



HAL
open science

Numerical simulation of coherent structures in the atmospheric boundary layer above a forest canopy

Dominique Morvan, Konstantin Gavrilov, Gilbert Accary, Dmitry Lyubimov,
Sofiane Méradji

► **To cite this version:**

Dominique Morvan, Konstantin Gavrilov, Gilbert Accary, Dmitry Lyubimov, Sofiane Méradji. Numerical simulation of coherent structures in the atmospheric boundary layer above a forest canopy. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03373485

HAL Id: hal-03373485

<https://hal.science/hal-03373485>

Submitted on 11 Oct 2021

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

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

Simulation numérique des structures cohérentes dans une couche limite turbulente au dessus d'un couvert forestier

K. GAVRILOV^a, D. MORVAN^b, G. ACCARY^c, D. LYUBIMOV^a, S. MERADJI^b

a. Institut Department of Theoretical Physics Perm State University, Perm Russia

b. M2P2 CNRS-Université d'Aix-Marseille, Marseille France

c. Université Saint-Esprit de Kaslik, Jounieh Lebanon

Résumé :

Cette étude concerne le problème de l'interaction entre une couche limite turbulente atmosphérique et un couvert forestier. Les nombreuses études sur le sujet, ont montré que cet écoulement présente plus de similitudes avec une couche de mélange qu'avec un écoulement classique de couche limite. Les simulations numériques 3D (LES), réalisées au dessus d'un couvert forestier homogène, reproduisent correctement les différentes phases de développement de cet écoulement : l'apparition d'une première génération de structures cohérentes résultant du développement d'une instabilité primaire de type Kelvin-Helmholtz, la réorganisation de ces structures par appariement et le développement d'une instabilité secondaire, conduisant à la formation de structures en fer à cheval. L'étude est ensuite généralisée à une configuration hétérogène représentative d'une coupure de combustible ou d'une éclaircie réalisée en bordure ou au cœur d'un massif forestier.

Abstract:

This study deals with the problem of a turbulent atmospheric boundary layer and a forest canopy. Different previously published works, showed that this flow presents more similarities with a mixing layer than with the classical boundary layer flow. The 3D numerical simulations (LES), carried out for a homogeneous canopy, reproduced correctly the various steps of development of this flow: the appearance of a first generation of coherent structures resulting from the development of a primary Kelvin-Helmholtz instability, the reorganization of these structures, by vortex pairing, and the development of a secondary instability, inducing the formation of horse shoe vortices. The study is then generalized to a heterogeneous configuration, representing a fuel break or a clearing at a border or in the heart of a forest.

Mots clefs: Couche limite atmosphérique, Canopée, Simulations des Grosses Structures (LES)

1 Introduction

L'interaction entre un écoulement de type couche limite turbulente avec une canopée est un sujet d'étude qui a de nombreuses applications dans divers problèmes plus ou moins liés à l'environnement tels que l'évaluation des flux de chaleur et de masse entre la couche limite de surface atmosphérique et une forêt, l'impact du vent (et en particulier les rafales) sur une plantation d'arbres, l'effet du vent sur le comportement d'un feu de forêt. Comparée à un écoulement standard de couche limite, la structure de l'écoulement au dessus de la canopée présente plusieurs similitudes avec une couche de mélange [1,2]. La couche de cisaillement résultant de l'action exercée par la présence de la végétation sur l'écoulement, conduit au développement d'une instabilité de type Kelvin-Helmholtz (KH), caractérisée par la formation de structures cohérentes tridimensionnelles en forme de fer à cheval [2,3]. Ce sont ces grosses structures qui sont responsables de la pénétration de rafales au cœur de la canopée, matérialisée par la mise en mouvement ondulatoire de la végétation dans le sens longitudinale, répertoriée sous le terme (d'origine japonaise) « honami » dans la littérature [4].

Cette étude numérique, basée sur une approche de type simulation des grosses structures (LES), a permis de reproduire les principales caractéristiques de ce type d'écoulement, aussi bien en configuration homogène (strate arborée continue) qu'en hétérogène (lisière, clairière).

2 Modèle physique et mathématique

En tenant compte des termes additionnels résultant des effets de traînée induit par la présence de la végétation, et une fois filtrées pour éliminer les perturbations dues aux petites structures, les équations du mouvement s'écrivent sous la forme suivante [5] :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \langle u_i \rangle) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \langle u_j \rangle \langle u_i \rangle) = -\frac{\partial \langle P \rangle}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + a_L \rho C_d (\langle u_j \rangle \langle u_j \rangle)^{1/2} \langle u_i \rangle \quad (1)$$

$$\frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

L'effet de la présence de la végétation sur le bilan de quantité de mouvement, est représenté par un terme additionnel de traînée (proportionnel au carré de la vitesse moyenne), caractérisé par deux paramètres : la densité de surface foliaire a_L et le coefficient de traînée moyen C_d (supposé ici constant et égal à 0.15). Le flux de quantité de mouvement résultant des effets des échelles de turbulence non résolues (modèle de sous-maille SGS), s'exprime en fonction de l'énergie cinétique de sous-maille k et du tenseur des contraintes moyennes, de la manière suivante [7,8] :

$$\tau_{ij} = \rho \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle - \rho \langle \rho u_i u_j \rangle, \quad \tau_{ij} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_T \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \sqrt{k} (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (4)$$

où μ_T désigne la viscosité turbulente de sous-maille et $C_\mu = 0.07$. Conformément à ce qui a déjà été proposé pour des problèmes de même type [4], l'énergie cinétique de sous-maille est calculée en résolvant l'équation de transport suivante:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \langle u_j \rangle k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_T \left(\frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right) + \tau_{ij} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \rho C_\epsilon \frac{k^{3/2}}{L} - 2a_L \rho C_d (\langle u_j \rangle \langle u_j \rangle)^{1/2} k \quad (5)$$

Le terme de dissipation (proportionnel à $k^{3/2}$) fait apparaître deux paramètres : C_ϵ (une constante égale à 0.93) et l'échelle de longueur de sous-maille L ($L = (\Delta_x \times \Delta_y \times \Delta_z)^{1/3}$). Le dernier terme de cette équation représente la perte d'énergie cinétique de sous-maille résultant des effets de traînée au sein de la canopée. Les équations de transport (continuité, quantité de mouvement, énergie cinétique de sous-maille) sont intégrées de manière implicite par la méthode des volumes finis, l'intégration en espace est basée sur un schéma du troisième ordre avec limiteur de flux (QUICK) pour la partie convective et un schéma au second ordre centré pour la partie diffusive. Le couplage vitesse-pression est assuré par un algorithme de type SIMPLER. Les calculs sont réalisés sur un ordinateur à mémoire partagée de type SGI ALTIX, équipé de 20 processeurs Ithanium2 partageant une mémoire de 40 GBytes, utilisant la technologie OpenMP [8].

3 Résultats

Une première série de calcul a été réalisée pour un couvert homogène d'une hauteur $h = 15$ m, caractérisé par une surface foliaire constante ($a_L = 0.1$, LAI = 1.5). La configuration géométrique du calcul est reportée sur la Figure 1. Les simulations ont été réalisées dans un domaine dont les dimensions en mètres ($L_X \times L_Y \times L_Z$) sont $285 \times 75 \times 60$ (X : direction horizontale parallèle au vent, Y : direction horizontale perpendiculaire au vent, Z : direction verticale). Les conditions limites aux frontières du domaine sont périodiques dans les deux directions X et Y , une vitesse longitudinale de 12 m/s est imposée au toit du domaine. La visualisation des structures cohérentes qui vont organiser l'écoulement est obtenu par le critère Q . Q est un champ scalaire défini à partir du tenseur du taux de rotation Ω_{ij} et celui du taux de déformation S_{ij} , de la manière suivante :

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad Q = \frac{1}{2} (\Omega_{ij}^2 - S_{ij}^2) \quad (6)$$

Dans sa phase initiale, l'écoulement s'organise autour de structures tourbillonnaires transversales, issues du développement d'une instabilité de type Kelvin-Helmholtz (voir l'image du haut sur la Figure 2) et localisées

à l'interface atmosphère libre/canopée. Après appariement et étirement des filets tourbillonnaires (« vortex stretching »), ces structures vont se déformer dans le sens longitudinal, formant des tourbillons en fer à cheval (voir Figure 2 au milieu). On note également une expansion verticale de ces structures tourbillonnaires qui viennent modifier en profondeur l'écoulement au sein même de la canopée. En introduisant une longueur de mélange L_s , définie à partir du taux de cisaillement relevé au sommet de la canopée :

$$L_s = \bar{u}_x(H) / (d\bar{u}_x / dz)_{z=H} \quad (7)$$

On note que la longueur d'onde Λ_x des structures cohérentes dans la direction longitudinale, est approximativement égale à 8 fois la longueur de mélange L_s . Ce résultat est en accord avec les travaux réalisés par Raupach & al [9] qui avaient trouvés une relation de la forme : $\Lambda_x = m L_s$, $m = 8.1 \pm 0.3$.

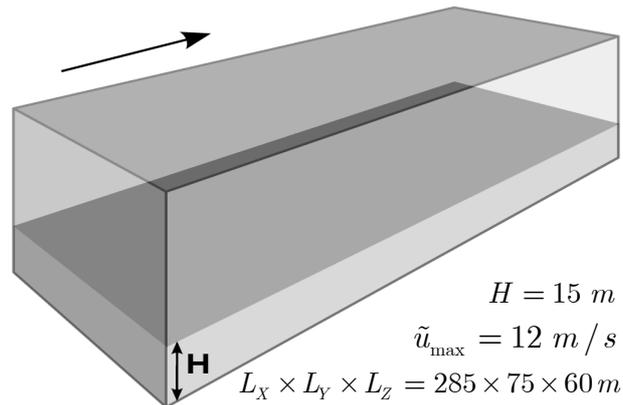


FIG. 1 – Configuration géométrique en couvert homogène.

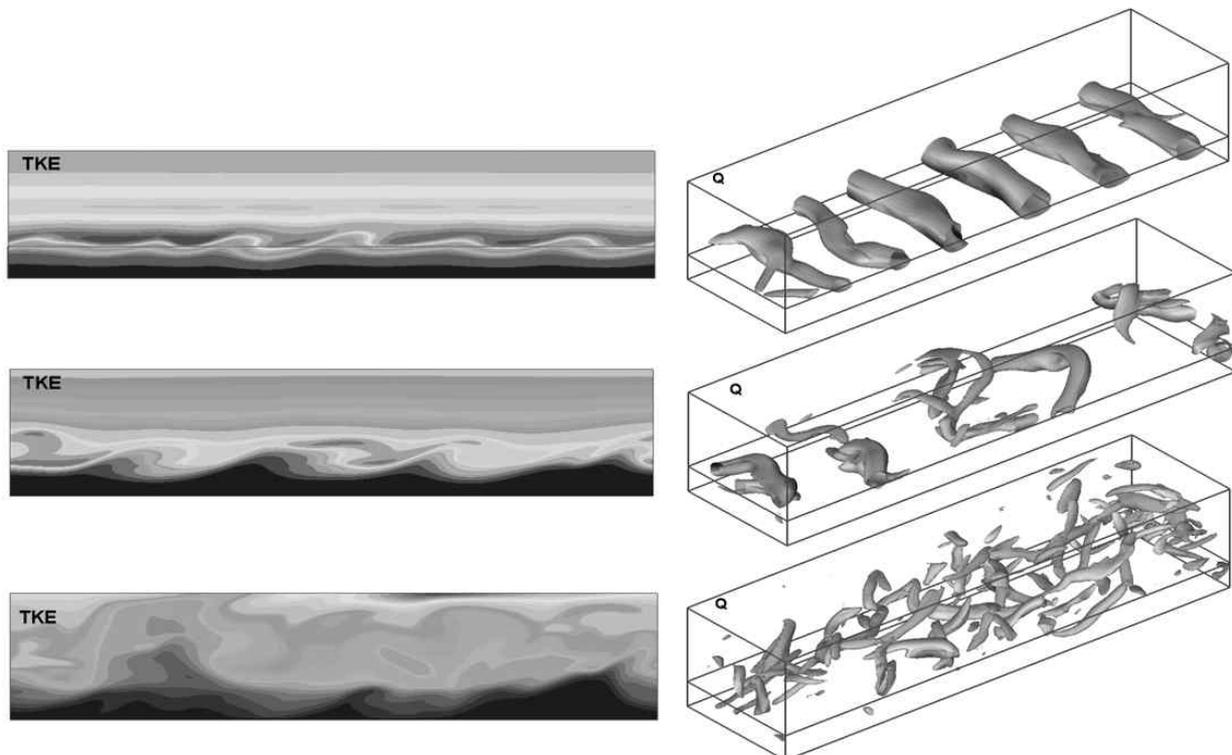


FIG. 2 – Structures turbulentes (iso-surfaces de Q) et énergie cinétique de sous-maille (à gauche) calculées au-dessus d'un couvert forestier homogène.

Les calculs ont été généralisés à une configuration hétérogène, représentant une clairière dans une forêt. La hauteur de canopée a été réduite à $h = 7.5$ m et les dimensions de la discontinuité ont été fixées à $21.3 \times h$. Ce choix devra faciliter la comparaison des résultats présents avec ceux obtenus au cours d'une expérience

précédente [9]. Au sommet du domaine de calcul, une vitesse de 15 m/s a été imposée. La Figure 3 montre les distributions de la composante longitudinale de la vitesse et l'énergie cinétique de sous-maille dans le plan XZ, ces distributions sont obtenues en moyennant en temps et dans la direction Y. Les coordonnées X et Z sont normalisées par la hauteur h de la canopée et la vitesse et l'énergie cinétique de sous-maille sont normalisée par des valeurs de référence correspondant au point de référence situé en $x = -8.5h$, $z = 2h$ et au milieu du domaine dans la direction Y. Ces figures sont similaires à celle obtenues par Dupont et Brunet [10].

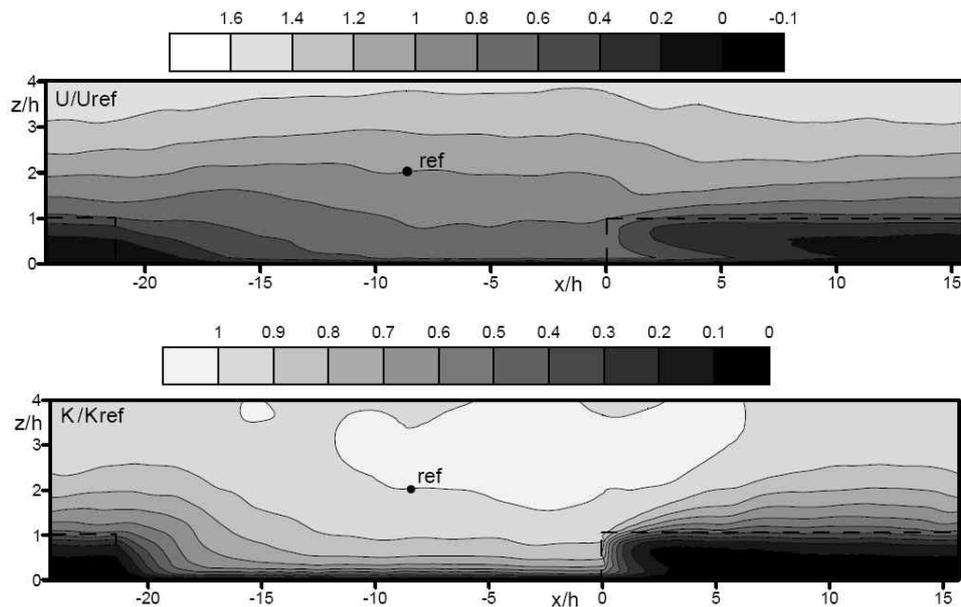


FIG. 3 – Distributions (moyennées en temps et dans la direction y) de la composante U de la vitesse (en haut) et l'énergie cinétique de sous-maille (en bas) dans le plan XZ dans le cas d'une configuration hétérogène.

Les résultats exposés sur les Figures 4 et 5 représentent la distribution verticale de la composante longitudinale de la vitesse moyenne U , la composante $\langle U'W' \rangle$ du tenseur de Reynolds, l'écart type σ_U suivant la même direction et le coefficient de dissymétrie (« skewness ») Sk_U . Comme le montre la figure 3, l'origine des coordonnées X suivant la direction longitudinale a été choisi à la bordure de sortie de la clairière, le premier point $X/h = -8.5$ est situé dans la clairière, les deux autres points $X/h = 2.1$ et 10.6 sont situés dans la zone recouverte de nouveau par la forêt. Les données ont été également normalisées en utilisant la vitesse de référence évaluée au point ($x = -8.5h$, $z = h$).

D'un point de vue général, les résultats sont en bon accord avec les observations et mesures expérimentales, à savoir :

- En absence de végétation dans la coupure, l'absence de force de traînée favorise l'accélération locale de l'écoulement.
- Aux deux limites de la clairière, on observe un écoulement vertical qui peut être ascendant ou descendant, et qui correspond aux zones d'adaptation de l'écoulement par rapport aux nouvelles conditions de « rugosité » du sol.
- A une distance $X/h = 8$, on note une zone d'activité turbulente intense au dessus de la canopée.

Au sein de la canopée ($0.7 < Z/h < 1$), conformément aux résultats déjà trouvés par Dupont et Brunet [10] et Raupach & al [11], on note une zone de rafales intenses (« Enhanced gust zone ») localisée pour des valeurs de X/h comprises entre 2.5 et 6. C'est dans cette zone que l'on relève le plus de dégâts dans les plantations d'arbre à l'issue d'une tempête (comme celle de 1999 qui a concerné une grande partie Ouest de l'Europe).

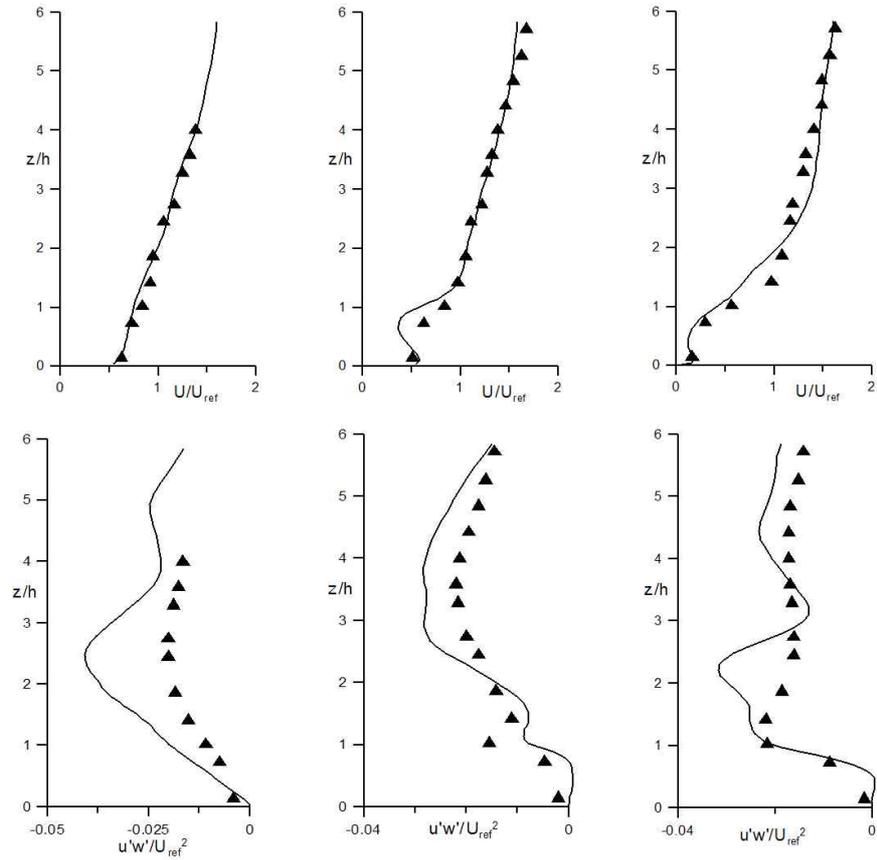


FIG. 4 – Profils verticaux de vitesse moyenne longitudinale U , de flux verticaux turbulent $U'W'$, en différents points du domaine : $x/H = -8.5, 2.1, 10.6$. Calcul (trait plein), expérience (symboles) [11].

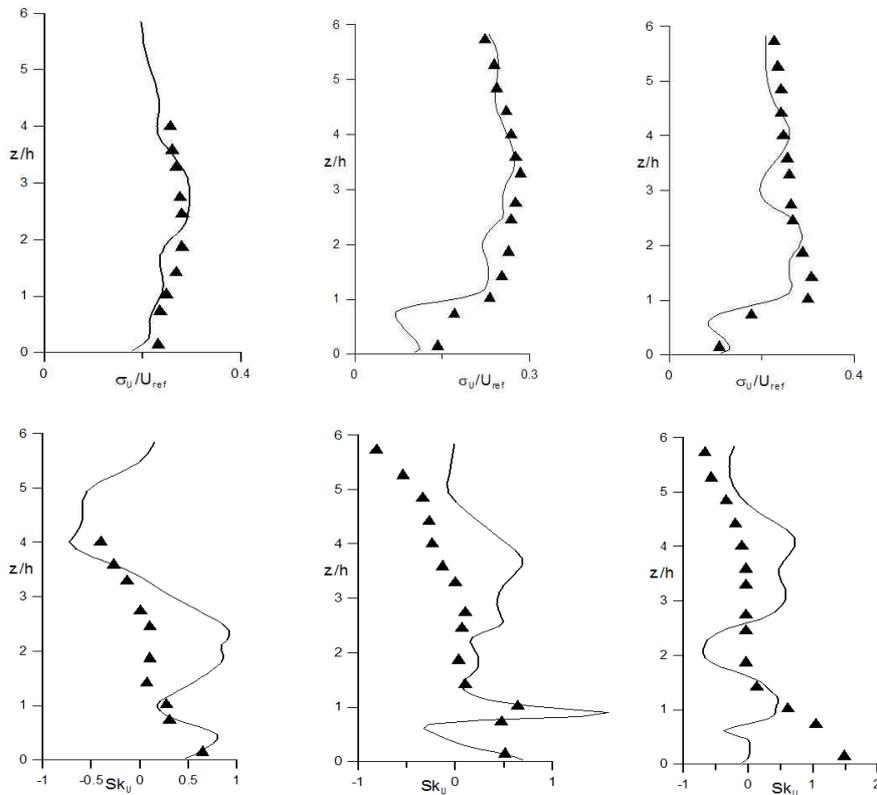


FIG. 5 – Profils verticaux d'écart type σ_U , de coefficient de dissymétrie Sk_U (skewness), en différents points du domaine : $x/H = -8.5, 2.1, 10.6$. Calcul (trait plein), expérience (symboles) [11].

Conclusions

L'interaction entre l'écoulement de couche limite atmosphérique avec un couvert forestier a été étudiée par simulation numérique des grosses structures (LES). Les résultats obtenus au dessus d'une canopée homogène ont confirmés que cet écoulement présentait beaucoup de similitudes avec un écoulement de type zone de mélange. Les visualisations des résultats (en particulier les iso-surfaces du critère Q) ont permis de mettre en évidence la manière et les mécanismes physiques qui contribuaient à l'organisation de cet écoulement. La confrontation des résultats numériques obtenus aussi bien en configuration homogène et hétérogène (clairière), avec des données expérimentales de la littérature a été jugée assez satisfaisante.

Références

- [1] Kaimal J.C., Finnigan J.J., 'Atmospheric Boundary Layer Flows', Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 289.
- [2] Finnigan J., 'Turbulence in plant canopies', Annual Review of Fluid Mechanics, 32, pp.519-571, 2000.
- [3] Marshall B.J., Wood C.J., Gardiner B.A., Belcher R.E., 'Conditional sampling of canopy gusts', Boundary-Layer Meteorology, 102, pp. 225-251, 2002.
- [4] Ghisalberti M., Nepf H.M., 'Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows', J. of Geophys. Res., 107(2), pp. 1-11, 2002.
- [5] Watanabe T., 'Large-eddy simulation of coherent turbulence structures associated with scalar ramps over plant canopies', Boundary-Layer Meteorology, 112, pp. 307-341, 2004.
- [6] Moeng C.H., 'A large eddy simulation model for the study of planetary boundary-layer turbulence', J. Atmos. Sci., 41, pp. 2052-2062, 1984.
- [7] Patton E.G., Shaw R.H., Judd M.J., Raupach M.R., 'Large-eddy simulation of windbreak flow', Boundary-Layer Meteorology, 87, pp. 275-306, 1998.
- [8] Accary G., Bessonov O., Fougère D., Meradji S., Morvan D., 'Optimized parallel approach for 3D modelling of forest fire behaviour', Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4671, pp. 96-102, 2007.
- [9] Raupach M.R., Finnigan J.J., Brunet Y. 'Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-layer analogy' Boundary-Layer Meteorology 78, pp. 351-382, 1996.
- [10] Dupont S., Brunet Y., 'Edge flow and canopy structure: a large-eddy simulation study', Boundary-Layer Meteorology, 126, pp. 51-71, 2008.
- [11] Raupach M.R., Bradley E.F., Ghadiri H., 'A wind tunnel investigation into aerodynamic effect of forest clearings on the nesting of abbot's Booby on Christmas Island. Internal report, CSIRO Centre for environmental Mechanics, Canberra, pp. 21, 1987.