

Analyse des interactions entre la basse atmosphère et les canopées denses

Laurent PERRET

La canopée, définie comme la région limitée par la surface du sol et le sommet des obstacles recouvrant celui-ci, est le lieu où prennent place l'ensemble des processus physiques responsables des échanges entre la basse atmosphère et la surface de la Terre. En effet, qu'elle soit urbaine ou végétale, c'est au sein de la canopée qu'ont lieu les transferts de quantité de mouvement, de chaleur ou de matière, ainsi que les phénomènes de dispersion et de transport de divers scalaires passifs ou actifs. Elle est aussi un lieu de vie, à la fois pour l'humain et pour la bio-diversité. Comprendre la manière dont se font les interactions canopée-atmosphère est donc crucial, notamment afin de pouvoir développer des stratégies d'aménagement et de gestion du tissu urbain dans le contexte de changement climatique, ainsi que développer des outils de modélisation et de prédiction.

C'est dans ce contexte que s'inscrivent mes travaux résumés dans ce mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches. Les activités de recherche que j'ai menée depuis 2006 au LHEEA à Centrale Nantes se sont articulées autour de deux axes principaux: l'étude de l'interaction entre la basse atmosphère et les canopées denses, et l'estimation du champ de vitesse en écoulement turbulent. Ces deux pistes ont été suivies de manière simultanée, les développements d'ordre plus méthodologique répondant aux besoins de l'analyse des écoulements étudiés sur la base d'un ensemble de données expérimentales limitées. Une grande part de mes travaux s'appuyant sur des expériences de laboratoire menées en soufflerie atmosphérique, le développement des moyens expérimentaux (soufflerie, métrologie) nécessaires à la conduite de mes travaux de recherche a également été mené.

Le premier axe de recherche a permis de réaliser des avancées scientifiques complémentaires de celles disponibles alors dans la littérature. En s'intéressant à l'aspect dynamique de l'interaction entre les deux régions de la couche limite urbaine ou végétale et non plus seulement à l'effet global de la présence de la paroi sur l'écoulement de couche limite, il a été possible de démontrer le couplage instantané entre la sous couche rugueuse et la région externe de la couche limite. L'empreinte des grandes échelles de la couche limite, qui se superposent et modulent la turbulence de proche canopée, a été mise en évidence, indépendamment de la morphologie de la canopée, et quantifiée d'un point de vue énergétique. Les bilans d'énergie cinétique turbulente par échelle ont en effet permis de confirmer et quantifier l'interaction jusqu'alors constatée. Combinés à l'étude plus classique de la structure de la couche limite se développant sur des canopées denses de différentes morphologies, ces résultats ont permis de compléter ceux existant dans la littérature à propos de la couche limite turbulente canonique de plaque plane et lisse. Si la proposition Townsend en 1976 selon laquelle il existe, à grand nombre de Reynolds, un régime de similitude de la région externe dans lequel la structure de la turbulence n'est plus influencée par la rugosité de la paroi à partir d'une distance à la paroi suffisante n'a pas encore de réponse définitive, l'organisation spatio-temporelle des écoulements de couche limite semble similaire quelle que soit la nature de la paroi, notamment en termes de types de structures cohérentes présentes dans l'écoulement et de la nature de leurs interactions.

Le deuxième axe de recherche suivi au cours de mes travaux a concerné la thématique de l'estimation du champ de vitesse en écoulements turbulents parallèlement à l'étude des interactions couche limite - canopée. Le principal objectif de ces études a été le développement de méthodes et de modèles permettant d'estimer le champ de vitesse de l'écoulement à partir d'observations en un faible nombre de points. Le premier aspect de ces travaux a porté sur la mise en œuvre de l'estimation stochastique et son développement dans le domaine spectral en l'utilisant comme outil d'extraction des grandes échelles de

la couche limite, ou de manière plus originale comme un outil de couplage entre expérience de laboratoire et expérience de terrain pour l'estimation du champ de vitesse instantané dans une rue canyon à partir d'un nombre limité d'anémomètres ultra-soniques. Dans ces travaux, la mise en œuvre de l'estimation stochastique a reposé sur l'utilisation simultanée (et de manière quasi systématique lors des expériences menées en soufflerie sur les canopées urbaines) de la vélocimétrie par images de particules (PIV) et de l'anémométrie à fil chaud. Afin d'éviter la mise en œuvre de ces anémomètres en complément de la PIV, des travaux ont également été menés sur la décomposition orthogonale aux valeurs propres et la modification de son noyau de manière à prendre en compte la cohérence temporelle de l'écoulement malgré la faible résolution temporelle des systèmes PIV mis en œuvre. Des travaux ont également été entamés afin d'étudier le potentiel des méthodes de type machine learning basées sur l'utilisation de réseaux de neurones pour l'estimation de certaines variables de l'écoulement à partir d'un nombre réduit de mesures. Les premiers résultats obtenus sur des systèmes dynamiques simples ont permis de démontrer la faisabilité de ce type d'approches. Des analyses portant à la fois sur les méthodes de réduction et d'estimation dans le cadre d'écoulements turbulents à complexité et nombre de Reynolds croissants ont également été entreprises. Enfin, je me suis intéressé de nouveau à la problématique de la génération de conditions amont instationnaires pour les calculs par Simulation des Grandes Echelles (LES) dans le contexte des écoulements atmosphériques en interaction avec un ou des bâtiments. La méthode employée durant ces travaux, basée sur la génération de champs de vitesse synthétiques respectant des statistiques en un ou deux points (en espace et en temps) de l'écoulement a permis une amélioration de la représentativité des calculs LES effectués, à la fois pour le champ de vitesse simulé mais aussi pour les efforts de pression sur l'obstacle. Néanmoins, l'approche reste perfectible notamment dans la prise en compte de la structuration spatio-temporelle instantanée de l'écoulement.

Sur la base de ces travaux, des perspectives de travail sont envisagées, notamment sur l'étude de l'influence de la stabilité atmosphérique de la couche limite sur les mécanismes d'interaction inter-échelles en région de proche canopée en raffinant la décomposition échelle par échelle de l'écoulement. Il serait en particulier souhaitable de corroborer les résultats obtenus sur la base d'expériences de laboratoire ou de simulations numériques à l'aide de données issues d'observations *in situ*. Une autre piste de travail est la poursuite du développement de méthodes d'estimation et de modélisation d'ordre bas des écoulements turbulents, notamment en explorant les possibilités offertes par les méthodes basées sur et pilotées par les données couplées à des méthodes de réduction de dimension et d'assimilation de données dans le contexte des écoulements urbains à l'échelle de la rue ou du quartier. Ces travaux permettront également d'approfondir la thématique des conditions amont instationnaires pour les calculs de type LES.