

# Elaboration d'écomatériaux pour le Grand Paris Express, dans une démarche d'économie circulaire.

M.A. MAHI <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> IMT Nord Europe, Institut Mines-Télécom, Centre for Materials and Processes, F-59000, Lille, France

<sup>2</sup> Univ. Lille, Institut Mines-Télécom, ULR 4515 – LGCgE, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, F-59000, Lille, France

## RESUME

La nécessité de réduire l'impact environnemental du secteur de la construction, notamment les émissions de CO<sub>2</sub> engendrées, pousse à redéfinir les matériaux utilisés et à valoriser des ressources locales et circulaires. Le présent travail s'inscrit dans cette démarche par le développement expérimental d'éco-matériaux à partir de terres excavées du projet Grand Paris Express, en combinaison avec des ciments bas carbone et des granulats recyclés, afin de concevoir des infrastructures plus éco-responsables. Le travail de recherche entrepris a abouti au développement d'éco-pavés, d'éco-bétons à base de granulats recyclés et ciments bas carbone, ainsi que d'éco-bétons de terres excavées. Dans cet article, seul l'éco-béton de terres excavées en combinaison avec des ciments bas carbone est présenté. Cette approche permet non seulement de réduire la consommation de ressources naturelles non renouvelables, mais aussi de limiter les émissions de CO<sub>2</sub> associées à la production des liants et des matériaux. Les formulations développées dans cette étude présentent des propriétés physiques et mécaniques satisfaisant les exigences des applications visées, tout en assurant une réduction de l'empreinte carbone d'au moins 50 %

**Mots-clefs** Ecomatériaux, Terres excavées, Ciment bas carbone, Granulats recyclés, Grand Paris Express.

## I. INTRODUCTION

Le secteur de la construction est l'un des plus grands contributeurs aux émissions de CO<sub>2</sub> à l'échelle mondiale. Ces émissions, en lien avec la construction et l'exploitation des bâtiments représentent environ 39 % des émissions de gaz à effet de serre [1]. Dans ce contexte, la transition vers des matériaux de construction durables constitue une priorité mondiale, afin de limiter à la fois les émissions de gaz à effet de serre et la consommation excessive de ressources naturelles. Le projet du Grand Paris Express (GPE) est un projet important au développement de la région parisienne. Il génère à terme, plus de 47 millions de tonnes de terres excavées et des milliers de tonnes de déchets de déconstruction, posant ainsi un défi majeur en matière de gestion et de valorisation de ces ressources [2].

Les travaux de recherche portant sur la valorisation des terres excavées du GPE, encore relativement récents, mettent en évidence leur potentiel dans diverses applications. En effet, les terres excavées fines et argileuses peuvent être calcinées pour produire des matériaux cimentaires

complémentaires (SCM : Supplementary Cementitious Materials). Ces derniers peuvent contribuer à l'amélioration de la résistance mécanique et à la modification de la microstructure des matériaux à travers différents mécanismes [3], [4], [5]. D'autres études se concentrent sur leur utilisation comme granulats dans le secteur de la construction routière [6]. Dans le cadre de cette étude, nous avons opté pour l'élaboration d'éco-bétons de terres excavées intégrant parfois des granulats recyclés issus de la déconstruction. L'ajout de granulats recyclés est fait avec un double objectif : la co-valorisation de deux ressources locales et l'amélioration de propriétés d'usage comme l'augmentation de la résistance mécanique, la diminution du retrait et de la fissuration.

L'objectif de ce travail est ainsi de concevoir des éco-bétons à base de terres excavées combinées à l'utilisation de ciments bas carbone. Pour cela, nous avons préalablement identifié un cahier des charges en adéquation avec les applications visées, mis en place une méthodologie de formulation, caractérisé les propriétés à l'état frais et à l'état durci des matériaux obtenus, et évalué leur impact environnemental. Dans cet article, nous présentons les matériaux utilisés, la démarche de formulation, le programme expérimental, les résultats obtenus, l'analyse de ces résultats et enfin les principales conclusions.

## II. MATERIAUX ET METHODES

### A. Cahier des charges initial

Afin de définir les bases de formulation, un cahier des charges a été établi, rassemblant les exigences techniques majeures pour l'écomatériau visé. Le Tableau 1 ci-dessous synthétise ces exigences et les conditions de formulation fixées, il guide le choix des constituants et des méthodes de formulation appliquées par la suite.

Tableau 1. Spécifications techniques – écomatériau de type béton de terre autoplaçant

| Eco-matériau                   | Application visée   | Exigence mécanique (28 j) | Exigence d'ouvrabilité            | Dosage en liant (kg/m <sup>3</sup> ) | Masse volumique humide (kg/m <sup>3</sup> ) | Squelette granulaire             | Méthode de mise en œuvre |
|--------------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|----------------------------------|--------------------------|
| Éco-béton de terre autoplaçant | Élément non porteur | ≥ 3 MPa<br>En compression | Béton autoplaçant (étalement SF3) | 250                                  | 2000  | Fuseau granulométrique empirique | Coulage sans vibration   |

### B. Principaux matériaux utilisés

**Terres excavées :** Dans le cadre de cette étude, deux types de terres excavées issues du projet Grand Paris Express (GPE) ont été valorisées, il s'agit des Marnes et Caillasses (MC), et du Calcaire Grossier (CG). Ces terres présentent un volume particulièrement important par rapport aux autres terres excavées du projet Grand Paris Express, représentant plus de 50 % du total. Cela justifie leur sélection pour l'élaboration d'écomatériaux. Leurs propriétés géotechniques seront présentées dans la section caractérisation physico-géotechnique.

**Ciments :** Trois ciments ont été sélectionnés pour cette étude, un ciment de référence de type CEM I et deux ciments bas carbone CBC 1 et CBC 2, émettant moins de 400 kg de CO<sub>2</sub> par tonne de ciment. Leur principal intérêt s'inscrit dans la réduction de l'empreinte carbone par rapport à un ciment standard.

**Granulats recyclés :** Les Sables Recyclés (SR) et les Gravier Recyclés (GR) utilisés dans cette étude proviennent de chantiers de déconstruction. Ils sont utilisés, si nécessaire, pour améliorer la distribution granulométrique des terres excavées, dans le cadre de la démarche de formulation décrite ci-après.

### B. Démarche de formulation

Avant d'entamer la formulation, les performances visées ont été définies par le cahier des charges (Tableau 1). La formulation de l'éco-béton de terre a ensuite été réalisée selon une approche basée sur un fuseau granulométrique empirique couramment utilisé pour les bétons de terre [7]. Ce fuseau définit une enveloppe granulométrique permettant d'assurer un comportement rhéologique adéquat ainsi que des performances mécaniques optimisées. Pour chaque type de terre (MC ou CG), plusieurs combinaisons de teneurs en eau et en ciment ont été explorées, en maintenant un dosage en ciment relativement constant à travers l'ensemble des formulations. Lorsque nécessaire, une addition de granulats recyclés a été intégrée afin d'ajuster la composition du mélange. Le rapport eau/ciment a été ajusté en fonction des caractéristiques intrinsèques des terres, afin d'atteindre l'ouvrabilité souhaitée.

Trois formulations de base ont ainsi été retenues :

- **MC :** formulation à partir des terres excavées MC sans granulats recyclés ;
- **MCGR :** formulation à partir des terres MC avec des granulats recyclés GR ;
- **CGGR :** formulation des terres CG avec des granulats recyclés.

Chacune de ces formulations a ensuite été combinée aux trois types de ciment (un ciment de référence CEM I et deux ciments bas carbone CBC 1 et CBC 2).

### C. Démarche expérimentale

Le Tableau 2 ci-dessous présente la liste des principales caractéristiques analysées sur les terres excavées brutes et les échantillons des écobétons, ainsi que les méthodes de mesure, appareillages et normes suivies.

Tableau 2. Méthodes d'analyses utilisées pour la caractérisation des matériaux

| Caractéristiques étudiées    | Analyses                                      | Appareillage / Normes suivies |
|------------------------------|---|-------------------------------|
| Distribution granulométrique | Tamissage par voie humide                     | ISO 17892-4                   |
|                              | Analyse granulométrique par diffraction laser | ISO 13320:2020                |
| Densité                      | Masse volumique apparente sèche               | NF EN 1097-3                  |
|                              | Masse volumique absolue                       | Accupyc 1330 Micromeritics    |
| Interactions avec l'eau      | Teneur en eau                                 | NF EN ISO 17892-1             |

|  |  |  |
|--|--|--|
|  | Limites d'Atterberg  | ISO 17892-12   |
| <b>Propriétés de surface</b>                               | Valeur de VBS  | NF EN 933-9  |
| <b>Teneur en matière organique</b>                         | 450 °C   | XP P 94-047  |
|  | 550 °C   | NF EN 15935:202108   |
| <b>Caractérisation minéralogique – physico chimique</b>    | Diffraction de rayons X (DRX)  | <i>Diffractomètre D2 Phaser-Bruker</i>   |
|  | Analyses thermiques différentielles – thermogravimétriques (ATD-ATG)                   | <i>Netzsch - STA 449 F3 Jupiter</i>  |
|  | Analyse chimique   | <i>ICP (Inductively Coupled Plasma),</i>   |
| <b>Surface spécifique par adsorption de gaz</b>            | Méthode BET  | ISO 9277   |
| <b>Classification environnementale des terres excavées</b> | Analyse environnementale par lixiviation<br>Analyse élémentaire<br>Composés organiques | NF EN ISO 17294-2<br>NF EN 17322 (2020)<br>NF EN ISO 22155<br>NF EN 15936<br><i>Directive 1999/31/CE (2003/33/CE). Journal officiel de l'Union européenne, L11, 27-49.</i> |
| <b>Etalement</b>   | Cône d'Abram   | NF EN 12350  |
| <b>V-funnel</b>  | Entonnoir en V   | NF EN 12350-9  |
| <b>Résistance mécanique</b>                                | Presse hydraulique couplée 400 kN/3000 kN (3R) ; Presse mécanique - 250 kN (Instron)   | NF EN 12390-3  |
| <b>Conductivité thermique</b>                              | Conductivimètre fil chaud  | ASTM D5930-97,<br><i>Recommandation RILEM AAC 11-3</i>   |

### III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### A. Caractérisation des matériaux bruts

##### A.1. Caractérisation physico géotechnique

La caractérisation physico-géotechnique des terres excavées et des granulats recyclés, réalisée dans le cadre des travaux de cette étude est résumée dans les Tableaux 3 et 4. Ces Tableaux récapitulent les principales caractéristiques physiques, granulométriques, géotechniques des échantillons de terres excavées et de granulats recyclés, fournissant une vue d'ensemble des paramètres clés de chaque ressource.

Tableau 3. Propriétés physico-géotechniques des matériaux étudiés

| Paramètre  | Appareillage / Normes suivies | MC   | CG   |
|--|-------------------------------|------|------|
| Teneur en eau à réception (%)                        | NF EN ISO 17892-1             | 5    | 6    |
| Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )         | Accupyc 1330<br>Micromeritics | 2,87 | 2,69 |
| Masse volumique apparente sèche (g/cm <sup>3</sup> ) | NF EN 1097-3                  | 1,13 | 1,25 |
| Masse volumique réelle (g/cm <sup>3</sup> )          |                               | 2,07 | 1,77 |

|  |                        |                     |                    |      |      |
|--|------------------------|---------------------|--------------------|------|------|
| <b>Granulométrie</b>                     | Tamisage humide (%)    | Graviers (4mm-25mm) | ISO 17892-4        | 42   | 18   |
|  |                        | Sable (63µm – 4mm)  |                    | 39   | 37   |
|  | Granulomètre laser (%) | Limon (2 à 63µm)    | ISO 13320:2020     | 13   | 39   |
|  |                        | Argile (<2µm)       |                    | 6    | 6    |
| <b>W<sub>L</sub> (%)</b>                 |                        |                     | ISO 17892-12       | 52   | 29   |
| <b>W<sub>P</sub> (%)</b>                 |                        |                     | ISO 17892-12       | 30   | 15   |
| <b>I<sub>P</sub> (%)</b>                 |                        |                     | ISO 17892-12       | 22   | 14   |
| <b>Valeur au bleu de méthylène (VBS)</b> |                        |                     | NF EN 933-9        | 0,7  | 2,1  |
| <b>Surface BET (m<sup>2</sup>/g)</b>     |                        |                     | ISO 9277           | 7,65 | 13,8 |
| <b>Teneur en matière organique (%)</b>   | 450 °C                 |                     | ISO 9277           | 1    | 2    |
|  | 550 °C                 |                     | NF EN 15935:202108 | 3    | 3    |

Tableau 4. Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats recyclés

| Granulats              | Classe granulaire [mm] | Coefficient d'absorption [%] | Masse volumique absolue [g/cm <sup>3</sup> ] | Los Angeles [%] | Micro-Deval [%] |
|------------------------|------------------------|------------------------------|--|-----------------|-----------------|
| Sables recyclés SR     | 0-6                    | 10                           | 2,59   |                 |                 |
| Gravillons recyclés GR | 4-20                   | 4                            | 2,65   | 28,75           | 28,5            |

En ce qui concerne les terres excavées, les valeurs de teneur en eau expliquent un taux d'humidité initial modéré, qui influencera la formulation. Les différentes mesures de densité indiquent que la terre MC est potentiellement plus légère que la terre CG, en raison d'une porosité plus élevée. En ce qui concerne la granulométrie, MC renferme une proportion plus importante de graviers que CG, tandis que CG contient davantage de particules fines (limon et argile). Les limites d'Atterberg mettent en évidence une plasticité nettement plus élevée pour MC. Par ailleurs, la valeur au bleu de méthylène et la surface BET indiquent une charge argileuse plus marquée dans CG, confirmant son caractère argileux. Enfin, la teneur en matière organique reste relativement faible pour les deux terres, ne dépassant pas les valeurs recommandées, ce qui est favorable à la durabilité des matériaux à base de ciment.

Pour ce qui est des granulats recyclés, le sable recyclé présente un coefficient d'absorption supérieur à celui des gravillons recyclés, suggérant une porosité plus élevée et, par conséquent, un besoin en eau de gâchage potentiellement augmenté. Les masses volumiques de SR et GR sont comparables à celles de granulats traditionnels, tandis que leurs indices Los Angeles et Micro-Deval témoignent d'une résistance acceptable à l'usure et à la fragmentation. Ces résultats confirment la faisabilité d'utiliser SR et GR dans des bétons recyclés, en veillant à bien maîtriser les quantités d'eau et de ciment en fonction de leur absorption.

#### A2. Analyse chimique

Le Tableau 5 présente la composition chimique des éléments majeurs en oxydes des différents matériaux, les terres excavées CG, MC, les granulats recyclés GR, SR et les trois ciments utilisés (CEM I, CBC 1, CBC 2). Les mesures ont été réalisées par la technique d'ICP (Inductively Coupled Plasma), qui permet de quantifier les éléments majeurs sous forme d'oxydes.

Tableau 5. Composition chimique par ICP (en % d'oxydes) des matériaux de l'étude

|                    |       | SiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | MnO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | SO <sub>3</sub> |
|--------------------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|
|                    |       | %                | %                              | %                              | %    | %    | %                 | %                | %                | %                | %                             | %               |
| Terres excavées    | CG    | 68,3             | 3,3                            | 7,5                            | 8,8  | 1,2  | 0,6               | 1,5              | 0,6              | <0.10            | 0,1                           | 0,1             |
|                    | MC    | 5,5              | 0,6                            | 0,8                            | 31,7 | 15,6 | 0,2               | 0,2              | <0.10            | <0.10            | <0.100                        | 2,3             |
| Granulats recyclés | GR    | 38,6             | 1,9                            | 3                              | 30,3 | 1    | 0,2               | 0,5              | 0,1              | <0.10            | 0,2                           | 0,9             |
|                    | SR    | 27,9             | 1,3                            | 2,5                            | 36,8 | 1,2  | 0,1               | 0,4              | 0,1              | <0.10            | <0.100                        | 0,7             |
| Ciments            | CEM I | 20,6             | 3,3                            | 4,4                            | 62,8 | 1,7  | 0,4               | 1,1              | 0,2              | 0,1              | 0,2                           | 3               |
|                    | CBC 1 | 30,7             | 1,9                            | 8,8                            | 47,7 | 4,8  | 0,6               | 0,6              | 0,6              | 0,7              | 0,2                           | 2,9             |
|                    | CBC 2 | 32,8             | 0,5                            | 9,8                            | 38,6 | 6,9  | 5,2               | 0,4              | 0,6              | 0,2              | <0.100                        | 1,6             |

La terre CG présente un pourcentage élevé en silice et des teneurs notables en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, attestant la présence de phases minérales silico-alumineuses. La terre MC se distingue par une teneur élevée en CaO et MgO, traduisant une forte composante calcaire. Les Granulats recyclés GR et SR présentent des taux de CaO notables indicateurs de pâte de ciment résiduelle. Leur composition en oxydes démontre aussi l'hétérogénéité propre aux matériaux issus de la démolition (mélange béton, mortier, sable). Concernant les ciments, le CEM I confirme un haut niveau de CaO, caractéristique d'un clinker à base de calcaire. Les ciments bas carbone (CBC 1, CBC 2) présentent une répartition plus variée entre SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et CaO, liée à l'apport d'additions minérales visant à réduire la part de clinker.

Cette analyse chimique illustre la variabilité des compositions (excavées, recyclées, cimentaires) et souligne leur compatibilité pour la formulation d'écomatériaux.

### A.3. Analyse environnementale

Le Tableau 6 ci-dessous indique le potentiel de dangerosité suivant la classification environnementale des matériaux bruts (terres excavées et granulats recyclés), établie sur la base d'analyses par lixiviation, d'analyses élémentaires et de la caractérisation des composés organiques.

Tableau 6. Classification environnementale des matériaux étudiés selon le Directive 1999/31/CE (2003/33/CE). Journal officiel de l'Union européenne, L11, 27-49

|                | MC            | CG     | GR     | SR     |
|----------------|---------------|--------|--------|--------|
| Classification | Non dangereux | Inerte | Inerte | Inerte |

En examinant les concentrations mesurées pour chacun des matériaux, on constate que la terre CG et les granulats GR et SR présentent des valeurs globalement faibles et homogènes, respectant ainsi les critères d'un matériau inerte et pouvant être utilisés sans restriction majeure. En revanche, la terre MC présente certaines valeurs plus élevées, notamment en ce qui concerne la teneur en sulfates 4514 mg/L et la fraction soluble 7580 mg/L, dépassant les seuils définis pour un matériau inerte mais restant inférieur aux limites fixées pour les matériaux « non dangereux ». Ainsi, MC reste classé non dangereux, mais pourrait nécessiter une gestion plus rigoureuse afin de limiter tout impact environnemental, tandis que CG, GR et SR, conformes à la classification « inerte », offrent davantage de flexibilité d'utilisation.

## B. Caractérisation des écomatériaux élaborés

### B.1 Etat frais

En ce qui concerne les écobétons de terre autoplaçants, immédiatement après le malaxage, l'étalement au cône d'Abrams a été mesuré en suivant la norme NF EN 12350-8. Pour ce type de béton, l'étalement ainsi que la vitesse au Funnel/entonnoir ont été étudiés (Figure 1). Le Tableau 7 présente les résultats de chaque formulation.



Figure 1 . Essais de caractérisation de la rhéologie de l'écobéton de terre : (a) étalement et (b) vitesse au Funnel

Tableau 7. Propriétés à l'état frais des éco-bétons de terre

| Formulation | Etalement (mm) | Vf (s) | Masse volumique à l'état frais (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|----------------|--------|---|
| CGGR_CEM I  | 755            | 3,93   | 1984  |
| CGGR_CBC_1  | 770            | 3,03   | 1958  |
| CGGR_CBC_2  | 750            | 3,61   | 1972  |
| MCGR_CEM I  | 775            | 3,34   | 2000  |
| MCGR_CBC_1  | 645            | 6,10   | 1948  |
| MCGR_CBC_2  | 605            | 7,90   | 1922  |
| MC_CEM I    | 845            | 3,6    | 1778  |
| MC_CBC_1    | 815            | 3,11   | 1880  |
| MC_CBC_2    | 775            | 3,94   | 1786  |

(CG = Calcaire Grossier ; MC = Marne/Caillasse ; GR = granulats recyclés ; CEM I = ciment Portland ; CBC = ciment bas carbone)

Dans toutes les formulations, l'ajout de granulats recyclés (formulations « ...\_GR ») a permis d'atteindre l'ouvrabilité cible tout en réduisant la quantité d'eau nécessaire, comparativement aux formulations sans granulats recyclés, à dosage en ciment égal. Plus les particules constitutives du squelette sont grossières, moins il y a de surface spécifique à mouiller et de frottements internes : le béton frais gagne donc en fluidité. Par ailleurs, les étalements obtenus correspondent à un béton autoplaçant de classe SF3, adapté à une mise en place dans des éléments verticaux [8]. Cela indique que ce type d'écobéton serait particulièrement approprié pour la réalisation de voiles ou

de murs en béton de terre, sans vibration. Enfin, il a été observé que, pour toutes les formulations, l'utilisation du ciment bas carbone CBC2 nécessite légèrement moins d'eau pour obtenir un béton autoplaçant (étalement SF3), comparé au ciment CBC1 ou au CEM I. Ceci pourrait s'expliquer par la granulométrie ou la formulation spécifique du CBC2 qui amélioreraient la rhéologie du mélange.

### B.2. Etat durci

La Figure 2 montre l'évolution de la résistance en compression et de la masse volumique au fil du temps (7, 28, 90 et 180 jours) pour les différentes formulations d'écobétons de terre autoplaçants.

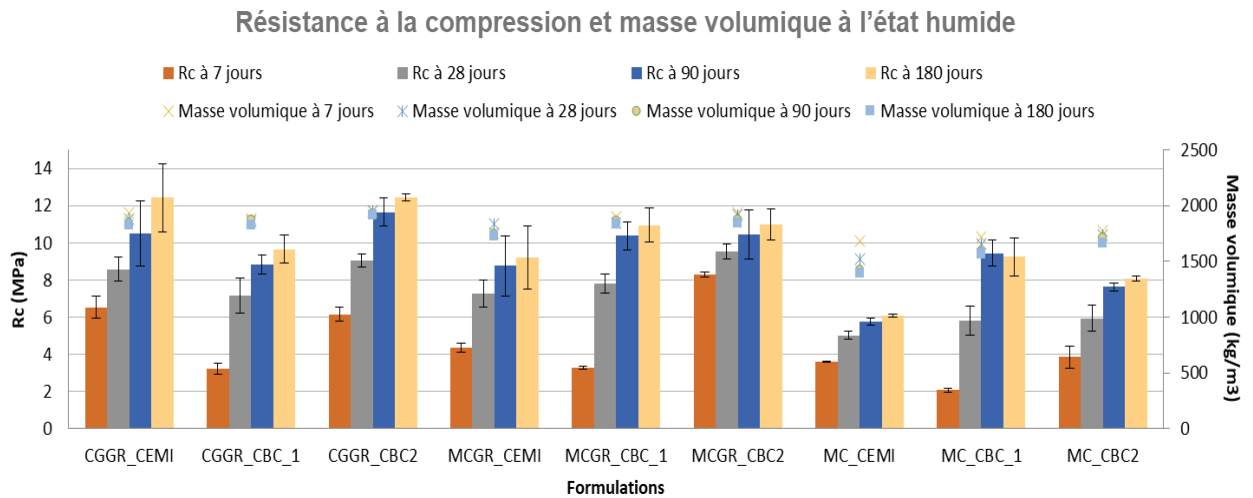


Figure 2. Évolution de la résistance à la compression et de la masse volumique des formulations en fonction du temps des écobétons de terre.

Le ciment bas carbone CBC1, bien que présentant une cinétique d'hydratation plus lente aux jeunes âges, continue de développer sa résistance au fil du temps et peut atteindre, voire dépasser, les performances du CEM I à long terme (90 et 180 jours). Cela confirme son potentiel d'utilisation dans des applications où une montée en résistance rapide n'est pas une exigence prioritaire, tout en contribuant à la réduction de l'empreinte carbone du béton. Le CBC2, quant à lui, se distingue par un développement de résistance initiale similaire à celui du CEM I, avec une montée en résistance rapide dès les premiers âges. Il s'agit donc d'une alternative intéressante au CEM I, offrant des résistances mécaniques comparables tout en présentant des performances environnementales améliorées.

Les résultats mécaniques obtenues sont cohérents avec celles rapportés dans la littérature pour des matériaux à base de terre stabilisés par des dosages similaires en liant hydraulique. Des travaux ont rapporté des résistances à 28 jours avoisinant 10 MPa [9], [10]. Cependant, d'autres formulations [11], [12] présentent des résistances plus faibles, en raison d'une mise en œuvre moins efficace. À l'inverse, les résultats de Seco et al. (2017) [13] montrent des résistances plus élevées (de l'ordre de 13 MPa), ce qui pourrait être attribué à un compactage optimisé lors de la fabrication des éprouvettes. La comparaison de ces résultats met en évidence l'influence déterminante du mode de mise en œuvre. En effet, dans la plupart des études de la littérature, les

bétons de terre sont mis en place par compactage mécanique, permettant une réduction significative de la porosité et donc une amélioration de la résistance mécanique. En revanche, dans notre étude a porté sur un écobéton autoplaçant, formulé pour s'écouler et se mettre en place sans vibration ni compactage externe, d'où une compacité légèrement inférieure a priori. Néanmoins, il ressort que l'écobéton autoplaçant élaboré présente des résistances mécaniques concurrentielles par rapport aux bétons de terre compactés, tout en offrant des avantages en termes de facilité de mise en œuvre et de réduction de l'empreinte environnementale.

### C. Conductivité thermique pour les écobétons de terre autoplaçants

Afin de comparer les propriétés thermiques des écobétons de terre élaborés, des essais visant à déterminer la conductivité thermique ont été réalisés à l'aide d'un conductivimètre à fil chaud.

La Figure 3 présente la relation entre la masse volumique humide et la conductivité thermique  $\lambda$  des différentes formulations d'écobéton de terre (MC, CG, avec ou sans granulats recyclés, et différents types de ciment : CEM I, CBC1, CBC2).

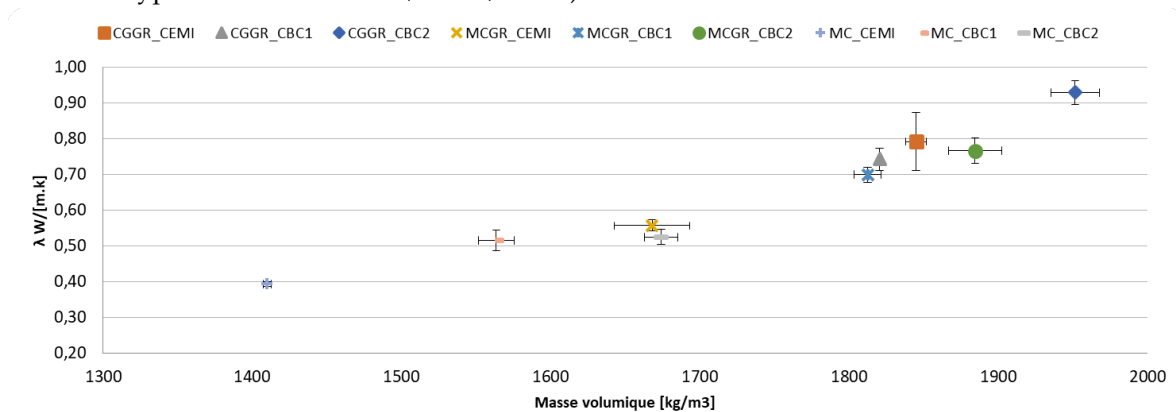


Figure 3 . Relation entre la masse volumique et la conductivité thermique des différents écobétons de terre.

Les écobétons autoplaçants élaborés à partir de terres excavées présentent des conductivités thermiques mesurées de l'ordre de 0,6 à 1,0 W/m·K, ce qui les situe dans le bas de l'intervalle observé pour les bétons ordinaires. En effet, un béton standard (à base de ciment CEM I et de granulats naturels) affiche typiquement une conductivité thermique comprise entre 1,4 et 2,3 W/m·K [14].

L'ajout de granulats recyclés tend à réduire à la fois la densité et la conductivité thermique du béton. Plusieurs études indiquent qu'un béton intégrant 100 % de granulats recyclés peut atteindre une conductivité thermique de l'ordre de 0,7 à 1,0 W/m·K pour une densité avoisinant 2000 kg/m³ [15], soit environ 20 à 30 % de moins qu'un béton ordinaire équivalent. Cette diminution s'explique notamment par la porosité élevée des granulats recyclés, issue de la présence de pâte de ciment résiduelle.

En comparaison, les matériaux à base de terre crue présentent généralement des conductivités thermiques encore plus faibles, en raison de leur densité réduite et de leur porosité importante. Par exemple, des blocs de terre comprimée stabilisée (stabilisé avec un léger pourcentage de de

ciment) présentent des conductivités thermiques comprises entre 0,4 et 1,2 W/m·K selon la densité et le taux de stabilisation [17].

Les écobétons de terre de notre étude possède une conductivité thermique nettement inférieure à celle d'un béton traditionnel, et comparable à celles observées dans des bétons allégés. Le choix de ce matériau doit donc intégrer un compromis entre performances mécaniques et comportement thermique amélioré par rapport à un béton classique.

#### IV. CONCLUSIONS

La caractérisation préalable des matériaux bruts issus des travaux d'excavation du Grand Paris Express (GPE) a permis d'orienter le développement d'écobétons de terre autoplaçants, intégrant des ciments à faible empreinte carbone. Les performances de ces matériaux ont été évaluées sur les plans mécanique, rhéologique et thermique.

Les résultats montrent que les formulations à base de ciment Portland CEM I offrent les résistances initiales les plus élevées. En revanche, les ciments bas carbone CBC1 et CBC2 présentent une montée en résistance plus progressive, atteignant voire dépassant les performances du ciment Portland à partir à long terme.

Sur le plan rhéologique, les écobétons autoplaçants présentent à l'état frais des propriétés conformes aux exigences des applications visées, notamment une consistance fluide de type auto-compactante. Par ailleurs, les mesures de conductivité thermique confirment l'impact direct de la densité et de la porosité sur le comportement thermique.

Ces résultats démontrent la faisabilité technique de formuler des bétons à base de matériaux issus de l'économie circulaire, tout en répondant à des critères de performance adaptés à des usages non structurels ou faiblement sollicités. L'optimisation du dosage en ciment qu'il s'agisse d'un ciment Portland ou bas carbone peut ainsi être ajustée en fonction des objectifs techniques et environnementaux du projet.

Ce travail ouvre la voie à une généralisation de ces pratiques innovantes, en promouvant la valorisation de terres excavées et de matériaux recyclés dans une optique de construction durable et à faible empreinte carbone.

#### V. REFERENCES

- 1- Global Alliance for Buildings and Construction. Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. <https://globalabc.org/>
- 2- Société des Grands Projets. (2024). Schéma cadre – Économie circulaire – Grand Paris Express.
- 3- Scrivener K. L, John V. M, Gartner E. M (2016). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. United Nations Environment Programme (UNEP). *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.
- 4- Poussardin V, Wilson W, Paris M, Tagnit-Hamou A, Deneele D (2024). Calcined clays as supplementary cementitious materials: A comparison between palygorskite and kaolinite. *Construction and Building Materials*, 416, 135180 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135180>

- 5- Avet F, Scrivener K. (2018). Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 107, 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.016>
- 6- Global Highways. (2015). Sustainable road construction: current practices and future concepts. Retrieved from <https://www.globalhighways.com/wh3/wh5/wh6/feature/sustainable-road-construction-current-practices-and-future-concepts>
- 7- Anger R, Fontaine L (2009). *Bâtir en terre.*, edition ?
- 8- Dieryck V, Van Itterbeeck P. (2012). Prescrire un béton autoplaçant. *Les Dossiers du CSTC*, 2012/3(3), 1-6.
- 9- Lima, S. A., Varum, H., Sales, A., & Neto, V. F. (2012). Analysis of the Mechanical Properties of Compressed Earth Block Masonry Using the Sugarcane Bagasse Ash. *Construction and Building Materials*, 35, 829–837. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.127>
- 10- Seco, A., Urmeneta, P., Prieto, E., & García, B. (2017). Estimated and real durability of unfired clay bricks: Determining factors and representativeness of the laboratory tests. *Construction and Building Materials*, 142, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.057>
- 11- Bahar, R., Benazzoug, M., & Kenai, S. (2004). Performance of Compacted Cement-Stabilized Soil. *Cement and Concrete Composites*, 26(7), 811–820. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003>
- 12- Dao, K., Ouedraogo, M., Millogo, Y., Aubert, J.-E., & Gomina, M. (2018). Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement. *Construction and Building Materials*, 158, 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.137>
- 13- Seco, A., Urmeneta, P., Prieto, E., Marcelino, S., García, B., & Miqueleiz, L. (2017). Estimated and real durability of unfired clay bricks: Determining factors and representativeness of the laboratory tests. *Construction and Building Materials*, 131, 600–605. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.107>
- 14- Vera, S. (2020). Improved balance between compressive strength and thermal conductivity of insulating and structural lightweight concretes for low rise construction. *Construction and Building Materials*.
- 15- Daza-Badilla L, Gómez R, Díaz-Noriega R, Avudaiappan S, Skrzypkowski K, Saavedra-Flores EI, Korzeniowski W. (2024). Thermal Conductivity in Concrete Samples with Natural and Synthetic Fibers. *Materials*. doi: 10.3390/ma17040817. PMID: 38399068; PMCID: PMC10890165.
- 16- Ben Mansour, M., Jelidi, A., Cherif, A. S., & Ben Jabrallah, S. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Construction and Building Materials*, 104, 44–51.