

**Impact de la complexité du terrain sur les propriétés des structures cohérentes dans la couche limite atmosphérique : approches expérimentale et numérique**

Clément Fesquet, Philippe Drobinski, Sylvain Dupont, Christian Barthlott,  
Thomas Dubos

► **To cite this version:**

Clément Fesquet, Philippe Drobinski, Sylvain Dupont, Christian Barthlott, Thomas Dubos. Impact de la complexité du terrain sur les propriétés des structures cohérentes dans la couche limite atmosphérique : approches expérimentale et numérique. Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Jan 2008, Toulouse, France. hal-02755779

**HAL Id: hal-02755779**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02755779>**

Submitted on 3 Jun 2020

**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.

**IMPACT DE LA COMPLEXITE DU TERRAIN SUR LES PROPRIETES DES STRUCTURES COHERENTES DANS LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE : APPROCHES EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE**

C. Fesquet<sup>(1)</sup>, P. Drobinski<sup>(2)</sup>, S. Dupont<sup>(3)</sup>, C. Barthlott<sup>(4)</sup> et T. Dubos<sup>(1)</sup>

(1) IPSL/LMD, (2) IPSL/SA, (3) INRA, (4) IMK

**INTRODUCTION**

Les théories existantes sur la structure de la turbulence reposent en grande partie sur une hypothèse d'homogénéité du terrain. Or, la surface terrestre est couverte d'éléments rugueux divers tels que des champs, des forêts ou encore des zones urbaines, ce qui crée des hétérogénéités et ainsi des changements de rugosité en surface. Cette variabilité importante de surfaces complexes perturbe l'écoulement turbulent au-dessus de la surface et a ainsi un impact sur les processus gouvernant les échanges de moment, de chaleur et de matière entre la surface et l'atmosphère. La turbulence dans l'atmosphère est généralement composée de mouvements organisés et désorganisés. Ces structures organisées peuvent prendre la forme de cellules convectives, de rouleaux longitudinaux, de « streaks » ou encore d'ondes et contribuent à environ 50% du transport d'énergie et de matière entre la surface et l'atmosphère (Barthlott et al., 2007).

Nous nous proposons d'évaluer dans cette étude, de façon expérimentale et numérique, l'impact des hétérogénéités du terrain sur la structure de la turbulence à proximité de la surface.

**1. ETUDE EXPERIMENTALE**

Depuis le mois d'avril 2005, des données de turbulence ont été collectées par le SIRTA situé à Palaiseau, sur le site de l'Ecole Polytechnique. Les instruments utilisés sont deux anémomètres soniques placés à 10 et 30m sur un mât de 30m (Figure 1).

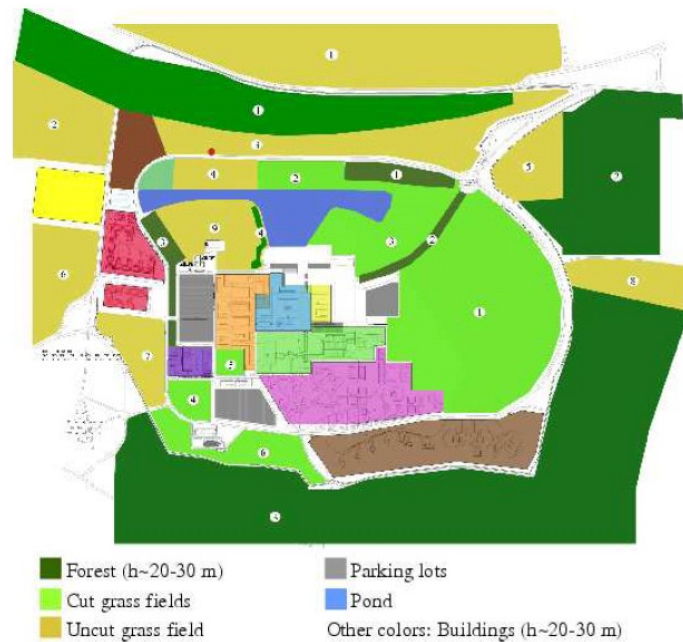


Figure 1. Carte du campus de l'Ecole Polytechnique accueillant le Sirta. Les couleurs correspondent aux différents types de terrain. Le point rouge indique la position du mât instrumenté.

Nous avons tout d'abord classé les données en fonction de la direction du vent correspondant à des éléments topographiques différents en amont de la mesure. Ainsi, nous avons sélectionné quatre secteurs de vent :

- Au nord du mât (entre  $320^\circ$  et  $40^\circ$ ), se trouve une forêt proche (environ 70m).
- A l'est (entre  $100^\circ$  et  $170^\circ$ ), nous avons une forêt lointaine située à environ 400m.
- Au sud ( $170^\circ$ - $260^\circ$ ), se trouve des bâtiments à une distance de 300m environ.
- Dans la direction ouest ( $260^\circ$ - $320^\circ$ ), le terrain est plat et homogène.

Nous avons ensuite classé les données en fonction des conditions de stabilité correspondant en

calculant la longueur de Monin-Obukhov,  $L_{MO} = -\frac{u_*^3 \bar{T}}{kg w' T'}$ . Ainsi, nous avons retenu quatre

classes de stabilité : très instable ( $-200 < L_{MO} < 0$ ), instable ( $-1000 < L_{MO} \leq -200$ ), stable ( $200 \leq L_{MO} < 1000$ ) et très stable ( $0 \leq L_{MO} < 200$ ).

### 1.1 Flux turbulents et énergie cinétique turbulente

La figure 2 montre les valeurs de la vitesse de friction ( $\sim$  tension de Reynolds surfacique) moyennées sur 5 minutes et sur  $10^\circ$  en fonction de la direction du vent et de la stabilité aux deux points de mesure (10m et 30m). Nous remarquons de façon évidente que  $u_*$  dépend fortement de la direction du vent et donc des différents éléments rugueux en amont de la mesure. Les plus petites valeurs sont trouvées dans le secteur homogène (ouest), les plus grandes valeurs étant en aval des bâtiments (direction sud). On peut noter également, particulièrement pour des conditions très stables et stables en aval de la forêt lointaine et des bâtiments, qu'il existe une importante différence (i.e. plus grande que les barres d'erreur) entre 10 et 30m.

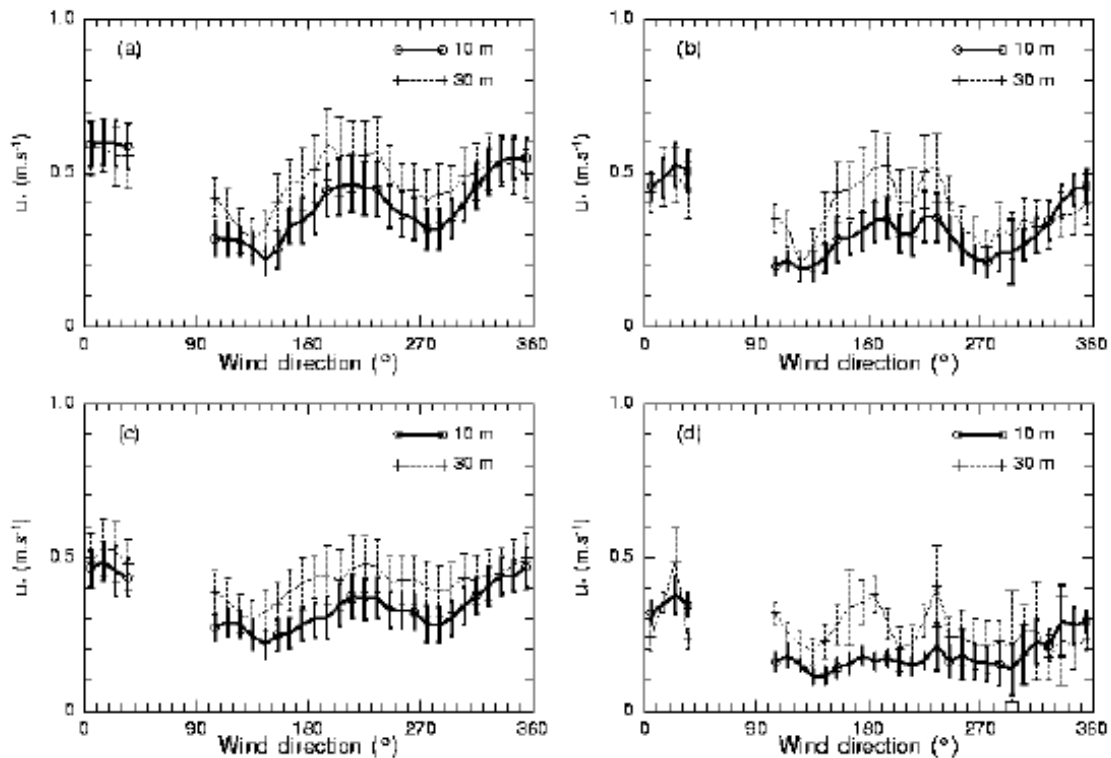


Figure 2. Vitesse de friction à 10m (ligne pleine) et 30m (ligne discontinue) en fonction de la direction du vent à 10m et de la stratification. Les figures a, b, c et d correspondent respectivement à des situations instables, stables, très instables et très stables. Les barres indiquent l'incertitude à 1- $\sigma$ .

Ceci est dû à une importante perturbation du flux, créant de la turbulence, en traversant ces éléments rugueux, perturbation qui se propage jusqu'au mât. Dans la direction homogène, les valeurs entre 10 et 30m sont très similaires. Pour le secteur nord, le mât est dans le sillage de la forêt proche, la turbulence importante homogénéise le profil vertical de  $u_*$  ce qui explique des valeurs similaires aux deux hauteurs de mesure. La vitesse de friction dépend également fortement des conditions de stabilité. En effet, en conditions très instables, la turbulence est essentiellement de source thermique et locale ce qui explique que  $u_*$  ne dépend ni de la direction du vent ni de la hauteur de mesure, dans ces conditions. Cette différence entre 10 et 30m devient significative (i.e. plus grande que les barres d'erreur) en conditions instables, stables et très stables. Dans ces conditions, la principale source de turbulence est cette fois mécaniquement induite par le frottement et l'advection, favorisant ainsi le transport de turbulence vers le mât instrumenté. Des résultats similaires sont obtenus pour l'énergie cinétique turbulente montrant l'impact important des hétérogénéités. Pour les flux de chaleur, les résultats sont différents car pour les stratifications stables et neutres, les flux sont quasiment nuls et donc indépendants des hétérogénéités. Pour les situations très instables, les sources de turbulence sont locales, aucun impact de la complexité du terrain n'est visible dans ce cas.

## 1.2 Structures cohérentes

Comment citer ce document :

	CLOSE FOREST			
	very stable	stable	unstable	very unstable
$F_{coh}(uw)_{10m}$ (%)	46 ± 6	44 ± 6	37 ± 5	42 ± 3
$F_{coh}(wT)_{10m}$ (%)	45 ± 6	48 ± 6	44 ± 6	45 ± 2
$FO_{10m}$ (30 min <sup>-1</sup> )	12 ± 2	11 ± 3	8 ± 1	8 ± 2
$F_{coh}(uw)_{30m}$ (%)	43 ± 3	39 ± 3	42 ± 5	53 ± 3
$F_{coh}(wT)_{30m}$ (%)	42 ± 3	42 ± 2	45 ± 3	51 ± 2
$FO_{30m}$ (30 min <sup>-1</sup> )	11 ± 1	10 ± 1	8 ± 1	7 ± 1
	DISTANT FOREST			
	very stable	stable	unstable	very unstable
$F_{coh}(uw)_{10m}$ (%)	51 ± 6	42 ± 9	38 ± 20	48 ± 4
$F_{coh}(wT)_{10m}$ (%)	48 ± 5	31 ± 11	64 ± 13	49 ± 2
$FO_{10m}$ (30 min <sup>-1</sup> )	10 ± 1	8 ± 5	9 ± 2	8 ± 1
$F_{coh}(uw)_{30m}$ (%)	44 ± 5	44 ± 4	42 ± 10	50 ± 6
$F_{coh}(wT)_{30m}$ (%)	45 ± 4	47 ± 2	55 ± 10	50 ± 4
$FO_{30m}$ (30 min <sup>-1</sup> )	10 ± 1	10 ± 1	8 ± 1	6 ± 1
	BUILDINGS			
	very stable	stable	unstable	very unstable
$F_{coh}(uw)_{10m}$ (%)	46 ± 4	39 ± 4	38 ± 3	42 ± 2
$F_{coh}(wT)_{10m}$ (%)	44 ± 3	42 ± 5	46 ± 3	46 ± 2
$FO_{10m}$ (30 min <sup>-1</sup> )	10 ± 1	9 ± 1	8 ± 1	8 ± 1
$F_{coh}(uw)_{30m}$ (%)	40 ± 3	39 ± 2	40 ± 2	49 ± 3
$F_{coh}(wT)_{30m}$ (%)	44 ± 2	45 ± 3	46 ± 4	50 ± 2
$FO_{30m}$ (30 min <sup>-1</sup> )	9 ± 1	9 ± 1	8 ± 1	7 ± 1
	OPEN FIELD			
	very stable	stable	unstable	very unstable
$F_{coh}(uw)_{10m}$ (%)	46 ± 4	40 ± 6	35 ± 6	45 ± 3
$F_{coh}(wT)_{10m}$ (%)	46 ± 2	42 ± 5	48 ± 5	48 ± 2
$FO_{10m}$ (30 min <sup>-1</sup> )	11 ± 1	10 ± 1	7 ± 2	7 ± 1
$F_{coh}(uw)_{30m}$ (%)	43 ± 2	39 ± 3	39 ± 4	50 ± 2
$F_{coh}(wT)_{30m}$ (%)	45 ± 2	44 ± 4	47 ± 6	51 ± 2
$FO_{30m}$ (30 min <sup>-1</sup> )	11 ± 1	9 ± 1	7 ± 1	7 ± 1

Tableau 1. Valeurs moyennes des propriétés des structures cohérentes pour les quatre secteurs de vent et les quatre classes de stabilité aux deux hauteurs de mesure 10 et 30m ainsi que l'incertitude correspondante.

Pour détecter de telles structures, nous avons utilisé une méthode basée sur la transformée en ondelettes de séries temporelles des fluctuations de la température. Cette méthode nous permet d'estimer l'occurrence de ces structures en 30 minutes ainsi que leur contribution aux flux turbulents de mouvement et de chaleur (Barthlott et al., 2007). Le tableau 1 est un récapitulatif des valeurs moyennes et incertitudes du nombre de structures détectées ainsi que de leur contribution aux flux en 30 minutes, pour les quatre secteurs de vent et les quatre classes de stabilité, aux deux hauteurs de mesure. Il est surprenant de constater l'absence de réelle différence entre les secteurs de vent, que ce soit pour la fréquence d'occurrence (FO) ou pour leur contribution aux flux (Fcoh), malgré l'impact de la direction du vent sur les variables turbulentes moyennées. Le fait que les propriétés des structures cohérentes soient indépendantes des éléments topographiques en amont de la mesure est un important résultat de cette étude. Un tel résultat peut être expliqué par le fait que les structures cohérentes sont créées bien au-dessus des éléments topographiques par cisaillement et/ou instabilité convective et sont ensuite transportées vers le bas. Ainsi, les propriétés des structures cohérentes (fréquence d'occurrence, contribution aux flux...) sont indépendantes de la complexité du terrain.

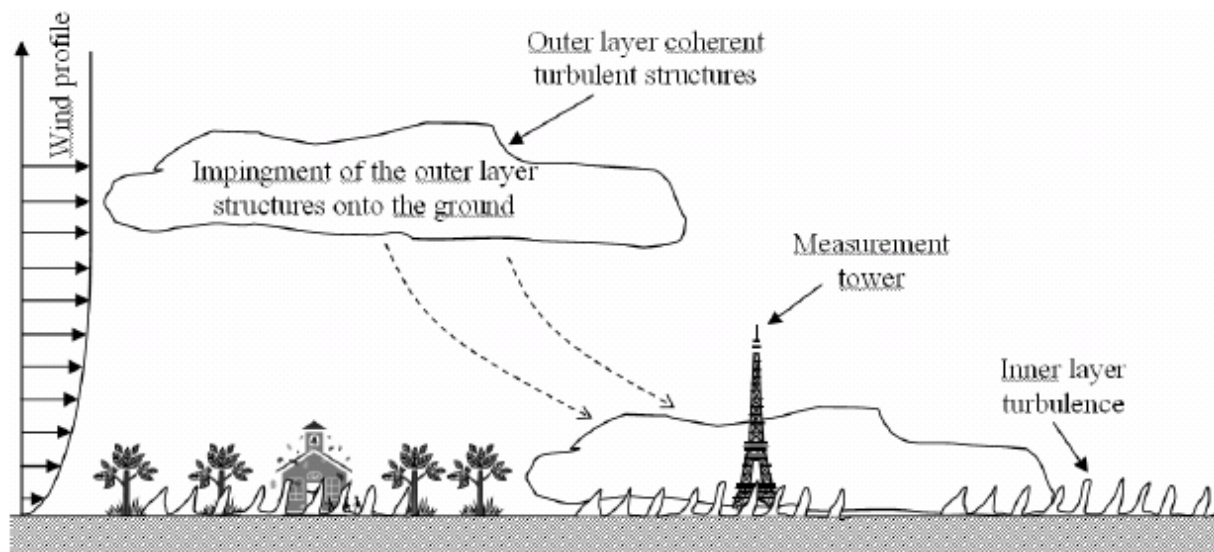


Figure 3. Schéma expliquant pourquoi les propriétés des structures cohérentes sont indépendantes de la complexité du terrain.

La figure 3 montre schématiquement les processus expliquant pourquoi les propriétés des structures cohérentes sont indépendantes de la complexité du terrain. Néanmoins, cette étude expérimentale ne nous a pas permis de savoir ce qu'il se passe près des éléments topographiques (moins de 70m). Les simulations numériques nous permettront de répondre à cette question et également de voir si l'on arrive à prédire le même comportement pour les propriétés des structures cohérentes.

## 2. ETUDE NUMÉRIQUE

### 2.1 Simulation LES avec le modèle ARPS

Les simulations LES ont été effectuées en utilisant le modèle numérique ARPS (Dupont et Brunet, soumis). La grille est orthogonale dans la direction horizontale et étirée sur la verticale. Le modèle résout les équations de conservation pour les 3 composantes de la vitesse, la pression, la température potentielle et l'humidité. L'équation de fermeture turbulente est d'ordre 1.5 en énergie cinétique turbulente et est anisotrope car utilisant des coefficients de viscosité turbulente différents selon la verticale et l'horizontale.

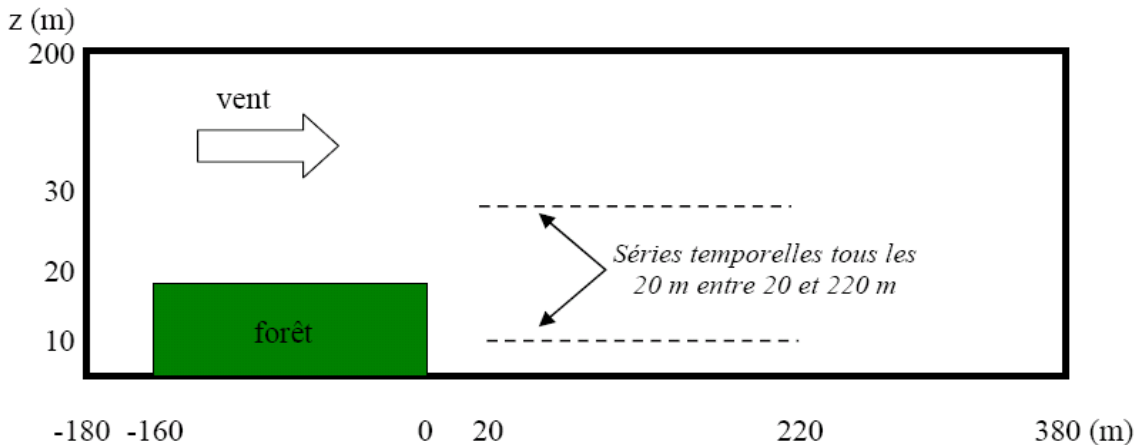


Figure 4. Coupe verticale du domaine de calcul dans le sens du vent moyen pour un y fixé (exemple avec forêt).

La figure 4 représente une coupe verticale (x-z) du domaine de calcul dans le cas avec la barrière d'arbres. Des simulations 3D ont été effectuées dans ce domaine de dimension  $560 \times 200 \times 200 \text{ m}^3$ , correspondant à  $280 \times 100 \times 105$  points de grille dans les directions x, y et z, respectivement. Le maillage horizontal est constitué par des cellules de 2m. La résolution verticale est de 0.5m à la surface et étirée au-dessus, elle est de 2m en moyenne. Pour reproduire les conditions expérimentales, nous extrayons les données simulées toutes les secondes à 10 et 30m. Le profil vertical du vent moyen est logarithmique, la vitesse du vent

est donc égale à  $\frac{u_*}{k} \log\left(\frac{z}{z_0}\right)$  avec  $u_*$ , la vitesse de friction,  $k$  la constante de Von Karman et

$z_0=0.03\text{m}$  la hauteur de rugosité. Les conditions aux limites latérales sont périodiques, les conditions en surface sont rigides. Les flux de surface sont paramétrés en utilisant les lois aérodynamiques. Une couche de Rayleigh de 70m d'épaisseur est utilisée comme condition limite en haut du domaine, pour absorber les ondes se propageant vers le haut et éliminer la réflexion. De plus, l'écoulement est piloté, dans les hautes couches du domaine, par un vent géostrophique constant avec l'altitude. Pour le cas avec la barrière d'arbres, la hauteur des arbres a été fixée à 20m et l'indice de surface foliaire à 2.

## 2.2 Champs de vitesse et structures cohérentes

Nous avons tout d'abord étudié les variables turbulentes moyennées de l'écoulement telles que l'énergie cinétique turbulente ou encore la vitesse de friction (non montré). Dans le cas hétérogène, l'écoulement s'est révélé plus turbulent que dans le cas homogène donc la barrière d'arbres a un impact non négligeable sur les variables de la turbulence.

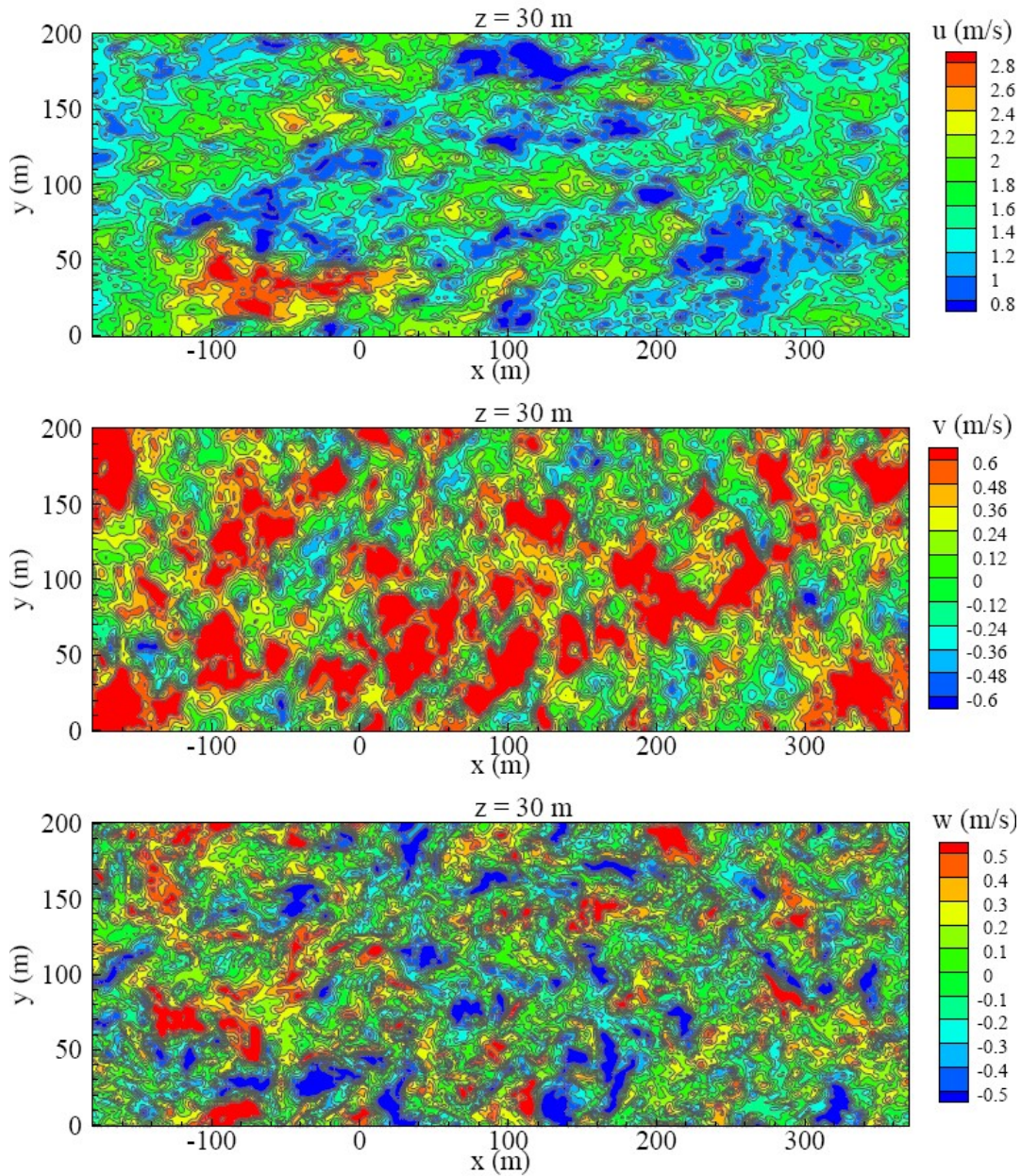


Figure 5. Exemple de champs instantanés des trois composantes de la vitesse sur une coupe horizontale à  $z=30$ m.

La figure 5 représente les champs instantanés des trois composantes de la vitesse sur une coupe horizontale à  $z=30$ m. L'organisation de l'écoulement en structures cohérentes est évidente sur cette figure. L'extension horizontale de ces structures est d'environ 100m à cette hauteur. Ce qui est néanmoins frappant, c'est l'absence d'effet de la barrière d'arbres sur l'écoulement. En effet, que l'on se situe juste au-dessus de celle-ci (de -180 à 0) ou au-delà de cette barrière, l'écoulement ne semble pas perturbé.

Nous avons ensuite utilisé la même méthode que précédemment pour détecter les structures cohérentes sur 30 minutes et leur contribution au flux de quantité de mouvement.

Le tableau 2 représente les valeurs obtenues pour les propriétés des structures cohérentes: fréquence d'occurrence de ces structures en 30 minutes (FO) et leur contribution au flux de mouvement ( $F_{coh}(uw)$  in %) en fonction du point de mesure et de la distance au changement de rugosité. Les incertitudes associées à ces valeurs moyennes ont été calculées en effectuant



## Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Météo-France, Toulouse, 22-24 janvier 2008

des simulations, en cas homogène, à différents points du domaine, elles sont de l'ordre de 20-25%. Les nombres en rouge correspondent à des cas où la détection a échoué, ils n'ont pas été pris en compte dans le calcul des valeurs moyennes.

Fetch	WITH FOREST CANOPY			
	10 m		30 m	
	FO	Fcoh(uw)	FO	Fcoh(uw)
1h	<b>2</b>	<b>11</b>	8	31
2h	<b>7</b>	<b>43</b>	6	66
3h	9	33	7	48
4h	13	55	5	33
5h	11	34	<b>1</b>	<b>40</b>
6h	9	50	<b>4</b>	<b>67</b>
7h	4	37	6	64
8h	13	35	4	53
9h	<b>2</b>	<b>63</b>	14	57
10h	9	24	4	56
<b>Means</b>	<b>10</b>	<b>38</b>	<b>7</b>	<b>51</b>

Tableau 2. Valeurs des propriétés des structures cohérentes aux deux hauteurs de mesure, 10 et 30m dans le cas hétérogène.

Pour le cas hétérogène, l'impact du fetch, notamment au-delà de 3h, n'est pas évident quelque soit la hauteur de mesure. En effet, concernant le nombre de structures comme leur contribution aux flux turbulents, aucune tendance n'est clairement mise en évidence, ces deux valeurs fluctuent apparemment aléatoirement. Nous remarquons qu'en moyenne la contribution aux flux est plus importante à 30m (51%) qu'à 10m (38%). Pourtant, l'incertitude étant de 25%, ces différences ne sont pas significatives. Cependant nous détectons presque le même nombre de structures aux deux hauteurs, 10 à 10m contre 7 à 30m. Près de la barrière d'arbres (1h et 2h), la détection a échoué à 10m probablement parce qu'à cette hauteur, le point de mesure est en-dessous de la canopée (20m). La barrière fait ainsi office d'obstacle physique pour le développement des structures de grande taille (environ 100m) vers les basses couches, ce qui causerait la mauvaise détection. Cette hypothèse est en partie confirmée par le fait qu'à 30m, nous ne retrouvons pas le même comportement. Le nombre de réalisations numériques insuffisants pourraient être à l'origine des autres mauvaises détections ou encore de la fluctuation importante des valeurs aux différents fetchs. Si nous comparons à présent les valeurs moyennées en cas homogène et hétérogène, nous observons que les structures contribuent plus aux flux en condition homogène (56%-63%) qu'en condition hétérogène (38%-51%) aux deux points de mesure. De plus, nous détectons plus de structures à 10m pour dans le cas hétérogène que dans le cas homogène, nous constatons un comportement inverse à 30m. Mais encore une fois, l'incertitude étant importante (25%), ces différences ne sont pas significatives.

Malgré le nombre limité de données, posant le problème de représentativité, la comparaison avec la partie expérimentale est intéressante. En effet, dans cette précédente étude, nous n'avons pas trouvé de différence, dans l'incertitude statistique (10%), entre les secteurs homogènes et hétérogènes que ce soit pour les valeurs moyennées du nombre de structures détectées ou de la contribution aux flux. Dans l'étude numérique, concernant le nombre de structures cohérentes détectées (FO) à 10m, nous obtenons le même comportement avec des différences souvent de l'ordre de l'incertitude (20-25%) avec toutefois des cas où l'on dépasse

## Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Météo-France, Toulouse, 22-24 janvier 2008

cette marge d'erreur (exemple à 7h). A 30m, nous pouvons faire la même remarque, avec seulement quelques cas dépassant les barres d'erreur (à 9h notamment). Concernant la contribution aux flux, nos remarques sont similaires avec l'essentiel des valeurs dans l'incertitude avec seulement quelques cas hors incertitude. Si nous comparons à présent les valeurs moyennées obtenues expérimentalement et numériquement, nous remarquons que la contribution aux flux a tendance à être plus importante lors des simulations aux deux hauteurs de mesure. En effet, nous trouvons une contribution de 41-43% expérimentalement et 56-63% numériquement en terrain homogène et 42-45% expérimentalement et 38-51% numériquement. Nous pouvons donc en conclure que la LES surestime la contribution des structures cohérentes aux flux sauf à 10m en cas hétérogène. Pour ce qui est du nombre de structures détectées, 9 structures sont détectées expérimentalement à 10 et 30m contre 7 et 12 respectivement à 10 et 30m, numériquement dans le cas homogène. En terrain hétérogène, nous détectons 9 structures expérimentalement en moyenne aux deux hauteurs contre 10 et 7 numériquement, respectivement à 10 et 30m. La fréquence d'occurrence des structures en 30 minutes est donc plutôt bien prédit par le modèle. A noter que ces différences entre simulation LES et étude expérimentale sont essentiellement dues au fait que les simulations sont « idéalisées » avec des paramètres fixés (par exemple l'indice de surface foliaire) et ainsi pas exactement fidèles aux conditions réelles du SIRTA. Pourtant, si nous comparons le cas de notre forêt « proche », située à environ 3h du mât instrumenté du SIRTA avec la simulation à la distance de 3h, nous détectons 10 structures à 10m et 9 à 30m quand nous en détectons respectivement 9 et 7 numériquement. La contribution aux flux dans ce cas est de 42% à 10m et 44% à 30m contre 33% et 48% à 10 et 30m respectivement, numériquement. Nous ne pouvons donc, malgré tout, qu'observer un bon accord entre mesures et simulations

### CONCLUSION

Cette étude évalue expérimentalement et numériquement l'impact des hétérogénéités du terrain sur les propriétés des structures cohérentes à partir de simulations LES (Large-Eddy Simulations) réalisées sans et avec hétérogénéités de surface (barrière d'arbres) et de mesures de turbulence collectées sur la tour instrumentée du SIRTA par deux anémomètres soniques à 10 et 30 m d'altitude.

A partir d'une technique de détection des structures cohérentes basée sur la transformée en ondelettes de séries temporelles des fluctuations haute fréquence des variables atmosphériques (composantes du vent et température) mesurées sur le SIRTA et simulées par LES, il est montré que quelque soit les éléments en amont de la mesure, les structures cohérentes semblent avoir des propriétés universelles totalement indépendantes de la nature du terrain: le nombre de structures, leur durée de vie, le temps de séparation entre deux structures consécutives et leur contribution aux flux (moment et chaleur) semblent être indépendants de la complexité du terrain. Malgré les différences entre une simulation LES « idéalisée » et les mesures en condition « réelle » du SIRTA, l'accord entre ces deux outils est plutôt bon. Ces résultats sont fondamentaux dans la mesure où ces structures cohérentes contribuent de façon non négligeable au transport d'énergie et de matière entre la surface et l'atmosphère, et leurs propriétés « universelles » faciliteront probablement leur paramétrisation dans les modèles météorologiques même en présence d'hétérogénéités importantes.

### RÉFÉRENCES

Comment citer ce document :

Fesquet, C., Drobinski, P., Dupont, S., Barthlott, C., Dubos, T. (2008). Impact de la complexité du terrain sur les propriétés des structures cohérentes dans la couche limite atmosphérique : approches expérimentale et numérique. In: Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère (p. 10 p.). Presented at Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère. Toulouse. FRA (2008-01-22 - 2008-01-24).

**Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Météo-France, Toulouse, 22-24 janvier 2008**

Barthlott C., Drobinski P., Fesquet C., Dubos T., Pietras C., 2007. Long-term study of coherent structures in the atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorol.* 125, 1-24.

Dupont S., Brunet Y. Influence of foliar density profile on canopy flow: a large-eddy simulation study. (soumis)