

Caractérisation de l'anisotropie d'un écoulement de couvert.

Laurence PIETRI¹, Muriel AMIELH₁ et Fabien ANSELMET₂

Adresse 1 – Aix-Marseille Univ., IRPHE, 13384 Marseille cedex 13

Adresse 2 – Centrale Marseille, 13451 Marseille cedex 20

1 Introduction

1.1 Présentation

L'écoulement de couvert est une appellation générale de tout écoulement interagissant avec un couvert donné. Le couvert peut être végétal (e.g. forêt, cultures, ...) ou artificiel (e.g. ville). En outre, le couvert peut aussi être submergé ou partiellement submergé (algues, mangroves, ...). Une large littérature existe couvrant l'ensemble des écoulements de couvert que l'on peut rencontrer et dont les centres d'intérêt sont très variés : sylviculture et agriculture, dispersion de particules (pollens, nutriments, sédiments ou polluants), dommages dus aux catastrophes naturelles ou à l'érosion des sols, développement des coraux ...

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons aux écoulements de couche limite se développant sur des couverts végétaux.

1.2 Couverts denses : l'analogie de couche de mélange

Un résultat classique des écoulements de couvert est l'analogie de couche de mélange introduite par Raupach et al. [1] qui est valable si le couvert végétal considéré est suffisamment dense et homogène. Raupach et al. ont montré que, pour un couvert végétal dense et homogène, les caractéristiques du champ dynamique sont semblables aux caractéristiques d'une couche de mélange.

1.3 Couverts peu denses

L'analogie de couche de mélange est cependant invalidée dès que le couvert devient épars. Si les éléments de couvert sont de plus en plus clairsemés, on va retrouver les caractéristiques d'une couche limite turbulente plus ou moins perturbée par la présence de ces éléments.

La transition entre les deux écoulements limites (couche de mélange et couche limite) peut être caractérisée grâce au produit du coefficient de traînée du couvert c_d , de sa densité de surface foliaire a et de sa hauteur h . Le paramètre $c_d ah$, tout d'abord introduit par Massman [2], a été finement étudié par Nepf et al. [3]. Ainsi, pour une valeur de $c_d ah$ inférieure à 0.04, l'écoulement peut être considéré comme une couche limite turbulente classique, sans point d'inflexion dans le profil de vitesses [3]. Lorsque $c_d ah$ prend des valeurs supérieures à 0.1, un point d'inflexion apparaît de manière très prononcée dans le profil de vitesses, impliquant alors la validité de l'analogie de couche de mélange [3].

1.4 But de l'étude

Outre le paramètre $c_d ah$ défini précédemment, il a été montré que le facteur de dissymétrie de la vitesse (équation 1) était aussi un paramètre relativement sensible à l'effet de densité du couvert [4].

$$S_u = \frac{\overline{u^3}}{\overline{u^2}^{3/2}} \quad (1)$$

¹ Correspondant : pietri@irphe.univ-mrs.fr

Une autre approche, proposée par Pietri et al. [5], s'appuie sur l'étude de l'anisotropie de l'écoulement. Pietri et al. proposent d'utiliser la représentation dans le diagramme de Lumley [6] des invariants de la composante anisotrope du tenseur de Reynolds obtenu pour différentes densités de couvert.

On calcule le tenseur d'anisotropie par l'équation (2).

$$a_{ij} = \frac{\overline{u_i' u_j'}}{2k} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \quad (2)$$

Les termes $\overline{u_i' u_j'}$ sont les tensions de Reynolds et $k = \overline{u_i' u_i'}/2$ représente l'énergie cinétique de la turbulence. On détermine ensuite les invariants principaux du tenseur d'anisotropie à partir des valeurs propres du tenseur, le premier invariant étant nul par construction. On peut alors tracer la carte des invariants d'anisotropie (Figure 1) dans le plan des invariants $(-II_a, III_a)$, II_a et III_a étant les invariants principaux d'ordre 2 et 3 du tenseur d'anisotropie a_{ij} [6].

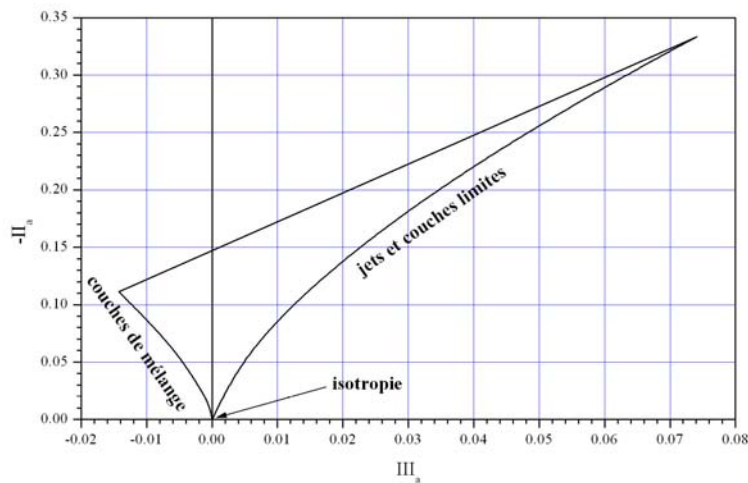


Figure 1 – Carte des invariants d'anisotropie ou triangle de Lumley

Cette carte permet de qualifier l'anisotropie d'écoulements de référence (couche de mélange, couche limite, ...). La branche asymptotique de gauche est représentative d'une turbulence axisymétrique pour laquelle deux des trois variances des composantes de la vitesse sont égales et supérieures à la troisième ($III_a < 0$). On parle d'une turbulence en forme de "pancake" ou de disque [7]. Typiquement, les écoulements de couche de mélange se trouvent sur cette branche. La branche de droite est liée à une turbulence axisymétrique pour laquelle la variance d'une des composantes est plus importante que les deux autres qui, elles, sont égales ($III_a > 0$). On parle alors de turbulence en forme de cigare [7]. On retrouve sur cette branche les écoulements classiques de couche limite et de jets. Ces deux branches sont définies par la relation (3).

$$III_a = \pm \left(-\frac{II_a}{3} \right)^{3/2} \quad (3)$$

Le signe positif est associé à la turbulence en forme de cigare, le signe négatif à la turbulence en forme de disque. La classification des écoulements adoptée ici est énergétique. Une autre classification existe, basée sur la forme des tourbillons de la turbulence [7].

Tous les états possibles de la turbulence doivent se retrouver à l'intérieur du triangle de Lumley dans le plan des invariants [7]. L'analyse des invariants d'anisotropie permet ainsi de déterminer le degré d'anisotropie d'un écoulement donné [8]. Les invariants du tenseur de Reynolds apportent des informations sur le mouvement des grandes échelles. Pour l'étude de l'anisotropie des petites échelles, on s'intéressera plutôt au tenseur de vorticité ou de dissipation de l'énergie cinétique [8].

L'étude de Pietri et al. [5] est basée principalement sur l'exploitation préalable de données de la littérature concernant des écoulements de couvert. Shafi et Antonia ([9]) notent que le tenseur est un indicateur sensible aux modifications de la structure de la turbulence résultant d'une

modification de surface. Il s'agit maintenant de constituer une base de données portant sur des couverts de différentes densités afin d'approfondir l'effet de cette densité sur la structure de la turbulence dans un écoulement de couvert. Pour cela, il faut caractériser le champ dynamique grâce à la mesure des trois composantes de la vitesse. Un dispositif expérimental a donc été développé. Les premiers résultats font l'objet du présent papier.

2 Description de l'expérience

2.1 Dispositif expérimental

Le travail expérimental est développé en soufflerie. La veine d'essais, de 5 m de long, a une section rectangulaire ($0.46 \times 0.56 \text{ m}^2$). La pente du plancher est ajustable afin de maintenir, si nécessaire, un gradient de pression nul dans la veine. Des trous régulièrement espacés ont été percés dans le plancher afin d'y planter les éléments du couvert. Celui-ci couvre une surface de $2 \times 0.56 \text{ m}^2$.

Le couvert est composé d'un nombre variable d'arbres artificiels (Figure 2). La hauteur moyenne h des arbres est de 0.05 m. Le rapport de cette hauteur à celle de la veine est de 1:9. Tronc et branches sont métalliques alors que le feuillage est composé d'une fine mousse verte. Les arbres peuvent être disposés au sol soit de manière alignée, soit en quinconce. La densité de rugosité λ du couvert, définie comme étant la surface frontale par unité de surface au sol, dépend du type d'arbre, de leur espacement moyen et de la disposition au sol. L'espacement Δ , rapporté à la hauteur h , varie de 1 à 2 alors que λ varie de 0.5 à 0.05.

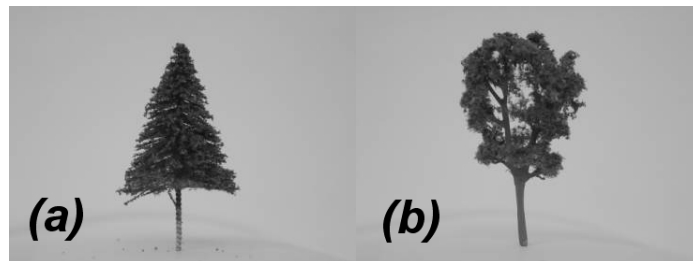


Figure 2 – Eléments du couvert artificiel (a) sapin (b) arbre rond

2.2 Vélocimétrie laser Doppler à trois composantes

La mesure de vitesse est réalisée par vélocimétrie laser Doppler (VLD), technique adaptée aux écoulements avec de fortes intensités de turbulence. En effet, celles-ci peuvent largement dépasser 30% à l'intérieur du couvert. Les parois de la veine d'essai ont été peintes en noir pour minimiser les réflexions. L'ensemencement est constitué de gouttelettes d'huile d'olive dont le diamètre, de l'ordre du micromètre, a été vérifié par anémométrie phase Doppler.

Un système de mesures des trois composantes de la vitesse de l'écoulement a été mis en place (Figure 3). Il combine un système de vélocimétrie laser Doppler à deux composantes (2C) et un système à une composante (1C). Le système 2C est composé d'un laser Argon stabilité 2016 Spectra Physics (4 W) et d'un système optique FiberFlow (Dantec Dynamics). Ce dernier est constitué d'un transmetteur qui assure la séparation et le décalage en fréquence (40 MHz) des faisceaux vert (514 nm) et bleu (488 nm) et d'une sonde optique 2D de 60 mm de diamètre, de longueur focale 400 mm. Le système 1C combine un laser Millenia Pro Yag continu Spectra Physics (532 nm, 5 W max) et une sonde optique FiberFlow 1D de mêmes diamètre et longueur focale que la précédente. Le décalage en fréquence du faisceau est réglé à 40 MHz.

Les deux volumes de mesure résultant de chaque système ont pour dimensions : $4 \times 0.2 \times 0.2 \text{ mm}^3$. La superposition des deux volumes est vérifiée à l'aide d'un trou optique de diamètre 50 μm . On visualise sur un écran les anneaux de diffraction créés lorsque les volumes coïncident dans le trou optique.

La sonde optique 1D est inclinée d'un angle de 21.5° par rapport à la perpendiculaire à la direction de l'écoulement et mesure une combinaison linéaire de la composante longitudinale u et de la composante transversale v de la vitesse, que l'on note $v_{\text{mesuré}}$. La sonde optique 2D mesure

directement la composante longitudinale $u_{\text{mesuré}}$ et la composante verticale $w_{\text{mesuré}}$ de la vitesse. On reconstruit la vitesse transversale v à partir des mesures simultanées $u_{\text{mesuré}}$ et $v_{\text{mesuré}}$ des deux sondes (équation 4). Le vecteur vitesse de composantes (u,v,w) est défini dans le repère de la soufflerie (Figure 3).

$$v = -\frac{1}{\tan(\alpha)} \cdot u_{\text{mesuré}} - \frac{1}{\sin(\alpha)} \cdot w_{\text{mesuré}} \quad (4)$$

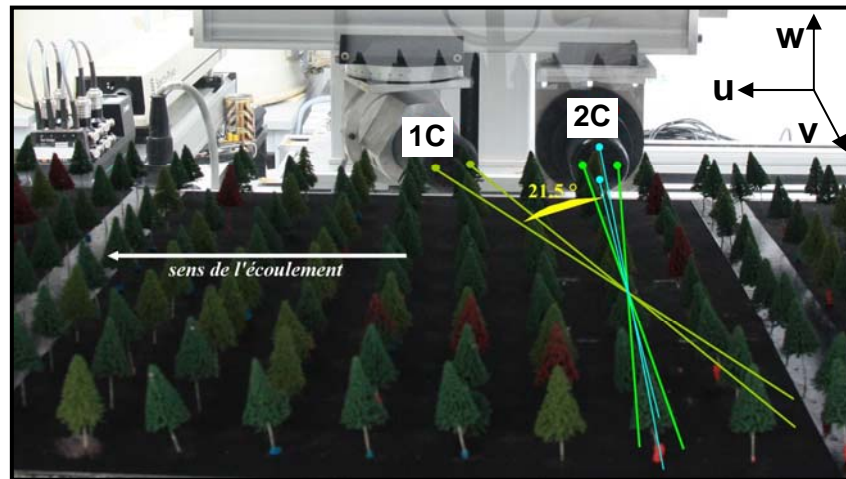


Figure 3 – Montage optique des sondes pour la mesure des trois composantes de la vitesse

Les mesures de vitesse sont effectuées en rétro-diffusion. L'acquisition des bouffées Doppler est gérée par un Burst Spectrum Analyzer (Dantec Dynamics) BSA P80 et du logiciel BSA Flow. Elle est réalisée en mode coïncident.

Les séries de mesure ont été réalisées pour des couverts de sapins (Figure 2-a) alignés pour deux espacements $\Delta/h = 1$ et $\Delta/h = 2$. Pour le premier espacement, la zone située à l'intérieur du couvert est difficilement accessible. Il a donc été quasi impossible de réaliser des mesures dans cette région. Il en résulte une absence de points dans certains profils de vitesse.

Pour tenir compte de la forte hétérogénéité des écoulements de couvert, il est préconisé de présenter des moyennes spatiales [10]. Les profils moyens correspondant à $\Delta/h=1$ sont obtenus à partir de 19 profils locaux alors que, pour l'instant, ceux correspondant à $\Delta/h=2$ sont obtenus seulement à partir de 4 ou 6 profils locaux.

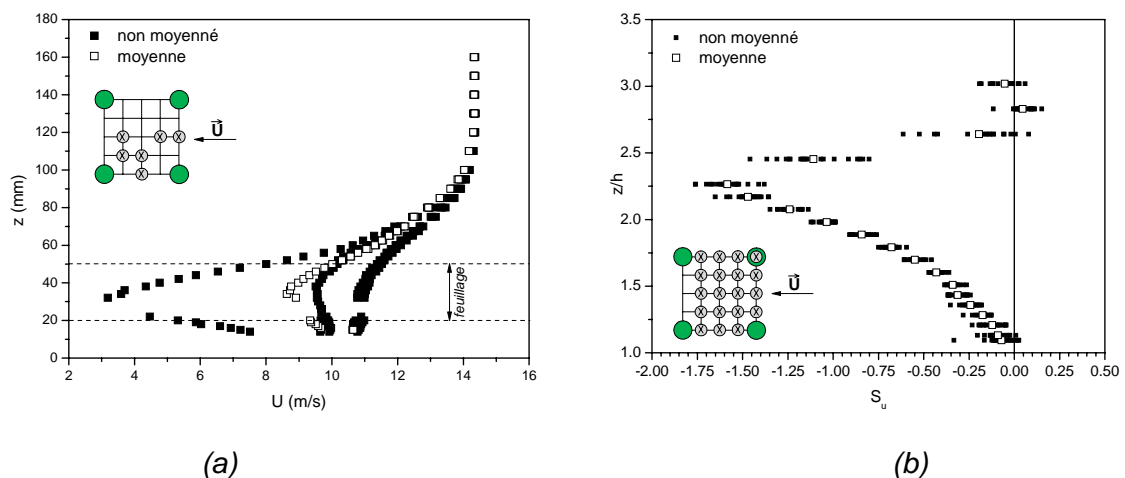


Figure 4 – Comparaison d'un profil moyenné spatialement et des profils bruts
(a) vitesse moyenne, $\Delta/h=2$ (b) facteur de dissymétrie, $\Delta/h=1$

Deux exemples de l'effet de moyenne spatiale sont données figure 4. La figure 4a présente, pour l'espacement $\Delta/h = 2$, le comportement de la composante longitudinale moyenne de la vitesse en fonction de l'altitude en quatre points du couvert et le profil moyen résultant. La figure 4b est relative au facteur de dissymétrie S_u pour l'espacement $\Delta/h = 1$.

Les différents tracés présentés dans les figures 5 et suivantes sont obtenus à partir de moyennes spatiales des profils de vitesse.

3 Caractérisation du champ dynamique

3.1 Caractérisation du champ de vitesse

Les champs des composantes longitudinale et verticale de la vitesse ont fait l'objet de différentes communications [4-5]. Nous nous attarderons ici sur le comportement des tensions de Reynolds au-dessus du couvert végétal ($z/h > 1$). u^* est la vitesse de frottement déduite de la mesure de la tension uw , ou covariance entre u et w , à la hauteur h du couvert. On constate un écart de 35% entre les valeurs actuelles de u^* et celles obtenues par Pietri et al. [4]. On rappelle que les données de [4] ont été déterminées à la suite de la mesure simultanée de deux composantes seulement de la vitesse u et w à partir de profils non moyennés spatialement.

L'effet de la densité du couvert végétal est plus important sur les tensions uw (Figure 5a). Pour le couvert le moins dense ($\Delta/h = 2$), lorsque z augmente, les tensions uw tendent plus rapidement vers zéro que pour le couvert le plus dense ($\Delta/h = 1$). En revanche, la tendance est inversée si on considère les tensions vw ou uv . Au-dessus de $z/h = 2$, tous les moments croisés tendent vers zéro.

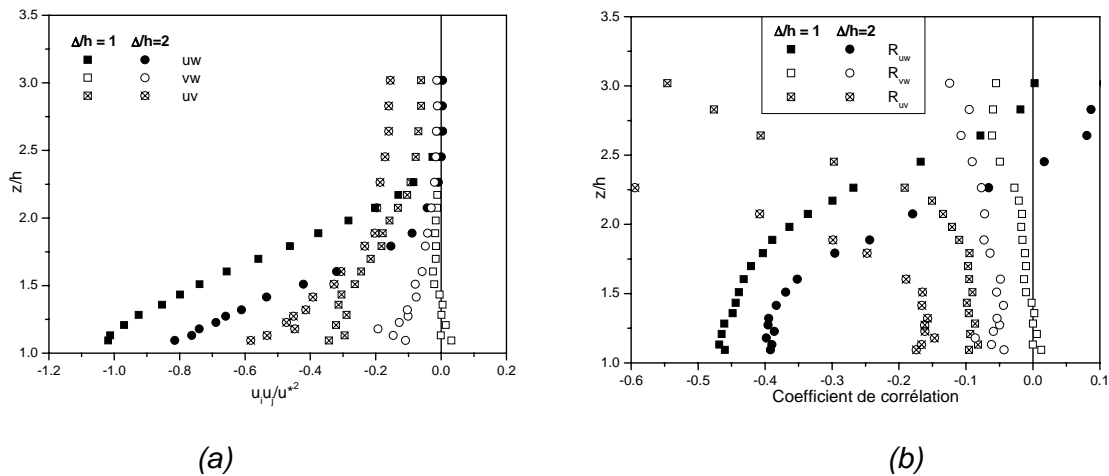


Figure 5 – Evolution verticale (a) des tensions de Reynolds (b) des coefficients de corrélation au-dessus du couvert

Au-dessus du couvert, pour $z/h < 1.5$, le coefficient de corrélation entre u et w prend une valeur de 0.45 pour $\Delta/h = 1$ et 0.4 pour $\Delta/h = 2$ (Figure 5b). La valeur de référence en écoulement de couvert est 0.4 [11].

Comme cela a été précédemment écrit, un paramètre sensible à la densité du couvert est le facteur de dissymétrie de la vitesse, noté S . Dans une couche limite ou dans un écoulement de couvert, les facteurs de dissymétrie de u et de w sont de signes opposés, ce que l'on constate effectivement Figure 6.

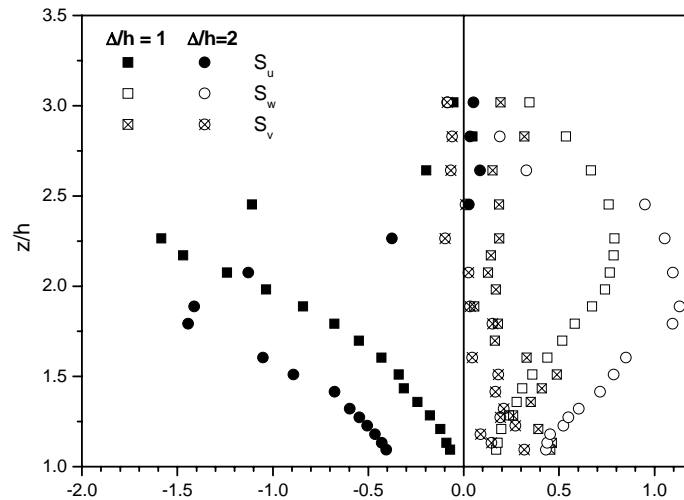


Figure 6 – Evolution verticale des facteurs de dissymétrie de u , v et w au-dessus du couvert

En outre, pour le couvert dense, on notera que S_u et S_w tendent vers zéro lorsqu'on se rapproche du sommet de la canopée. Même si on ne peut le visualiser sur la figure, il est vraisemblable que S_u et S_w changent de signe à l'intérieur du couvert dans le cas dense comme on a pu le montrer dans un papier antérieur [4] en accord avec la littérature [11]. Le facteur de dissymétrie de v est relativement faible sur toute la hauteur du profil.

4 Caractérisation de l'anisotropie

La figure 7 présente les invariants du tenseur d'anisotropie pour différents couverts. Deux sont artificiels [12, 13], le troisième est naturel [14]. Le LAI est l'indice de surface foliaire et est équivalent à une densité de rugosité (à un facteur 2 près). Ce sont des couverts plus denses que ceux étudiés ici. Seules, les données de Dunn et al. [12] indiquent une tendance des invariants à se rapprocher de la branche asymptotique caractéristique des couches de mélange, cela pour quelques points du profil obtenu en couvert très dense ($\Delta/h = 0.65$). La majeure partie des données semblent plutôt montrer une anisotropie de la turbulence. Cette anisotropie est confirmée par nos mesures au-dessus du couvert. Toutefois, les points situés en dessous de $z/h < 1.5$ et pour lesquels l'invariant d'ordre 3 est négatif semblent tendre vers la branche asymptotique de couche de mélange. Cette tendance est plus nette pour le cas $\Delta/h = 1$. En revanche, lorsque z augmente, loin du sommet du couvert, nous retrouvons des caractéristiques de couche limite.

Dans la sous-couche rugueuse de l'écoulement de couvert, la turbulence serait ainsi plutôt caractérisée par une axisymétrie en forme de disque. Loin du couvert, on retrouve les caractéristiques classiques d'une couche limite turbulente avec une axisymétrie en cigare.

La figure 8 permet de préciser l'évolution de chaque invariant en fonction de la position verticale dans le couvert végétal. On note que III_a change de signe rapidement dès $z/h = 1.5$ pour l'espacement $\Delta/h = 2$ ($z/h = 2$ pour $\Delta/h = 1$). Les invariants II_a et III_a sont constants dans la région $1 < z/h < 1.5$ et sont du même ordre de grandeur pour chacun des espacements. L'état d'anisotropie semble donc indépendant de la densité du couvert dans la région proche de la canopée.

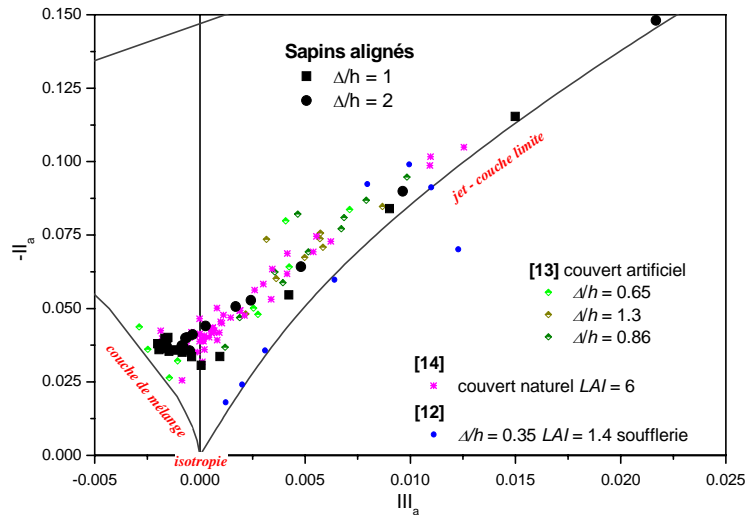


Figure 7 – Carte des invariants d'anisotropie pour des couverts végétaux

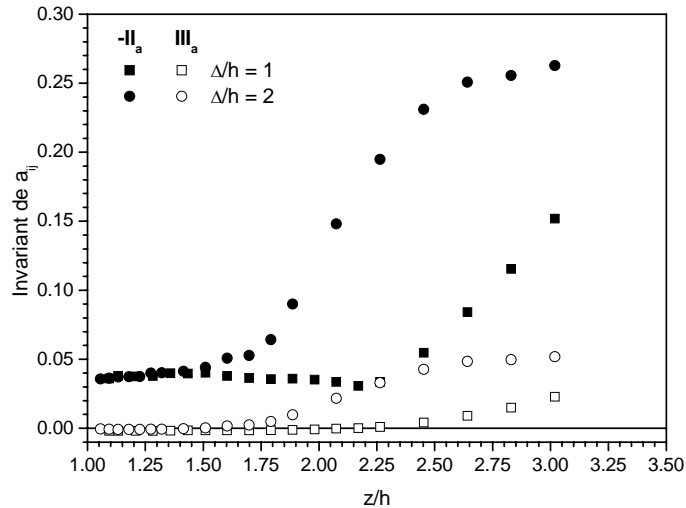


Figure 8 – Evolution des invariants du tenseur d'anisotropie en fonction de la position z/h

5 Conclusion

Un système de mesure a été développé afin de caractériser complètement le tenseur de Reynolds en écoulement de couvert. La technique utilisée est la vélocimétrie laser Doppler à trois composantes. Pour une configuration donnée, plusieurs profils de vitesse ont été relevés, puis moyennés afin de tenir compte de l'hétérogénéité spatiale horizontale des écoulements de couvert. Les premiers résultats ont été exploités pour étudier l'anisotropie d'un écoulement de couche limite en interaction avec un couvert dont on peut faire varier la densité. L'analyse dans le plan des invariants du tenseur d'anisotropie semble mettre en évidence que, dans la région située juste au-dessus du sommet du couvert ($1 < z/h < 1.5$), la turbulence est plutôt de type axisymétrique en forme de disque, ce qui s'accorderait avec l'analogie de couche de mélange.

Afin de valider (ou non) cette conclusion, une campagne de mesures importante est en cours pendant laquelle nous allons compléter la série de mesures relatives au cas $\Delta/h = 2$ et faire varier le type d'élément constituant le couvert et l'arrangement au sol de ces éléments. Implicitement, on fait ainsi varier la densité de couvert. On étudiera ainsi l'effet de la densité de couvert sur l'anisotropie des écoulements de couvert.

Références

- [1] M.R. Raupach, J.J. Finnigan, Y. Brunet, « Coherent eddies in vegetation canopies: the mixing layer analogy », *Boundary-Layer Meteorol.* – vol. 78 (3-4), 351-382 (1996)
- [2] W.J. Massman, « A comparative study of some mathematical models of the mean wind structure and aerodynamic drag of plant canopies », *Boundary-Layer Meteorol.* – vol. 40 (1-2), 179-197 (1987)
- [3] H. Nepf, M. Ghisalberti, B. White, E. Murphy, « Retention time and dispersion associated with submerged aquatic canopies », *Water Resour. Res.* – vol. 43 (4), W0422, doi: 10.1029/2006WR005362, (2007)
- [4] L. Pietri, A. Petroff, M. Amielh, F. Anselmetti, « Turbulence characteristics within sparse and dense canopies », *Environ. Fluid Mech.* – vol. 9 (3), 297-320 (2009)
- [5] L. Pietri, M. Amielh, F. Anselmetti, A. Petroff, « 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)
- [6] S. Pope, « *Turbulent flows* », Cambridge University Press (2000)
- [7] K.-S. Choi, J. L. Lumley, « The return to isotropy of homogeneous turbulence », *J. Fluid Mech.* – 436, 59-84 (2001)
- [8] P.-A. Krogstad, L. E. Torbergsen, « Invariant analysis of turbulent pipe flow », *Flow Turb. Comb.* – 64 (3), 161-181 (2000)
- [9] H.S. Shafi, R.A. Antonia, « Anisotropy of the Reynolds stresses in a turbulent boundary layer on a rough wall », *Exp. Fluids* – 183 (3), 213-215 (1995)
- [10] M.R. Raupach, R.H. Shaw, « Averaging procedures for flow within vegetation canopies », *Boundary-Layer Meteorol.* – 22 (1), 79-90 (1982)
- [11] J.J. Finnigan, « Turbulence in plant canopies », *Annu. Rev. Fluid Mech.* – 32, 519-571 (2000)
- [12] M.D. Nowak, J.S. Warland, A.L. Orchansky, R. Ketler, S. Green, « Wind tunnel and field measurements of turbulent flow in forests. Part I: Uniformly thinned stands », *Boundary-Layer Meteorol.* – 95 (3), 457–495 (2000)
- [13] C. Dunn, F. Lopez, M. Garcia, « Mean flow and turbulence in a laboratory channel with simulated vegetation », *Hydraulic Engineering Series 51*, University of Illinois, Urbana, Illinois (1996).
- [14] J. G. Murphy, J. A. Geddes, A. Petroff, A. de Sousa., R.A. Ellis, S.C. Thomas, « Monitoring carbon, nitrogen, and particulate matter exchange in a northern hardwood forest subject to high N deposition », *American Meteorological Society*, Boulder, CO, USA (2010).

Remerciement

Nous remercions l'équipe technique de l'I.R.P.H.E. pour sa contribution à la conception et au montage du système de vélocimétrie laser Doppler à trois composantes.