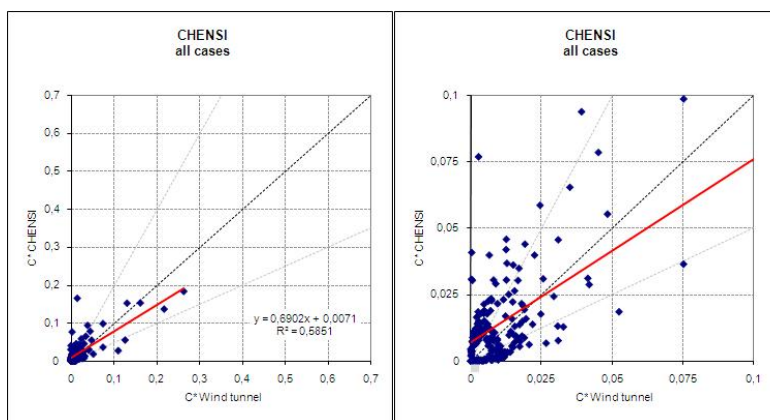
Avec C désignant concentration mesurée ou simulée,  $U_{ref}$  la vitesse d'entrée prise à la hauteur du contenant H et Q le débit massique de la source.

On montre dans la figure VI.22.a la configuration du cas de dispersion à -45°. Dans le tunnel du vent, la source a été placée au niveau du sol, tandis que les mesures de concentration ont été effectuées à une hauteur de 1,275 m. Bien que le filet de moniteurs à première vue semble dense, la rareté des moniteurs est un problème lorsque les résultats sont interprétés. La figure 7 illustre la difficulté de comparer les données obtenues par mesure et les résultats de la modélisation. Les comparaisons point par point ne portent aucune information. Pour chaque point, la valeur mesurée est comparée à celle modélisée au niveau du point de la grille la plus proche de la modélisation. Ce sera normalement un point de l'extérieur des bâtiments, à moins que la grille ait été choisie avec trop faible résolution. Cependant, pour certains modèles, les données ont été interpolées à partir des points de mesure et réutilisées. En raison de la discontinuité dans les murs du bâtiment (voir par exemple la figure VI.22.b), comme l'interpolation est onéreuse et nécessite des soins si elle ne doit pas produire des valeurs erronées. La figure VI.23 montre un nuage de points assez typique de modèle en fonction des concentrations mesurées pour tous les points (271 points). Malgré, les mauvaises prédictions évidentes pour certaines des concentrations élevées (proches de la source), de nombreux points à faibles concentration où le modèle s'adapte assez bien (les points sont éloignés de la source). Les valeurs constatées sont inférieures à la valeur du seuil, ceci n'était pas difficile à prévoir, pour obtenir des résultats de dispersion pour le cas de MUST avec le vent moyen à -45° angle de l'orientation de l'obstacle nous avons suggéré que la direction du panache soit la même pour les particules à des hauteurs inférieures et supérieures à la hauteur de l'obstacle. L'observation a montré un cisaillement important. Il sera intéressant de voir les résultats de notre comparaison des simulations du modèle avec les observations.



**Figure VI.22 :** (a): Aménagement d'expérience de dispersion. Le domaine de calcul est de gauche. Les moniteurs sont situés à points bleus, la source au rouge. (b): Profil des concentrations en coupe à 18 m de la source, le long de la ligne rouge. La concentration modélisée est zéro où il s'agit d'un bâtiment.

Nous avons calculé dans le tableau VI.6, les tailles statistiques présentées dans la figure (VI.23). Au total, similaires aux résultats de concentration en moyenne, le modèle prédit les observations très bien ( $R^2 = 58\%$ ) et ( $FAC2 = 60\%$ ). En outre, il ya une petite dispersion des données ( $NMSE = 0,79$ ) et une petite sur la prédiction ( $FB = 0,047$ ). Il est évident que les mesures pour les mesures totales de ce cas de calcul remplissent les critères d'acceptation de qualité bien. En conclusion de la concentration standard déviation, le présent modèle montre, en général, un très bon comportement en particulier près de la source où l'effet du temps de déplacement est plus fort.



**Figure VI.23:** Les diagrammes de dispersion des concentrations pour le code CHENSI comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]).

<b>-45 degre</b>		<b>All towers</b>			
		<b>R2</b>	<b>FB</b>	<b>NMSE</b>	<b>FAC2</b>
<b>CHENSI-Medjahed</b>	<b>C*</b>	<b>0.58</b>	<b>0.047</b>	<b>0.79</b>	<b>0.60</b>

**Tableau VI.6:** mesures statistiques de concentration pour les 26 tours simulés.

---

---

## Ch. Conclusion générale:

### Conclusion générale

Notre but était d'étudier l'écoulement du vent, la dispersion d'un scalaire passif en milieu urbain simplifié et de valider les résultats obtenus par simulation numérique à l'aide du code CHENSI en les confrontant aux résultats de l'expérience MUST (Mock Urban Setting Test) d'une part et aux résultats de la simulation en soufflerie en modèle réduit réalisé à l'université de Hambourg et ceux obtenus par simulation numérique par le code MISKAM et FLUENT d'autre part. Deux angles d'incidence du vent ont été pris en considération pour réaliser les simulations il s'agit des angles  $0^\circ$  et  $-45^\circ$ .

Cette étude a permis de mettre en évidence l'influence de la canopée sur l'écoulement moyen et la dispersion. L'effet principal sur l'écoulement est un fort ralentissement avec l'apparition de zones de recirculation en aval de chaque container. La turbulence est également affectée avec l'apparition en dessous du niveau des toits, de zones de faible turbulence, en aval des faces protégées du vent et au niveau des toits, des zones de forte turbulence se développent près du point d'impact sur les containers. L'effet moyen sur la dispersion se traduit par une déviation de l'axe du panache par rapport à la direction du vent incident, due à l'acheminement du polluant à travers les rues parallèles aux deux directions x et y.

- Dispersion de MUST à  $-45$  degrés: La plupart des modèles prédisent bien la trajectoire du panache, à part quelques exceptions. C'est une caractéristique commune que les modèles ont tendance à prédire des valeurs trop élevées de la concentration maximale dans le panache à des distances de plus de 30 m en aval de la source (à la hauteur de mesure générale de 1,25 m). C'est est en partie, en raison de la faible TKE résultant des valeurs d'équilibre bas à l'entrée limite par frontières. Le désaccord peut être réduite par exemple en utilisant un schéma d'intégration de premier ordre plus diffusant (mais cela signifie une amélioration des résultats en raison de moyens mal choisi, cet est à dire une erreur numérique plus élevée).

Les résultats du modèle sont en bonne adéquation avec les mesures de l'expérience MUST pour la dynamique et la dispersion pour les deux cas  $0^\circ$  et  $-45^\circ$ .

---

---

Il peut être conclu que l'angle d'incidence est un facteur très important dans la dispersion des polluants puisque son changement a une influence sur la vitesse et sur le taux de turbulence et par conséquent sur la dispersion. L'écoulement avec un angle d'incidence de  $-45^\circ$  avait pour conséquence de minimiser la zone de recirculation qui se déplace aux cotés inférieurs. Cette orientation conduit à une augmentation du mouvement donc l'état de turbulence d'une part et d'une autre part les obstacles favorisent le transport et la dispersion de l'énergie cinétique turbulente. L'étude a montré une bonne concordance entre le profil expérimental et celui calculé numériquement par le code CHENSI en comparaison avec le code MISKAM et FLUENT. La sous estimation est essentiellement due au modèle utilisé d'où la nécessité de chercher soit à améliorer le modèle soit à utiliser un autre modèle mieux adapté. Les valeurs de (TKE) calculées numériquement sont très faibles par rapport à celles mesurées expérimentalement. En utilisant une méthode de calcul statistique pour mieux apprécier les résultats trouvés car il a été prouvé la bonne qualité de ces derniers.

Cette analyse statistique prouve la qualité des résultats trouvés qui sont plus ou moins acceptables. Pour le calcul du champ dynamique, les facteurs de comparaison statistiques permettent de mettre en évidence les résultats de la simulation qui sont en général acceptables. Avec un angle d'incidence du vent de ( $0^\circ$ ), et une vitesse moyenne, les résultats sont acceptables pour tous les facteurs (même parfaites pour NMSE et FAC2). Avec un angle d'incidence de ( $-45^\circ$ ) pour l'écoulement du vent, les mêmes remarques peuvent être citées, où seuls les facteurs FB et NMSE ne sont pas acceptables dans la direction horizontale pour (TKE). Dans la direction verticale tous les facteurs sont acceptables. En fin, pour le scalaire de concentration, les deux facteurs FB, NMSE et FAC2 sont acceptables.

---

---

## Références bibliographiques :

- [1] Launder, B. and B. Sharma, Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Letters in heat and mass transfer*, 1974. 1(2): p. 131-137.
- [2] Peric, M. and J.H. Ferziger, *Computational methods for fluid dynamics*, 1996, Springer, Berlin.
- [3] Harlow, F.H. and J.E. Welch, Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface. *Physics of fluids*, 1965. 8(12): p. 2182.
- [4] Chang, J. and S. Hanna, Air quality model performance evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2004. 87(1-3): p. 167-196.
- [5] Britter, R. and M. Schatzmann, Background and justification document to support the model evaluation guidance and protocol document. COST Office Brussels, 2007, ISBN 3-00-018312-4.
- [6] Franke, J., COST 732 Model Evaluation Case Studies: CFD RANS models applied to MUST and Oklahoma City data.
- [7] Leitl, B., K. Bezpalcova, and F. Harms. Wind tunnel modelling of the MUST experiment. in *Proceeding of the 11th International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, Cambridge. 2007.
- [8] Goricsán, I., et al., Simulation of flow in an idealised city using various CFD codes. *International Journal of Environment and Pollution*, 2011. 44(1-4): p. 359-367.
- [9] Franke, J., et al., The MUST model evaluation exercise: statistical analysis of modelling results. *Hrvatski meteorološki časopis*, 2008. 43(43/1): p. 414-418.
- [10] Olesen, H.R., et al., The MUST model evaluation exercise: Patterns in model performance. *Hrvatski meteorološki časopis*, 2008. 43(43/1): p. 403-408.
  
- [11] Bilitoft, C.A., Customer report for mock urban setting test. DPG Document Number 8-CO-160-000-052. Prepared for the Defence Threat Reduction Agency, 2001.
- [12] Yee, E. and C.A. Bilitoft, Concentration fluctuation measurements in a plume dispersing through a regular array of obstacles. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004. 111(3): p. 363-415.

- 
- 
- [13] Milliez, M., Modélisation micro-météorologique en milieu urbain: dispersion des polluants et prise en compte des effets radiatifs, 2006, École nationale des ponts et chaussées (France).
- [14] Gailis, R., Wind tunnel simulations of the mock urban setting test: experimental procedures and data analysis. 2004.
- [15] Warner, S., et al., Comparisons of transport and dispersion model predictions of the Mock Urban Setting Test field experiment. *Journal of applied meteorology and climatology*, 2006. 45(10): p. 1414-1428.
- [16] Bezpalcová, K., et al. Passive Pollutant Passage Through an Idealised Urban Canopy. in WDS. 2006.
- [17] Milliez, M. and B. Carissimo, Numerical simulations of pollutant dispersion in an idealized urban area, for different meteorological conditions. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007. 122(2): p. 321-342.
- [18] Milliez, M. and B. Carissimo, Computational fluid dynamical modelling of concentration fluctuations in an idealized urban area. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008. 127(2): p. 241-259.
- [19] Camelli, F.E., R. Löhner, and S.R. Hanna, Dispersion patterns in a heterogeneous urban area. *Mecánica Computacional*, 2005. 24: p. 1339-1354.
- [20] Keats, A., E. Yee, and F.-S. Lien, Bayesian inference for source determination with applications to a complex urban environment. *Atmospheric environment*, 2007. 41(3): p. 465-479.
- [21] Wang, B.-C., E. Yee, and F.-S. Lien, Numerical study of dispersing pollutant clouds in a built-up environment. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2009. 30(1): p. 3-19.
- [22] Britter, R., Background and justification document to support the model evaluation guidance and protocol: COST action 732 Quality assurance and improvement of microscale meteorological models 2007: Meteorological Inst.
- [23] Franke, J., et al., Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment. COST Action 732: Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models (2007). Hamburg, Germany.
- [24] Bezpalcova, K. and F. Harms, EWTL data report/part I: summarized test description mock urban setting test. Environmental Wind Tunnel Laboratory, Centre for Marine and Atmospheric Research, University of Hamburg, 2005.

- 
- 
- [25] Donnelly, R., T. Lyons, and T. Flassak, Evaluation of results of a numerical simulation of dispersion in an idealised urban area for emergency response modelling. *Atmospheric environment*, 2009. 43(29): p. 4416-4423.
- [26] Balczó, M., C. Gromke, and B. Ruck, Numerical modeling of flow and pollutant dispersion in street canyons with tree planting. *Meteorologische Zeitschrift*, 2009. 18(2): p. 197-206.
- [27] Balczó, M. and J. Eichhorn. Refined MISKAM simulations of the Mock Urban Setting Test. in *Proceedings of the XXIII. MicroCAD International Scientific Conference*, Miskolc, Hungary. 2009.
- [28] Franke, J., et al. The Best Practise Guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment: an outcome of COST 732. in *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering*. Chapel Hill, North Carolina, USA. 2010.
- [29] Rákai, A. and G. Kristóf. CFD simulation of flow over a mock urban setting. in *5th OpenFOAM Workshop*, Chalmers, Gothenburg, Sweden. 2010.
- [30] Sabatino, S.D., et al., COST 732 in practice: the MUST model evaluation exercise. *International Journal of Environment and Pollution*, 2011. 44(1-4): p. 403-418.
- [31] Qu, Y., et al., Micrometeorological modeling of radiative and convective effects with a building-resolving code. *Journal of applied meteorology and climatology*, 2011. 50(8): p. 1713-1724.
- [32] Qu, Y., Three-dimensional modeling of radiative and convective exchanges in the urban atmosphere, 2011, Paris Est.
- [33] Di Sabatino, S., R. Buccolieri, and P. Salizzoni, Recent advancements in numerical modelling of flow and dispersion in urban areas: a short review. *International Journal of Environment and Pollution* 7, 2013. 52(3-4): p. 172-191.
- [34] Hanna, S.R., O.R. Hansen, and S. Dharmavaram, FLACS CFD air quality model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations. *Atmospheric environment*, 2004. 38(28): p. 4675-4687.
- [35] Camelli, F.E., R. Löhner, and S.R. Hanna, Dispersion patterns in a heterogeneous urban area. *Mecánica Computacional*, 2005. 24: p. 1339-1354.
- [36] Stull, R.B., *Measurement and Simulation Techniques*, in *An Introduction to Boundary Layer Meteorology* 1988, Springer. p. 405-440.

- 
- 
- [37] Garratt, J., The atmospheric boundary layer. Cambridge atmospheric and space science series. Cambridge University Press, Cambridge, 1992. 416: p. 444.
- [38] Arya, S.P., Air pollution meteorology and dispersion. 1999.
- [39] Boussinesq, J., Essai sur la théorie des eaux courantes 1877: Imprimerie nationale.
- [40] Boussinesq, J., Théorie de l'écoulement tourbillant. Mem. Présentés par Divers Savants Acad. Sci. Inst. Fr, 1877. 23(46-50): p. 6.5.
- [41] Kolmogorov, A.N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. in Dokl. Akad. Nauk SSSR. 1941. JSTOR.
- [42] Kolmogorov, A.N. Dissipation of energy in locally isotropic turbulence. in Dokl. Akad. Nauk SSSR. 1941. JSTOR.
- [43] Smagorinsky, J., General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiment\*. Monthly weather review, 1963. 91(3): p. 99-164.
- [44] Pope, S.B., Turbulent flows, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2000.
- [45] Beare, R.J. and M.K. Macvean, Resolution sensitivity and scaling of large-eddy simulations of the stable boundary layer. Boundary-Layer Meteorology, 2004. 112(2): p. 257-281.
- [46] Prandtl, L., The Magnus effect and windpowered ships. Naturwissenschaften, 1925. 13: p. 93-108.
- [47] Louis, J.-F., A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. Boundary-Layer Meteorology, 1979. 17(2): p. 187-202.
- [48] Musson-Genon, L., Comparison of different simple turbulence closures with a one-dimensional boundary layer model. Monthly weather review, 1995. 123(1): p. 163-180.
- [49] Pielke, R., Mesoscale meteorological modeling, Academic Press Inc., 1984.
- [50] Viollet, P., On the numerical modelling of stratified flows, in Physical processes in estuaries 1988, Springer. p. 257-277.

- 
- 
- [51] Byrne, C. and A. Holdo, Effects of increased geometric complexity on the comparison between computational and experimental simulations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998. 73(2): p. 159-179.
- [52] Kato, M. The modeling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders. in *Ninth Symposium on Turbulent Shear Flows*, 1993. 1993.
- [53] Lien, F.-S. and E. Yee, Numerical Modelling of the Turbulent Flow Developing Within and Over a 3-D Building Array, Part I: A High-Resolution Reynolds-Averaged Navier—Stokes Approach. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004. 112(3): p. 427-466.
- [54] Yakhot, V. and L.M. Smith, The renormalization group, the  $\epsilon$ -expansion and derivation of turbulence models. *Journal of Scientific Computing*, 1992. 7(1): p. 35-61.
- [55] Yakhot, V., et al., Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)*, 1992. 4(7): p. 1510-1520.
- [56] Bougeault, P. and P. Lacarrere, Parameterization of Orography-Induced Turbulence in a Mesobeta--Scale Model. *Monthly weather review*, 1989. 117(8): p. 1872-1890.
- [57] Duynkerke, P. and A. Driedonks, Turbulent structure of a shear-driven stratus-topped atmospheric boundary layer: A comparison of model results with observations. *Journal of the atmospheric sciences*, 1988. 45(16): p. 2343-2351.
- [58] Duynkerke, P., Application of the E- $\epsilon$  turbulence closure model to the neutral and stable atmospheric boundary layer. *Journal of the atmospheric sciences*, 1988. 45(5): p. 865-880.
- [59] Kim, J.-J. and J.-J. Baik, A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG  $k$ - $\epsilon$  turbulence model. *Atmospheric environment*, 2004. 38(19): p. 3039-3048.
- [60] Chen, Y.-S. and S.-W. Kim, Computation of turbulent flows using an extended k-epsilon turbulence closure model. 1987.
- [61] Viegelli, J.A., A method for including arbitrary external boundaries in the MAC incompressible fluid computing technique. *Journal of Computational Physics*, 1969. 4(4): p. 543-551.
- [62] Spalding, D.B., A novel finite difference formulation for differential expressions involving both first and second derivatives. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1972. 4(4): p. 551-559.

- 
- 
- [63] Levi-Alvares, S., Simulation numérique des écoulements urbains à l'échelle d'une rue à l'aide du modèle k- $\epsilon$ , 1991, Thèse de l'Université de Nantes.
- [64] Costes, J.-P., Simulations numériques des écoulements atmosphériques sur sols fortement hétérogènes, 1996.
- [65] Peyret, R. and T. Taylor, Computational methods for fluid flow. Sprinifer-Verlag, New York, 1983.
- [66]Lauder, B., et al., The prediction of free shear flows. A comparison of six turbulent models. NASA Report SP-311, 1972.
- [67] Castro, I.P. and D.D. Apsley, Flow and dispersion over topography: a comparison between numerical and laboratory data for two-dimensional flows. Atmospheric environment, 1997. 31(6): p. 839-850.
- [68] Raithby, G., G. Stubbley, and P. Taylor, The Askervein Hill project: a finite control volume prediction of three-dimensional flows over the hill. Boundary-Layer Meteorology, 1987. 39(3): p. 247-267.
- [69] Hanjalic, K. and B. Launder, Sensitizing the dissipation equation to irrotational strains. Journal of Fluids Engineering, 1980. 102(1): p. 34-40.
- [70] Peric, M. and J.H. Ferziger, Computational methods for fluid dynamics, 1996, Springer, Berlin.
- [71] Sini, J-F., Anquetin, S. Et Mestayer, P., Pollutant Dispersion and Thermal Effects in Urban Street Canyons, Atmos. Environ., 1996. 15: p 2659-2677.
- [72] Hanna, S.R. et Chang J.C.: Boundary layer parameterization for applied dispersion modeling over urban areas, Boundary-Layer Meteorol., 1992. 58: p229-259

---

---

## Liste des figures

### Chapitre II

Figure II.1: Photos des expériences MUST (Mock Urban Setting Test).	22
Figure II.2: Jeune Yee avec DSTL Gil Wind master sonique sur la tour de 6 m (photo par SAM Chang, ARL).	23
Figure II.3: La pipe de diffusion de propylène (photo par Chris Biltoft, WDTC).	23
Figure II.4: Les collecteurs ultra-violets d'ion (UVIC) ont monté sur une tour de 6 m (photo par SAM Chang, ARL).	24
Figure II.5: Grand tunnel du vent de la couche de la limite WOTAN à Université de Hambourg. Le modèle a été placé sur la seconde (sous le vent) platine.	25
Figure II.6: L'organisation de flèches à l'entrée de tunnel. Toutes les mesures sont dans mm.	26
Figure II.7: Organisation de la rugosité.	27
Figure II.8: Modèle (-45° direction du vent) sur le tour t capable, les éléments de la rugosité, flèches et Prandtl tubent (entre premier et deuxième flèche) à l'intérieur de WOTAN enrroulez le tunnel.	27
Figure II.9: Système des coordonnées et places des dimensions.	28

### Chapitre IV

Figure IV.1 : Volume de contrôle élémentaire et notations dans le cas tridimensionnel cartésien.	50
Figure IV.2 : Disposition décalée des inconnues dans le cas tridimensionnel cartésien.	52
Figure IV.3 : Volumes de contrôle élémentaires dans le cas bidimensionnel.	52
Figure IV.4 : Mailles de paroi.	56

### Chapitre V

Figure V.1: Situation pour MUST expérience du tunnel du vent (Bezpalcova and Harms, [24]).	60
Figure V.2: Domaine de la simulation a) domaine tridimensionnelle b) coupe horizontale (maillage de calcul utilisé pour les simulations numériques).	63
Figure V.3 : Conditions aux limites pour les deux cas implémentées dans Code_CHENSI a) 0° et b) -45°.	64
Figure V.4: profil de vitesse d'entrée.	66

---

---

Figure V.5 : Profil d'entrée de l'énergie cinétique de turbulente. **66**

## Chapitre VI

Figure VI.1: Expérience du tunnel du vent MUST (Bezpalcova and Harms, [24]). **69**

Figure VI.2: Les points peuvent être classés en trois groupes de sorte que la tour 1 représente un «rue étroite», tour 20 un « croisement », et la tour 21 une « rue large » pour le cas de 0°.

Figure VI.3: Comparaison des expérimentale et de la vitesse longitudinale modélisée (U) Profils normalisés par la vitesse du courant libre, sur les trois grilles sont présentés à 21 tours, qui sont représentatifs de a) «rues étroites» (Tour 1, 4, 7, 10 , 13, 16 et 19), b) «croisements» (Tour 2, 5, 8, 11, 14, 17 et 20) et c) «rues larges» (Tour 3, 6, 9, 12, 15, 18 et 21 ), voir figure VI.2 comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]). **77**

Figure VI.4: Comparaison des expérimentale et la vitesse verticale modélisée (W) Profils normalisés par la vitesse du courant libre, sur les trois grilles sont présentés à 21 tours, qui sont représentatifs de a) «rues étroites» (Tour 1, 4, 7, 10 , 13, 16 et 19), b) «croisements» (Tour 2, 5, 8, 11, 14, 17 et 20) et c) «rues larges» (Tour 3, 6, 9, 12, 15, 18 et 21 ), voir figure VI.2 comme expliqué par (Olesen et Berkowicz,[10]). **83**

Figure VI.5: Comparaison de l'énergie cinétique turbulente expérimentales et modélisées (TKE) Profils normalisés par la vitesse du courant libre, sur les trois grilles sont présentés à 21 tours, qui sont représentatifs de a) «rues étroites» (Tour 1, 4, 7, 10, 13, 16 et 19), b) «croisements» (Tour 2, 5, 8, 11, 14, 17 et 20) et c) «rues larges» (Tour 3, 6, 9, 12, 15, 18 et 21), voir figure VI.2 comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]). **89**

Figure VI.6: Positions de stations relatives aux profils horizontaux de concentration (cas de 0°). **90**

Figure VI.7: Profils horizontaux des concentrations en quatre niveaux de hauteur [1,27 m (0,5 H), 1.905m (0,75H) et 4.359m (1,5 H)] pour le cas 0 °. **91**

Figure VI.8: Les points peuvent être classés en trois groupes, de sorte que la tour 1 représente une «rue étroite», tour 11 un «croisement», et de la tour 6 une «rue large» pour le cas de -45°.

Figure VI.9: Comparaison des résultats expérimentaux et de la vitesse longitudinale modélisée (U) Profils normalisés par la vitesse du courant libre, sur les trois grilles sont présentés à 18 tours qui sont représentatifs de a) «rues étroites» (Tour 1, 3, 7, 10 , 13 et 16), b) «croisements» (Tour 2, 4, 8, 11, 14 et 17) et c) «rues larges» (Tour 5, 6, 9, 12, 15 et 18), voir figure VI.8 comme indiqué par (Olesen et Berkowicz, [10]) pour le cas-45 °. **99**

Figure VI.10: Comparaison des résultats expérimentaux et de la vitesse longitudinale modélisée (W) Profils normalisés par la vitesse du courant libre, sur les trois grilles sont présentés à 18 tours qui sont représentatifs de a) «rues étroites» (Tour 1, 3, 7, 10 , 13 et 16), b) «croisements» (Tour 2, 4, 8, 11, 14 et 17) et c) «rues larges» (Tour 5, 6, 9, 12, 15 et 18), voir figure VI.8 comme indiqué par (Olesen et Berkowicz, [10]) pour le cas -45 °. **103**

Figure VI.11: Comparaison de l'énergie cinétique turbulente expérimentale et modélisée (k) Profils normalisés par la vitesse du courant libre sur les trois grilles sont présentés à 18 tours, qui sont représentatifs de a) «rues étroites» (Tour 1, 3, 7, 10, 13 et 16), b) «croisements» (Tour 2, 4, 8, 11, 14 et 17) et c) «rues larges» (Tour 5, 6, 9, 12, 15 et 18), voir figure VI.8 comme indiqué par (Olesen et Berkowicz, [10]) pour le cas $-45^\circ$ .	<b>108</b>
Figure VI.12: Comparaison de la distribution de concentration en quatre niveaux de hauteur [1,27 m (0,5 h), 1.905m (0,75H), 2.54m (H) et 4.359m (1,5 H)] pour le cas $-45^\circ$ .	<b>109</b>
Figure VI.13: Profils horizontaux des concentrations en quatre niveaux de hauteur [1,27 m (0,5 H), 1.905m (0,75H), 2.54m (H) et 4.359m (1,5 H)] pour le cas $-45^\circ$ .	<b>110</b>
Figure VI.14: Profils de concentration le long de la direction y à z = 1.275m.	<b>111</b>
Figure VI.15: Disposition des mesures et les bâtiments pour les cas d'écoulement. Les profils verticaux de vent et de turbulence composants sont les endroits mesurés («tours») montré. Le vent soufflé de la gauche.	<b>115</b>
Figure. VI.16: La vitesse moyenne ( $U/U_{ref}$ , $W/U_{ref}$ ) et de l'énergie cinétique turbulente ( $TKE/U_{ref}^2$ ) observée dans le tunnel du vent avec celle prédite par le code numérique (CHENSI) calculées sur les trois grilles sont présentés à trois tours, qui sont représentatifs des «ruelles», Tour 1 représente un «Rue étroite», Tour 20 un« Croisement », et de la Tour 21 une« Rue large », voir Figure VI.15 comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]).	<b>117</b>
Figure VI.17: Cas de $0^\circ$ . Les diagrammes de dispersion pour les composants de vitesse $U/U_{ref}$ (à gauche), $W/W_{ref}$ (au centre) et $TKE/U_{ref}^2$ (à droite) pour un modèle particulier (CHENSI) comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]).	<b>118</b>
Figure VI.18 : Cas $0^\circ$ . Mêmes données que la figure VI.17 pour les paramètres ( $U/U_{ref}$ , $W/U_{ref}$ et $TKE/U_{ref}^2$ ), mais divisé en 3 classes de données: "rue étroite" (Tour 1), "croisement" (Tour 20), "rue larges "(Tour 21), voir figure VI.15 comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]).	<b>119</b>
Figure VI.19: La vitesse moyenne ( $U/U_{ref}$ , $W/W_{ref}$ ) et de l'énergie cinétique turbulente ( $TKE/U_{ref}^2$ ) observée dans le tunnel du vent avec celle prédite par les modèles numériques (CHENSI) calculées sur les trois grilles sont présentés à trois tours, qui sont représentatifs des «ruelles» : "rue étroite" pour (tour 1), «croisement» (tour 11) et «rue large» (Tour 6), voir figure VI.15 comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]).	<b>122</b>
Figure VI.20: Cas de $-45^\circ$ . Les diagrammes de dispersion pour les composants de vitesse $U/U_{ref}$ (à gauche), $W/U_{ref}$ (au centre) et $TKE/U_{ref}^2$ (à droite) pour un modèle particulier (CHENSI) comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]).	<b>123</b>
Figure VI.21: Cas de $-45^\circ$ . Mêmes données que la figure 6.20 pour les paramètres ( $U/U_{ref}$ , $W/U_{ref}$ et $TKE/U_{ref}^2$ ), mais divisé en 3 classes de données: "rue étroite" (Tour 1), "croisement" (Tour 11), "rue large "(Tour 6), voir figure VI.15 comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]).	<b>124</b>
Figure VI.22 : (a): Aménagement d'expérience de dispersion. Le domaine de calcul est de gauche. Les moniteurs sont situés à points bleus, la source au rouge. (b): Profil des concentrations en coupe à 18 m de la source, le long de la ligne rouge. La concentration modélisée est zéro où il s'agit d'un bâtiment.	<b>126</b>
Figure VI.23: Les diagrammes de dispersion des concentrations pour le code CHENSI comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [10]).	<b>126</b>

---

---

## Liste des tableaux

Tableau III.1: Constantes pour le modèle k-l (Pielke, [49]).	40
Tableau III.2: Constantes pour le modèle $k - \varepsilon$ (Launder et Spalding , [1]).	41
Tableau IV.1:valeurs des constantes du modèle $k - \varepsilon$ standard.	46
Tableau IV.2:valeurs des constantes du modèle de Chen & Kim [60].	48
Tableau IV.3:valeurs modifiées des constantes du modèle de Chen & Kim [60].	48
Tableau VI.1: Outils statistiques d'estimation d'un modèle numérique.	114
Tableau VI.2: mesures statistiques pour les paramètres ( $U/U_{\text{ref}}$ , $W/U_{\text{ref}}$ et $\text{TKE}/U_{\text{ref}}^2$ ) pour toutes les tours simulés (21 tours), cas de $0^\circ$ .	119
Tableau VI.3: mesures statistiques pour les paramètres ( $U/U_{\text{ref}}$ , $W/U_{\text{ref}}$ et $\text{TKE}/U_{\text{ref}}^2$ ), mais divisé en 3 classes de données: "Rue étroite" (Tour 1), "croisement" (Tour 20), "rue large" (Tour 21), voir figure VI.15, cas $0^\circ$ .	120
Tableau VI.4: mesures statistiques pour les paramètres ( $U/U_{\text{ref}}$ , $W/U_{\text{ref}}$ et $\text{TKE}/U_{\text{ref}}^2$ ) pour tous les tours simulés (18 tours), cas de $-45^\circ$ .	123
Tableau VI.5: mesures statistiques pour les paramètres ( $U/U_{\text{ref}}$ , $W/U_{\text{ref}}$ et $\text{TKE}/U_{\text{ref}}^2$ ), mais divisé en trois classes de données: "Rue étroite" (Tour 1), "croisement" (Tour 11), "rue large" (Tour 6), voir Figure VI.15, cas $-45^\circ$ .	124
Tableau VI.6: mesures statistiques de concentration pour les 26 tours simulés.	126

---

---

## Annexe :

### Annexe 1: Liste des publications

**Article 01:** MEDJAHED Bendida, ABIDAT Miloud and SINI Jean François, ‘Comparison between numerical models and CHENSI with experimental data (MUST) within the case of the 0° approach flow, *Journal MATEC Web of Conferences*, vol 11. (2014) (Publication International cite par SCOPUS et THOMSON REUTER)

**Article 02:** MEDJAHED Bendida, BOUZIT Mohamed, (Numerical study of the dispersion of a passive scalar in simplified urban), *International Journal of Applied Engineering Research IJAR.*, Volume. 11, N° 2. (2016) (Publication International cite par SCOPUS).

Article 03: MEDJAHED Bendida, BOUZIT MOHAMED, (Numerical Study of the Dispersion of the pollutant (CH<sub>4</sub>) in a canopy Urban), *Journal of Materials and Environmental Science JMES*, Volume.7, N° 12. (2016) (Publication International cite par SCOPUS).

**Article 04:** MEDJAHED Bendida, NAILI Said, BOUZIT MOHAMED, Experimental Study of the impact of pollutants on air quality in the Urban city, *Journal of Materials and Environmental Science JMES*, Volume.8, N° 1. (2017) (Publication International cite par SCOPUS).

**Article 05:** MEDJAHED Bendida, BOUZIT MOHAMED, Validation study of the experience Mock Urban Setting Test, *Journal of Materials and Environmental Science JMES*, Volume.8, N° 3. (2017) (Publication International cite par SCOPUS).

---

---

## **Annexe 2: Article 01**

**MEDJAHED Bendida, ABIDAT Miloud and SINI Jean François**, ‘Comparison between numerical models and CHENSI with experimental data (MUST) within the case of the 0° approach flow, **Journal MATEC *Web of Conferences***, vol 11. (2014) (Publication International cite par SCOPUS et THOMSON REUTER)

## Comparison between numerical models and CHENSI with experimental data (MUST) within the case of the 0° approach flow.

MEDJAHED Bendida<sup>1,2</sup>, ABIDAT Miloud<sup>2</sup>, Jean-François, SINI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Mécanique Appliquée ; Université Des Sciences et de la Technologie d'ORAN, Faculté de Génie Mécanique, BP. 1505, El-Mnaouar, Oran, ALGERIE.

<sup>2</sup>Laboratoire de Modélisation Numérique et Expérimentale des phénomènes Mécanique ; Université Abdelhamid Ibn Badis. Mostaganem, Faculté des Sciences et de la Technologie Mostaganem, ALGERIE.

<sup>3</sup>Laboratoire de Mécanique des Fluides. Equipe Dynamique de l'Atmosphère Habitée; Unité Mixte de Recherche CNRS n° 6598, FRANCE.

**Abstract.**The MUST wind tunnel data set served as a validation case for obstacle-resolving micro-scale models in the COST Action 732 "Quality Assurance and Improvement of Micro-Scale Meteorological Models". The code used for the numerical simulation is code CHENSI, simulations carried out showed a certain degree of agreement between the experimental results and those of the numerical simulation, they highlight the need for proceeding to an experimental campaign but with more measurements and the need for having a good control of determining factors in the exploitation of its results. The aim is to explain the experimental data obtained by atmospheric wind on the physical model. The site company of Mock Urban Setting Test (MUST) was selected to be simulated by the code CEN CHENSI developed by the team of Dynamique de l'atmosphère Habitee of LME/ECN. The code was based on (K-  $\epsilon$ ) model of (Launder and Spalding). For the integration of the PDE (Potential Dimensional equations) constitute the mathematical model, the finite volume method of (Ferziger and Peric) was used within the decade disposition of unknowns MAC of (Harlow and Welck) for the discretisation of PDE terms. The boundary conditions were imposed according to the wall laws (In ground and on buildings) or within Dirichlet condition (Inlet boundary) or of Newman (Outlet boundary or top limit). The numerical domain used was comparable to the one of the atmospheric wind experiences within a three-dimensional Cartesian mesh. Numerical results presented in this study for the mean flow field, turbulent kinetic energy in the direction of wind incidence 0°. For an objective comparison of the CHENSI model performances within other European codes used for MUST configuration simulation. The results obtained by the numerical modelling approach are presented in this paper.

Keywords: MUST, COST732 Action, CHENSI Code, (K-  $\epsilon$ ) model.

### 1 Introduction

The aim of the work is to provide data analysis about the use of CHENSI for modeling atmospheric flows, with the help of data obtained in the COST 732 framework (Quality Assurance and Improvement of Micro-scale Meteorological Models) over a mock urban setting (Michael Schatzmann et al 2009). The investigations were carried out with CHENSI, compared to wind tunnel.

The work is relevant for the CHENSI community because it deals with environmental problems, with which CFD and CHENSI might be a good tool to deal. As I can see from the forum it is an interesting topic for several users. It also validates CHENSI data with wind tunnel measurements.

COST is an Intergovernmental European framework for international cooperation between nationally funded research activities. The COST Action 732 (Quality Assurance and Improvement of Micro-scale Meteorological Models) program was carried out to perform proper quality assurance method for micro-scale meteorological models which can model urban pollution dispersion and therefore are used in environmental impact studies and decisions with economic and political consequences. In this framework several CFD codes were evaluated, e.g. FLUENT, MISKAM, Star-CD, CFX.... The first step of the simulations was to determine the wind field and turbulent kinetic energy above a Mock Urban Setting Test which consists of 120 containers as obstacles.

The modelled geometry can be seen in Figure 1. The flow

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 2.0, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Article available at <http://www.matec-conferences.org> or <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20141102005>

enters the domain from the inlet side, perpendicular to the containers longer length. The computational grid used for the CHENSI simulations was taken from the MISKAM and FLUENT simulations to provide an identical environment for comparison. In the wind tunnel measurements 21 reference profiles were measured (Figure 2). The 21 reference profiles are located in the street canyons and behind the buildings, so the fairly undisturbed flow and the wake behind the buildings can also be investigated. Applied in the frame of the MUST exercise of COST732 Action (URL1).

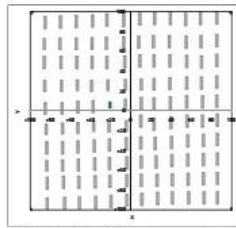


Fig. 1. Modelled geometry.

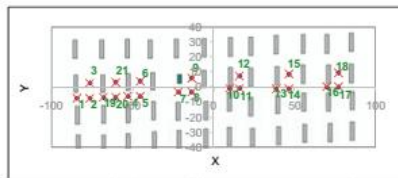


Fig. 2. Velocity profile measurement points

## 2 Description of wind tunnel experiments (MUST)

The wind tunnel data set used in this paper contains flow and dispersion data measured within an idealized urban roughness. The wind tunnel experimental setup originates from the Mock Urban Setting Test (MUST), an extensive field test carried out on a test site of the US Army in the Great Basin Desert in 2001. 120 standard size shipping containers were set up in a nearly regular array of 10 by 12 obstacles (12.2 m long, 2.4 m wide, and 2.5 m high) placed in the center of Horizontal Grid along the sides of the roads. The wind tunnel measurements within a scaled model (1:75) of that configuration were carried out at the University of Hamburg (Bezpalcove, K and F. Harms, 2005). We focus only on main wind direction ( $0^\circ$ ) which correspond to those cases selected within the COST 732 Action.

### 2.1 Set up of model runs

For the MUST wind tunnel experiment the 120 obstacles of the full scale experiment were modelled on a 1:75 scale and positioned on the wind tunnels turn table as shown in Figure 3. The approach flow conditions in the wind tunnel were adjusted to meet the approach flow measured in full scale. In Figure 4 the measured mean velocity profile and the measured profile for the turbulent

kinetic energy are shown.  $H = 2.54\text{m}$  is the height of the containers in full scale.



Fig. 3. Setup for the MUST wind tunnel experiment (Bezpalcova and Harms, 2005).

### 2.2 The initial conditions and conditions to the limits

The conditions to the lateral limits are fixed by the direction of wind.

In the case  $0^\circ$ : On the face of entry (plan  $(y, z)$ , for which  $x = 0$ ) the condition of Dirichlet has been imposed, for the profiles of entry of the middle speed and turbulent kinetic energy. To the level of soil, the classic conditions to the partition have been used, and for the other faces the condition of Neumann has been specified.

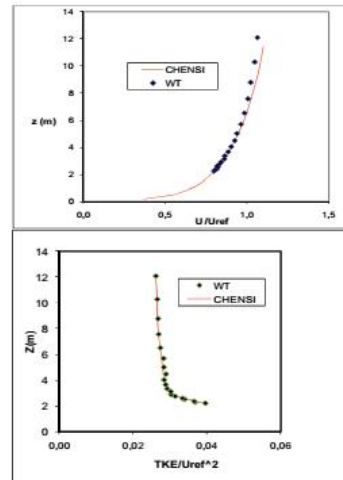
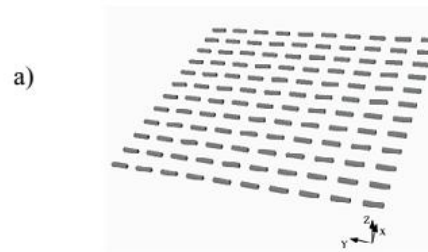
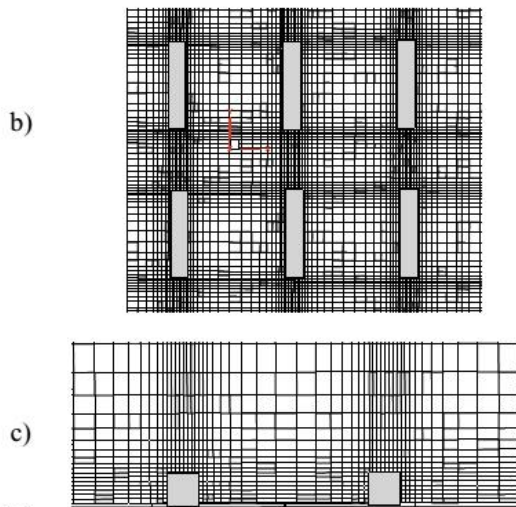


Fig.4. Measured velocity (Top) and turbulent kinetic (Bottom) profile of the approach flow in the wind tunnel.





**Fig.5.** Domain of simulation a) Three-dimensional domain, b) Vertical cut and c) Horizontal cut (Computational mesh used for numerical simulations).

### 3 Models

The CFD codes applied in this exercise comprise three advanced CFD models, i.e. CHENSI, FLUENT (Fluent, 2006) and MISKAM (Eichhorn, 1989), for the numerical simulation of the three-dimensional flow field and the dispersion of pollutants in the micro-scale. These models employ the widely used 'standard k-ε -model' for the turbulence closure but different implementation of the boundary conditions and different numerical schemes are used. A detailed description of the codes can be found in the model inventory (see link in URL2). All three models used the same domain and grid sizes as well as the same inflow conditions specified by the available experimental data sets.

### 4 CFD code validation

The code CHENSI has been validated for a series of 13 reference flows predicting either of the physical characteristics that are important in the lower urban atmospheric flows: diffusive transport in round and plane jets, and in plumes spreading in a uniform or stratified atmosphere; recirculations in isothermal boundary layers over backward- and forward-facing steps, 2-D and 3-D rectangular blocks; inhomogeneous dynamical and thermal developments in internal plane boundary layers over roughness and temperature steps. These validation tests have been extensively presented and analysed by Sini (1986), Sini and Dekeyser (1987, 1989), Lévi Alvarès et al. (1990), Lévi Alvarès (1991), Zhang (1991) and Mestayer et al (1993). The results show that the standard k-ε model gives good to excellent predictions for all the mean flow fields and relatively good prediction of the turbulent diffusion, with no systematic deficiencies

except in the flow zones where coherent structures, clearly non- isotropic, are of importance in transport processes. In that case (e.g., step or block flows), the k-ε model significantly under predicts (by about 15-20%) the size of recirculating zones. Nevertheless, this first order model can be used for heuristic studies to provide some qualitative ideas on the recirculating flow structure, keeping in mind that some uncertainties can affect the quantitative results.

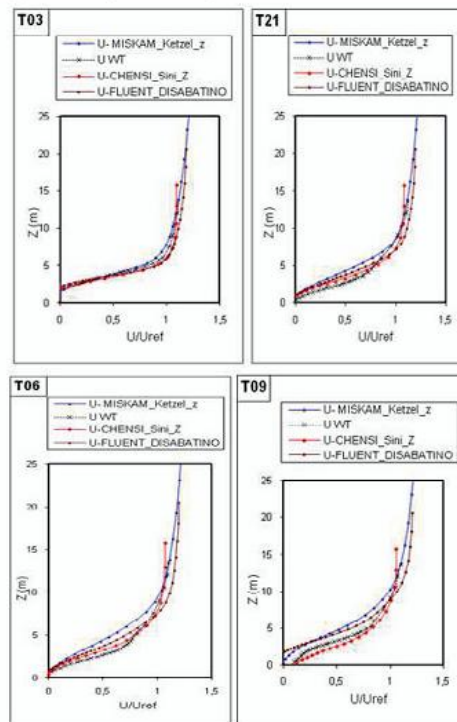
## 5 Results and discussion:

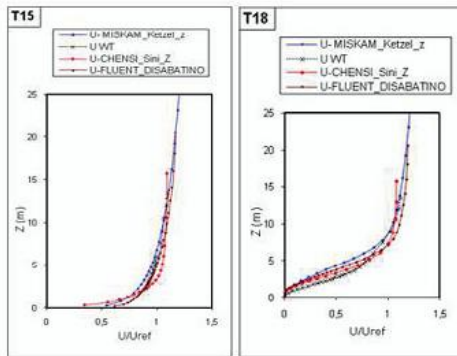
Three models CHENSI, MISKAM and FLUENT were validated against non-uniform inflow conditions. Before making a direct comparison of the dynamic fields between the wind tunnel measurements and numerical simulations.

### 5.1 Component U

The agreement between observed and modelled u-velocity data upstream of the obstacle was very satisfactory, however, all models agreed excellently with each other and the measurements.

In figure (6), all the models in the towers of 'wide streets'. In agreement with the observations, all codes predicted very accurately the u-velocity of the leeward vortex in the cavity zone behind the obstacle. Finally the profiles of U are almost similar to the wind tunnel measurements, in many cases slightly underestimating them and no remarkable differences can be found between CHENSI and (MISKAM, FLUENT).

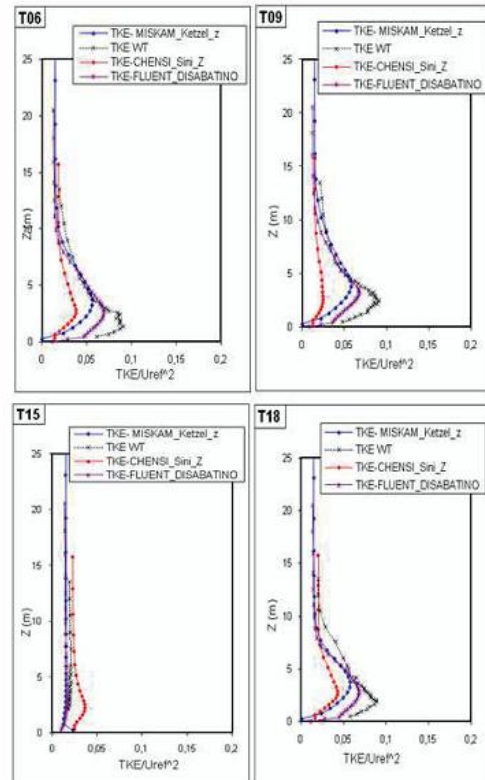
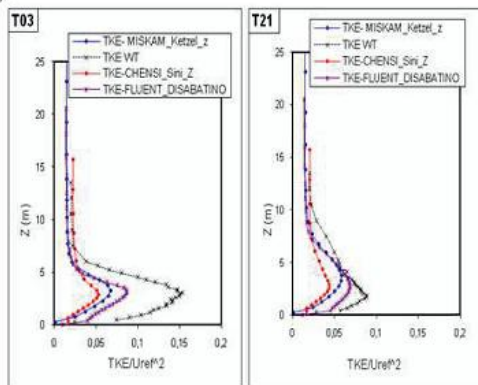




**Fig.6.** Comparison of experimental and modelled longitudinal velocity ( $U$ ) profiles normalised with the free stream velocity, are shown at 06 towers, which are representative of 'wide streets' (Tower 3, 6, 9, 15, 18 and 21), cf. Figure 2. The figure is from SavedMetrics\_UWtke\_UVWtke\_0degree\_5Dec07.xls with a filter applied (as explained by Olesen and Berkowicz, 2007).

### 5.2 Component TKE

Finally, all of the models had difficulties simulating the turbulent kinetic energy ( $k$ ) near the up wind face of the obstacles in the three grids are shown at 06 towers, which are representative of 'wide streets' (Tower 3, 6, 9, 12, 15, 18 and 21), cf. Figure 2. In this case, CHENSI came closest to predicting the observed data. However, it is clear that all three models greatly overestimated  $k$  in the impingement region near the up wind obstacle wall, which is a common problem with models using. Further downstream the agreement was good, except that CHENSI over predicted  $k$  just behind the obstacle, while the other three models produced satisfactory results (Fig. 7).



**Fig.7.** Comparison of experimental and modelled turbulent kinetic energy ( $k$ ) profiles normalised with the free stream velocity, are shown at 06 towers, which are representative of 'wide streets' (Tower 3, 6, 9, 12, 15, 18 and 21), cf. Figure 2. The figure is from SavedMetrics\_UWtke\_UVWtke\_0degree\_5Dec07.xls with a filter applied (as explained by Olesen and Berkowicz, 2007).

### 6 Conclusions

The present work was carried out within the COST network (creates scientific networks and enables scientists to collaborate in a wide spectrum of activities in research and technology). In order to assure the quality of models for flow in urban and industrial areas, a European COST initiative (see <http://www.cost.esf.org>) was launched. COST is an Intergovernmental European framework for international cooperation between nationally funded research activities.

The numerical results were in good agreement with the wind tunnel data, giving a reasonable representation of the general flow pattern. The oncoming flow exhibits an impingement region at the windward side of the obstacle. At the upper leeward edge of the obstacle the flow separates again and leads to an extended lee vortex formed in the cavity zone immediately behind the obstacle which interacts with the horseshoe vortex. The disagreements with the experiment appear close to the reattachment point in the mean longitudinal velocity component and close to the windward obstacle face of turbulent kinetic energy. CHENSI overestimate the

reattachment length (MISKAM in opposite underestimate) and both models over predict turbulent kinetic energy (TKE) in the impingement region. CHENSI, MISKAM and FLUENT fail to predict the strong gradients of the TKE on the top of the obstacle and close to the lateral obstacle faces. Further model's developer can be another turbulent model implementation and other boundary conditions for the turbulent kinetic energy applying on the obstacle's faces.

## Acknowledgements

The numerical calculations were carried out on the supercomputers of the CNRS national computing centre. Complete computer support was given by the Scientific Council of Institut de Développement et de Recherche pour l'Informatique Scientifique (IDRIS), Orsay, France.

## References

1. Bezpalcova, K. and Harms, F. (2005) EWTL Data Report / Part I: Summarized Test Description Mock Urban Setting Test. Environmental Wind Tunnel Laboratory, Centre for Marine and Atmospheric Research, University of Hamburg.
2. Eichhorn, J. (1989), 'Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen mikroskaligen Stadtklima-Modells', Dissertation, Universität Mainz, Germany.
3. Ferziger, J. H. & Peric, M.: 1996, Computational methods for fluid dynamic, Springer-Verlag, New-York – Heidelberg – Berlin.
4. FLUENT (2006): FLUENT V6.3 User's guide. Lebanon, New Hampshire: Fluent Inc.
5. Hanjalic R. and Launder B. E. (1972) A Reynolds stress model of turbulence and its application to thin shear flows. *J. Fluid Mech.* 52, 609-638.
6. Harlow, F. H & Welch, J. E.: 1965, Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface, *Phys. Fluids* 8, 2182-2182.
7. Launder B. E. and Spalding D. B. (1974) The numerical computation of turbulent flows. *Comput. Meth. Appl. Mech. Engng* 3, 269-289.
8. Launder B. E., Reynolds W. C., Rodi W., Mathieu J. and Jeandel D. (1984) *Turbulence Models and their Applications*. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, 2, No, 56, Eyrolles Ed., Paris.
9. Lévi Alvarès S. (now Anquetin S.), Sini J.-F., Zhang C. X. and Sacré C. (1990) Tests for a flow simulation around a isolated block, k e. turbulence model improvements. *AMS 9th Symp. on Turbulence and Diffusion*, Roskilde, Denmark, May 1990, A.M.S., Boston, Massachusetts, pp. 145-147.
10. Lévi Alvarès S. (now Anquetin S.) (1991) Simulation numérique des écoulements urbains fi l'échelle d'une rue fi l'aide d'un module *k-e* (in French), Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, 44072 Nantes Cedex, France.
11. Mestayer P. G., Sini J. F., Rey C., Anquetin S., Badri Kusuma S. M., Lakehal D. and Moulinec Ch. (1993) Pollutant dispersion in the urban atmosphere: simulation of turbulent flows using a *k ε* model. *ERCOFTAC Bull.* 16, 22 28.
12. Michael Schatzmann, Helge Olesen and Jörg Franke (2009): ' COST 732 Model Evaluation Case Studies', COST Action 732, Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models, 1 June 2009.
13. Olesen, H.R. and Berkowicz, R. (2007): Guide to Excel sheets for MUST experiment <http://www2.dmu.dk/atmosphericenvironment/Docs/SpreadsheetInfo.pdf>
14. Sini J.-F. (1986) Modélisation d'écoulements turbulents libres bidimensionnels avec effets de flottabilité -- Cas du panache en milieu stratifié. (in French), Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille II, IMST, 12, Avenue du Général Leclerc, 13003-Marseille, France.
15. Sini J. F. and Dekeyser I. (1987) Numerical prediction of turbulent plane jets and forced plumes by use of the *k-ε*; model of turbulence. *Int. J. Heat Mass Transfer* 30,1787 1801.
16. Sini J. F. and Dekeyser I. (1989) Numerical prediction of turbulent plane buoyant jets discharging in a stratified stagnant or flowing ocean. *Numer. Heat Transfer* 16,371-387.
17. Zhang C.-X. (1991) Simulation numérique d'écoulements turbulents autour d'un obstacle. (in French), Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, 44072 Nantes Cedex, France.
18. URL1: The MUST exercise of COST732 Action URL <http://www.mi.uni-hamburg.de/cost732>
19. URL2: CFD working group URL <http://www.dmu.dk/AtmosphericEnvironment/trapos/cfd-wg.htm>

---

---

### **Annexe 3: Article 02**

**MEDJAHED Bendida, BOUZIT Mohamed**, (Numerical study of the dispersion of a passive scalar in simplified urban), *International Journal of Applied Engineering Research IJAR.*, Volume. 11, N° 2. (2016) (Publication International cite par SCOPUS).

## Numerical Study of the Dispersion of a Passive Scalar in Simplified Urban

**Medjahed Bendida**

*Laboratory of Numerical and Experimental Modeling of Mechanical phenomena,  
University of Abdelhamid Ibn Badis, Faculty of Science and Technology, Mostaganem, Algeria.*

**Bouzit Mohamed**

*Laboratory of Applied Mechanics; University of Science and Technology of Oran,  
Faculty of Mechanical Engineering, BP. 1505 El-Mnaouar, Oran, Algeria.*

### Abstract

Dispersion of a passive scalar in simplified urban environment was investigated numerically in this study. The aim is to explain the experimental data obtained by atmospheric wind on the physical model. The Mock urban setting test must be selected to be simulated by the code CHENSI developed by the team of Dynamics of atmosphere Habitee of Ecole Central Nantes (France). The code was based on (K- $\epsilon$ ) model. For the integration of the Equation differentials potential constitute the mathematical model, the finite volume method was used within the staggered disposition of unknowns for the discretisation of Equation differentials potentially terms. The boundary conditions were imposed according to the wall laws (In ground and on buildings) or within Dirichlet condition (Inlet boundary) or of Newman (Outlet boundary or top limit). The numerical domain used was comparable to the one of the atmospheric wind experiences within a three-dimensional Cartesian mesh. Numerical results presented in this study in the mean flow field, turbulent kinetic energy and the concentration field of the passive scalar in two directions of wind incidence ( $0^\circ$  and  $45^\circ$  from street axes) for different altitudes. However we note that the turbulent kinetic energy was underestimated with regards to the measured values of atmospheric wind. The mean concentration field was in good agreement within the ones obtained experimentally.

**Keywords:** Urban, pollutant dispersion, CHENSI code, k- $\epsilon$  model, MUST, Dynamics.

### Introduction

Air pollution is an issue increasingly topical; its control requires first having effective means of forecasting can provide estimates as close as possible to reality.

In the particular context of the dispersion of a passive scalar in a point source continue is considered without of chemical reactions. An application example is the study of the impact of an accidental release. The dispersion of pollutants in the layer of urban area is a direct result of the air turbulence: an important characteristic of turbulence is in fact the ability to transport and mix more efficiently. Atmospheric dispersion then depend highly thermal stability. Unstable atmosphere, the

dispersion is favored by strong convective motions. It also depend mechanical turbulence and the characteristics of the surface. It therefore appears important in dispersion studies to accurately describe turbulent flows.

The COST Action 732 provided a model evaluation guidance document, [1], leading model developers through the steps of proper model validation and documentation. On the other hand, the Action also gives recommendations on model set-up for users of micro-meteorological CFD models with a comprehensive Best Practice Guideline in Franke et al [2]. Emphasizing the necessity of applicable validation data sets, the Action will recommend and publish several data sets at its ending in 2009. One of them is the Mock Urban Setting Test, which was also extensively investigated in wind tunnel [3], and was already run by a plenty of models during the Action, including also MISKAM 5.01 simulations of Goricsán et al [4]. Summarized results were presented e.g. by Franke et al [5] and Olesen et al [6]. This article discusses the dispersion of a passive scalar in simplified urban environments. The main objective is the detailed study of the flow and dispersion of pollutants in a city of modeling the mean flow, turbulence and concentration. Numerical simulations were undertaken using a CFD (Computational Fluid Dynamics) model and the code used in our case the calculation is CHENSI code. The simulation shows the case of experimental wind tunnel study of field experience MUST (Mock Urban Setting Test).

### Simulation Model

In the present work of the Mock Urban Setting Test (MUST), a total of 120 standard size shipping buildings were set up in a nearly regular array consisting of 12 rows of 10 buildings, covering an area of around 100 by 100 m, and each buildings have the same dimensions ( $L=12.2$  m,  $l=2.42$  m and  $H= 2.54$  m) as the MUST experiment shipping containers [7].

### CHENSI Code

The objective of this calculation code is to simulate the atmospheric out-flows in the layer limits urban surface. One considers that all obstacles of the layer limit urban are constituted possibly of parallelepipeds rectangles, what drives

to consider a Cartesian three-dimensional mesh only, non homogeneous that is-to say of which the size of the stitches is not constant in each of the three directions.

In this article of presentation, we expose the choices that we did at the time of the development of this code succinctly:

- The model of turbulence adopted: the model of the first order to two equations of Chen and Kim) [8].
- The used numeric model: the method of the volumes finishes with the disposition baffled of the unknowns, also named MAC method (Marker and Cell) of Harlow and Welch [9].
- The coupling speed-pressure solved by the artificial compression method developed by Viecegli [10].
- The conditioning or in particular, the conditioning in presence of an inspired partition of the partition law developed by Launder and Spalding [11].
- The discretization of the different terms and, in particular, the discretization of the term of advection by the Hybrid diagram of Spalding.

**The Initial Conditions and Conditions to the Limits**

The conditions to the lateral limits are fixed by the direction of wind.

For the case 0°: On the face of entry [plan (y, z), for which x = 0] the condition of Dirichlet has been imposed, for the profiles of entry of the middle speed and turbulent kinetic energy. To the level of soil, the classic conditions to the partition have been used, and for the other faces the condition of Neumann has been specified.

For the second case-45°: on the face of entry [plan (y, z) for which x = 0] and the face of symmetry [plan (x-z) for which y= 0], the condition of Dirichlet has been imposed, for the profile of entry speed and for the turbulent kinetic energy. To the level of soil, the classic conditions to the partition have been used, and for the other faces the condition of Neumann has been imposed.

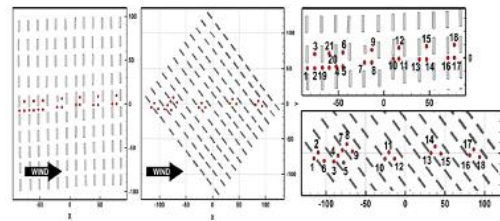
**Simulation and Analysis**

The battery of sensor nodes in the wireless sensor network become rechargeable, the network design changes fundamentally. Designing the network that reduces the cost for power

In figure 1 present the vertical profiles of wind and turbulence components are measured locations ('towers') shown. The wind blows from the left.

Top: the 0degree case. The points can be classified into three groups, so Tower 1 represents a 'Narrow Street', Tower 20 a 'Crossing', and Tower 21 a 'Wide Street'.

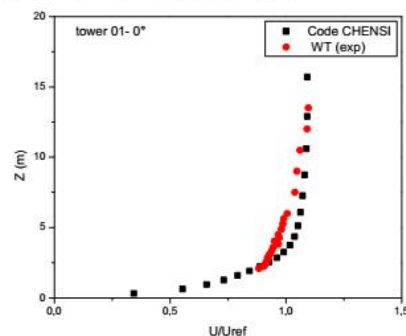
Bottom: the-45degree case. Tower 1 represents a 'Narrow Street', Tower 11 a 'Crossing', and Tower 6 a 'Wide Street'.

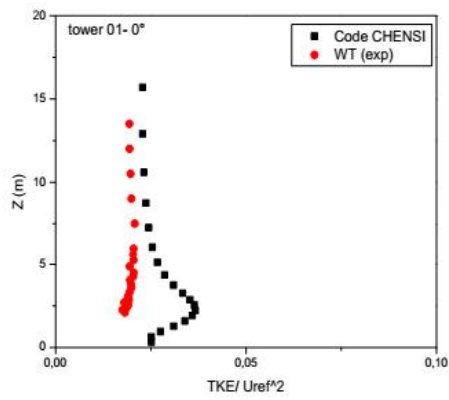
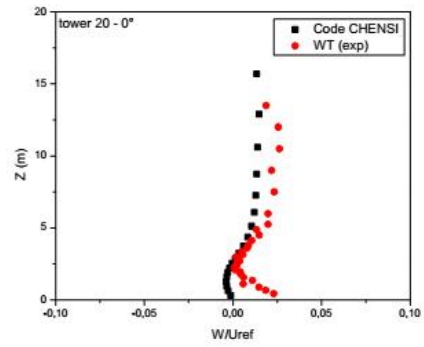
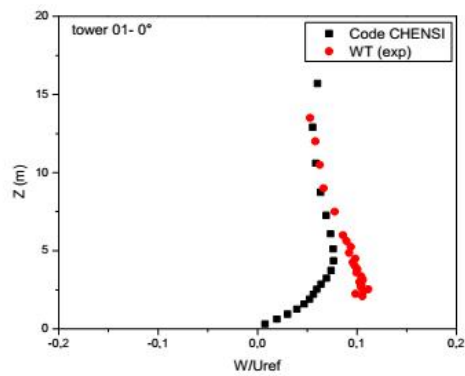


**Figure 1:** Layout of measurements and the buildings for the flow cases.

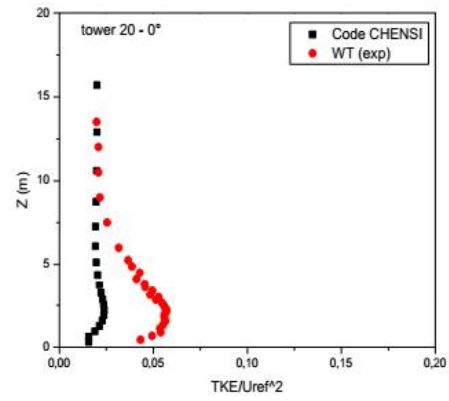
**Plots and metrics for the 0 degree flow case**

In Figure 2 the mean velocities and turbulent kinetic energy computed on the three grids are shown at three towers, which are representative of 'narrow streets' (Tower 1), 'crossings' (Tower 20) and 'wide streets' (Tower 21), cf. Figure 1. For  $U/U_{ref}$  all simulations are very close, especially above 2.5 times the container intervals are also small. The largest uncertainties are here however obtained for Tower 1 in the 'narrow height H. The corresponding uncertainty is also small. Below 2.5H it increases, although the simulations also do not differ much. The largest uncertainties are obtained in the 'wide streets' where recirculation regions behind the containers exist, for  $W/U_{ref}$  the differences and uncertainty street. At Tower 21, where the largest differences between simulation and experiment exist, the solution on the fine grid is slightly closer to the experiments, but the uncertainty indicates that further refinement of the mesh will not lead to substantial improvements, for the vertical profiles of turbulence kinetic energy ( $TKE/U_{ref}^2$ ). In general, the turbulence energy levels are under predicted within the urban canopy by the standard k-ε model. Nevertheless, note that the position of the observed large peak in TKE at tower 21 'wide Street' is well predicted using the standard k-ε model. This observed large peak in the TKE arises from an oscillation of the high shear layer by the larger-scale upstream turbulence, enhancing the stream wise velocity variance. The peak value of k at tower 21 'wide Street' (which occurs at or near the canopy top at  $z/H = 1$ ) decreases monotonically in the stream wise direction from the first street canyon.

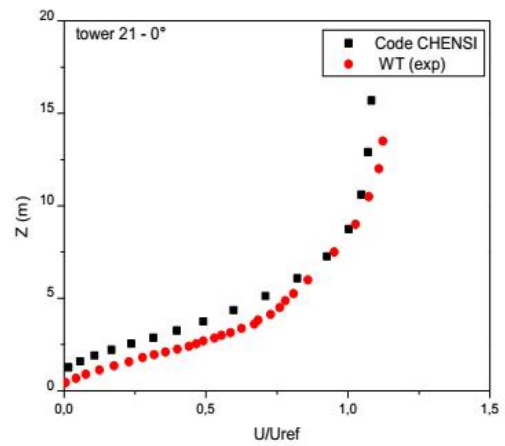
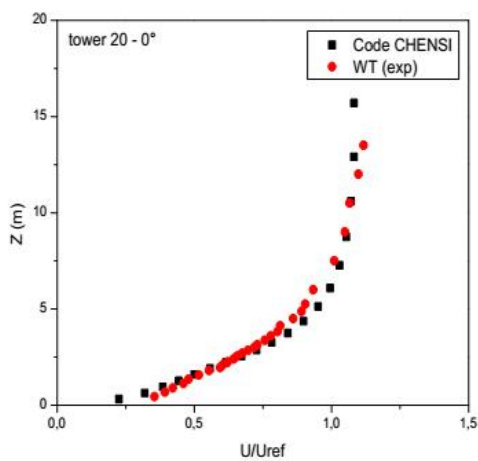


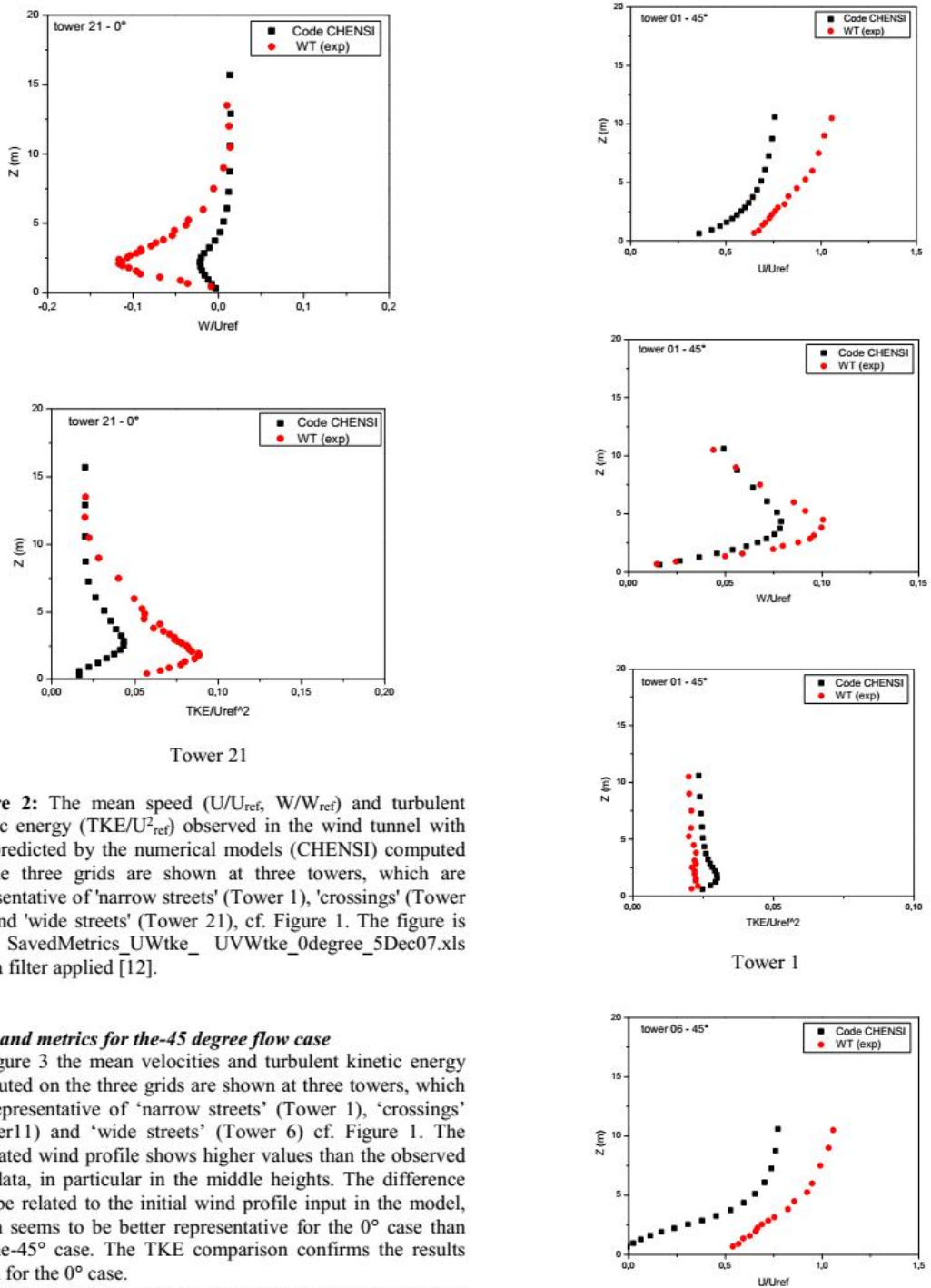


Tower 01



Tower 20



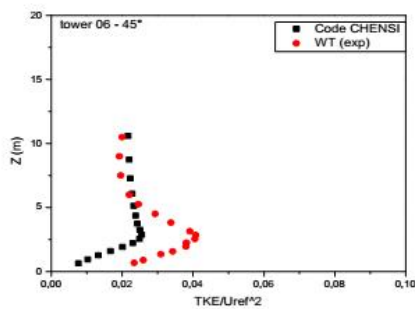
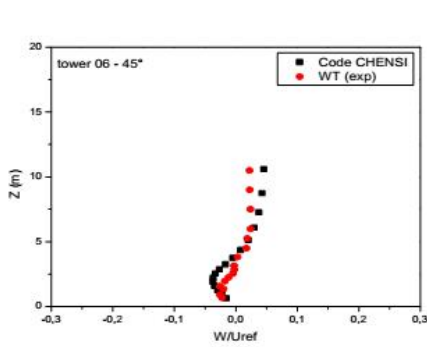


**Figure 2:** The mean speed ( $U/U_{ref}$ ,  $W/W_{ref}$ ) and turbulent kinetic energy ( $TKE/U_{ref}^2$ ) observed in the wind tunnel with that predicted by the numerical models (CHENSI) computed on the three grids are shown at three towers, which are representative of 'narrow streets' (Tower 1), 'crossings' (Tower 20) and 'wide streets' (Tower 21), cf. Figure 1. The figure is from SavedMetrics\_UWtke\_UVWtke\_0degree\_5Dec07.xls with a filter applied [12].

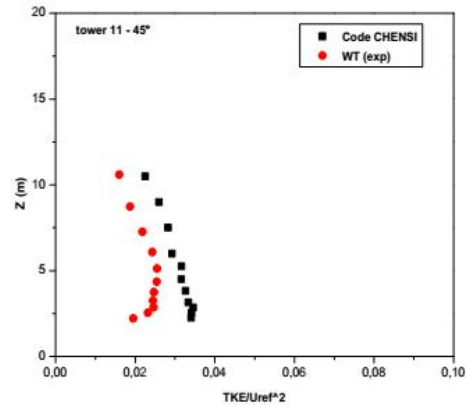
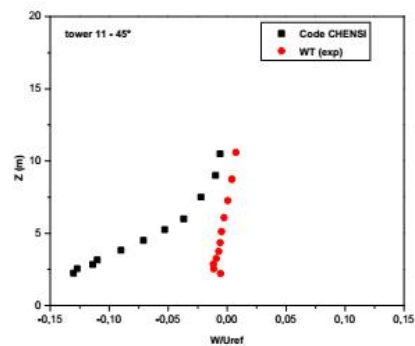
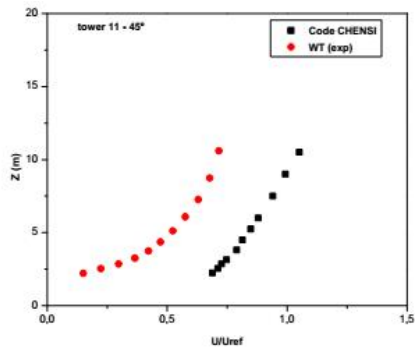
**Plots and metrics for the-45 degree flow case**

In Figure 3 the mean velocities and turbulent kinetic energy computed on the three grids are shown at three towers, which are representative of 'narrow streets' (Tower 1), 'crossings' (Tower 11) and 'wide streets' (Tower 6) cf. Figure 1. The simulated wind profile shows higher values than the observed WT data, in particular in the middle heights. The difference may be related to the initial wind profile input in the model, which seems to be better representative for the 0° case than for the-45° case. The TKE comparison confirms the results found for the 0° case.

While for  $U/U_{ref}$  the results are similar to the ones of the 0 degree case shown in Figure 2, the uncertainty of  $W/U_{ref}$  is much larger than in the 0 degree case, especially for the 'crossings' (Tower 11) and 'wide streets' (Tower 6).



Tower 6



Tower 11

**Figure 3:** The mean speed ( $U/U_{ref}$ ,  $W/W_{ref}$ ) and turbulent kinetic energy ( $TKE/U_{ref}^2$ ) observed in the wind tunnel with that predicted by the numerical models (CHENSI) computed on the three grids are shown at three towers, which are representative of 'narrow streets' (Tower 1), 'crossings' (Tower 11) and 'wide streets' (Tower 6), cf. Figure 1. The figure is from Saved Metrics\_UWtke\_UVWtke\_0degree\_5Dec07.xls with a filter applied [12].

**Concentration field at-45°**

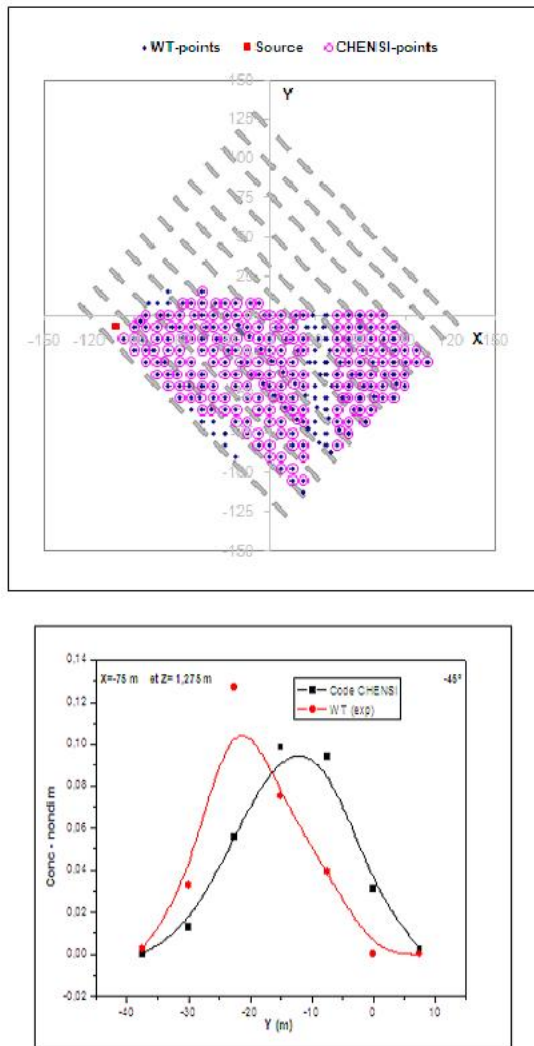
Normalized concentrations shown in the following are defined as:

$$C^* = C \cdot U_{ref} \cdot H^2 \cdot Q^{-1} \quad (1)$$

with  $C$ -measured or simulated concentration,  $U_{ref}$ -inlet velocity taken at container height  $H$  and  $Q$ -source strength.

In figure 4-a: shows the setup of the-45 degree dispersion case. In the wind tunnel the source was placed at ground level, while the concentration measurements were performed at a height of 1.275 m. Although the net of monitors at first sight looks dense, the sparseness of monitors is a problem when results are interpreted. Figure 4-b illustrates the difficulty in comparing measurements and modeled results.

Although difficult to interpret, point-by-point comparisons do carry some information. For each measurement point, the measured value is compared to the modeled value at the closest point in the modeling grid. This will normally be a point outside buildings, unless the grid has been chosen with too poor resolution. However, for some of the models the data were provided interpolated exactly to the measuring points; in those cases interpolated values were used. Due to the discontinuity at the building walls (see e.g. Figure 4-b), such interpolation is dangerous and requires care if it shall not produce misleading values.

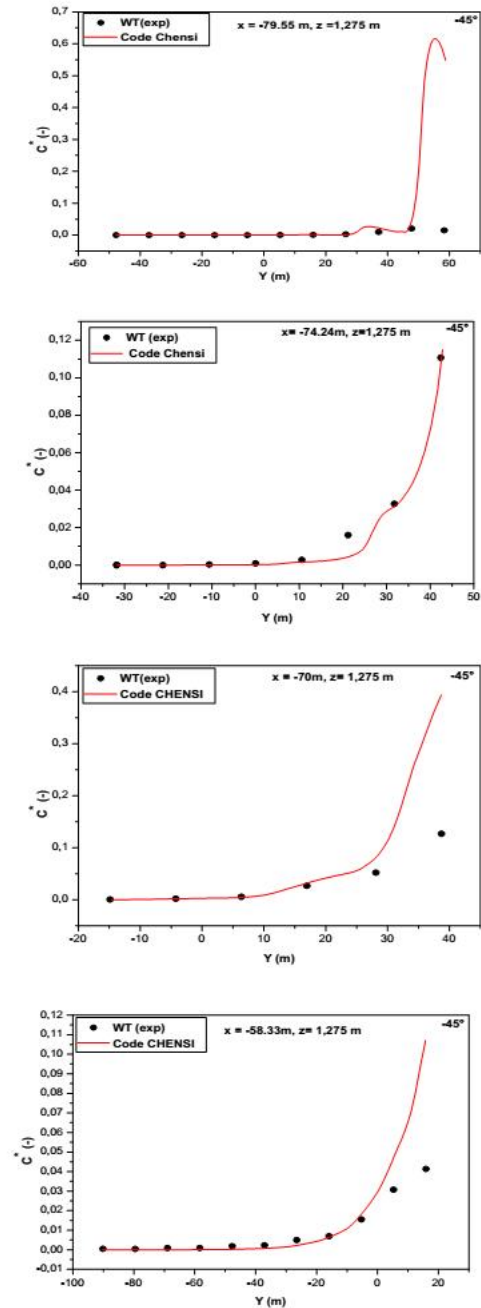


**Figure 4. (a):** Layout of dispersion experiment. The flow is from the left. Monitors are located at blue dots, the source at the left. (b): Profile of concentrations in cross-section at 18 m from the source, along the red line in (a). The modelled concentration is zero where there is a building.

**Fluctuations of the Concentrations**

In figure 5: represent the profiles dimensionless of concentrations ( $C^*$ ) for the case ( $-45^\circ$ ), those calculated by the CHENSI code and the experimental profiles corresponding. On the profiles dimensionless of concentrations ( $C^*$ ) for the case ( $-45^\circ$ ), one notices a good concordance between the experimental profile and the one gotten numerically by the CHENSI code, on the other hand the profiles experimental after that shows one or remarkable

evaluation. The size of the values of the middle concentrations indicates on the other hand by the CHENSI code the experimental profile given of the values a lot of fable.



**Figure 5:** Concentration profiles along the y direction at  $z=1.275$ m.

## Conclusion

The current study was designed to study the wind flow, the dispersion of a passive scalar in simplified urban and validate the results obtained by numerical simulation using the CHENSI code by comparing the results of the experience MUST (Mock Urban Setting Test) on the one hand and the results of wind tunnel simulation miniature conducted at the University of Hamburg. Two angles of incidence of the wind were taken into account to achieve the simulations 0° and 45°. This study highlights the influence of the canopy on the mean flow and dispersion. The main effect on the flow is a significant slowdown with the appearance of recirculation zones downstream of each container. Turbulence is also affected by the appearance below the roof level, areas of low turbulence downstream protected from the wind at roof faces, areas of high turbulence develops near the point of impact on containers. The average effect on the dispersion results in a deflection of the axis of the plume from the direction of the incident wind, due to the delivery of pollutant through the streets parallel to the two directions (x and y).

The model results are well consistent with the measurements MUST experience the dynamics and dispersion for both 0° and 45°.

It can be concluded that the angle of incidence is an important factor in the dispersion of pollutants, since the change will influence the speed and the rate of turbulence and consequently on the dispersion. The flow at an angle to minimize the recirculation zone which moves to the lower sides of incidence of 45° had resulted. Remarkable since this orientation leads to an increased movement thus the state of turbulence and a portion of the other obstacles promote transport and dispersion of turbulent kinetic energy. The study showed good agreement between the experimental profile and that calculated numerically by CHENSI code. Underestimation is mainly due to the model used where the need is to seek to improve the model is to use another more suitable model. Values (TKE) are calculated numerically very low relative to those measured experimentally.

## References

- [1] Britter, R., Schatzmann, M. (ED.) (2007): Model Evaluation Guidance and Protocol Document, COST Action 732-COST Office: Brussels, ISBN 3-00-018312-4.
- [2] Franke, J.; Bartzis, J. Barmpas, F.; Berkowicz, R.; Brzozowski, K. Buccolieri, R. Carissimo, B.; Costa, A.; Disabatino, S.; Efthimiou, G. Goricsan, I. Hellsten, A. Ketzl, M.; Leidl, B.; Nuterman, R.; Olesen, H.; Polreich, E.; Santiago, J., Tavares, R (2008): The MUST model evaluation exercise: statistical analysis of modelling results-Proceedings of the 12th International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (HARMO12), Croatian Meteorological Journal 43, 414-418.
- [3] Leidl, B., Bezpalcova, K., Harms, F. (2007): Wind tunnel modelling of the MUST experiment-Proceedings of the 11th International Conference on Harmonisation

within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes 435-439.

- [4] Goricsán, I., Balczó, M., Balogh, M., Czáder, K., Rákai, A., Tonkó, CS (2009): Simulation of flow in an idealised city using various CFD codes-International Journal of Environment and Pollution, accepted for publication.
- [5] Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo B., (ED.) (2007): Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment-COST Office, Brussels.
- [6] Olesen, H.R., Baklanov, A., Bartzis, J., Barmpas, F. Berkowicz, R., Brzozowski, R. Buccolieri, R., Carissimo, B., Costa, A., Disabatino, S., Efthimiou, G., Franke, J., Goricsán, I., Hellsten, A., Ketzl, M. Leidl, B., Nuterman, R., Polreich, E., Tavares, R. (2008): The MUST model evaluation exercise: Patterns in model performance-Proceedings of the 12th International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (HARMO12), Croatian Meteorological Journal 43, 403-408.
- [7] Yee, E. and Biltoft, C.A. (2004): Concentration fluctuation measurements in a plume dispersing through a regular array of obstacles-Boundary-Layer Meteorol. 111, 363-415.
- [8] Chen, Y. and Kim S., 1987: Computation of turbulent flows using an extended k-ε turbulence closure model. Report NASA-CR-179204.
- [9] Harlow, F. H & Welch, J. E.: 1965, Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface, Phys. Fluids 8, 2182-2182.
- [10] Vieceili, J.A. (1969) A method for including arbitrary external boundaries in the MAC incompressible fluid computing technique, J. Comput. Physics 4, 543-551.
- [11] Launder B. E. and Spalding D. B. (1974) the numerical computation of turbulent flows. Comput. Meth. Appl. Mech. Engng 3, 269-289.
- [12] Olesen, H.R. and Berkowicz, R. (2007): Guide to Excel sheets for MUST experiment <http://www2.dmu.dk/atmosphericenvironment/Docs/SpreadsheetInfo.pdf>.

---

---

### **Annexe 4: Article 03**

**MEDJAHED Bendida, BOUZIT MOHAMED, Numerical Study of the Dispersion of the pollutant (CH<sub>4</sub>) in a canopy Urban, *Journal of Materials and Environmental Science JMES*, Volume.7, N° 12. (2016) (Publication International cite par SCOPUS).**



## Numerical Study of the Dispersion of the pollutant (CH<sub>4</sub>) in a canopy Urban. (Etude Numérique de la Dispersion du Polluant (CH<sub>4</sub>) dans une Canopée Urbaine)

Bendida Medjahed<sup>a\*</sup>, Mohamed Bouzit<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Laboratory of Numerical and Experimental Modeling of Mechanical phenomena, University of Abdelhamid Ibn Badis, Faculty of Science and Technology, Mostaganem, Algeria

<sup>b</sup>Laboratory of Applied Mechanics; University Of Science and Technology of Oran, Faculty of Mechanical Engineering, BP. 1505 El-Mnaouar, Oran, Algeria.

Received 07 Jul 2016, Revised 23 Oct 2016, Accepted 26 Oct 2016

\*For correspondence: Email: [madedpodim2006@yahoo.fr](mailto:madedpodim2006@yahoo.fr); Phone: +2136 6 142 6640

### Abstract

The present work is about the study of pollution dispersion (CH<sub>4</sub>) in urban site consists of street canyons. Several numerical simulations were performed using the CHENSI code. The flow is considered three-dimensional, turbulent. The aim is to explain the experimental data obtained by atmospheric wind on the physical model. The site company of Mock Urban Setting Test MUST be selected to be simulated by the CHENSI code developed by the dynamic team Atmospheric Inhabited (Central School of Nantes, France). Numerical results presented in this study in the mean flow field, the concentration field of the passive scalar in one direction of wind incidence (-45° from street axes). For an objective comparison of the CHENSI model performances within other European codes used for MUST configuration simulation. For the direction of the wind incidence (-45°), an analysis showed that the results for the mean concentration field was in good agreement within the ones obtained experimentally.

*Keywords:* Pollution dispersion, CH<sub>4</sub>, Canopy, concentration.

### Résumé

Le présent travail porte sur l'étude de la dispersion de la pollution (CH<sub>4</sub>) dans un site urbain constitué de rues canyons. Plusieurs simulations numériques ont été effectuées en utilisant le code de calcul CHENSI. L'écoulement considéré est tridimensionnel et turbulent. Le travail consiste à exploiter les données expérimentales obtenues en soufflerie atmosphérique sur un modèle physique du site de la campagne MUST (Mock Urbain Setting Test), et ce, dans le but d'évaluer le modèle CFD CHENSI développé par l'équipe Dynamique de l'Atmosphère Habitée du LMF/ ECN. Les résultats numériques présentés du champ de concentration d'un scalaire passif (C), suivant la direction du vent d'incidence à -45° par rapport à l'axe des rues. Toujours, dans le cadre de ce travail et afin de valider nos résultats, nous les avons confrontés avec la configuration MUST. Pour la direction du vent incident à -45°, l'analyse montre que les résultats pour le champ moyen de concentration est en bonne concordance avec celui obtenu expérimentalement.

*Mots-clés:* Dispersion de la pollution, CH<sub>4</sub>, Canopée, concentration.

### 1. Introduction

La compréhension des détails de prédiction de la direction du vent et la dispersion d'un polluant autour des bâtiments est très importante pour estimer l'effet de la présence de ces derniers sur l'évolution des différents contaminants. La pollution générée par la circulation automobile au cœur de la ville, les activités industrielles à

sa périphérie, est un problème aigu des grandes cités urbaines dans lesquelles nous vivons. Les répercussions sur le bien être de ses habitants sont nombreuses mais, bien au-delà, ce sont ses conséquences sur la santé publique qui deviennent préoccupantes. Cependant, ces travaux expérimentaux ne fournissent pas une base de données complète pour valider et améliorer les modèles de prédiction et dispersion dans un terrain complexe, mais se limitent à donner des lois empiriques simples concernant essentiellement l'effet du rapport d'aspect de l'obstacle et l'épaisseur de la couche limite sur la diffusion du polluant. Le but de la simulation numérique effectuée est d'évaluer les performances du modèle en comparant les résultats numériques obtenus par ce dernier avec les résultats expérimentaux obtenus après l'étude de la dispersion d'un scalaire passif en milieu urbain simplifié et de comparer les performances globales. Dans nos résultats du modèle de la méthodologie proposée doit être analysé de manière combinée au moyen des profils de concentration adimensionnelle. Dans l'exemple fourni, nous utilisons seulement le cas  $-45^\circ$  d'écoulement d'approche des mesures de concentration étaient pas disponibles pour le cas  $0^\circ$ . Dans une autre recherche, Murakami, Hibi, et Moshida [1] ont simulé l'écoulement du vent autour d'un bâtiment en cube en utilisant le modèle L.E.S. ("Large Eddy Simulation"). Ils ont comparé leurs résultats avec ceux obtenus par le modèle (k- $\epsilon$ ) pour un vent normal à l'obstacle. Baetke et al. [2] ont évalué par des méthodes numériques la pression du vent sur la surface d'un bâtiment avec l'angle d'incidence du vent égal à  $45^\circ$  puis  $0^\circ$ . Ils ont conclu que les résultats obtenus avec l'incidence du vent normal à l'obstacle étaient raisonnables et concordent avec ceux des expériences de Castro et Robins [3]. Mais, pour le vent à direction oblique les calculs étaient faits pour un profil uniforme, donc n'étaient pas comparables avec ceux des expériences. Dans le même contexte, Xiaomin Xie, Zhen Huang et Jia-song Wang [4] ont procédé à une simulation numérique des émissions des gaz d'échappement des véhicules dans une rue canyon urbaine. En particulier, l'étude a été menée sur l'influence de l'effet de la forme du toit des bâtiments sur la dispersion des polluants. István Goricsán [5] a simulé le flux dans une ville idéalisée en utilisant différents codes CFD ; ce document est soumis à la session extraordinaire de HARMO11. COST 732 est adressé pour l'assurance de l'amélioration et de la qualité du micro obstacle échelle pouvant accueillir des modèles météorologiques et leur application à la prédiction des processus d'écoulement et de transport en milieu urbain ou industriel. Silvana Di Sabatino [6] a publié un article sur l'exercice de COST 732 sur la pratique (l'évaluation de l'exercice MUST). Le but de cet article est de décrire l'utilisation d'une méthodologie générale adaptée à l'évaluation des modèles météorologiques micro-échelles appliquées à l'écoulement et des simulations de dispersion dans les zones urbaines. Yongfeng Qu [7] a modélisé les effets radiatifs et convectifs avec une résolution code du bâtiment. Dans de nombreuses études micro météorologiques avec la dynamique des fluides, la construction de la résolution de modèles supposent généralement une atmosphère neutre. Néanmoins, les transferts radiatifs urbains jouent un rôle important en raison de leur influence sur le budget de l'énergie. En 2013 Silvana Di Sabatino [8] a réalisé un travail sur les récents progrès dans la modélisation numérique de l'écoulement et de la dispersion dans les zones urbaines: Un bref examen pour détecter les risques sanitaires associés à l'exposition à des concentrations de polluants dans les villes a motivé la recherche pour améliorer la circulation à l'échelle locale et des modèles numériques de dispersion. La complexité de la forme urbaine introduit un certain nombre de difficultés pour les modélisateurs.

## 2. Présentation du cas étudié

### 2.1. Présentation de l'expérience de MUST

Dans cet article, on s'attachera à présenter la campagne expérimentale MUST réalisée à l'université de Hambourg (Bezpalcova and Harms, [9]) qui servira de cas-test pour la validation de Code CHENSI. Nous insisterons sur les données disponibles, paramètres qui nous permettront de mettre en place les différentes simulations sous Code CHENSI. Le but de la simulation numérique effectuée est d'évaluer les performances du modèle en confrontant les résultats numériques obtenus par ce dernier avec des résultats expérimentaux obtenus après l'étude de la dispersion d'un scalaire passif en milieu urbain simplifié et de comparer les performances globales à celles obtenues par le biais d'autres codes européens.

### 2.2 Description de la campagne de mesures

Un exercice numérique détaillé est basé sur la configuration de MUST (Mock Urban Setting Test). L'ensemble des données réalisées par les participants de l'action COST 732 Le MUST (Mock Urban Setting Test) était une

campagne de mesure à grande échelle sur un arrangement de conteneurs de 40 pieds dans l'Utah comme décrit par Yee et Biltoft, [10]. Les essais en soufflerie de la même disposition ont été effectués à Hambourg (Leitl et al., [11]). Les modèles numériques utilisés dans cette étude ont été comparés à ceux de COST 732 qui font partie de CHENSI. Dans les simulations entreprises, nous avons opté pour le code CHENSI en utilisant la même grille de calcul afin d'améliorer le modèle décrit dans la section précédente ayant contribué à l'amélioration des résultats de simulation. Comme le montre la figure 1, l'expérience à grande échelle (1 :75) en soufflerie est constituée de 120 obstacles. Les conditions d'écoulement d'approche dans la soufflerie ont été ajustées pour répondre à l'écoulement d'approche mesurée en pleine échelle pour le cas où l'incidence du vent est à  $-45^\circ$ .



Dimensions des obstacles	
Hauteur	2.54 m
longueur	12.2 m
largeur	2.42 m
Espacement entre lignes	12.9 m
Espacement entre rangées	7.9 m
Aire de la grille	(100 mX100 m)

**Figure 1:** Situation pour MUST expérience du tunnel du vent de l'Université de Hambourg (Bezpalcova and Harms, [9]).

### 2.3 Données expérimentales disponibles

#### 2.3.1 Données mesurées

La campagne expérimentale réalisée par les participants de COST 732. Le MUST (Mock Urban Setting Test) était une campagne de mesure à grande échelle sur un arrangement de conteneurs de 40 pieds dans l'Utah comme décrit par Yee et Biltoft, [10]. Les essais en soufflerie de la même disposition ont été effectués à Hambourg (Leitl et al., [11]). Différentes sources de données sont disponibles dans la littérature scientifique, sans pour autant arriver à un véritable consensus. Pour l'étude présentée, nous utiliserons les données de (Olesen et Berkowicz, [12]).

#### 2.3.2 Données interprétées

Un nombre très élevé d'exploitations a été réalisé de ces jeux de données, en particulier l'importance de ces données turbulentes dans les conditions aux limites du modèle Code CHENSI. Les données issues de (Olesen et Berkowicz, [12]) seront exploitées ainsi que celles que nous avons obtenues par une méthode itérative, basée sur les gradients de vitesse, l'énergie cinétique turbulente et concentration. Les données mesurées et interprétées utilisées pour la mise en place des simulations Code CHENSI sont regroupées dans les résultats finaux.

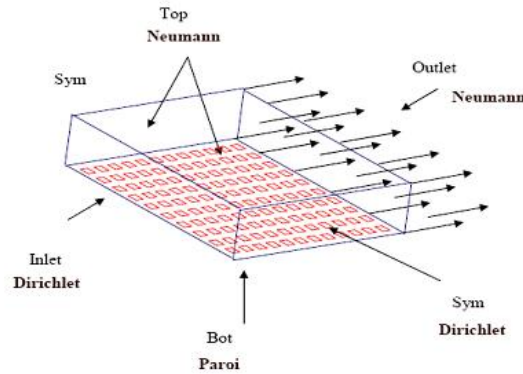
#### 2.3.3. Conditions de rejet

Pour toutes les expériences Prairie Grass modélisées, on considèrera dans la suite de l'étude une vitesse de rejet ainsi que des paramètres turbulents ( $k$ ,  $\epsilon$ ), correspondant à un rejet passif sans effet d'écoulement. Le débit massique rejeté sera adapté selon les conditions expérimentales propres à chaque cas.

#### 2.3.4. Les conditions aux limites et initiales

Fixer des conditions aux limites et initiales est fondamental dans le processus de modélisation numérique, elles alimentent les calculs, à l'instant initial et tout au long de la période de simulation. Les conditions aux limites sur les variables principales diffèrent selon les frontières du domaine considéré comme le montre la figure 2. Les conditions aux limites latérales sont fixées par la direction du vent. Pour le cas du vent à incidence  $-45^\circ$  décrit à

la figure 2, sur la face d'entrée [plan (y-z) pour lequel  $x = 0$ ] et la face de symétrie [plan (x-z) pour lequel  $y = 0$ ], la condition de Dirichlet a été imposée pour le profil de vitesse d'entrée pour l'énergie cinétique turbulente. Au niveau du sol, les conditions classiques à la paroi ont été utilisées, et pour les autres faces, la condition de Neumann a été imposée.



**Figure 2:** Conditions aux limites pour le cas d'incidence à  $-45^\circ$  cas implémentées dans le code\_CHENSI.

### 2.3.5. Description du code de calcul CHENSI

CHENSI est un code de mécanique des fluides 3D, incompressible, turbulent, mais, avec prise en compte des effets de flottabilité. Il a été procédé à un calcul sur un volume fluide parallélépipédique avec un maillage cartésien ( $x, y, z$ ) avec une masse volumique constante, fonction uniquement de l'altitude. La résolution est explicite en temps et en espace. La version que nous avons adoptée est celle qui a été développée par Jean François Sini [13]. La validation des résultats de simulation du code de calcul des écoulements turbulents a été réalisée à l'échelle d'un quartier urbain. Le code de calcul 3D, nommé CHENSI, est destiné à résoudre le système elliptique et instationnaire des équations dynamique et thermique dans une géométrie complexe. Un modèle de turbulence de type  $k-\epsilon$  standard est utilisé. La validation du code a porté sur l'épanouissement d'un jet non-portant, sur l'écoulement isotherme au-dessus d'une marche descendante et sur le développement d'une couche limite thermique au-dessus d'une plaque plane non-uniformément chauffée.[ 14, 15]. Le code est utilisé pour la simulation des écoulements turbulents dans une rue canyon où le vent au-dessus des toits est perpendiculaire à l'axe de la rue. [16].

### 2.3.6. Paramètres de calculs

Certains paramètres ou propriétés physiques sont introduits par défaut dans le code\_CHENSI. Nous ne citerons ici que ceux qui peuvent influencer notre étude de validation du modèle. Par défaut, l'atmosphère est caractérisée par une pression de référence  $P_0 = 1013.25$  Pa, une température de référence  $T_0 = 288.15$  °K et un débit massique  $Q = 1.66 \cdot 10^{-6}$  kg/s. Ce débit massique est aussi celui imposé au traceur passif. L'humidité de l'atmosphère n'étant pas un paramètre influent sur notre étude, nous considérerons son effet nul.

### 2.3.7. Aspects numériques

La résolution de l'écoulement est menée et décrite par les équations en instationnaire, sur un nombre d'itérations suffisant pour satisfaire la convergence temporelle des calculs. De ce fait, les simulations effectuées compteront généralement 50000 itérations pour un nombre égal à 1761110 noeuds, au total, variable en temps et en espace, d'environ 1s pour l'itération. La durée totale d'une simulation,est de l'ordre de 15heurs 30 minutes, sera cependant réduite par la parallélisations des calculs sur plusieurs processeurs.

2.3.8. Description le modèle K-ε

Les équations de Navier-Stokes Reynolds régissant le mouvement des écoulements turbulents peuvent être écrites sous la forme suivante:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \left( \frac{\rho - \rho_n}{\rho_n} \right) g_i - \frac{1}{\rho_n} \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + U_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = - \frac{\partial \overline{u_i \theta}}{\partial x_j} \quad (3)$$

Où les  $x_i$  sont les coordonnées cartésiennes,  $U_i$  les composantes de la vitesse moyenne,  $g_i$  les composantes de l'accélération de la pesanteur,  $P$  la pression moyenne,  $\theta$  l'écart de température moyenne à partir d'un état de référence adiabatique,  $u_i$  et  $\theta$  les fluctuations des composantes de la vitesse et de la température autour de leurs moyennes,  $\overline{u_i u_j}$  le tenseur de Reynolds et  $\overline{u_j \theta}$  le flux de chaleur turbulent. L'indice  $n$  se réfère à l'état de référence aérostatique et adiabatique.

L'équation de transport pour la concentration moyenne  $C$  d'un polluant passif s'écrit comme suit:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = - \frac{\partial \overline{u_j C}}{\partial x_j} \quad (4)$$

Où  $\overline{u_j C}$  est la concentration du flux turbulent. Les flux sont toujours complètement turbulents les conditions de transport moléculaire sont négligées car ils sont de petite taille lorsqu'on les compare aux termes correspondants de transport diffusif turbulent.

L'écart de densité ( $\rho - \rho_n$ ) citée dans l'équation (1) est lié à la température grâce à l'équation linéaire suivante:

$$\frac{\rho - \rho_n}{\rho_n} = - \beta (\theta - \theta_n) \quad (5)$$

Où  $\beta$  désigne le coefficient de dilatation thermique qui peut être supposé constant avec une bonne approximation pour les cas avec des plages de températures limitées. Pour résoudre les équations d'écoulement moyen, nous avons introduit un modèle de turbulence de premier ordre pour exprimer les flux turbulents inconnus. La Reynolds contrainte  $\overline{u_i u_j}$ , le flux de chaleur  $\overline{u_j \theta}$  et la concentration de flux  $\overline{u_j C}$  sont estimés au moyen de la viscosité turbulente du Boussinesq et des modèles de diffusivité de Foucault:

$$\overline{u_i u_j} = \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (6)$$

$$- \overline{u_j \theta} = K_t \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$- \overline{u_j C} = K_c \frac{\partial C}{\partial x_j} \quad (8)$$

Où  $\nu_t$  est la viscosité turbulente,  $\delta_{ij}$  est le delta Kronecker,  $k$  est l'énergie cinétique turbulente et  $K_t$  et  $K_c$  sont les coefficients de diffusivité turbulente. Les expériences indiquent que  $\nu_t$ ,  $K_t$  et  $K_c$  ne sont pas constantes mais varient dans un flux et d'un flux à l'autre et que leurs rapports, le nombre de Prandtl turbulent  $P_{rt} = \nu_t / K_t$  et le nombre Schmidt turbulent  $S_{ct} = \nu_t / K_c$ , sont à peu près constants. Par conséquent, le problème de fermeture est réduit afin de déterminer la répartition des ans. Il peut être empiriquement lié à deux paramètres qui sont supposés pour caractériser l'état local de la turbulence: une échelle de vitesse et une échelle de longueur. Le modèle à deux équations la plus utilisée est celle de Launder et al., [17]. Se référer à l'énergie cinétique turbulente  $k$  et son  $\epsilon$  taux de dissipation pour exprimer l'échelle de vitesse de turbulence  $k^{1/2}$  et l'échelle de longueur de turbulence  $k^{3/2} \epsilon^{-1}$ . Ceci permet la formulation de la viscosité turbulente comme suit:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (9)$$

Où  $C$  est une constante empirique. Le tableau suivant donne les différentes valeurs des constantes du modèle k-ε.

**Tableau 1 :** Constantes pour le modèle k-ε.

$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$P_{r1}$	$S_{ct}$
0.09	1.0	1.3	1.44	1.92	0.7	0.9

L'énergie cinétique turbulente (k) et son taux de dissipation (ε) sont calculés à partir des équations de transport semi-empiriques suivantes (Hanjalic et Launder [18]):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta g_j \overline{u_j \theta} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \epsilon \quad (10)$$

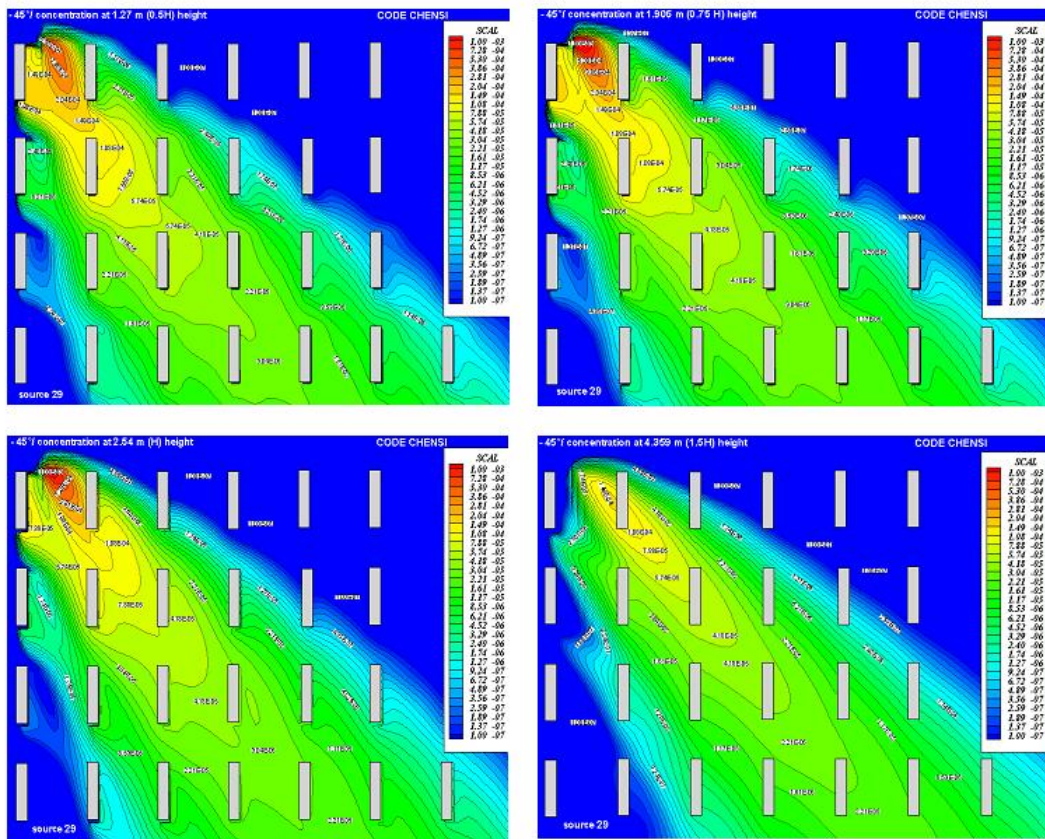
$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = -C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \beta g_j \overline{u_i \theta} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (11)$$

Dans les présentes simulations, les constantes de modélisation empiriques dont les valeurs les plus couramment utilisées dans les simulations de flux industriels, sont énumérés dans le tableau 1 (voir, par exemple, Launder et Spalding, [19] et Launder et al.,[17]).

### 3. Resultats et discussion

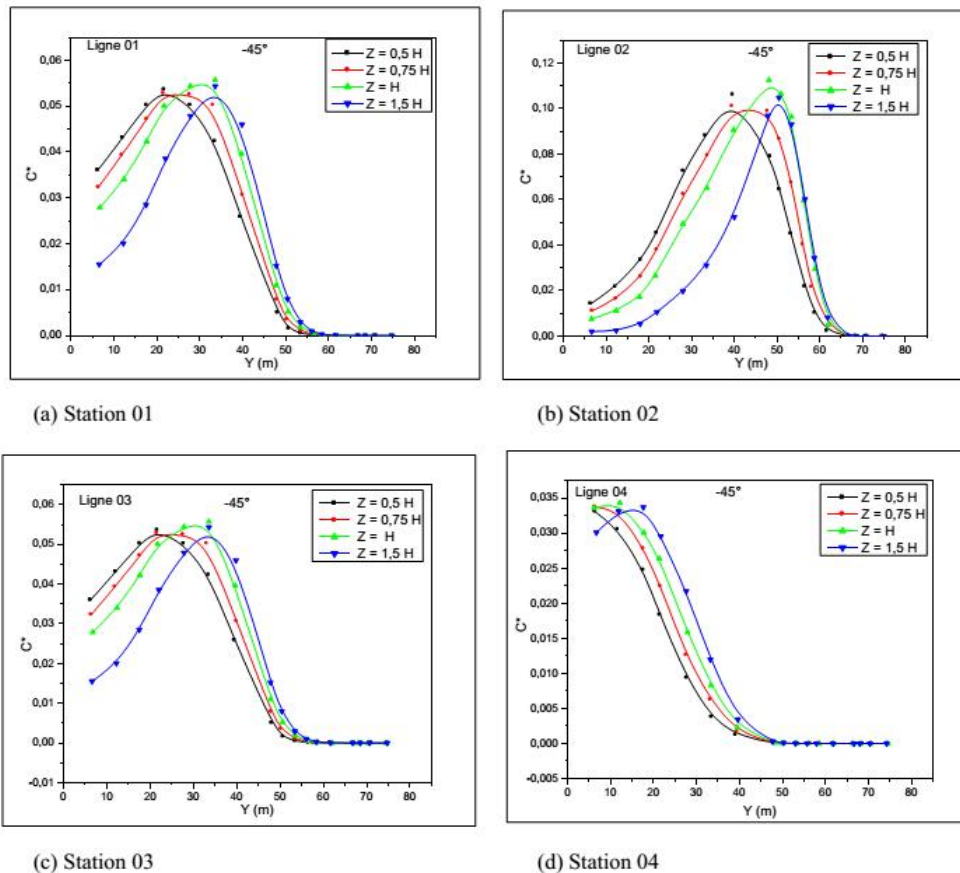
#### 3.1. Variations de concentration

Dans la figure 3 sont présentées des coupes de champs de concentrations moyennes sur un plan horizontal à quatre hauteurs différentes ( $z = 0,5 H$ ,  $z = 0,75 H$ ,  $z = H$  et  $z = 1,5 H$  avec  $H = 2.5 m$ ) pour un angle d'incidence du vent à  $-45^\circ$ .



**Figure 3:** Comparaison des distributions de concentration à quatre niveaux de hauteur [1,27 m (0,5 H), 1.905m (0,75H), 2.54m (H) et 4.359m (1,5 H)] pour le cas  $-45^\circ$ .

Les concentrations moyennes proches de la source diminuent rapidement, par rapport l'autre hauteur, après deux rangs, les concentrations moyennes diminuent plus rapidement. Ainsi, au moment où le panache des concentrations moyennes agrandit, ces dernières sont plus homogènes et le gradient diminue. La forme longitudinale des obstacles entraîne une déviation de l'axe de la plume par rapport à la direction du vent, lorsque l'angle du vent incident est suffisamment grand, le polluant est transporté par l'écoulement dans les rues perpendiculaires. La figure 4 représente les profils de concentration du polluant (éthane  $CH_4$ ) pour le cas  $-45^\circ$  pour les quatre stations, on voit que la concentration de l'éthane augmente en passant de la station 1 (située juste en amont de la source) vers la station 2 (située en aval de la source), les concentrations maximales se déplacent alors vers une position où la valeur de  $y$  est plus grande. Pour les stations suivantes, la valeur de la concentration maximale diminue de plus en plus en s'éloignant de la source d'émission, alors que la valeur de  $y$  correspondant à la concentration maximale reste sans changement, plus on se déplace vers le haut, plus la concentration diminue, mais la différence de concentration entre les trois hauteurs en chaque station diminue en s'éloignant de la source.



**Figure 4:** Profils horizontaux des concentrations en quatre niveaux de hauteur [1,27 m (0,5 H), 1,905m (0,75H), 2,54m (H) et 4,359m (1,5 H)] pour le cas  $-45^\circ$ .

Dans la figure 5 sont représentés les profils adimensionnels de concentrations ( $C^*$ ) pour le cas d'incidence à  $-45^\circ$ , ceux calculés par le code CHENSI et les profils expérimentaux issus de [9]. Sur les profils adimensionnels de

concentrations ( $C^*$ ), on constate une bonne concordance entre le profil expérimental et celui obtenu par calcul numérique par le code CHENSI ; d'autre part, les profils expérimentaux représentés dans la figure 5 donnent un aperçu d'évaluation assez remarquable. La taille des valeurs des concentrations moyenne indique que les profils de code CHENSI par rapport à ceux d'expérimentation donnent des valeurs beaucoup plus faibles.

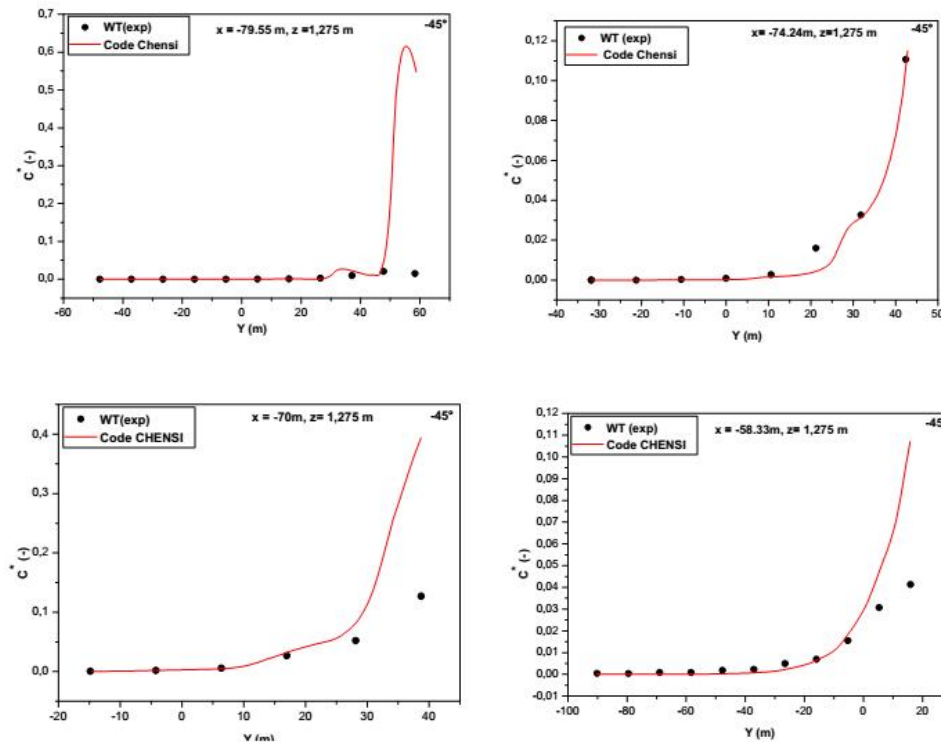


Figure 5: Profils de concentration le long de la direction y avec  $z = 1.275\text{m}$ .

### 3.2. Champ de concentration à $-45^\circ$

Les concentrations normalisées indiquées ci-après sont définies comme suit:

$$C^* = \frac{C U_{\text{ref}} H^2}{Q} \quad (12)$$

Avec  $C$  désignant concentration mesurée ou simulée,  $U_{\text{ref}}$  la vitesse d'entrée prise à la hauteur du contenant  $H$  et  $Q$  le débit massique de la source.

On montre dans la figure 6 la configuration du cas de dispersion à  $-45^\circ$ . Dans le tunnel du vent, la source a été placée au niveau du sol, tandis que les mesures de concentration ont été effectuées à une hauteur de  $1,275\text{ m}$ . Bien que le filet de moniteurs à première vue semble dense, la rareté des moniteurs est un problème lorsque les résultats sont interprétés. La figure 7 illustre la difficulté de comparer les données obtenues par mesure et les résultats de la modélisation. Les comparaisons point par point ne portent aucune information. Pour chaque point, la valeur mesurée est comparée à celle modélisée au niveau du point de la grille la plus proche de la modélisation. Ce sera normalement un point de l'extérieur des bâtiments, à moins que la grille ait été choisie avec trop faible résolution. Cependant, pour certains modèles, les données ont été interpolées à partir des points de mesure et

réutilisées. En raison de la discontinuité dans les murs du bâtiment (voir par exemple la figure 7), comme l'interpolation est onéreuse et nécessite des soins si elle ne doit pas produire des valeurs erronées. La figure 8 montre un nuage de points assez typique de modèle en fonction des concentrations mesurées pour tous les points (271 points). Malgré, les mauvaises prédictions évidentes pour certaines des concentrations élevées (proches de la source), de nombreux points à faibles concentration où le modèle s'adapte assez bien (les points sont éloignés de la source). Les valeurs constatées sont inférieures à la valeur du seuil, ceci n'était pas difficile à prévoir, pour obtenir des résultats de dispersion pour le cas de MUST avec le vent moyen à  $-45^\circ$  angle de l'orientation de l'obstacle nous avons suggéré que la direction du panache soit la même pour les particules à des hauteurs inférieures et supérieures à la hauteur de l'obstacle. L'observation a montré un cisaillement important. Il sera intéressant de voir les résultats de notre comparaison des simulations du modèle avec les observations.

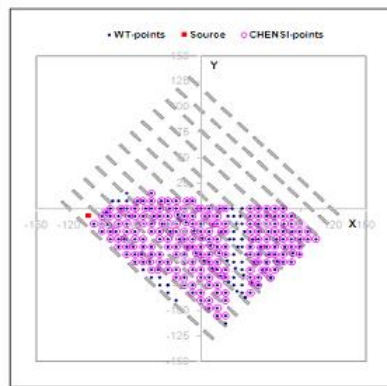


Figure 6: Le domaine de calcul est de gauche. Les moniteurs sont situés à points bleus, la source au rouge.

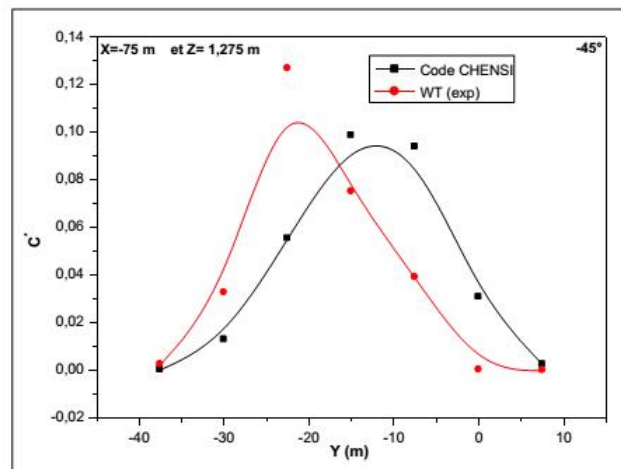
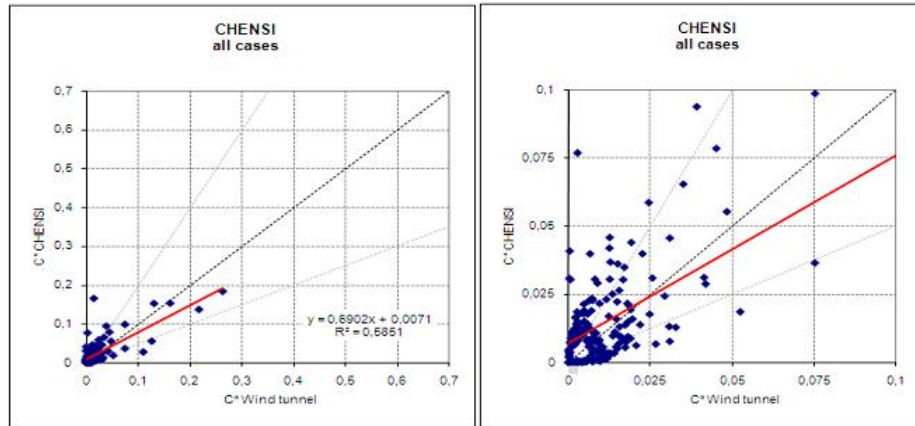


Figure 7: Profils des concentrations en coupe à 18 m de la source.

Les tailles statistiques présentées dans la figure 7. Au total, similaires aux résultats de concentration moyenne, le modèle prédit les observations très bien ( $R^2 = 58\%$ ).



**Figure 8:** Les diagrammes de dispersion des concentrations pour le code CHENSI comme expliqué par (Olesen et Berkowicz, [12]).

FTIR spectroscopy is useful in probing the chemical composition of the surface of the silver nanoparticles and the

### Conclusions

La présente étude a été consacrée à la simulation numérique de la circulation de l'air dans une rue canyon et sur la dispersion des polluants d'un traceur passif. Des simulations numériques pour la prédiction du vent et la dispersion des polluants en milieu urbain simplifié ont été menées à travers le code de calcul CHENSI.

Les simulations du cas de validation de MUST utilisant CHENSI avec schémas numériques révisées ont donné des améliorations dans les deux mesures de validation d'écoulement et de dispersion. Les principales caractéristiques d'écoulement sont bien résolues, résultant dans un champ de concentration avec des valeurs métriques près ou au-dessus de la limite d'acceptation. Les petites structures à proximité des conteneurs ne s'affichent pas correctement, ce qui est une observation générale dans les modèles RANS testé dans le MUST exercice COST 732. C'est ce qui explique les mesures n'ayant pas beaucoup de composants latéraux et verticaux de vitesse. Les utilisateurs du modèle sont invités à utiliser les programmes révisés, une grille de calcul bien et prendre soin de définir le bon choix des paramètres du modèle, par exemple le profil de turbulence entrée, car ils peuvent influencer remarquablement sur les résultats d'ensemble. L'ensemble des données de MUST a été fourni par l'Agence de réduction de la menace de la Défense (DTRA) pour une utilisation dans COST732.

Cette étude a permis de mettre en évidence l'influence de la canopée sur la dispersion. L'effet moyen sur la dispersion se traduit par une déviation de l'axe du panache par rapport à la direction du vent incident, due à l'acheminement du polluant à travers les rues parallèles aux deux directions x et y. Les résultats du modèle sont en bonne adéquation avec les mesures de l'expérience MUST pour la dispersion pour le cas  $-45^\circ$ . Il peut être conclu que l'angle d'incidence est un facteur très important dans la dispersion des polluants, puisque son changement a une influence sur la vitesse et sur le taux de turbulence et par conséquent sur la dispersion. L'écoulement avec un angle d'incidence de  $-45^\circ$  avait pour conséquence de minimiser la zone de recirculation qui se déplace aux cotés inférieurs. Remarquable puisque cette orientation conduit à une augmentation du mouvement donc l'état de turbulence d'une part et d'une autre part les obstacles favorisent le transport et la dispersion de l'énergie cinétique turbulente.

**Remerciements** -Les calculs numériques ont été réalisées sur les supercalculateurs du centre de calcul national CNRS. Prise en charge complète de l'ordinateur a été donnée par le Conseil scientifique de l'Institut de Développement et de Recherche pour l'Informatique Scientifique (IDRIS), Orsay, France.

## Références

1. Murakarmi S., Hibi, K., Mochiba, A., *J. of Arch. Plam Environ. Engrg. AIJ*, (1990) 1-10.
2. Baetke F., WERNER, H., WENGLER, H., *J. wind Eng. and Industrial Aerodyn*, 35 (1990) 129-147.
3. Castro I.P., Robins A.G., *J. Fluid Mech.*, 79 (1977) 307-335.
4. Xiaomin X., Zhen H., Jia-song W., *Atmospheric Environment*, 39 (2005) 4519-4530
5. Goricsán, I., et al., *Int. J. Environ. Pollut.* 44 (2011) 359-367.
6. Di Sabatino, S., et al., *Int. J. Environ. Pollut.* 44 (2011) 403-418.
7. Qu, Y., et al., *Journal of applied meteorology and climatology*, 2011. **50**(8): p. 1713-1724.
8. Di Sabatino, S., R. Buccolieri, and P. Salizzoni, *Int. J. Environ. Pollut.* 52 (2013) 172-191.
9. Bezpalcova K., Harms F., EWTL Data Report/ Part I, *Center for Marine and Atmospheric Research University of Hamburg* (2005).
10. Yee E. , Biltoft C. A.. *Boundary-layer Meteorol.* 111 (2004) 365- 415.
11. Leiti B., Bezpalcova K., Harms F., *11th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Cambridge, UK, July 2-5. (2007).*
12. Olesen H.R., Berkowicz R.B., Lofstrom P., *OML: Review of model formulation. National Environmental Research Institute, Denmark. NERI Technical Report.* 609 (2007) 130.
13. Sini, J-F., Anquetin, S. Et Mestayer, P.. *Atmos. Environ.*, 15 (1996) 2659-2677.
14. Louka, P., G. Vachon, et al.. *Water, air and soil pollution: Focus* 2(5-6) (2002) 351-364.
15. Dimitrova, R., J.-F. Sini, et al..*Boundary-Layer Meteorology* 131 (2009) 223-243.
16. Medjahed, B., M. Abidat, et al.. MATEC Web of Conferences, EDP Sciences.11 (2014) 02-05.
17. Launder B. E., Reynolds W. C., Rodi W., Mathieu J. and Jeandel D.. *Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France.* 56 (1984).
18. Hanjfilic R. and Launder B. E.. *J. Fluid Mech.* 52 (1972) 609-638.
19. Launder B. E. and Spalding D. B. *Comput. Meth. Appl. Mech. Engng* 3 (1974) 269-289.

(2016) ; <http://www.jmaterenvirosnci.com/>

---

---

### **Annexe 5: Article 04**

**MEDJAHED Bendida, NAILI Said, BOUZIT MOHAMED**, Experimental Study of the impact of pollutants on air quality in the Urban city, *Journal of Materials and Environmental Science JMES*, Volume.8, N° 1. (2017) **(Publication International cite par SCOPUS)**.



## Experimental Study of the impact of pollutants on air quality in the Urban city

**B. Medjahed<sup>a\*</sup>, S. Naili<sup>c</sup>, M. Bouzit<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>Laboratory of Numerical and Experimental Modeling of Mechanical phenomena, University of Abdelhamid Ibn Badis, Faculty of Science and Technology, Mostaganem, Algeria

<sup>b</sup>Laboratory of Applied Mechanics; University Of Science and Technology of Oran, Faculty of Mechanical Engineering, BP. 1505 El-Mnaouar, Oran, Algeria.

<sup>c</sup> University Of Science and Technology of Oran, Faculty of Chemistry, Department of Chemical Engineering, Oran, Algeria.

Received 19 Jun 2016, Revised 31 Aug 2016, Accepted 03 Sep 2016

\*Corresponding author. E-mail: [madepodim2006@yahoo.fr](mailto:madepodim2006@yahoo.fr); Phone: +2136 6 142 6640

### Abstract

The main purpose of this experimental study was the effect of the pollutants on air quality in the Arzew city generated by the petrochemical industrial. Sources from the management of environmental Oran, argue that the industrial zone of Arzew, on the hazardous area classification, will be subject to ongoing monitoring of the activities of its production units to reduce its rate of pollution using different techniques or by equipping plants of a refinery to reduce the toxic gas emission levels in the air. In an integrated management approach to the environment and sustainable development of the Industrial Platform, the approach of Sonatrach for the control of air quality and monitoring of air pollution is:

- set up a mobile laboratory to be installed in the perimeter of the study area but outside industrial units.
- This will allow for spot measurements in real time on a wide range of analyzers, quality and quantity of pollutants and dust samples.

*Keywords:* Air quality, PM10, concentration, industrial zone.

### 1. Introduction

In this work we treat the control of air pollution and the improving of its quality breathed is mainly on the base of the impact of pollutants on human health and the environment of the industrial area of Arzew in Algeria. In other research, the study investigated the pollutant emissions of filling stations and the impact they cause to the air quality by U. C. Okonkwo and al. [1] and Buntić, N. and al. [2], show the dependence of air pollution levels upon traffic density and seasons. Considering the level of air pollution relative to the regulated, limited and tolerated values, the measured 24-hours concentrations of all studied pollutants did not exceed the limited values and tolerated values. The PM10 standard includes particles with a diameter of 10 micrometers or less. Was used because of their small size, particles PM10 can penetrate the deepest part of the lungs, such as the bronchioles or alveoli. Larger particles are generally filtered in the nose and throat via cilia and mucus, but particulate matter smaller than about 10 micrometers, referred as PM10, can settle in the bronchi and lungs and cause health problems. Major concerns for human health from exposure to PM10 include are: the effects on breathing and respiratory systems, damage to lung tissue, cancer, and premature death Li-Shun Lu et al. [3]. Kayode O. Owoade et al [4] conducted a research to determine the chemical compositions and source identification of PM

2.5 and PM 2.5–10 fractions, airborne particulate matter (PM). To this effect the samples were collected from May, 2011 through April, 2012 at three sites: up and downwind and within a scrap iron and steel smelting industry, Ife–Ibadan highway, southwestern Nigeria. Samples of PM 2.5 (fine) and PM 2.5–10 (coarse) were collected on nuclepore polycarbonate filters using a low volume GENT sampler equipped with a stacked filter unit (SFU). Shaadan, N. and al. [5] found useful for air pollution investigation in this study. The findings of the latter imply that the location and background of station, as well as wind speed, seasonal (monsoon) and weekdays–weekend variations play important role in influencing PM 10 anomalies. Several studies done by controlling the impact of pollutants on air quality in industrial areas as the study of José Antonio Adame et al.[6] Maximum daily of 8 h averages for O<sub>3</sub>, daily 90th percentiles for NO, NO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub> and mean daily values for CO were calculated and used to assess the weekend effect by applying three different metrics: weekly evolution, weekend-weekday differences and the average daily difference between weekends and minus workdays. Particulate Matter (PM) has been recognized as a major factor in determining global climate change. As an important component of air pollution, PM has been linked to various adverse health effects, e.g., Gwynn et al., [7]; Pope et al., [8]; Husain et al., [9]; Khan et al., [10]; Kim et al.,[11]; Alam, K et al., [12] as well as having general environmental effects. One can see how oil has played a major role in the advancement of technology in our time. But, just like every other technology, oil discovery has come with some of its disadvantages. One such disadvantage is its negative impact on the earth's biosphere, releasing pollutants and greenhouse gases into the environment and damaging ecosystem through events such as oil spillage [13], increase in NO<sub>x</sub> and PM<sub>10</sub> emission [14, 15].

## 2. Experimental

The effect of the air quality on the Arzew population health indeed he is more difficult, today, to find in the townships of Arzew and Béthioua a family completely saved by the respiratory illnesses. The clouds black and other toxic steams of the complex of the industrial zone that functioned without worrying too much about the effects on the long-term environment conceal the sky of these two localities and pollute the atmosphere of it. For this reason, we have do a the experimental study. The work is to exploit the experimental data obtained by the team of engineers in the industrial area in order to assess experimental study of the effect of the pollutants on air quality in the Arzew city.

### 2.1. Measurement area

The industrial zone in the area of Arzew, Oran, Algeria extends over 12 km along the Bay of Arzew, more than 3500 ha (see figure 1). They are a total of 15 industrial complexes located in this area added to the service units. Cocktail Heavy metals pollution Arzew, NO, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, CO<sub>2</sub>, sulfates, acids, oxides ammoniated, hydrocarbons ....; "Some nights the flames of the torches are very high and black smoke clouds cover the entire region, particularly on our side of Bethouia city. The yellow fumes of ASMIDAL factory are also identifiable. Sometimes it's really hard to breathe, throat and eyes sting you ... and it's always like that; olds, childrens ... are all affected "Ali works as a technician in the area and lives near the area of company housing, he will tell us!" For years they talk about measures to limit the discharge of flue gases, we are still waiting, but we have no choice, we must continue to work "A testimony that it continues to meet and says a lot about the stresses experienced by the inhabitants. However, no reliable and comprehensive study on this is available or has been released to quantify the problem and to determine the quantities of pollutants discharged and released by international standards. In an integrated management approach to the environment and sustainable development of the Industrial Platform, the approach of Sonatrach for the control of air quality and monitoring of air pollution is:

- Set up a mobile laboratory to be installed on the perimeter of the study area but outside industrial units.
- This will allow for spot measurements in real time on a wide range of analyzers, quality and quantity of pollutants and dust samples.

### 2.2 The cabin mobile DRIZ

The DRIZ set up a booth for monitoring the quality of ambient air in the platform of the ARZEW industrial area to measure in real time the quantity and quality of air pollutants emitted by industrial activity. This approach

aims to restore a database on the quality of the air we breathe directed by six-line analyzers that measure the concentration of gaseous pollutants and particulate thirteen in ambient air samples (NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, CO, CO<sub>2</sub> ... .. and dust <10 microns). The precision and the choose of the PM<sub>10</sub> sensor :

- Mass minimum detectable surface:: 6 µg/cm<sup>2</sup>s on one period of 2h.
- Range of measure: 0-100, 0-200, 0-500, 0-1000, 0-2000, 0-5000, 0-10000 µg/m<sup>3</sup>s.



Figure 1: The industrial zone Arzew (Source: Google Earth).

The measurement of the air quality at the Arzew industrial zone will be from measurement conducted by mobile companion cabin. The devices used are automatic analyzers (MP10M, AC32M + CNH<sub>3</sub>, CO12M, HC51M and VOC 71M) see figure 2 left.

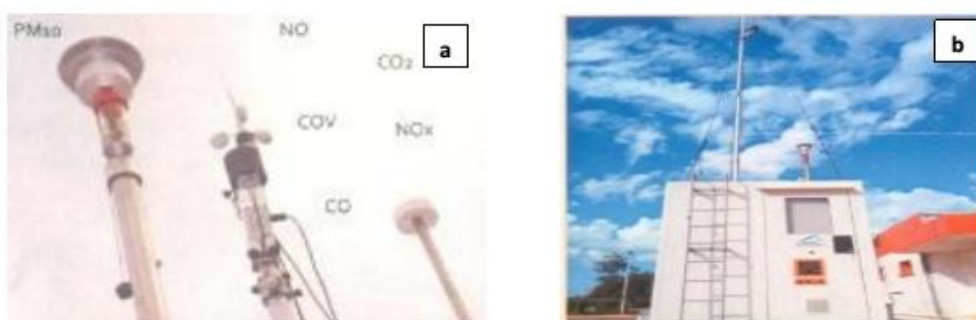


Figure 2: Mobile station (a), sampling heads and meteorological mast (b).

These sampler devices, ambient air to the outside by means of sampling heads (see figure 02 on the right), analyze internally using measurement technology-specific pollutant and provide results according to different formats. The results used are generally average values. The mobile station has been installed in the industrial area of Arzew Sonatrach in the complex.

### 2.3 The effects and influence of Settings Meteorology

If the air quality depends mainly on the emission of pollutants from various sources (transport and industry), it also depends on weather conditions. The topography of a site, climatology (wind speed, wind direction, temperature and humidity) influence the transport, transformation and dispersion of pollutants.

- Speed and wind direction: Turbulence and stability winds effects on transport, dilution and dispersion of pollutants.

- Temperature: alters the chemistry of pollutants: Cold reduces the volatility of some gas while the summer heat is in favor of photochemical ozone. The temperature has an effect on the movement speed and response of the molecules.
- Humidity: Is often a determining factor in the effect of pollutants on the property, vegetation and health. (See table 1)

**Table 1:** Settings Meteorology of daily means the period of 02 to 13 November 2013

Settings Meteorology				
Date	Wind speed (m/s)	Wind Direction deg	Humidity %	Temperature °C
Moy:02/11/2013	1,9	269	58	16,5
Moy:03/11/2013	2,7	264	62	18,8
Moy:04/11/2013	28,3	263	61	18,9
Moy:05/11/2013	32,5	271	67	19,4
Moy:07/11/2013	3,4	219	71	19,4
Moy:11/11/2013	8,5	219	94	35,3
Moy:12/11/2013	6,0	184	67	29,1
Moy:13/11/2013	11,9	166	155	54,0
Moy:16/11/2013	7,6	220	106	38,3
Moy:17/11/2013	10,9	224	150	57,7

### 3. The standards for PM 10 particles in air quality

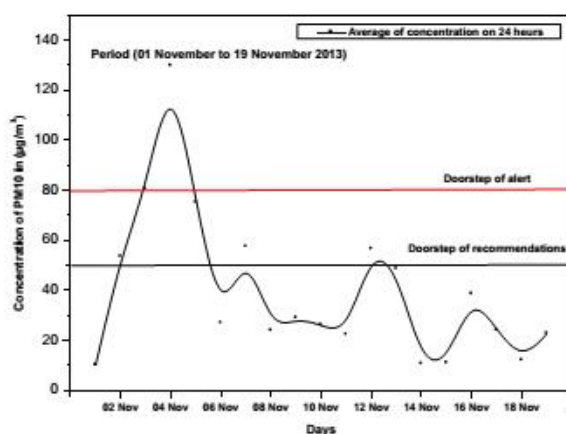
Table 02 below shows the relatives (2013) and (2014) standards for PM10 particles. Due to a short period of action (3 months), the comparison is only possible for short-term regulatory values as the daily limit value and information thresholds and recommendations and alert. The standardss for PM 10 in air quality:

**Table 2:** The relatives2013 standards for PM10 and 2014 (Source: Decree No. 2010-1250 of 21 October 2010 on air quality).

Pollutant	Airborne dust (PM10)
Value limit	Annual average: 40 µg / m <sup>3</sup>
	Daily average: 50 µg / m <sup>3</sup> not to be exceeded more 35 days / year
Quality Objective /	Annual average:
Long-term goal	30 µg / m <sup>3</sup>
Threshold information and recommendation	Averaging over 24 hours slippery:
	50 µg / m <sup>3</sup>
Alert threshold	Averaging over 24 hours slippery:
	80 µg / m <sup>3</sup>

#### 4. Results and discussion

In this article, the measurements of the mobile station are compared to the DRIZ concentrations observed in the industrial Arzew zone. The comparative analysis of average daily profiles (Figure 03 and 08) measured between November 2013 and January 2014 month on the mobile station's DRIZ. Commuter's peaks are, however, somewhat more marked on the Arzew industrial site. The collection of data from the mobile station The DRIZ started from the months November 2013 and the month in January 2014, because it is more often this season than those brief and intense peaks occur, often also the night, so in conditions contrary to the photochemical formation.



**Figure 3:** PM10- exceedance of the information threshold and alert threshold and recommendation on the mobile station (averages 24 hours of months in November 2013).

PM10 peaks due to photochemistry are fairly characteristic, as can be seen in figure 4, 6 and figure 09. These peaks are broad: a period of several hours, the increase in concentration takes place in the morning since it takes enough sunlight, and the decay is very slow. Often, though, when there has been a significant spike, we do not quickly find low. The lowest levels are in the late night, around 6:00 am. The level of concentration of pollutants in the atmosphere above which a short exposure presents a risk to human health from which emergency measures must be taken. The results obtained using the mobile station The DRIZ in the industrial zone of Arzew, will be compared to time standards (information and alert thresholds) because the three measurement periods, only the station DRIZ exceeds the information threshold, warning and recommendations set at  $80 \mu\text{g m}^{-3}$  and has an offset with higher concentrations of the station several hours (Figure 4, 6 and 9). In the mobile station measures the daily limit value set at  $50 \mu\text{g m}^{-3}$  was exceeded in three periods:

The first case observed in the following dates: (November 2, 2013 around 11 hours with a maximum of  $117.8 \mu\text{g m}^{-3}$ , 03 November 2013 to 10 hours with a maximum of  $225 \mu\text{g m}^{-3}$ , 04 November 2013 to 14 hours with a maximum of  $273 \mu\text{g m}^{-3}$ , November 5, 2013 to 16 hours with a maximum of  $137 \mu\text{g m}^{-3}$  and 07 November to 10 hours with a maximum of  $102 \mu\text{g m}^{-3}$ , see figure 05) concerned only simultaneous peak PM10. The only industrial plant in the area being a boiler room (which was run at full speed at this time of year). The second case observed in the following dates: (November 11, 2013 to 12 hours with a maximum of  $41 \mu\text{g m}^{-3}$ , 12 November 2013 to 10 hours with a maximum of  $148 \mu\text{g m}^{-3}$ , 13 November, 2013 around 11 hours with a maximum of  $100.5 \mu\text{g m}^{-3}$ , 16 November 2013 to 14 hours with a maximum of  $148 \mu\text{g m}^{-3}$  and 17 November 2013 to 02 hours with a maximum of  $148 \mu\text{g m}^{-3}$ , see figure 07) involved only a peak of PM10 pollutant. And

the third case observed in the following dates: (January 7, 2014 to 12 hours with a maximum of  $126 \mu\text{g m}^{-3}$ , 08 January 2014 to 12 hours with a maximum of  $69 \mu\text{g m}^{-3}$ , 09 January, 2014 to 10 hours with a maximum  $115 \mu\text{g m}^{-3}$ , January 11, 2014 to 12 hours with a maximum of  $90 \mu\text{g m}^{-3}$  and 13 January 2014 to 20 hours with a maximum of  $71 \mu\text{g m}^{-3}$ , see figure 10) involved only a peak of pollutant PM10.

Finally, the results of seasonal variation in 24-hour concentration of PM10, indicating higher values in winter, could be explained by air pollution from emission sources industrial. The higher values of PM10 concentration in the summer period were probably consequential to the growing number of my resuspended particles due to dry weather and wildfires in this area Toth I. and al. [16-18].

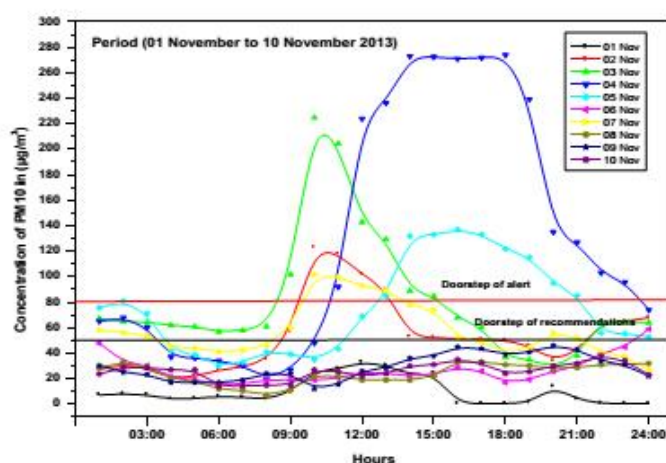


Figure 4: Evolution of daily profiles means the period of 01 to 10 November 2013 PM10 in Arzew.

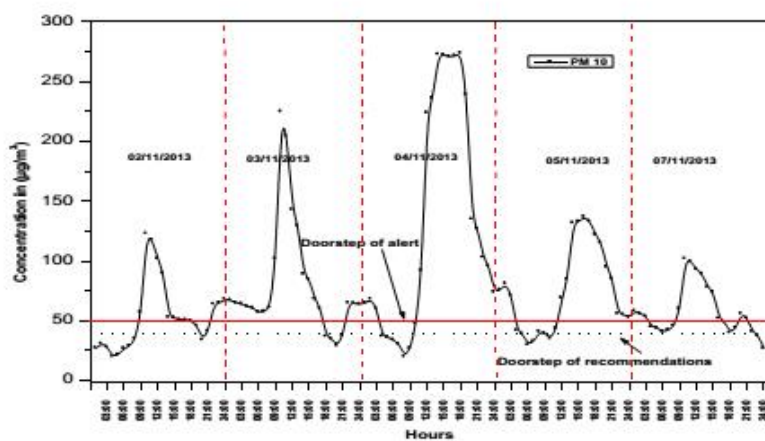


Figure 5: PM10 Arzew peak period of 2 to 7 November 2013.

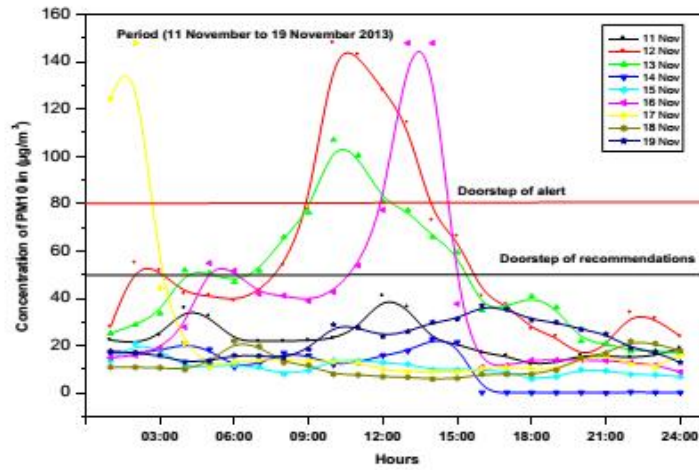


Figure 6: Evolution of daily profiles means PM10 period of 11 to 19 November 2013.

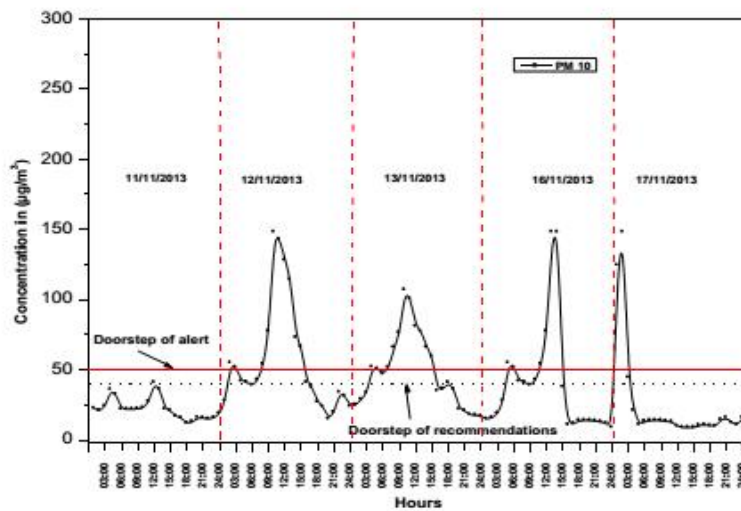


Figure 7: PM10 peak Arzew period of 11 to 17 November 2013.

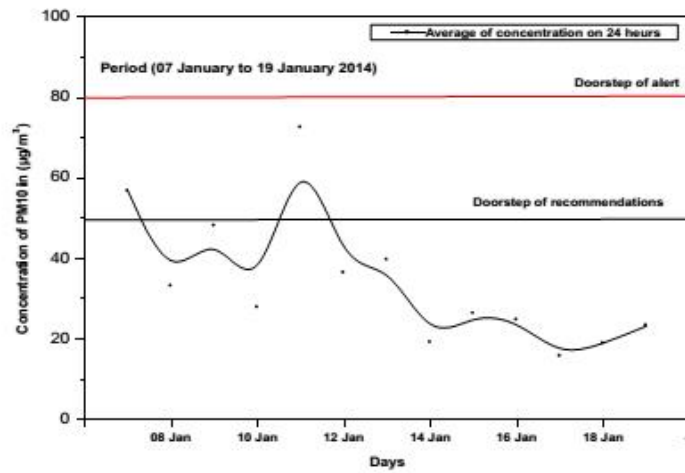


Figure 8: PM10- exceedance of the information threshold and alert threshold and recommendation on the mobile station (averages 24 hours of month January 2014).

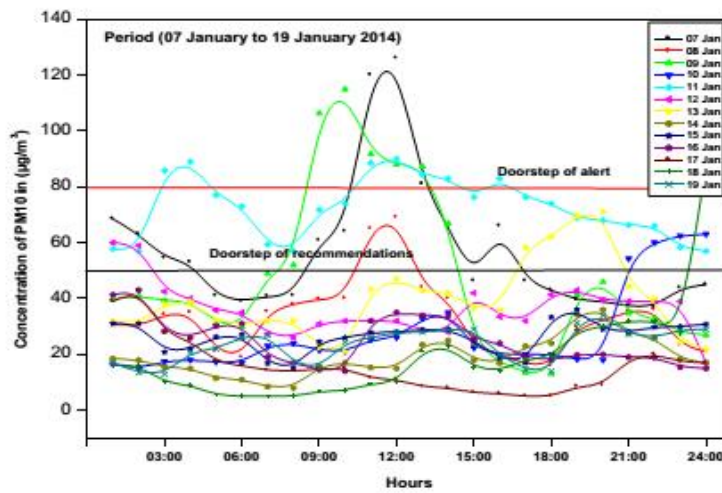
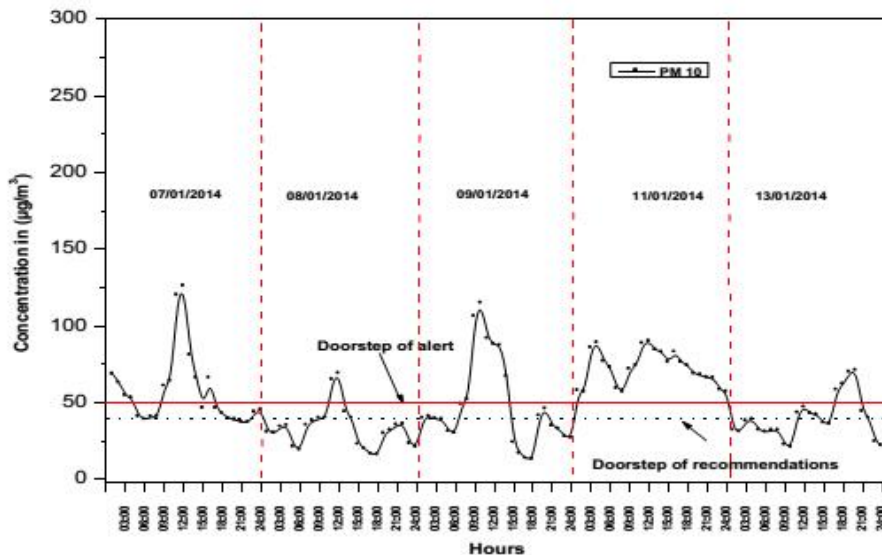


Figure 9: Evolution of daily profiles means PM10 period of 7 to 19 January 2014.



**Figure 10:** PM10 in Arzew peak period from 7 to 13 January 2014.

## Conclusions

The purpose of this work is to take stock of the industrial zone of Arzew in Algeria on city air pollution and health risk, through the results of studies or audits conducted at national level or international. Described successively pollution caused by industries. The results presented in this article provide a first estimate of the impact of pollution on air quality in the Arzew city and the surroundings. A daily concentration of three periods, well beyond the standards. Although these air quality standards have been established for urban pollution. Larger particles are retained by the upper respiratory tract. They are therefore less harmful to health than the finer particles (<10 microns in diameter) which penetrate deeper into the body; then they irritate the lower airways and impair lung function overall. Finally, during the winter, the highest 24-hour air concentrations were recorded for the PM10 pollutant. Lower ozone concentrations were generally observed in winter and during early morning hours, while high ozone levels were typically found in summer and in the afternoon. In the urban area in the City of Arzew the air quality is relatively is not acceptable with occasionally higher concentration of ozone in the summer time, which exceeded the limit and tolerated values.

**Acknowledgments**-Experimental measurements were performed on the mobile station's DRIZ set up a cabin for monitoring the quality of ambient air in the platform of the ARZEW industrial area to measure in real time the quantity and quality of air pollutants issued by industrial activity.

## References

1. Okonkwo U.C., Ijioma I.N., Onwuamaezea I.P., *International Journal of Engineering Transactions C: Aspects*, 28, No. 6, (2015) 949-955.
2. Buntić N., Kraljević T., Talić, S., *Journal of Bulletin of the Chemists and Technologists of Bosnia and Herzegovina* 39 (2012) 7-10.
3. Li-Shun L., Bo-Huei L., Tin-Chi W., *Interactive Qualifying Project, IQP E-project-*, (2006) 050206-144504.
4. Kayode O. O., Philip K. H., Felix S.O., Lasun T. O., Olusegun G. F., Bamidele H. O., Olugbemiga O. J., Muritala A. A., Muniru I. B., *Atmospheric Pollution Research* 06, (2015) 107-119.
5. Shaadan, N., Abdulaziz J., Mohd T. L., Sayang M. D., *Atmospheric Pollution Research (APR)* 06 (2015) 365-375.
6. Adame J. A., Hernández-Ceballos M. Á., Sorribas M., Lozano A., De la Morena B. A., *Aerosol and Air Quality Research*, 14 (2014) 1862-1874.
7. Gwynn R.C., Burnett R.T., Thurston G.D., *Environ. Health Perspect.* 108 (2000) 125-133.
8. Pope C. A., Burnett R.T., Thun M. J., Calle E. E., Krewski D., Ito K., Thurston G.D., *Air Pollution. J. Am. Med. Assoc.* 287 (2002) 1132-1141.
9. Husain, L., Dutkiewicz V.A., Khan A.J., Ghauri B. M., *Atmos. Environ.* Vol 41, (2007) 6872-6883.
10. Khan, M.F., Hirano, K., Masunaga, S., *Atmos. Environ.* 44 (2010) 2646-2657.
11. Kim N.K., Kim Y.P., Kang C.H., *Atmos. Environ.* 45 (2011) 6107-6115.
12. Alam K., Mukhtar A., Shahid I., Blaschke T., Majid H., Rahman S., Khan R., Rahman N., *Aerosol and Air Quality Research*, 14 (2014) 1851-1861.
13. Timothy P.M., *USEPA Publications*, (2006) 23-25.
14. Tabejamaat S., *International Journal of Engineering Transactions B: Application*, 16, No.3 (2003) 301-310.
15. Pirouzpanah V., Sami S. M., Ajabshirchy Y., *International Journal of Engineering Transactions B: Application*, 14 No. 3 (2001) 263-272.
16. Toth I., Hercog P., Peternel R., Vojnikovi B., *Coll. Antropol.* 35 Suppl. 2, (2011) 25-30.
17. Medjahed B. Bouzit M., *International Journal of Applied Engineering Research*.11 (2016) 3192-3198.
18. Medjahed B., Naili S., Bouzit M., *Journal of Materials and Environmental Science.* 7 (2016) 4767-4777.

(2016) ; <http://www.jmaterenvironsci.com/>

---

---

## **Annexe 6: Article 05**

**MEDJAHED Bendida, BOUZIT MOHAMED**, Validation study of the experience Mock Urban Setting Test, *Journal of Materials and Environmental Science JMES*, Volume.8, N° 3. (2017) (**Publication International cite par SCOPUS**).



## Validation study of the experience Mock Urban Setting Test

B. Medjahed<sup>1\*</sup>, M. Bouzit<sup>2</sup>

1. Laboratory of Numerical and Experimental Modeling of Mechanical phenomena, University of Abdelhamid Ibn Badis, Faculty of Science and Technology, Mostaganem, Algeria
2. Laboratory of Applied Mechanics; University Of Science and Technology of Oran, Faculty of Mechanical Engineering, BP. 1505 El-Mnaouar, Oran, Algeria.

Received 20Dec2016,  
Revised 17 Jan 2017,  
Accepted 23Jan 2017

### Keywords

- ✓ Statistics;
- ✓ Concentration;
- ✓ Dispersion;
- ✓ Dynamics;
- ✓ CHENSI code.

L.G Bousiakou  
[madedpodim2006@yahoo.fr](mailto:madedpodim2006@yahoo.fr)  
+213661426640

### Abstract

The study presented in this paper includes a comparison, and a statistical validation. The results that are obtained by a numerical simulation in CHENSI Code are compared with the experimental results that are taken from an experimental wind tunnel study of field experience Mock Urban Setting Test. The wind tunnel measurements within a scaled model (1:75) of that configuration were carried out at the University of Hamburg. We focus only on main wind direction (0° and -45°) which correspond to those cases selected within the COST 732 Action. The work is to exploit the experimental data obtained from the wind tunnel results of the University of Hamburg and those of the numerical simulation. The purpose of this study was to compare and statistical validation of CHENSI code. Numerical results presented in this study in the mean flow field, turbulent kinetic energy and the concentration field. To compare, objectively, the performance of the model with experimental data, statistical indicators proposed by Chang and Hanna [1] were calculated for different measurement points. Note; however, that the model results are in a very good agreement with experimental measurements.

### 1. Introduction

Air pollution is an issue increasingly topical; its control requires first having effective means of forecasting can provide estimates as close as possible to reality. In the particular context of the dispersion of a passive scalar (without consideration of chemical reactions), for a point source and a continuous release. An application example is the study of the impact of an accidental release. The dispersion of pollutants in the layer of urban area is a direct result of the air turbulence: an important characteristic of turbulence is in fact the ability to transport and mix more efficiently. The COST Action 732 provided a model evaluation guidance document, [2], leading model developers through the steps of proper model validation and documentation. On the other hand, the Action also gives recommendations on model set-up for users of micro-meteorological CFD models with a comprehensive Best Practice Guideline [3]. Emphasizing the necessity of applying validation data sets, the Action will recommend and publish several data sets at its ending in 2009. One of them is the Mock Urban Setting Test, which was also extensively investigated in wind tunnel [4], and was already run by a plenty of models during the Action, including also MISKAM 5.01 simulations of Goricsán et al [5]. Summarized results were presented, e.g. by Franke et al [6] and Olesen et al [7]. This article discusses the dispersion of a passive scalar in simplified urban environments. The main objective is the detailed study of the flow and dispersion of pollutants in a city of modeling the mean flow, turbulence and concentration. Numerical simulations were undertaken using a CFD (Computational Fluid Dynamics) model and the code used in our case the calculation is CHENSI code [8, 9]. The simulation shows the case of experimental wind tunnel study of field experience MUST (Mock Urban Setting Test).

## 2. Simulation model

In the present work of the Mock Urban Setting Test (MUST), a total of 120 standard size shipping buildings was set up in a nearly regular array consisting of 12 rows of 10 buildings, covering an area of around 100 by 100 m, and each building has the same dimensions (L=12.2 m, l=2.42 m and H= 2.54 m) as the MUST experiment shipping containers [10, 11].

## 3. CHENSI Code

The objective of this calculation code is to simulate the atmospheric out-flows in the layer limits urban surface. One considers that all obstacles of the layer limit urban are constituted possibly of parallelepipeds rectangles, what drives to consider a Cartesian three-dimensional mesh only, non homogeneous, that is - to say of which the size of the stitches is not constant in each of the three directions.

In this article of presentation, we expose the choices that we did at the time of the development of this code succinctly:

- The model of turbulence adopted: the model of the first order to two equations [12].
- The used numeric model: the method of the volumes finishes with the disposition baffled of the unknowns, also named MAC method (Marker and Cell) [13].
- The coupling speed - pressure solved by the artificial compression method developed by Viecegli [14].
- The conditioning or, in particular, the conditioning in the presence of an inspired partition of the partition law developed by Launder & Spalding [15].
- The discretisation of the different terms and, in particular, the discretisation of the term of advection by the Hybrid diagram of Spalding.

## 4. Statistical Methods Used In Evaluation

The performance measures recommended by (Chang and Hanna [1]), also used in other model evaluations the following statistical performance measures, they include the fractional bias (FB), the normalized mean square error (NMSE) and the fraction of predictions within a factor of two of the observations (FAC2) given in the table, where  $C_o$ ,  $C_p$  and  $C$  are respectively observations, model predictions and the average over the dataset.

**Table 1:** Statistical tools of assessment of a numeric model.

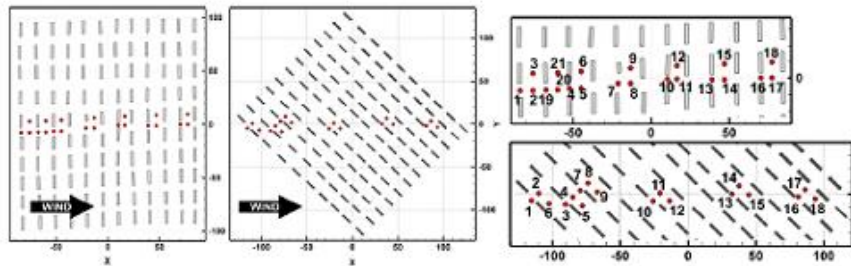
Name	Definition	Model perfects	Acceptable model
FB	$FB = 2 \times \left( \frac{\overline{C_o} - \overline{C_p}}{\overline{C_o} + \overline{C_p}} \right)$	0	-0.3 < FB < 0.3
NMSE	$NMSE = \frac{(\overline{C_o} - \overline{C_p})^2}{\overline{C_o} \times \overline{C_p}}$	0	NMSE < 4
FAC2	$FAC2 = \frac{C_p}{C_o}$	1	FAC2 > 0.5

## 5. Simulation And Analysis

In figure 1 present the vertical profiles of wind and turbulence components are measured locations ('towers') shown. The wind blows from the left.

Top: the 0degree case. The points can be classified into three groups, so Tower 1 represents a 'Narrow Street', Tower 20 a 'Crossing', and Tower 21 a 'Wide Street'.

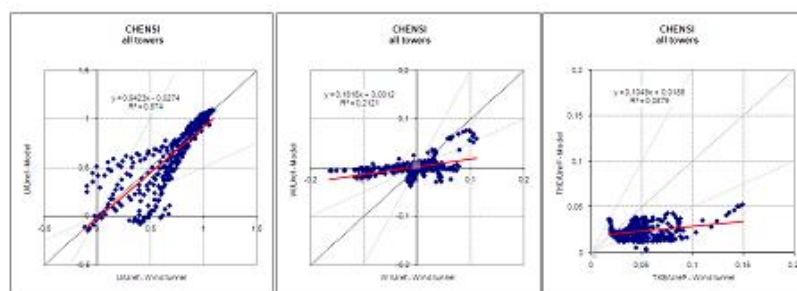
Bottom: the -45degree case. Tower 1 represents a 'Narrow Street', Tower 11 a 'Crossing', and Tower 6 a 'Wide Street'.



**Figure 1:** Layout of measurements and the buildings for the flow cases.

### 5.1 Plots and metrics for the 0 degree flow case

The results underlying the figure should be further examined. In the parameters ( $U/U_{ref}$ ,  $W/W_{ref}$  and  $TKE/U_{ref}^2$ ) Figure 3: shows the same data as Figure 2, but split into three classes of data: "Wide streets", "Crossings", "Narrow Streets". The model appears much less successful in performance of  $u$  for Narrow Streets than for the other locations. Close to the ground the modelled ( $U$ ) comes close to zero, whereas this is not the case for the measured values. The performance measures recommended by Chang and Hanna are fractional bias (FB), normalized mean square error, (NMSE), correlation coefficient ( $R^2$ ) and fraction of predictions within a factor of two of the observations (FAC2), they are presented in Table 2 for the velocity profile of ( $U$ ,  $W$ ) and turbulent kinetic energy (TKE). In figure 2 shows an example, referring to the 0 degree flow case. For one model - in this case CHENSI - information for all towers is summarized. There are 21 towers, with altogether 566 data pairs (Observed, measured) for the parameters ( $U/U_{ref}$ ,  $W/W_{ref}$  and  $TKE/U_{ref}^2$ ). We have computed the corresponding statistical measures (Table 2). As stressed before, CHENSI gives good agreement in  $R^2$  and FAC2, with satisfactory results for vertical with the parameters ( $U/U_{ref}$  and  $TKE/U_{ref}^2$ ) of respectively (FAC2=79% and FAC2=52%) for all towers (21 towers). For NMSE the model gives globally satisfactory results, so much on the speed of wind (with a NMSE = 0.01) that on the turbulent kinetic energy (with a NMSE = 0.99). CHENSI presents a top of the party took fractional (FB=1.09,  $0.72 > 0.3$ ) with the parameter of speed ( $U$ ) accept (FB=0.01 < 0.3).

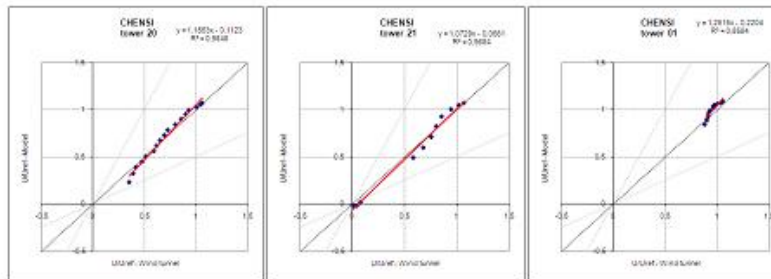


**Figure 2:** Flow, 0 degree case. Scatter plots for velocity components  $U/U_{ref}$  (left),  $W/U_{ref}$  (center) and  $TKE/U_{ref}^2$  (right) for one particular model (CHENSI). The figure is from SavedMetrics\_UVWtke\_45degree\_5Dec07.xls with a filter applied (as explained by Olesen and Berkowicz [7]).

**Table 2:** Statistical measures for the parameters ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  and  $TKE/U_{ref}^2$ ), for all towers simulated (21 towers), 0 degree case.

	0 degree	All towers		
	$R^2$	FB	NMSE	FAC2
$U/U_{ref}$	0.67	0.01	0.01	0.79
$W/U_{ref}$	0.21	1.09	4.31	0.303
$TKE/U_{ref}^2$	0.08	0.72	0.99	0.52

In figure 3 shows an example, referring to the 0 degree flow case. One model - in this case CHENSI - information, but split into 3 classes of data: "Narrow Streets" (Tower 1), "Crossings" (Tower 20), "Wide streets" (Tower 21), cf. Figure 1, with altogether 13 data pairs (Observed, measured) for the parameters ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  and  $TKE/U_{ref}^2$ ). We have computed the corresponding statistical measures (Table 3). As stressed before, CHENSI gives good agreement, with better results for vertical tower T01, T20 and T21 with the parameters ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  and  $TKE/U_{ref}^2$ ) of respectively (FAC2=100%, FAC2=91.7% and FAC2=91.7%) for tower 01 "Narrow Streets", (FAC2=100%, FAC2=58% and FAC2=29%) for tower 20 "Crossings" and (FAC2=72%, FAC2=18% and FAC2=72%) for tower 21 "Wide streets". In table 3, NMSE (normalized mean square error) CHENSI gives globally very satisfactory results, so much on the speed of wind (with a NMSE = 0.002) that of the turbulent kinetic energy (with a NMSE = 0.24), notably on the measures far from the obstacles or above the canopy. In the prismafractionaire, the results exhibit a small over prediction of the observations with the parameter of speed U ( $|FB| < 0.3$ ), but a high over prediction for the parameters of speed (W) and turbulent kinetic energy ( $|FB| > 0.3$ ).



**Figure 3:** Flow, 0 degree case. Same data as Figure 5.2 for the parameters ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  and  $TKE/U_{ref}^2$ ), but split into 3 classes of data: "Narrow Streets" (Tower 1), "Crossings" (Tower 20), "Wide streets" (Tower 21), cf. Figure 1. The figure is from SavedMetrics\_UWtke\_UVWtke\_0degree\_5Dec07.xls with a filter applied (as explained by Olesen and Berkowicz [7]).

**Table 3:** Statistical measures for the parameters ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  and  $TKE/U_{ref}^2$ ), but split into 3 classes of data: "Narrow Streets" (Tower 1), "Crossings" (Tower 20), "Wide streets" (Tower 21), cf. Figure 1, 0 degree case.

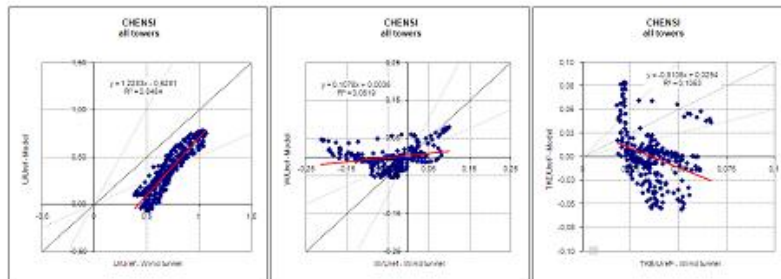
0 degree	Tower 1 (Narrow Street)				Tower 20 (Crossing)				Tower 21 (Wide Street)			
	R <sup>2</sup>	FB	NMSE	FAC2	R <sup>2</sup>	FB	NMSE	FAC2	R <sup>2</sup>	FB	NMSE	FAC2
$U/U_{ref}$	0.85	-0.03	0.002	1	0.98	0.001	0.004	1	0.98	0.02	0.007	0.72
$W/U_{ref}$	00	0.30	0.16	0.917	0.39	0.74	1.08	0.58	0.58	1.19	4.81	0.18
$TKE/U_{ref}^2$	0.58	-0.42	0.24	0.917	0.20	0.72	0.75	0.29	0.17	0.65	0.63	0.72

### 5.2 Plots and metrics for the -45 degree flow case

The results underlying the figure should be further examined. In the parameters ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  and  $TKE/U_{ref}^2$ ) Figure 5: shows the same data as Figure 4, but split into three classes of data: "Wide streets", "Crossings", "Narrow Streets". The model appears much less successful in performance of  $u$  for Narrow Streets than for the other locations. Close to the ground the modelled ( $U/U_{ref}$ ) comes close to zero, whereas this is not the case for the measured values.

The vertical velocity ( $W/U_{ref}$ ) and turbulent kinetic energy ( $TKE/U_{ref}^2$ ), figure 4 shows that the range of modelled values is smaller than the range of measured values. In particular, predicted downward velocities are numerically much smaller than measured. The available material permits one to determine whether this behavior of  $w$  is peculiar to the model examined or whether it is a common feature for many models.

In figure 4 shows an example, referring to the - 45 degree flow case. For one model - in this case CHENSI - information for all towers is summarized. There are 18 towers, with altogether 497 data pairs (Observed, measured) for the parameters ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  and  $TKE/U_{ref}^2$ ). We have computed the corresponding statistical measures (Table 4). In total, similar to the mean velocities and turbulent kinetic energy results, the model predicts the observations well (FAC2=54% to 66%), higher than the limit (50%). Also, there is a small data (NMSE=0.47 to 3.38 < 4) and also presents a high for the fractional bias (FB=0.54 to 0.89 > 0.3). It fulfills obvious for the total measurements of this computer case the quality acceptance criteria well.

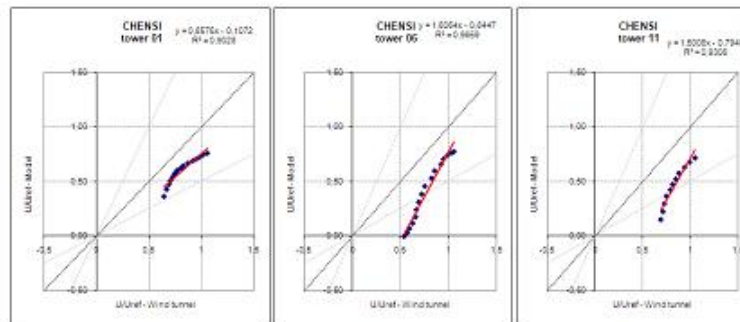


**Figure 4:** Flow, -45 degree case. Scatter plots for velocity components  $U/U_{ref}$  (left),  $W/U_{ref}$  (center) and  $TKE/U_{ref}^2$  (right) for one particular model (CHENSI). The figure is from SavedMetrics\_UVWtke\_45degree\_5Dec07.xls with a filter applied (as explained by Olesen and Berkowicz, [7]).

**Table 4:** Statistical measures for the parameters ( $U/U_{ref}$ ,  $W/W_{ref}$  and  $TKE/U_{ref}^2$ ) for all towers simulated (18 towers), -45 degree case.

	-45 degree	All towers		
	$R^2$	FB	NMSE	FAC2
$U/U_{ref}$	0.84	0.63	0.47	0.54
$W/U_{ref}$	0.06	0.89	3.38	0.37
$TKE/U_{ref}^2$	0.105	0.54	0.51	0.66

In figure 5 shows an example, referring to the - 45 degree flow case. One model - in this case CHENSI - information, but split into 3 classes of data: "Narrow Streets" (Tower 1), "Crossings" (Tower 11), "Wide streets" (Tower 6), cf. Figure 1, with altogether 16 data pairs (Observed, measured) for the parameters ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  and  $TKE/U_{ref}^2$ ). We have computed the corresponding statistical measures (Table 5). The computational case shows good model performance into 3 classes of data: (Narrow Streets, Crossings, Wide streets) for the statistical metrics. As stressed before, CHENSI gives good agreement in a high correlation coefficient ( $R^2=93 >50\%$ ) and especially it also presents a high FAC2 for the tower 1 "Narrow Streets" (100%), tower 11 "Crossings" (100%) and the tower 6 "Wide streets" (75%), higher than the limit (50%). Also the present model exhibits small data for the tower 1 and the tower 6 according to the NMSE. Concerning the FB, the computational results exhibit a small over prediction of the observations for the narrow Streets ( $|FB|=0.19 <0.3$ ), but a rather high over prediction for the crossings ( $|FB|=0.58$  to  $1.67 >0.3$ ) and wide streets ( $|FB|=0.37$  to  $0.62 >0.3$ ).



**Figure 5:** Flow, -45 degree case. Same data as Figure 4 for the parameters ( $U/U_{ref}$ ,  $W/U_{ref}$  and  $TKE/U_{ref}^2$ ), but split into 3 classes of data: "Narrow Streets" (Tower 1), "Crossings" (Tower 11), "Wide streets" (Tower 6), cf. Figure 1. The figure is from SavedMetrics\_UWtke\_UVWtke\_0degree\_5Dec07.xls with a filter applied (as explained by Olesen and Berkowicz [7]).

**Table 5:** Statistical measures for the parameters ( $U/U_{ref}$ ,  $W/W_{ref}$  and  $TKE/U_{ref}^2$ ), but split into 3 classes of data: "Narrow Streets" (Tower 1), "Crossings" (Tower 11), "Wide streets" (Tower 6), cf. Figure 1, -45 degree case.

-45degre	Tower 1 (Narrow Street)				Tower 11 (Crossing)				Tower 06 (Wide Street)			
	R <sup>2</sup>	FB	NMSE	FAC2	R <sup>2</sup>	FB	NMSE	FAC2	R <sup>2</sup>	FB	NMSE	FAC2
$U/U_{ref}$	0.90	0.30	1.06	1	0.93	0.58	0.38	0.63	0.96	0.62	0.47	0.56
$W/U_{ref}$	0.92	0.19	0.059	1	0.81	1.67	13.1	0.09	0.79	-0.5	0.55	0.56
$TKE/U_{ref}^2$	0.52	-0.21	0.05	1	0.49	0.30	0.106	1	0.08	0.37	0.25	0.75

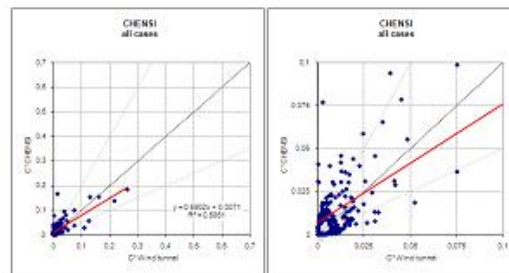
### 5.3 Concentration field at -45°

Normalized concentrations shown in the following are defined as:

$$C^* = C \left( \frac{U_{ref} H^2}{Q} \right) \quad (1)$$

With C: measured or simulated concentration,  $U_{ref}$ : inlet velocity taken at container height H and Q: source strength.

Figure 6 shows a rather typical scatter plot of modelled versus measured concentrations for all measuring points (271). Despite the obvious model-predictions for some high concentrations (close to the source), many points with low concentration values where the model fits fairly well (further away from the source). The observations are below the threshold value, and such values are not so difficult to predict. For dispersion results for the MUST case with the mean wind at -45° angle to the obstacle orientation suggested that the plume direction was the same for the particles at heights below and above the obstacle height. The observation showed a significant shear. It will be interesting to see the results of your comparison of the model simulations to the observations [9, 16]. We calculated in the table 6, the statistical sizes presented in the figure 6. In total, similar to the mean concentration results, the model predicts the observations very well ( $R^2=58\%$ ) and (FAC2=60%). Also, there is a small scatter in the data (NMSE =0.79) and a small over prediction (FB=0.047). It is obvious that the metrics for the total measurements of this computer case fulfill the quality acceptance criteria well. As a conclusion for the concentration standard deviation, the present model shows, in general, a very good behavior, especially near the source where the travel time effect is stronger.



**Figure 6:** Scatter plots of concentrations for the CHENSI code. The figure is from Saved Metrics\_UVWtke\_45degree\_5Dec07.xls with a filter applied (as explained by Olesen and Berkowicz [7]).

**Table 6:** Statistical measures of concentration for the 26 towers simulated.

	-45°			
	All towers			
	R <sup>2</sup>	FB	NMSE	FAC2
C*	0.58	0.047	0.79	0.60

## 6. Conclusions

According to the results exposed on this paper, the agreement deduced - between the experimental profile and that obtained numerically in the CHENSI code environment is acceptable. The current study was designed to study the wind flow, the dispersion of a passive scalar in simplified urban and validate the results obtained by numerical simulation using the CHENSI code by comparing the results of the experience MUST (Mock Urban Setting Test) on the one hand and the results of wind tunnel simulation miniature conducted at the University of Hamburg. Two angles of incidence of the wind were taken into account to achieve the simulations 0 ° and -45 °. It can be concluded that the angle of incidence is an important factor in the dispersion of pollutants, since the change will influence the speed and the rate of turbulence and consequently on the dispersion. The flow at an angle to minimize the recirculation zone, which moves to the lower sides of incidence of 45°, had resulted. Remarkable, since this orientation leads to an increased movement, thus the state of turbulence and a portion of the other obstacles promote transport and dispersion of turbulent kinetic energy. The simulation of these results is confirmed by experimental measurements (Statistical Validation). Using the method of statistical calculation to better appreciate the results, it has been proven good quality of the latter.

## Acknowledgments

The numerical calculations were carried out on the supercomputers of the CNRS national computing centre. Complete computer support was given by the Scientific Council of Institut de Développement et de Recherche pour l'Informatique Scientifique (IDRIS), Orsay, France.

## References

1. Chang J., Hanna S., *Meteorology and Atmospheric Physics*. 87 (2004) 167–196.
2. Britter R., Schatzmann M., (ED.) (2007), *COST Action 732 -COST Office: Brussels*. (2007) ISBN 3-00-018312-4.
3. Franke J., Hellsten A., Schlünzen H., Carissimo B., (ED.) *Brussels* (2007).
4. Leitl B., Bezpalcova K., Harms F., *Proceedings of the 11th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. (2007) 435-439.
5. Goricsán I., Balczó M., Balogh M., Czáder K., Rákai A., Tonkó C.S., *International Journal of Environment and Pollution, accepted for publication* (2009).
6. Franke J.; Bartzis J. Barmpas F.; Berkowicz R.; Brzozowski K.; Buccolieri R. Carissimo, B.; Costa, A.; Disabatino, S.; Efthimiou, G. Goricsan; I. Hellsten, A. Ketzler, M.; Leitl, B.; Nuterman, R.; Olesen, H.; Polreich, E.; Santiago, J., Tavares R., *Croatian Meteorological Journal* 43(2008) 414-418.
7. Olesen, H.R. Berkowicz, R. *Guide to Excel sheets for MUST experiment* <http://www2.dmu.dk/atmosphericenvironment/Docs/SpreadsheetInfo.pdf>. (2007).
8. Medjahed B., Abidat, M., Jean F.S., *MATEC Web of Conferences, EDP Sciences*. 11 (2014) 02-05.
9. Medjahed B. and Bouzit, M. *J. Mater. Envir. Sci.*, 7 (12) (2016) 4767-4777.
10. Yee E. and Biltoft, C.A., *Boundary-Layer Meteorol.* 111(2004) 363-415.
11. Medjahed B and Bouzit M., *International Journal of Applied Engineering Research*. 11 (2016) 3192-3198.
12. Chen Y., Kim S., *Report NASA-CR-* (1987) 179204.
13. Harlow, F. H & Welch, J. E.: 1965. *Phys. Fluids* 8 (1987) 2182-2182.
14. Vieceilli J.A. *Jornal. Comput. Physics*. 4 (1969) 543-551.
15. Launder B. E. and Spalding D. B., *Comput. Meth. Appl. Mech. Engng.* 3 (1974) 269-289.
16. Medjahed B., Naili S. and Bouzit, M., *J. Mater. Envir. Sci.*, 8 (1) (2017) 144-153.

(2017) ; <http://www.jmaterenvirosci.com/>