## **Construire sur la Lune**

Projet Scientifique en Equipe

Alice Lallemand - Quentin Roux - Julie Vong







Figure 1 | Présentation des concepts pratiques et théorique de la synthèse de géopolymère à base de métakaolin (mélange de différents oxydes simulant la régolithe lunaire) avec récupération de l'eau consommée. a. Composition des réactifs utilisés pour la synthèse des géopolymères dans des moules en silicone. Description des quatre formulations étudiées : le paramètre variant est la proportion massique d'eau. b. Schéma du système de récupération d'eau par chauffage (120°C, 2h) et mise sous vide des échantillons de géopolymère. La vapeur d'eau circule selon le sens indiqué et se condense dans le piège à azote liquide. c. Micrographie électronique à balayage sur un échantillon de poudre de métakaolin : composition  $Al_2Si_2O_7$  (représente 65% en masse de la régolithe lunaire). d. Modèle simplifié de la géopolymérisation proposé par Duxson<sup>1</sup>. L'eau n'agit que comme catalyseur de la réaction et peut donc être extraite sans modifier la structure finale du géopolymère (agrandissement).

1. Duxson, P., et al., Geopolymer technology: the current state of the art. Journal of Materials Science, 2007. 42(9): p. 2917-2933.



Figure 2 | Distribution en diamètre des pores des géopolymères synthétisés (calculée à partir du volume occupé), selon le pourcentage massique d'eau avant cure au four, obtenue par mesure d'adsorption d'azote et traitement des données par méthode BJH (un cycle adsorption désorption à 250°C). a. Distribution en taille de pore normalisée, avant cure au four : essentiellement composés de mésopores (entre 50Å et 400Å), les géopolymères présentent un pic de taille qui augmente avec la proportion massique d'eau de leur formulation (40 Å à 44%, 80 Å à 47%, 90 Å à 51% et 110 Å à 54%). b. Distribution en taille de pore normalisée. V est le volume cumulé des pores et D le diamètre des pores. Après cure au four : augmentation de la proportion de grand pores (> 150 Å) due à la fracture des petits pores lors de l'échappement de la vapeur d'eau occasionnée par la cure à 120°C sous vide. Le pic précédent est conservé sauf pour la formulation à 44% en eau où tous les petits pores (40 Å) ont formé des pores 5 à 10 fois plus larges. c. Micrographie électronique à balayage sur un géopolymère (formulation à 51% en masse d'eau) avant cure au four : structure poreuse correspondant à la distribution en 2.a bien visible. d. Micrographie électronique à balayage sur un géopolymère (formulation de la tailles des pores remarquable, structure plus chaotique (fragilisation du matériau avec la cure).



Figure 3 | Test de résistance mécanique en flexion selon la formulation du géopolymère (proportion massique en eau) avant et après cure au four (extraction de l'eau contenue dans les géopolymères) et bilan de l'étude. a. Photographie du montage expérimental : test flexion trois points sur des briques moulées selon une géométrie préconisée par la norme ISO 13586-1 placées sur deux appuis séparés d'une distance L. Les contraintes subies par la structure d'un bâtiment lunaire sont de type flexion et non compression : haute pression d'air à l'intérieur et vide à l'extérieur. b. Courbe de charge d'une brique de géopolymère à 47% en masse d'eau en flexion 3 points (1 cycle de charge-décharge) : la pente donne le module d'Young caractéristique de l'échantillon par les relations  $\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$  et  $\varepsilon = \frac{6hf}{L^2}$  avec P la force appliquée et f la flèche mesurées lors de l'expérience, L la distance entre appuis, b et h la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette. **c.** Modules d'Young mesurés des géopolymères avant et après cure au four, selon le pourcentage massique en eau de leur formulation : l'extraction de l'eau diminue considérablement les propriétés mécaniques en flexion des échantillons, la formulation la plus résistante après cure est celle avec la plus faible proportion d'eau (44%). d. Bilan des caractéristiques des différentes formulations de géopolymère après extraction d'eau (cure) : la résistance mécanique (module d'Young E) diminue avec l'augmentation du volume poreux V, lui-même lié à une augmentation de la part d'eau dans le géopolymère. Bien que la taille moyenne D de ses pores soit supérieure, la formulation à 44% est la plus optimale pour notre objectif : une récupération d'eau maximale pour des propriétés mécaniques maximales.