

# La régénération de l'hydraulicité des matériaux de construction : Étude sur le C<sub>3</sub>S

A. ABIDAR<sup>1</sup>, O. BOUCHENAF<sup>1</sup>, S. MANSOUTRE<sup>2</sup>, R. HAMZAOU<sup>1</sup>, C. FLORENCE<sup>1</sup>, L. BARNES DAVIN<sup>2</sup>, C. CAPRA<sup>3</sup>, B. CLASSEN<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Université Paris-Est, Institut de Recherche en Constructibilité, ESTP, 28 avenue du Président Wilson, 94234 Cachan, France

<sup>2</sup> Vicat, 4 Rue Aristide Bergès, Les Trois Vallons 38080 L'Isle d'Abeau, France

<sup>3</sup> Lafarge France, 2 avenue du général de Gaulle 92148 Clamart Cedex, France

<sup>4</sup> Ciments Calcia – Heidelberg Cement, Pôle Route et Développement, BP01 Les Technodes 78930 Guerville.

## RESUME

Un travail de thèse a été lancé et financé par la Fondation ESTP, Vicat, Lafarge-Holcim France, et Ciments Calcia, pour étudier et comprendre les mécanismes de régénération de l'hydraulicité des bétons recyclés après différents traitements thermiques.

Dans cet article, nous présentons quelques résultats sur l'étude des mécanismes d'hydratation et déshydratation d'une phase pure : le C<sub>3</sub>S. Sur la base de l'étude bibliographique réalisée, le processus que nous proposons implique de traiter thermiquement des poudres, issues de concassage des éprouvettes d'alite pur hydratés à 28 jours à différentes températures entre 400°C et 800°C. À partir d'un traitement thermique de 600°C, une formation de la structure bélitique C<sub>2</sub>S a été identifiée par la DRX et confirmée par la spectroscopie infrarouge dans les deux pics à 845 et 993 cm<sup>-1</sup> montrant les vibrations des liaisons de type Si-O présentes dans le β-C<sub>2</sub>S.

**Mots-clefs** Ciment, Régénération de l'hydraulicité, Structure, Traitement thermique, Recyclage.

## I. INTRODUCTION

Le développement durable est devenu un véritable enjeu stratégique. Il concerne directement les matériaux de construction, que ce soit du point de vue des émissions de CO<sub>2</sub>, de la consommation d'énergie, de la consommation de matières premières, ou de la production de déchets au moment de la construction et de la déconstruction.

En termes de valorisation, le recyclage du béton est une solution existante pour réduire l'utilisation des ressources naturelles et les émissions associées au secteur des matériaux de construction. Cela se traduit par l'utilisation des déchets de béton comme granulats recyclés industriels pour béton neuf (Silva et al., 2019) ou comme matériaux de chaussée granulaires, en particulier dans les couches structurelles telles que les bases et les sous couches des chaussées (Jiménez et al., 2012). D'autres options sont envisageables pour utiliser la partie fine des déchets de béton (des fines issues des sables ou granulats de béton recyclé) soit en tant que matière première alternative entrant dans la fabrication du clinker, soit en tant qu'ajout dans le ciment ou encore en tant que liant hydraulique où le liant a été remplacé totalement le ciment.

Le présent travail est consacré à l'étude des mécanismes de régénération de l'hydraulicité des poudres C<sub>3</sub>S. Pour ce faire, nous allons suivre les phénomènes d'hydratation et de déshydratation via des traitements thermiques à différentes températures. Une étude structurale et microstructurale est également effectuée.

## II. Matériaux et méthodes

### A. Matériaux

Nous avons utilisé un silicate tricalcique « C<sub>3</sub>S » pur qui a été synthétisé par LafargeHolcim. La valeur D<sub>50</sub> de la poudre concassée et tamisée à 80µm est de 14,57 µm.

### B. Méthodes

Une pâte de C<sub>3</sub>S a été préparée avec un rapport eau/liant de 0,6 afin d'obtenir une hydratation rapide. La pâte a été coulée dans de petits flacons en plastique. Après 24h le démoulage est effectué et les éprouvettes sont immergées totalement dans l'eau à 20°C pendant la durée de cure.

Après 28 jours de cure, les éprouvettes ont été concassées à l'aide d'un concasseur RETSCH BB50 et tamisées à 80µm. Ensuite un traitement thermique des poudres obtenues a été réalisé dans un four électrique. Les traitements investigués ont été appliqués pendant une heure à différentes températures, de 400°C jusqu'à 800°C, suivis d'un refroidissement à l'air à température ambiante. Après les traitements thermiques, des caractérisations par diffraction des rayons X (DRX) et spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) sur les produits formés ont été effectuées.

Face à la complexité du traçage de l'histoire des traitements appliqués sur les matériaux dans notre étude, nous avons convenu d'une nouvelle nomenclature permettant de retracer la « généalogie » des liants hydrauliques étudiés. Par exemple, nous avons appelé « LH1\_G0\_A » le matériau de C<sub>3</sub>S pur Anhydre où LH1 signifie le liant hydraulique C<sub>3</sub>S, G0 correspond à la Génération 0 (C<sub>3</sub>S pur d'origine) et A signifie Anhydre. L'appellation « LH1\_G0\_H28j » fait référence quant à lui, au matériau C<sub>3</sub>S pur de Génération 0 hydraté pour une durée de 28 jours (H28j). Après traitement thermique, on obtient alors une nouvelle génération de matériau régénéré G1, Génération 1. Ces poudres, après traitement thermique sont alors appelées LH1\_G1\_H28j\_XT\_A avec X la température de traitement thermique de régénération appliquée sur la première pâte durcie de LH1\_G0\_28j, et A faisant référence à la poudre anhydre ainsi obtenue (avant réhydratation).

## III. Résultats et discussion

Une fois les poudres produites après les traitements thermiques, elles sont analysées par la diffraction des rayons X et la spectroscopie infrarouge et les résultats sont comparés à ceux de la poudre sans traitement thermique.

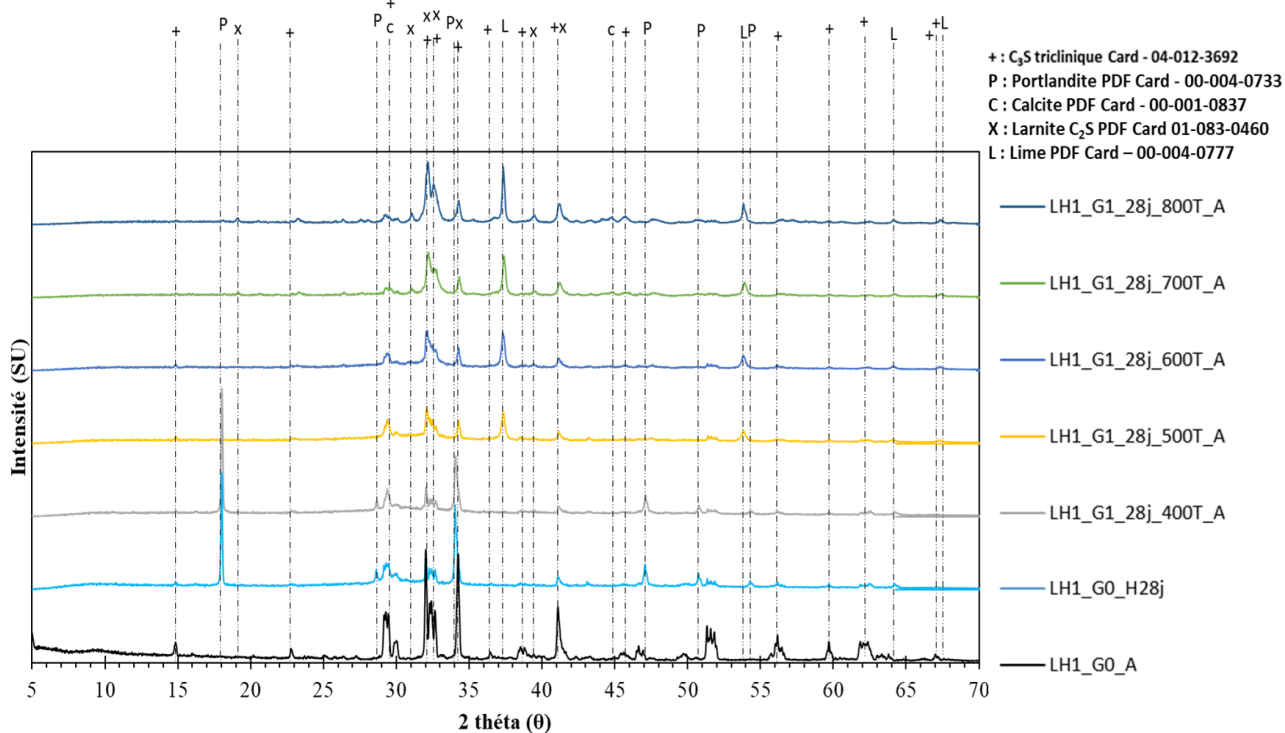
La figure 1 présente les différents diffractogrammes des LH1\_G0\_A (C<sub>3</sub>S pur anhydre), LH1\_G0\_H28j (C<sub>3</sub>S pur hydraté à 28 jours) et des traitements thermiques de LH1\_G0\_H28j (C<sub>3</sub>S pur hydraté à 28 jours) à différentes températures. La structure de LH1\_G0\_A est identifiée

comme structure triclinique selon la fiche PDF (04-012-3692). Après hydratation à 28 jours, la structure LH1\_G0\_H28j a montré la présence de portlandite, identifié avec la fiche PDF (00-004-0733) et aussi avec la présence de C<sub>3</sub>S non hydraté. En utilisant le logiciel TOPAS pour la quantification des structures cristallines par la méthode RIETVELD, nous avons trouvé une amorphisation d'environ 55% qui peut être attribuée à la formation des C-S-H, aussi 16% de l'alite non hydraté avec 25% de la portlandite.

Concernant les diffractogrammes des LH1\_G1\_H28j\_XT\_A (les LH1\_G0\_H28j traités thermiquement à différentes températures pendant une heure), nous avons observé la disparition des pics de portlandite à 500°C. Il s'agit d'une réaction de déshydroxylation de la portlandite qui commence à partir de 450°C, selon la formule suivante :  $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ .

Le pic correspondant à la chaux (00-004-0777) augmente avec la température de traitement. Cela peut être due à la décomposition de CaCO<sub>3</sub> et de Ca(OH)<sub>2</sub>. On remarque l'apparition de ce pic à partir de 500 °C, et devient plus intense à 800°C. Généralement dans la littérature, on trouve la décomposition de la structure CaCO<sub>3</sub> qui commence à partir de températures proches de 750 °C selon la formule suivante  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ .

À partir de 600°C, on remarque une apparition des pics attribués, à la formation de la structure bélitique silicate dicalcique C<sub>2</sub>S identifié avec la fiche PDF (01-083-0460).



**FIGURE 1.** Diffractogramme de LH1\_G0\_A, LH1\_G0\_H28j et des traitements thermiques de LH1\_G0\_H28j à différentes températures

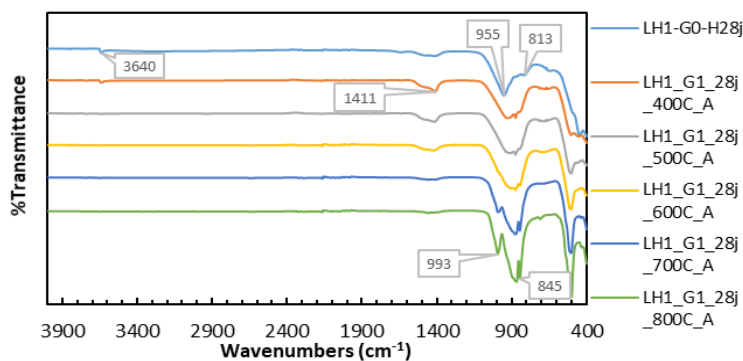
La Figure 2 présente les spectres de la pâte de C<sub>3</sub>S à 28 jours LH1\_G0\_H28j ainsi que les traitements thermiques effectués LH1\_G1\_H28j\_XT à différentes températures pendant une heure. Concernant la pâte LH1\_G0\_H28j, nous avons identifié les bandes de liaison type Si-O à

955  $\text{cm}^{-1}$  et à 813  $\text{cm}^{-1}$ , caractéristique de la présence des silicates de calcium hydratés (C-S-H). Le tableau 1 résume les différentes bandes trouvées associées aux types de liaisons chimiques. Après les différents traitements thermiques, nous avons constaté à partir de 500°C la disparition de pic à 3640  $\text{cm}^{-1}$  caractéristique de la bande de liaison type O-H provenant de la portlandite. Aussi nous avons remarqué le déplacement de la bande à 955  $\text{cm}^{-1}$  caractéristique de la liaison type Si-O vers 880  $\text{cm}^{-1}$ , qui peut être due à la décomposition des CSH.

À partir de 600°C une apparition de deux pics à 845 et 993  $\text{cm}^{-1}$  caractéristique des liaisons type Si-O présentes dans le  $\beta$ -C<sub>2</sub>S (Fernández-Carrasco et al., 2012).

**TABLEAU 1.** Pics IR de quelques groupements chimiques.

Groupement chimique	Nombre d'onde ( $\text{cm}^{-1}$ )
O-H ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )	3640
C-O ( $\text{CaCO}_3$ )	1411
Si-O (C-S-H)	955, 813



**FIGURE 2.** Spectre infrarouge des différents produits obtenus par traitement thermique pendant une heure

#### IV. Conclusion

Les transformations de phase dans les poudres de pâtes de C<sub>3</sub>S hydraté ont été étudiées en fonction de la température de traitement dans la gamme de 400-800 °C. La chaux s'est formée à la suite de la décomposition de la portlandite et de CaCO<sub>3</sub>.

Les résultats expérimentaux démontrent qu'une nouvelle phase régénérée peut être produite à partir des pâtes de C<sub>3</sub>S hydraté, grâce à un traitement thermique. L'analyse par la DRX et le FTIR montrent que la bélite obtenue est un  $\beta$ -C<sub>2</sub>S. La bélite a commencé à se former à une température de 600 °C et sa formation a été accompagnée par la décomposition des CSH.

#### REFERENCES

- Fernández-Carrasco, L., Torrens-Martín, D., Morales, L.M., Martínez-Ramírez, S., 2012. Infrared Spectroscopy in the Analysis of Building and Construction Materials. *Infrared Spectrosc. - Mater. Sci. Eng. Technol.* <https://doi.org/10.5772/36186>
- Jiménez, J.R., Ayuso, J., Agrela, F., López, M., Galvín, A.P., 2012. Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. *Resour. Conserv. Recycl.* 58, 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.012>
- Silva, R. V., de Brito, J., Dhir, R.K., 2019. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. *J. Clean. Prod.* 236, 117629. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117629>