

Matériaux alcali-activés : caractérisations physico-chimiques et mécaniques

Anass Cherki El Idrissi¹

¹ Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR-CNRS 6183, Centrale Nantes, France.

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ. La formulation de coulis de renforcement de sols basés sur l'activation alcaline pose plusieurs défis liés aux propriétés rhéologiques, mécaniques et microstructurales. La variété des matières premières et la haute teneur en eau requise pour cette gamme d'applications impactent les mécanismes de structuration et les propriétés à l'état durci. Une caractérisation multi-échelles de ces matériaux et la compréhension des liens entre les différents niveaux de caractérisation est alors indispensable. Ce travail vise à mettre au jour des relations entre les aspects physico-chimiques et le comportement du matériau au jeune âge et au long terme. Cette analyse, conduite à travers des méthodes d'évaluation classiques ainsi que des approches originales, détermine les leviers pour une procédure rationnelle de formulation. L'utilisation de la micromécanique et de l'homogénéisation multi-échelles peut fournir des informations importantes et construire un pont entre la microstructure et le comportement macroscopique. Enfin, la meilleure résistance dans les milieux acides des matériaux alcali-activés ouvre la porte à leur utilisation dans des environnements chimiquement agressifs.

ABSTRACT. The design of alkali-activated soil-reinforcement grouts faces several challenges regarding the required rheological, mechanical and microstructural properties. In this type of applications, the wide variety of source materials and the necessary addition of water affect the structuration processes and extend to the hardened state properties. A comprehensive characterization of the specificities of these materials and the relations between the multiple factors is essential. This study aims at linking the physicochemical aspects of alkali-activated materials and their early age as well as long term behavior. This analysis was carried using conventional evaluation methods as well as innovative approaches to examine the influential parameters for a rational design process. Coupling micromechanics and multiscale homogenization can offer valuable data and help relate the microstructure to the macroscopic mechanical properties. Finally, the better resistance of alkali-activated materials in acid conditions provides a solution for projects involving chemically aggressive environments.

MOTS-CLÉS : activation alcaline, géopolymères, micromécanique, rhéologie, coulis, durabilité.

KEY WORDS: alkali-activation, geopolymers, micromechanics, rheology, grouts, durability.

Nés dans la seconde moitié du siècle dernier suite aux travaux de Purdon [PUR 40], Glukhovskiy [GLU 67] et Davidovits [DAV 91], les matériaux alcali-activés font partie des matériaux de construction qui suscitent le plus d'intérêt actuellement. Cette attractivité est alimentée en partie par leurs bonnes propriétés mécaniques et leur durabilité élevée dans certains environnements chimiquement agressifs. En plus, ils permettent, à travers un choix judicieux des matières premières, d'obtenir un impact CO₂ relativement faible, tout en valorisant certains coproduits industriels. Leurs applications principales se retrouvent dans les domaines de l'isolation thermique, de l'industrie céramique et des matériaux de construction. Dans ce dernier cas, les normes actuelles constituent un obstacle à l'application réelle sur chantier, car elles ne prévoient pas encore l'introduction de ce type de matériaux.

L'utilisation en coulis de renforcement présente une situation adaptée à l'emploi des matériaux alcali-activés : un environnement potentiellement agressif avec plusieurs types d'attaques chimiques et un contexte normatif moins restrictif, basé sur les performances des matériaux choisis. Cependant, avant l'application in situ, les produits doivent faire l'objet de développements spécifiques, afin de respecter les critères d'utilisation liés à la résistance, fluidité et durabilité. L'étude de matériaux répondant à ces prescriptions a donc été l'objectif principal de ce travail, afin de lever plusieurs verrous technologiques. En effet, cette application étant originale, la littérature n'offre pas suffisamment de résultats pour la formulation et le choix des matériaux.

Le premier verrou à lever était le choix des matériaux à utiliser : métakaolin, cendres volantes, laitier, etc [CHE 16]. Cette décision, qui prend en considération le coût, la performance et l'impact écologique, conditionne en effet la chimie, les propriétés obtenues et les applications adaptées. Lors de l'activation alcaline du laitier, la forte teneur en calcium conduit à la formation d'hydrates, assez proches de ceux retrouvés dans les matériaux cimentaires classiques. Ce gel d'hydrates noté C-A-S-H, où l'aluminium joue un rôle primordial [FER 03], permet l'obtention d'une structure plus dense [SHI 96a], améliorant ainsi la durabilité du matériau et sa résistance mécanique [BYF 89]. Mais ces matériaux présentent une grande sensibilité au dosage d'activateur, type de laitier et conditions de cure [SHI 96b, WAN 94]. D'autre part, l'activation d'aluminosilicates comme le métakaolin ou les cendres volantes silico-alumineuses, pauvres en calcium, conduit à la réaction de géopolymérisation qui forme un réseau tridimensionnel amorphe. Ici aussi, les résultats obtenus dépendent de la pureté des matériaux [AUT 13], de leur finesse [DIA 10] et du type d'activateur employé [KON 08].

Malgré la composante industrielle de ces travaux, la compréhension des mécanismes qui régissent le comportement des matériaux développés était l'objectif principal. Les coulis ont donc été étudiés à différentes échelles, en essayant de lier les effets observés à chaque niveau. La combinaison des données obtenues permet en effet d'adopter une approche plus rationnelle pour la formulation, basée sur l'identification des principaux paramètres contrôlant le comportement des matériaux. Ainsi l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés rhéologiques a d'abord été étudiée, dans le but d'optimiser la fluidité des coulis. Ensuite, les mécanismes de structuration sont présentés, avec l'appui d'analyses physico-chimiques. La méthodologie établie pour la caractérisation micromécanique de ces matériaux permet de lier les observations microscopiques aux propriétés mécaniques globales. Enfin, la résistance des matériaux alcali-activés aux attaques chimiques est étudiée à travers une approche multicritères pour l'évaluation de la performance en milieu acide.

2. Programme expérimental

Les formulations étudiées diffèrent par les matières utilisées ainsi que par leurs proportions respectives. L'activation alcaline de toutes les formulations est réalisée au moyen d'un silicate de sodium avec l'ajout d'une faible quantité d'hydroxyde de sodium. Les compositions ont été adaptées aux différents essais à réaliser. Ainsi, pour l'étude rhéologique ainsi que pour la caractérisation physico-chimique, les coulis ont été formulés sans addition ou adjuvant, avec un rapport volumique eau sur solides (E/S) commun de 1,36. Pour la caractérisation au jeune âge, ainsi que pour les essais de durabilité, l'étude a été réalisée sur des mortiers fabriqués à partir de quelques formulations choisies de coulis. Ces mortiers, avec un volume de pâte de 53%, permettent d'avoir une idée sur le comportement des coulis en contact avec un sol, tout en ayant des matériaux d'études plus cohésifs et de manipulation plus aisée. Les coulis choisis, y compris le ciment de référence, ont tous un rapport Eau/Solide massique de 0,75. Ces formulations sont notamment : GMK (à base de métakaolin seul), GMKCV40 (60% métakaolin et 40% cendres), SLAG45 (laitier activé), C1 (au ciment Portland CEM I) et C3 (ciment CEM III/C). L'étude micromécanique a été réalisée sur des pâtes moins diluées, afin d'obtenir des matériaux avec une rigidité qui permet l'opération de polissage, nécessaire pour l'analyse de micro-indentation. La formulation présentée ici est à base de métakaolin, similaire à GMK, à l'exception de la proportion d'eau réduite (E/S = 0,35).

Le comportement rhéologique a constitué pour cette étude un axe crucial. En effet, les coulis au métakaolin seul présentaient de bonnes performances au niveau de la résistance mécanique et de la stabilité, mais pas au niveau de la rhéologie. Les spécifications pour le développement de ces matériaux comportaient en effet une limite sur la viscosité (60 s maximum au cône de Marsh) et une limite sur la ressuée (3% après 24h de la préparation, moyenne sur des éprouvettes de hauteur 10 cm). Le compromis entre ces deux propriétés ne peut être trouvé par l'ajout des superplastifiants classiques pour ciment, inefficaces dans ce type de systèmes, ni par l'ajout de l'eau, qui augmente l'instabilité du mélange. La solution restante est donc la variation de la fraction solide du coulis et de sa demande en eau, en introduisant un matériau avec une surface spécifique plus faible et une meilleure compacité. Les particules sphériques des cendres volantes silico-alumineuses présentent ces caractéristiques, avec l'avantage d'être une matière disponible et dont l'utilisation réduit l'impact carbone.

L'effet positif de l'introduction des cendres sur la fluidité du coulis est visible sur la Figure 1. La viscosité Marsh ainsi que la consistance – mesurée au rhéomètre en appliquant un modèle d'Herschel-Bulkley – diminuent avec l'ajout de cendres volantes. L'indice d'écoulement augmente, indiquant le passage à un comportement légèrement rhéoépaississant du matériau. Sur toutes les formulations, le seuil de cisaillement était très faible. On remarque également une perte de stabilité dans le mélange, induisant une augmentation de la ressuée. Cette instabilité est causée par la perte de réactivité liée à la substitution du métakaolin par les cendres, qui conduit à une vitesse de structuration plus faible que celle du ressuage. Outre la viscosité de la solution alcaline, la réactivité de l'aluminosilicate a en effet été retenue comme un facteur important dans le comportement rhéologique des géopolymères [FAV13]. Elle nuit à la performance mécanique, rendant inutilisables les formulations présentant une ressuée trop importante. A partir de ces données, un domaine de formulation a été retenu, avec un taux d'introduction de cendres volantes entre 0 et 40%. Aussi avons-nous choisi d'étudier les formulations à ces deux limites, afin de mieux caractériser l'effet des cendres sur les autres propriétés.

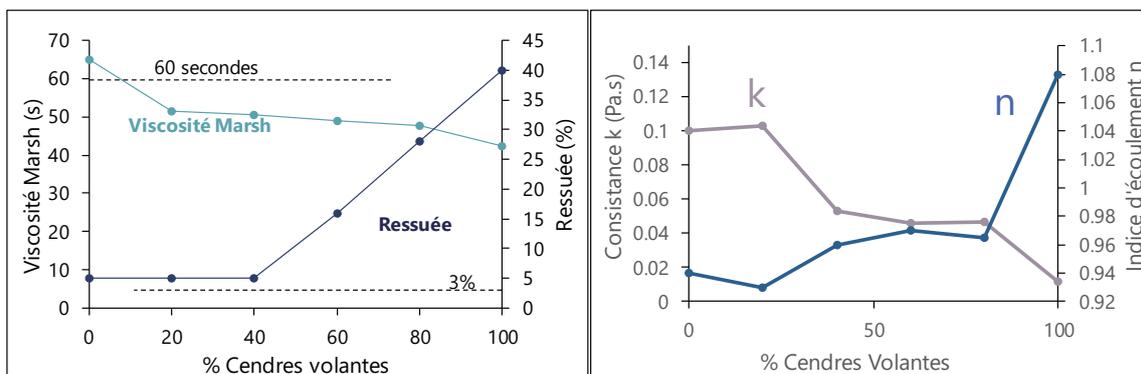


Figure 1. Viscosité, ressuée (gauche), consistance et indice d'écoulement (droite) en fonction du taux de cendres volantes

4. Structuration

Les différences entre les liants hydrauliques classiques et les matériaux alcali-activés dépassent les matières premières et concernent surtout les processus réactionnels qui les régissent. La réaction de l'hydratation est bien connue aujourd'hui à travers sa cinétique, les produits formés, et les liens avec le durcissement. Un tel consensus est loin d'être atteint pour l'activation alcaline. Alors que plusieurs modèles existent, leur validité et leur extension aux différents matériaux utilisés n'est pas encore démontrée [CHE 06]. Encore moins connues sont les manifestations de ce processus à l'échelle macroscopique, notamment au jeune âge. Celui-ci conditionne, par sa cinétique, la rhéologie du coulis frais, en plus des propriétés au long terme du matériau durci.

En se basant sur des formulations différentes, nous avons étudié les différents liens qui existent entre le déroulement de la réaction, le durcissement et les déformations volumiques. Le dégagement de chaleur pendant la réaction a été suivi par calorimétrie isotherme à 20°C. Cette mesure a permis d'établir une base de comparaison malgré les différences dans leurs processus de réaction. Un avancement de la réaction, rapportant la chaleur cumulée émise à l'instant t à la chaleur totale émise, a été calculé.

Le développement des propriétés élastiques a été estimé à partir des vitesses d'ondes ultrasonores [REI 04]. Le module d'Young, tracé en fonction de l'avancement de la réaction (Figure 2), indique les étapes de la structuration

du matériau. Pour SLAG 45 (Al₂O₃ 6%) le développement du module est plus rapide que celui des matériaux cimentaires (C1 et C3). En plus, ceux-ci présentent une phase « dormante » plus longue jusqu'au seuil de percolation, puis une croissance graduelle du module liée au processus d'hydratation. Dans les géopolymères, où le calcium est absent, le développement de rigidité intervient plus tard dans le processus de réaction et suit une évolution progressive, signe d'une polycondensation qui se développe au sein de la phase liante.

Une autre particularité qui distingue les géopolymères des liants hydrauliques est l'absence de déformation volumique lors de la structuration (Figure 3). Lors de l'hydratation du ciment, le volume du matériau diminue avec la formation d'hydrates, vu leur volume molaire plus faible que celui des réactifs. Ce phénomène, appelé contraction de Le Chatelier, est proportionnel au degré d'hydratation et peut se prolonger au-delà de la fin de prise si la réaction se poursuit [CHA 87, MOU 04]. Dans SLAG45, on observe ce comportement, mais plus tard et avec moins d'intensité. L'activation du laitier conduit en effet à la formation d'hydrates calciques qui causent un retrait, mais celui-ci est compensé en partie par la formation de phases secondaires expansives telles que l'hydrotalcite.

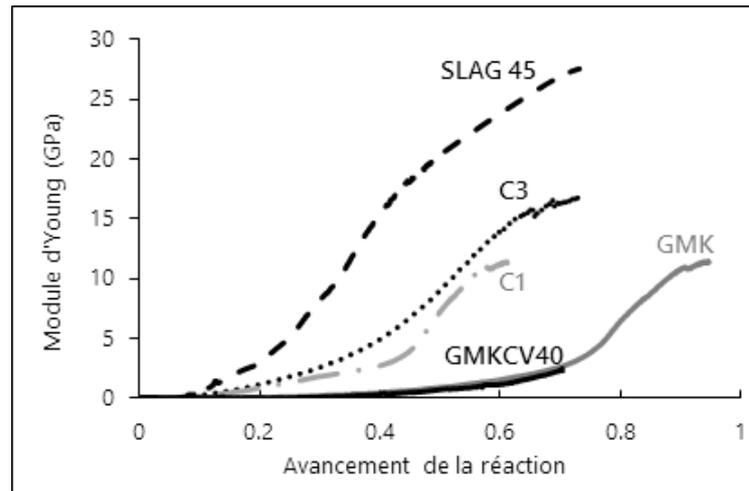


Figure 2. Evolution du module en fonction de l'avancement de réaction

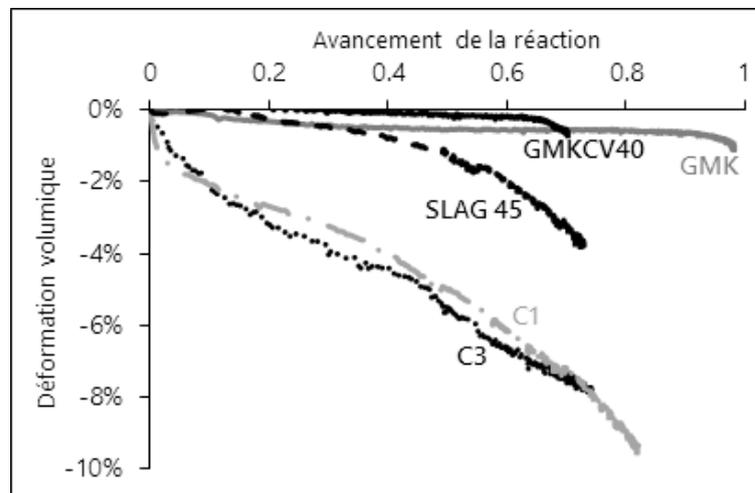


Figure 3. Variation volumique en fonction de l'avancement de réaction

Cette différence dans les manifestations macroscopiques de la structuration trouve son origine dans les produits formés par chaque chemin de réaction, en fonction du taux de calcium présent dans le mélange. La spectroscopie RMN fournit les informations permettant de décrire la structure moléculaire où se trouvent le silicium et l'aluminium. Ainsi, dans les spectres des deux géopolymères (Figure 4), GMK et GMKCV40, on observe une grande homogénéité de la microstructure. A l'exception d'une faible proportion de Si (présente dans les grains de quartz, non réactif) et d'Al (dans la kaolinite résiduelle), les autres atomes se retrouvent dans un réseau tridimensionnel. On peut également noter l'absence d'un effet significatif des cendres volantes, que ce soit à court

ou long terme. Le seul changement qui a lieu est un déplacement du pic de ^{29}Si vers la droite, signe d'une augmentation du ratio Si/Al dans le matériau. Cette augmentation est probablement due à la réduction de la quantité de métakaolin réactif et ne peut être attribuée à une dissolution des cendres.

Le laitier activé (Figure 5) apparaît comme un matériau évolutif et assez hétérogène. D'une part, on a l'apparition progressive de pics définis liés à des structures de type C-S-H. Dans le spectre de l'aluminium à 730 jours, les pics à 68 et 74 ppm sont liés à une introduction de l'aluminium pontant dans les chaînes Si, augmentant ainsi leur taille et réduisant le ratio Ca/Si. On observe également, dans le spectre Al, l'apparition d'un pic à 9 ppm. Celui-ci correspond à la formation de phases riches en magnésium auquel l'aluminium peut se substituer, probablement de l'hydrotalcite. L'apparition de ce type de phases bidimensionnelles et expansives peut être à l'origine du retrait chimique plus faible présenté plus tôt (Figure 3). Il peut également s'avérer nuisible à l'intégrité de la microstructure, avec l'apparition de contraintes et la modification locale de la répartition des vides.

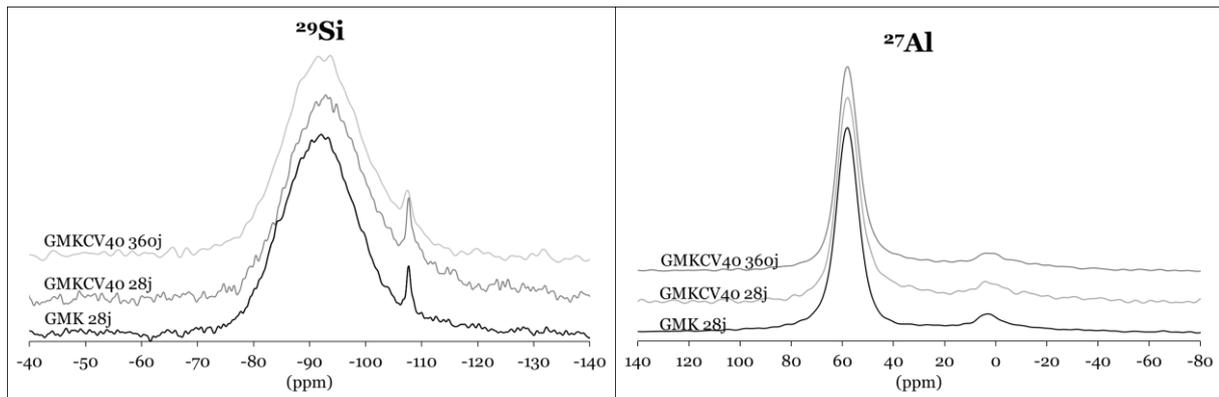


Figure 4. Spectres RMN de GMK et GMKCV40

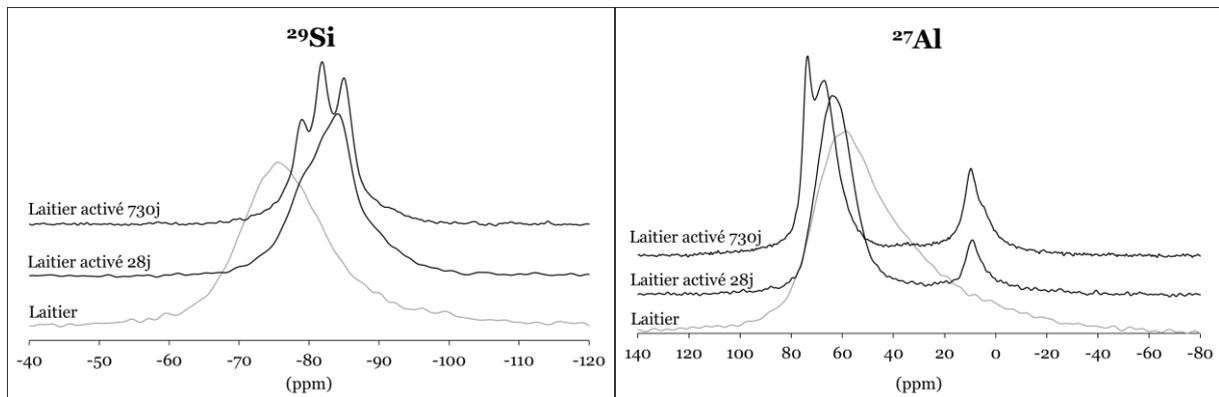


Figure 5. Spectres RMN du laitier brut et du laitier activé

5. Micromécanique

Afin d'assurer un point de passage entre les résultats obtenus à l'échelle physico-chimique et les observations macroscopiques, nous avons développé une méthodologie à une échelle intermédiaire. Celle-ci est basée sur l'analyse microscopique, la caractérisation micromécanique et les modèles d'homogénéisation. Cette approche permet de combiner les caractéristiques chimiques du matériau et les données sur la microstructure aux propriétés mécaniques des phases, pour remonter au comportement macroscopique du matériau [GRO 05]. Dans un premier temps, elle a été appliquée sur des formulations simples et peu diluées, afin de développer les procédures expérimentales.

L'analyse EDX du géopolymère au métakaolin (Figure 6) montre la présence de trois phases : liant géopolymère (orange), grains de quartz (bleu) et des particules de métakaolin non dissoutes (vert). A celles-ci vient se rajouter la porosité, évaluées à l'échelle mésoscopique ($>1\mu\text{m}$) par micro-tomographie aux rayons X. Alors que les grains de quartz vont agir comme des inclusions et augmenter le module global, la porosité va causer une baisse des propriétés mécaniques. Complétées par les résultats de micro-indentation, ces données sont

combinées par le modèle de Mori-Tanaka ou Lu et al. [2011] Dilé, 09/14/15 (15 de 15) pour déterminer le module d'Young du matériau (Tableau 1). L'ensemble des données est également exploité pour une homogénéisation par éléments finis (Figure 7), permettant de modéliser le comportement élastique du matériau. Cette méthode permet également de déterminer les facteurs les plus influents sur la performance mécanique et d'affiner progressivement le modèle et les résultats obtenus.

Tableau 1. Données et résultats de l'homogénéisation pour le géopolymère au métakaolin

	Modules des phases (GPa)	Proportion volumique (%)	Module homogénéisé (GPa)	Module mesuré (GPa)
Matrice GP	11,5	84,1	10,5	9,1
Quartz	68,2	7,4		
Macropores	0,0001	8,5		

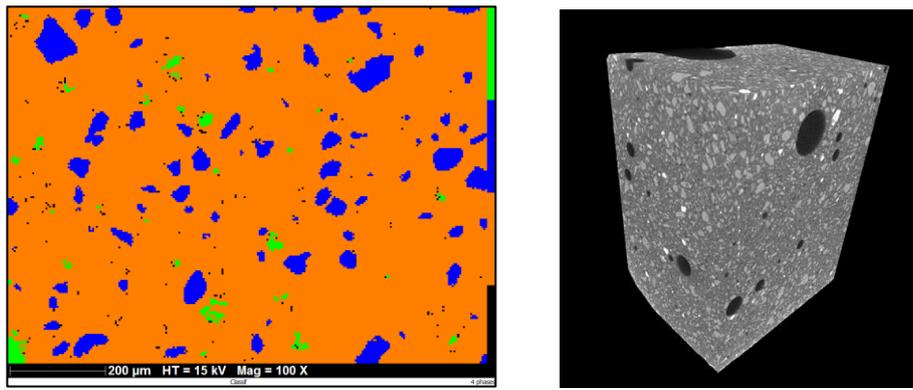


Figure 6. Cartographie EDS des phases (gauche) et analyse micro-tomographique de l'échantillon (droite)

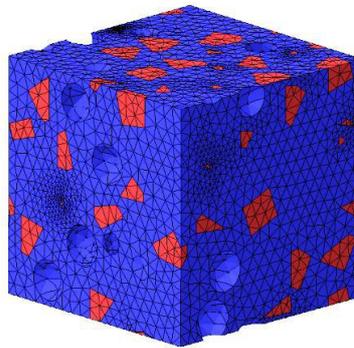


Figure 7. Microstructure et maillage pour l'homogénéisation par éléments finis (DIGIMAT®)

6. Résistance aux sollicitations physico-chimiques: attaque acide

En plus du comportement mécanique et rhéologique, la durabilité est un paramètre crucial pour l'adoption de ces matériaux comme coulis d'injection. Les sols à traiter étant très fréquemment pollués par différents effluents industriels, ils présentent un pH parfois trop faible pour l'utilisation de coulis traditionnels. Dans les matériaux cimentaires, l'exposition à un tel environnement conduit à la dissolution de la portlandite et une décalcification des CSH, qui cause l'affaiblissement de la phase liante. Il faut alors prévoir des précautions supplémentaires, comme le stipule la norme P18-011. Afin d'examiner cet aspect, nous avons exposé des éprouvettes de mortier à un pH de 3,5 avec une régulation continue à l'acide nitrique. Les paramètres évalués sont : le volume d'acide consommé, la perte de masse, les variations volumiques et les éléments lixivifiés dans la solution [MAS 16].

La quantité d'acide ajoutée ($n(\text{OH}^-)$) est représentée en fonction de la racine carrée du temps. Les courbes représentées sur la Figure 8 sont tracées en fonction de la racine carrée du temps. La tendance linéaire indique la prévalence d'un mécanisme de diffusion-réaction commun à tous les matériaux, mais à des amplitudes différentes. Les matériaux calciques (C3 et SLAG45) présentent le plus fort taux de lixiviation, à cause de la décomposition de phases hydratées. Dans les géopolymères, la présence d' OH^- dans les réseaux aluminosilicates est réduite à certaines terminaisons des chaînes. Le reste des ions hydroxydes se trouve dans la solution interstitielle, autour des cations de sodium, et se dissout ainsi graduellement au fur et à mesure de l'avancement du front d'exposition.

Cette lixiviation est accompagnée d'une perte de masse et une dégradation de la microstructure du matériau. Le mortier cimentaire a perdu le plus de masse, notamment à cause de la perte de cohésion avec les grains de sable et à l'augmentation du volume de vides. L'épaisseur dégradée et la détérioration des surfaces exposées était facilement visible à l'œil nu (Figure 9). Les autres matériaux ont suivi un mécanisme de dégradation similaire, quoique l'amplitude soit nettement réduite. La meilleure performance est celle de GMK, avec des variations de masse et de volume négligeables, ainsi qu'une faible lixiviation des éléments constitutifs de la matrice liante (Si et Al), comme l'ont montré des analyses chimiques complémentaires

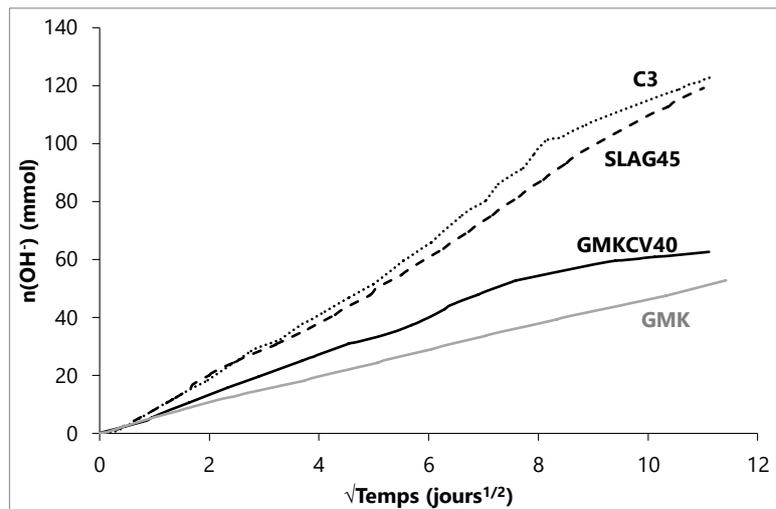


Figure 8. Evolution de la quantité d' OH^- lixiviée en fonction de la racine du temps

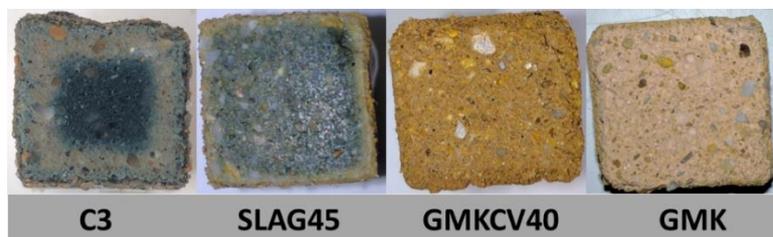


Figure 9. Sections des éprouvettes après 4 mois de lixiviation

7. Conclusion

Cet article présente quelques résultats d'une démarche de formulation et de caractérisation de coulis alcali-activés pour le renforcement de sols. Différents aspects ont été examinés, de l'analyse physico-chimique des produits formés, en passant par le comportement micromécanique et rhéologique, jusqu'au déroulement de la structuration et de la durabilité potentielle. D'abord, l'utilisation de combinaisons binaires métakaolin-cendres volantes a permis de dépasser les limitations rhéologiques posées par l'absence d'adjuvants organiques efficaces. L'effet du taux de calcium sur les produits formés et sur le processus de réaction a été mis en avant à travers la comparaison du laitier et du métakaolin. Une méthodologie d'analyse basée sur la micromécanique a été présentée, permettant à terme de prédire le comportement macroscopique du matériau. Enfin, on a montré que les coulis géopolymères sont particulièrement adaptés à une utilisation dans des milieux acides trop agressifs pour les liants

traditionnels. Ces résultats confirment l'intérêt de l'utilisation de liants à base de ciment pour l'enforcement de sols, notamment pour les sols pollués ou contaminés. Des études futures sont à mener pour évaluer la durabilité vis-à-vis d'autres agents agressifs et confirmer l'adaptation pour une utilisation à grande échelle.

8. Bibliographie

- [AUT 13] AUTEF, A. ; JOUSSEIN, E. ; POULESQUEN, A. ; GASGNIER, G. ; PRONIER, S. ; SOBRADOS, I. ; SANZ, J. ; ROSSIGNOL, S.: Influence of metakaolin purities on potassium geopolymer formulation: The existence of several networks, *Journal of Colloid and Interface Science* Bd. 408 (2013), Nr. 1, P. 43–53
- [BYF 89] BYFORS, K ; KLINGSTEDT, G ; LEHTONEN, V ; PYY, H ; ROMBEN, L: Durability of Concrete Made With Alkali-Activated Slag, *Third International Conference Proceedings. Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*. Trondheim, Norway : American Concrete Institute, 1989, P. 1429–1466
- [CHA 87] LE CHATELIER, H.: *Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques*. Bd. Huitième S, 1887
- [CHE 06] CHEN, W. ; BROUWERS, H. J. H.: The hydration of slag, part 1: Reaction models for alkali-activated slag, *Journal of Materials Science* Bd. 42, Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers (2006), Nr. 2, P. 428–443
- [CHE 06] CHERKI EL IDRISSE A., ROZIERE E., LOUKILI A. ET DARSON S., Design of Geopolymer Grouts: The Effects of Water Content and Mineral Precursor, *European Journal Of Environmental And Civil Engineering*, 8189 (August), Taylor & Francis, 2016, P. 1-22. DOI: 10.1080/19648189.2016.1214183.
- [DAV 91] DAVIDOVITS, J: Geopolymers : Inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis* Bd. 37 (1991), P. 1633–1656
- [DIA 10] DIAZ, E.I. ; ALLOUCHE, E.N. ; EKLUND, S.: Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers, *Fuel* Bd. 89, Elsevier Ltd (2010), Nr. 5, P. 992–996
- [FAV 13] FAVIER, A.: Mécanisme de prise et rhéologie de liants géopolymères modèles, Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2013
- [FER 03] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. ; PUERTAS, F. ; SOBRADOS, I. ; SANZ, J.: Structure of Calcium Silicate Hydrates Formed in Alkaline-Activated Slag: Influence of the Type of Alkaline Activator, *Journal of the American Ceramic Society* Bd. 86 (2003), Nr. 8, P. 1389–1394
- [GLU 67] GLUKHOVSKII, V. D. ; PASHKOV, I. A. ; STARCHEVSKAYA, E A ; ROSTOVSKAYA, G. S.: Soil-silicate concrete for hydraulic and irrigation structures, *Hydrotechnical Construction* Bd. 1 (1967), Nr. 2, P. 120–124
- [GRO 05] GRONDIN, F. : Modélisation multi échelles du comportement thermo- hydro - mécanique des matériaux hétérogènes. Applications aux matériaux cimentaires sous sollicitations sévères, Thèse de doctorat, Université Pierre & Marie Curie, 2005
- [KON 08] KONG, D. L. Y. ; SANJAYAN, J. G. ; SAGOE-CRENTSIL, K. : Factors affecting the performance of metakaolin geopolymers exposed to elevated temperatures, *Journal of Materials Science* Bd. 43 (2008), Nr. 3, P. 824–831
- [MOU 04] MOUNANGA, P. ; KHELIDJ, A. ; LOUKILI, A. ; BAROGHEL-BOUNY, V.: Predicting Ca(OH)₂ content and chemical shrinkage of hydrating cement pastes using analytical approach, *Cement and Concrete Research* Bd. 34 (2004), Nr. 2, P. 255–265
- [MAS 16] MASSAAD, G. ; ROZIERE, E. ; LOUKILI, A. ; IZORET, L.: Advanced testing and performance specifications for the cementitious materials under external sulfate attacks, *Construction and Building Materials* Bd. 127 (2016), P. 918–931
- [PUR 40] PURDON, A.O.: The action of alkalis on blast-furnace slag, *Journal of the Society of Chemical Industry* Bd. 59 (1940), Nr. Trans. Commun., P. 191–202
- [REI 04] REINHARDT, H.W. ; GROSSE, C.U.: Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete, *Construction and Building Materials* Bd. 18 (2004), Nr. 3, P. 145–154
- [ROZ 11] ROZIERE, E. ; LOUKILI, A.: Performance-based assessment of concrete resistance to leaching, *Cement and Concrete Composites* Bd. 33 (2011), Nr. 4, P. 451–456
- [SHI 96] SHI, C.: Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars, *Cement and Concrete Research* Bd. 26 (1996), Nr. 12, P. 1789–1799
- [SHI 96] SHI, C. ; DAY, R. L.: Some factors affecting early hydration of alkali-slag cements, *Cement and Concrete Research* Bd. 26 (1996), Nr. 3, P. 439–447
- [WAN 94] WANG, S.-D. ; SCRIVENER, K. L. ; PRATT, P.L.: Factors affecting the strength of alkali-activated slag, *Cement and Concrete Research* Bd. 24, Pergamon (1994), Nr. 6, P. 1033–1043