وزارة التـــعليم العـــالي والبـــحث العـــلمي
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH
المـــدرســـة المتـعددة العلـــوم للـــهنـــدسـة المـــعمارية والعـــمران
(المجاهد حسين آيت أحمد)
POLYTECHNIC SCHOOL OF ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING
(Mujahid Hocine Ait Ahmed)
Architecture and Environment Laboratory -LAE-

ECOLE POLYTECHNIQUE D' ARCHITECTURE ET D' URBANISME "LE MOUDJAHID HOCINE AIT AHMED"

Laboratoire de recherche Architecture et Environnement

LMD Doctoral Thesis Defense of
Ms. Khadidja KEHLI
Wednesday, October 16 th, 2024, at 4.00 PM
at the conference room

Entitled:

Thermal and energy retrofit of residential buildings with low thermal inertia following a regenerative approach in the city of Laghouat

The jury consists of:

- ✓ **Pr. BOUSSOUALIM Aïcha,**
  Président, EPAU
- ✓ **Dr. MESTOUL Djamel,**
  Examiner, EPAU
- ✓ **Pr.GUEDDOUDA Mohamed Kamel,**
  Examiner, University of Laghouat
- ✓ **Pr. ZEMMOURI Noureddine,**
  Examiner, University of Algiers 1
- ✓ **Pr. BELHADJ Belkacem,**
  Thesis supervisor, University of Laghouat

Abstract

The thermal and energy efficiency rehabilitation of existing buildings is of growing research interest due to the high energy use in buildings, which is considered a significant driver of climate change, global warming and CO2 emissions. In Algeria, the residential sector contributes to energy challenges by consuming 43% of electricity during the summer season, due to the low thermal inertia of opaque building envelopes. This can be attributed to changes in building materials and construction techniques, which can characterize the

The methodological framework to which this work relates is divided into three parts, the first of which involves an in-situ experimental study for a representative case study, by means of interior temperature measurements and thermal imaging recordings during the winter and summer period. A second part deals with an experimental study for developing two regenerative bio-composites, designed for the thermal and energy rehabilitation of opaque envelopes of existing buildings (exterior walls and roofs). Following the determination of the optimal composition of the gypsum-based bio-composite lightened with hot-water-treated barley straw, the effect of the direct incorporation of two proposed phase-change bio-materials (PCMs), namely palm oil and cocoa butter, used separately, on the physico-mechanical properties and microstructure analysis was investigated. Finally, a numerical simulation study is undertaken to determine the optimum thickness of the addition of a new regenerative bio-composite on the thermo-physical behavior of the built envelope. This was accompanied by an evaluation of the thermal and energy retrofit for a summer day and the months of the year, especially the summer period.

The in-situ findings highlighted that the comfort level is not considered, particularly in the summer period, and that a thermal and energy retrofit strategy is required. Furthermore, incorporating phase change material (PCM) in the two developed bio-composites has resulted in an improvement of the thermal storage capacity and consequently of the thermal diffusivity, mainly in the case of cocoa butter. Microstructure analysis results by several techniques also revealed improved homogeneity and chemical stability for the two bio-composites developed. Moreover, it has been demonstrated through numerical simulation that the addition of the bio-composite developed with cocoa butter has a favorable effect on the thermal and energy retrofit of exterior walls and roofing in the summer period, by increasing time lag and consequently reducing cooling loads. Last but not least, the development of bio-composite with bio-based PCM positively contributes to improving the thermal performance of opaque building envelopes. Such a thermal and energy eco-rehabilitation approach can promote regenerative and sustainable architecture by reducing energy consumption, thereby reducing greenhouse gas emissions and stimulating the local economy.

Keywords: Thermal and energy retrofit, thermal inertia, thermal comfort, bio-based materials, regenerative bio-composites, bio-based phase-change materials, opaque built envelope, thermo-physical behavior, circular economy, hot and dry climate.

وزارة التـــعليم العـــالي والبـــحث العـــلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
المـــدرســـة المتـعددة العلـــوم للـهنـــدسـة المـــعمارية والعـــمران
(المجاهد حسين آيت أحمد)
ÉCOLE POLYTECHNIQUE D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME
(Le Moudjahid Hocine Ait Ahmed)

Laboratoire d'architecture et d'environnement -LAE-

Soutenance de thèse de doctorat LMD
Mme Khadidja KEHLI
Mercredi 16 octobre 2024 à 16h00
Dans la salle de conférences

Intitulé de la thèse :

Réhabilitation thermique et énergétique des habitations à faible inertie thermique suivant une approche régénérative dans la ville de Laghouat

Le jury est composé de :

- ✓ **Pr. BOUSSOUALIM Aïcha,**
  Présidente, EPAU
- ✓ **Dr. MESTOUL Djamel,**
  Examinateur, EPAU
- ✓ **Pr.GUEDDOUDA Mohamed Kamel,**
  Examinateur, Université de Laghouat
- ✓ **Pr. ZEMMOURI Noureddine,**
  Examinateur, Université d'Alger 1
- ✓ **Pr. BELHADJ Belkacem,**
  Directeur de thèse, Université de Laghouat

RESUME

La réhabilitation thermique et énergétique des bâtiments existants présente un intérêt croissant pour la recherche, en raison de la forte consommation d'énergie dans les bâtiments qui est considérée comme un contributeur majeur au changement climatique, au réchauffement de la planète et aux émissions de CO_2. En Algérie, le secteur résidentiel contribue aux défis énergétiques en consommant 43% de l'électricité pendant la saison estivale, en raison de la faible inertie thermique des enveloppes bâties opaques des bâtiments. Cela est attribué au changement des matériaux de construction ainsi qu'aux techniques constructives, qui peuvent caractériser tout un parc immobilier existant construit de 1970 à ce jour. Cette situation touche principalement les régions à climat chaud et aride, telle que la ville de Laghouat, où les fortes amplitudes thermiques se manifestent fortement et nuisent au confort thermique des habitants.
La méthodologie à laquelle se rapporte ce travail est articulée en trois parties, dont la première partie consiste à une étude expérimentale in-situ pour un cas d'étude représentatif, par le biais des mesures de températures intérieures et des images de la caméra thermique en période hivernale et en période estivale,
La deuxième partie porte sur une étude expérimentale destinée au développement de deux bio-composites régénératifs, destinés à la réhabilitation thermique et énergétique des enveloppes opaques des bâtiments existants (murs extérieurs et toitures).
La dernière partie est consacrée à une étude par simulation numérique visant à déterminer l'épaisseur optimale de l'ajout d'un nouveau bio-composite régénératif sur le comportement thermo-physique de l'enveloppe bâtie. Ensuite, l'évaluation de la réhabilitation thermique et énergétique pour un jour d'été et les mois de l'année, surtout la période estivale.
Les résultats in-situ ont montré que le niveau confort n'est pas pris en considération notamment dans la période estivale, et qu'il est nécessaire d'adopter une stratégie de réhabilitation thermique et énergétique. Par ailleurs, l'incorporation du biomatériau à changement de phase (PCM) dans les deux bio-composites développés a permis d'améliorer la capacité de stockage thermique et par conséquent la diffusivité thermique, plus particulièrement pour le cas du beurre de cacao. Les résultats de l'analyse de la microstructure par plusieurs techniques ont montré également une meilleure homogénéité et une stabilité chimique pour les deux bio-composites développés. De plus, les résultats de la simulation numérique ont montré que l'ajout du bio-composite a un effet favorable sur la réhabilitation thermique et énergétique des murs extérieurs et de la toiture dans la période estivale, par l'augmentation des temps de déphasage et par conséquent la réduction des charges de refroidissement.
Enfin, le développement du bio-composite avec du PCM biosource (beurre de cacao) contribue favorablement à l'amélioration des performances thermiques des enveloppes opaques du bâtiment. Cette approche d'éco-réhabilitation thermique et énergétique peut promouvoir une architecture régénérative et durable en réduisant la consommation d'énergie, réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre et stimulant l'économie locale.

Mots clés
Réhabilitation thermique et énergétique, inertie thermique, confort thermique, matériaux biosources, bio-composites régénératif, biomatériau à changement de phase, enveloppe bâtie opaque, comportement thermo-physique, économie circulaire, climat chaud et aride

.

ملخص

إن قضية تأهيل المباني الموجودة حاليا من الناحية الحرارية والطاقية تحظى باهتمام متنام في مجال البحث العلمي، نظرا لارتفاع استهلاك الطاقة داخل المباني، والتي تعتبر مساهما رئيسيا في تغير المناخ والاحتباس الحراري وانبعاث غاز ثاني اكسيد الكربون .

في الواقع، يساهم القطاع السكني في الجزائر في استهلاك 43% من الطاقة الكهربائية خلال فصل الصيف، ويعزى ذلك إلى القصور الحراري المنخفض لغلاف المبنى المعتم. كما يرتبط ذلك بالتغيرات التي طرأت على استخدام مواد البناء وتقنيات البناء، والتي يمكن أن تميز مجمل البنايات الحالية والتي تم تشييدها بين عام 1970 وحتى يومنا هذا. إن هذا الوضع يؤثر بشكل رئيسي على المناطق ذات المناخ الجاف الحار، كمدينة الأغواط، حيث تكون التقلبات الحرارية القوية ملحوظة للغاية وتؤثر سلبًا على مستوى الكفاءة الحرارية للسكان .

أما المنهجية التي يتعلق بها هذا العمل فتنقسم إلى ثلاثة أجزاء، أولها دراسة تجريبية ميدانية لدراسة حالة نموذجية باستخدام عمليات قياس درجات الحرارة داخل المبنى والتقاط صور بالكاميرا الحرارية خلال فترة الشتاء والصيف، بهدف تقييم الأداء الحراري الفيزيائي لغلاف المبنى ذي القصور الحراري المنخفض.أما الجزء الثاني فهو دراسة تجريبية بشأن استحداث نوعين جديدين من مواد البناء المركبة الحيوية المصممة للتأهيل الحراري والطاقوي لغلافات المباني الحالية المعتمة (الجدران الخارجية والأسقف). بعد تحديد التركيبة المثلى للمركب الحيوي المكون من الجبس المخفف باستخدام قش الشعير بعد معالجته بالماء الساخن، كما وتمت دراسة تأثير الإدماج المباشر للمادتين متغيرة الطور المقترحتين ،وهما زيت النخيل وزبدة الكاكاو، المستخدمتين بشكل منفصل، على الخواص الفيزيائية الميكانيكية و شمل ذللك تحليل البنية المجهرية.

أما القسم الأخير فقد كُرس لدراسة المحاكاة الرقمية لتحديد السُمك الأمثل لإضافة مركب حيوي متجدد جديد على السلوك الفيزيائي الحراري للغلاف المبني. وأعقب ذلك تقييم لعملية التأهيل الحراري والطاقوي خلال يوم من أيام الصيف وخلال أشهر السنة لاسيما فترة الصيف.

كشفت نتائج الدراسة الميدانية أن مستوى الراحة الحرارية لم يؤخذ بعين الاعتبار، خاصةً خلال فترة الصيف، وأن ثمة ضرورة لوضع استراتيجية تأهيل حراري وطاقوي. علاوةً على ذلك، فإن دمج المواد الحيوية المتغيرة الطور (PCM)في المركبين الحيويين المستحدثين أدى إلى تحسين قدرة التخزين الحراري ومنه الاستجابة الحرارية، خاصةً في حالة زبدة الكاكاو. أظهرت نتائج تحليل البنية المجهرية باستخدام عدة تقنيات أيضًا تحسن التجانس والاستقرار الكيميائي للمركبين الحيويين المستحدثين .كما أظهرت نتائج المحاكاة الرقمية أن إضافة المركب الحيوي المطور بزبدة الكاكاو له تأثير إيجابي على تأهيل الجدران الخارجية والأسقف الخارجية حراريًا وطاقيًا خلال فترة الصيف، وذلك بزيادة أزمنة الانتقال الطوري وبالتالي تقليل استهلاك الطاقة الكهربائية في التبريد .

وأخيرًا، يساهم تطوير المركب الحيوي مع المواد الحيوية متعددة الطور ذات المصدر العضوي (زبدة الكاكاو) في تحسين الأداء الحراري لغلاف المبنى المعتم. إن هذا التوجه نحو التأهيل البيئي الحراري والطاقة يمكن أن يروج للعمارة المتجددة والمستدامة من خلال تقليل استهلاك الطاقة، وبالتالي تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري وكذلك تحفيز الاقتصاد المحلي.

الكلمات المفتاحية

التأهيل الحراري والطاقوي، القصور الحراري، الراحة الحرارية، مواد البناء ذات المصدر العضوي ، المواد الحيوية المتجددة، مواد البناء المركبة الحيوية المتجددة ، المواد الحيوية متغيرة الطور، غلاف المبنى المعتم، الأداء الحراري الفيزيائي، الاقتصاد المستدام، المناخ الحار والجاف.