

–  
Liège, Belgique  
7-8 Novembre 2018

## **TERRE COULÉE STABILISÉE PAR ACTIVATION ALCALINE : ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES PHYSICO-CHIMIQUES ET DE LEURS IMPACTS SUR LES PROPRIÉTÉS D'USAGE**

DE FILIPPIS Ugo<sup>A</sup>, PRUD'HOMME Elodie<sup>A</sup>, MEILLE Sylvain<sup>A</sup>

A MATEIS – INSA Lyon – Université de Lyon

**Résumé** : L'avantage principal de la construction en terre réside dans sa capacité à limiter et réguler les échanges de chaleur et d'humidité avec le milieu extérieur, notamment grâce à sa capacité à échanger de l'eau, sous forme liquide ou gazeuse. Cependant, les argiles forment un liant de faible qualité et instable, il est donc nécessaire de les stabiliser en ajoutant un liant plus résistant, tel que le ciment, matière première à fort impact environnemental. La stabilisation de la terre par activation alcaline est une alternative technique qui permet d'améliorer les propriétés mécaniques du béton de terre, sa tenue à l'eau et sa mise en œuvre tout en maintenant son intérêt écologique. Le matériau source alcali-activé utilisé est un laitier de haut fourneau granulé.

Dans cette étude, les propriétés rhéologiques et mécaniques de deux terres différentes sont étudiées en présence de différentes solutions activantes d'hydroxyde de sodium obtenues à différentes concentrations en NaOH afin de déterminer l'impact du milieu alcalin sur le comportement des terres, et notamment sur leur fraction fine. Les terres stabilisées au laitier sont ensuite caractérisées par leur résistance mécanique en compression ainsi que par analyse au microscope électronique à balayage. Bien que les résistances mécaniques obtenues restent faibles, de l'ordre de 1,5 MPa, une première analogie entre composition minéralogique de la terre et comportement rhéo-mécanique peut être esquissée.

**Mots-clés**: terre coulée, stabilisation, laitier, activation alcaline, résistance mécanique

---

## 1. INTRODUCTION

La construction en terre est une technique vieille de plusieurs millénaires qui retrouve aujourd'hui un intérêt tout particulier dans le cadre de la recherche d'efficacité et d'optimisation écologique et énergétique de l'habitat tertiaire. En effet, ce matériau est connu pour limiter et réguler les échanges de température et d'humidité entre l'environnement extérieur et l'intérieur de l'habitat (Fontaine et al., 2009). Cette caractéristique particulière permettrait de diminuer de manière non négligeable les besoins énergétiques de l'habitat liés au maintien et à la régulation des conditions thermiques et hygrométriques. Cependant, les techniques traditionnelles de construction en terre que sont le pisé, le torchis ou la maçonnerie en adobes ou blocs comprimés ne répondent pas aux exigences de productivité et de durabilité des standards de la construction. Le principal inconvénient de la construction en terre est sa mauvaise tenue aux intempéries qui demande un entretien régulier et coûteux. Afin de pallier à ce défaut, la terre peut être stabilisée, entre autres, par ajout de ciment. Cette technique permet d'une part, d'améliorer la tenue à l'eau du matériau, et d'autre part, de fortement augmenter sa résistance mécanique. La production de ciment étant très énergivore et responsable d'une part importante des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale, l'ajout de ce stabilisant augmente l'impact écologique du matériau et diminue grandement son intérêt, d'autant plus qu'il impact ses caractéristique hygrothermiques.

Cette étude s'intéresse donc à la possibilité de stabiliser la terre à l'aide de laitier de haut fourneau granulé activé. L'intérêt majeur du laitier réside dans le fait que c'est un déchet de l'industrie sidérurgique qui possède un pouvoir hydraulique latent, il peut être activé et s'hydrater en milieu fortement alcalin ( $\text{pH} > 12$ ). Ce matériau, une fois activé, peut développer des propriétés mécaniques très importantes grâce à la formation d'hydrates comme des silicates de calcium hydratés (CSH), des hydrates d'aluminium et de l'hydrotalcite (Prud'homme et al., 2015), (Song et al., 2000) (Myers et al., 2017). Plusieurs types d'activateur peuvent être envisagés : sodique, sulfatique, calcique ou des combinaisons de ces derniers (Houzé, 2013).

L'objectif de cette étude est d'étudier l'activation sodique du laitier, par attaque à l'hydroxyde de sodium, dans le cadre de la construction en terre, et par conséquent en présence de la fraction fine d'un sol. Les argiles présentes dans la terre sont notamment susceptibles d'influencer les conditions du milieu d'activation du laitier par adsorption des cations sodiques activateurs ou des cations calciques libérés lors de la dissolution du laitier. De plus, l'influence du pH du milieu d'activation, fortement basique, sur le comportement rhéologique des fines argileuses sera étudiée. L'étude portera donc sur deux fractions argileuses différentes, d'une part des fines argilo-calcaires (FAC), et d'autre part la fraction granulométrique inférieure à  $400 \mu\text{m}$  d'un sol, la terre de Levens. Suite à leur caractérisation (granulométrie, limite de liquidité), différentes formulations de pâtes pures stabilisées au laitier seront étudiées en faisant varier la concentration en hydroxyde de sodium des solutions activantes. Les différents échantillons synthétisés seront comparés dans un premier temps à jeune âge en termes de rhéologie de pâte à l'état frais (enfouissement au cône), puis dans un second temps à l'état durci en termes de performances mécaniques (résistance en compression) et de microstructure (MEB).

## 2. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

### 2.1. Matières premières utilisées

Les matériaux sont formés à partir de trois constituants : la solution alcaline d'hydroxyde de sodium, le laitier de haut fourneau et la terre crue. La solution alcaline est obtenue par dissolution dans de l'eau distillée de pastilles d'hydroxyde de sodium NaOH pure à 99% (Fisher Scientific). Les solutions sont laissées au repos au minimum 24h afin d'assurer la parfaite dissolution des pastilles et la mise à l'équilibre du pH et de la température.

Le laitier de haut fourneau granulé est produit à Fos-sur-Mer (France) par la société ECOCEM, sa composition est donnée dans le Tableau 1. Ce matériau amorphe est principalement constitué d'oxyde de calcium, de silice et d'alumine. Sa surface spécifique Blaine est de  $4450 \text{ cm}^2/\text{g}$ , son diamètre médian ( $d_{50}$ ) est de  $12 \mu\text{m}$  et le passant à  $32 \mu\text{m}$  est supérieur à 95%.

Eléments	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Impuretés
Proportions (%)	42	35,3	10,9	7,5	0,4	2,3	0,5	0,2	0,4	0,3	0,2

Tableau 1. Composition du laitier de haut fourneau

La basicité du matériau, caractérisée par le rapport CaO/SiO<sub>2</sub>, est donc de 1,19 et son module chimique, par le rapport (CaO + MgO)/SiO<sub>2</sub>, est de 1,40. Enfin, l'analyse DRX indique que la structure du laitier est en très grande majorité amorphe, ce qui permet de caractériser ce laitier comme étant très réactif (Alexandre et al., 1988) (Tänzer et al., 2015).

Les deux terres utilisées sont :

- Fines argilo-calcaires, Carrières du Boulonnais – Pas-de-Calais (62), France
- Terre de Levens, Filliatte – Alpes-Maritimes (06), France

La terre de Levens est tamisée à 400 µm afin de n'utiliser que la fraction granulométrique correspondante. Les FAC ont un diamètre maximal inférieur à 100 µm. Leur caractérisation est présentée en partie 3.1.

### 2.1. Protocole de synthèse

La pâte pure a été obtenue par malaxage manuel des différents constituants selon le protocole suivant : la fraction fine de la terre est introduite avec le laitier de haut fourneau, l'ensemble est mélangé pendant 1 min. Puis la solution alcaline est ajoutée tout en maintenant le malaxage. Le mélange final est encore malaxé pendant 1 minute. Les pâtes sont ensuite immédiatement coulées dans des moules plastiques, lubrifiées par une huile à base de silicone, afin d'obtenir des mini-éprouvettes de diamètre 20 mm et hauteur 40 mm. De légères vibrations sont appliquées afin d'éliminer les éventuelles bulles d'air.

Les éprouvettes sont conservées à température ambiante (T<sub>a</sub>=22°C), et sont démoulées après 24h puis conservées pendant 7 jours à l'air libre. Afin d'obtenir des mélanges à consistances équivalentes, les quantités d'eau sont déterminées par un test d'enfoncement du cône de limite d'Atterberg. Deux enfoncements sont retenus : 35 et 40 mm, car ils correspondent à une maniabilité optimale du matériau. Les compositions des éprouvettes sont reportées dans le Tableau 2 ci-dessous.

Groupe	Nomenclature	mTerre (g)	mLaitier (g)	Concentration NaOH (M)	mEau (g)	Enfoncement (mm)
FAC	FL0M <sub>e35</sub>	100	10	0	35,0	35,00
	FL0,5M <sub>e35</sub>	100	10	0,5	47,5	35,00
	FL1M <sub>e35</sub>	100	10	1	50,1	35,00
	FL1M <sub>e40</sub>	100	10	1	54,4	40,00
	FL2M <sub>e35</sub>	100	10	2	50,4	35,00
	FL2M <sub>e40</sub>	100	10	2	54,7	40,00
Levens	LL0M <sub>e40</sub>	130	13	0	67,6	40,00
	LL0,5M <sub>e40</sub>	130	13	0,5	90,4	40,00
	LL1M <sub>e40</sub>	130	13	1	70,1	40,00
	LL2M <sub>e40</sub>	130	13	2	73,5	40,00

Tableau 2. Composition des éprouvettes et mesures d'enfoncement au cône

### 2.3. Techniques de caractérisation

Les spectres de diffraction des rayons X sont obtenus à l'aide d'un diffractomètre Brucker-AXS D8 Advance utilisant la radiation  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda\text{K}\alpha = 0.154186 \text{ nm}$ ). Les diagrammes sont obtenus avec un pas de  $0.02^\circ$  ( $2\theta$ ) et un temps d'acquisition de 1s entre  $5^\circ$  et  $70^\circ$  ( $2\theta$ ). Les phases cristallines sont identifiées par comparaison avec la base de données PDF standard (Powder Diffraction Files) d'ICDD.

Les spectres infrarouges ont été obtenus sur poudre ou échantillons broyés à l'aide d'un spectromètre ThermoFisher Scientific IS50 utilisé en mode Réflectance Totale Atténuée (ATR). Les acquisitions ont été réalisées de  $4000 \text{ cm}^{-1}$  à  $400 \text{ cm}^{-1}$  moyennées sur 32 scans et avec une résolution de 4. L'analyse des données est réalisée en utilisant le logiciel Omnic Series.

Les ATD-ATG des différents produits ont été réalisées sur un appareil Setsys Evolution de SETARAM. Les analyses ont été effectuées entre  $20^\circ\text{C}$  et  $1050^\circ\text{C}$  avec une vitesse de montée en température de  $10^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  sous air sec ( $100\text{mL}/\text{min}$ ) et en creuset en alumine fermé.

Le suivi de prise des pâtes pures a été réalisé à l'aide du test de l'aiguille Vicat selon la norme NF EN 196-3. L'aiguille a une hauteur de 50 mm, un diamètre de 1,13 mm et la masse totale des pièces mobiles est égale à 1 000 g.

Les mesures de pH ont été réalisées à l'aide d'un instrument METTLER TOLEDO SevenEcellence Multiparameter avec une sonde METTLER TOLEDO InLab® Pure Pro – ISM.

Les densités sèches des terres sont mesurées à l'aide d'un pycnomètre à eau de 0.50 mL, selon le protocole de la norme française NF P 94-054.

Les essais de compression mécanique ont été réalisés sur cylindre sur une machine Zwick équipée d'un capteur de force de 100 kN de classe 0,5. L'essai est contrôlé par le déplacement de la traverse supérieure avec une course imposée est de  $0,3 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Les essais sont réalisés à 7 jours.

La granulométrie des terres est évaluée par tamisage à sec grâce au jeu de tamis suivant : 2000, 1600, 1250, 1000, 315, 100, 63, 40  $\mu\text{m}$ .

La limite de liquidité d'Atterberg (WI) a été évaluée avec la méthode de pénétration au cône et selon la norme NF P94-052-1. La terre est tamisée à 400  $\mu\text{m}$ , le cône est à surface lisse et a un angle au sommet de  $30^\circ$ . La masse de la tige et du cône est de 80g. La limite de plasticité (Wp) a été évaluée avec la méthode du rouleau et conformément à la norme NF P94-051. Les teneurs en eau ont été mesurées par séchage à l'étuve à  $105^\circ\text{C}$  pendant 2h.

### **3. RÉSULTATS ET DISCUSSION**

#### **3.1. Caractérisation des terres utilisées**

##### **3.1.1. Granulométrie**

La figure 1 présente les courbes granulométriques des terres étudiées. Les FAC, ont une granulométrie bien inférieure à la terre de Levens puisque, d'une part elles sont tamisées à 100  $\mu\text{m}$ , et d'autre part 20% des particules ont un diamètre inférieur à 40  $\mu\text{m}$ , contre 4 % pour Levens. Ces différences de granulométrie auront un impact important sur les squelettes granulaires des différentes formulations et le comportement rhéologique de chaque terre.

##### **3.1.2. Composition minéralogique**

Les analyses thermiques réalisées sur les deux types de terre (Figure 2 (A)) permettent d'identifier la présence de kaolinite (Ramachandran et al., 2002), de muscovite (Guggenheim et al., 1987), de dolomite (Criado et al., 1991) et de calcite (Ramachandran et al., 2002) grâce à la présence de phénomènes endothermiques à  $530^\circ\text{C}$ ,  $575^\circ\text{C}$ ,  $760^\circ\text{C}$  et  $830^\circ\text{C}$ , et entre  $870^\circ\text{C}$  et  $910^\circ\text{C}$  respectivement. Le phénomène à  $110^\circ\text{C}$  peut être attribué à la présence d'eau libre dans les terres, les analyses étant faites sans séchage préalable. Ces observations sont corroborées par les analyses

par diffraction des rayons X qui révèlent également la présence de montmorillonite, d'albite et de quartz.

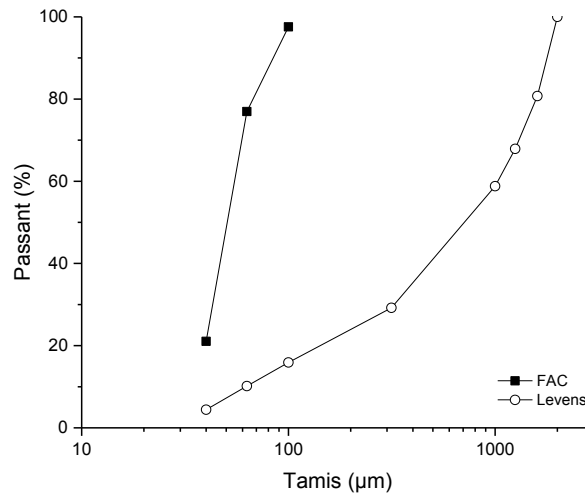


Figure 1. Courbes granulométriques des deux terres étudiées.

Le pic endothermique observé en ATD à 190°C peut ainsi être attribué au départ d'eau de l'espace interfoliaire de la montmorillonite. Les pertes de masse obtenues en analyses thermiques combinée à la semi-quantification obtenue par diffraction des rayons X permet de déterminer la composition des deux terres (Figure 2 (B)).

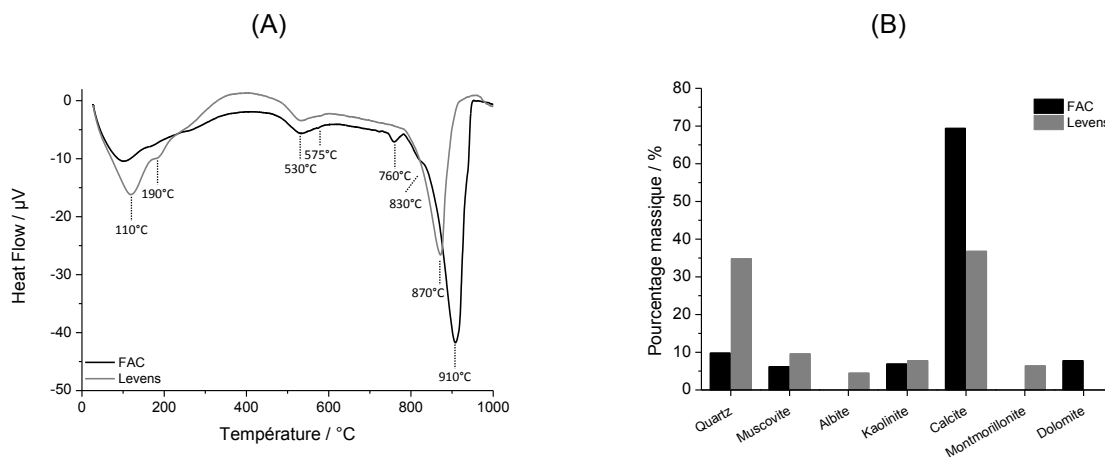


Figure 2. (A) Analyses thermodifférentielles et (B) composition minéralogique des deux terres.

Ainsi, les FAC sont principalement composées de carbonates, de la Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) en grande majorité, et de la dolomite. Il y a également de faibles proportions de phyllosilicates, de kaolinite et de muscovite, ainsi que du quartz. La terre de Levens est majoritairement, et dans des proportions similaires, composée de quartz et de calcite. Ces composés cristallins sont très peu sensibles à l'eau et à l'alcalinité du milieu, dans la mesure où leur solubilité varie peu dans la plage de pH étudiée [12,7 ; 14] (Iler, 1979). L'albite, qui est un tectosilicate, ainsi que la kaolinite ne présente pas non plus d'interactions particulières avec l'eau ou avec une solution alcaline (Fontaine et al., 2009).

La différence majeure dans la composition de la terre naturelle et des FAC est l'absence d'albite et de montmorillonite dans ces dernières. La montmorillonite étant une argile gonflante (Meunier, 2013) de la famille des smectites, sa présence aura une influence sur le comportement rhéologique des terres en présence d'eau (Fontaine et al., 2009). La terre naturelle est globalement plus riche en composés argileux alors que les FAC présentent une proportion de composés calcique nettement plus

importante. Enfin, la terre de Levens est sensiblement plus sableuse que les FAC, comme illustré par sa plus forte teneur en quartz.

### 3.1.3. Caractérisation géotechnique

Afin d'appréhender le comportement rhéo-mécanique des terres, celles-ci sont également caractérisées, en mesurant leur teneur en argiles (valeur de bleu du sol – VBS), leur limite de liquidité (WI) et indice de plasticité (Ip) ainsi que leur pH naturel. Ces informations sont regroupées dans le Tableau 2 ci-dessous.

	<b>FAC</b>	<b>Levens</b>
<b>Densité sèche (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,54	2,47
<b>VBS</b>	1,18	2,09
<b>Surface spécifique (cm<sup>2</sup>/g)</b>	2475,59	4364,40
<b>WI (%)</b>	31,9	42,0
<b>Ip (%)</b>	10	18
<b>Classification LPC</b>	Limon peu plastique	Sable argileux
<b>Teneur en argile</b>	Faiblement argileux	Moyennement argileux
<b>pH naturel</b>	8,6	8,4

Tableau 2. Propriétés géochimiques des terres.

La teneur en argile des FAC est nettement plus faible (1,18) que celle de la terre de Levens (2,09), résultat concordant avec les analyses DRX précédentes. La teneur en argiles étant réduite, la limite de liquidité et l'indice de plasticité des FAC sont également plus faibles. C'est-à-dire qu'il sera, à priori, nécessaire d'ajouter plus d'eau à un mortier formulé avec la terre de Levens qu'avec des FAC, pour une consistance similaire. Ces indices permettent également de classer les terres selon la classification LPC (Laboratoire des Ponts et Chaussées). Les classifications sont concordantes avec les autres analyses géotechniques et avec les analyses DRX puisqu'elles confirment la faible présence d'argiles au sein des FAC. Le pH naturel des deux terres est semblable et relativement basique puisqu'aux environs de 8,5.

### 3.2. Comportement des terres en présence d'une solution alcaline

Le comportement rhéo-mécanique des terres est désormais étudié en présence de laitier et faisant varier la concentration en hydroxyde de sodium (NaOH) des solutions alcalines utilisées pour l'activation de ce dernier. La rhéologie des terres peut être, en partie, caractérisée par les limites d'Atterberg de plasticité et de liquidité du sol. La limite de la liquidité d'un sol correspond à la teneur en eau pour laquelle un enfoncement au cône de 20 mm est mesuré.

En présence d'une solution alcaline, le comportement du sol change puisque les limites de liquidité évoluent lorsque l'eau est remplacée par une solution de NaOH. La figure 3 représente l'évolution de l'enfoncement et du pH de la solution en fonction de la concentration en NaOH, à teneur en eau effective égale.

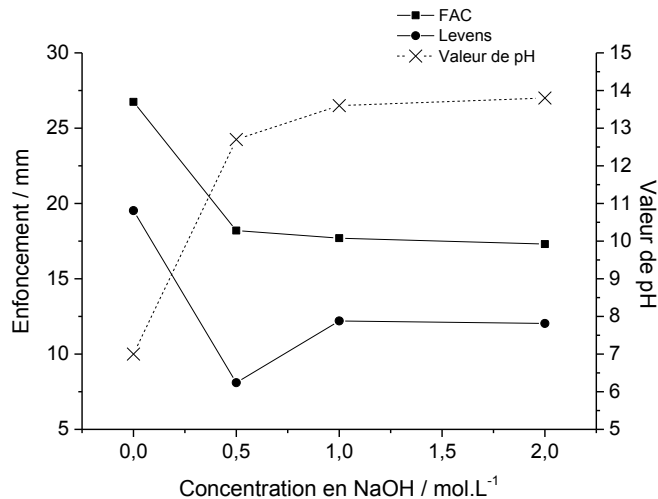


Figure 3. Évolution de l'enfoncement et de la valeur de pH en fonction de la concentration en NaOH de la solution.

L'enfoncement du cône est réduit lorsque la concentration en hydroxyde de sodium croît. Les FAC sont moins liquides en milieu alcalin, la présence de NaOH a donc tendance à faire coaguler les fines argilo-calcaires. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les éléments argileux, et en particulier la muscovite, possèdent une charge de surface négative (Meunier, 2013). Les ions  $\text{Na}^+$  en solution vont s'adsorber en surface des feuillets et permettre leur coagulation par attraction électrostatique conduisant à la formation d'agrégats plus ou moins denses qui augmentent la viscosité du mélange. De plus, l'augmentation de la valeur de pH entraîne la déprotonation des groupements hydroxyles, à la fois en bordures des plaquettes des phyllosilicates ainsi que sur la surface libre octaédrique des kaolinites (Fontaine et al., 2009). Cette déprotonation est synonyme d'apparition de charges négatives supplémentaires interagissant avec les ions sodium. Une dissolution des particules fines de quartz amenant à la formation de particules siliceuses négativement chargées sous forme  $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$  ou  $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^{2-}$  est également possible (Jolivet, 1994). L'ajout de NaOH, au-delà de 0.5 M n'a que très peu d'impact sur la rhéologie des FAC, ce qui permet de supposer que cette concentration correspond à un état de saturation de l'adsorption des ions  $\text{Na}^+$ .

La terre de Levens ne présente pas le même comportement puisque l'enfoncement pour une concentration en NaOH de 1M est légèrement plus important qu'à 0,5M. Entre les deux solutions l'accroissement de la valeur de pH est faible en regard de l'augmentation forte de la concentration en ions sodium, cette évolution de l'enfoncement peut donc être attribuée à la quantité de  $\text{Na}^+$  ajoutée. La terre de Levens se distingue notamment par la présence d'une smectite gonflante, la montmorillonite. Or, ce gonflement est maximal dans une solution concentrée à 1M. Le gonflement des smectites engendrent une diminution de la viscosité et donc une augmentation de l'enfoncement du cône. Entre 0 et 0,5M, comme pour les FAC, les ions sodium sont adsorbés en surface des plaquettes argileuse et sur les sites hydroxyliques déprotonnés, entraînant une floculation des particules argileuses par agrégation électrostatique. Les quantités de muscovite et kaolinite étant semblables entre les deux terres, ces dernières sont également considérées saturées en sodium à partir de 0,5M. Au-delà de cette concentration, les ions sodium sont principalement adsorbés à la surface des feuillets de montmorillonite, cette surconcentration locale entraîne le gonflement des smectites par phénomène d'osmose (Fontaine et al., 2009). L'écartement des feuillets diminue la viscosité du mélange et l'enfoncement augmente. L'évolution se stabilise entre 1M et 2M par saturation de l'adsorption et diminution de la différence de concentration en ions sodium entre les espaces interfoliaires des montmorillonites et la solution, réduisant de fait le phénomène d'osmose.

### 3.3. Propriétés mécaniques des pâtes pures

La résistance mécanique des pâtes pures est évaluée pour chaque concentration en hydroxyde de sodium après 7 jours de séchage (Figure 4 (a)).

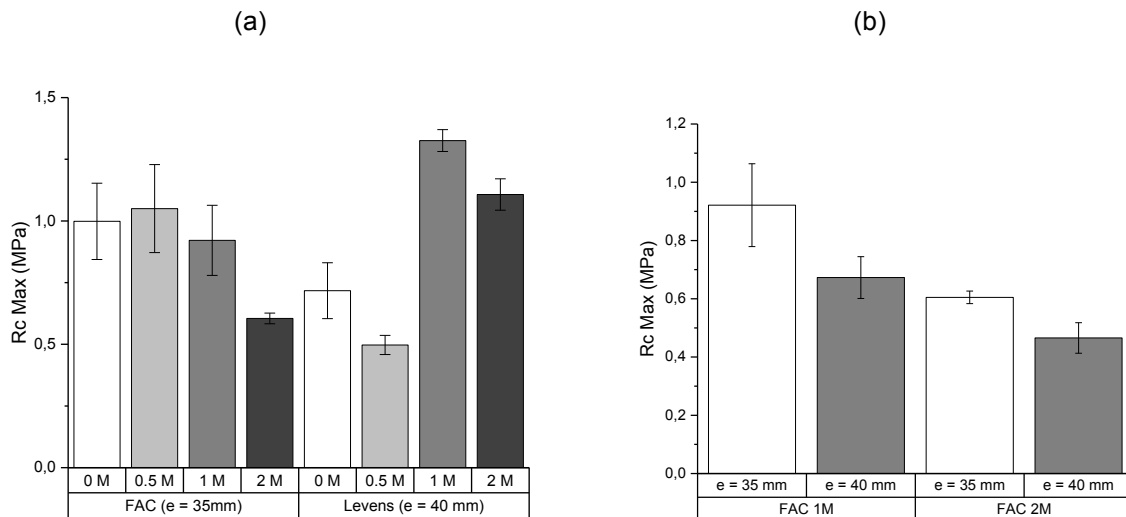


Figure 4. Résistances à la compression maximales à 7 jours en fonction (a) de la teneur en NaOH (en mol/L) à enfoncement (en mm) équivalent et (b) de l'enfoncement (en mm) de la pâte à l'état frais pour la terre FAC à deux concentrations en NaOH.

L'évolution du comportement mécanique des deux terres en fonction de la teneur en hydroxyde de sodium est très différente. Dans le cas des FAC, la solution alcaline n'apporte qu'un gain de résistance très limité à 0.5M. Au-delà de cette concentration les résistances chutent. L'augmentation de la quantité de NaOH s'accompagne d'une formation plus importante de carbonates de sodium, visibles en surface des échantillons par la formation d'une pellicule blanche. La présence de ces composés sodiques dégrade, d'une part, les performances mécaniques du matériau et, d'autre part, ne permettent pas aux ions sodium de participer à la dissolution du laitier, ce qui induit une mauvaise hydratation de ce dernier, d'où des performances mécaniques plus faibles. Ce phénomène est particulièrement marqué pour les FAC qui sont riches en carbonates susceptibles de se dissoudre en faible quantité en présence de la solution alcaline.

Dans le cas de la terre de Levens, les performances mécaniques sont nettement améliorées à partir de 1M. Une concentration inférieure à 1M ne semble pas suffisante pour activer correctement le laitier ce qui peut expliquer la faiblesse des résistances mécaniques. Une concentration en hydroxyde de sodium trop importante paraît par contre néfaste, et ce pour les mêmes raisons que pour les FAC. Il est à noter que, contrairement aux FAC, les propriétés pour l'échantillon préparé à 2M restent supérieures à celles de l'échantillon témoin.

Il est également important de souligner que les teneurs en eau des échantillons peuvent être très différentes puisque chaque éprouvette a été coulée à consistance égale pour chaque série présentée dans la figure 4 (a). Elles correspondent à un enfoncement de 35 mm pour les FAC et de 40 mm pour Levens. Ainsi, les teneurs en eau pour Levens sont presque deux fois plus élevées pour les échantillons 0M et 0.5M et 40% plus élevées pour les échantillons 1M et 2M que pour les échantillons équivalents avec FAC. Au sein de chaque série, les teneurs en eau fluctuent également d'un échantillon à l'autre en fonction de l'évolution des limites de liquidité avec la concentration de la solution. La Figure 4 (b) présente l'impact de la différence d'enfoncement, donc de la différence de teneur en eau, pour les échantillons 1M et 2M des FAC sur les résistances mécaniques. Ces dernières sont réduites d'environ 25 % lorsque l'enfoncement passe de 35 à 40 mm, ce qui correspond à une augmentation de la teneur en eau de 8.5%. L'eau supplémentaire augmente la porosité du matériau ainsi que les fissures liées au séchage et dégradent donc ses propriétés mécaniques. Ce phénomène explique la faible résistance mécanique de l'échantillon LL0,5M<sub>e40</sub>, puisque ce dernier présente une teneur en eau très importante (90%), par rapport à l'échantillon LL1M<sub>e40</sub> (70%).



### 3.4. Analyse MEB

Les observations MEB des échantillons à base de FAC sont présentées en Figure 5. Pour une solution d'eau pure (Figure 5 (A)), les grains de laitier sont bien visibles et ne sont pas attaqués, l'hydratation n'a pas lieu ou bien dans une faible proportion. A partir de 0.5M, le laitier semble être attaqué, sa surface est moins lisse et nettement définie que dans l'eau pure. Pour une solution à 1M, les grains de laitier ne sont plus clairement identifiables et de fines particules filandreuses se forment en créant un réseau de jonction entre les grains de matière des FAC. Ces particules ont une topologie semblable à celle des silicates de calcium hydratés (CSH) (Paula et al., 2014; Kumar et al., 2017; Liu et al., 2017), l'un des principaux produits de l'hydratation du laitier (Pacheco-Torgal et al., 2015).

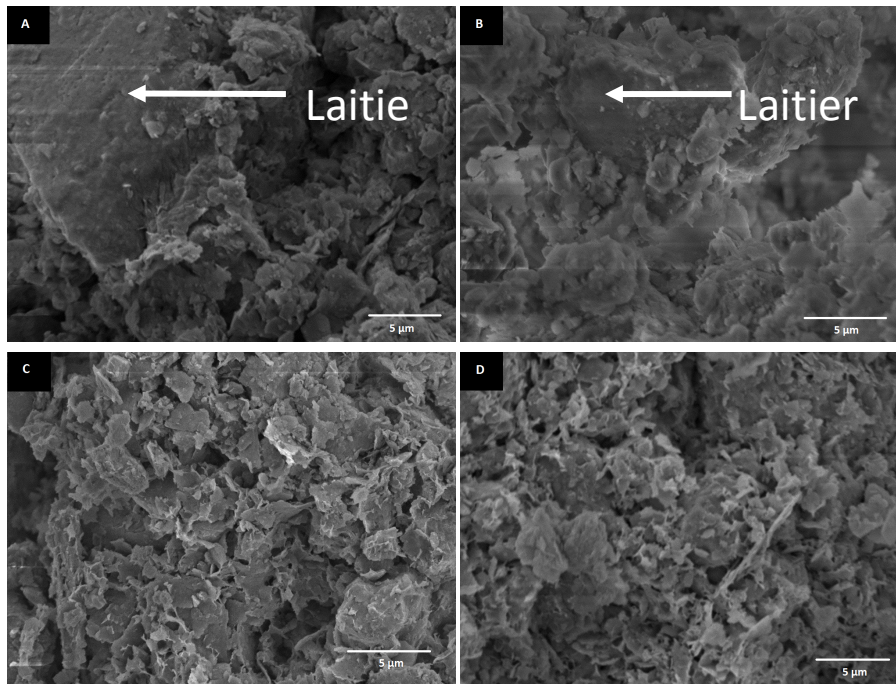


Figure 5. Observations MEB des échantillons de FAC (A) 0M, (B) 0,5M, (C) 1M, (D) 2M

Les mêmes constatations peuvent être faites avec la terre de Levens (Figure 6), pour laquelle les hydrates se forment également à partir de 1M, d'où une résistance mécanique accrue par rapport à l'échantillon à 0.5M. Les particules de terre semblent également plus agglomérées pour la solution à 0.5M, dont la viscosité est plus élevée.

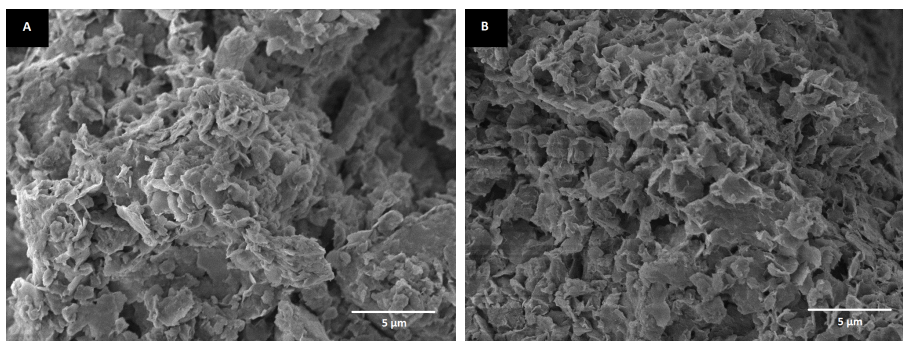


Figure 6. Observations MEB des échantillons de Levens (A) 0.5M, (B) 1M

## 5. CONCLUSION

L'utilisation d'une solution alcaline d'hydroxyde de sodium, nécessaire pour déclencher l'hydratation du laitier dans le cadre du processus de stabilisation de la terre crue, a un impact non négligeable sur les propriétés rhéo-mécanique de cette dernière. L'étude comparative a traité ici le cas de deux terres très différentes. Les FAC, notamment riches en calcium et pauvres en élément argileux, ont tendance à s'agréger sous l'effet de l'introduction d'une solution d'hydroxyde de sodium. Ce phénomène se stabilise à partir d'une solution concentrée à 1M. De ce fait, le besoin en eau nécessaire à la mise en œuvre du matériau est accru, ce qui a un effet néfaste sur les résistances mécaniques. Aussi, malgré une formation d'hydrates qui croît avec la concentration de la solution, au-delà de 0,5M les résistances chutent, à teneur en eau équivalente, du fait notamment de la formation de carbonates de sodium. En ce qui concerne la terre de Levens, riche en quartz et comprenant des argiles gonflantes de type smectites, le comportement rhéologique ne suit pas l'évolution du pH de la solution. La présence de smectites, telle que la montmorillonite, peut donc permettre de moduler les teneurs en eau nécessaires pour atteindre une rhéologie optimale. Les résistances mécaniques optimales ont été obtenues pour une solution à 1M, celles-ci diminuent pour des concentrations plus élevées, du fait également de la formation de carbonates de sodium. Cette étude est une première étape d'une démarche plus globale qui sera notamment complétée par une étude plus approfondie des conditions et cinétiques d'hydratation du laitier en présence de terre.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier les sociétés Filliatte et Ecocem pour les fournitures en matières premières.

## RÉFÉRENCES

- Alexandre J. & Sebileau J.-L. (1988). *Le Laitier de Haut Fourneau*. Paris, France: C.T.P.L.
- Criado J.M. & Ortega A. (1991). Kinetic study of thermal decomposition of dolomite by Controlled transformation Rate Thermal Analysis (CRTA) and TG. *Journal of Thermal Analysis*, 37, 2369–2375.
- Fontaine L. & Anger R. (2009). *Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture*. Paris, France: Editions Belin / Cité des sciences et de l'industrie.
- Guggenheim S., Chang Y.H. & Koster van Groos A.F. (1987). Muscovite dehydroxylation: High-temperature studies. *American Mineralogist*, 72, 537–550.
- Houzé C. (2013). *Etude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silicomanganèse*. Université Paris-Est.
- Iler R.K. (1979). *The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Jolivet J.-P. (1994). *De la solution à l'oxyde. Condensation des cations en solution aqueuse. Chimie de surface des oxydes*. Paris, France: InterEditions / CNRS Editions.
- Kumar A., Walder B.J., Kunhi Mohamed A., Hofstetter A., Srinivasan B., Rossini A.J., Scrivener K., Emsley L. & Bowen P. (2017). The Atomic-Level Structure of Cementitious Calcium Silicate Hydrate. *The Journal of Physical Chemistry C*, 121(32), 17188–17196.
- Liu S., Han W. & Li Q. (2017). Hydration properties of ground granulated blast-furnace slag (GGBS) under different hydration environments. *Medziagotyra*, 23(1), 70–77.
- Myers R.J., Bernal S.A. & Provis J.L. (2017). Phase diagrams for alkali-activated slag binders. *Cement and Concrete Research*, 95, 30–38.
- Paula A., Trigo M., Benedicto J. & Liborio L. (2014). Doping Technique in the Interfacial Transition Zone Between Paste and Lateritic Aggregate for the Production of Structural Concretes.
- Song S., Sohn D., Jennings H.M. & Mason T.O. (2000). Hydration of alkali-activated ground granulated blast furnace slag.
- Tänzer R., Buchwald A. & Stephan D. (2015). Effect of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag. *Materials and Structures*, 48, 629–641.