

Deploying Nature-Based Solutions in urban areas: Thermal performance and urban feasibility across scales.

The urbanisation process and the reduction of the natural land cover, have altered energy balance and climate within cities, enhancing the Urban Heat Island (UHI) effect. This effect occurs when elevated temperatures are experienced in high dense areas, mainly at night. Climate change could increase extreme events (as heatwaves) in terms of intensity and frequency, and exacerbate the UHI phenomena. Therefore, Nature-Based Solution (NBS), such as green roofs, emerged as a relevant high elevated temperatures mitigation strategy, due to the shading effect and evapotranspiration (ET) from vegetation. Nevertheless, the performance of NBS to cool the air and its variability across different temporal and spatial scales are still unclear. As well, the conditions that can influence their implementation in complex urban environments are little studied.

In this context, throughout this thesis, the elements likely to influence the installation of NBS across scales have been evaluated. For this purpose, first some measurement campaigns of the ET process were carried out in the Blue Green Wave (BGW), a green roof located in Bienvenue building in front of the Ecole des Ponts ParisTech. The thermal performance of the BGW was characterised through three different methods: the surface energy balance (SEB), an evapotranspiration chamber and the water balance during dry conditions. Differences in the three measurement methods were observed and the errors causing these were discussed. A sensitivity analysis served to determine principal variables affecting SEB estimations and formulate recommendations for further measurement campaigns.

Second, the fractal geometry was used to analyse the complexity and heterogeneity of the spatial distribution of urban elements in the case study of Est-Ensemble, and to develop some multiscale scenarios of NBS deployment. More specifically, fractal dimension helped to analyse the hierarchical organisation of the built-up structure and NBS across different scales. These scaling properties were used to produce multiscale scenarios making possible the insertion of NBS of different sizes within the urban environment not occupied by buildings (lacunas).

Finally, in order to improve the understanding of thermal flux variability measured in the BGW and to make the link with the previous spatial analysis, statistical multiscale data analysis was carried out. The spectral analysis exhibited the scale invariance behaviour of air temperature and structure parameter of refractive index of air (C_n^2), both fluxes impacting ET. Moreover, the structure function highlighted their intermittence and multifractality of C_n^2 and temperature fluctuations. The scale invariant properties of fluctuations were characterised through the Universal Multifractal (UM) framework. The results demonstrated the multifractality of C_n^2 was stronger than the temperature, indicating the influence of additional turbulent processes than heat convection on C_n^2 fluctuations. This suggested the need to investigate the additional meteorological parameters affecting turbulent activity in the BGW, such as wind speed. In this way, the scaling behaviour of ET could be fully characterised and spatial scales of NBS installation could be determined based on their cooling effect.

Key words: Nature-Based Solutions; evapotranspiration; spatial organisation; multiscales; fractal and multifractal, lacunas.

Déploiement des Solutions fondées sur la nature en milieu urbain : Performance thermique et faisabilité urbaine à toutes les échelles.

L'urbanisation et l'imperméabilisation des sols naturels qu'elle a provoquée ont engendré une modification du bilan énergétique et du micro-climat dans les villes, favorisant l'effet d'îlot de Chaleur Urbain (ICU). Cet effet se produit lorsque des températures plus élevées sont enregistrées dans des zones à forte densité, notamment pendant la nuit. Dans un contexte du changement climatique, l'intensité et occurrence des événements extrêmes (comme les vagues de chaleur) pourraient être plus élevées, ce qui exacerberait ce phénomène. Les Solutions fondées sur la Nature (SFN), telles que les toitures végétalisées, apparaissent aujourd'hui comme une stratégie pertinente d'atténuation des températures élevées, en raison de l'effet d'ombrage et de l'évapotranspiration (ET) produits par la végétation. Néanmoins, la performance réelle des SFN pour rafraîchir l'air, ainsi que sa variabilité à différentes échelles temporelles et spatiales, sont encore mal connues. De plus, les conditions qui peuvent influencer leur mise en œuvre dans des environnements urbains complexes ont été très peu étudiées.

Dans ce contexte, cette thèse s'intéresse à l'évaluation d'éléments susceptibles d'influencer la mise en place de SFN à travers les échelles. Dans un premier temps, des campagnes de mesure de l'ET ont été réalisées dans la Blue Green Wave (BGW), une toiture végétalisée située sur le bâtiment Bienvenüe, placé en face de l'Ecole des Ponts ParisTech. Les performances thermiques de la BGW ont été caractérisées par trois méthodes différentes d'estimation de l'ET, utilisant respectivement : le bilan énergétique de surface (SEB), une chambre d'évapotranspiration et le bilan hydrique par temps sec. Des différences dans les trois méthodes de mesure ont été observées et les erreurs à l'origine de celles-ci ont été discutées. Une analyse de sensibilité a permis de déterminer les principales variables affectant les estimations et de formuler des recommandations pour de futures campagnes de mesure.

Dans un second temps, la géométrie fractale a été utilisée pour analyser la complexité et l'hétérogénéité de la distribution spatiale des formes urbaines au sein du cas d'étude d'Est-Ensemble (est de Paris), et pour développer des scénarios multiéchelles de déploiement de SFN. Plus précisément, la dimension fractale a permis d'analyser l'organisation hiérarchique de la structure bâtie et des SFN à différentes échelles. Ces propriétés d'échelle ont ensuite été utilisées dans la réalisation de scénarios multiéchelles à concilier structure bâtie existante et futures SFN. Cette approche à base fractale a permis de proposer des installations de SFN de différentes tailles dans les espaces non occupés par les bâtiments (lacunes), mais également sur les bâtiments existants (végétalisation des toitures par exemple).

Enfin, afin d'améliorer la compréhension de la variabilité temporelle des flux thermiques mesurés sur la BGW et de faire le lien avec l'analyse spatiale précédente, une analyse statistique multi-échelle des données a été réalisée. L'analyse spectrale a démontré le comportement

scalant de la température de l'air et le paramètre de structure de l'indice de réfraction de l'air (C_n^2), impactant tous deux le flux d'ET. De plus, la fonction de structure a mis en évidence l'intermittence et multifractalité des fluctuations de C_n^2 et température. Ainsi, les propriétés d'invariance d'échelle des fluctuations ont été caractérisées dans le cadre des multifractals universels. Les résultats ont démontré la multifractalité de C_n^2 était plus forte que celle de la température, indiquant l'influence des processus turbulents supplémentaires à la convection thermique sur les fluctuations de C_n^2 . Cela suggère la nécessité d'étudier paramètres météorologiques supplémentaires affectant l'activité turbulente, telle que la vitesse du vent. De cette manière, l'invariance d'échelle du flux d'ET pourrait être entièrement caractérisé et les échelles spatiales pour l'installation des SFN seraient déterminées en fonction de leur effet de refroidissement.

Mots clés : Solutions fondées sur la nature ; évapotranspiration ; organisation spatiale ; multiéchelles ; fractale et multifractale ; lacunes.