

Quantifier les échanges de carbone et d'eau des enveloppes végétales des bâtiments via une modélisation renseignée par l'observation

Laboratoire d'accueil : DESR/CNRM, Météo France-CNRS, UMR3589, Toulouse, France

Encadrement : Aude lemonsu (HDR, aude.lemonsu@meteo.fr) et Cécile de Munck (cecile.demunck@meteo.fr), chercheuses dans l'équipe VILLE du Groupe de Météorologie à Moyenne Échelle de la DESR/CNRM

Contexte

De nombreuses villes en France et dans le monde cherchent à développer et équilibrer leur couverture végétale, y compris dans les zones les plus urbanisées, afin de lutter contre le changement climatique. Pour les zones urbaines, qui sont à fort enjeu de régulation thermique, l'espace disponible au sol est en général très limité pour implémenter un réseau d'espaces végétalisés de pleine terre (trames vertes). Végétaliser les enveloppes des bâtiments en mettant en œuvre des toits et façades végétalisés constituerait donc une alternative ou une solution complémentaire. À leur échelle et intégrées aux trames vertes et bleues, ces dispositifs végétalisés sont susceptibles de contribuer aux services rendus à l'écosystème urbain par la végétation, parmi lesquels la régulation du microclimat et des eaux pluviales, mais aussi la séquestration du carbone de l'atmosphère.

Dans certains pays européens, la végétalisation des bâtiments est en constante augmentation, comme en Allemagne avec 800 ha/an de nouvelles toitures végétalisées. En France, le déploiement de toits et façades végétalisés n'est pas encore très répandu, probablement parce que la complexité de leur mise en œuvre et leurs besoins en eau supposés élevés restent des freins face à des services de régulation assez méconnus. Les mesures et modèles pour décrire tous les échanges qui s'opèrent au sein et à la surface de ces enveloppes végétales sont, en effet, soit rares soit incomplets. Ce sont ces verrous que ce projet de recherche vise à lever.

Objectifs scientifiques

L'équipe VILLE du Groupe de Météorologie à Moyenne Échelle de la DESR/CNRM dispose d'un modèle de microclimat urbain TEB ([Masson 2000, BLM](#)) qui permet déjà de représenter de façon réaliste une partie des interactions énergétiques et hydrologiques entre végétation et bâtiments, pour la végétation basse (module TEB-Veg ; [Lemonsu et al 2012, GMD](#)), les arbres d'alignement (module TEB-Tree ; [Redon, Lemonsu et al 2017, 2020, GMD](#)) et les toitures végétalisées des bâtiments (module TEB-GREENROOF ; [de Munck, Lemonsu et al 2013, GMD](#)).

Sur la base des outils existants, cette thèse poursuit trois objectifs majeurs :

- 1) **mieux comprendre les échanges** radiatifs, thermiques, hydrologiques et de carbone qui s'opèrent spécifiquement au sein et aux interfaces de deux types d'enveloppes végétales des bâtiments (toits et façades) ;
- 2) **améliorer ou décrire ces échanges dans le modèle** pour aboutir à une modélisation physique avancée des interactions entre enveloppes végétales et atmosphère à l'échelle du bâti ;
- 3) **évaluer ces dispositifs sous différentes zones du globe**, en comparant leurs performances de régulation micro-climatique, hydrologique, et de séquestration de carbone au regard de leurs besoins en eau et des contraintes climatiques locales.

Méthodologie

Pour atteindre ces objectifs, la thèse se déroulera en trois phases successives :

- 1) **une revue bibliographique des observations disponibles & un état de l'art des modèles :**

La revue d'études expérimentales sous des régions climatiques différentes du globe permettra de comprendre les processus physiques et les enjeux et besoins des toits et façades végétalisés. Une attention plus spécifique portera sur deux super-sites situés à Berlin, qui documentent exceptionnellement bien les processus et états radiatifs, thermiques, hydrologiques et les flux de carbone : une très grande toiture végétalisée (Heusinger & Weber 2017, *Scie Tot Env* ; Konopka et al 2021, *JGR : Biogeosciences*) et plusieurs façades végétalisées (Hölscher et al 2016, *Energy and Buildings*, 2018, *Agri Forest Met*).

La revue sur les modèles numériques visera à identifier les processus physiques dominants et les différentes approches mises en œuvre selon les échelles spatiales d'application.

2) la modélisation des enveloppes végétales des bâtiments renseignée par les observations des super-sites berlinois :

Pour les toitures végétalisées, il s'agira de raffiner la paramétrisation existante TEB-GREENROOF (de Munck et al 2013, *GMD*) au regard des transferts hydrologiques dans le substrat de toiture et les caractéristiques de la végétation qui contrôlent les échanges de CO₂. Les périodes humides permettront d'améliorer la modélisation des écoulements d'eau tandis que les périodes sèches permettront d'améliorer le couplage des processus (écoulements d'eau + évapotranspiration & flux de CO₂).

Pour les façades végétalisées, il s'agira de développer une paramétrisation à base physique basée sur la compréhension des processus physiques en jeux acquise en début de thèse. Une piste envisagée serait d'adapter la paramétrisation existante d'arbres d'alignement TEB-Tree (Redon, Lemonsu et al 2017, 2020, *GMD*) sous forme de rideau végétal en interaction avec le mur.

Pour les deux types d'enveloppes végétales, un enjeu important sera d'évaluer la capacité des modèles développés à reproduire la variabilité des performances de rafraîchissement et de séquestration de carbone selon les conditions microclimatiques locales (périodes humides, sèches, chaudes) et l'apport de l'irrigation pour un fonctionnement optimal.

3) des simulations climatiques mettant en jeux les enveloppes végétales dans différentes régions du globe :

Des bâtiments équipés de dispositifs végétalisés en toiture ou en façades seront simulés sous des conditions climatiques contrastées pour comparer leurs performances en termes de régulation microclimatique, hydrologique et de séquestration en CO₂ en différents points du globe.

Cela impliquera i) de choisir les régions d'intérêt et de construire de longues séries de forçages atmosphériques pour alimenter le modèle, et ii) d'établir un protocole d'évaluation des performances de chaque dispositif (orientation du bâtiment, type de végétation, nature du substrat, scénario d'irrigation, indicateurs de performance).

Liens avec les activités de l'unité de recherche d'accueil

L'équipe VILLE du CNRM est dédiée aux recherches sur le climat urbain depuis 20 ans. Les travaux du laboratoire sont mondialement reconnus et le CNRM a organisé en 2015 la 9ème conférence internationale sur le climat urbain, regroupant 550 chercheurs de plus de 60 pays. Ces recherches suivent trois grands axes: (1) l'amélioration des modèles numériques de prévision du temps et du climat en ville, via le développement du modèle de canopée urbaine TEB, (2) l'amélioration continue des connaissances sur le climat urbain par l'observation et l'étude de processus, et (3) l'adaptation des villes au changement climatique. La thèse propose donc de contribuer au 1er et au 3ème axes de recherche, ce dernier étant en plein essor depuis une dizaine d'années. Elle se basera sur la collaboration en cours avec l'Université Technologique de Braunschweig (Allemagne), qui dispose de sites expérimentaux inégalés pour le suivi et l'étude des toitures végétalisées. Cette collaboration sera étendue avec l'Université Technologique de Berlin (Allemagne) qui pilote le super site de façades végétalisées instrumentées à Berlin.

Références citées

de Munck C, Lemonsu A, Bouzouidja A, Masson V & Claverie R, 2013: The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB. *Geosci. Model Dev.*, 6, 1941–1960. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1941-2013>

Heusinger J & Weber S, 2017: Surface energy balance of an extensive green roof as quantified by full year eddy-covariance measurements. *Science of the Total Environment*, 577: 220–230. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.168>

Hölscher M-T, Nehls T, Jänicke B & Wessolek G, 2016: Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*, 114: 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.047>

Hölscher M-T, Kern MA, Wessolek G & Nehls T, 2018: A new consistent sap flow baseline-correction approach for the stem heat balance method using nocturnal water vapour pressure deficits and its application in the measurements of urban climbing plant transpiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248: 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.014>

Konopka J, Heusinger J & Weber S, 2021 : Extensive urban green roof shows consistent annual net uptake of carbon as documented by 5 years of eddy-covariance flux measurements. *JGR: Biogeosciences*, 126(2): e2020JG005879. <https://doi.org/10.1029/2020JG005879>

Lemonsu A, Masson V, Shashua-Bar L, Erell E, and Pearlmutter D, 2012 : Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geosci. Model Dev.*, 5, 1377–1393. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1377-2012>

Masson V, 2000: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94 (3), 357–397. <https://doi.org/10.1023/a:1002463829265>

Redon E, Lemonsu A, Masson V, Morille B & Musy M, 2017: Implementation of street trees within the solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8.0. *Geosci. Model Dev.*, 10. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-385-2017>

Redon E, Lemonsu A & Masson V, 2020: An urban trees parameterization for modeling microclimatic variables and thermal comfort conditions at street level with the Town Energy Balance model (TEB-SURFEX v8.0). *Geosci. Model Dev.*, 13, 385–399. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-385-2020>

Profil et compétences recherchées

L'étudiant.e devra avoir une formation en physique de l'atmosphère et/ou études des processus de surface et des interactions surface/atmosphère. Il.elle devra se familiariser avec la thématique urbaine et sera amené.e à couvrir plusieurs thématiques intimement connectées au cours de sa thèse : climatologie, hydrologie et fonctionnement de la végétation. Ce sujet requiert par conséquent un goût pour la recherche pluri-disciplinaire, avec une vision à la fois détaillée et synthétique des thématiques abordées.

Différentes compétences scientifiques et techniques seront mobilisées pour traiter le sujet :

- études et synthèses bibliographiques, nécessitant curiosité et esprit de synthèse,
- traitement et analyse de données, nécessitant la prise en main experte d'outils tels que R ou Python,
- programmation dans le modèle urbain TEB, en langage Fortran90, des équations régissant le comportement physique des enveloppes végétales des bâtiments ,
- simulations numériques pour évaluer les performances des dispositifs végétalisés en différents points du globe.

Un bon niveau initial et un goût pour la programmation est souhaité (Fortran90, shell, R, Python) et pourra être perfectionné au cours de la thèse par des formations au sein du laboratoire d'accueil.

Une bonne pratique et maîtrise de l'anglais sont nécessaires aux vues des travaux et collaborations envisagés.