Étude expérimentale et numérique de l'aérodynamique des arbres

Porteur : Livia Grandoni
(Le porteur s'engage à participer et présenter son projet aux journées de la GI-EIF)
Partenaires : x
Laboratoire : Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique
Composante : Ecole Centrale de Lyon

Nature du financement demandé : Stage de M2

Dates : Mars 2027 – Septembre 2027

Résumé :

(Version anglaise) Urban trees can reduce air pollution and heat stress through pollutant deposition, shading and evapotranspiration. However, they also modify airflow and may reduce ventilation and pollutant dispersion in urban areas. Wind-tunnel experiments and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations provide complementary ways to study these effects, but reliable numerical predictions require experimental validation. Since the complex geometry of trees cannot be fully represented in CFD, their aerodynamic effects are usually modelled using simplified porous-canopy approaches. This internship combines numerical and experimental work to address two open issues in the current literature. The numerical part will use Large Eddy Simulations to study airflow around an isolated tree and compare the results with existing wind-tunnel measurements. Particular attention will be given to the ability of CFD simulations to reproduce turbulent kinetic energy (TKE) fields, which remains a challenge in vegetation modelling. The experimental part will investigate the effects of leaf size and orientation on the drag coefficient and aerodynamic porosity (two key parameters in CFD modelling), while keeping the leaf area density constant. Idealised tree crowns, made of circular disks mounted on supporting grids, will be tested in the LMFA wind tunnel. Drag force and upstream and downstream air velocities will be measured.

(Version française) Les arbres urbains atténuent la pollution atmosphérique et le stress thermique par le dépôt des polluants, l'ombrage et l'évapotranspiration. Cependant, ils modifient les écoulements et peuvent limiter la ventilation et la dispersion des polluants. Les expériences en soufflerie et les simulations de dynamique des fluides numérique (CFD) étudient ces phénomènes, mais les prédictions numériques nécessitent une validation expérimentale. La géométrie des arbres étant trop complexe pour la CFD, leurs effets aérodynamiques sont modélisés par des milieux poreux. Ce stage étudie des questions ouvertes par des approches numériques et expérimentales. La partie numérique utilisera des simulations aux grandes échelles (LES) autour d'un arbre isolé, comparées à des mesures en soufflerie. L'accent sera mis sur la capacité des simulations à reproduire les champs d'énergie cinétique turbulente (TKE), dont la prédiction reste difficile avec la végétation. La partie expérimentale étudiera l'effet de la taille et de l'orientation des feuilles sur le coefficient de traînée et la porosité aérodynamique, deux paramètres clés en CFD, à densité surfacique foliaire (LAD)

constante. Des houppiers idéalisés, composés de disques circulaires montés sur des grilles, seront testés dans la soufflerie du LMFA. Les forces de traînée et les vitesses de l'air en amont et en aval seront mesurées.

Sujet développé :

(Version anglaise)
Context: Urban air pollution and heat stress are major environmental and public health challenges in contemporary cities, whose impacts are further exacerbated by climate change and urbanisation [1]. Urban trees can help address these challenges by improving outdoor thermal comfort through shading and evapotranspiration, while reducing airborne pollutant concentrations through dry deposition [2]. However, trees also modify the local flow, potentially reducing urban ventilation, and thus, hindering pollutant dispersion and heat removal within street canyons [3]. The overall impact of urban trees therefore results from competing mechanisms that still need to be assessed accurately. Wind-tunnel experiments provide valuable insights into the complex interactions between vegetation and airflow, enabling the investigation of individual physical processes under well-controlled and reproducible conditions. However, their ability to resolve the full three-dimensional structure of flow, and concentration and temperature fields is limited by discrete measurements and experimental constraints. On the other hand, Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations provide spatially continuous, three-dimensional fields [3] and enable full-scale simulations, thereby overcoming limitations associated with scaling effects in wind-tunnel experiments. Nevertheless, reliable CFD predictions require rigorous experimental validation, particularly when modelling vegetation. Indeed, explicitly resolving the complex, multi-scale geometry of trees is computationally prohibitive. Their geometry must therefore be simplified, and their aerodynamic effects on the surrounding flow represented through appropriate parameterisations, whose accuracy must be assessed against experimental data.

Tree modelling in CFD simulations: Trees are commonly modelled in CFD simulations as homogeneous porous regions, within which a sink term ($\boldsymbol{S_u}$) is introduced into the momentum conservation equations governing the flow to account for the aerodynamic resistance exerted by the vegetation:

$$\boldsymbol{S_u} = -LAD\ C_d^v\ |\boldsymbol{u}|\ \boldsymbol{u}\ . \qquad (1)$$

In eq. (1), C_d^v denotes the volumetric drag coefficient, $\boldsymbol{u}$ is the local airflow velocity, and LAD represents the one-sided leaf area density, i.e., the leaf surface area per unit volume of tree crown, accounting for only one side of each leaf. Some studies also incorporate explicit parametrisations of vegetation-induced modifications to turbulent kinetic energy (TKE) production and dissipation [4]. To facilitate the experimental validation of CFD models for tree canopies, [5] recently proposed an analytical relationship linking the two parameters LAD and C_d^v to quantities that can be directly measured in wind-tunnel experiments, namely aerodynamic porosity (α) and the drag coefficient (C_d). The former, quantifies the fraction of airflow passing through the tree crown relative to the airflow diverted around it, whereas the latter, which differs from the volumetric drag coefficient, is defined as $C_d = \frac{2\ F_d}{\rho\ U_{ref}^2\ A_f}$ (where F_d is the bulk drag force measured on a single tree, ρ the air density, U_{ref} the upstream reference velocity, and A_f the projected frontal area).

Previous work and open problems: In the recent study [3], high-fidelity CFD simulations were conducted to investigate the effects of trees on airflow, pollutant dispersion, and ventilation efficiency within a street canyon oriented perpendicular to the approaching wind. Unlike most previous studies, the street canyon here is embedded within a continuous urban canopy. The numerical results were compared with measurements carried out with an analogous configuration in the wind tunnel of the Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustiqe (LMFA) of the Ecole Centrale de Lyon (ECL). Although the numerical simulations reproduced the mean flow fields, discrepancies with the experimental results were observed in the TKE field. This discrepancy may arise from both the tree modelling approach and the difficulty of accurately capturing the complex flow dynamics above the urban canopy. It is therefore worth investigating a simpler configuration in which vegetation is the only factor considered, allowing the effects of its modelling approach to be isolated.

Experimental studies report volumetric drag coefficients ranging from 0.1 to 0.3, while most CFD studies assume a constant value of 0.2 [5]. A systematic investigation of the effects of leaf size and orientation on C_d^v would help better constrain its variability.

Objective of the internship: The internship will involve both a numerical and an experimental component**.** The first part of the internship will focus on high-fidelity numerical simulations, specifically Large Eddy Simulations (LES), of an atmospheric boundary layer approaching an isolated tree. The numerical results will be compared against experimental measurements conducted in the atmospheric wind tunnel at LMFA [6]. In this experimental campaign, three different tree models with distinct crown porosities were investigated and which were characterized in terms of drag coefficient and aerodynamic porosity. The flow field upstream and downstream of each tree model was characterized using Particle Image Velocimetry. The numerical simulations will be carried out using uDALES, an open-source LES solver developed at Imperial College London. This work builds on an existing collaboration with researchers at this institution. The analysis will primarily focus on the ability of the numerical simulations to reproduce the experimentally measured TKE field. Different explicit parameterizations of the effects of trees on TKE production and dissipation can be tested and compared. Note that such a systematic comparison is currently lacking in the literature [4].

The second objective is to experimentally investigate the sensitivity of C_d and α (and, consequently, C_d^v) of a tree crown to leaf orientation and leaf size, while keeping the LAD constant. To this end, idealized tree-canopy models will be designed and manufactured. Each model will consist of a supporting grid onto which circular disks of different diameters, representing individual leaves, can be mounted. The disks will be arranged to reproduce different leaf orientations while maintaining a constant LAD. The idealized canopy models will then be tested in the LMFA wind tunnel, where a uniform incoming flow can be generated at different wind speeds. Drag force measurements will be performed using an aerodynamic force balance, while velocity measurements upstream and downstream of the tree models will be obtained using either a Pitot tube or a hot-wire anemometer. The use of laser-based measurement techniques (such as PIV) will not be considered, as these techniques are not accessible by internship students.

References

[1] World Health Organization. (2025). The synergies of heat stress and air pollution and its health impacts. World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/B09369

[2] Janhäll, S., 2015. Review on urban vegetation and particle air pollution – deposition and dispersion. Atmos. Environ. 105, 130–137.

[3] Fellini, S., Majumdar, D., Salizzoni, P., van Reeuwijk, M., 2026. Three-dimensional pollutant dispersion in tree-lined urban canyons: Combined wind-tunnel and LES analysis. Atmos. Environ. 367, 121748.
[4] Buccolieri, R., Santiago, J.-L., Rivas, E., Sáanchez, B., 2019. Reprint of: Review on urban tree modelling in CFD simulations: Aerodynamic, deposition and thermal effects. Urban For. Urban Green. 37, 56–64.
[5] Majumdar, D., Vita, G., Ramponi, R., Glover, N., van Reeuwijk, M., 2025. The drag length is key to quantifying tree canopy drag. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 261, 106084.
[6] Grandoni, L., Michard, M., Grosjean, N., et al., 2026. The dynamics of a wake behind an isolated model tree within an atmospheric boundary layer. Boundary-Layer Meteorol. 192, 26.

(Version française)

Contexte : La pollution atmosphérique et le stress thermique constituent des enjeux majeurs pour l'environnement et la santé publique dans les villes contemporaines, dont les effets sont accentués par le changement climatique et l'urbanisation [1]. Les arbres urbains peuvent contribuer à relever ces défis en améliorant le confort thermique extérieur grâce à l'ombrage et à l'évapotranspiration, tout en réduisant les concentrations de polluants atmosphériques par dépôt sec [2]. Cependant, les arbres modifient également les écoulements locaux, pouvant ainsi réduire la ventilation urbaine et limiter la dispersion des polluants ainsi que l'évacuation de la chaleur dans les rues canyons [3]. L'impact global des arbres urbains résulte donc de mécanismes antagonistes qui doivent encore être évalués avec précision. Les expériences en soufflerie apportent des informations précieuses sur les interactions complexes entre végétation et écoulements d'air, en permettant d'étudier des processus physiques individuels dans des conditions contrôlées et reproductibles. Toutefois, leur capacité à caractériser la structure tridimensionnelle complète des écoulements ainsi que les champs de concentration et de température est limitée par le caractère ponctuel des mesures et les contraintes expérimentales. À l'inverse, les simulations de mécanique des fluides numérique (CFD) fournissent des champs tridimensionnels continus [3] et permettent des simulations à l'échelle réelle, dépassant ainsi les limites liées aux effets d'échelle des expériences en soufflerie. Néanmoins, des prédictions CFD fiables nécessitent une validation expérimentale rigoureuse, en particulier pour la modélisation de la végétation. En effet, représenter explicitement la géométrie complexe et multi-échelle des arbres nécessite des ressources de calcul prohibitives. Leur géométrie doit donc être simplifiée et leurs effets aérodynamiques sur les écoulements environnants représentés par des paramétrisations adaptées, dont la précision doit être évaluée à partir de données expérimentales.

Modélisation des arbres dans les simulations CFD : Dans les simulations CFD, les arbres sont généralement représentés comme des zones poreuses homogènes, au sein desquelles un terme puits ($\boldsymbol{S_u}$) est introduit dans les équations de conservation de la quantité de mouvement régissant l'écoulement afin de prendre en compte la résistance aérodynamique exercée par la végétation :

$$\boldsymbol{S_u} = -LAD\ C_d^v\ |\boldsymbol{u}|\ \boldsymbol{u}\ . \qquad (1)$$

Dans l'équation (1), C_d^v désigne le coefficient de traînée volumique, $\boldsymbol{u}$ la vitesse locale de l'écoulement de l'air et LAD la densité surfacique foliaire unilatérale, c'est-à-dire la surface foliaire par unité de volume du houppier, en ne comptabilisant qu'une seule face de chaque feuille. Certaines études intègrent également des paramétrisations explicites des modifications de la production et de la dissipation de l'énergie cinétique turbulente (TKE) induites par la végétation [4].

Afin de faciliter la validation expérimentale des modèles CFD appliqués aux houppiers, [5] ont récemment proposé une relation analytique reliant les deux paramètres LAD et C_d^v à des grandeurs directement mesurables en soufflerie, à savoir la porosité aérodynamique (α) et le coefficient de traînée (C_d). La première quantifie la fraction de l'écoulement d'air traversant le houppier par rapport à celle qui est déviée autour de celui-ci. Le second, qui se distingue du coefficient de traînée volumique, est défini par $C_d = \frac{2\,F_d}{\rho\,U_{ref}^2\,A_f}$ (où F_d représente la force de traînée totale mesurée sur un arbre isolé, ρ la masse volumique de l'air, U_{ref} la vitesse de référence en amont et A_f la surface frontale projetée).

Travaux antérieurs et problématiques ouvertes : Dans l'étude récente [3], des simulations CFD à haute fidélité ont été réalisées afin d'étudier les effets des arbres sur les écoulements d'air, la dispersion des polluants et l'efficacité de la ventilation au sein d'une rue canyon orientée perpendiculairement au vent incident. Contrairement à la plupart des études précédentes, la rue canyon est ici intégrée dans une canopée urbaine continue. Les résultats numériques ont été comparés à des mesures obtenues avec une configuration analogue dans la soufflerie du Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA) de l'École Centrale de Lyon (ECL). Bien que les simulations numériques reproduisent les champs d'écoulement moyen, des écarts ont été observés avec les résultats expérimentaux concernant le champ de TKE. Ces écarts pourraient provenir à la fois de l'approche utilisée pour modéliser les arbres et de la difficulté à reproduire fidèlement la dynamique complexe des écoulements au-dessus de la canopée urbaine. Il est donc pertinent d'étudier une configuration plus simple, dans laquelle la végétation constitue le seul facteur considéré, afin d'isoler les effets de son mode de modélisation.

Les études expérimentales rapportent des coefficients de traînée volumiques compris entre 0.1 et 0.3, tandis que la plupart des études CFD supposent une valeur constante de 0.2 [5]. Une étude systématique de l'influence de la taille et de l'orientation des feuilles sur C_d^v permettrait de mieux caractériser sa variabilité.

Objectifs du stage : Le stage comportera à la fois un volet numérique et un volet expérimental. La première partie du stage portera sur des simulations numériques à haute fidélité (*Large Eddy Simulations*, LES) d'une couche limite atmosphérique incidente sur un arbre isolé. Les résultats numériques seront comparés à des mesures expérimentales réalisées dans la soufflerie atmosphérique du LMFA [6]. Lors de cette campagne expérimentale, trois maquettes d'arbres présentant des porosités de houppier différentes ont été étudiés et caractérisés en termes de coefficient de traînée et de porosité aérodynamique. Le champ de vitesse en amont et en aval de chaque maquette a été caractérisé par vélocimétrie par images de particules (PIV). Les simulations numériques seront réalisées à l'aide de uDALES, un solveur LES open source développé à l'Imperial College London. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une collaboration existante avec des chercheurs de cet établissement. L'analyse portera principalement sur la capacité des simulations à reproduire le champ de TKE mesuré expérimentalement. Différentes paramétrisations explicites des effets des arbres sur la production et la dissipation de la TKE pourront être testées et comparées. Il convient de noter qu'une telle comparaison systématique fait actuellement défaut dans la littérature [4]. Le second objectif consiste à étudier expérimentalement la sensibilité de C_d et α (et, par conséquent, de C_d^v) à l'orientation et à la taille des feuilles, à LAD constante. Pour cela, des modèles de houppiers idéalisés seront conçus et fabriqués. Chaque modèle sera constitué d'une grille support sur laquelle pourront être fixés des disques circulaires de différents diamètres, représentant les feuilles. Les disques seront disposés selon différentes orientations. Les modèles seront ensuite testés dans la soufflerie du LMFA, où un écoulement incident uniforme pourra être généré à différentes vitesses. Les forces de traînée seront mesurées à l'aide d'une balance aérodynamique, tandis que les vitesses de l'air en amont et en

aval des modèles seront mesurées à l'aide d'un tube de Pitot ou d'un anémomètre à fil chaud. Les techniques de mesure laser, telles que la PIV, ne seront pas utilisées, car elles ne sont pas accessibles aux stagiaires.

Références

[1] World Health Organization. (2025). The synergies of heat stress and air pollution and its health impacts. World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/B09369
[2] Janhäll, S., 2015. Review on urban vegetation and particle air pollution – deposition and dispersion. Atmos. Environ. 105, 130–137.
[3] Fellini, S., Majumdar, D., Salizzoni, P., van Reeuwijk, M., 2026. Three-dimensional pollutant dispersion in tree-lined urban canyons: Combined wind-tunnel and LES analysis. Atmos. Environ. 367, 121748.
[4] Buccolieri, R., Santiago, J.-L., Rivas, E., Sáanchez, B., 2019. Reprint of: Review on urban tree modelling in CFD simulations: Aerodynamic, deposition and thermal effects. Urban For. Urban Green. 37, 56–64.
[5] Majumdar, D., Vita, G., Ramponi, R., Glover, N., van Reeuwijk, M., 2025. The drag length is key to quantifying tree canopy drag. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 261, 106084.
[6] Grandoni, L., Michard, M., Grosjean, N., et al., 2026. The dynamics of a wake behind an isolated model tree within an atmospheric boundary layer. Boundary-Layer Meteorol. 192, 26.