

Rafrâichissement passif bio-géosourcé pour limiter les îlots de chaleur urbains en France à l'horizon 2100

Description du sujet

La France s'est dotée d'une trajectoire nationale de référence pour l'adaptation (TRACC) qui retient un réchauffement moyen de l'ordre de +2 °C à l'horizon 2030, +2,7 °C vers 2050 et +4 °C à l'horizon 2100 (par rapport à l'ère pré-industrielle) [1,2]. Dans ce cadre, l'îlot de chaleur urbain devient un enjeu durable de confort, de santé et de continuité des usages, car l'été est précisément la saison où les écarts peuvent dépasser la moyenne annuelle et où les nuits chaudes limitent le rafraîchissement naturel des bâtiments [2]. L'adaptation ne peut donc pas reposer uniquement sur des systèmes actifs de climatisation, au risque d'augmenter les besoins électriques, la chaleur rejetée en ville, et la vulnérabilité en cas de tension énergétique. Les travaux opérationnels récents en France convergent vers l'idée qu'il faut raisonner à l'échelle des surfaces urbaines dominantes (voirie, places, toitures, façades) et comparer les solutions avec une lecture multicritère, car le "gain thermique" dépend fortement du contexte et peut déplacer le problème (eau mobilisée, entretien, éblouissement, durabilité, carbone) [3,4]. C'est l'esprit du guide de l'ADEME sur le rafraîchissement urbain et du projet national ISSU (IREX/Cerema) qui vise précisément à objectiver et comparer les solutions, des matériaux aux solutions fondées sur la nature, via des méthodes et des démonstrateurs instrumentés [3,4]. Les matériaux de construction du futur se situent à l'interface de verrous multiphysiques, où les couplages thermo-hydro-mécaniques, chimiques et environnementaux gouvernent la performance et la durabilité à long terme. Les propriétés macroscopiques et le comportement différé sont directement gouvernés par l'organisation microstructurale : distribution et connectivité de la porosité, nature des interfaces et évolution sous sollicitations thermo-hygriques conditionnent les transferts et, in fine, le retrait, le fluage et la durabilité. L'enjeu de la thèse est donc de relier, dans une approche multi-échelle, des indicateurs microstructuraux à la performance rafraîchissante et à sa tenue dans le temps.

Les stratégies de voirie "cool" reposent classiquement sur trois familles de leviers : augmenter la réflectance solaire (albédo), favoriser le refroidissement par évaporation via des revêtements perméables et/ou à rétention d'eau, et réduire le stockage de chaleur (choix de textures, porosités, propriétés thermophysiques) [5-7]. En parallèle, Seifeddine et al. montrent aussi que, pour les revêtements perméables, l'effet rafraîchissant dépend de la disponibilité en eau proche de la surface, de la capillarité et des propriétés d'absorption, et pas uniquement d'un indicateur global de porosité [6]. À l'échelle du bâtiment, les solutions fondées sur la nature complètent ces leviers par l'ombrage et l'évapotranspiration. Les revues bibliographiques sur les toitures végétalisées mettent en avant que l'évapotranspiration est un mécanisme central du refroidissement, mais qu'il reste sensible aux hypothèses de substrat, de végétation, de climat et de gestion de l'eau, ce qui impose des protocoles de mesure et de modélisation explicites [8]. De façon analogue, l'investigation d'Oquendo-Di Cosola et al. sur les murs végétalisés rappelle la grande variabilité des gains (selon typologie, densité végétale et irrigation) et insiste sur l'évaluation en conditions réelles de rue et de façade, pas uniquement via des essais "idéalisés" [9]. Le verrou scientifique identifié ici est donc moins "l'absence de solutions" que la difficulté à construire une approche intégrée, adaptée au scénario +4 °C, qui combine voirie, enveloppes, végétal et contraintes de ressource.

En 2100, deux facteurs risquent d'être déterminants pour la performance réelle : la durabilité (encrassement, colmatage, altération des enduits/isolants, perte de réflectance, vieillissement des substrats) et la contrainte hydrique (capacité à rafraîchir sans irrigation systématique, arbitrage entre infiltration, stockage, récupération d'eau pluviale et usages)

[3,4,6]. Autrement dit, il faut quantifier non seulement des températures de surface “au début de vie”, mais aussi la tenue des performances et leurs conditions de maintien. Le choix d’une base bio et géosourcée est justifié par trois raisons directement liées au contexte climatique et aux objectifs d’adaptation. D’abord, les mécanismes recherchés sont passifs : inertie, adsorption/désorption d’humidité, et gestion hydrique à faible énergie, ce qui renvoie à des matériaux capables d’interagir avec la vapeur d’eau et de lisser certaines variations, propriétés discutées de manière générale dans les travaux sur la régulation d’humidité [10]. Ensuite, les ressources bio- et géosourcées permettent d’explorer des systèmes “sobres” et localisables : fibres (chanvre, lin), matrices minérales (terre, charges, pouzzolanes), et couches capillaires/stockantes, avec une attention explicite à la dépendance à l’eau et au vieillissement. Enfin, ces matériaux sont cohérents avec une évaluation environnementale élargie (carbone, circularité, maintenance), demandée par les approches multicritères du rafraîchissement urbain [3,4].

Ce positionnement s’appuie aussi sur des compétences et résultats déjà établis sur des enveloppes à base de terre. Belarbi et al. ont montré, à l’échelle enveloppe et bâtiment, l’intérêt de caractériser finement les transferts hygrothermiques des parois en terre crue sous climats contrastés, précisément pour relier matériau, sollicitation et confort/énergie et l’intérêt de la terre crue pour des climats désertiques. [12,13]. Les objectifs scientifiques peuvent alors être formulés de façon opérationnelle. Il s’agit d’abord d’identifier, parmi des familles de revêtements de voirie (réfléchissants, perméables, à rétention, géosourcés) et de solutions d’enveloppe (enduits terre, isolants biosourcés denses, toitures/façades végétalisées), celles qui produisent un abaissement mesurable des températures de surface et un bénéfice microclimatique local lors d’épisodes de chaleur représentatifs, en s’appuyant sur la TRACC comme cadre de scénarisation [1,2]. Il s’agit ensuite de quantifier la sensibilité de ces performances aux contraintes de ressource et d’exploitation (eau disponible, colmatage, encrassement, maintenance), en cohérence avec les constats de la littérature sur les revêtements perméables et les dispositifs végétalisés [6,8,9]. Enfin, il s’agit de proposer un cadre de comparaison qui intègre des indicateurs environnementaux et de durabilité (au minimum carbone, eau mobilisée, entretien), afin d’aboutir à des choix “tenables” dans une France à +4 °C [3,4]. Un point spécifique, lié à la question “quelles plantes tiendront encore en France”, sera traité de manière prudente : l’objectif n’est pas de figer une liste d’espèces pour 2100, mais de construire une logique de sélection par traits (résistance à la sécheresse, enracinement, besoins hydriques, capacité d’ombrage, tolérance au stress thermique) et par scénarios, car les projections indiquent des impacts sur le cycle de l’eau et des incertitudes fortes sur certains équilibres écologiques [2]. Dans le cadre de solutions végétalisées, cela revient à tester des palettes sobres en eau (y compris des végétations de type xérophytes/sedums ou des assemblages plus diversifiés) et à quantifier le compromis entre refroidissement par évapotranspiration et besoin d’irrigation, point explicite dans les revues bibliographiques récentes [8,9].

Présentation établissement et labo d'accueil

L’établissement d’accueil est l’Institut Pascal au sein de l’Université Clermont Auvergne dans un environnement scientifique favorable au développement d’une thèse à l’interface entre matériaux, physique du bâtiment, mécanique et durabilité. Le projet bénéficiera d’un encadrement complémentaire associant expertise en hygrothermie des matériaux bio- et géosourcés, en formulation de matériaux et en mécanique expérimentale. Il s’appuie également sur un ensemble cohérent de moyens expérimentaux disponibles sur le plateau des Cézeaux, couvrant les échelles microstructurale à macroscopique : enceintes climatiques, essais mécaniques, instrumentation thermique et hydrique, corrélation d’images, caractérisations microstructurales et outils de modélisation multiphysique. Cet environnement permettra au

doctorant de mener un travail à la fois fondamental et appliqué, en lien avec les enjeux d'adaptation climatique et de rafraîchissement passif à l'horizon 2100.

Profil du candidat

Le candidat recherché devra être titulaire d'un Master en génie civil, physique du bâtiment, énergétique, science des matériaux ou discipline proche, avec un intérêt marqué pour les matériaux durables et les transferts couplés chaleur-humidité. Une appétence pour le travail expérimental, l'analyse de données et la modélisation hygrothermique sera particulièrement appréciée, de même qu'une sensibilité aux approches multi-échelles reliant microstructure, propriétés de transfert, comportement différé et performance à l'échelle de la paroi ou du microclimat. Le sujet étant multidisciplinaire, il conviendra également que le candidat fasse preuve d'autonomie, de rigueur scientifique, de bonnes capacités rédactionnelles en français et en anglais, ainsi que d'un intérêt pour les problématiques d'adaptation climatique, de durabilité et de rafraîchissement passif en milieu urbain.

Renseignements

Pour tout renseignement ou pour transmettre votre candidature (CV, relevés de notes et lettres de motivation), merci de contacter :

Yassine BELARBI : yassine.belarbi@uca.fr

Evelyne TOUSSAINT evelyne.toussaint@uca.fr

Sofiane AMZIANE sofiane.amziane@uca.fr

Références

- [1] Météo-France. À quel climat s'adapter en France selon la TRACC ? — Variabilité, événements extrêmes et impacts climatiques (Partie 2). Rapport, 14 mars 2025.
- [2] Ministère de la Transition écologique. Troisième Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC3). 10 mars 2025.
- [3] ADEME. Rafraîchir les villes – Des solutions variées (synthèse d'expertise), 2021.
- [4] Cerema. Projet national ISSU : vers un référentiel national pour évaluer les solutions contre la surchauffe urbaine (présentation institutionnelle), 2024.
- [5] Khaled Seifeddine, Sofiane Amziane, Evelyne Toussaint, Salah-Eddine Ouldboukhitine, Review on thermal behavior of cool pavements, Urban Climate, Volume 51, 2023, 101667, ISSN 2212-0955, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101667>.
- [6] Khaled Seifeddine, Sofiane Amziane, Evelyne Toussaint, Experimental investigation of physical characteristics to improve the cooling effect of permeable pavements, Construction and Building Materials, Volume 345, 2022, 128342, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128342>.
- [7] Chenghao Wang, Zhi-Hua Wang, Kamil E. Kaloush, Joseph Shacat, Cool pavements for urban heat island mitigation: A synthetic review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 146, 2021, 111171, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111171>.
- [8] Stefano Cascone, Julià Coma, Antonio Gagliano, Gabriel Pérez, The evapotranspiration process in green roofs: A review, Building and Environment, Volume 147, 2019, Pages 337-355, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.024>.
- [9] V. Oquendo-Di Cosola, F. Olivieri, L. Ruiz-García, A systematic review of the impact of green walls on urban comfort: temperature reduction and noise attenuation, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 162, 2022, 112463, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112463>.
- [10] Valeria Cascone, Daniel Maskell, Andy Shea, Pete Walker, A review of moisture buffering capacity: From laboratory testing to full-scale measurement, Construction and Building Materials, Volume 200, 2019, Pages 333-343, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.094>.
- [11] Ichrak Hamrouni, Habib Jalili, Tariq Ouahbi, Said Taibi, Mehrez Jamei, Abdelkader Mabrouk, Thermal properties of a raw earth-flax fibers building material, Construction and Building Materials, Volume 423, 2024, 135828, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135828>.
- [12] Yassine Elias Belarbi, Mohammed Yacine Ferroukhi, Nabil Issaadi, Philippe Poullain, Stéphanie Bonnet, Assessment of hygrothermal performance of raw earth envelope at overall building scale, Energy and Buildings, Volume 310, 2024, 114119, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114119>.
- [13] Yassine Elias Belarbi, Philippe Poullain, Ines Othmen, Nabil Issaadi, Stéphanie Bonnet, Nordine Leklou, Experimental evaluation of the time lag and decrement factor of a raw earth wall for various climates: Comparison of different methods, Journal of Building Engineering, Volume 113, 2025, 113996, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.113996>.