

TEST DE VALIDITE DE L'ANALOGIE DE COUCHE DE MELANGE POUR L'ÉCOULEMENT SUR UN COUVERT VEGETAL

Laurence Pietri*, Muriel Amielh, Fabien Anselmet

Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, IRPHE UMR 7342, 13384, Marseille, France

*Correspondante : laurence.pietri@univ-amu.fr

Résumé : Le diagramme de Lumley, ou carte des invariants d'anisotropie, est couramment utilisé pour l'étude de l'anisotropie d'écoulements classiques de type couches limites, jets ou couches de mélange. Appliqué aux écoulements de couvert, il permet de tester la limite de validité de l'hypothèse d'analogie de couche de mélange qui est couramment utilisée lorsque les couverts sont denses

1 Introduction

L'analogie de couche de mélange [1] est une analogie communément admise lorsqu'un écoulement turbulent se développe au voisinage d'un couvert végétal dense. Si la densité de rugosité du couvert diminue, les caractéristiques de l'écoulement vont cependant évoluer jusqu'à retrouver des caractéristiques de couche limite plus ou moins perturbée par la présence de quelques arbres. Cette transition a été caractérisée par le passé [2] en analysant les champs moyen et turbulent des composantes longitudinale et verticale de la vitesse. La troisième composante de la vitesse est en général peu ou pas du tout mesurée. Pourtant, à l'intérieur et au voisinage de la canopée, la structure de la turbulence dépend de toutes les composantes de la vitesse qui vont toutes contribuer à l'énergie cinétique de la turbulence :

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) .$$

La transition entre couche de mélange et couche limite peut aussi s'apprécier à l'aide du diagramme de Lumley (Figure 1), ou plan des invariants d'anisotropie [3], selon l'approche proposée par Pietri et al. [4].

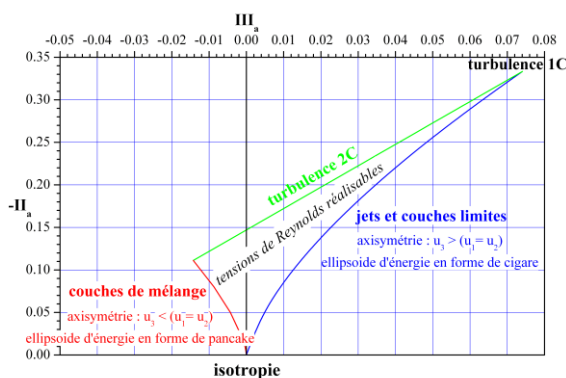


Figure 1 Diagramme de Lumley

Les premiers résultats d'analyse dans le plan des invariants du tenseur d'anisotropie ($-II_a$, III_a) semblaient mettre en évidence que, dans la région située juste au-dessus du sommet du couvert ($1 < z/h < 1.5$, h représentant la hauteur du couvert), la turbulence était plutôt de type axisymétrique en forme de disque, en accord avec l'analogie de couche de mélange, cela quelle que soit la densité de rugosité du couvert considérée par Pietri et al [5].

2 Dispositif expérimental

2.1 Présentation

Des mesures simultanées des trois composantes de la vitesse ont été réalisées avec le dispositif expérimental et la technique de mesure décrits dans [5] (Figure 2). La densité de rugosité λ est modifiée en jouant à la fois sur l'espacement moyen entre les éléments du couvert ($\Delta/h=1,2$), leur disposition spatiale relative (alignement, quinconce) et le type d'arbre (sapin, arbre rond). La disposition relative au sol a cependant peu d'influence sur les valeurs de λ .

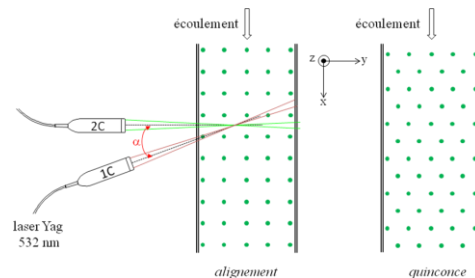


Figure 2 Dispositif expérimental

Le tableau 1 donne les densités de rugosité pour les deux espèces d'arbre utilisées et les deux espacements.

Pour une même densité de rugosité du couvert, plusieurs profils de vitesse sont relevés en différentes positions dans le couvert. Une moyenne spatiale dans le plan horizontal est ensuite calculée à chaque altitude z afin de tenir compte de la forte

hétérogénéité des écoulements de couvert [6]. On compare alors les profils moyennés pour chaque type de couvert.



Type d'arbre	Espacement Δ/h	Densité de rugosité λ
	1	0.48
-	2	0.13
	1	0.22
-	2	0.06

Table 1 Densités de rugosité du couvert estimées pour les différents cas d'étude.

Les résultats présentés ici ne porteront que sur des couverts de sapins. Les couverts s'étendent sur $2 \times 0.56 \text{ m}^2$. Les mesures sont réalisées à une distance 25h de la lisière afin de s'affranchir de ses effets.

2.2 Problème spécifique à la vélocimétrie laser Doppler 3 composantes

Un problème crucial soulevé par les systèmes de vélocimétrie laser Doppler 3 composantes (VLD 3C) tels que celui utilisé ici est la mesure de particules virtuelles [7]. On rappellera brièvement que Pietri et al. [5] mesurent directement la composante longitudinale, notée u , et la composante verticale, notée w , de la vitesse grâce au vélocimètre 2C alors que la composante transverse, notée v , se déduit de la mesure d'une composante résultant d'une combinaison de u et v grâce au vélocimètre 1C (figure 2).

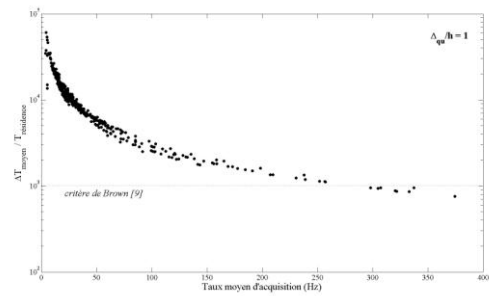
Lorsque l'angle α que font les axes des deux têtes optiques (figure 2) est faible, généralement inférieur à 30° , deux particules distinctes présentes au même instant dans chacun des volumes de mesure peuvent être validées et considérées comme représentant une seule et même particule. Ces particules virtuelles ont peu d'effet sur les valeurs moyennes des composantes de la vitesse mais augmentent les valeurs de la variance de la composante de la vitesse qui est déduite. En outre, Boutier [7] note que les valeurs des tensions de Reynolds $\overline{u'w'}$ obtenues à l'aide d'un système 3C sont plus faibles que celles obtenues avec un système 2C. La probabilité d'apparition des particules virtuelles augmente avec le taux d'acquisition et est plus grande pour des angles α faibles. Leur apparition est minimisée en travaillant avec un angle proche de 90° [7, 8] et lorsque l'intervalle de temps entre deux mesures successives ΔT_{moyen} vaut mille fois le temps de résidence des particules dans le volume de mesure $T_{\text{résidence}}$, i.e. pour de faibles taux d'acquisition [9].

2.3 Tests du système VLD 3C

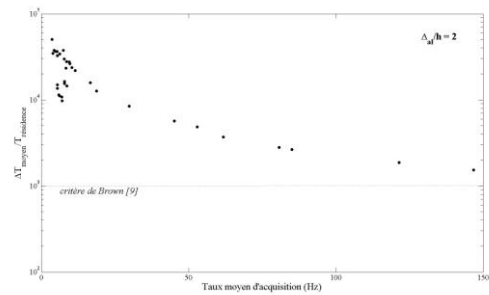
2.3.1 Critère de Brown

Le critère de Brown [9], i.e. $\Delta T_{\text{moyen}}/T_{\text{résidence}} \geq 10^3$, a été testé sur différents points de mesure pour différentes configurations du couvert végétal (figure 3). Il est

vérifié pour des taux d'acquisition inférieurs à 250 Hz environ. Lors de la campagne de mesures dont les résultats sont présentés, 250 à 300 Hz sont les taux d'acquisition maximum constatés.



(a)



(b)

Figure 3 Vérification du critère de Brown (a) couvert dense en quinconce (b) couvert épars aligné

2.3.2 Effet de l'angle entre les deux têtes optiques

L'effet de l'angle α sur la valeur de certains moments statistiques a été testé en une position de mesure d'un couvert végétal de sapins épars arrangés en quinconce. L'ensemble des mesures a été réalisé pour une valeur de α égale à 21.5° . Des mesures complémentaires ont été effectuées pour α égal à 30° , angle limite d'apparition des particules virtuelles selon Boutier [7]. Il apparaît clairement que la valeur de l'écart-type de la composante de la vitesse déduite v est fortement surestimée et que la tension de Reynolds $\overline{u'v'}$ est sous-estimée pour l'angle plus faible (figure 4). Toutefois, dans la zone du couvert où l'on constate les écarts les plus critiques ($z \approx h$), les barres d'incertitude calculées selon [10] sont importantes. Il est donc difficile pour l'instant de conclure sur l'effet réel de l'angle entre les têtes optiques.

2.3.3 Conclusion

Si on applique le critère proposé par Brown, on constate que l'on limite la probabilité d'occurrence de particules virtuelles. Les premiers tests sur l'influence de la valeur angulaire à imposer entre les têtes optiques du système de VLD 3C semblent négatifs et demanderaient une campagne de vérification plus approfondie. Malheureusement, dans la configuration expérimentale étudiée, il n'est pas possible d'augmenter l'angle, 30° étant la valeur

limite maximale pour notre système de VLD 3C. En outre, cet arrangement optique ne permet pas de pénétrer à l'intérieur du couvert végétal : les mesures sont impossibles à faire pour $z/h \leq 1$ lorsque α est égal à 30° (figure 4). Enfin, d'autres critères, non pris en compte ici, peuvent entrer en jeu dans les incertitudes de mesure liées à l'utilisation de la VLD 3C [8]. En revanche, il n'a été constaté aucune différence notable sur les valeurs de $\overline{u'w'}$ entre les systèmes VLD 2C et VLD 3C.

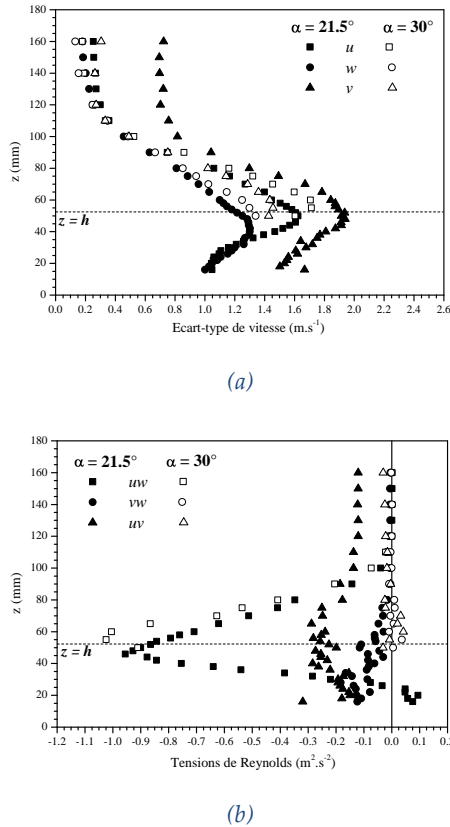


Figure 4 Effet de l'angle entre les têtes optiques sur (a) les écarts-type, (b) les tensions de Reynolds

3 Couvert de sapins de densité variable

Une vingtaine de profils de vitesse ont été mesurés en différents points d'une portion donnée du couvert végétal pour chaque configuration au sol et chaque densité. Ces profils ont ensuite été moyennés spatialement.

La moyenne spatiale est notée avec des crochets $\langle u \rangle$ et l'écart par rapport à la moyenne avec un double prime u'' . La moyenne temporelle est notée de manière classique avec une barre supérieure \overline{u} et u' représente la fluctuation. Il en résulte les décompositions suivantes de la vitesse instantanée :

$$u = \overline{u} + u' \quad u = \langle u \rangle + u''$$

Ce paragraphe présente quelques résultats caractéristiques sous la forme de profils verticaux moyennés spatialement. Les profils correspondant au cas du couvert dense sont tronqués sous le feuillage

en raison de l'occultation des faisceaux laser par le couvert.

3.1 Tensions dispersives

L'écriture des équations de quantité de mouvement fait apparaître, après moyenne spatiale, de nouveaux termes notés $\langle \overline{u''_i u''_j} \rangle$, appelés tensions dispersives, qui s'ajoutent aux tensions de Reynolds usuelles $\overline{u'_i u'_j}$ [6]. On obtient alors une covariance totale ou flux de quantité de mouvement total qui s'écrit :

$$\langle u''_i u''_j \rangle = \langle \overline{u''_i u''_j} \rangle + \langle \overline{u'_i u'_j} \rangle .$$

Ces tensions dispersives ont peu été évaluées par le passé et la littérature propose essentiellement des résultats sur $\langle \overline{u'' w''} \rangle$ [11,12]. Les tensions dispersives sont généralement négligeables dans les écoulements de couvert, hormis pour les couverts les moins denses. Pour ces derniers, elles atteignent leur maximum dans la partie basse de la canopée [11].

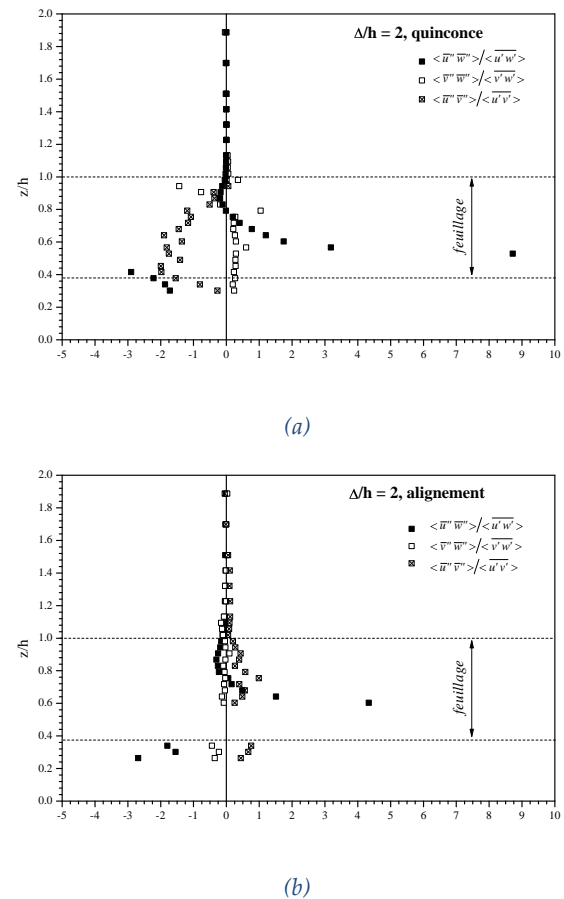


Figure 5 Rapport des tensions dispersives et des tensions de Reynolds pour un couvert épars (a) en quinconce, (b) aligné

La figure 5 présente l'importance relative des tensions dispersives par rapport à celles de Reynolds dans le cas du couvert épars ($\Delta/h = 2$). Le rapport $\langle \overline{u'' w''} \rangle / \langle \overline{u' w'} \rangle$ est largement supérieur à 1 dans la partie basse du feuillage, en accord avec la littérature. Les tensions dispersives et de Reynolds sont de même signe. En revanche, près du sommet du couvert, le rapport change de signe. Grâce à une

analyse par quadrant, Poggi et al. [11] attribuent ce changement de signe au fait que des mécanismes différents sont à l'origine de ces tensions dispersives suivant la zone de couvert considérée.

Les tensions dispersives $\langle \overline{v''w''} \rangle$ semblent négligeables par rapport à $\langle \overline{v''v''} \rangle$, leur rapport restant proche de zéro quelle que soit l'altitude dans le couvert végétal.

En revanche, bien que la densité de rugosité du couvert soit identique pour les deux cas de couvert épars, le comportement des tensions dispersives $\langle \overline{u''v''} \rangle$ semble nettement différent. Dans le cas du couvert aligné, elles sont négligeables par rapport à $\langle \overline{u''v''} \rangle$ et de même signe alors que, dans le cas du quinconce, elles deviennent prépondérantes, jusqu'à deux fois plus fortes en valeur absolue, et sont de signe opposé dans la zone de feuillage.

Ces résultats sur les moments statistiques impliquant la composante de la vitesse déduite seront à approfondir étant donnés les problèmes de mesure évoqués au paragraphe précédent.

3.2 Anisotropie de l'écoulement

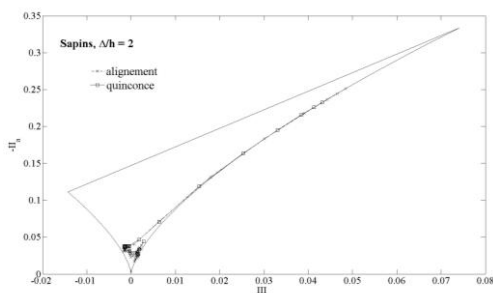
Les tensions de Reynolds ayant été calculées et moyennées spatialement, le tenseur d'anisotropie est construit grâce à l'équation :

$$a_{ij} = \frac{\langle \overline{u_i' u_j'} \rangle}{2k} - \frac{1}{3} \delta_{ij}$$

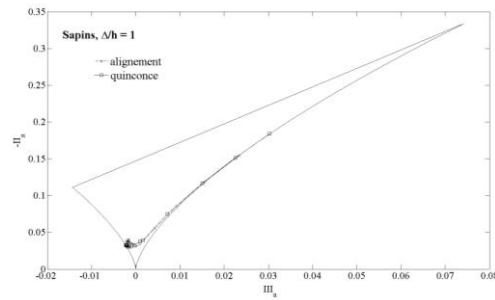
avec $k = \frac{1}{2}(\langle \overline{u'^2} \rangle + \langle \overline{v'^2} \rangle + \langle \overline{w'^2} \rangle)$.

On détermine ensuite ses invariants principaux à partir de ses valeurs propres, le premier invariant étant nul par construction. On peut alors tracer la carte des invariants d'anisotropie (Figure 6) dans le plan des invariants $(-II_a, III_a)$, II_a et III_a étant les invariants principaux d'ordre 2 et 3 [3].

La figure 6 donne l'allure générale de la carte obtenue pour chaque cas d'étude. Un agrandissement du diagramme est fourni figure 7. Il se concentre sur la zone de couvert, $z/h \leq 1$, et la région proche au-dessus du couvert.



(a) $\lambda = 0.06$



(b) $\lambda = 0.22$

Figure 6 Diagramme de Lumley d'un écoulement se développant au-dessus de couverts de densités différentes

La figure 7a (cas épars, $\lambda = 0.06$) est la seule qui apporte une information sur la structure de l'écoulement à l'intérieur du couvert. La région située sous le feuillage, $z/h \leq 0.4$, suit la branche asymptotique typique des écoulements de couche limite (cf. figure 1) avec une turbulence axisymétrique où la variance d'une composante de la vitesse est supérieure à celles des deux autres composantes. L'écoulement s'y développe quasi librement en proche paroi, puis, en s'éloignant, se rapproche du feuillage. Dans la zone de feuillage, $0.4 \leq z/h \leq 1$, la turbulence perd sa structure de couche limite sans vraiment tendre vers une autre structure caractéristique. On note toutefois le changement de signe du 3^e invariant. Ce n'est que vers le sommet du couvert, dans les deux cas d'arrangement au sol étudiés, que la structure de l'écoulement semble reprendre une certaine axisymétrie, de type disque, typique des couches de mélange. Toutefois, cela reste très marginal. Enfin, lorsqu'on s'éloigne du couvert végétal, la courbe des invariants rejoint la branche asymptotique des couches limites, en accord avec de précédents résultats [2]. L'analyse de la figure 7a montre clairement que, pour le cas peu dense, l'analogie de couche de mélange ne semble pas s'appliquer.

La figure 7b (cas dense, $\lambda = 0.22$) ne permet d'étudier le diagramme de Lumley que dans la zone s'étendant juste au-dessus de la canopée, $z/h \geq 1$. Concernant la disposition du couvert dite d'alignement, on ne constate aucune différence notable entre les deux cas de densité étudiés (dense et épars), même dans la région proche du sommet du couvert. La structure de la turbulence ne semble pas totalement correspondre à une structure de couche de mélange. L'analyse du cas dense associé à un arrangement en quinconce des éléments du couvert révèle toute autre chose. Proche du sommet du couvert, la courbe des invariants s'appuie nettement sur la branche asymptotique caractéristique des couches de mélange et suggère la validité de l'analogie de couche de mélange.

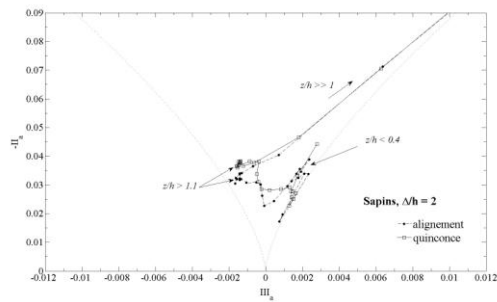
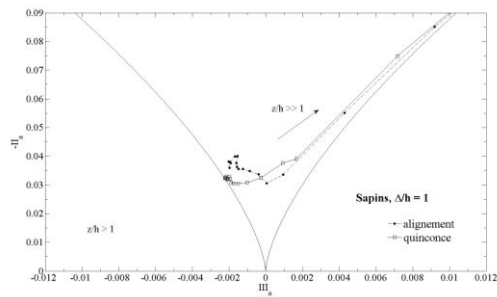
(a) $\lambda = 0.06$ (b) $\lambda = 0.22$

Figure 7 Zoom de la figure 6

4 Conclusion

Un système de VLD 3C est utilisé pour caractériser les champs moyen et turbulent de la vitesse dans un écoulement se développant sur un couvert végétal dont on peut faire varier la densité de rugosité et la disposition au sol des éléments le constituant.

La technique pose quelques problèmes très spécifiques dont, notamment, l'introduction de particules virtuelles dont il est difficile de s'affranchir et dont l'effet principal semble jouer sur la mesure de la composante transversale v qui est une mesure indirecte. Il sera nécessaire d'approfondir la question avant de valider complètement le test de validité de l'analogie de couche de mélange proposé.

Les mesures réalisées ont permis d'évaluer les tensions dispersives qui apparaissent dans les équations de quantité de mouvement lorsque celles-ci sont moyennées spatialement afin de tenir compte de la forte hétérogénéité spatiale des écoulements de couvert. Les tensions dispersives $\langle \bar{u}''\bar{w}'' \rangle$ sont négligeables par rapport aux tensions de Reynolds $\langle u'w' \rangle$ dans le cas dense et deviennent non négligeables dans la partie basse de la canopée pour le couvert épars, en accord avec la littérature. Un point qui nécessitera un approfondissement porte sur les tensions $\langle \bar{u}''\bar{v}'' \rangle$ qui semblent deux fois plus fortes en valeur absolue que les tensions correspondantes $\langle u'v' \rangle$. En raison du problème de la mesure de v , ce résultat reste à confirmer.

Enfin, un test de validité de l'analogie de couche de mélange basé sur le diagramme de Lumley a été proposé. L'analyse de la structure de la turbulence à l'aide du diagramme de Lumley est classique pour les écoulements turbulents de référence et pourrait

être appliquée aux écoulements de couvert. Elle permettrait de caractériser la transition d'un écoulement de couche limite vers un écoulement de couche de mélange lorsque la densité du couvert augmente en visualisant le basculement de la courbe des invariants de la branche asymptotique typique des écoulements de couche limite à celle typique des écoulements de couche de mélange (figure 1).

Dans le cas étudié (§3.2), la carte des invariants montre, avec une modification du signe du 3^e invariant, une profonde modification de la structure de la turbulence dans la région se situant à l'intérieur de la zone de feuillage et juste au-dessus de celle-ci. Dans tous les cas traités, les courbes obtenues sur le diagramme de Lumley se rapprochent de la branche asymptotique des couches de mélange mais, seul le cas dense du couvert en quinconce, semble suivre l'analogie de couche de mélange. Ce constat semble renforcer une des conclusions de Pietri et al. [2] sur l'importance de la disposition relative des éléments dans un couvert végétal.

5 References

- [1] Raupach M.R., Finnigan J.J., Brunet Y., Coherent eddies in vegetation canopies: the mixing layer analogy, *Boundary-Layer Meteorol.* 78 (3-4): 351-382 (1996)
- [2] Pietri L., Petroff A., Amielh M., Anselmet F., Turbulence characteristics within sparse and dense canopies, *Environ. Fluid Mech.* 9 (3): 297-320 (2009)
- [3] Choi K.-S., Lumley J.L., The return to isotropy of homogeneous turbulence, *J. Fluid Mech.* 436: 59-84 (2001)
- [4] Pietri L., Amielh M., Anselmet F., Petroff A., Anisotropie de la turbulence dans une couche limite sur couvert végétal, *20^e Congrès Français de Mécanique (CFM 2011)*, 29 août – 2 septembre, Besançon, France, 2011
- [5] Pietri L., Amielh M., Anselmet F., Caractérisation de l'anisotropie d'un écoulement de couvert, *13^e Congrès Francophone de Techniques Laser (CFTL 2012)*, 18-21 septembre, Rouen, France, 2012.
- [6] Raupach M.R., Shaw R.H., Averaging procedures for flow within vegetation canopies, *Boundary-Layer Meteorol.* 22 (1): 79-90 (1982)
- [7] Boutier A., *Vélocimétrie laser pour la mécanique des fluides* (Lavoisier, 2012).
- [8] Micheli F., Losfeld G., Girardot L., Measurement uncertainties on the third velocity component variance provided by a 3-dimensional Laser Doppler Velocimeter, *4th Pacific Symposium on Flow. Visualization and Image Processing (PSFVIP-4)*, June 3-5, Chamonix, France, 2003.
- [9] Brown J. L., Geometric bias and time coincidence in 3-dimensional laser Doppler velocimeter systems, *Exp. in Fl.* 7 (1): 25-32 (1989)
- [10] Benedict L. H., Gould R. D., Towards better uncertainty estimates for turbulence statistics, *Exp. in Fl.* 22 (2): 129-136 (1996)
- [11] Poggi D., Katul G. G., The effect of canopy roughness density on the constitutive components of the dispersive stresses, *Exp. in Fl.* 45 (1): 111-121 (2008)
- [12] Böhm M., Finnigan J. J., Raupach M.R., Hughes D., Turbulence structure within and above a canopy of bluff elements, *Boundary-Layer Meteorol.* 146 (3): 393-419 (2013)