

**RESUME**

Les précipitations, sous formes d'averses, provoquent l'érosion rapide des versants. Les particules solides fines qui sont transportées par les cours d'eau, arrivent jusqu'aux niveaux des barrages où elles décantent. Ainsi, de crue en crue le barrage s'envase; ce qui diminue sa durée de vie. La solution adoptée a été le dévasement, mais devant la grande quantité de produit rejetée simplement en aval du barrage, le problème d'environnement est apparu. L'utilisation de cette vase récupérée, dans la fabrication d'un ciment pouzzolanique, contribue à la résolution de ces problèmes. L'étude montre que l'ajout de 30% de vase calcinée au ciment portland ordinaire (CPA) permet d'obtenir un ciment pouzzolanique. En effet, la quantité de pouzzolane artificielle ajoutée rentre en réaction avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment pour former un silicate de calcium hydraté (CSH) et la géhlénite.

**MOTS-CLÉS :** Érosion, vase, calcination, ciment, pouzzolane, chaux, Barrage, Algérie

**ABSTRACT**

Precipitations, in the showers, cause the fast erosion of the slopes. The fine solid particles which are transported by the rivers arrive up to the levels of the stoppings where they settle. Thus, after continuous downpours the dam silts up; which decreases its lifespan. One of the solutions adopted at summer was unsilting, but in front of the great quantity of product rejected simply downstream from the stopping, the problems of environment appeared. The use of this recovered mud in the manufacture of pozzolanic cement, contributes in the resolution of these problems. The study shows that the addition of 30% of calcined mud with cement (CPA) makes it possible to obtain pozzolanic cement. Indeed, the quantity of added artificial pozzolana creates a chemical reaction with the lime released during the hydration of cement to form a calcium silicate hydrate probably the tobermorite and gehlenite.

**KEYWORDS :** Erosion, mud, calcination, cement, pouzzolane, lime, dam, Algeria

# Élaboration d'une pouzzolane de synthèse à partir des sédiments de barrage

**BENAMARA Lakhdar<sup>1</sup>, OUHBA Kamal<sup>1</sup>, HAMWI André<sup>2</sup>**

1. Laboratoire d'Hydrologie et de Gestion des Ressources en Eau, Département d'Hydraulique, Université Des Sciences et de la Technologie d'Oran Algérie.

2. Laboratoire des Matériaux Inorganiques Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand France.

**Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : benaladz@yahoo.fr**

## Introduction

La nature des précipitations, souvent sous forme d'averse de courte durée, entraîne l'érosion rapide des talus amont des bassins versants. Cette érosion, importante lors des crues, est d'autant plus accentuée que le bassin est non reboisé et les rives érodables. Les cours d'eau transportent les particules solides résultant de l'érosion et les déposent dans d'autres sites en fonction de leurs dimensions, de la vitesse de l'écoulement et de la nature des parois du cours d'eau ; les particules les plus grosses sont déposées plus en amont que les particules fines (sédimentation, décantation) (1, 2 et 3).

Les particules fines, celles transportées en suspension constituent les vases. Elles arrivent jusque dans les retenues, même tout près du barrage où elles se décantent, dans certains cas une partie de ces particules est évacuée par des ouvrages spéciaux, si le barrage en est muni. Toutefois, une grande partie de ces éléments reste dans la retenue, et ainsi, d'année en année et de crue en crue, les quantités de matière s'ajoutent et se condensent au fond. La hauteur d'eau dans le barrage se trouve ainsi diminuée.

L'ouvrage d'art que représente un barrage est si important qu'il n'est pas judicieux de l'abandonner ainsi à la nature. La solution adoptée en Algérie pour prolonger sa durée de vie, est le dévasement. Cette solution s'est avérée très onéreuse en plus de sérieux problèmes causés par le rejet des vases en aval du barrage sur l'environnement jusqu'à l'embouchure du cours d'eau.

Une solution possible pour résoudre ce problème est d'utiliser cette vase dans la fabrication des ciments. Dans cet ordre d'idées, des travaux ayant un intérêt ; à savoir rentabiliser la vase récupérée lors du dévasement du barrage (4 et 5).

D'autre part, la vase récupérée par dragage est un matériau très fin qui peut être utilisé dans l'industrie de matériaux de construction comme matière première dans la confection de produits rouges. Cela sous la condition que sa composition chimique et minéralogique s'adapte aux performances attendues.

## 1. Les pouzzolanes

Une pouzzolane est un matériau siliceux, alumineux ou ferriqueux, n'ayant aucune propriété liante en lui même, mais

qui, sous certains états de cristallinité et de structure peut réagir en présence de chaux et d'eau à température et pression normales pour donner les mêmes produits d'hydratation qu'un ciment. Ils ont la particularité chimique de contenir intrinsèquement peu ou pas d'oxydes de calcium dans leurs compositions (6 et 7).

Ils sont utilisés dans la fabrication de ciment pouzzolanique, ce sont :

- soit des sous-produits industriels (cendres volantes, déchets de tuiles et briques, ...)
- soit des matériaux naturels quasiment inemployables par ailleurs (cendres volcaniques, certains sols argileux, ...).

## 2. Caractéristiques de la vase d'étude

### 2-1 Essais d'identification

#### 2-1-1 Caractéristiques physiques

La vase utilisée dans notre étude est une vase naturelle. Elle vient plus précisément du barrage de Fergoug situé dans la wilaya de Mascara Algérie. Il devait être dévasé de plus de 10 millions de mètres cubes de sédiments. Les analyses physiques effectuées sur des échantillons prélevés du fond du barrage ont donné les résultats suivants : l'analyse granulométrique montre que le produit cru présente une granulométrie étalée (figure 1) : 100% passant à moins de 200  $\mu\text{m}$ . Les essais physiques ont donné les valeurs suivantes: le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s = 26 \text{ kN/m}^3$ ), la limite de liquidité ( $w_L = 53\%$ ), la limite de plasticité ( $w_p = 22\%$ ), la limite de retrait ( $w_R = 10\%$ ) et l'indice de plasticité ( $I_p = 31\%$ ). L'essai triaxial du type non drainé non consolidé a donné la valeur de la cohésion ( $C_u = 1.7 \text{ bar}$ ) et de l'angle de frottement interne ( $\phi_u = 27^\circ$ ). Ces analyses ont été réalisées au laboratoire de géotechnique de l'université de sciences et technologie d'Oran « Algérie ».

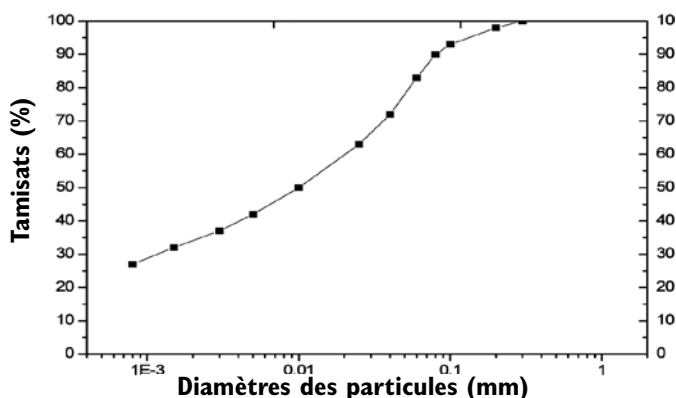
#### 2-1-2 Analyse chimique

L'analyse chimique consiste à doser sous formes d'oxydes les différents éléments chimiques constituant les matériaux. Elle a été réalisée sur la vase réduite en poudre de diamètres inférieurs à 100  $\mu\text{m}$  au laboratoire des travaux publics d'Oran « Algérie » et a donné les résultats présentés dans le tableau.

**Tableau 1 : Valeurs moyennes du carbone organique et de l'azote total ainsi que le rapport C/N, DBO<sub>5</sub>/DCO, DBO<sub>5</sub>/N**

Éléments (%)	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Perte au Feu
	43.79	16.02	2.07	8.41	4.01	0.13	25.07

La kaolinite représente (21%) de la masse totale, ceci en supposant que l'alumine contenue dans cette vase est entièrement sous forme de kaolinite, ce pourcentage est calculé par défaut.



**Figure 1 : Granulométrie de la Vase crue**

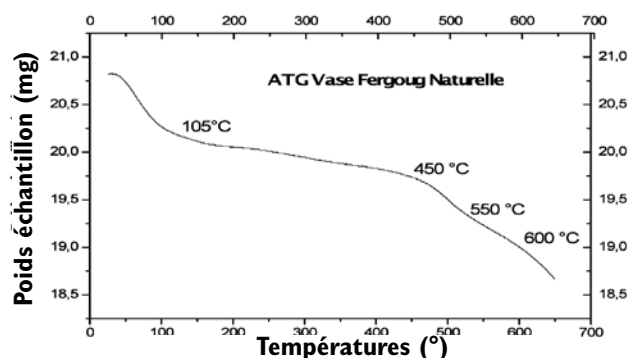
### 2-1-3 Analyse thermogravimétrie (atg)

Elle permet d'identifier les principaux minéraux par leur perte de poids, autrement dit, le départ de l'eau, formée à partir de la deshydroxylation des OH<sup>-</sup> liés aux différents cations, et du CO<sub>2</sub> suite à la décomposition des carbonates. Les analyses ont été réalisées à l'aide d'une balance thermogravimétrique (TGA-50 Shimadzu) au laboratoire de chimie inorganique de l'université de Blaise Pascal de Clermont-Ferrand. Un échantillon finement broyé est porté de la température ambiante à 900°C à une vitesse relativement lente (5°C/minute), afin de suivre, et d'optimiser les phénomènes de pertes de poids. D'après la courbe de l'analyse thermogravimétrique (ATG) effectuée sur la vase naturelle (Fig. 2), on note une perte de poids quasi linéaire jusqu'à 105°C correspondant au départ de l'eau libre, une variation très faible (un amortissement) entre 105°C jusqu'à 450°C, une perte considérable entre 450°C et 550°C correspondant à l'élimination de l'eau de constitution de la Kaolinite et une perte plus importante au-delà de 600°C marque l'existence des carbonates.

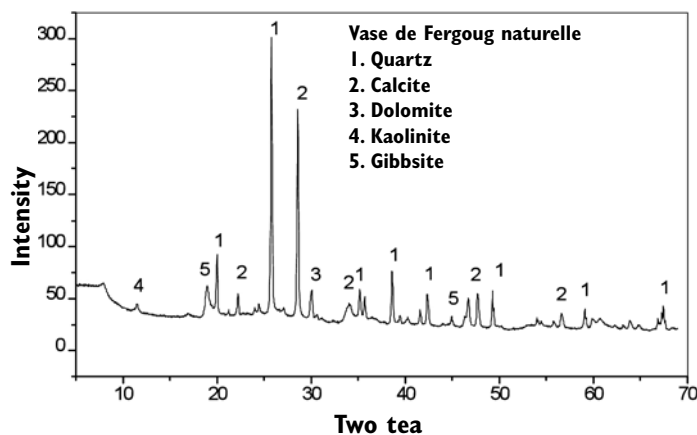
### 2-1-4 Diffraction des rayons 'x'

Les minéraux cristallisés possèdent une structure atomique régulière et périodique selon les trois dimensions. Chaque espèce cristalline donne un diagramme de diffraction caractéristique, c'est à dire un ensemble de raies de diffraction dont la position et l'intensité correspondent à sa structure. Cette analyse est faite au laboratoire de chimie inorganique de l'université de Blaise Pascal de Clermont - Ferrand. Les diffractogrammes des rayons X sont obtenues à l'aide d'un appareil X'pert ProMPD Philips couplé à un système informatique

qui permet l'exploitation automatique des résultats. L'analyse aux diffractions des rayons X effectuée sur notre vase naturelle crue montre l'existence de raies caractérisant le quartz (SiO<sub>2</sub>), les carbonates : la calcite (CaCO<sub>3</sub>) et la dolomite (Ca Mg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), la Kaolinite (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2SiO<sub>2</sub> 2H<sub>2</sub>O) et de la gibbsite Al(OH)<sub>3</sub>. (Figure 3).



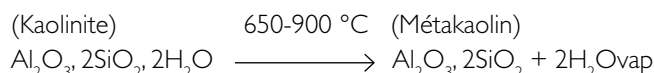
**Figure 2 : Courbe ATG de la vase de Feergoug crue**



**Figure 3 : Diffractogramme des rayons x de la vase de Feergoug crue**

## 3 - Traitement thermique de la vase

Le traitement thermique transforme fortement la composition minéralogique du matériau. Il élimine les matières organiques et les minéraux argileux sont largement détruits par le départ de H<sub>2</sub>O, si bien que des combinaisons amorphes apparaissent selon la réaction (8, 9 et 10).



Des travaux antérieurs sur des argiles ont optimisé la température de cuisson entre 700 et 800°C. Pour une température inférieure à 700°C la déshydratation du minéral n'est pas totale (8, 9 et 11).

Ainsi, nos travaux ont porté sur la possibilité d'utiliser cette vase comme pouzzolane de synthèse. La pouzzolane est d'une part un produit d'ajout au ciment dans la réalisation d'ouvrage de bonne qualité du point de vue résistance mécanique, en fixant l'hydroxyde de calcium libérée lors de l'hydratation de ciment et d'autre part ajouter un pourcentage de pouzzolane revient à économiser le même pourcentage en ciment, en sachant que la production du ciment demande une grande énergie de cuisson du clinker, alors que la température de cuisson de la vase pour la transformer en pouzzolane n'est que de l'ordre de 750 °C. A une échelle industrielle un gain énergétique est certain (8 et 9).

La calcination de notre vase a été effectuée au laboratoire de métallurgie de l'université des sciences et technologie d'Oran « Algérie ». Le produit cru est calciné dans un four électrique programmé : température de cuisson 750°C - durée de cuisson 5 heures - montée de température 5°C/minute. On remarque sur le diffractogramme des rayons X du produit calciné (figure 4) que les raies caractéristiques de la kaolinite, la gibbsite et les carbonates ont totalement disparu du spectre, et l'apparition de quelques raies qui caractérisent le quartz.

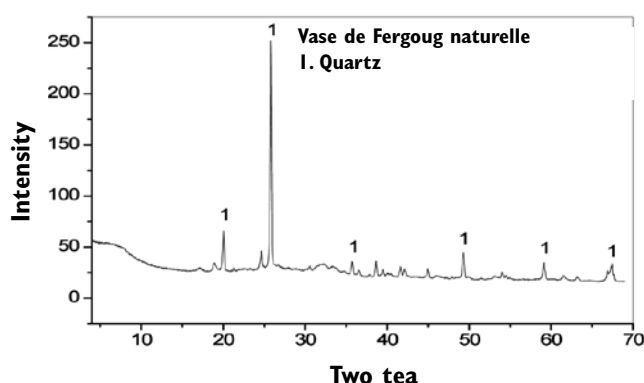


Figure 4 : Diffractogramme des rayons x de la vase de Fergoug calciné

## 4 - Essais mécaniques

Les caractéristiques mécaniques ont été déterminées essentiellement par la contrainte à la rupture en compression simple sur des éprouvettes de pâte pure, de forme cylindrique de 2 cm de diamètre et 4 cm de hauteur selon le procédé mis au point par le laboratoire des matériaux minéraux de l'institut national des sciences appliquées de Lyon (10). Ces éprouvettes sont conservées dans une chambre humide pendant 28, 60 et 120 jours à une température de 20°C. A l'âge requis, les éprouvettes sont démoulées 24 heures avant d'être soumises à l'essai de compression simple. Quatre mélanges ont été préparés, les proportions en vase calcinée à 750°C des mélanges sont 30%, 50% et 70% et un témoin (100%

de ciment). La quantité d'eau de gâchage est déterminée par essai de consistance normale. Le rapport eau sur solide (E/S) varie en fonction du pourcentage de vase calcinée ajoutée au ciment. La valeur E/S est entre 0,3 pour le ciment seul et 0,45 pour le mélange à 70% de vase calcinée en passant par 0,35 pour le mélange à 30% de vase calcinée. On montre dans la figure 5 que la résistance mécanique à la compression simple augmente en fonction de l'âge de conservation et le pourcentage en ciment. Le mélange à 30 % de vase calcinée à 750 °C constitue un liant honorable puisqu'il donne des résistances en compression simple égales à 85% de celles obtenues avec le ciment seul. Ces résultats peuvent être améliorés en ayant un temps de conservation plus long, sachant que la réaction pouzzolanique intervient après celle d'hydratation du ciment libérant de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Les performances sur un échéancier plus long sont prometteuses.

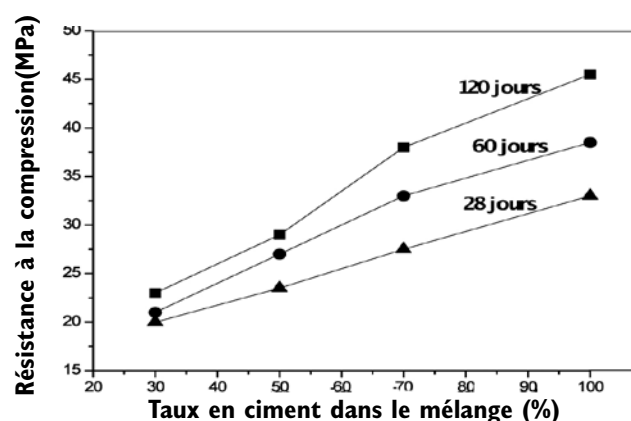
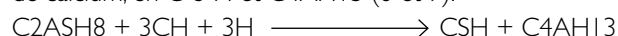
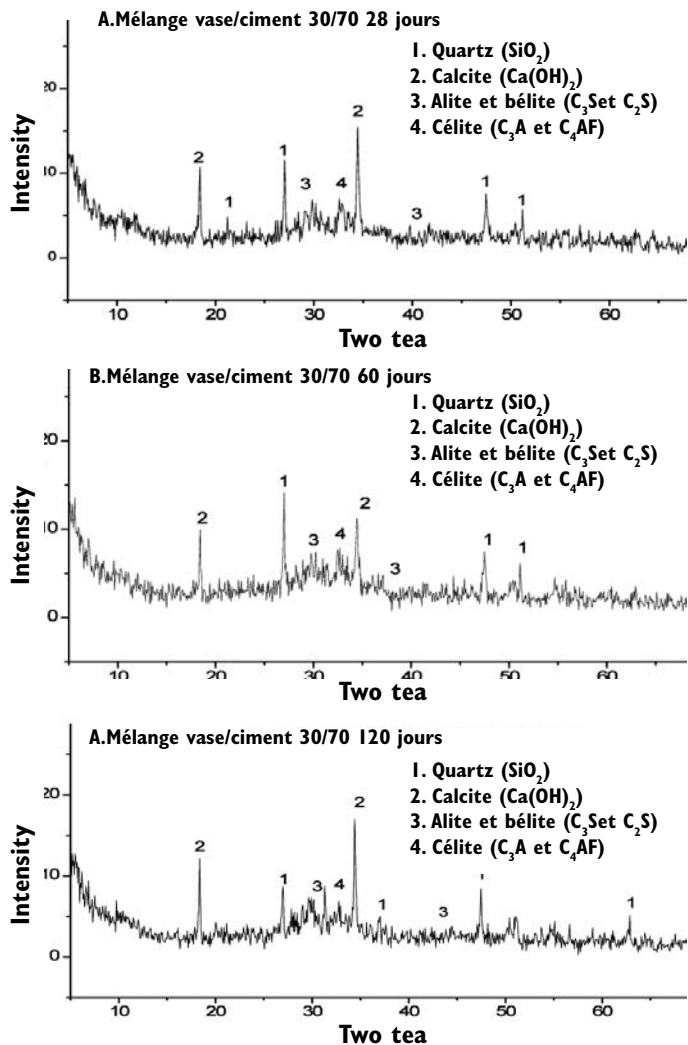


Figure 5 : Courbes des résistances mécaniques à la compression des différences en fonction de l'âge de conservation

## 5. Analyse physico-chimique

La figure 6 représente les diffractogrammes des rayons x du mélange (vase calcinée à 750°C)/Ciment = 3/7 à différentes durées de conservation à température ambiante et dans une atmosphère à taux d'humidité égale à 100 %. On montre l'existence des raies qui caractérisent la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment ainsi que les autres phases du ciment en plus le quartz de la vase calcinée. Les éléments réactifs de la vase calcinée (métakaolin et la gibbsite calcinée) consomment la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment pour donner naissance à un gel de silicate de calcium hydraté ou CSH1 de Taylor et la géhlénite hydratée C2ASH8. Ce qui explique les résultats de la résistance mécanique (11). Les principaux produits d'hydratation à 20°C dans une réaction pouzzolanique entre le métakaolin et l'hydroxyde de calcium sont : C2ASH8, CSH, C4AH13. La géhlénite hydratée (C2ASH8), se décompose en présence d'une solution saturée d'hydroxyde de calcium, en C-S-H et C4AH13 (8 et 9).





**Figure 6 : Diffractogramme des rayons x de la vase de Fergoug aux différentes durée de conservation**

## Conclusion

L'étude que nous avons menée donne un certain nombre de résultats :

- la résistance mécanique augmente avec le pourcentage en ciment ajouté et avec l'âge de conservation.
- le mélange à 30 % de vase calcinée à 750 °C constitue le ciment pouzzolanique honorable puisqu'il conduit à des résistances en compression égales à 85% de celles obtenues avec le ciment seul.
- les produits formés sont la tobermorite (CSH) et la géhlénite (C2ASH8).

On peut retenir que l'ajout de la vase calcinée dans certaines proportions peut donner un ciment pouzzolanique, ce qui présente une économie d'énergie non négligeable. Le ciment est le liant le plus utilisé dans les pays en développement. Son poids économique est considérable ; importé ou

produit localement. Toutefois, l'incorporation de la vase calcinée dans le ciment présente une alternative aux quantités considérables de vase, dont disposent nos barrages et longtemps considérée comme un déchet.

Il reste intéressant de valoriser encore mieux ces matériaux car la résistance mécanique n'étant pas toujours le principal facteur recherché, une étude sur la durabilité dans des milieux agressifs d'un béton à base d'un liant pouzzolanique composé de vase calcinée et de ciment portland s'impose.

## Références bibliographiques

DEMMAK A., 1982. Contribution à l'étude de l'érosion des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de Doc-Ing. Université Pierre et Marie Curie Paris, 232 p

REMINI B. 2002. Évolution de la sédimentation dans les retenues de barrage et le soutirage des particules fines, Courrier du Savoir Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, – n°02, pp : 29-34.

BENFETTA H., REMINI B., 2008. La Problématique du Stockage des Eaux de Surface dans les Régions Arides Cas du Barrage de Ouizert (Algérie) European Journal of Scientific Research Vol.23, n°3, pp : 380-391

OUHBA K., BENAMARA L., 2009. Réaction hydrothermale vase-ciment, revue Déchets Sciences et Techniques, n° 53, pp : 39-43

BENAMARA L., OUHBA K. 2002. Utilisation des vases dans la fabrication des briques. Colloque International sur l'Urbanisation des Régions Arides et les Problèmes Associés, Université des Pays Arabes, 2-4 novembre 2002, Riyad, Arabie Saoudite, pp : 801-807.

MILLET J., FOURNIER A., SIERRA R., 1976. Rôle des chaux industrielles dans leurs emplois avec les matériaux à caractère pouzzolanique. Bull. Liaison Labo. P et Ch., n°83, pp : 91-98.

FRACHEBOURG J., 1965. Contribution à l'étude de quelques Pouzzolanes naturelles et artificielles en vue de la fabrication des ciments de Pouzzolanes, Thèse Doctorat Es Sciences, Ecole Polytechnique, Université de Lausanne, 136 p.

BICH C., 2005. Contribution à l'étude de l'activation thermique du kaolin : Evolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique, Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 264 p.

CHAHIDI ELOUZZANIA D., MANSOURIA K., BOPDA FOKAMB C., 2013. Etude préliminaire de la valorisation des boues de papeterie comme matières premières secondaires dans les mortiers de ciment Portland, Revue Nature & Technologie, A- Sciences fondamentales et Engineering, n° 09. pp : 13 - 18

GNIEWEK J., 1987. Réactivité des montmorillonites calcinées utilisation dans le génie civil, Thèse de Doctorat Es-Sciences, INSA de Lyon, 184 p.

MESSI A., 1988. Propriétés des ciments pouzzolaniques élaborés à partir de latérites activées thermiquement. Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 256 p.