

Projet de thèse : RECYclage des Boues EXcavées dans des Blocs de Béton Biofibré « RECYBEX – 3B »

Structure de recherche principale : CY Cergy Paris Université

2^{ème} Structure de recherches : Université Gustave Eiffel MAST/EMGCU

Contacts :

Académique : Elhem GHORBEL (Directrice de la thèse) elhem.ghorbel@cyu.fr et Franziska SCHMIDT (co-directrice de la thèse) Franziska.schmidt@univ-eiffel.fr

Industriel: Filippo CUCCAGNA, filippo.cuccagna@tractebel.engie.com

Dates prévisionnelles d'accueil : octobre 2024 – septembre 2027

Localisations : CY Cergy Paris Université et Université Gustave Eiffel – Campus de Marne-La-Vallée à Champs sur Marne

Exigence du candidat au doctorat : L'étudiant devra avoir un master recherche orienté matériaux et/ou mécanique et/ou génie civil. De solides connaissances sur l'analyse de données et les traitements statistiques (Machine Learning), ainsi qu'un intérêt pour l'analyse bibliographique et la simulation. Le candidat devra faire preuve d'autonomie, de rigueur et d'un bon niveau d'anglais.

Financement : financement accordé dans le cadre d'un appel [Paris Region PhD 2024](#) « PRPhD » (avec complément industriel soit 130 kilo-euros sur le 3 ans chargés

Contexte

Le projet GPE a généré une grande quantité de boues excavées mélangées à des matériaux pour le creusement de tunnel. Ces déchets sont généralement évacués vers des déchetteries pour stockage ou des zones allouées dans un objectif lointain de valorisation. Malgré l'importance et l'ambition du projet, les habitants locaux et les élus de l'IDF sont préoccupés de voir les terres agricoles se transformer en "déchets". Depuis le début du projet en 2019, des manifestations ont eu lieu presque dans toute l'île de France pour lutter contre l'enfouissement des déchets issus du projet GPE. Le 7 août 2019, le préfet du Val-d'Oise a rejeté le projet de Terra 95, filiale du groupe Paprec, concernant l'enfouissement prévu à Épinay-Champlâtreux. En mai 2021, plusieurs centaines de manifestants se sont rassemblés à Etampes (Essonne), pour protester contre un projet de stockage de déblais sur un terrain de 34 hectares situé dans le village voisin de Saint-Hilaire et pour dénoncer un risque de pollution des sols, des sous-sols et des nappes phréatiques. En 2022, une ancienne carrière située dans la municipalité de Mauny (Seine-Maritime), entre La Bouille et Duclair, a été choisie pour déposer près de 400000 m³ de déchets inertes. Les habitants du secteur craignent que les boues excavées soient polluées et se sont mobilisés contre le trafic de 120 camions par jour acheminant ces déchets vers l'ancienne carrière en traversant leur village.

Devant cette crise sociétale et le tonnage important de boues extraites, le projet ci-après propose de mettre au point une formule de béton incorporant les boues excavées à des fibres issues des résidus de l'agriculture et du Tannin pour la fabrication de blocs (pleins et/ou creux) et/ou de panneaux utilisés pour la construction de structures verticales assurant ou pas une fonction porteuse tout en permettant une isolation thermique destinées aux logements individuels ou/et petits bâtiments.

L'utilisation des fibres végétales et l'incorporation des boues excavées pour la mise en œuvre de blocs/panneaux permettront de participer à la préservation des ressources et de proposer des solutions alternatives dans une démarche de transition vers une économie bas-carbone, circulaire et durable. De même l'utilisation du tannin permettra la fabrication de blocs/panneaux qui ne contiennent pas des matériaux nécessitant un tri et une séparation minutieuse lors de la déconstruction due à l'absence de gypse et de peintures. Ce projet aura un impact positif dans les deux secteurs d'activité :

1. Le secteur du bâtiment pour lequel les objectifs sont de réduire les GES en 2030 de -49% et en 2050 d'avoir une décarbonation complète par rapport à 2015. Ce projet répondra à ces objectifs par l'utilisation des fibres végétales issues des résidus de l'agriculture de manière générale et le miscanthus en particulier. Ces fibres jouent 2 rôles en étant un véritable puits de CO₂ contribuant aux réductions de gaz à effets de serre et en améliorant le pouvoir isolant des produits tout en les allégeant.
2. Le secteur des déchets : en effet la réutilisation des boues d'excavation rentre pleinement dans la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) puisqu'elle participe à la réduction des émissions de GES dues au secteur des déchets en permettant de prévenir la génération de déchets dès la phase de conception des produits (conception, principe pollueur-payeur) et de promouvoir l'économie circulaire et la réutilisation.

Etat de l'art, verrous scientifiques

Les principaux travaux concernent, essentiellement, la réutilisation des matériaux d'excavation en tant que remblais pour les infrastructures routières, l'étanchement des digues, la surélévation de terrain, l'exécution de talus anti-bruit, ou comme granulats, ... [2]. En France, beaucoup d'efforts ont été consacrés à l'étude de la terre crue : projet ANR ReparH [3] de 2010-2014, projet ANR BIOTERRA [4] de 2014 et 2018. Quelques efforts ont été déployés pour la valorisation des sédiments : l'ANR a soutenu en 2006 pour 36 mois un projet visant à utiliser les sédiments de dragage

portuaire inertes pour la conception de pavés et de nouveaux bétons autoplaçants [5]. Des projets régionaux existent parmi lesquels le projet Cycle Terre [6] qui vise à développer à partir de déblais des blocs en terre comprimée, des mortiers, et des panneaux en argile extrudés. Certains auteurs se sont intéressés à la valorisation des déblais issus des travaux de terrassements superficiels pour fabriquer des blocs de terre comprimée stabilisée au ciment (5 à 10%) [7,8]. Enfin, on peut aussi citer les travaux récents visant à valoriser les matériaux excavés du tunnel Lyon-Turin dans des bétons [9] et ce même si la valeur en Soufre d'une partie de ces granulats dépasse la valeur seuil imposée par la norme sur l'utilisation des granulats dans le béton. Une autre étude traite de l'incorporation des gravillons issus des matériaux d'excavation pour élaborer des bétons en substitution de granulats naturels [10]. Il apparaît clairement que peu ou pas d'études visent à recycler 100% des boues excavées des tunnels pour la fabrication d'éléments pour structures verticales efficaces thermiquement et ne nécessitant.

Les verrous scientifiques de ce travail scientifique qui doivent être levés sont :

- La construction d'une base de données ouverte et accessible avec les données des coupes afin d'alimenter des modèles fondés sur l'apprentissage automatique. En effet les propriétés chimiques, physiques et géométriques des matériaux excavés dépendent des formations géologiques rencontrées lors du creusement. Cette variabilité associée à celles des fibres végétales et du tannin et son impact sur les propriétés finales du produit doivent être prédites.
- Proposition de formules stables pour la réalisation d'éléments verticaux (briques ou plaques) durables, à haute efficacité énergétique et environnementale. Les produits devraient répondre aux exigences d'une économie circulaire en termes de réemploi en fin de vie.
- Conception d'une structure expérimentale instrumentée de capteurs pour l'étude du comportement thermo-hydro-mécanique

Méthodologie

Le projet RECYBEX-3B est organisé autour de 6 tâches. Ces différentes tâches interagissent mais peuvent être conduites en parallèle hormis la phase de séparation décrite dans la tâche 1.

Tâche 1 : Caractérisation des propriétés d'entrée des matériaux. Il s'agit de séparer les fines du sable et du gravillon par tamisage des marins tunneliers par voie humide puis de les caractériser à l'échelle mécanique et physico-chimique selon les normes en vigueur. Les résultats obtenus permettront d'alimenter la base de données.

Tâche 2 : Construction d'une base de données des matériaux disponibles. Les caractéristiques pétrographiques, physico-chimiques et géométriques des boues excavées varient d'un échantillon à un autre selon le lieu géographique de l'opération d'extraction d'une même ligne et selon la ligne. L'ensemble des valeurs disponibles pour le projet sont agrégées dans une base de données commune alimentée également avec de l'open data et des données de projets antérieurs.

Tâche 3 : Formulation d'un béton bio-fibré à base de boue excavée des tunnels : Une étude exploratoire réalisée sur des marins tunneliers montre qu'ils sont composés d'eau (20 à 30%), de fines (25% à 40%), de sable (22 à 32%), de gravillons 4/20 (7 à 13%) et des gravillons 20/50 (0 à 7%) [11]. Différentes formulations seront élaborées en faisant varier les taux d'incorporation des stabilisants purs ou combinés (ciments, laitiers, cendres volantes, métakaolin, ...) et le dosage des fibres végétales afin d'en améliorer les performances énergétiques, hydriques et mécaniques. Les propriétés intrinsèques des matériaux d'entrée, préalablement caractérisées, ainsi que leurs dosages jouent un rôle important sur la prise, le durcissement et le comportement au jeune âge. Les résultats obtenus permettront d'une part d'alimenter la base de données (tâche 2) et de choisir des formules performantes au regard des applications industrielles visées et alimenteront l'étude de variabilité.

Tâche 4 : Fabrication des blocs de béton bio-fibrés et détermination de leurs caractéristiques : Les différentes formulations de la tâche 3 seront testées pour vérifier l'aptitude du béton à être coulé pour la fabrication de blocs et/ou plaques. Les matériaux seront caractérisés à l'état frais et durci : microstructuraux (porosité, tortuosité, ...), physico-chimiques (phases en présence, densité, ...), mécaniques (fluage-retrait, propriétés instantanées, ...), thermiques (conductivité, chaleur spécifique, ...) et hydriques (perméabilité hydrique, sorption/désorption, ...).

Une campagne de caractérisation expérimentale des principales propriétés blocs/plaques est ensuite entreprise.

Tâche 5 : Conception d'un mur de bloc/ Approche performancielle des éléments structuraux et diagnostics
La construction d'un mur à base de ces blocs de béton bio-fibrés sera développée. Les produits incorporant la boue d'excavation les plus performants sont mis en œuvre à l'échelle d'un mur.

Les performances des éléments construits seront testées en laboratoire. Un système d'auscultation combinant fibres optiques (mesures de température et de déformation) et extensomètres à corde vibrante noyés dans les blocs de béton est déployé. En parallèle, les murs en 3B sont modélisés numériquement en utilisant en entrée les propriétés des matériaux afin d'évaluer leur performance énergétique, leur durabilité en situation opérationnelle ainsi que leur réponse à des sollicitations climatiques variables et/ou extrêmes.

Tâche 6 : L'Impact environnemental complète la recherche en calculant les émissions des matériaux, les énergies utilisées et les niveaux de déchets produits. Une analyse supplémentaire doit permettre de faire le choix d'une impression sur site ou hors site puis de faire la comparaison des alternatives, logistique et gestion de la chaîne d'approvisionnement, impact du transport.

Partenariat et les intérêts associés

Le partenariat autour de cette thèse est composé de CY Cergy Paris Université (partenaire académique porteur du projet) l'Université Gustave Eiffel (UGE, deuxième partenaire académique) et Tractebel (partenaire Industriel).

Le L2MGC de CY Cergy Paris Université : l'équipe est compétente dans les méthodes de formulation, l'étude du comportement en conditions extrêmes des bétons et structures en maçonneries et l'étude des impacts environnementaux

Le **laboratoire EMGCU de l'UGE** travaille sur la gestion de patrimoine d'infrastructures sur la base de données d'instrumentation, avec des méthodes de type Machine Learning appliquées sur des données mesurées et de l'aide à la décision avec analyse des réseaux complexes et interface de type jumeau numérique.

Le partenaire industriel Tractebel fournit des services d'ingénierie et de conseil de haut niveau s'appliquant à tout le cycle de vie des projets d'infrastructure et de bâtiments industriels. Elle participe en tant que Maître d'œuvre (MOE) et Assistant à Maître d'ouvrage (AMO) sur les projets majeurs d'infrastructures en Ile de France et sur le territoire français.

Implémentation pratique : calendrier et livrables

CY Cergy Paris Université et l'UGE à Marne-la-Vallée et TRACTEBEL ayant des implantations en île de France, les mobilités courtes du doctorant entre ces trois entités seront faciles à organiser.

Période	Accueil	Contenu de travail	Résultats
M0-M6	CYU/TRACTEBEL	Etat de l'art- Identification des matières premières- Identification des essais à réaliser et formation sur les différents équipements	Livable 1
M6—M9	UGE	Création de la base de données pour l'apprentissage, Alimentation par des essais en laboratoire.	Livable 2
M9-M15	CYU/UGE	Formulation et caractérisation des différentes formulations de bétons à base de boues excavées. Amélioration de l'analyse de données (Deep Learning)	Livable 3
M15-M24	CYU/UGE	Fabrications des produits (blocs et/ou plaques) et caractérisation	Livable 4
M24-M30	CYU/TRACTEBEL	Approche performancielle des éléments structuraux et diagnostics et ACV	Livable 5
M30-M36	TRACTEBEL	Etude de l'industrialisation de l'outil développé. Rédaction du mémoire de thèse et articles	Livable 6

Le travail sera également diffusé par des publications (3 articles de journal, 3 articles de conférence dont au moins une internationale), des présentations en réseau métier et le grand public.