



Paris, 30 novembre 2024

Dossier suivi par :

Olivier Fouché-Grobla

+33 632 59 57 46

olivier.fouche-grobla@ird.fr // olivier.fouche-grobla@lecnam.net

Objet : Projet de recherche doctoral - ED129 - Sciences de l'environnement - Ile-de-France

Titre de la thèse

FR. Dynamique de l'eau, de la chaleur, et du carbone, dans la trame brune urbaine : une approche par l'expérimentation à la parcelle d'analogues de sols et la modélisation numérique.

EN. Dynamics of water, heat and carbon in the urban brown grid: an approach based on plot experiments with soil analogues and numerical modeling.

Contexte

Dans le contexte d'une prise de conscience des conséquences de l'artificialisation des sols, un objectif du PEPR SOLU-BIOD est la requalification de surfaces en sols et la réalisation d'infrastructures végétalisées. Celles-ci sont demandées en urbanisme pour rendre des services écosystémiques. Des réflexions et expériences sont menées en vue de valoriser ces matériaux minéraux dans des substrats de sols composites incluant un apport de biomasse recyclée en établissant des formulations adaptées du point de vue mécanique, hydraulique, hydrologique, thermique, organique, des agencements de matériaux-déchets en profils qui deviendront des sols construits (Fouché-Grobla et al., 2022). L'implémentation d'un sol construit sera guidée par une stratégie de solution basée sur la nature (SfN). La diffusion de ce type de SfN auprès des collectivités permettra de démontrer l'apport de sols composites à l'objectif d'une trame brune et à la continuité écologique en milieu urbain. L'équipe a acquis ce genre de savoir-faire dans le cas des fonctions écosystémiques des sols à l'égard des eaux usées en milieu péri-urbain (Daudin et al., 2022). Les mélanges terre-pierre sont un exemple de type d'horizon de sol construit et de SfN connu depuis une vingtaine d'années : Nasri et al. (2015) ont étudié le rôle des pierres (cailloux), source d'un réseau de macropores dont l'influence sur la densité apparente et la perméabilité est exprimée par une fonction de pédotransfert spécifique. Les propriétés hydro-structurales, d'une grande importance car les sols construits sont censés fournir des services de régulation de l'eau de pluie et répondre aux besoins de la végétation, ont été peu étudiées au sein de iEES avant 2015, où Maha Deeb a initié ce thème en étudiant les synergies entre matière organique ajoutée, travail des organismes bioturbateurs du sol, et végétation (Deeb et al., 2017). Il est temps de valoriser les corrélations, trouvées entre facteurs lors des études empiriques, par une approche de modélisation d'un système composé de sol construit.

Snoussi et al. (2020) ont créé un prototype de modèle numérique de sol construit pour simuler les flux couplés de chaleur et d'eau à l'échelle d'un petit ouvrage urbain végétalisé dans un sol doté de courts-circuits hydrauliques aménagés. Taccone et al. (2020) ont proposé un nouveau critère pour l'évaluation des champs de vitesse en simulation de ruissellement à l'échelle d'une parcelle. Ma et al., (2020) ont réalisé un modèle hydrologique emboîté de bassin versant à base physique intégrant des propriétés des sols. Kirstetter et al. (2021) ont testé et validé, sur des cas tests analytiques décrivant différents régimes d'écoulement, un algorithme avec maillage adaptatif développé au sein de la suite Basilisk (Sorbonne Univ.). Ainsi, l'équipe d'encadrement a acquis à travers des thèses un savoir-faire et a les compétences requises pour effectuer un changement d'échelle en hydrologie et hydraulique des sols sur des systèmes hétérogènes, de la parcelle à la trame brune urbaine.



Domaine

Solutions basées sur la nature. Les avantages écologiques des sols construits sont nombreux : support favorisant la biodiversité, réduction du pic de ruissellement en ville et de l'îlot de chaleur urbain, résilience face à la sécheresse, piégeage du carbone...

Objectif

Au sein du projet de living lab francilien des SfN (PEPR Solu-Biod), la contribution de la thèse sera de réaliser un modèle numérique de sol construit. L'objectif de la thèse est de mettre au point un modèle hydrodynamique avec transfert de C que l'on utilisera pour simuler le fonctionnement d'une trame brune urbaine de sols construits. Les services écosystémiques attendus seront représentés par des coefficients de partage du sol vu comme l'interface entre l'atmosphère et l'hydrosphère : entre infiltration et ruissellement des précipitations ; entre absorption et réflexion du rayonnement solaire ; entre carbone organique du sol et carbone minéralisé. L'approche par la modélisation numérique permettra de questionner l'effet d'échelle dans les sols composites.

Méthodologie

Le régime hydrodynamique des sols construits a une influence sur l'évolution biochimique de la matière organique, sur la distribution spatiale du carbone organique et minéral dans plusieurs horizons du sol, sur le bilan du carbone et des nutriments (les pertes en humus, l'azote, etc.). La modélisation numérique d'un sol construit à macropores permettra d'effectuer une étude paramétrique, confirmer les paramètres déterminants puis explorer des solutions au moyen de scénarios numériques à l'échelle d'une trame brune, et enfin aboutir à une optimisation notamment dans le cas difficile d'une surface à forte pente (Taccone et al., 2020) où la modélisation hydrologique à base physique, couplage entre Saint-Venant pour le ruissellement et Green & Ampt pour l'infiltration, a des limitations. Le système considéré sera le volume compris entre deux interfaces : la surface du sol (rôle de la plante et de l'atmosphère) et l'interface entre l'horizon le plus profond du sol construit et la zone vadose. Dès lors que Green & Ampt sera implémenté, il serait intéressant de le compléter / remplacer par un autre modèle 1D vertical, tel que la SMVE de Ogden et al. (2017), une approche par différences finies de type Lagrange.

Au-delà d'une solution à un problème où le milieu poreux est homogène par couche, on souhaite introduire de l'hétérogénéité dans le milieu poreux matriciel, sous la forme d'une population aléatoire de cailloux (éléments de taille supérieure à 2 mm, donc en ordre de grandeur dix à cent fois plus grands que les particules constituant la matrice). Ces cailloux peuvent être des "no-flow volumes", c'est le cas si l'on ne veut pas tenir compte de leur porosité et de leurs échanges d'eau avec la matrice. Mais surtout, ces cailloux sont à l'origine d'une interface caillou-matrice, interface décollée, disjointe, qui devient alors une macroporosité. Si celle-ci est connectée, cela produit des chemins de court-circuit hydraulique qu'il conviendra de modéliser par un réseau connecté de surfaces ouvertes ou de *pipes* permettant la propagation d'une onde cinématique, y compris par un écoulement de film adhérent à la surface. Par analogie, ce phénomène recouvre aussi les fentes de dessiccation ou les galeries des organismes bioturbateurs du sol.

Le couplage numérique hydrodynamique entre ruissellement et infiltration (collaboration avec Olivier DELESTRE, université de Nice Côte d'Azur, en délégation au laboratoire Saint-Venant commun EDF R&D et Ecole des Ponts ParisTech, co-encadrant non-HDR) sera validé sur des données expérimentales et de terrain dont la disponibilité a été vérifiée à l'amont.

L'expérimentation à la parcelle sera montée avec l'aide de Behzad NASRI (UMR iEES-Paris), ingénieur de recherche IRD spécialisé en physique du sol et instrumentation in situ, déjà co-encadrant cette année du stage de master sur le rôle des colloïdes et de la matière organique dans les propriétés hydriques des sols construits.



Résultats attendus

Un algorithme de couplage ruissellement-infiltration sera créé pour introduire l'effet des macropores à l'interface sol-atmosphère dans un modèle hydrologique à la parcelle. En termes de physique couplée – hydraulique, transport et thermique, on testera numériquement, en continuant le travail de Snoussi et al. (2020), des assemblages composites comprenant des colonnes drainantes s'inspirant des macropores des sols pour faire communiquer deux horizons du sol construit. Cette tâche servira à discriminer l'influence des paramètres et des processus sur les résultats des flux verticaux (eau, matière organique, chaleur). Enfin, ce concept de macropore artificiel sera mis en œuvre afin de tirer parti de la simulation numérique spatialisée pour estimer les effets d'un réseau de tranchées ou ouvrages de sols construits en termes de fonctionnement hydrique et hydrologique à l'échelle de la trame brune et verte dans un quartier.

Bibliographie du projet et de l'équipe

- Aubertin M-L, Sebag D, Jouquet P, Pillot D, Lamoureux-Var V, Kowalewski I, Girardin C, Houot S, Rumpel C. (2022). Abiotic interactions of biochar and compost during their blending may reduce biochar thermal stability.
- Daudin K., Weber Ch., Fouché-Grobla O., Maton L. (2022). Soil-water adaptive management process: the case of on-site wastewater treatment systems in peri-urban areas in France. *Environmental Challenges* 7: 100506.
- Deeb M., Desjardins T., Podwojewski P., Pando A., Blouin M., Lerch T.Z. (2017). Interactive effects of compost, plants and earthworms on the aggregations of constructed Technosols. *Geoderma* 305: 305-313.
- Deeb M., Smagin A.V., Pauleit S., Fouché-Grobla O., Podwojewski P., Groffman P.M. (2024, in review). Building soils for Middle Eastern and North African countries: economic, environmental, and health solutions. *Science of The Total Environment*, Elsevier.
- Eono D., Marzouki N., Fouché-Grobla O., Sebag D. (2022). Does a mixture of compost and minerals become soil after five years? The answer from organic matter. Poster P-902. The 22nd World Congress of Soil Science WCSS22, Glasgow, UK, 31-July - 5 August 2022.
- Fouché-Grobla O., Deeb M., Eono D., Hamdi E., Marzouki N., Snoussi G. (2022). The MMOTIVVES project: Mineral material waste valorization – from tunnels to green infrastructures – and the development of soil. Poster P-475. The 22nd World Congress of Soil Science WCSS22, Glasgow, UK, 31-July - 5 August 2022.
- Kirstetter G., Delestre O., Lagrée P-Y., Popinet S., Josserand C. (2021). B-flood 1.0: an open-source Saint-Venant model for flash flood simulation using adaptive refinement. *Geoscientific model development, Discussions*. Open access, <https://doi.org/10.5194/gmd-2021-15>.
- Ma Q., Abily M., Du M., Gourbesville P., Fouché O. (2020). Integrated Groundwater Resources Management: Spatially Nested Modelling Approach for Water Cycle Simulation. *Water Resour. Manage.* 34(4), 1319–1333.
- Marzouki N., Bottinelli N., Eono D., Fouché-Grobla O., Gueye M., Henry des Tureaux T., Jouquet P., Khlass Y., Pelosi C. (2022). Experimenting hydraulic fatigue of soil biomacropores. Oral comm. The 22nd World Congress of Soil Science WCSS22, Glasgow, UK, 31-July - 5 August 2022.
- Nasri B., Fouché O., Torri D. (2015). Coupling of published pedotransfer functions for the estimation of bulk density and saturated hydraulic conductivity in stony soils. *Catena* 131: 99-108.
- Snoussi G., Yang Y., Bel Hadj Ali I., Hamdi E., Fouché O. (2020). Recycling of TBM-Excavated Materials of the Paris Basin into Technosol: A Numerical Assessment of Its Hydrological Transfer Functions. In: Gourbesville P. & Caignaert G. (eds) *Advances in hydro-informatics*. pp 1063-1077.
- Snoussi G., Nasri B., Hamdi E., Fouché-Grobla O. (2023). Reuse of Tunisian excavated material into composite soil for rainwater infiltration within urban green infrastructure. *Geoderma Regional*, Elsevier.
- Taccone F., Antoine G., Delestre O., Goutal N. (2020). A new criterion for the evaluation of the velocity field for rainfall-runoff modelling using a shallow-water model. *Advances in Water Resources* 140, 103581.



INSTITUT D'ÉCOLOGIE ET DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT DE PARIS
S-U UMR 113 - CNRS UMR 7618 - INRAE UMR 1392 - IRD UMR 242 - UNIV. DE PARIS UMR 113 - UNIV. PARIS EST CRETEIL UMR 7618



Référence hors-équipe d'encadrement :

Ogden, F. L., M. B. Allen, W. Lai, J. Zhu, M. Seo, C. C. Douglas, and C. A. Talbot (2017), The soil moisture velocity equation, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 9, 1473–1487.

Conditions scientifiques matérielles (conditions de sécurité spécifiques) et financières du projet de recherche

La thèse se déroulera à Paris, sur les sites de Jussieu et du Cnam, et sur des terrains en région Ile-de-France. Le financement du contrat doctoral et des activités de recherche est assuré par le PEPR Solu-Biod (ANR) au sein du partenariat dénommé « living lab francilien des SfN » dont l'animateur est le directeur de la thèse (Olivier Fouché).

Ouverture internationale

La collaboration en cours avec la Tunisie sera poursuivie, notamment en 2025 par une action commune dans l'Ecole des objectifs du développement durable (EODD), en partenariat aussi avec le Togo.

De plus, un projet a démarré avec la Malaisie (financement PHC acquis en juin 2023), avec un échange de doctorants pour des séjours scientifiques de quelques mois.

Enfin, une collaboration sur le sujet est en cours avec Maha DEEB, université de Suisse occidentale, et Perl EGENDORF, université de New-York, deux perspectives de post-doc possibles après la thèse.

Collaborations actuelles

Deux thèses expérimentales sont en cours sur les sols construits à partir de matériaux géologiques excavés : la thèse de Ghada SNOUSSI s'est déroulée (2019-2024) en Tunisie, collaboration entre l'ENIT (Essaieb HAMDI), le CNAM et l'IRD (Olivier FOUCHÉ) sur les propriétés à atteindre en construction de sols pour les infrastructures végétalisées dans les régions en manque de pluie de la Méditerranée et du Moyen-Orient (Snoussi et al., 2023 ; Deeb et al., 2024) ; l'autre, menée par David EONO en France, thèse de l'ED129 qui se déroule au sein de iEES-Paris en collaboration avec l'IFPEN (David SEBAG) sur la maturation de la matière organique des sols composites sur 5 ans.

De plus, des travaux pour mesurer et comprendre l'influence des biomacropores et du système racinaire sur le comportement physique (instabilité sous infiltration, retrait sous dessiccation) du sol construit ont déjà eu lieu dans l'équipe (Marzouki et al., 2022 ; Aubertin et al., 2022 ; Eono et al., 2022 ; stage de W. Hafid, 2023, master MNHN). En 2024, grâce à un nouveau stage de master (Marie-José MAKHOUL, univ. Rouen) financé par iEES-Paris dans le cadre d'une collaboration (PHC) avec une école agronomique en Malaisie, on mène un travail approfondi sur le rôle comparé de la matière organique et des colloïdes dans les propriétés hydriques et hydrauliques d'un sol construit en combinant un limon excavé et un compost issu de déchets alimentaires de la ville, dans des placettes de 1 m² sur 40 cm de profondeur (design par Behzad NASRI, IRD).

Enfin, une collaboration avec Pierre-Yves LAGRÉE, en soutien scientifique, qui contribuera par l'outil logiciel Basilisk du laboratoire d'Alembert de Sorbonne Université et sera membre du comité de suivi de la thèse.

Objectifs de valorisation des travaux de recherche du doctorant : diffusion, publication et confidentialité, droit à la propriété intellectuelle

Les objectifs de valorisation sont la publication, une contribution au développement d'un outil logiciel de Sorbonne Université (Basilisk), et l'innovation dans la voirie urbaine avec un partenaire institutionnel, la Ville de Paris, et une société privée du secteur BTP, le groupe BIR. D'autres partenaires pourront être impliqués grâce notamment au cluster Eau-Milieu-Sol.





Résumé

La thèse s'inscrit dans un contexte scientifique marqué par les aspects suivants :

- L'émergence nationale nécessaire des solutions fondées sur la nature (SfN) pour soutenir la biodiversité dans la ville (enjeu du PEPR Solu-Biod) et mitiger les risques atmosphériques : îlot de chaleur, sécheresse, inondation.
- L'effort des collectivités pour développer une trame brune, réseau de sol reliant les espaces verts.
- L'expérience de iEES-Paris sur les sols construits, qui sont vus ici comme un composant d'une SfN pour constituer une trame brune, et au-delà comme une heuristique par la production d'analogues des sols urbains et pour l'étude des sols en général.

Dans la thèse on traite 3 types de flux que l'on sait modéliser séparés avec au moins 3 équations gouvernantes : l'originalité de la thèse est de coupler les trois flux pour monter un modèle intégré à l'échelle de la parcelle.

Pour cela, les tâches à effectuer dans la thèse sont :

- Un modèle hydrodynamique à l'échelle de la parcelle : le sol, transformateur de la pluie en débit. Coupler ruissellement et infiltration au moyen d'un code par éléments finis, avec prise en compte de l'hétérogénéité (éléments grossiers, biomacropores).
- Un modèle de stockage-restitution du carbone entre l'atmosphère et le sol (incluant sa végétation, le C minéralisé dissous ou sous forme gaz) pour simuler le cycle des GES à l'échelle de la parcelle.
- Un modèle de transfert-stockage de la chaleur entre l'atmosphère et le sol
- Une expérimentation pour calibrer le modèle /eau-chaleur-carbone/ à la parcelle.
- Un algorithme de changement d'échelle depuis la parcelle à un réseau de tranchées brunes et vertes pour simuler une trame brune virtuelle, produire des simulations à l'échelle d'un quartier, puis d'une ville de 5 km sur 5 km (résolution d'un scénario climatique, connexion avec l'ANR MicroLarge sur le cycle du carbone démarré en 2024), déduire des paramètres de bilan tels qu'un coefficient de partage pour chaque item /eau-chaleur-carbone/.

L'expérimentation à la parcelle sera montée avec l'aide de Monsieur Behzad NASRI (IR, IRD, UMR iEES-Paris). Elle sera localisée sur un terrain mis à disposition par une collectivité avec laquelle nous travaillons déjà, partenaire du living lab francilien des SfN (4 équipes, ensemble animé par le directeur de la thèse, O. Fouché) dans le cadre du PEPR Solu-Biod.

Le couplage numérique hydrodynamique entre ruissellement et infiltration (collaboration avec Olivier DELESTRE, EDF, co-encadrant non-HDR) sera validé sur des données expérimentales et de terrain dont la disponibilité a été vérifiée à l'amont avec leur détenteur.

Le couplage des flux d'eau (liquide, gaz) avec les flux de chaleur et de carbone sera réalisé au moyen de l'outil Basilisk (code multiphysique opérant par éléments finis, en développement au laboratoire d'Alembert de Sorbonne Université (collaboration Pierre-Yves LAGRÉE) ou en cas d'échec, par un outil commercial que nous maîtrisons déjà tel que Comsol Multiphysics.

En parallèle de la thèse, le projet réalisera une caractérisation et un suivi de la biodiversité du sol (microbiome dans la porosité, végétation spontanée, faune du sol) ponctuellement et à l'échelle d'un réseau de trame brune afin de démontrer l'efficacité de ce concept de SfN. Cette partie du projet sera menée au sein du futur département sol-plante de iEES-Paris, avec ses équipes travaillant sur la matière organique et sur la faune du sol, et en particulier son équipe spécialisée sur l'étude de la pérennité (physiologie et résilience aux stress) de la végétation en ville. Cet environnement de compétences sera représenté dans le comité de suivi de la thèse.



Collaboration externe à iEES-Paris

- Avec Olivier DELESTRE : co-directeur de thèse, spécialiste en couplage numérique des flux, M&C université de Nice Côte d'Azur, en délégation au laboratoire Saint-Venant commun à EDF R&D et Ecole des Ponts ParisTech.
- Avec Pierre-Yves LAGRÉE : en soutien scientifique, contribuera par l'outil Basilisk du laboratoire d'Alembert de Sorbonne Université. Membre du comité de suivi de la thèse.

Summary

The thesis will be part of a scientific context marked by the following aspects:

- The necessary national emergence of nature-based solutions (NbS) to support biodiversity in the city (PEPR Solu-Biod issued) and mitigate atmospheric risks: heat island, drought, flooding.
- Local authorities' efforts to develop a brown grid, a network of soil linking green spaces.

- iEES-Paris' experience with built-up soils, which are seen here as a component of a NbS to form a brown grid, and beyond as a heuristic through the production of analogues of urban soils and for the study of soils in general.

In this thesis, we focus on three types of flow, with at least 3 governing equations, which we know how to model separately: the originality of the thesis is to couple the three flows to set up an integrated model at plot scale.

To achieve this, the tasks to be carried out in the thesis are:

- A hydrodynamic model at plot scale: the soil as a transformer of rainfall into flow. Couple runoff and infiltration using a finite element code, considering heterogeneity (coarse elements, biopores).
- A model of carbon storage and restitution between the atmosphere and the soil (including vegetation, mineralized C dissolved or in gas form) to simulate the GHG cycle at plot scale.
- A heat transfer-storage model between atmosphere and soil.
- An experiment to calibrate the /water-heat-carbon/ model at plot level.
- A scaling algorithm from the plot to a network of brown and green trenches to simulate a virtual brown grid, produce simulations at the scale of a neighbourhood, then of a city 5 km by 5 km (resolution of a climate scenario, connection with the ANR MicroLarge carbon cycle project starting in 2024), deduce balance parameters such as a partition coefficient for each /water-heat-carbon/ item.

The plot experiment will be set up with the help of Behzad NASRI (UMR iEES-Paris), an IRD research engineer specializing in soil physics and in situ instrumentation, already co-supervising this year a Master's internship on the role of colloids and organic matter in the hydric properties of built-up soils. It will be located on land made available by a local authority with which we are already working, and which is a partner in the Ile-de-France living lab for NbS (4 teams, led by the thesis director, O. Fouché) as part of the PEPR Solu-Biod program.

Numerical hydrodynamic coupling between runoff and infiltration (collaboration with Olivier DELESTRE, EDF, non-HDR co-supervisor) will be validated on experimental and field data, the availability of which has been verified upstream with the data holder.

The coupling of water flows (liquid, gas) with heat and carbon flows will be carried out using the Basilisk tool (multiphysics code operating by finite elements, under development at the d'Alembert laboratory of Sorbonne University (collaboration with Pierre-Yves LAGRÉE) or, in the event of difficulty with this tool, using a commercial software that we already have (Comsol).

In parallel with the thesis, the project will carry out characterization and monitoring of soil biodiversity (microbiome in porosity, spontaneous vegetation, soil fauna) on a selective basis and on the scale of a brown grid network, in order to demonstrate the effectiveness of this NbS concept. This part of the project will be carried out within the future soil-plant department of iEES-Paris, with its teams working on organic matter and soil fauna, and in particular its team specializing in the study of the sustainability (physiology and stress resilience) of urban vegetation. These skills will be represented on the thesis monitoring committee.