



Valorisation des boues de papeterie comme matières premières secondaires dans les mortiers de ciment Portland : incidence des conditions d'incinération sur la résistance mécanique des mortiers (Valorization of paper mill sludge as a partial replacement of Portland cement in mortar: the impact of incineration conditions on the strength of mortars)

A. Bouamrane¹, D. Chahidi ELouazzani², L. Tiruta Barna³, K. Mansouri²

¹Université de Lyon, INSA-Lyon, LGCIE, 20 av. A. Einstein, F-69621 Villeurbanne cedex, France

Email : Ahmed.bouamrane@insa-lyon.fr

²Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique, Bd Hassan II, Mohammedia Maroc.

E-mail : d.elouazzani@gmail.com, khmansouri@hotmail.com

³ University of Toulouse; INSA, UPS, INP; LISBP, 135 Avenue de Rangueil, F-31077 Toulouse, France

lbarna@insa-toulouse.fr

Received 15 May 2013, Revised 22 Dec 2013, Accepted 22 Dec 2013

¹Corresponding Author, E-mail: d.elouazzani@gmail.com

Abstract

The aim of the present work was to show if paper sludges can be used in the building and public works's sector as a partial replacement of Portland cement in mortar without affecting their durability. The mineralogical and mechanical study of paper sludge calcined at temperatures between 650°C and 800°C are presented. The pozzolanic activity of ashes from paper mill sludges is improved because of the transformation of kaolinite to metakaolin (showed by DRX and IR). The mechanical characteristics (compression tests, pulling / bending tests) of mortar containing 25% of calcined sludges appear comparable to standard mortar containing 100% of Portland cement.

Keys words: paper mill sludge, ashes, physicochemical properties, mineralogical composition, pozzolanic activity, mortar, strength.

Résumé :

Le secteur du bâtiment et des travaux publics, grand consommateur des déchets, peut présenter aux industries de papeterie une solution très intéressante pour la valorisation des boues de papeterie. Dans cet article, on présente à la fois une étude minéralogique des boues calcinées dans une plage de température allant de 650°C à 800°C ainsi qu' une étude mécanique des mortiers modifiés comportant les cendres de papeteries comme substituant partiel du ciment Portland à hauteur de 25% en masse. Les résultats des essais montrent une amélioration de l'activité pouzzolanique des boues de papeterie incinérées. Cette amélioration est le résultat de la transformation de la kaolinite en métakaolin et de la disparition de la matière organique.

Les essais de compression, ainsi que ceux de traction/flexion réalisés sur les éprouvettes de mortier modifié montrent que ces derniers présentent une résistance relativement similaire aux mortiers de composition standard.

Mots- clefs: boues de papeterie, cendres, caractéristique physicochimique, composition minéralogique, activité pouzzolanique, mortier, résistance.

1/ Introduction

Le développement durable est désormais un objectif proclamé à tous les échelons de la société actuelle et la gestion des déchets est de plus en plus prise en compte par les industriels. La problématique de la gestion des déchets repose sur la volonté de réduire au maximum la mise en décharge et développer par conséquent les modes de valorisation en équilibre avec le milieu naturel [1].

L'industrie du papier produit des quantités considérables de boues [2], dont la mise en décharge a été le moyen d'élimination le plus simple et le moins couteux [3]. Toutefois, le secteur du bâtiment et des travaux publics est

un grand consommateur des déchets tels que les laitiers de haut fourneau, les fumées de silice etc., et peut présenter pour les industries de papeterie une solution très intéressante de valorisation de ces déchets non ultimes comme pouzzolanes de synthèse [4]. De la bibliographie [5][6], on peut espérer avoir des cendres de papeterie présentant de bonnes propriétés pouzzolaniques.

A l'état brut, les boues de papeteries constituées principalement de kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), calcite (CaCO_3), talc ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) avec présence de quartz (SiO_2) et de muscovite ($\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sont incompatibles avec le ciment Portland. La transformation des boues de papeterie en pouzzolanes, dans l'industrie des matériaux de construction consistera à lui appliquer un traitement thermique approprié pour éliminer les matières organiques et transformer la kaolinite en métakaolin [7].

L'étude complète du cycle thermique nécessaire à l'obtention de ces différentes transformations chimiques a été présentée dans un de nos articles précédents [8]. Dans la bibliographie, des études antérieures ont été amorcées dans l'objectif de valoriser les boues de papeterie dans le mortier de ciment. CHABANNET [9] et d'autres auteurs [10], [11] ont montré que la proportion maximale du métakaolin naturel ou de synthèse à utiliser comme substituant au ciment sans nuire à la durabilité du mortier est de 25%.

Dans la suite de ces travaux bibliographiques, cet article se consacre à l'étude de l'activité pouzzolanique réelle des boues de papeteries et de l'incidence du traitement thermique préalablement subit (conditions d'incinération des boues de papeterie) sur la structure minéralogique finale des cendres obtenues.

En dernière partie, une étude expérimentale des propriétés mécaniques en compression et en traction/flexion d'un élément de structure, fabriqué à partir d'un mortier constitué de cendres de boues de papeteries est réalisée. Les éprouvettes du mortier de ciments conçues sont constituées de 25% de cendres de boues de papeteries en substitution en masse du ciment Portland.

2/ Matériaux étudiés

2.1/ Boues de papeterie

L'échantillon de l'étude, « boues de papeterie », est un résidu du traitement des effluents liquides issus des différentes étapes de la fabrication du papier [12], [13]. Ces échantillons ont été prélevés sur une même unité de production à 8 échéances de temps et désignés par les indices de B1 à B8.

2.2/ Préparation des cendres de boues de papeterie

Les cendres sont issues de l'incinération (à différentes températures : 650°C, 700°C, 750°C et 800°C) des boues de papeterie dans une chaudière à lit fluidisé de 40 MW. Le dispositif de calcination utilisé est un four électrique type FERRO où les échantillons sont calcinés en lit fixe, dans des bacs en céramique. La montée en température est linéaire et s'effectue à une vitesse de 250°C/heure. Le refroidissement des boues calcinées s'effectue à la vitesse propre du four fermé. La désignation des cendres de boues de papeterie est représentée par « B1Cal » suivie de la température d'incinération (exemple B1Cal 700 : calcinée à 700°C).

2.3/ Eprouvette de mortier de ciment

Les essais mécaniques de compression et de traction/flexion ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm³ selon la norme EN 196-1: Méthodes d'essais des ciments.

L'éprouvette de mortier de ciment standard ou mortier de référence, désignée par M100, est constituée de [14] : 450g Ciment Portland Artificiel, 1350g de sable normalisé, 225 ml d'eau déminéralisée et 0,8% en poids du liant de Glénium 21 (super plastifiant) [15].

La composition ci-dessus correspond aux pondérations en masse d'un mortier de référence, contenant la quantité maximale de ciment de 100% (désignation M100). La composition de mortier modifiée, avec ajout de cendre de papeterie, est constituée de 75% de ciment et de 25% de cendre, de désignation M75 (quantité en masse 337,5g de ciment et 112,5g de cendre de papeterie).

Le dispositif d'essais de flexion utilisé est une presse de type ADAMEL LHOMARGY DY25, asservi en déplacement de 1mm/mn. La machine de compression est presse de type de Perrier asservi en force (240 daN/s).

3/ Techniques expérimentales d'analyses minéralogiques

3.1/ Spectrométrie d'Emission Atomique ICP-AES

Le spectromètre d'émission atomique à source plasma ICP-AES permet de déterminer les pourcentages des principaux éléments chimiques présents dans un échantillon de boues de papeterie [16]. L'étude spectrale des échantillons repose sur la mesure du rayonnement émis.

3.2/ Dispositif de Diffraction aux Rayons X (DRX)

L'appareillage utilisé est un diffractomètre pour poudre SIEMENS D500 couplé à un système informatique [16]. Cette technique permet de déterminer l'état de cristallisation des échantillons et d'identifier les différentes phases solides cristallisées.

3.3/ Analyse Infra-Rouge (IR)

Le dispositif utilisé est un spectromètre à infra-rouge de type dispersif et de marque PerkinElmer. Cette technique vient compléter l'analyse par diffraction aux rayons X dans l'étude des matériaux mal cristallisés.

4/ Résultats et discussions

4.1/ Analyse minéralogique des boues et cendres

4.1.1/ Constituants chimiques des boues de papeterie (%)

Le tableau 1 récapitule les résultats d'analyses des éléments chimiques majeurs présents dans les boues (de type B1 à B8) et obtenus par spectrométrie d'émission (ICP-AES).

Tableau 1: Eléments majeurs (%) présents dans les boues (de type B1 à B8)

| Eléments (%) | Boues | | | | | | | |
|--------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | B8 |
| SiO ₂ | 18.68 | 18.36 | 18.61 | 18.42 | 16.52 | 16.86 | 16.87 | 17.56 |
| Al ₂ O ₃ | 9.75 | 9.15 | 9.85 | 9.00 | 8.66 | 9.04 | 8.79 | 9.16 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.51 | 0.65 | 0.56 | 0.68 | 0.64 | 0.54 | 0.56 | 0.58 |
| MnO | <Id | <Id | <Id | <Id | <Id | <Id | <Id | <Id |
| MgO | 3.34 | 3.46 | 3.21 | 3.78 | 2.74 | 2.76 | 3.19 | 3.11 |
| CaO | 22.73 | 21.49 | 21.32 | 22.32 | 21.99 | 21.21 | 23.77 | 21.68 |
| Na ₂ O | 0.12 | 0.07 | 0.05 | 0.16 | 0.16 | 0.05 | 0.06 | <Id |
| K ₂ O | 0.26 | 0.24 | 0.26 | 0.22 | 0.21 | 0.19 | 0.21 | 0.22 |
| TiO ₂ | 0.30 | 0.25 | 0.25 | 0.29 | 0.26 | 0.26 | 0.27 | 0.25 |
| P ₂ O ₅ | 0.11 | 0.11 | 0.09 | 0.10 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| PF (%) | 43.89 | 46.08 | 45.80 | 44.14 | 48.64 | 48.68 | 46.26 | 47.17 |
| Total | 99.69 | 99.86 | 100.00 | 99.11 | 99.89 | 99.65 | 100.04 | 99.79 |

Ces résultats mettent en évidence la reproductibilité de la production des boues. Les éléments majeurs présents dans ces boues, et qui sont exprimés en oxydes, sont essentiellement de la silice, l'alumine et l'oxyde de calcium. La perte au feu est élevée et varie de 44 à 49 %, signe d'une présence importante de matières organiques et de calcite.

4.1.2/ Analyse minéralogique par DRX des boues séchées et des cendres (boues calcinées)

Dans le paragraphe ci-dessus (cf. section 4.1.1) on a remarqué que les boues, correspondant aux différents prélèvements, présentent relativement la même composition minérale. Dans la suite de l'étude, seul l'échantillon de boue de type B1 sera retenu. Nous présentons dans la figure 1, l'analyse par diffraction aux rayons X des échantillons de boue de papeterie de type B1 séché à 105°C, et des cendres de boues de papeteries calcinés à différentes températures allant de 650°C à 800°C.

Comparativement à la boue séchée (B1 sec 105°C), on remarque sur la figure 1 que pour des températures au-delà de 650°C et inférieures à 800°C, toutes les raies de kaolinite (Al₂Si₂O₅(OH)₄) disparaissent. Par contre, la calcite (CaCO₃) et le talc (3MgO 4SiO₂ H₂O) restent intacts. A 700°C, on observe une légère décomposition de la calcite et du clinocllore. La décomposition de la calcite est importante à partir de 750°C. A cette température le talc demeure toujours intact, et l'intensité de la raie principale du clinocllore continue à diminuer.

A la température de calcination de 800°C, on observe une décarbonatation totale de la calcite, une déshydroxylation importante du talc avec la disparition de la kaolinite et la formation de la gehlénite (2CaO, Al₂O₃, SiO₂) [17]. Le carbonate de calcium est sans doute décomposé en CaO et CO₂ sous l'effet des températures relativement hautes. Par la suite, le CaO est combiné à la silice et l'alumine contenues dans le kaolin Al₂O₃ 2SiO₂ 2H₂O (sous produit papetier de départ) pour former la gehlénite. Cette phase est inerte en présence de ciment [16].

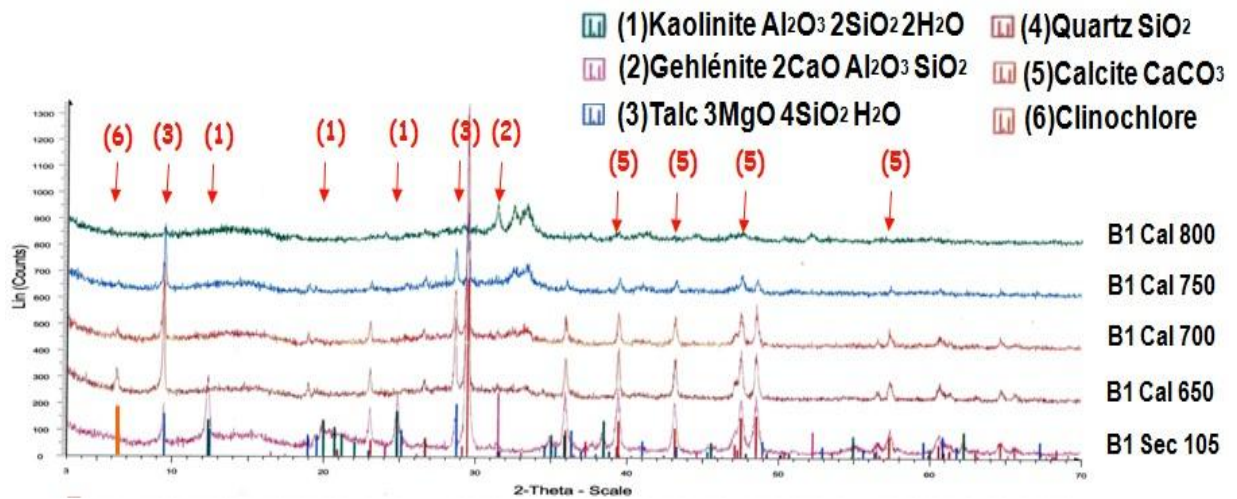


Figure 1: Spectres DRX pour la boue B1 calcinée à différentes températures : comportement de la calcite, talc, kolinite, quartz et gehlénite

4.1.3/ Résultats Spectrométrie Infra-Rouge à transformée de Fourier (IR)

Cette technique vient compléter la caractérisation par diffraction aux rayons X dans le cas des matériaux mal cristallisés. Dans le tableau n°2, nous récapitulons les bandes caractéristiques, par spectrométrie infra-rouge, des phases présentes dans le matériau étudié.

Tableau 2: Identification par IR des phases solides présentes dans la boue de type B1 séchée et calcinée à 650°C (bandes en cm^{-1})

| Phases | Bandes | |
|---|--------------------------------|----------------------------------|
| | Boue de type B1 séchée à 105°C | Boue de type B1 calcinée à 650°C |
| Talc ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) : | | |
| Hydroxyles (OH) | 538, 669, 3676 | 669, 3676 |
| Liaison Si-O | 1010 | 1017 |
| Kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) : | | |
| Hydroxyles (OH) | 3620, 3652 | Disparition de ces bandes |
| Liaison Al-OH | 913, 938 | |
| Liaison Si-O | 467, 698, 1010, 1031, 1101 | |
| Liaison Si-O-Al ^{IV} | 755, 789 | |
| Liaison Si-O-Al ^{VI} | 538 | |
| Calcite (CaCO_3) : | | |
| Vibrations CO_3 | 712, 875, 1429, 1797, 2515 | 712, 875, 1430, 1797, 2514 |
| Cellulose ($\text{C}_{12}\text{H}_{20}\text{O}_{10}$) | 2924 | Disparition |
| Lignine [$\text{C}_6\text{H}_4(\text{OCH}_3)\text{C}_3\text{H}_6\text{O}]_n$ | 3400, 2900, 1740 | Disparition |

➤ Boues séchées :

La figure 2 rassemble les spectres IR des boues de type B1 à B8.

Les spectres infra-rouge obtenus confirment encore une fois la reproductibilité de la production des boues (de type B1 à B8) au cours du temps. Ces spectres permettent d'identifier la présence dans les boues étudiées de la kaolinite, calcite, talc, et des matières organiques : cellulose et lignine.

➤ Cendres de boues calcinées :

Les figures 3 et 4 présentent les spectres IR des cendres (B1cal650, B1cal700, B1cal750 et B1cal800) analysée après calcination des boues à une température comprise dans la plage de 650°C à 800°C.

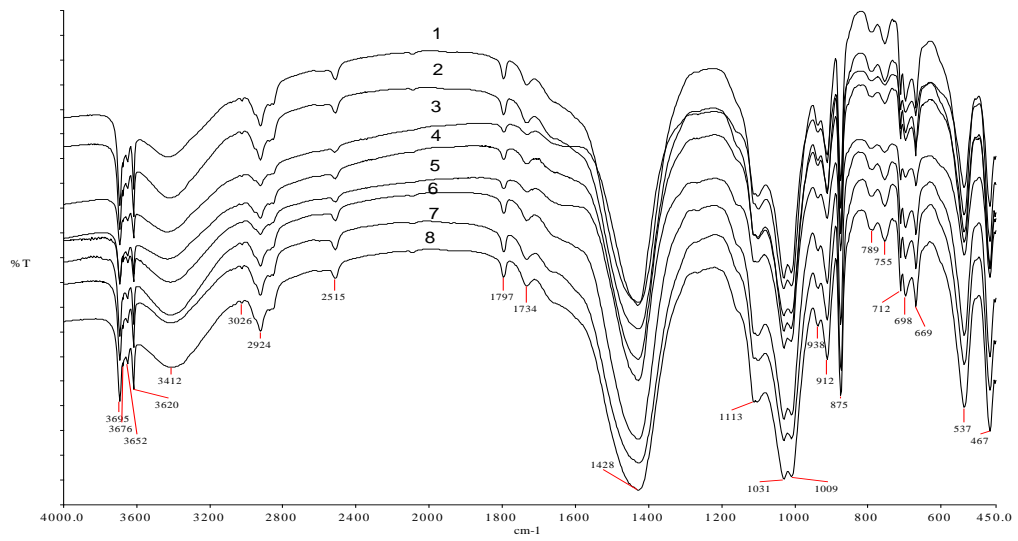


Figure 2: Spectres IR des boues B1 à B8 séchées à 105°C

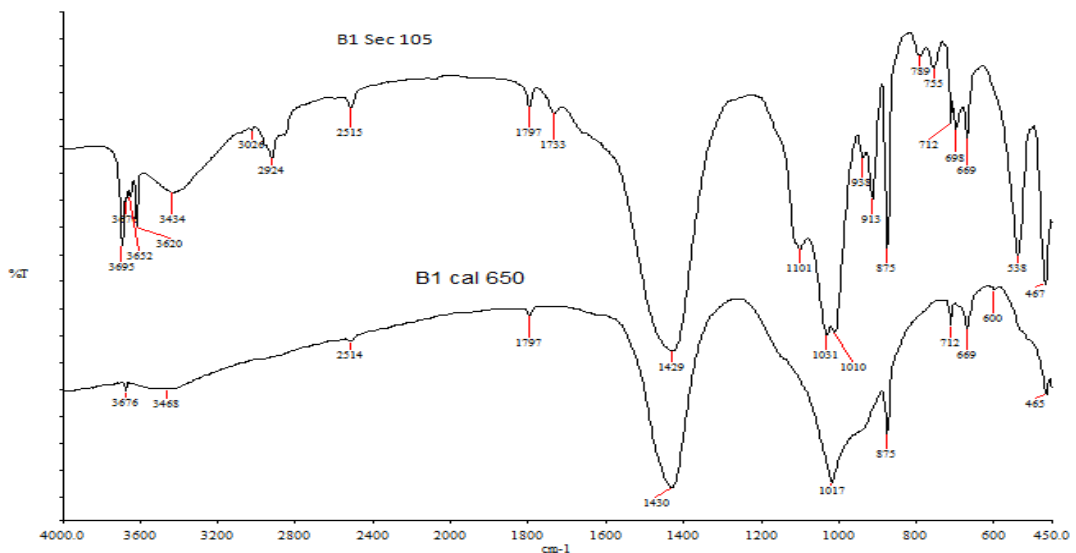


Figure 3: Spectres IR de la boue B1 séchée à 105°C et calcinée à 650°C.

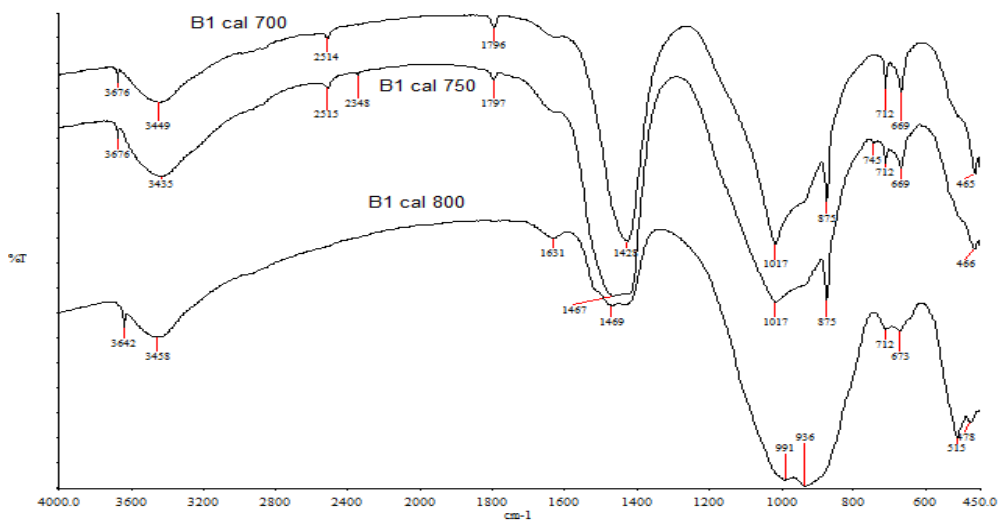


Figure 4: Spectres IR de la boue de type B1 calcinée à 700°C, 750°C et 800°C

La figure 3 montre que la kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) se transforme en métakaolin ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$). Cette transformation est caractérisée par la disparition des bandes caractéristiques, principalement celle très large centrée sur 1017 cm^{-1} et correspondant à la vibration de la liaison Si-O. Le carbonate de calcium (CaCO_3) est caractérisé par la présence des bandes caractéristiques à 2520 , 1800 , 1430 , 875 et 715 cm^{-1} , et est préservé au cours de la calcination à 650°C .

Dans la figure 4, les spectres montrent essentiellement que la calcite, caractérisée par les bandes 875 cm^{-1} , 1797 cm^{-1} et 2515 cm^{-1} , présente :

- Une certaine décomposition à 750°C
- Une décarbonatation totale à 800°C déterminée par la disparition de ces bandes caractéristiques.

Les résultats obtenus par cette technique analytique confirment ceux obtenus par diffraction aux rayons X. En effet, les phases majoritaires cristallisées présentes dans les boues séchées sont la calcite (CaCO_3), la kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et le talc ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$). Ces phases subissent au cours de la calcination certaines décompositions ou disparitions totales.

4.2/ Etude de l'activité pouzzolanique des cendres de boues calcinées

Dans ce qui suit, nous évaluerons l'activité pouzzolanique des cendres de boues calcinées en déterminant la quantité d'hydroxyde de calcium (chaux) consommée au cours du temps dans un mélange équipondéral chaux-cendres hydraté à consistance normale.

La chaux servant à l'activation chimique est de la portlandite [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], connue également comme l'une des composantes formée lors de l'hydratation du ciment Portland artificiel [18],[19]. Le mélange a lieu dans un malaxeur RILEM type 32 normalisé jusqu'à l'obtention de la consistance normale définie par la norme NFP 15-402. On mesure ensuite, par analyse thermique différentielle la quantité de chaux résiduelle contenue dans le mélange. Les résultats de l'activité pouzzolanique des cendres de boues calcinées à 650°C , 700°C , 750°C et 800°C sont illustrés dans la figure 5.

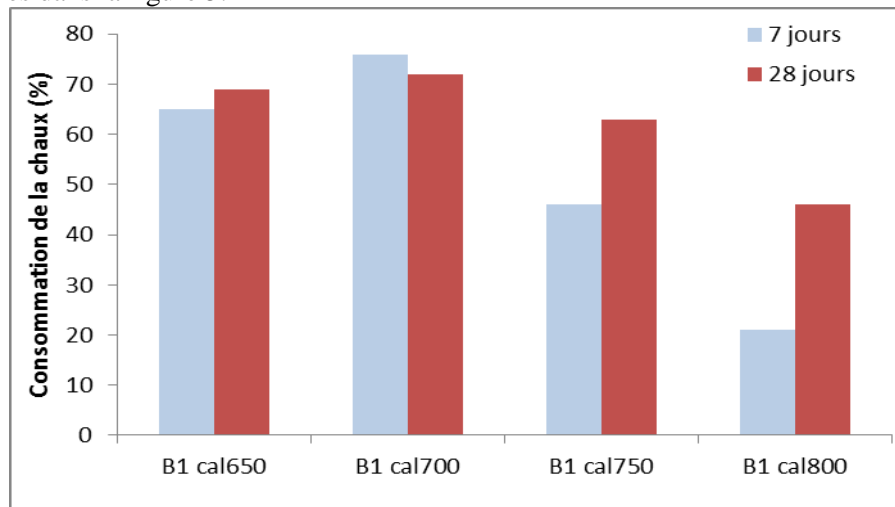


Figure 5: Activité pouzzolanique des cendres de boues calcinées à différentes températures.

La figure 5 montre une activité pouzzolanique assez importante des cendres de boues calcinées à différentes températures. En effet, le taux de consommation de chaux observé est au minima égal 22%. On peut également observer que l'activité pouzzolanique est maximale ou meilleure pour des échantillons de cendres calcinées à 700°C , car l'activité pouzzolanique à 7 jours ou 28 jours est supérieure à 70%. Les cendres de boues calcinées à 650°C peuvent aussi être valorisables comme pouzzolane réactive. Par contre, les cendres obtenues à 800°C présentent une faible activité pouzzolanique. Ceci est confirmé par la formation de la gehlénite (2CaO , Al_2O_3 , SiO_2) à cette température (Cf. figure 1).

4.3/ Etudes de la résistance mécanique des éprouvettes de mortier modifié

A ce niveau de l'étude, on présente la résistance mécanique en compression et en flexion/traction des éprouvettes normalisées de mortiers de ciment modifiés par ajout de cendres de boues (Cf. section 2.3).

Dans le mortier modifié, le liant hydraulique est constitué de 75 % de ciment Portland et 25 % de cendres de boues calcinées soit à 650°C , 700°C , 750°C ou 800°C (de désignation M75). Ces mortiers modifiés sont

comparés aux mortiers de référence dont le liant hydraulique est à 100% de ciment Portland. Les éprouvettes étudiées sont âgées soit de 28 jours ou de 90 jours (Cf. figure 6a et 7a).

Lors des expérimentations, les valeurs de la résistance en compression (ou flexion/traction) du mortier standard (100% de ciment de désignation M100) sont déterminées aux mêmes échéances de temps que les essais mécaniques sur mortier modifié (désignation M75).

De ces résultats de résistances mécaniques, nous pouvons calculer l'indice d'activité des différents mortiers modifiés par ajout des cendres de boues calcinées à des températures de 650°C, 700°C, 750°C ou 800°C (Cf. figure 6b et 7b). L'expression de l'indice d'activité, notée « I », utilisée est celle défini par la norme NF EN 450-octobre 1995 et dont la formulation mathématique est la suivante :

$$I = R / R_{\text{réf}} \quad (1)$$

R : est la résistance en compression (ou flexion/traction) d'une éprouvette normalisée de mortier de même âge, préparée avec un liant contenant 75 % de ciment et 25 % de cendres.

R_{réf} : est la résistance à la compression (ou flexion/traction) du mortier avec 100% de ciment de référence.

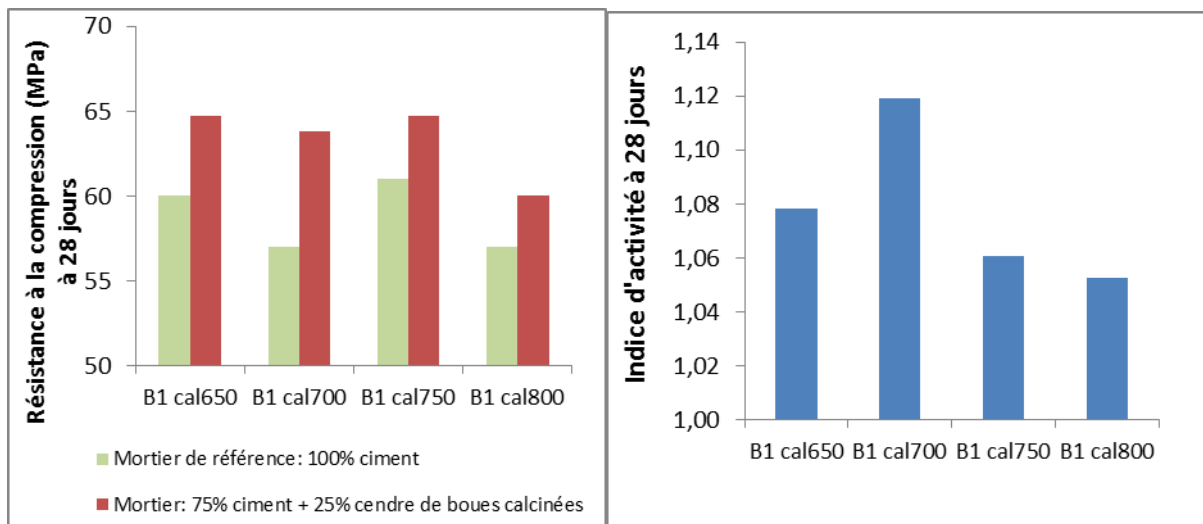


Figure 6 : (a) Résistance à la compression des mortiers à 28 jours, (b) indice d'activité.

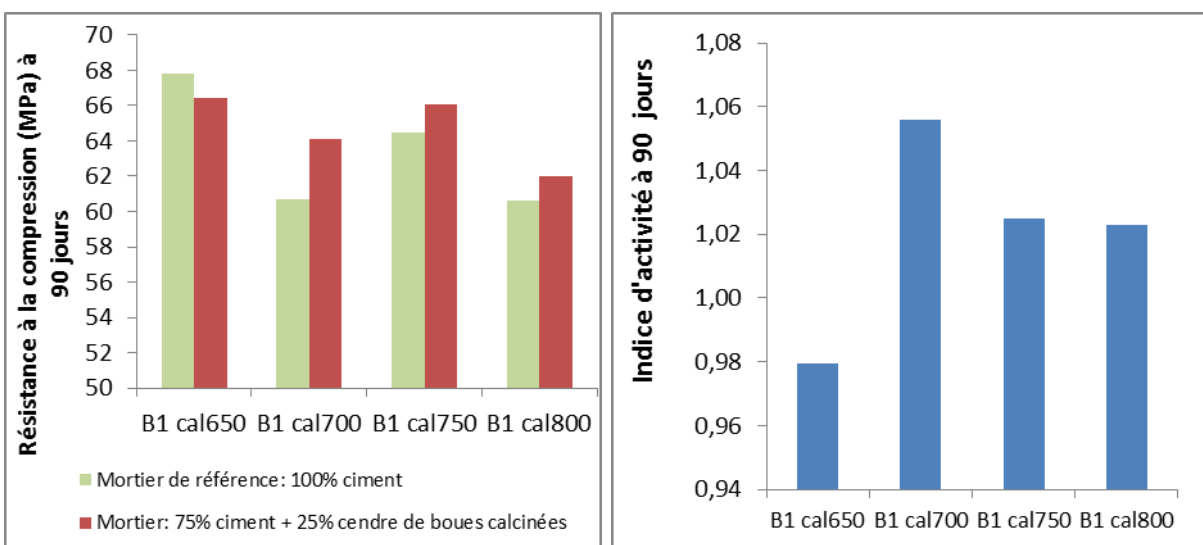


Figure 7 : Résistance à la compression des mortiers à 90 jours, (b) indice d'activité

Des figures 6a et 7a, on observe à 28 jours pour les mortiers modifiés une légère augmentation de la résistance à la compression par rapport au mortier de référence. A 90 jours, on observe également une augmentation de la résistance en compression.

La représentation de l'évolution de l'indice d'activité dans les figures 6b et 7b des différents mortiers modifiés (par ajout de 25% des cendres de boues calcinées à 650°C, 700°C, 750°C et 800°C) permet de mieux observer l'incidence des conditions d'incinération sur les mortiers modifiés. En effet, on constate aisément sur les figures 6b et 7b, que les mortiers réalisés à partir des cendres obtenus à 700°C ont des indices d'activité supérieurs. Similairement à la compression, les résultats des essais de flexion/traction sont présentés dans les figures ci-dessous (Cf. figures 8 et 9).

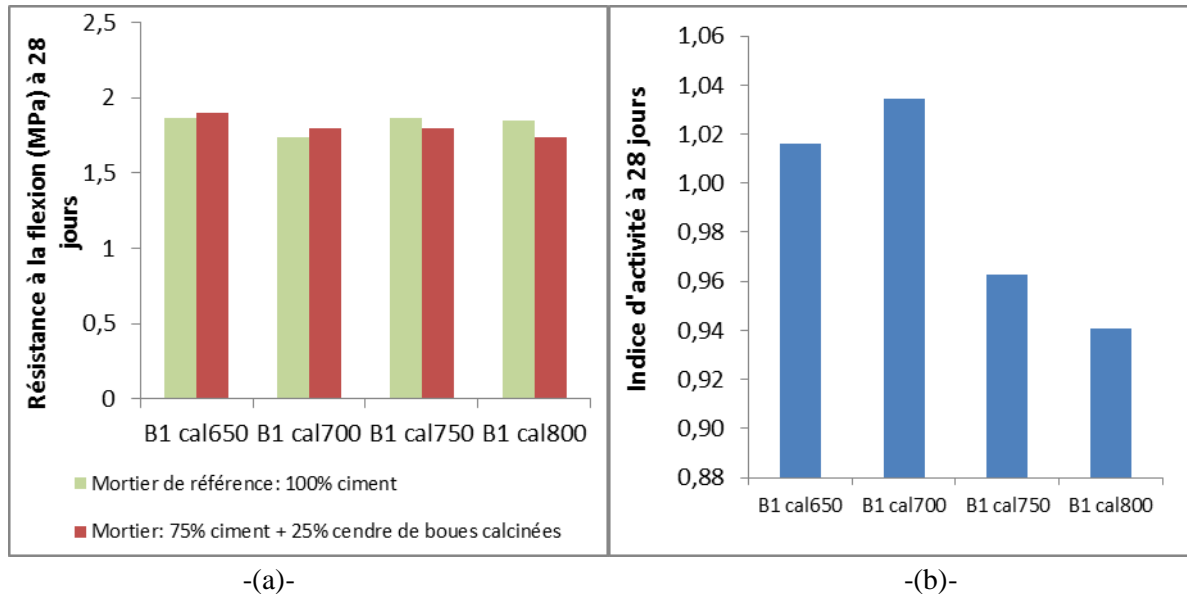


Figure 8 : (a) Résistance à la flexion/traction des mortiers à 28 jours, (b) indice d'activité.

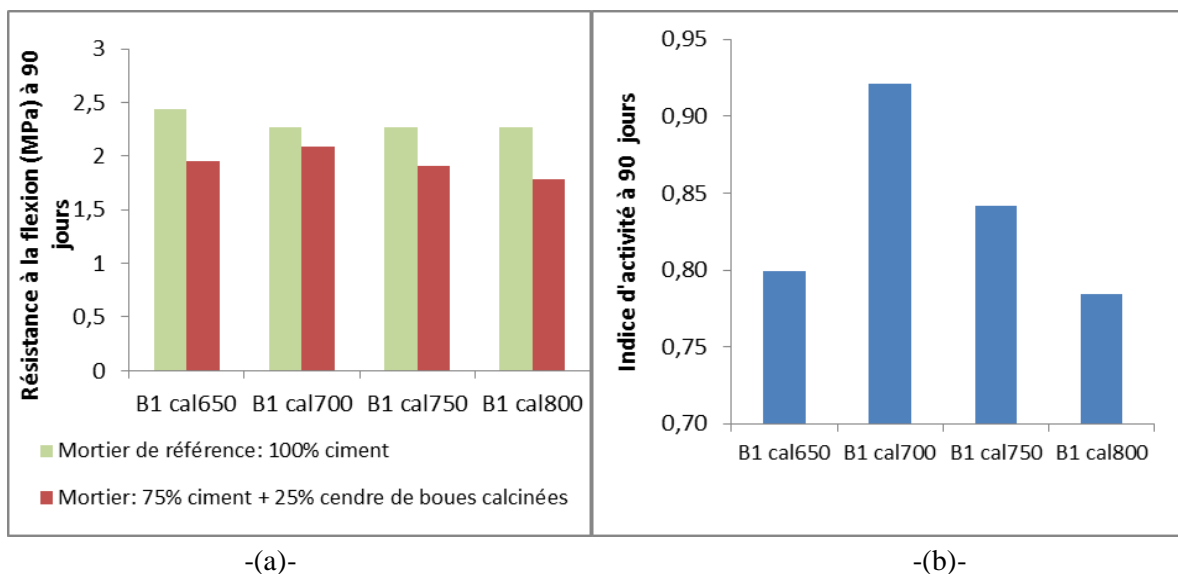


Figure 9 : Résistance à la flexion/traction des mortiers à 90 jours, (b) indice d'activité

Des figures 8 et 9, on remarque que les analyses faites lors des essais de compression sont semblables aux résultats de la flexion/traction.

L'ajout des cendres de boues calcinées en substitution du ciment Portland à hauteur de 25% en masse permet d'avoir un mortier à la résistance mécanique similaire aux mortiers de référence. Les indices d'activité obtenus ont une valeur moyenne proche de 1.

En conclusion, les résultats des tests d'activité pouzzolanique (Cf. figure 5) et d'indice d'activité (Cf. figure 6b; 7b, 8b et 9b.), mettent en évidence que le produit le plus réactif possible est obtenu à partir de la calcination des boues à une température de l'ordre de 700°C.

Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une étude expérimentale visant à améliorer, par incinération, la compatibilité minéralogique des boues de papeteries avec le ciment de portland, en vue de leur valorisation comme matière première secondaire dans la filière de cimenterie.

L'analyse par diffraction aux rayons X des boues calcinées à 650°C, 700°C, 750°C ou 800°C a montré qu'à partir d'une température de 650°C, la kaolinite disparaît pour se transformer en métakaolinite, alors que la calcite et le talc restent intacts. A partir de 800°C on observe une déshydroxylation importante du talc avec la disparition de la kaolinite et la formation de la gehlénite et une décarbonatation totale de la calcite.

Ces résultats sont confirmés par l'analyse infra-rouge des boues séchées et calcinées. Les cendres de boues calcinées à 650°C peuvent ainsi être valorisables comme pouzzolane réactive.

A une température de 700°C, l'activité pouzzolanique à 7 jours ou 28 jours est maximale et présente un indice d'activité supérieure à 70%. La calcination à 700°C permet d'avoir le produit le plus réactif possible. Par contre, les cendres obtenues à 800°C présentent une faible activité pouzzolanique. Ceci est confirmé par la formation de la gehlénite (2CaO, Al₂O₃, SiO₂) à cette température et mise en évidence lors de l'analyse par diffraction X.

Les essais de résistance à la compression (ou flexion/traction) des mortiers dont le ciment a été substitué à hauteur de 25% en masse par des boues de papeterie, préalablement incinérées sur une plage de température allant de 650°C à 800°C, montrent que ces mortiers présentent une résistance mécanique similaire aux mortiers de référence.

Références

1. Secrétariat d'état chargé de l'eau et de l'environnement, Ministère de l'énergie, des mines, de l'eau et de l'environnement, Maroc. Textes législatives et réglementaires, (2011) 167.
2. Boni, M.R., D'aprile, L., De casa, G. Environmental quality of primary paper sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 108 (2004) 4.
3. Agence de l'environnement de la maîtrise de l'énergie (ADEME). Industrie papetière française, Gestion et traitement des déchets, (2001) 211.
4. Mazouak, A., Sharrock, P., Guendouz, F., Morarech, M., Azmani, A. Cendres volantes issues de l'incinération des déchets solides d'une papeterie. Commune Urbaine de Tetouan, *Revue Déchets Sciences & Techniques*, 22 (2001) 5.
5. Pera, J., Amrouz, A. Development of highly reactive metakaolin from paper sludge. *Advanced Cement Based Materials*, 7 (1998) 8.
6. Ghrici, M., Kenai, S., Said-Mansour, M. Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement & Concrete Composites*, 29 (2007) 8.
7. Kakali, G., Perraki, T., Tsvivilis, S., Badogiannis, E. Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity. *Applied Clay Science*, 20 (2001) 8.
8. Elouazzani chahidi, D., Bouamrane, A., Mansouri, K., Fokam, C. Valorisation des boues de papeterie dans le BTP: analyses minéralogiques de l'incidence des conditions d'incinération. *Journal of Material and Environmental Sciences*, 4 (2012) 8.
9. Chabannet, M. Gel interne de matrices cimentaires sous sollicitation mécanique- Intérêt du métakaolin. Thèse. Lyon: INSA de Lyon, (1994) 314.
10. Amrouz, A. Transformation des boues de papeteries en pouzzolanes artificielles. Thèse. Lyon: INSA de Lyon, (1996) 176.
11. Pera, J., Ambroise, J., Biermann, J., Voogt, N. Use of Thermally Converted paper Residue as a Building Material. THIRD CANMET/ACI: Sustainable development of cement and concrete, San Francisco (USA), (2001)13.
12. Beauchamp, C.J., Charest, M.H., Gosselin, A. Examination of environmental quality of raw and composting de-inking paper sludge. *Chemosphere*, 46 (2002) 9.
13. Boni, M R., D'aprile, L., Casa, G.DE. Environmental quality of primary paper sludge. *Journal of Hazardous Materials*, B108, (2004) 4.

14. De larrad F. Structures granulaires et formulation des bétons. Collection Etudes et Recherches des Laboratoire des Ponts et Chaussées, OA 34, (2000) 414.
15. Baron, J., Ollivier, J.P. Les bétons: bases et données pour leur formulation. Paris: Edition Eyrolles, (1996) 522.
16. Rouessac, F., Rouessac, A. Analyse Chimique: Méthodes et Techniques Instrumentales modernes, 3ème Edition Masson, (1997) 372.
17. Traoré, K., Siméon Kabré, T., Blanchart, P. Gehlenite and anorthite crystallisation from kaolinite and calcite mix, *Ceramics International*, 29 (2003) 7.
18. Barret, P., Menetrier, D., Cottin, B. Study of silicate-lime solution reaction. *Cement and Concrete Research*, 7 (1977) 7.
19. Pera, J., Ambroise, J. Development of supplementary cementitious materials from paper sludge. *L'industria italiana del Cemento*, 758 (2000) 10.

(2014); <http://www.jmaterenvirosci.com>