Septembre 2024

Dossier de réponse à l'appel à projet

Proposition BIO4House

PROJET

Nouveaux biomatériaux à faible empreinte environnementale pour l'Habitat or *New biomaterials with low environmental footprint for House sector*, BIO4House

PORTEURS/TEUSES du PROJET

Nom : LY Prénom : Elhadji Babacar
Etablissement d'appartenance : Université Gaston Berger, UGB
Laboratoire : Laboratoire d'Electronique, Informatique, Télécommunication et Energies Renouvelables, LEITER

LISTE DES LABORATOIRES ET ÉQUIPES CONCERNÉES

Etablissement	Laboratoire	Equipe	Nom des E-C / C impliqués	Section CNU	% d'implication dans le projet
UGB	LEITER	Matériaux	Dr. Babacar DIOUF, Prof. Elhadji Babacar LY	60 & 62 33	40
CIRAD	BioWooEB	Matériaux & Molécules du végétal	Dr. Amandine VIRETTO, Dr. Anthony BENOIST	33 & 62 62	30
INP-HB	LAPISEN	Génie des procédés	Dr. Esaie Kouadio Appiah KOUASSI Prof. Benjamin Kouassi YAO	62 32	30

1. Description du projet scientifique

a. Positionnement dans l'état de l'art

Selon les Nations Unies [1], la population urbaine du continent africain a doublé en 20 ans, atteignant 475 millions de personnes en 2015. Ce chiffre devrait dépasser le milliard en 2025 et atteindre 2,4 milliards d'ici 2050. En raison de cette explosion démographique et de l'exode rural qui l'accompagne, plus de 60 % de la population urbaine en Afrique vit désormais dans des bidonvilles, selon la Banque mondiale [2]. Dakar, la capitale sénégalaise est un parfait exemple ; elle occupe seulement 0,3 % du territoire national, concentre près du quart de la population sénégalaise (22,1 %), soit 4 004 426 habitants et une densité de 7 478 habitants au km². Elle est passée de 400 000 habitants en 1970 à plus de 4 millions d'habitants aujourd'hui. Dans ces grandes villes africaines, accéder à un logement décent et abordable est quasiment impossible pour une grande partie de la population. La demande en logements est supérieure à l'offre, ce qui conduit à des loyers extrêmement élevés et ainsi à la naissance de bidonvilles qui restent le seul recours pour une large partie de la population de vivre et de travailler en ville [3]. En plus du manque de surfaces disponibles, le coût des matériaux de construction est très élevé, notamment celui du ciment qui,

Le ciment de Portland, un des principaux ciments utilisés dans les bétons traditionnels, est un liant hydraulique composé majoritairement de silicates de calcium qui durcissent par réaction chimique avec l'eau. La production de ces liants nécessite des procédés très énergivores pour atteindre des températures très élevées nécessaires à la clinkérisation, se traduisant par l'émission de quantités importantes de CO_2 et de gaz à effet de serre [4]. En ce sens, les géopolymères ont suscité un intérêt croissant au cours des deux décennies, dans le domaine de la recherche en tant qu'alternative écologique aux matériaux de construction traditionnels comme le béton à base de ciment de Portland [5]. Les réactions chimiques mises en œuvre lors de la géopolymérisation reposent simplement sur une activation alcaline à température ambiante [6] ou légèrement supérieure (50 °C) [7] de composés aluminosilicates. Ces géopolymères sont des polymères inorganiques présentant une très bonne stabilité thermique, une excellente inertie chimique et des propriétés mécaniques intéressantes [6],[8]. Ils peuvent avoir une structure amorphe ou semi-cristalline, caractérisée par un enchainement de séquences de tétraèdres de silicates et d'aluminates [6]. En plus du fait d'être produits sans procédés énergivores, les précurseurs d'aluminosilicates utilisés pour former ces géolopymères sont issus de déchets tels que les cendres volantes, les laitiers des hauts fourneaux et les métakaolins.

Depuis une vingtaine d'années, l'utilisation des biomasses végétales dans les matériaux composites a connu un essor exceptionnel du fait qu'elles soient renouvelables, très largement disponibles et ayant une grande gamme de propriétés (bonnes propriétés mécaniques, propriétés isolantes et acoustiques, faible abrasion, faible retrait et biodégradable). Leur utilisation dans les matériaux composites à matrice cimentaire a permis de développer une nouvelle génération de matériaux appelés Agro-bétons, démontrant une excellente capacité de régulation hygrothermique en raison de leur très forte porosité mais également de très bonnes propriétés thermiques (la conductivité thermique varie entre 0,06 et 0,2 $W.m^{-1}.K^{-1}$) et acoustiques (le coefficient d'absorption acoustique varie entre 0,3 à 0,9 sur la gamme de fréquences entre 100 à 2000 Hz) mais des performances mécaniques plus modestes que les bétons seuls, dues à une faible résistance en compression (la résistance en compression varie entre 0,25 et 1,15 MPa) [9]. De nombreuses études se sont intéressées à améliorer la résistance en compression de ces agro-bétons afin d'en faire des matériaux porteurs tout en conservant les propriétés thermiques et acoustiques. Les résultats ont montré qu'en fonction des traitements chimiques réalisés sur les fibres végétales, il était possible d'améliorer la résistance en compression de manière significative [9]. La problématique de l'interface entre les fibres et la matrice est bien connue dans le domaine des matériaux composites, et les Agro-bétons n'échappent pas à la règle.

La combinaison de fibres végétales et de liant géopolymère est un sujet d'étude très récent et a fait l'objet de très peu de publications. C'est en ce sens que nous proposons ce sujet très innovant sur l'utilisation de géopolymères dans le développement de nouveaux matériaux aux propriétés équivalentes à celles du béton conventionnel pour l'habitat en Afrique, et dans le contexte décrit précédemment, il s'agit d'une alternative à la fois économique et surtout environementale très prometteuse proposant une solution durable à la crise du logement dans les grandes villes africaines.

b. Objectifs et démarche scientifique

L'objectif principal du projet BIO4House est de proposer une solution durable comme alternative à un matériau conventionnel onéreux et très polluant, en utilisant des géopolymères comme liants minéraux à faible empreinte environnementale dans des nouveaux éco-matériaux pour l'habitat.

La géopolymérisation repose des réactions chimiques simples d'activation alcaline de composés aluminosilicates. Les argiles et les latérites font partie de cette classe de composés, elles sont très abondantes dans les pays tropicaux comme au Sénégal et en Côte d'Ivoire. Afin de déterminer précisément la composition chimique de ces deux matières premières, des analyses chimiques seront réalisées pour déterminer la concentration en SiO_2, Al_2O_3 et Fe_2O_3, ce qui nous permettra d 'estimer le ratio SiO_2/Al_2O_3 indispensable pour la réaction de géopolymérisation. Des solutions alcalines à base de

soude et de potasse de différentes concentrations seront ajoutées aux argiles/latérites afin de solubiliser les oxydes aluminosilicates présents et permettre la géopolymérisation.

Le développement d'éco-matériaux dans le projet repose dans un premier temps sur l'utilisation de ressources locales. Pour cela, les fibres végétales sélectionnées sont trois biomasses résiduelles très largement disponibles au Sénégal et en Côte d'Ivoire ; le typha, les fibres de Coco et les cabosses de Cacao, qui présentent des compositions chimiques et des morphologies très différentes. Ces trois biomasses n'ont aucune valeur nutritionnelle et leur valorisation en tant que matériaux est perçue comme une réelle solution, aussi bien du point de vue économique en donnant une valeur ajoutée à un déchet mais également du point de vue sanitaire, en réduisant ces volumes de déchets. A l'heure actuelle, ces biomasses résiduelles sont abandonnées sur les lieux de récolte, où elles se dégradent et sont souvent source de nombreuses maladies en Afrique de l'Ouest.

Afin d'améliorer l'interface entre les fibres végétales et le liant géopolymère, il est prévu dans le cadre du projet de thèse de traiter thermiquement les fibres par torréfaction et par pyrolyse (différents temps de séjour et températures seront testées), ce qui aura pour effet de modifier leur chimie de surface, en rendant ces fibres plus hydrophobes et moins rugueuses que les biomasses dont elles sont issues. Les fibres ainsi produites seront caractérisées du point de vue de leur propriétés chimiques et physico-chimiques avant d'être formulées avec les liants géopolymères à base d'argile et de latérite activées. Les propriétés physico-chimiques, mécaniques, thermiques et acoustiques de ces matériaux composites seront caractérisées. Ce programme expérimental, nous permettra d'évaluer l'influence de la modification des fibres sur les propriétés d'interface Fibres/Matrice, et de manière globale sur les propriétés fonctionnelles des matériaux composites ainsi développés.

Enfin, en vue de confirmer l'intérêt environnemental des matériaux étudiés en référence aux matériaux conventionnels, une Analyse de Cycle de Vie (ACV) sera menée. Au-delà de la validation des performances environnementales des éco-matériaux étudiés par rapport aux matériaux conventionnels, l'ACV permettra également d'aider à sélectionner les éco-matériaux les plus pertinents, en fonction des matières premières utilisées ou des prétraitements nécessaires. Pour cela, l'étude intégrera l'ensemble du cycle de vie du matériau, de la mobilisation des résidus en biomasse, incluant l'éventuel bénéfice à offrir un débouché à un déchet, à son utilisation comme matériau en tenant compte des performances thermiques et acoustiques mesurées.

c. Eléments de faisabilité dans le cadre d'une thèse (planning, encadrement, ...)

Planning prévisionnel de déroulement de la thèse :

	09/2025 - 03/2026	03/2026 - 09/2026	09/2026 - 03/2027	03/2027 - 09/2027	09/2027 - 03-2028	03/2028 - 09/2028
Pays	Sénégal	Sénégal	Côte d'Ivoire	France	France	Sénégal
Encadrement	UGB	UGB	INP-HB	CIRAD	CIRAD	UGB
Bibliographie						
Activation de la latérite et de l'argile						
Production de briques de référence à base de géopolymères						
Production des renforts lignocellulosiques et caractérisation						
Formulations des agro-bétons, à matrice géopolymère avec les fibres végétales traitées ou non						
Caractérisation des éco-matériaux composites (briques d'agro-bétons)						
Analyse de cycles de vie, ACV des nouveaux matériaux						
Rédaction du manuscrit et Soutenance						

d. Résultats et impacts scientifiques attendus

Le principal résultat attendu porte sur le développement de **nouveaux biomatériaux pour l'habitat** à partir de ressources locales. La géopolymérisation de composés minéraux comme les argiles ou la latérite est un sujet très innovant ainsi que le volet de recherche portant sur l'amélioration des propriétés d'interface fibre/matrice par hydrophobisation des biomasses. Les connaissances scientifiques sur ces deux principaux volets de recherche sont à ce jour limitées. Les travaux menés dans le cadre de cette thèse nous permettront de mieux comprendre les réactions mises en jeu lors de la géopolymérisation, et évaluer comment l'effet de la composition chimique initiale de la latérite ou de l'argile impacte celles-ci. De manière analogue, les travaux menés sur l'hydrophobisation des biomasses par traitement thermique nous permettront de mieux comprendre les interactions physico-chimiques existantes à l'interface Fibre/Matrice, et comment la composition chimique initiale des biomasses renforce les propriétés d'adhésion. Il est prévu que les résultats des travaux menés dans le cadre de cette thèse feront l'objet d'articles dans des journaux à comités de lecture, et de présentations dans des conférences internationales.

e. Financement acquis

A ce jour, pas de financement identifié mais l'objectif est d'inclure une partie de ces travaux de recherche dans un projet de plus grande ampleur. Actuellement, une réflexion est menée pour donner une suite au projet européen Bio4Africa (H2020, n°101000762), notamment sur le volet biomatériaux qui a permis d'obtenir des premiers résultats très intéressants. D'autre part, les encadrants s'engagent à mener une veille sérieuse et répondre à des appels à projet qui pourraient assurer le financement de la 3ème année.

2. *Enjeu primaire (et enjeu secondaire s'il y a) dans lequel se situe le projet (positionnement argumenté)*

L'enjeu primaire est de **développer de nouveaux éco-matériaux pour l'habitat** à partir de ressources locales (liant à base de latérite et d'argile, et de biomasses résiduelles très largement disponibles au Sénégal et en Côte d'Ivoire) aux propriétés équivalentes voire améliorées par rapport aux matériaux conventionnels. Un enjeu secondaire en découle, dans la transformation des biomasses locales à l'aide de procédés simples et très peu énergivores, nous permettant de proposer des **nouveaux matériaux ayant une empreinte environnementale très limitée** par rapport au béton conventionnel.

3. *Impact sociétal : contribution aux enjeux considérés et originalité du défi ciblé (caractère disruptif*

Le projet BIO4House permettant de **développer de nouveaux éco-matériaux pour l'habitat** à faible empreinte environnementale se positionne à **différents niveaux,** sur :

- La **Crise du logement** dans les grandes villes africaines :
  - Par diminution du coût des matériaux de construction en ainsi diminution du coût global du logement ;
  - Par améliorations des conditions de confort et de bien être dans l'Habitat grâce aux excellentes propriétés hygrothermiques des matériaux développés ;
- La **Gestion des déchets** :
  - Par utilisation de matière considérée comme un déchet à l'heure actuelle, ce qui contribue à limiter les sources de maladies (accumulation des matières organiques en dégradation sur lieux de récolte et expansion des eaux stagnantes) et ainsi améliorer les conditions sanitaires ;
- La **Bio-économie** :
  - Par valorisation d'un déchet en matière à plus haute valeur ajoutée, permettant de diversifier les revenus des agriculteurs ;

- Par transformation locale grâce à des procédés simples et très peu énergivores, permettant de développer une nouvelle filière de production d'éco-matériaux, et donc de nouveaux emplois ;

- Le **Changement climatique** :
  - Par substitution globale de matériaux polluants par des matériaux à faible empreinte environnementale.

4. *Plus-value de l'interdisciplinarité pour le projet et pour chacune des disciplines engagées*

Les travaux de thèse se découpent entre les trois partenaires impliqués dans ce projet ; le laboratoire LEITER de l'Université Gaston Berger (UGB) au Sénégal, le laboratoire LAPISEN de l'Institut National Polytechnique – Félix Houphouët Boigny (INP-HB) en Côte d'Ivoire et le laboratoire BioWooEB du CIRAD en France, afin que les différentes thématiques de recherche des chercheurs impliqués puissent être mises en avant et ainsi permettre une transdisciplinarité efficace dans le projet BIO4House.

Le premier volet thématique mené à l'UGB relève de la chimie minérale et plus largement du Génie Civil, où la latérite et l'argile seront activées par voie alcaline afin de réaliser la géopolymérisation et développer les matériaux de référence dont les propriétés physico-chimiques, mécaniques, thermiques et acoustiques seront comparées avec celles de briques en béton conventionnel. Le second volet porte essentiellement sur la transformation de la biomasse par des traitements thermiques (Pyrolyse - INP-HB et Torréfaction – CIRAD) et relève du Génie des Procédés. Le dernier volet comprend les étapes de formulation et de caractérisations des propriétés fonctionnelles des agro-bétons issus des biomasses vierges et traitées mises en mélange avec les géopolymères synthétisés. Ce dernier volet relève du domaine des Sciences des Matériaux et sera mené essentiellement au CIRAD ainsi que l'analyse du cycle de vie des biomatériaux élaborés.

5. *Publications récentes (max 5) des co-encadrants en lien avec le projet.*

Pour Dr. Babacar DIOUF (UGB-LEITER) :

1) E. M. ELHAJ-MAHAM, **B. DIOUF**, E. H. B. LY & M. MANGA. *Study of the Physic-Mechanical Properties of a Typha Concrete Composites: A Possible New Material for Sustainable Construction*. Materials Science Forum **2024**, 1122, 121-131.
2) A. GASSAMA, **B. DIOUF**, Babacar, E. H. B. LY, M. MANGA & D. NDIAYE. *Caractérisation des propriétés mécaniques et thermiques de matériaux à base de ciment, de Typha Domingénis et d'argile*. Journal de Physique de la SOAPHYS **2023**, 3(2), C23N23.

Pour Dr. Amandine VIRETTO (CIRAD-BioWooEB) :

3) S. Mansour, **A. Viretto**, M. F. Thevenon & L. Brancheriau. *Sustainable biocomposites from renewable resources in Sub-Saharan Africa: a review*. Soumis à Journal of Renewable Materials **2024**.
4) S. Mansour, **A. Viretto**, M.-F. Thévenon & L. Brancheriau. *Agricultural residues from Western Africa to produce biocomposite panels for building applications*. 26th IUFRO (International Union of Forest Research Organizations) World Congress, Stockholm (Suède), 23-29 juin **2024**
5) J. Bossu, J. Moreau, C. Delisée, N. Le Moigne, S. Corn, R. Sonnier, **A. Viretto**, J. Beauchêne & B. Clair. *Revealing the potential of waste fibers from timber production and clearings for the development of local bio-based insulation fiberboards in French Guiana*. Waste & Biomass Valorization **2023**, 14, 4281-4295.
6) **A. Viretto**, N. Gontard & H. Angellier-Coussy. *Urban parks and gardens green waste: A valuable resource for the production of fillers for biocomposites applications*. Waste Management **2021**, 120, 538-548.
7) **A. Viretto** & J. Galy. *Development of biobased epoxy matrices for the preparation of green composites materials for civil engineering applications.* Macromolecular Materials and Engineering **2018,** 303(5), 1700521 (1-9).

Pour Dr. Esaie Kouadio Appiah KOUASSI (INP-HB-LAPISEN) :

1) G. M. H. Ibrahim, **E. K. A. Kouassi**, A.T. S Konan, M. O. Sanda, Y. C. Brou and K. B.Yao. *Valorization of cassava peelings into biochar: Physical and chemical characterizations of biochar prepared for agricultural purposes.* Scientific African **2023**, 20, e01737.

2) M. Bamba, E. F. Assanvo, **E. K. A. Kouassi**, D. Soro, L. Y. Ouattara, K.B. Yao, A. P. Drogui and D. R. Tyagi. *Preparation and Characterization of Cellulose Triacetate from Cocoa Pod Husk.* BioResources **2023**, 18(1), 1684-1698.
3) L. Y. Ouattara, D. Soro, G. D. Fanou, **E. K. A. Kouassi**, M. Bamba, K.B. Yao, K. Adouby,A. P. Drogui and D. R. Tyagi. Optimization of the autoclave-assisted alkaline delignification of cocoa (Theobroma cacao) pod husks using KOH to maximize reducing sugars. BioResources **2022**, 17(1), 826-848.
4) L. Y. Ouattara, **E. K. A. Kouassi**, D. Soro, Y. Soro, K.B. Yao, K. Adouby, A. P. Drogui, D. R. Tyagi and P.M. Aina. *Cocoa pod husks as potential sources of renewable high-value-added products: A review of current valorizations and future prospects*. BioResources **2021**, 16(1), 1988-2020.
5) **E. K. A. Kouassi**, Y. Soro, C. Vaca-Garcia and K.B. Yao. *Chemical composition and specific lipids profiles of the cashew apple bagasse*. Rasayan Journal Chemistry **2018**, 11(1), 386-391.

Références :

[1] : Rapport « L'Etat des villes africaines : Réinventer la transition urbaine », Ed. UN-Habitat, 2014, 250 pages.
[2] : Rapport « Bilan du secteur du logement en Afrique subsaharienne - Défis et opportunités », Ed. World Bank group, 2015, 140 pages.
[3] : M. Boukari, « *Un autre modèle d'habitat entre Ville et Bidonville : Proposition de logements abordables et durables pour le bidonville de Taiba à Dakar* », Mémoire Master en architecture, Université catholique de Louvain, 2022.
[4] : L. K. Turner & F. G. Collins, "*Carbon dioxide equivalent (CO2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete*". Construction and Building Materials, 2013, 43, 125–130.
[5] : S. M. De Moraes Pinheiro, A. Font & L. Soriano, "*Olive-stone biomass ash (OBA): An alternative alkaline source for the blast furnace slag activation*". Construstion and Building Materials, 2018, 178, 327–338
[6] : J. Davidovits, "*Geopolymers: inorganic polymeric new materials*". Journal of Thermal Analysis and calorimetry, 1991, 37, 1633–1656.
[7] : Y. Ling, K. Wang, X. Wang & S. Hua, "Effects of mix design parameters on heat of geopolymerization, set time, and compressive strength of high calcium fly ash geopolymer", Construction Building. Materials, 2019, 228, 116–763.
[8] : A. Cherki El Idrissi, « *Géopolymérisation et Activation Alcaline des Coulis d'injection : Structuration, Micromécanique et Résistance aux Sollicitations Physico-Chimiques* ». Mémoire Ph.D. Thesis, École Centrale de Nantes, 2016.
[9] : M. Chabannes, « *Formulation et étude des propriétés mécaniques d'agrobétons légers isolants à base de balles de riz et de chènevotte pour l'éco-construction* ». Mémoire Ph.D Thesis, Université de Montpellier, 2016

Avis <u>motivés</u> et signatures des directeurs/trices des laboratoires concernés

Nom/Prénom : **SEIDOU H. MAIGA Amadou** **Avis motivé :** Ce projet de thèse cadre parfaitement avec les axes de recherche du LEITER. Nous soutenons fortement la proposition. Avis très favorable **Signature**	**Nom/Prénom :** COMMANDRE Jean-Michel **Avis motivé :** Cette proposition de thèse est totalement en phase avec les activités du laboratoire. Avis très favorable **Signature :**	**Nom/Prénom :** YAO Kouassi Benjamin **Avis motivé :** Cette proposition de thèse est totalement en phase avec les activités du laboratoire. Avis très favorable **Signature**