

# Eco-matériaux pour renforcement et stabilisation des sols

Amira MANSOUR KHODJA<sup>1,2</sup>, Javad ESLAMI<sup>2</sup>, Prosper PLIYA<sup>2</sup>, Souhila REHAB BEKKOUCHE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Matériaux, Géotechnique, Habitat et Urbanisme (LMGHU), Département de Génie civil, Université 20 Août 1955-Skikda, Skikda, Algérie.P.O. Box 26, 21000 Skikda, Algerie,

<sup>2</sup> CY Cergy Paris Université, Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil, EA4114, Cergy-Pontoise F-95000, France,

## CONTEXTE ET OBJECTIFS



Epuisement de ressources Stabilisation par un liant hydraulique : ciment



Source : Ingetel-bet.com



Source : Tpdemain.com



Source : Atlascopco.com

- 50 milliards de tonnes de matières premières extraites chaque année (UNEP, 2024)<sup>1</sup>
- Le ciment, responsable de 8 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> (IEA, 2023)<sup>2</sup>



- Chercher des alternatives plus écologiques, abondants
- Evaluer les performances mécaniques et techniques
- Analyse de cycle de vie (ACV)



Source : 17 ODD de l'ONU, septembre 2015

## MATÉRIAUX ET MÉTHODES



Marc de café (MC)



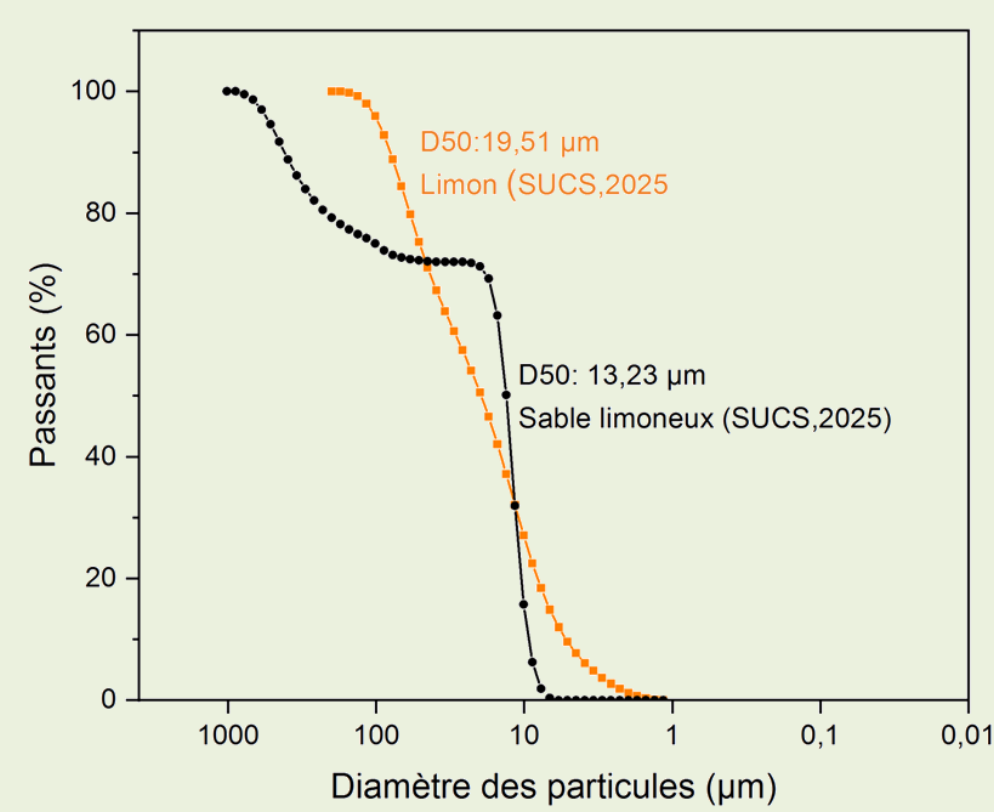
- Abondance
- Légèreté (densité de 1,33)
- Double intérêt environnemental
- Nécessite une stabilisation

Déchets de terre cuite (DTC)

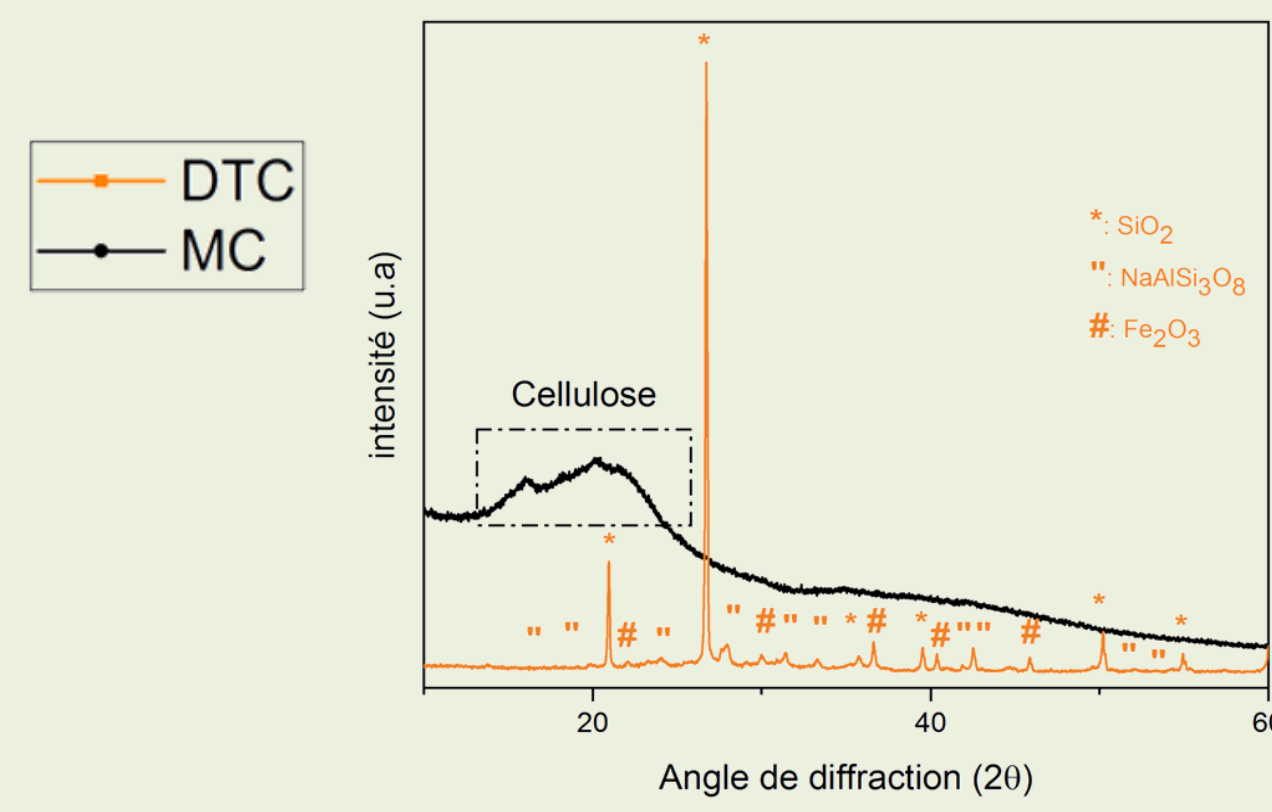


- Abondance
- Riches en aluminosilicate (Si/Al=3,55)
- Finement broyés: pouzzolanique
- En milieu alcalin : formation de géopolymères

Analyse granulométrique



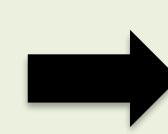
Diffraction aux rayons X



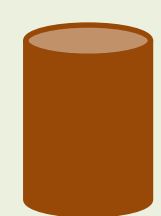
Un plan factoriel à 5 facteurs

- Composition MC:DTC  
90:10, 80:20, 70:30, 60:40
- Proportion Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:NaOH  
90:10, 70:30, 50:50
- Concentration molaire  
2, 4, 6 et 8 mol/L
- Température de cure  
35 et 50 °C
- Durée de cure  
7, 28 jours

Essai de compression simple Rc (ASTM D2166)<sup>3</sup>



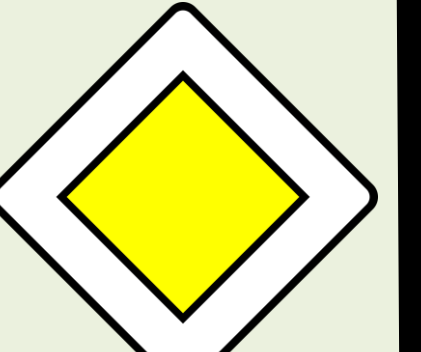
- Eprouvettes cylindriques : 50 x 100 mm
- Compactage avec w<sub>opt</sub> et γ<sub>dmax</sub> (ASTM D1557)<sup>4</sup>



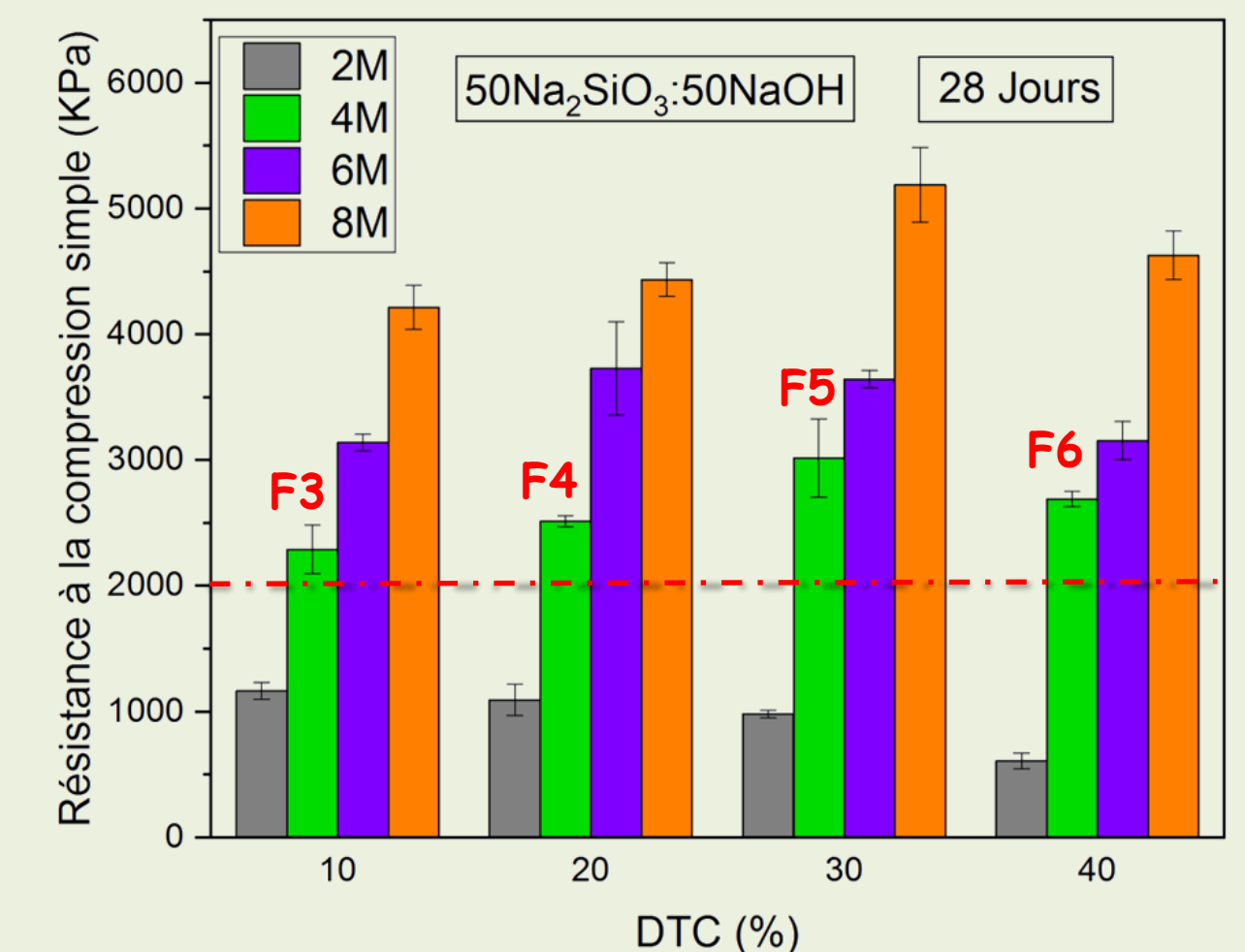
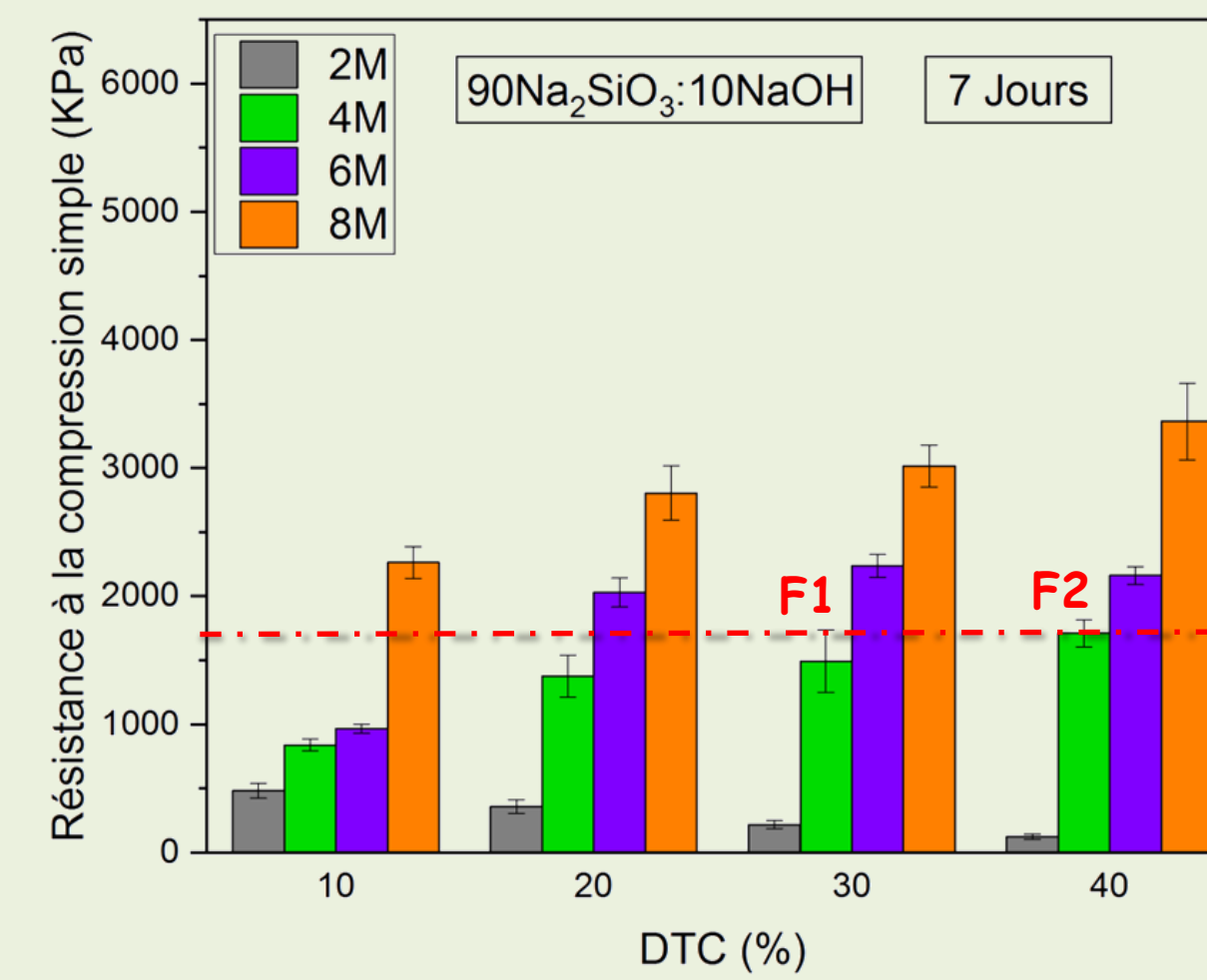
192 mesures de Rc traité avec R Studio

ACV (ISO 14440-44)<sup>5</sup> avec OPENLCA 2.4 et la base de données ecoinvent 3.10

## RESULTATS ET INTERPRETATIONS



Performances mécaniques



- La résistance à jeune âge augmente avec M et DTC (%)
- Seulement 4M avec 30~40% DTC → 1,7 MPa à 7 j
- A 28 j, différents facteurs et leurs interactions interagissent
- Avec 4M tous les mélanges > 2MPa à 28 j

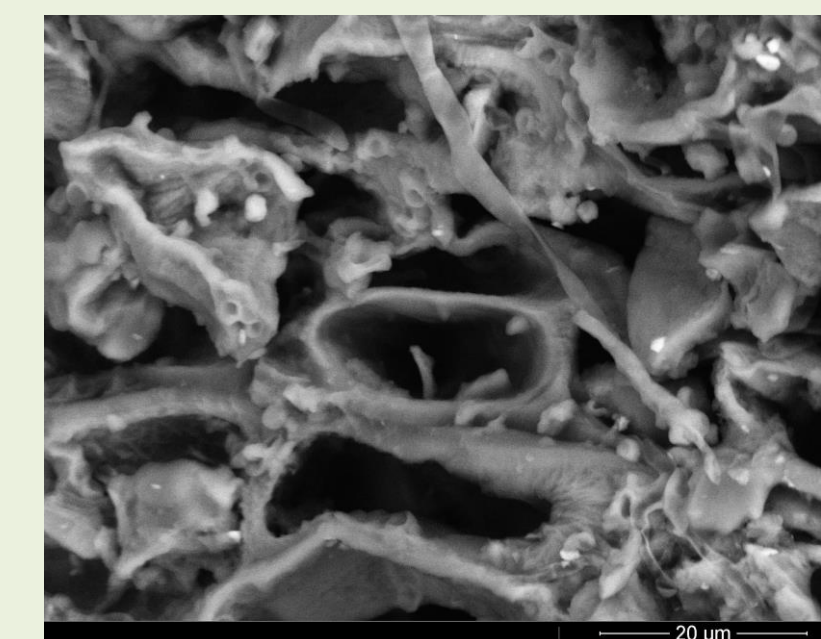
Analyse de la variance: ANOVA

| Effet                 | DDL | P-value | Signif. | w <sup>2</sup> Partiel |
|-----------------------|-----|---------|---------|------------------------|
| M (mol/L)             | 3   | <0,001  | ***     | 0,830                  |
| Température (°C)      | 1   | <0,001  | ***     | 0,689                  |
| Durée de cure (Jours) | 1   | <0,001  | ***     | 0,834                  |

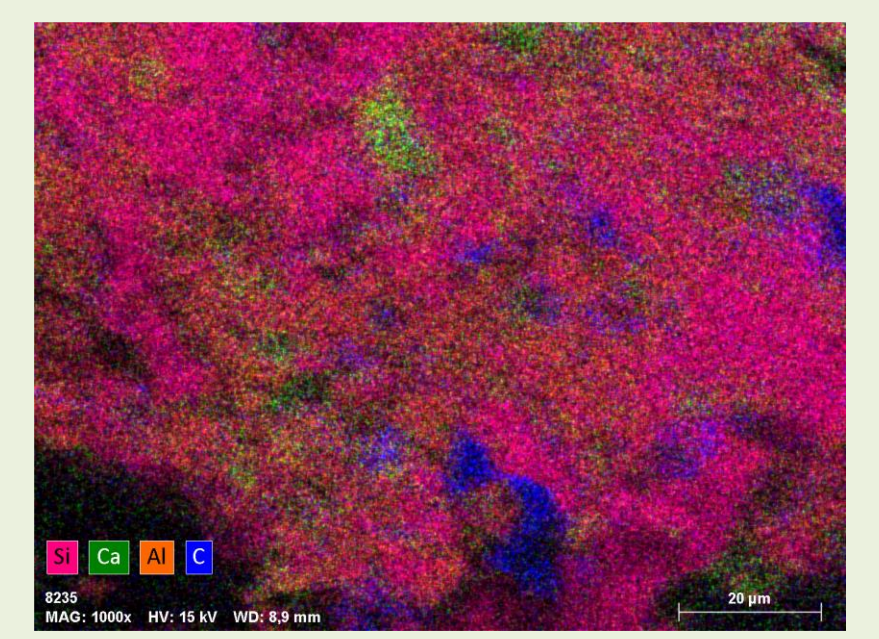
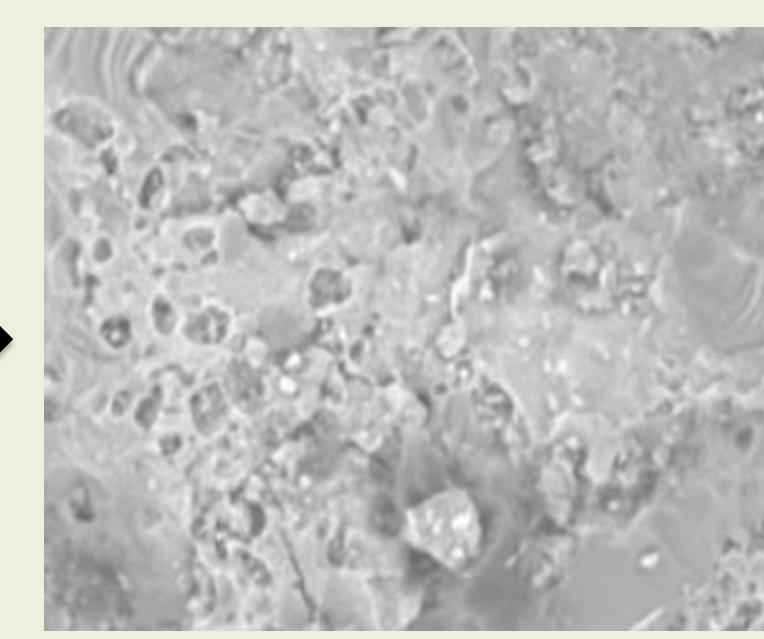
R<sup>2</sup>=0,93 avec P<0,05

A l'échelle de la microstructure

Porosité importante de MC brut



MC stabilisé par formation de gel géopolymère



Applications routières

F1 et F2 selon (AASHTO, 2008)<sup>6</sup>

F3, F4, F5 et F6 selon (NF EN 14227-10)<sup>7</sup>

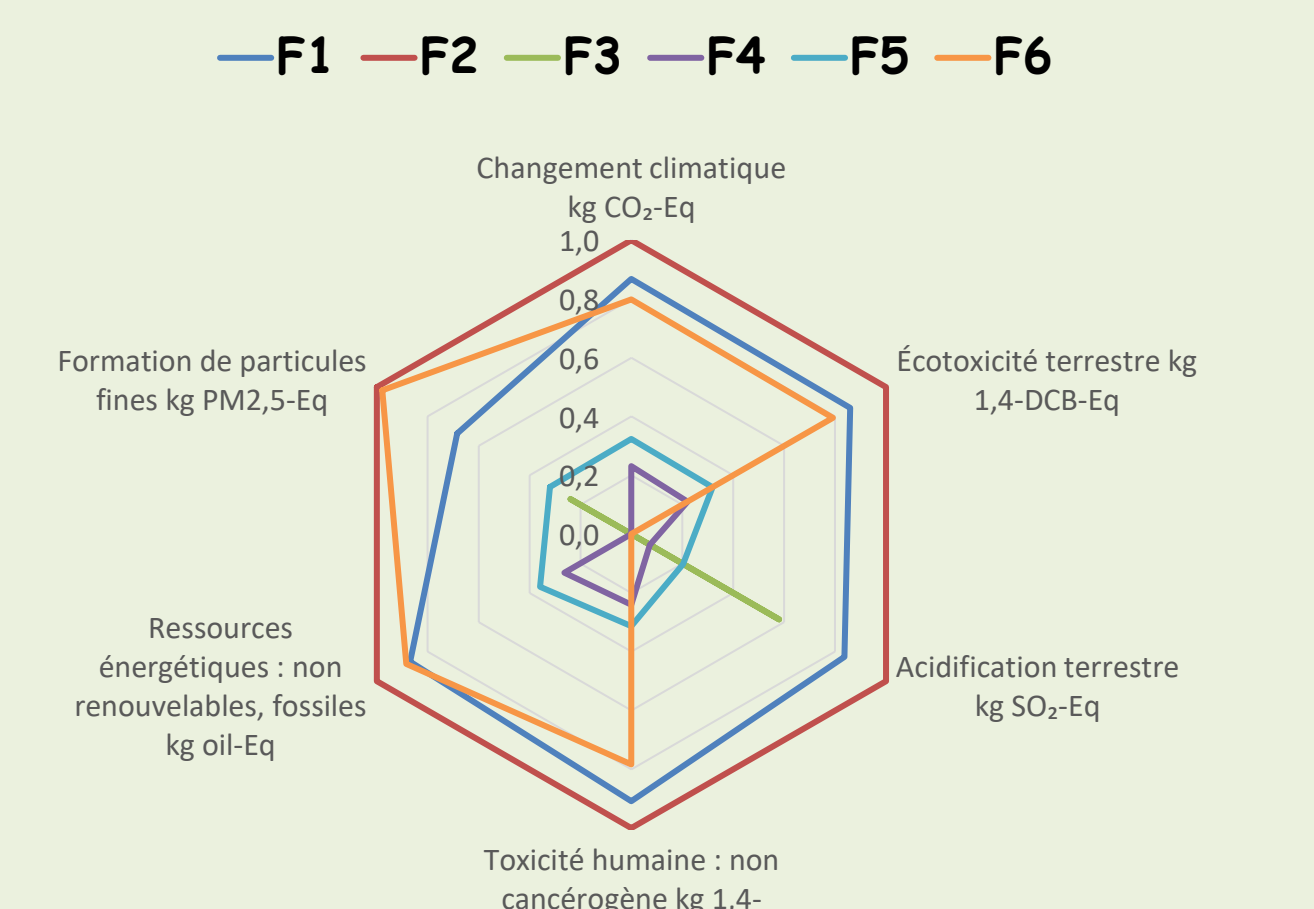
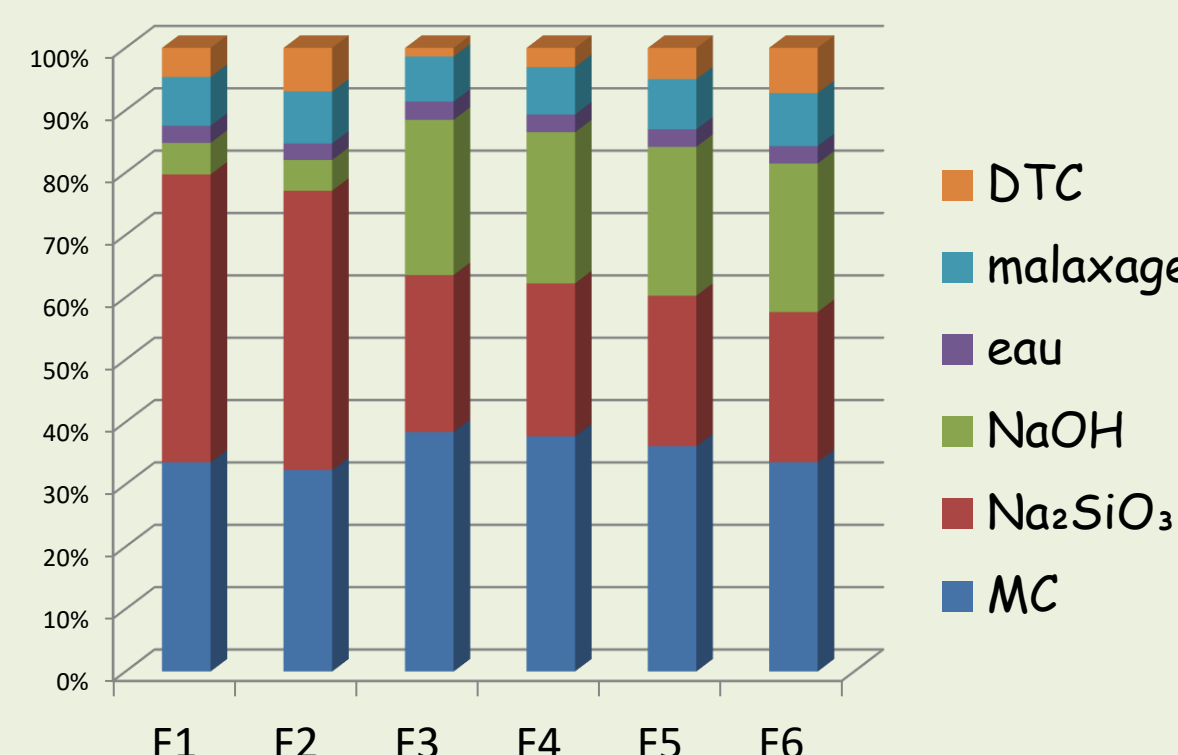


Impact environnemental (du berceau à la porte)

L'impact carbone IC des formulations F1...F6 (1m<sup>3</sup>) varie de 67,73 à 73,17 kg CO<sub>2</sub> eq

IC de 1 m<sup>3</sup> de Fi < 1 m<sup>3</sup> de sol stabilisé au ciment ou géopolymère (Maheepala, 2025)<sup>8</sup>

Contribution de la composition



Majoritairement due aux activateurs chimiques

L'impact normalisé de F2 est le plus

## CONCLUSIONS



- Développement d'un matériau alternatif au sol sableux stabilisé au ciment.
- Performances mécaniques qui répondent aux exigences minimales pour emploi routier.
- Impact environnemental réduit, notamment après optimisation par un plan factoriel.

## RÉFÉRENCES



- [1] United Nations Environment Programme. Global Resources Outlook 2024: Bend the Trend – Pathways to a liveable planet as resource use spikes. Nairobi: International Resource Panel; 2024.
- [2] International Energy Agency (IEA). Cement – Analysis. Paris: IEA; 2023. Available from: <https://www.iea.org/reports/cement>.
- [3] ASTM D2166/D2166M-24. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International, 2024.
- [4] ASTM International. ASTM D1557-12: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2012.
- [5] NF EN ISO 14040 (octobre 2006). Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre.
- [6] AASHTO. Mechanistic, empirical pavement design guide, a manual of practice, AASHTO (2008).
- [7] NF EN 14227-10 (décembre 2006). Mélanges traités aux liants hydrauliques — Spécifications — Partie 10 : sol traité au ciment.
- [8] M.M.A.L.N. Maheepala, M.C.M. Nasvi, Dilan Robert, L.C. Kurukulasuriya, C. Gunasekara. Life-cycle assessment of novel geopolymer stabilization method in applications with expansive subgrades. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 146, 2025, 104840, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104840>.