

# Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie

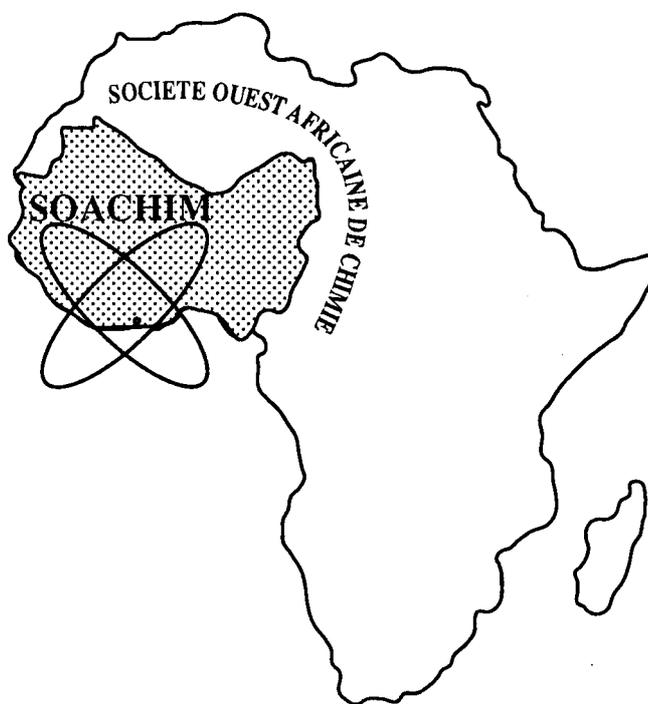
*J. Soc. Ouest-Afr. Chim.*

*Code Chemical Abstracts : JSOCF2*

*Cote INIST (CNRS France) : <27680>*

ISSN 0796-6687

**16<sup>ème</sup> Année, Décembre 2011, N° 032**



Site Web: <http://www.soachim.org>

## **Procédé de basse température pour la fabrication des briques à partir de coproduits de phosphate d'alumine**

**Mouhamadou Bassir Diop<sup>1\*</sup>, Michael W. Grutzeck<sup>2</sup>, Jauberthie Raoul<sup>3</sup> et Ahmed Bouguerra<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Materials Research Institute (MRI), the Pennsylvania State University, Materials Research Lab, University Park, PA 16802

<sup>2</sup> Fulbright, Associate Professor, Institut des Sciences de la Terre (IST), BP: 5396, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Faculté des Sciences et Techniques, Dakar, Sénégal.

<sup>3</sup> Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique (LGCGM) - EA 3913, Institut National des Sciences Appliquées EA, 20, avenue des buttes de Coësme CS14315 F-35043 Rennes cedex, France.

<sup>4</sup> rue Gabriel germain, 35000 Rennes cedex, France.

. (Reçu le 12 /03/2010 – Accepté après corrections le 02/12/2011)

**Résumé:** Un procédé nouveau permettant la fabrication de briques pour la construction à partir de matériau mélangé avec une solution caustique concentrée : 4moles/l, 8moles/l et 12moles/l a été mis au point. Les coproduits d'exploitation des phosphates d'alumine du Sénégal dénommés "feral" sont utilisés pour tester le procédé. Le feral mélangé avec suffisamment de solution caustique concentrée (80% de feral avec 20% de solution en masse) permet d'obtenir une pâte épaisse, qui est compactée dans un moule et séchée au soleil ou dans une enceinte thermique pendant une période variable et une température adéquate. Alors, ils se forment, des zéolites phosphatées et des zéolites silicatées, à un pH voisin de 10, qui assurent la cohésion de la matrice cimentaire. Ces zéolites sont insolubles à température ambiante, ce qui confère aux briques une bonne résistance aux intempéries. La solution caustique peut être obtenue à partir d'hydroxyde de sodium seul ou mélangé avec du silicate de sodium, de l'eau douce ou l'eau de mer. Ainsi, ce procédé est attrayant pour ceux qui vivent en milieu rural dans les pays en développement comme le Sénégal où les briques d'argile séchées au soleil constituent la norme pour la construction.

**Mots clés :** Briques séchées au soleil; température, activation alcaline; résistance, zéolites; durabilité

### **Low temperature process to create brick from aluminum phosphate waste**

**Summary:** A new method to fabricate bricks for houses from granular texture material mixed with caustic solution: 4M, 8M and 12M have been discovered. Aluminum phosphate mining waste from Senegal called feral is used to test the process. The feral mixed with just enough concentrated caustic solution (80% of feral with 20% of solution in weight) form a thick paste, compacted in a mold, and allowed to cure as a function of time and temperature. Then, phosphates zeolites and silicates zeolites will form, at a pH close to 10. These zeolites, quite insoluble at room temperature, will ensure the cohesion of the cement matrix, on one hand and will confer to the bricks resistance to water. Caustic can consist of sodium hydroxide alone or mixed with sodium silicate and water/seawater. Thus, the technology should appeal to those living in villages in less industrialized nations such as Senegal where less durable sun dried mud brick is the norm for housing.

**Keywords:** Sun-dried bricks; temperature; alkali activated; strength; zeolites; durability

---

\* **Corresponding author :** E-mail address: mbdiop@ucad.sn et mbassirdiop@yahoo.fr

## 1 Introduction

Les briques d'argile séchées au soleil utilisées habituellement au Sénégal (et dans la plupart des pays d'Afrique) pour la construction ne résistent pas à l'eau. Elles se ramollissent pendant la saison pluvieuse. Généralement, elles durent un à deux ans. Ici, nous faisons le point des résultats obtenus avec la fabrication de briques à partir de coproduits d'élaboration de minerai de phosphate d'alumine (feral) du gisement de Lam-Lam. Lam-Lam est l'un des rares gisements de phosphate d'alumine à travers le monde. Les projections font état de près de 15 millions de tonnes de feral qui seront générés les années à venir, ce qui représente une quantité significative de coproduits. Malheureusement, le Sénégal, pays en développement n'a ni les moyens financiers, ni la technologie pour recycler de telles quantités. Ces coproduits s'accumulent dans des dépressions et autres lacs où ils impactent négativement sur l'environnement. Dans cette étude, nous examinons la possibilité d'utiliser le feral pour fabriquer des briques pour les logements sociaux.

Le but de l'étude est d'explorer la faisabilité d'incorporer de l'hydroxyde de sodium au mélange feral-eau (un procédé utilisé maintenant) comme un moyen d'améliorer la durabilité des briques à base d'argile. L'activation alcaline du métakaolin et des cendres volantes est un procédé bien connu <sup>[1-5]</sup>. Ainsi, il était prévisible que de telles additions pourraient aussi augmenter la résistance et la durabilité des briques à base de feral sans mettre en cause la simplicité du procédé. Il a été mis en évidence que l'addition de solution caustique provoquait la formation des minéraux de type zéolite <sup>[6]</sup> avec une

structure de type alumine phosphore-oxygène :  $\text{AlPO}_4$ ,  $s$  représentant le nombre de charge non balancée. Dans les aluminés phosphatés ( $\text{AlPO}_4$ ), la charge négative du tétraèdre  $\text{AlO}_4^{5-}$  est compensée par une charge positive du tétraèdre  $\text{PO}_4^{3-}$ , et des cations non impliqués dans le réseau ne sont pas nécessaires <sup>[7]</sup>.

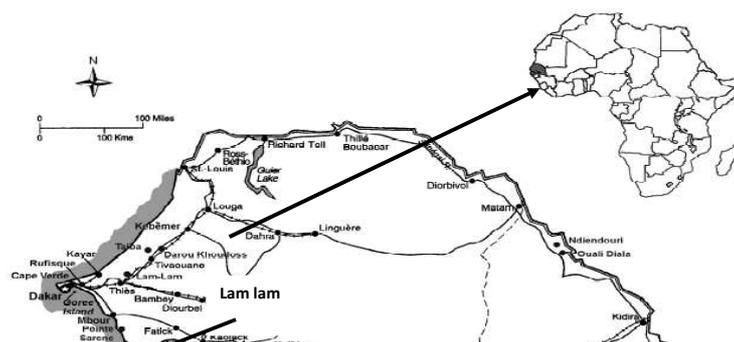
Aussi d'autres variantes incluent les structures de silico-alumino-phosphates (SAPO) dans lesquelles des Si se substituent à quelques P dans le réseau de  $\text{AlPO}_4^{8-}$ , chaque Si ajouté nécessite un cation non engagé dans les réseaux pour compenser la charge dans le réseau.

## 2. Matériaux disponibles

Des recherches antérieures pour développer des briques plus durables ont employés des matériaux au Sénégal: des variétés d'argile, des roches intensément altérées (latérites, tufs), des coproduits d'exploitation des phosphates de calcium (schlamm) et des phosphates d'alumine (feral).

Ces coproduits appelés feral sont générés lors du traitement du minerai de phosphate du gisement de Lam-Lam dans le Sénégal occidental. La **Figure 1** représente la carte du continent africain montrant la position du Sénégal et la localisation du gisement de phosphate de Lam-Lam (A: 16°59'W et 14°57'N; B: 16°57'W et 14°57'N; C: 16°57'W et 14°59'N; D: 16°51'W et 14°51').

Durant le traitement du phosphate, 30 % du minerai sont stockés comme rejets avec un diamètre inférieur à 5mm. Ces coproduits sont appelés feral du fait de leurs teneurs élevées en fer et alumine: 10 et 27% en poids respectivement.



**Figure 1:** Carte du continent africain montrant la position du Sénégal et la localisation du gisement de phosphate de Lam-Lam (A : 16°59' W et 14°57' N; B : 16°57' W et 14°57' N; C : 16°57' W et 14°59' N; D : 16°51' W et 14°51').

### 3. Méthodes

Quoique le travail relaté ici est une continuité de nos précédentes études [8,9]. Le fait nouveau est que le procédé de fabrication de briques marche aussi avec le feral sans aucun prétraitement thermique. Le feral est mélangé avec des solutions de différentes concentrations de NaOH: 4moles/l, 8moles/l et 12moles/l pour former des pâtes épaisses (**Tableau I**). Le  $D^{TM}$  utilisé dans la formule 20 est composé d'acide silicique, sel de sodium; silicate de sodium qui en constituent 44.1% en poids le reste est constitué d'eau. Ensuite pour le  $D^{TM}$ , le ratio  $SiO_2/Na_2O$  en poids est égal à 2. Après un vigoureux malaxage manuel, les briques sont compactées dans un moule cylindrique (2,5 mm de diamètre) à l'aide d'une presse hydraulique manuelle. La pression est appliquée jusqu'à essorage de l'eau de gâchage en dehors de l'éprouvette. Les pressions appliquées sont d'environ de l'ordre de 10 MPa. Les briquettes cylindriques ont été ajustées à 5,0 mm en longueur et séchées à 120°C. Les éprouvettes sont mises dans des capsules hermétiques avec valves en téflon pour des durées variables. Toutes les éprouvettes cylindriques ont été pré-conditionnées à la température ambiante pendant 24 heures. Ce procédé permet la dissolution des matériaux et la formation des minéraux précurseurs des zéolites [6,10].

Pour chaque concentration et échéance, deux éprouvettes en moyenne sont écrasées par compression simple. Une presse automatisée avec un plateau de chargement qui descend à la vitesse de 1,27 mm/mn écrase les briquettes cylindriques. Les courbes effort-déformations verticales sont enregistrées jusqu'à rupture complète de l'éprouvette. Après rupture des éprouvettes, les fragments sont récupérés. Certains sont métallisés et observés au microscope électronique à balayage Hitachi S 3500-N pour examiner la microstructure.

La durabilité est déterminée à l'aide de tests de consistance modifié (PCT) mis au point pour évaluer les phénomènes de lessivage dans le verre. Les tests de solubilité étaient effectués avec le feral réagissant avec une solution caustique [2]. Les éprouvettes ont été pulvérisées à une granulométrie inférieure à 250  $\mu m$  et 1 gramme placé dans 10 ml d'eau distillée et conservée à 90 °C durant 1 à 7 jours dans des capsules en téflon hermétiquement fermées. Ces échantillons ont été choisis parce qu'on suppose (ASTM C1285) que la réaction se déroule de façon plus effective à 120 °C et le lessivage de ces échantillons reflèterait ce qui arriverait à toutes briques qui seraient séchées pour une durée plus longue une fois utilisées pour construire une maison (plusieurs années) notamment dans les zones pluvieuses.

**Tableau I:** Formulations étudiées (% en masse)

Echantillons	Feral (%)	NaOH (%)	Température de cure (°C)	Durée de cure (jours)
1	80	4moles (20)	120	0,25
2				0,5
3				1
4	80	8moles (20)	120	0,25
5				0,5
6				1
7	80	12moles (20)	120	0,25
8				0,5
9				1
10	80	15moles (20)	120	0,5
11	80	Mix moles (20)*	120	0,5

\*(100g d'une solution de 320g/l de NaOH + 250g de "D" silicate de sodium)

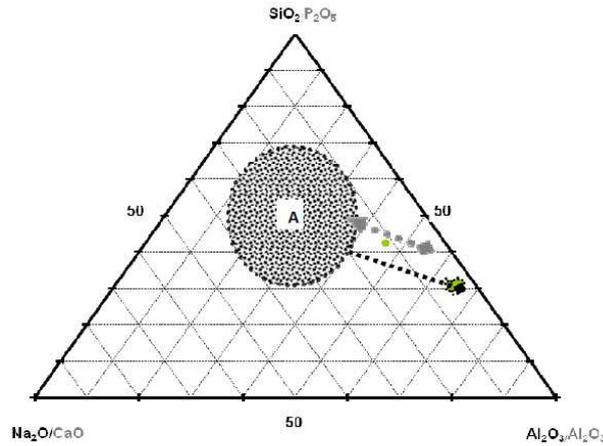
#### 4. Résultats

Le **tableau II** indique la composition chimique du feral en masse. Les oxydes les plus importants dans le feral sont respectivement l'alumine, la silice et l'oxyde de fer. La **figure 2** suggère que l'addition d'environ 30% de NaOH aux stériles des phosphates de Lam-lam déplacerait le mélange dans le domaine des zéolites (zone A). Le **tableau III** résume les propriétés physiques et mécaniques du feral. La courbe est bien étalée et contient une fraction importante de fines (24% < 80 µm) qui vont réagir avec les solutions caustiques. La proportion élevée en fines explique la faiblesse de l'équivalent de sable.

L'indice de plasticité est faible, ce qui traduit un matériau non plastique, peu sensible à l'eau avec un gonflement nul. Des courbes effort-déformations caractéristiques des éprouvettes de feral avec des solutions à 4moles/l, 8moles/l, 12moles/l et 15 moles/l de NaOH et conservées pendant 6h, 12 h et 24h à 120 °C

sont représentées dans la **figure 3**. Les courbes effort-déformations des éprouvettes cylindriques montrent que la rupture est progressive. La rupture de toutes les éprouvettes cylindriques (diamètre 2,5mm, hauteur 5,0 mm) pendant la compression était bonne, toutes les ruptures sont en forme de double pyramide typique.

La **figure 4** représente la résistance à la compression des éprouvettes de feral activées avec des solutions alcalines à 4moles/l, 8moles/l et 12moles/l de NaOH séchées à 120 °C pendant 6, 12 et 24 heures. Les éprouvettes fabriquées à partir de feral et de solutions de NaOH atteignent des résistances à la compression qui varient entre 6 et plus de 13 MPa. Ces résistances sont du même ordre que celles des éprouvettes fabriquées à partir de métakaolin <sup>[5]</sup>. Selon la norme sénégalaise, les éprouvettes testées à sec doivent présenter un minimum de 6 MPa et après deux heures d'immersion complète dans l'eau une résistance résiduelle de 3 MPa.



**Figure 2:** Position des phosphates de Lam-Lam dans le triangle  $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{P}_2\text{O}_5\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$  et localisation du domaine des zéolites (zone A).

**Tableau II:** Composition chimique du feral (% en poids)

SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	BaO	SrO	PF
12,5	6,76	27	9,53	0,08	0,13	1,27	2,01	0,03	24,9	0,09	0,42	15,28

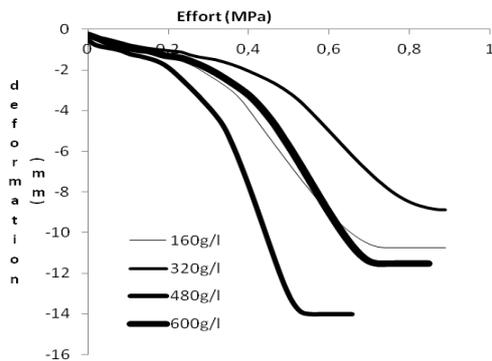
**Tableau III:** Propriétés physiques et géotechniques du feral.

<i>Granulométrie</i>	
% > 2mm	10
% < 80µm	24 (26 après CBR)
% < 2µm	13
coefficient d'uniformité (C <sub>u</sub> )	600
coefficient de courbature (C <sub>c</sub> )	32
<i>Equivalent de sable (ES)</i>	
Au piston	34
visuel	30
<i>limites d'Atterberg</i>	
Limite de liquidité (W <sub>l</sub> )	32,6
Limite de plasticité (W <sub>p</sub> )	29,3
Indice de plasticité (I <sub>p</sub> )	3,3 (4,2 après CBR)
Activité (A)	0,25
Optimum Proctor modifié (WOPM)	20,4
Densité sèche maximale : γ <sub>dmax</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	18,3
Indice portant californien à 95% OPM	13
Gonflement (%)	0
Densité saturée : γ <sub>s</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	27,6
Densité apparente : γ <sub>app</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	13

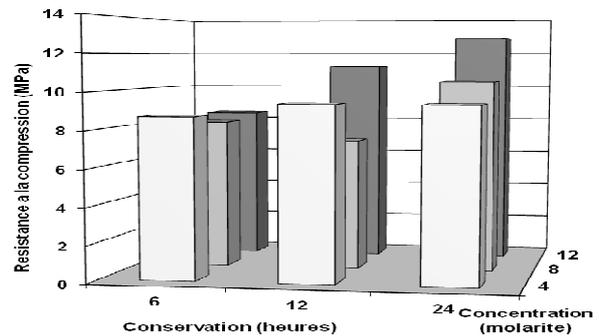
La **figure 5** correspond à la micrographie représentant la microstructure du feral traité avec une solution à 12 moles/l de NaOH (80% de feral et 20% de solution en masse) et séchées à 120°C pendant 12 heures. L'échantillon représenté sur la micrographie a été fabriqué avec une solution de 12moles/l de NaOH et séchées à 120 °C pendant 12 heures. La microstructure est plutôt de type texture en colonnade. Il n'y a pas de changement notable par rapport à la phase initiale mais il semble que c'est plutôt la réaction des fines ( $24\% < 80\mu\text{m}$ ) avec la solution caustique qui crée la phase liante zéolitique.

Sur la base de la diffractométrie des rayons X de la **figure 6**, ces cristaux sont supposés être de la millisite. La **figure 6** représente la diffractométrie aux rayons X des poudres des échantillons curés à 120 °C pendant 12 heures avec des solutions de différentes

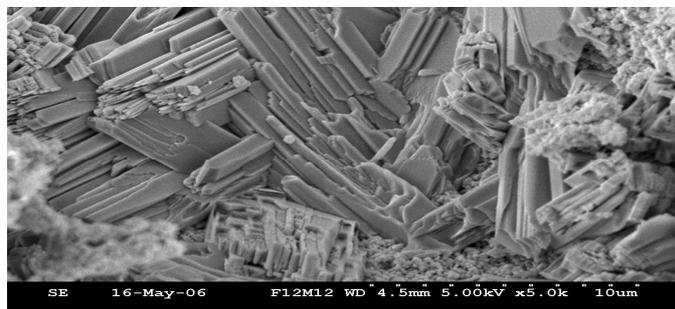
concentrations molaires en NaOH. Il n'y a pas beaucoup de différence entre les courbes. Toutefois, il y a un élargissement général des pics avec l'augmentation de la concentration. La Millisite ((Na, K)  $\text{CaAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_9 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), un zéolite phosphaté est le plus représentatif des minéraux formés; ensuite la Huangite ( $\text{Ca Al}_6(\text{SO}_4)(\text{OH})_{12}$ ). Le quartz ( $\text{SiO}_2$ ) et la Dickite ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$ ) sont des minéraux silicatés. Il est admis que d'autres zéolites soient aussi présentes. Toutefois, ils sont probablement sub-microscopiques et donc incapables de diffracter les rayons X de façon cohérente. Le pH modéré confirme la formation de quelques types de minéraux silicatés. Ces valeurs sont en droite ligne avec celles obtenues quand les zéolites sont plongées dans l'eau. Le sodium n'est pas lessivé de ces minéraux de façon perceptible.



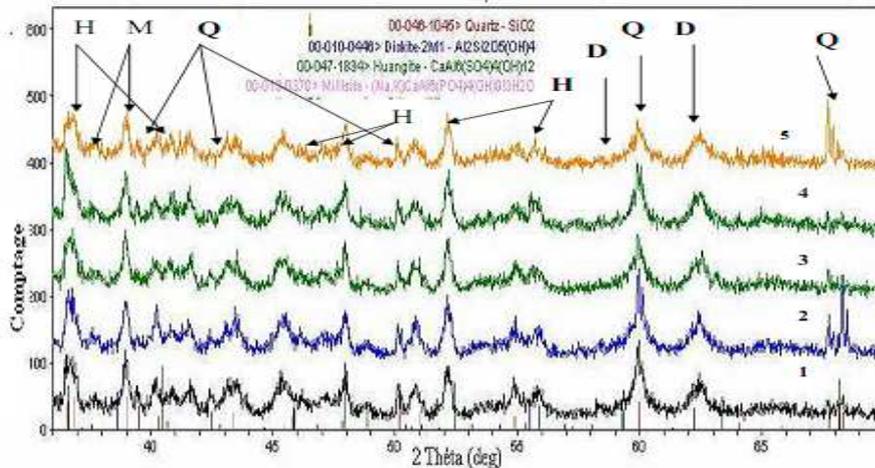
**Figure 3:** Courbes effort-déformation des éprouvettes constituées de 80% de feral (en masse) et 20% de solutions alcalines à 4moles/l, 8moles/l, 12moles/l et 15moles/l de NaOH et conservées à 120 °C



**Figure 4:** Résistance à la compression des éprouvettes séchées à 120 °C



**Figure 5:** Micrographie représentant la microstructure du feral traité avec une solution à 12 moles/l de NaOH (80% de feral et 20% de solution en masse) et séchées à 120°C pendant 12 heures.



**Figure 6:** Comparaison de la diffractométrie aux RX de poudres du feral (courbe n°1) avec celles des mélanges: 4moles/l, (courbe n°2), 8moles/l (courbe n°3), 12 moles/l (courbe n°4) et 15 moles/l (courbe n°5) de NaOH avec le feral après 12heures de cure. D = dickite, H = huangite, M = millisite, Q = quartz

**Tableau IV:** résultats des tests de lessivage des briques curées à 120 °C.

Concentration (molaire)	Mesures à 1 jour		Mesures à 7 jours	
	Conductivité (mS/cm)	pH	Conductivité (mS/cm)	pH
4	0,7	10	1,00	10
8	0,6	10	0,90	10
12	1,5	11	2,10	11

Après 24heures de tests de solubilité à 120 °C, les éprouvettes présentent des conductivités faibles quelque soit la concentration en alcali utilisée. Les valeurs de conductivités mesurées ici correspondent aux ions Na<sup>+</sup> non engagées dans les zéolites et augmentent avec la durée (**Tableau IV**), les conductivités mesurées après un jour pour toutes les trois éprouvettes sont inférieures à celles obtenues après 7 jours de conservation.

Les éprouvettes avec une concentration molaire égale à 160g/l et 320 g/l ont les conductivités les plus basses, alors que les éprouvettes avec une concentration molaire égale 480g/l pourraient contenir un excès de NaOH ou silicate de sodium soluble extrait par lessivage causant une conductivité et un pH plus élevés. Néanmoins, toutes les

valeurs de conductivité sont basses. Par exemple une solution standard de NaOH dans l'eau à 20 °C avec une conductivité de 1 mS/cm contient 200 ppm de NaOH <sup>[11]</sup>. Ceci prouve que les réactions se déroulent pendant la cure et que des minéraux similaires aux zeolites se forment probablement <sup>[12,13]</sup>. La solubilité est basse, la durabilité devrait être meilleure.

### 5. Discussion

Quoique, les minéraux de type zéolitique qui se forment ne soient pas tout à fait stables, ils sont soudés les uns aux autres et forment un solide bien plus résistant au ramollissement et à la déformation durant les cycles annuels sec/humide que les briques d'argile séchées au soleil. Toutes les zéolites sont métastables à un certain degré

[7,8]. Celles qui se forment les premières en présence d'une abondante quantité d'eau deviendront moins hydratées et subiront une transition de phase du fait de la diagenèse. Si, elles sont placées dans un environnement agressif comme celles avec un pH acide, elles seront aussi dissoutes. Cependant dans des environnements alcalins et neutres, les zéolites sont très insolubles. Les zéolites changeront avec le temps si, elles sont enfouies, mais si, elles sont exposées à la chaleur et à l'humidité en surface, ce changement est presque imperceptible. Les types de zéolites qui se forment durant la fabrication des briques en question sont dépendants de la température. Occasionnellement, il arrive qu'une zéolite formée initialement change en une autre qui est plus stable. Ce phénomène associé à la nucléation et à la croissance à partir de solutions supersaturées est semblable à ce qui se passe pendant la diagenèse. Les zéolites précoces, souvent les moins stables se transforment en d'autres espèces plus stables après quelques heures ou quelques jours de cure. Ceci rend nécessaire le fait de tester pour le fabricant de briques utilisant ce procédé l'évolution de la résistance en fonction du temps (spécialement à 120 °C) et de voir si une phase nouvelle pouvait réduire la résistance en causant des fissures dues à un phénomène de retrait/gonflement. Si une telle chose survenait, les briques ne devraient pas être séchées pour une période plus longue que nécessaire pour atteindre le maximum de résistance initiale.

Concernant, les échantillons séchées à 120 °C, 12heures de conservation correspond à la meilleure résistance à la compression quant la concentration molaire en NaOH est égale à 4 moles/l. Ceci peut être expliqué par le fait que la réaction entre la solution et le feral a effectivement eu lieu.

Après 12 heures de cure, les phases hydratées  $AlPO_4$  de type zéolitique se sont effectivement formées, car la composition des matières premières initiales est comprise dans la gamme des compositions typiques des zéolites.

L'évolution des résistances est fonction de la température, de la durée de cure, de la concentration en alcalis, de la granulométrie et de la composition des matières premières. La performance mécanique optimum dépend de la concentration en alcalis utilisée pour fabriquer les éprouvettes. Pour une concentration molaire égale à 4moles/l, la résistance à la compression la plus grande est obtenue après 12heures de cure. Pour une concentration molaire égale à 8moles/l et 12moles/l, la résistance à la compression la plus grande est obtenue après une journée de cure. La résistance présentée par le feral traité à une solution à une concentration molaire égale à 15moles/l et curés pendant 12 heures (8,35 MPa) est inférieure à celle obtenue avec une concentration molaire égale à 12moles/l et curé pendant la même durée (12,84 MPa). En utilisant un mélange entre le silicate de sodium "D" et une solution à une concentration molaire égale à 8, la résistance à la compression augmente sensiblement (16 MPa). Ceci pourrait être dû au fait qu'avec le silicate sodium "D<sup>TM</sup>", nous avons simultanément la formation de zéolites silicatées et zéolites phosphatées.

Pour toutes les éprouvettes testées, celles mélangées avec des solutions de concentrations molaires égales à 12 présentent les résistances les plus élevées. Ceci était prévisible, car au fur et à mesure que la concentration de la solution alcaline augmente plus le feral se dissout dans la solution et d'avantage de précurseurs d'aluminophosphate de sodium seront formés et auront un ratio idéal pour former,

(i.e. Na:Al:Si P = 1:1:1) des zéolites. Cependant, le fait d'augmenter indéfiniment la concentration n'entraînera pas un accroissement continu de la résistance: au contraire, cela causera la formation de phases plus riches en sodium qui ne seront pas aussi insolubles que les zéolites. Cela augmentera la solubilité et aura éventuellement un effet négatif sur la durabilité. Il y a une cinétique réactionnelle (éventuellement de type diffusion) qui limite l'accumulation des ions  $\text{Na}^+$  dans la solution. Il y a peu de Al ou Si présents dans la solution, car ces espèces sont essentiellement insolubles, c'est le sodium qui rend compte de la conductivité. La résistance et le lessivage des échantillons sont comparables à ceux des métakaolins activés par des solutions alcalines qui tournent généralement autour de 3 MPa, avec un pH d'environ 10 et une conductivité de 2-3 mS/cm<sup>[10,13,14]</sup>.

Enfin, la possibilité de fabriquer des briques avec ces caractéristiques est plutôt intéressante du fait de ses implications et impacts sur la nature des briques séchées au soleil dans les pays sous développés.

## 6. Conclusions

Les zéolites sont très insolubles. Souvent, elles se forment au fond des océans. Cependant, les ions  $\text{Na}^+$  dans les zéolites sont mobiles, ce qui traduit la capacité des zéolites à échanger des cations avec d'autres substances en solution. Dans ce cas, l'enregistrement de la conductivité ici mesure deux choses: le degré de réaction que l'échantillon a subi avant d'être testé, et la mobilité des ions  $\text{Na}^+$  dans la matrice zéolitique, à mesure qu'il échange des protons dans l'eau<sup>[11]</sup>. Si la conductivité de

cette solution est basse, cela suggère que le NaOH a été utilisé pour fabriquer des zéolites d'une part, et que l'échantillon a réagi avec le feral et a été piégé dans la matrice tectosilicate, d'autre part. La conductivité reflète le degré de fixation (effectivité du réceptacle de jouer son rôle) et la magnitude d'échange des cations  $\text{Na}^+$  pour  $\text{H}_3\text{O}^+$  qui a lieu. C'est évident de dire que si aucun NaOH n'avait réagi, il se dissoudrait dans la solution lessivée et la conductivité serait dans la gamme des 20-30 mS/cm. Le fait d'être dans la gamme des 1-3 mS/cm, suggère que les zéolites se forment et elles font bien partie de la structure quoique leur présence ne soit pas évidente au MEB et à la diffractométrie des rayons X. Basées sur les valeurs faibles de la conductivité des échantillons à 120 °C, il est prévisible que la durabilité à long terme des briques activées par solution alcaline à la température ambiante soit meilleure que celles des briques conventionnelles séchées au soleil. Il est aussi suggéré qu'une simple presse manuelle soit utilisée pour fabriquer des briques de format standard.

Le développement de procédé rapide pour fabriquer des briques durables, avec des seuils de résistances suffisantes pour construire des logements sociaux peut être accompli en fonction des besoins de la communauté. Il ne génère pas des polluants chimiques tels ceux causés par les briques cuites. Il peut aussi utiliser des coproduits comme les déchets industriels et miniers permettant ainsi aux fabricants de briques de résoudre des problèmes environnementaux.

Toutefois, une étude de formulation devrait être effectuée de façon systématique pour chaque matériau afin de trouver les proportions optimales du mélange par rapport au milieu d'emploi, d'une part, et

ainsi s'assurer du respect des normes de construction en vigueur, d'autre part.

### **Bibliographie**

[1] Davidovits, J., Geopolymers and Geopolymeric Materials, *J. Therm. Anal.*, 1989, vol. 35, pp. 429–441. 15. Rowles, M. and Connor, B.O.

[2] Siemer DD, Grutzeck MW, Scheetz BE. Comparison of materials for making hydroceramic waste forms. *Ceram Trans* 2000; 107:161–7. *Environmental Issues and Waste Management Technologies in the Ceramic and Nuclear Industries V*.

[3] Grutzeck MW, Siemer DD. Zeolites synthesized from Class F fly ash and sodium aluminate slurry. *J Amer Ceram Soc* 1997; 80(9):2449–53.

[4] Palomo A, Grutzeck MW, Blanco MT. Alkali-activated fly ashes A cement for the future. *Cem Concrete Res* 1999; 29(8):1323–9.

[5] Palomo A, Blanco MT, Granizo ML, Puertas F, Vasquez T, Grutzeck MW. Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. *Cem Concr Res* 1999;29(7):997–1004.

[6] Dyer A.; An introduction to zeolite molecular sieves. New York: John Wiley & Sons; 1988.

[7] Sherman J. D. "Synthetic zeolites and other microporous oxide molecular sieves" *Proceeding of the National Academy of Sciences of the USA; PNAS Marsh* 30 1999,

vol 96 7 3471 -3478.

[8] Diop M. B. and Grutzeck M. W. "Sodium silicate activated clay brick" *Bull Eng Geol Environ*, DOI 10.1007/s10064-008-0160-3

[9] Diop M. B. and Grutzeck Michael W. "Low temperature process to create brick", *Construction and Building Materials* 22 (2008) 1114–1121

[10] Breck D. W. *Zeolite molecular sieves*. New York: John Wiley & Sons; 1974.

[11] Bao Y, Grutzeck MW, Jantzen CM. Preparation and properties of hydroceramic waste forms made with simulated Hanford low-activity waste. *J Amer Ceram Soc* 2005;88(12):3287–302

[12] Boa Y, Grutzeck MW. Solidification of sodium bearing waste using hydroceramic and portland cement binders. *Ceram Trans* 2005; 168:243–52. *Environmental Issues and Waste Management Technologies in the Ceramic and Nuclear Industries X*.

[13] Bao Y, Grutzeck MW. General recipe and properties of a four inch hydroceramic waste form. In: *Ceramic Transactions*, vol. 176 (*Environmental Issues and Waste Management Technologies in the Ceramic and Nuclear Industries XI*); Am Ceram Soc, Westerville, OH; 2006. p. 63-74.

[14] Bao Y, Kwan S, Siemer DD, Grutzeck MW. Binders for radioactive waste forms made from pretreated calcined sodium bearing waste (SBW). *J Mater Sci* 2004;39(2):481–8.