# Sofia Fellini

# Jeudi 04 Mars 2021, 16h00, visioconférence

# Modélisation de la dispersion des polluants à l'échelle de la ville et de la rueExpériences en soufflerie et théorie des réseaux complexes

## **Résumé**

La pollution atmosphérique dans les zones urbaines constitue une menace sérieuse pour la santé et la sécurité des résidents. Centres d'activité économique, politique et sociale, les villes sont densément peuplées et exposées à un grand nombre de sources de pollution. Ces facteurs, ainsi que le risque d'actes malveillants à des fins terroristes, les rendent extrêmement vulnérables aux rejets gazeux. Afin de prévoir et gérer la pollution atmosphérique, il est très important de comprendre et de modéliser les phénomènes de dispersion dans l'atmosphère urbaine. Contrairement au transport loin des parois, l'écoulement et la dispersion dans la canopée urbaine sont principalement régis par la géométrie complexe de la ville.

L'objectif de cette thèse est d'étudier et de modéliser l'effet de la forme urbaine sur la dispersion des polluants à deux échelles spatiales différentes : à l'échelle du quartier et à l'échelle de la rue.

Le tracé des rues est la géométrie dominante à l'échelle du quartier. Partant de ce constat, la première partie de cette thèse propose une nouvelle perspective basée sur la théorie des réseaux complexes pour analyser et modéliser le transport de polluants le long des rues d'une ville. La canopée urbaine est modélisée comme un réseau. Les rues-canyons et leurs intersections façonnent la structure spatiale du réseau. La direction et la capacité de transport de l’écoulement dans les rues déterminent les directions et le poids des liens du réseau. Avec cette interprétation mathématique, la propagation est modélisée comme un processus de diffusion sur un réseau et les zones les plus dangereuses d'une ville sont identifiées comme les nœuds avec le potentiel de diffusion le plus élevé. Dans ce but, nous introduisons une nouvelle métrique de centralité adaptée au transport de masse dans les réseaux de flot. L'approche proposée fournit un outil opérationnel pour identifier les lieux d'une ville avec le potentiel de dispersion le plus élevé. En outre, le modèle est utile pour identifier les propriétés structurelles qui rendent les villes vulnérables à la pollution atmosphérique.

La comparaison entre quatre villes emblématiques, aux plans urbains différents, montre que la vulnérabilité dépend des propriétés topologiques du tissu urbain: la connectivité des rues et la variabilité de l'orientation des rues par rapport à la direction du vent extérieur.

À l'échelle de la rue, les dynamiques d'écoulement et de dispersion sont régies par la géométrie du canyon. Le transport des polluants peut être décomposée en transport longitudinal le long de la rue et en transfert vertical entre le canyon et l'écoulement extérieur. La vitesse moyenne de l'écoulement régit la dispersion le long de la rue. En revanche, les mécanismes d'échange de masse dans le sens vertical ne sont pas encore parfaitement compris.

La deuxième partie de cette thèse analyse ces processus à l'aide d'expériences en soufflerie qui simulent la dispersion de polluants dans un canyon orienté perpendiculairement à la direction du vent. Dans cette configuration, l'échange vertical est le seul mécanisme de ventilation du canyon.

Au cours des expériences, les conditions du canyon sont modifiées en chauffant alternativement les parois latérales, en modifiant le rapport hauteur/largeur du canyon et en introduisant des éléments de rugosité sur les parois. Deux rangées de maquettes d'arbres sont disposées le long du canyon pour simuler la végétation urbaine. Des mesures de vitesse et de concentration sont effectuées dans le canyon et une vitesse d'échange caractéristique entre la rue-canyon et l'atmosphère sus-jacente est estimée pour quantifier la ventilation globale du canyon dans les différentes configurations. Les résultats montrent que l'efficacité de l'échange vertical entre le canyon et l'écoulement externe est principalement déterminée par l'énergie cinétique turbulent à l'intérieur du canyon. L'intensité et la distribution spatiale du champ de l'énergie cinétique turbulente changent en fonction de la géométrie du canyon, des conditions imposées aux parois et de la présence d'obstacles.

En synthèse, cette thèse contribue à notre compréhension (i) du rôle de la géométrie urbaine dans la dispersion des polluants, et (ii) des mécanismes physiques qui régissent la ventilation urbaine. De plus, les techniques et méthodes adoptées dans cette étude mettent en évidence (i) l'importance d'une approche multi-échelles et (ii) le potentiel d'outils innovants, à la fois conceptuels et expérimentaux, pour développer des modèles opérationnels de simulation de la pollution atmosphérique dans les villes.

# Modelling pollutant dispersion at the city and street scales

# From wind tunnel experiments to complex network theory

# **Summary**

Air pollution in urban areas is a major concern for the health and safety of citizens. Hubs of economic, political and social activities, cities are densely populated and are exposed to a large number of pollution sources. These factors, together with the risk of malicious acts for terrorist purposes, make them extremely vulnerable to gaseous releases. To predict and manage air pollution scenarios, the understanding and modeling of dispersion phenomena in the urban atmosphere is crucial. Differently from transport processes far from boundaries, flow and dispersion in the urban canopy are primarily governed by the intricate geometry of the city.
The aim of this thesis is to investigate and model the effect of urban form on the dispersion of pollutants at two different spatial scales: at the scale of the district and at the scale of the single street canyon.

Urban street pattern is the dominant geometry at the district scale. Starting from this observation, the first part of this thesis proposes a new perspective based on the theory of complex networks to analyze and model the transport of pollutants along the streets of a city. The urban canopy is modelled as a network. Street canyons and their intersections shape the spatial structure of the network. The direction and the transport capacity of the flow in the streets define the direction and the weight of the links. Adopting this mathematical interpretation, propagation is modelled as a spreading process on a network and the most dangerous areas in a city are identified as the best spreading nodes. To this aim, a novel centrality metric tailored to mass transport in flow networks is derived. Besides providing an operational tool to identify the places in a city with the highest potential for dispersion over large areas, the proposed approach is suitable to investigate which structural properties of a city make it fragile to air pollution. The comparison between four emblematic cities with different urban patterns evidences that vulnerability is driven by the topological properties of the urban fabric, i.e., street connectivity and the variability in the orientation of the streets with respect to the approaching wind.

At the scale of the single street, flow and dispersion dynamics are governed by the canyon geometry. The dispersion of pollutants can be decomposed in the longitudinal transport along the street and the vertical transfer between the canyon and the external flow. While advection drives the dynamics along the canyon axis, the mechanisms of mass exchange in the vertical direction are still not fully understood.
The second part of this thesis investigates these processes by means of wind tunnel experiments of pollutant dispersion in a canyon oriented perpendicular to the wind direction. In this configuration, the vertical exchange is the dominant mechanism of canyon ventilation. Keeping the external flow unaltered, we analyze the effect of different boundary conditions at the building walls and the presence of obstacles within the canyon. The boundary conditions are modified by alternatively heating the downwind and upwind walls of the canyon, by changing its aspect ratio and by introducing roughness elements at walls. Two rows of model trees are arranged at the sides of a street canyon to simulate urban vegetation. ùVelocity and concentration measurements are performed within the canyon and a characteristic exchange velocity between the street canyon and the overlying atmosphere is estimated to quantify the overall canyon ventilation in the different configurations. Results evidence that the efficiency of the vertical exchange between the canyon and external flow is mainly driven by the fluctuating component of the turbulent flow within the canyon. The intensity and spatial distribution of the turbulent kinetic energy field varies according to the geometry of the canyon, the conditions imposed at the walls and the presence of obstacles.

In short, this thesis contributes to our understanding of (i) the role of urban geometry in the dispersion of pollutants, and (ii) the physical mechanisms that govern urban ventilation. Moreover, the techniques and methods adopted in this study highlight the importance of a multi-scale approach and the potential of innovative tools, both conceptual and experimental, to develop operational models for the assessment of urban air pollution.