

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## PREPARATION OF POZZOLAN WITH A RAW CLAY MATERIAL FROM BURKINA FASO

## PREPARATION D'UNE POZZOLANE A BASE D'UNE MATIERE PREMIERE ARGILEUSE DU BURKINA FASO

François Ganon<sup>1</sup>, Adama Yameogo<sup>2</sup>, Brahim Sorgho<sup>1</sup>,  
Lamine Zerbo<sup>1</sup>, Mohamed Seynou<sup>1\*</sup>,  
Younoussa Millogo<sup>1,3</sup>, Raguilnaba Ouedraogo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Ouagadougou, UFR Sciences Exactes et Appliquées,  
Département de Chimie, 03 B.P. 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso

<sup>2</sup>Université de Ouagadougou, UFR Sciences de la Vie et de la Terre,  
Département de Géologie, 03 B.P. 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso

<sup>3</sup>Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Institut des Sciences de la  
Nature et de la Vie (ISNV), 01 BP 1091 Bobo 01, Burkina Faso

\*Corresponding author: [seynoulmohamed@yahoo.fr](mailto:seynoulmohamed@yahoo.fr)

Received: November, 09, 2015

Accepted: December, 18, 2015

**Abstract:** A raw clay material from Burkina Faso has been characterized for pozzolan elaboration. The analysis showed that SiO<sub>2</sub> (45.91 wt. %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (28.29 wt. %) and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (9.75 wt. %) are the main oxides and kaolinite (71 wt. %) is the principle mineral. The sample has been activated at 680 °C during 2 or 5 hours. The pozzolanic activity has been accessed by coupling several methods. The chemical methods showed the good lime fixing ability by the activated sample. At the first 24 hours, more than 50 wt. % of the lime is fixed and at 28 days around 90 wt. % of lime are fixed. Mineralogical analyses showed the disappearing of portlandite (CH) and the formation of new C-S-H hydrates. The pozzolanic index (81 %) calculated from mechanical strength of mortars made with 25 wt. % substitution of cement by the pozzolan confirm its suitability for portland cement replacement in the field of building materials.

**Keywords:** Burkina Faso, carbon dioxide, cement, kaolinite, pozzolan

## INTRODUCTION

Au Burkina Faso, on assiste à l'exécution d'un vaste programme de construction d'habitats, de bâtiments structurants comme les hôpitaux, l'administration et les universités, la réalisation de travaux de voiries et bien d'autres domaines de construction. La mise en œuvre de ce gros programme infrastructurel va avec une grande consommation des matières de base que sont principalement les agrégats (graviers, gravillons, sable), le ciment, la brique latéritique, les briques en terre cuite, les adobes, etc. L'une des matières de base les plus utilisées est sans doute le ciment. Il est sollicité pratiquement dans tous les domaines de la construction. Obtenu à partir du clinker, qui lui-même obtenu par cuisson de matière argileuse et de la calcite à 1450 °C, le ciment est un composé énergétivore [1]. En outre, sa production est polluante car une tonne de ciment produite équivaut à une tonne de dioxyde de carbone rejetée dans l'atmosphère. Les industries cimentaires sont alors au premier rang de pollueurs atmosphériques mondiaux.

Il est alors nécessaire, voire impérieux de trouver de matériaux innovants, surtout écologiques qui peuvent au mieux substituer en partie le ciment. Les matériaux pouzzolaniques constituent des candidats sérieux. Parmi ces matériaux pouzzolaniques, la métakaolinite a fait l'objet de plusieurs études pour mieux cerner sa réactivité pouzzolanique afin d'optimiser les résultats [2]. L'utilisation des pouzzolanes permet d'améliorer la tenue mécanique des produits par l'augmentation des hydrates C-S-H, la diminution de la porosité due à leurs propriétés filler et la réduction des réactions alkali-silice [3]. Les matériaux pouzzolaniques intègrent à la fois les dimensions environnement, accessibilité et durabilité.

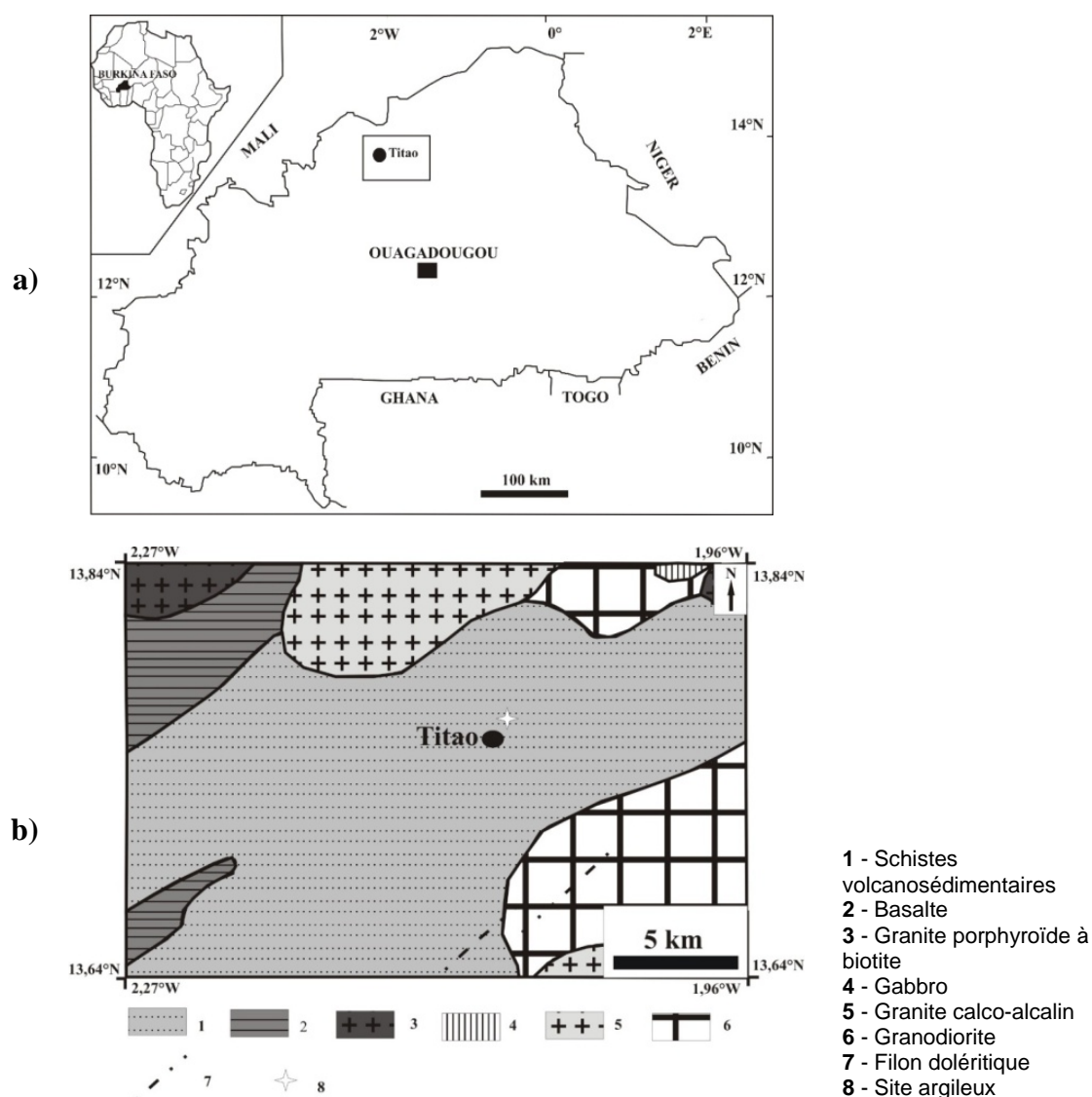
Au Burkina Faso, les matériaux argileux font l'objet de travaux scientifiques en vue de leur valorisation [4]. Ils sont utilisés essentiellement dans les domaines de la poterie, de l'habitat et de la céramique. Ces travaux concernent essentiellement l'étude des caractéristiques physico-chimiques, le comportement thermique, mécanique et pouzzolanique de quelques matières argileuses. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre étude, à savoir l'étude des potentialités d'utilisation de matières premières locales du Burkina Faso comme pouzzolane dans le ciment.

## MATERIAUX ET METHODES

### Localisation et géologie du site

Le site argileux de Titao (Figure 1) qui fait l'objet de la présente étude se situe dans le domaine Birimien et est localisé autour des coordonnées 2,08277°W et 13,77940°N. Le site est situé à environ 228 km au Nord-Ouest de Ouagadougou (Figure 1a).

Sur le plan géologique, le site argileux de Titao s'est développé sur des schistes volcanosédimentaires. Ces schistes sont en contact avec les granodiorites et les granites calco-alcalins au Nord et à l'Est (Figure 1b). Le développement de cette argile a probablement été favorisé par un réseau très dense de fractures, observable sur les images de géophysiques aéroportées.



**Figure 1.** Localisation et géologie du site argileux de Titao  
 a) Localisation du site de prélèvement sur la carte du Burkina Faso ;  
 b) Carte géologique du site argileux

A proximité du site s'est développée une intense activité d'orpaillage et à travers les puits des orpailleurs, on constate que l'argile n'a pas une couleur homogène. Elle est blanche violacée à rougeâtre par endroit et d'épaisseur variable (entre 25 à 30 m) pour ce qui a été constaté dans les puits des orpailleurs. Quelques fois la roche est reconnaissable lorsque les puits sont assez profonds. Ceci est la preuve probable que cette argile s'est développée également dans des conditions d'altération météorique. Une estimation approximative des réserves fixe le volume d'argile utile du site à environ 70000 m<sup>3</sup>.

### Analyses géotechniques, chimiques et minéralogiques de la matière première

La finesse des particules est estimée par la détermination de la surface spécifique des particules à l'aide de la méthode BET. L'analyse granulométrique a été réalisée avec un

granulomètre laser de type COULTER par voie liquide. La microstructure a été observée grâce à un microscope électronique à balayage de type Hitachi SC 2500.

Les limites d'Atterberg ont été respectivement déterminées avec la coupelle de Casagrande pour la limite de liquidité et par la méthode des baguettes confectionnées manuellement pour la limite de plasticité. Les différents essais sont effectués selon la norme NF P94-051 [5]. Les essais au bleu de méthylène des différents échantillons sont réalisés suivant la norme NF EN 933-9 [6].

La composition chimique élémentaire est déterminée par spectrométrie d'émission atomique par plasma à couplage inductif (ICP-AES - Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry) après une mise en solution des échantillons par du tétraborate de lithium  $\text{LiBO}_4$ .

Les phases minérales au sein de l'échantillon ont été identifiées en couplant la diffraction des rayons X (DRX), la spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR) et les analyses thermiques différentielle et thermogravimétrique (ATD/TG). Le diffractogramme de poudre a été enregistré avec un diffractomètre Bruker AXS utilisant la radiation  $\text{CuK}\alpha$  comme source de rayonnement et un monochromateur arrière en graphite. Le spectromètre infrarouge utilisé pour l'identification des groupements fonctionnels des espèces minérales est de type Perkin Elmer FT-IR utilisant du KBr comme matrice. Les courbes ATD/TG ont été enregistrées avec un appareil Linseis et fonctionnant sous atmosphère d'air avec la vitesse de chauffe de  $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ .

### **Préparation et caractérisation des pouzzolanes**

L'échantillon, finement broyé ( $\Phi < 100\text{ }\mu\text{m}$ ), a été activé par un traitement thermique à la température de  $680\text{ }^\circ\text{C}$  car elle indique la limite de la transformation de la kaolinite en métakaolinite sur sa courbe ATD. Les paliers de cuissons utilisées sont de 2 heures et 5 heures, et la vitesse de chauffe est de  $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ . Le palier de 5 heures est le plus utilisé pour transformer la kaolinite en métakaolinite. Cependant pour nos pays où l'énergie est rare, il faut alors optimiser le temps de cuisson. C'est ainsi que les 2 heures ont aussi été utilisées. Les échantillons activés (référéncé  $\text{TIT}_1$  pour le palier de 2 heures et  $\text{TIT}_2$  pour le palier de 5 heures) ont été caractérisés pour leur densité, leur finesse, leur caractère amorphe et leur minéralogie. Les échantillons activés étant prédestinés à une utilisation dans le ciment, la finesse des poudres a donc été déterminée par la méthode de perméabilité de Blaine. La minéralogie a été déterminée par la diffraction des rayons X et confirmée par les analyses thermiques (ATD/TG).

### **Analyse de l'activité pouzzolanique des échantillons activés**

L'activité pouzzolanique d'un échantillon est liée à sa vitesse de fixation de la chaux, la quantité de chaux qu'il peut fixer pour un temps donné et la nature des phases néoformées. Ces différents facteurs influencent la tenue mécanique des produits qui y seront issus. Il est alors nécessaire de coupler plusieurs méthodes afin de mieux cerner cette activité pouzzolanique. A cet effet, nous avons alors associé des méthodes chimiques, minéralogiques et mécaniques.

Les méthodes chimiques utilisées sont la méthode de saturation à la chaux et la méthode de Frattini. Ces deux méthodes permettent d'accéder à la vitesse de fixation de la chaux par les échantillons activés. Pour les essais de saturation à la chaux, dans une bouteille

en plastique, à 1g de chaque échantillon activé est ajouté 75 mL d'une solution saturée en chaux obtenue en dissolvant 2 g de chaux dans 1 L d'eau distillée. L'ensemble est bien scellé et conservé pendant 1, 3, 7 et 28 jours avant d'être filtré. Le filtrat obtenu est titré pour les ions  $\text{OH}^-$  et  $\text{Ca}^{2+}$  [2]. Pour le test de Frattini, à 20 g d'un mélange composé de 80 % d'un ciment CEM I (CPA 45 de Diamond Cement) et 20 % de l'échantillon à tester, on ajoute 100 mL d'eau distillée. L'ensemble est laissé sous agitation à 40 °C pendant 8 jours avant d'être filtré sur Buchner avec un papier filtre Whatman. Le filtrat est analysé pour les ions  $\text{OH}^-$  par du HCl dilué avec l'héliantine comme indicateur coloré. La quantité d'ions  $\text{Ca}^{2+}$  dans le filtrat est déterminée par de l'EDTA ( $0,03 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) à  $\text{pH} = 12,5$  avec l'indicateur coloré de Patton et Reeders [2]. L'ensemble des essais est effectué suivant la norme BS EN 196-5 [7].

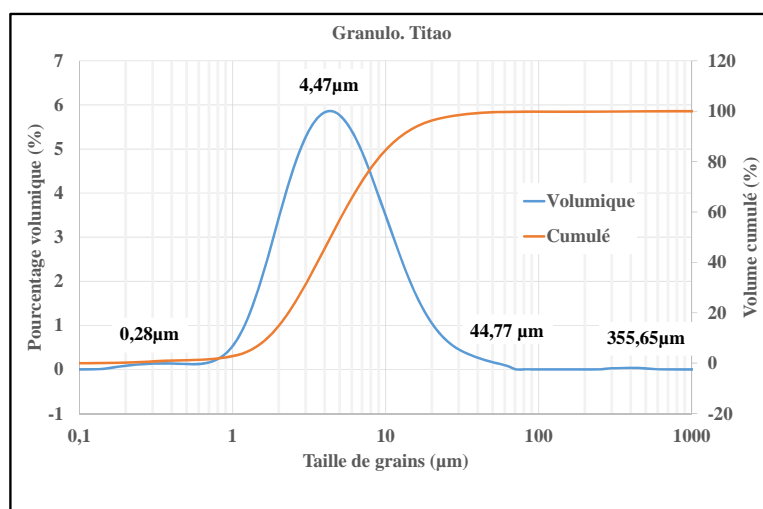
Pour la méthode minéralogique, c'est à dire l'identification de phases néoformées pendant la réaction pouzzolanique, les échantillons ayant subi l'essai Frattini ont été testés en utilisant les analyses thermiques (ATD/TG) et la diffraction des rayons X (DRX).

Pour la méthode mécanique, l'indice pouzzolanique a été calculé. Des mortiers prismatiques ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ) sont confectionnés suivant le standard NF EN 196-1 [8]. Plusieurs mortiers avec remplacement partiel du ciment (25 % en masse) sont élaborés et conservés à 20 °C dans de l'eau avant de subir des tests mécaniques de compression 28 jours. L'indice pouzzolanique correspond au rapport de la résistance à la compression du mortier contenant la pouzzolane sur la résistance du mortier sans pouzzolane.

## RESULTATS ET DISCUSSION

### Analyses géotechniques, chimiques et minéralogiques de la matière première

Les courbes granulométriques cumulées et volumiques (Figure 2) de l'échantillon indiquent une granulométrie étalée avec quatre familles modales centrées à  $0,28 \mu\text{m}$ ,  $4,47 \mu\text{m}$ ,  $44,77 \mu\text{m}$  et  $355,65 \mu\text{m}$ .



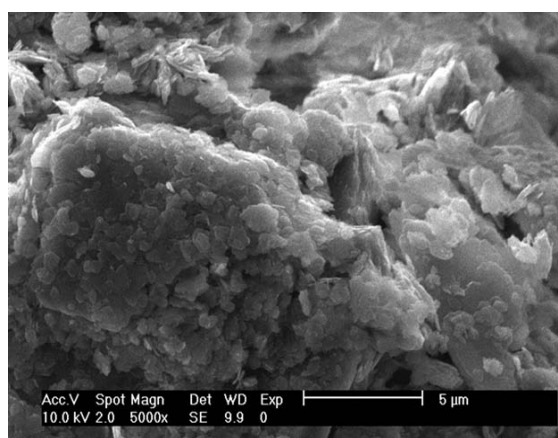
**Figure 2.** Courbes granulométriques cumulée et volumique de Titao

Le Tableau 1 rassemble les résultats des essais géotechniques. La surface spécifique de Titao, proche de celle de la kaolinite ( $10 - 30 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ) indique la prédominance de cette phase dans l'échantillon. Cette prédominance de la kaolinite est en accord avec les valeurs de bleu de méthylène et les limites d'Atterberg qui indiquent que l'échantillon est un sol argileux plastique.

**Tableau 1.** Principaux paramètres géotechniques de Titao

Paramètres	Valeurs
Densité [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]	2,58
Surface spécifique BET [ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ]	24,27
Limite de liquidité, WL [%]	65
Limite de plasticité, WP [%]	32
Indice de plasticité, IP [%]	33
Valeur au Bleu de Méthylène, VBS [%]	6

L'image MEB présentée sur la Figure 3 montre des plaquettes hexagonales, allongées et parfois réduites à des losanges caractéristiques de la kaolinite désordonnée.



**Figure 3.** Image MEB de Titao

Les résultats de l'analyse chimique (Tableau 2) indiquent une prédominance de silice et d'alumine dans l'échantillon. Cependant, il est particulièrement riche en oxyde de fer qui indique la présence probable de la goéthite et de l'hématite. La somme  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  est largement supérieure aux 50 % requis par la norme ASTM C-618 [9] pour les matériaux pouzzolaniques. La quantité de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dépasse remarquablement la valeur ( $< 3\%$ ) requise par la même norme. Peu de travaux antérieurs ont été consacrés à l'activité pouzzolanique de matériaux riche en fer. Les résultats disponibles ont montré que la tenue mécanique des matériaux cimentaires à pouzzolanes s'améliore avec la teneur en fer et ce jusqu'à 2,7 %. Au-delà de cette teneur, la tenue mécanique est détériorée [10]. Cependant des travaux sur des latérites riches en fer ont donné des résultats concluants [11].

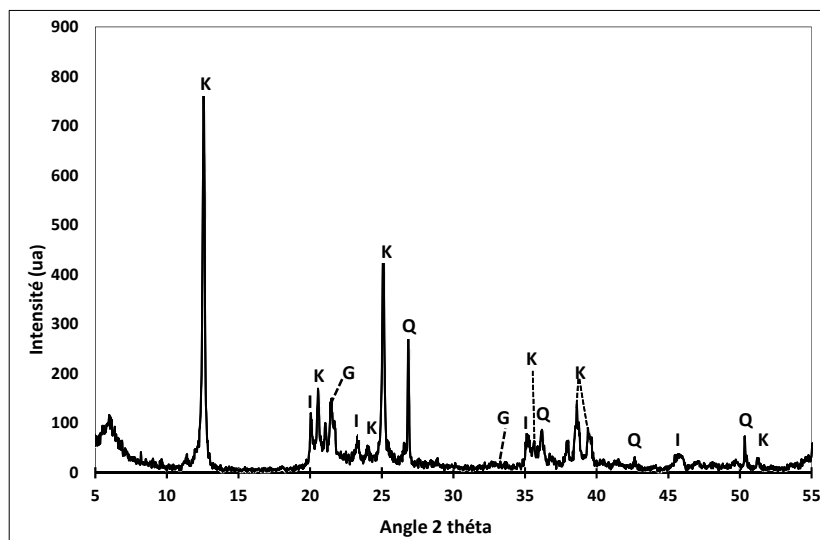
**Tableau 2.** Analyse chimique élémentaire de Titao

Oxydes	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	MnO	MgO	CaO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$	PF*	Total
%	45,91	28,29	9,75	0,05	0,36	0,21	0,04	0,12	1,18	0,22	13,51	99,65

\* PF = Perte au Feu

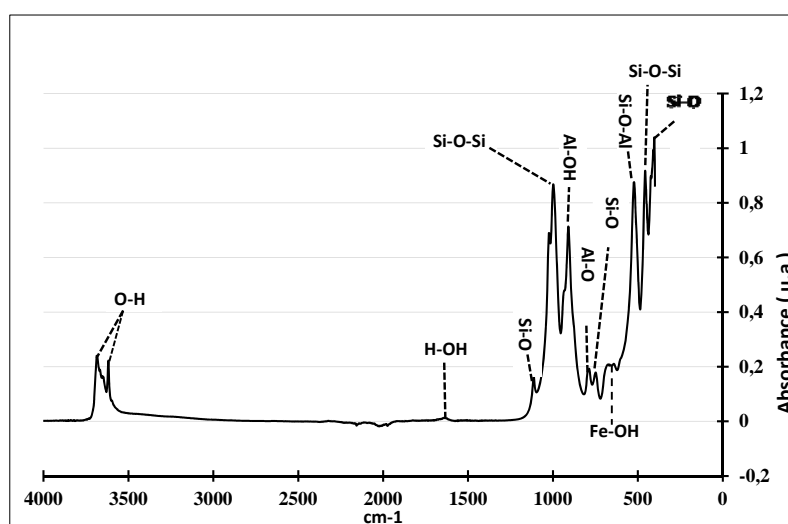


La principale phase argileuse identifiée après analyse du diffractogramme (Figure 4) est la kaolinite  $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ . A cette phase argileuse s'ajoutent le quartz ( $\text{SiO}_2$ ), la goéthite ( $\text{FeOOH}$ ) et l'illite ( $\text{K}_2\text{O}, 2\text{H}_2\text{O}, 2\text{Al}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})$ ).



**Figure 4.** Diffractogramme de Titao  
(K - kaolinite; I - illite; G - goethite; Q - quartz)

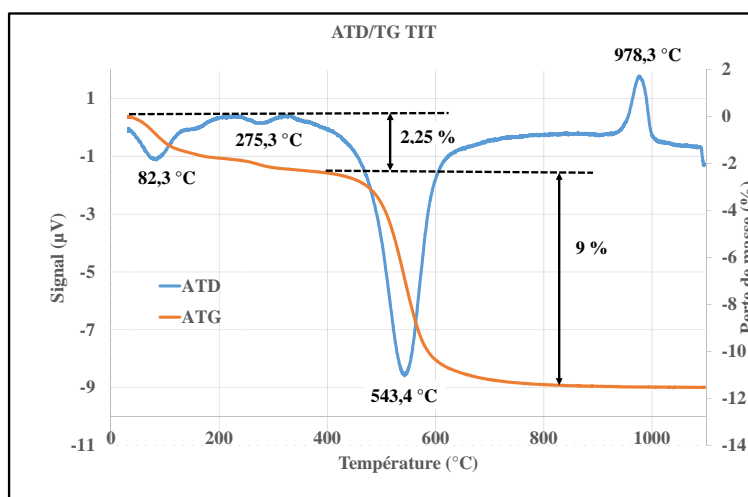
Les spectres infrarouges (Figure 5) confirment la présence de la kaolinite et du quartz. En effet, la kaolinite est mise en évidence par les bandes de vibration Al-OH ( $3620\text{ cm}^{-1}$ ,  $912\text{ cm}^{-1}$  et  $908\text{ cm}^{-1}$ ), Si-O ( $1116\text{ cm}^{-1}$  et  $746\text{ cm}^{-1}$ ), Si-O-Si ( $998\text{ cm}^{-1}$  et  $457\text{ cm}^{-1}$ ), Si-O-Al ( $520\text{ cm}^{-1}$ ) et Al-O ( $788\text{ cm}^{-1}$ ). Quant au quartz, il est mis en évidence par la bande à  $746\text{ cm}^{-1}$  caractéristique de la liaison Si-O.



**Figure 5.** Spectre infrarouge de Titao

Les courbes ATD/TG (Figure 6) sont en accord avec ceux de la DRX et de l'IR. La présence de la goéthite est confirmée par le faible pic endothermique centré à  $275\text{ °C}$  correspondant à sa déshydroxylation en hématite [12]. Le pic intense autour de  $540\text{ °C}$ ,

est attribuable à la déshydroxylation de la kaolinite en métakaolinite. Le pic exothermique autour de 978 °C correspond à la réorganisation structurale de la métakaolinite [13]. Les pertes de masse enregistrées en ATG sont associées aux transformations endothermiques indiquées par les courbes ATD.



**Figure 6.** Courbes ATD et TG de Titao

En utilisant la formule proposée par Yvon et al [14], nous avons établi un bilan semi-quantitatif qui est résumé dans le Tableau 3.

**Tableau 3.** Composition semi-quantitative de l'échantillon

Minérale	Kaolinite	Quartz	Goéthite	Illite	Total
%	71	12	10	1	94

Titao est majoritairement composés de kaolinite (71 %). Un traitement thermique approprié peut transformer la kaolinite en métakaolinite qui présente d'excellente réactivité pouzzolanique. Le quartz, en présence de ciment à fort teneur en C<sub>3</sub>A réagit avec la portlandite aux jeunes âges pour former des gels C-S-H [15]. Ce comportement du quartz améliore l'hydratation du ciment. Il s'en suit alors une formation de forte proportion de portlandite qui réagira avec le métakaolin pour donner plus de gel C-S-H.

### Caractérisation des échantillons activés

Les résultats de caractérisation des échantillons activés sont donnés dans le Tableau 4. La densité (2,93 g·cm<sup>-3</sup>) de Titao activé à 680 °C avec 2 heures de palier est proche de celles des métakaolins ou des pouzzolanes qui varient autour de 2,50 à 3,0 g·cm<sup>-3</sup> [16]. Le long palier de cuisson diminue de manière notable la densité des produits activés.

**Tableau 4.** Quelques paramètres physico-chimiques des matériaux activés

Paramètres	TIT1	TIT2
Densité [g·cm <sup>-3</sup> ]	2,93	2,27
Surface spécifique Blaine [cm <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> ]	5259	2877
% amorphes	70,5	70



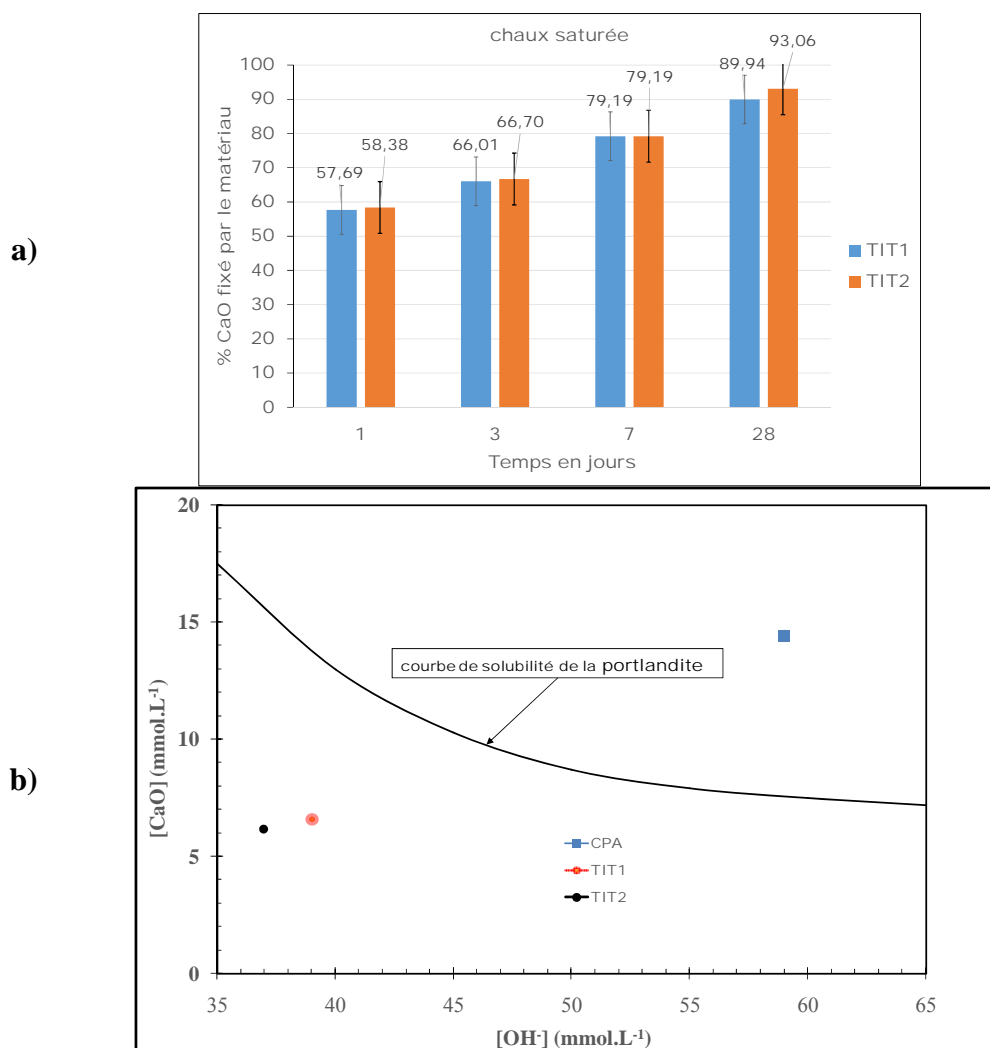
Les surfaces spécifiques sont relativement faibles dues à la présence de quartz dans les échantillons traités. Le pourcentage d'amorphes est supérieur à 70 % ce qui prédestine nos échantillons à de bonne réactivité pouzzolanique. Le pourcentage des amorphes est lié à la cristallinité de la kaolinite et à sa teneur dans l'échantillon de départ. En effet, une kaolinite désordonnée produit de la métakaolinite désordonnée plus réactive.

### Evaluation de l'activité pouzzolanique des échantillons activés

#### Analyse chimique de l'activité pouzzolanique

Les résultats de saturation à la chaux sont représentés par la Figure 7a. La quantité de chaux fixée croît avec le temps. L'effet du palier de cuisson des échantillons sur la quantité de chaux fixée est très faible. L'activité pouzzolanique de nos matériaux est élevée car dès le premier jour, plus de 50 % de la chaux est fixé et à partir du 7<sup>ème</sup> jour la quantité de chaux fixée dépasse les 70 % et avoisine les 90 % à 28 jours.

La Figure 7b présente le tracé de Fratini, nos échantillons activés sont situés en dessous de la courbe de solubilité de la portlandite donnée par la norme EN 196-5 [17].



**Figure 7.** Essais chimiques pour évaluation de l'activité pouzzolanique

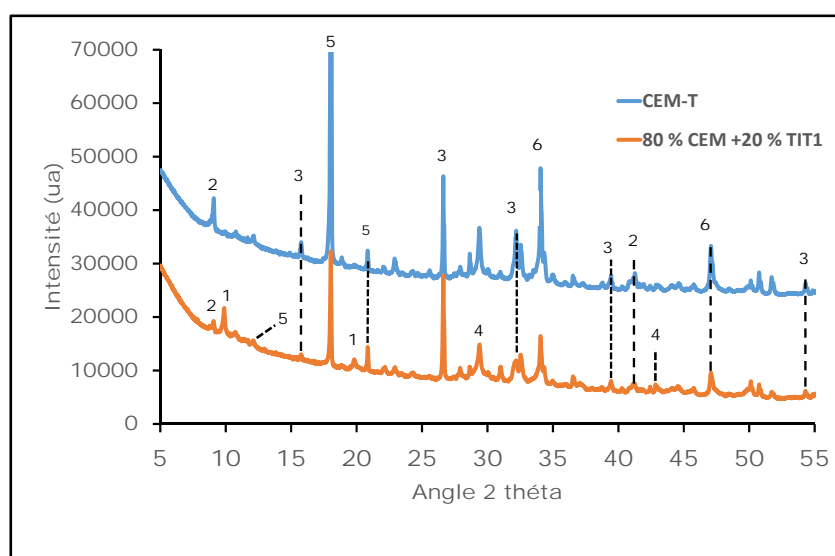
a) saturation à la chaux ; b) essai Frattini avec la courbe de solubilité de la portlandite

Ce résultat confirme alors la réactivité pouzzolanique appréciable de nos échantillons. Ces résultats corroborent ceux obtenus par la méthode de saturation à la chaux. Quel que soit le palier (2 h ou 5 h), le taux de fixation de chaux est pratiquement le même. Ainsi, pour une question énergétique nous utiliserons uniquement le palier de 2 h dans la suite des travaux.

### *Analyse minéralogique de l'activité pouzzolanique*

Après le test de Frattini, les résidus obtenus ont été finement broyés et soumis aux analyses de diffraction des rayons X et des analyses thermiques.

La comparaison du diffractogramme du mélange contenant TIT<sub>1</sub> à celui du ciment seul (Figure 8), montre la diminution en intensité du pic de la portlandite et l'apparition de nouveaux pics. La portlandite est ainsi consommée par TIT<sub>1</sub>, grâce à la réaction pouzzolanique, pour former de phases cristallisées néoformées de type aluminates de calcium hydratés qui sont C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub> et C<sub>4</sub>ASH<sub>12</sub>.

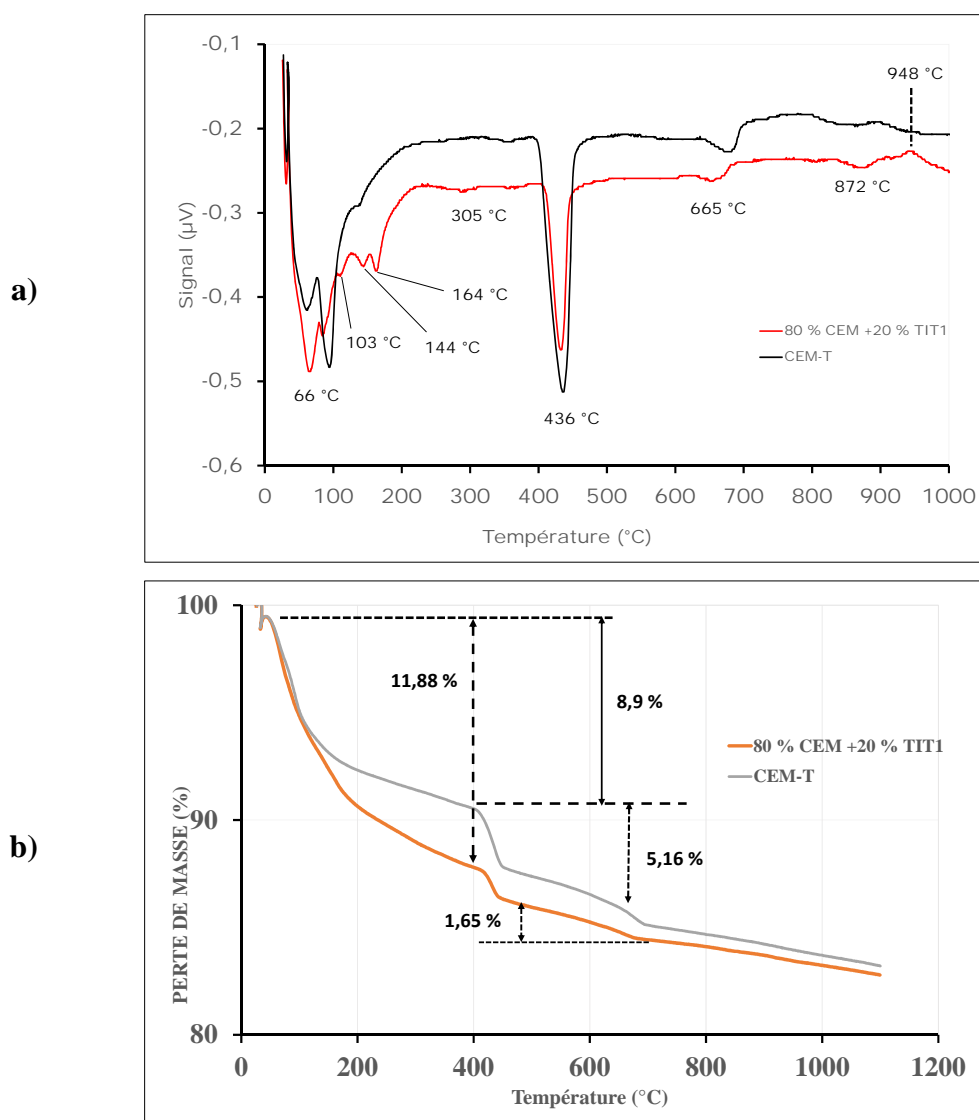


**Figure 8.** DRX des résidus de l'essai de Frattini

1 - C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub> ; 2 - Ettringite ; 3 - Portlandite ; 4 - Quartz ; 5 - C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub> ; 6 - C<sub>3</sub>S

Les résultats de l'ATD/TG confirment et complètent les résultats de la DRX (Figure 9). La courbe ATD du mélange (Figure 9a) se distingue du témoin par la diminution de l'intensité du pic à 436 °C correspondant à la portlandite, l'apparition du pic à 144 °C correspondant à la stratlingite ou gehlénite hydratée C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub> et par l'apparition de nouveaux pics à 164 °C et 305 °C correspondant respectivement aux hydrates C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub> et C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> ou C<sub>3</sub>ASH<sub>6</sub>. Il y a alors consommation de la portlandite libérée par l'hydratation du ciment, amélioration de la formation d'ettringite et formation de nouveaux types d'hydrates. Les pertes de masses observées entre 410 et 450 °C correspondant à la décomposition de la portlandite permettent d'évaluer la quantité de CH fixée par TIT<sub>1</sub> par simple différence (Figure 9b). Cette quantité de CH fixée est d'environ 68 % pour les 8 jours.

La perte correspondant aux hydrates est de 11,88 % pour le mélange et 8,9 % pour le témoin. Soit une différence de 2,98 %. Ce qui traduit très bien la formation de nouveaux hydrates C-S-H suite à la réaction pouzzolanique entre la pouzzolane et la portlandite.



**Figure 9.** Thermogrammes des résidus obtenus après le test de Frattini  
a) ATD ; b) TG

### Analyse mécanique de l'activité pouzzolanique

Les résistances en compression et l'indice pouzzolanique des éprouvettes à 28 jours sont données dans le Tableau 5. Les éprouvettes contenant 25 % de Titao calciné à 680 °C avec 2 heures de palier affichent un indice supérieur à 75 %. Ceci confirme la forte pouzzolanicité de notre échantillon activé car la norme ASTM C-618 prévoit un minimum d'indice d'activité pouzzolanique de 75 % à 28 jours [9].

**Tableau 5.** Résultat de l'indice pouzzolanique

	Résistance en compression à 28 jours [MPa]	Indice d'activité pouzzolanique
Ciment + TIT <sub>1</sub>	23,81	0,81
CEM-T	29,38	1,00

## CONCLUSIONS

Cette étude a permis de caractériser un site argileux du Burkina Faso et d'évaluer son activité pouzzolanique. La caractérisation physico-chimique de l'échantillon révèle qu'il est riche en kaolinite (71 %) avec de quantité moindre de quartz (12 %) et de goethite (10 %). Après cuisson à 680 °C pendant 2 heures ou 5 heures, l'échantillon a donné un métakaolin avec plus de 70 % d'amorphe. L'activité pouzzolanique des différents métakaolins, évaluée par des essais chimiques et minéralogiques a été très concluante car près de 90 % de chaux étaient fixés à 28 jours. L'effet du palier de cuisson n'a pas montré une différence notable dans les résultats de pouzzolanité. La portlandite libérée par le ciment est consommée par le métakaolin en formant de nouveaux hydrates C-S-H. Après 28 jours, l'indice pouzzolanique obtenu avec 25 % de métakaolin est de 81 % nettement supérieur à la valeur requise de 75 %. Le métakaolin préparé présente une grande réactivité pouzzolanique et peut alors être utilisé pour substituer partiellement le ciment en construction. Cette substitution constitue une solution écologique et contribue à la préservation de l'environnement par la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> résultant de la fabrication du clinker et tout en améliorant les propriétés mécaniques des produits finis.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le projet ISP/IPICS/BUF: 02 Uppsala (Suède) pour le soutien financier apporté à la finalisation de cet article.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Geryville, D., Kacimi, L., Cyr, M., Clastres, P.: Amélioration et étude de l'activité pouzzolanique de certains matériaux d'aluminosilicates naturels, en: *Actes de la 29<sup>èmes</sup> Rencontre de l'AUGC (XXIX<sup>e</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil, Tlemcen, Algérie, 29-31 mai, 2011)*, Ed. Université Abou Bekr Belkaïd, **2011**, volume 2, 148-157, [http://www.augc.asso.fr/dl/articles/AUGC\\_article\\_00132.pdf](http://www.augc.asso.fr/dl/articles/AUGC_article_00132.pdf);
2. Donatello, S., Tyrer, M., Cheeseman, C.R.: Comparison of test methods to assess pozzolanic activity, *Cement and Concrete Composites*, **2010**, 32 (2), 121-127;
3. Singh, M., Gar, M.: Reactive pouzzolana from Indian clay - their use in cement mortar, *Cement and Concrete Research*, **2006**, 36 (10), 1903-1907;
4. Seynou, M.: *Caractérisation de matières premières argileuses des sites de Loulouka et de Korona (Burkina Faso) : valorisation dans la céramique du carreau*, Thèse de Doctorat, Université de Ouagadougou (Burkina Faso), **2009**;
5. \*\*\*AFNOR (Association Française de Normalisation): *Norme NF P 94-051 (Sols : reconnaissance et essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau)*, **1993**;
6. \*\*\*AFNOR (Association Française de Normalisation): *Norme NF EN 933-9 (Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 9 : Qualification des fines – Essai au bleu de méthylène)*, **1999**;
7. \*\*\*BSI (British Standards Institution): *Standard BS EN 196-5 (Methods of testing cement – Part 5: Pozzolanicity test for pozzolanic cement)*, **2005**;
8. \*\*\*AFNOR (Association Française de Normalisation): *Norme NF EN 196-1 (Méthodes d'essais des ciments – Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques)*, **2006**;

9. \*\*\*ASTM (American Society for Testing and Materials): *Standard ASTM C618-99 (Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete)*, **1999**;
10. Ghorbel, H., Samet, B.: Effect of iron on pozzolanic activity of kaolin, *Construction and Building Materials*, **2013**, **44**, 185-191;
11. Chakchouk, A., Samet, B., Bouaziz, S.: Difference in pozzolanic behaviour of Tunisian clays with lime and cement, *Advances in Cement Research*, **2012**, **24** (1), 11-22;
12. Pialy, P.: *Etude de quelques matériaux argileux du site de Lembo (Cameroun) : minéralogie, comportement au frittage et analyse des propriétés d'élasticité*, Thèse de Doctorat, Université de Limoges (France), **2009**, <http://epublications.unilim.fr/theses/2009/pialy-pierre/pialy-pierre.pdf>;
13. Castelein, O., Soulestin, B., Bonnet, J.P., Blanchart, P.: The influence of heating rate on the thermal behaviour and mullite formation from a kaolin raw material, *Ceramics International*, **2001**, **27** (5), 517-522;
14. Yvon, J., Garin, P., Delon, J.F., Cases, J.M.: Valorisation des argiles kaoliniques des Charentes dans le caoutchouc naturel, *Bulletin de Minéralogie*, **1982**, **105** (5), 535-541;
15. de Larrard, F.: *Construire en béton : l'essentiel sur les matériaux*, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, Paris, **2002**;
16. Bai, J., Chaipanich, A., Kinuthia, J.M., O'Farrell, M., Sabir, B.B., Wild, S., Lewis, M.H.: Compressive strength and hydration of wastepaper sludge ash-ground granulated blastfurnace slag blended pastes, *Cement and Concrete Research*, **2003**, **33** (8), 1189-1202;
17. \*\*\*AFNOR (Association Française de Normalisation): *Norme NF EN 196-5 (Méthodes d'essais des ciments – Partie 5 : Essai de pouzzolanité des ciments pouzzolaniques)*, **1987**.