

Lyon, France
5-6 juillet 2012

Impact de la chaux dans un mélange de ciment Portland et de ciment sulfoalumineux

R. Trauchessec ^A, J-M. Mechling ^A, A. Lecomte ^A, A. Roux ^B, B. Le Rolland ^B

A Institut Jean Lamour, UMR 7198, CP2S, Équipe matériaux pour le génie civil, Université de Lorraine, IUTNB, 54600 Villers-lès-Nancy, France.

B CTG, Italcementi Group, rue des Technodes, 78931 Guerville, France.

RÉSUMÉ: Dans le cadre de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'utilisation du ciment sulfoalumineux est une alternative partielle ou totale au ciment Portland traditionnellement utilisé. Cet article étudie les propriétés d'un liant contenant 60% de ciment sulfoalumineux et 40% de ciment Portland dans lequel la quantité de chaux a été modulée. Ce paramètre influe considérablement sur les résistances en compression à court et à long termes, ainsi que sur la stabilité dimensionnelle. On montre ici que ces modifications sont liées aux mécanismes réactionnels.

MOTS CLES : Ciment sulfoalumineux – Ciment Portland – Chaux – Mortiers – Hydratation.

1. INTRODUCTION

La production du ciment Portland, traditionnellement utilisé pour la réalisation des ouvrages en génie civil, est considérée comme responsable de près de 5% des émissions mondiales de dioxyde de carbone (Damtoft *et al.*, 2008).

Le ciment sulfoalumineux est une des alternatives à l'utilisation de ce ciment (Juenger *et al.*, 2011) car il utilise moins de calcaire émetteur de CO₂ (décarbonatation) et sa cuisson se fait à température plus faible (1250°C à la place de 1450°C). Comparé au ciment Portland, le ciment sulfoalumineux compte aussi d'autres avantages, tels un durcissement plus rapide et une meilleure stabilité dimensionnelle. Ces propriétés peuvent être mises à profit pour de nouvelles applications (Péra et Ambroise, 2004). Cependant, l'utilisation de bauxite rend la production de ce ciment plus onéreuse et sa durabilité n'est pas encore entièrement démontrée.

Le ciment sulfoalumineux est utilisé depuis les années 1960 pour la réalisation de liants à retrait compensé ou expansif, dont les spécifications répondent à l'ASTM C 845 - 04 (ciment de type K) (Inconnu, 1964). Ces ciments sont habituellement composés d'environ 75% de ciment Portland et de 25% d'un mélange de clinker sulfoalumineux, de sulfate de calcium et de chaux. La yeelimite (C₄A₃S̄) composant principal du clinker sulfoalumineux, forme alors en présence d'anhydrite (CS) et de chaux (CH), de l'ettringite (C₆A₃H₃₂) (réaction 1) qui provoque un gonflement compensant le retrait endogène du ciment Portland (Ish-Shalom et Bentur, 1974). Ici, l'ettringite se forme à la surface des grains de yeelimite (réactions topo-chimiques) ou bien présente une structure colloïdale (Ogawa et Roy, 1982) (Mehta, 1973).



Lorsque le ciment sulfoalumineux est utilisé seul (absence de chaux), la yeelimite conduit à la formation d'ettringite et de gibbsite (AH₃) (réaction 2). L'ettringite se forme alors dans la solution et ne provoque pas d'expansion (Cohen, 1983).



La chaux modifie également la cinétique de réaction de la yeelimite (Hanic *et al.*, 1989) (F. Winnefeld et Barlag, 2009).

Les mécanismes décrits ci-avant ont été observés sur des phases de synthèses et des ciments. La présente étude s'intéresse à des mélanges contenant une forte proportion de ciment sulfoalumineux (60%), avec trois teneurs en chaux différentes afin d'évaluer l'impact de ce constituant. Ce type de mélange a pour intérêt de combiner potentiellement les avantages des ciments sulfoalumineux (moindre émission de dioxyde de carbone, prise rapide...) et ceux du ciment Portland (coût, protection des armatures...).

Dans ce type de mélange, outre le rôle de la chaux, le sulfate de calcium ajouté est un paramètre crucial. En absence de sulfate et en absence de chaux (réaction 3), l'hydratation de la yeelimite conduit à la formation de monosulfoaluminate (C₄A \bar{S} H₁₂) et de gibbsite (AH₃).



En absence de sulfate et en présence de chaux, la yeelimite forme, selon la quantité de chaux, de l'hydrogrenat et/ou de la gibbsite, ainsi qu'une solution solide de monosulfoaluminate (C₃A. ½C \bar{S} . ½CA. H_x) et d'hydrate d'aluminate de calcium (C₄AH_x) (Kaprálík et Hanic, 1989) (Figure 1).

Reactants	Products
C ₄ A ₃ \bar{S}	M _x + AH ₃
C ₄ A ₃ \bar{S} + 4 CH	M _x ^{SS} + AH ₃
C ₄ A ₃ \bar{S} + 6 CH	M _x ^{SS} + C ₃ AH ₆ + AH ₃
C ₄ A ₃ \bar{S} + 7 CH	M _x ^{SS} + C ₃ AH ₆
C ₄ A ₃ \bar{S} + 10 CH	M _x ^{SS} + C ₃ AH ₆ + CH

M_x = C₄A \bar{S} H_x; M_x^{SS} = C₃A.1/2C \bar{S} .1/2CH.H_x

Figure 1. Produits d'hydratation de la yeelimite en présence de chaux et en absence d'anhydrite (Hanic *et al.*, 1989).

La nature du sulfate de calcium utilisé (gypse, anhydrite) a également un impact sur la cinétique et sur les produits d'hydratation de la yeelimite (Marchi et Costa, 2011) (Pelletier-Chaignat *et al.*, 2011).

Dans les mélanges de ciments sulfoalumineux et Portland contenant une forte proportion de ciment sulfoalumineux, l'hydratation de l'alite (C₃S) conduit, selon la réaction 4, à la formation de strätlingite (C₂ASH₈) et de portlandite (Pelletier *et al.*, 2010).



Hormis l'étude de l'effet de l'ajout de chaux sur les propriétés physiques (résistance en compression et stabilité dimensionnelle sur mortiers), l'objectif de cette recherche est de décrire également les mécanismes, la cinétique et les produits d'hydratation observés.

2. MATERIAUX ET METHODES

Le ciment Portland utilisé est un ciment gris CEM I 52,5 N (NF EN 197-1). Le ciment sulfoalumineux est un mélange de clinker sulfoalumineux (77,5%) et d'anhydrite naturelle (22,5%). La chaux utilisée est une chaux aérienne (Ca(OH)₂) commerciale. La composition chimique de ces matériaux a été déterminée par fluorescence X. La quantité de chaux libre a été mesurée selon la méthode PT 207

CERILH (1970) (tableau 1). La composition minéralogique a, quant à elle, été déterminée par diffraction des rayons X et analyse Rietveld (tableau 2).

	Ciment Portland	Ciment sulfoalumineux	Chaux
Chaux libre	0,9	0,2	/
SiO ₂	20,0	5,4	0,6
Al ₂ O ₃	4,8	24,6	0,2
Fe ₂ O ₃	3,1	1,0	0,1
TiO ₂	0,2	0,4	-
MnO	-	0,1	-
CaO	63,3	39,4	73,3
MgO	2,8	3,4	0,6
SO ₃	3,4	22,4	0,3
K ₂ O	0,5	0,4	-
Na ₂ O	0,2	0,6	-
P ₂ O ₅	0,2	0,1	-
SrO	0,1	0,4	-
Perte à 950°C	1,2	1,4	25,1

Tableau 1. Composition chimique du ciment Portland, du ciment sulfoalumineux et de la chaux.

	Ciment Portland	Ciment sulfoalumineux	Chaux
Alite (C ₃ S)	62	-	-
Bélite (C ₂ S)	15	8	-
Aluminate de calcium (C ₃ A)	6	-	-
Brownmillerite (C ₄ AF)	11	-	-
Périclase (M)	3	3	-
Gypse (C \bar{S} H ₂)	3	-	-
Bassanite (C \bar{S} H _{0,5})	2	-	-
Anhydrite (C \bar{S})	-	22	-
Calcite (C \bar{C})	1	-	4
Chaux (CH)	-	-	96
Quartz (S)	-	1	-
Yeelimite (C ₄ A ₃ \bar{S})	-	50	-
Fluorellestadite (C ₁₀ S ₃ \bar{S} ₃ F ₂)	-	8	-
Mayenite (C ₁₂ A ₇)	-	3	-
Perovskite (CT)	-	2	-
Dolomite (CM \bar{S} ₂)	-	2	-

Tableau 2. Composition minéralogique du ciment Portland, du ciment sulfoalumineux et de la chaux.

Le mélange de référence contient 60% de ciment sulfoalumineux et 40% de ciment Portland. Afin d'étudier l'impact de la chaux, trois autres mélanges ont été réalisés. Ils contiennent respectivement 1, 2 et 4% de chaux, en substitution au ciment Portland (tableau 3).

Mélanges	0%	1%	2%	4%
Ciment sulfoalumineux	60	60	60	60
Ciment Portland	40	39	38	36
Chaux	0	1	2	4

Tableau 3. Proportions en pourcentage massique des différents constituants dans les mélanges.

Les résistances en compression à 6 heures, 1, 3, 7 jours, ainsi qu'à 1 et 3 mois, ont été mesurées sur des éprouvettes 4x4x16 de mortiers réalisés sans adjuvant, avec 450g de ciment, 1350g de sable normal et un rapport eau/ciment (E/C) de 0,5 (NF EN 196-1). Les moules ont été conservés 4h à 20°C dans un sac hermétique. Les éprouvettes ont été ensuite démoulées et immergées dans l'eau à 20°C.

Les variations dimensionnelles ont été mesurées pendant trois mois sur les éprouvettes 4x4x16 conservées dans l'eau à 20°C. Ces mesures ont été conduites selon la norme NF EN 196-3. Comme la montée en résistance des mélanges à base de ciment sulfoalumineux est particulièrement rapide, la mesure de la longueur initiale (l₀) a pu être effectuée dès que le démoulage de chacun des mélanges est devenu possible, c'est-à-dire dès 2h pour les éprouvettes contenant 2 et 4% de chaux

et dès 4h pour les mélanges à 0 et 1% de chaux. Les éprouvettes démoulées dès 2h n'ont été immergées qu'à 4h, après conservation dans un sac hermétique.

Afin de mesurer les variations dimensionnelles des différents mortiers durant la prise, des essais ont également été réalisés sur un banc de retrait de section triangulaire isocèle de longueur 40 cm, équipé de capteurs micrométriques, et conservé dans une salle à 20°C et à 50% d'humidité relative. Ces mesures ont duré 2 jours.

Les flux de chaleurs dégagés lors de l'hydratation ont été mesurés pendant 6 jours par calorimétrie isotherme (calorimètre commercial TAM AIR) sur des pâtes de composition (tableau 3) et de rapport E/C (E/C=0,5) identiques aux mortiers.

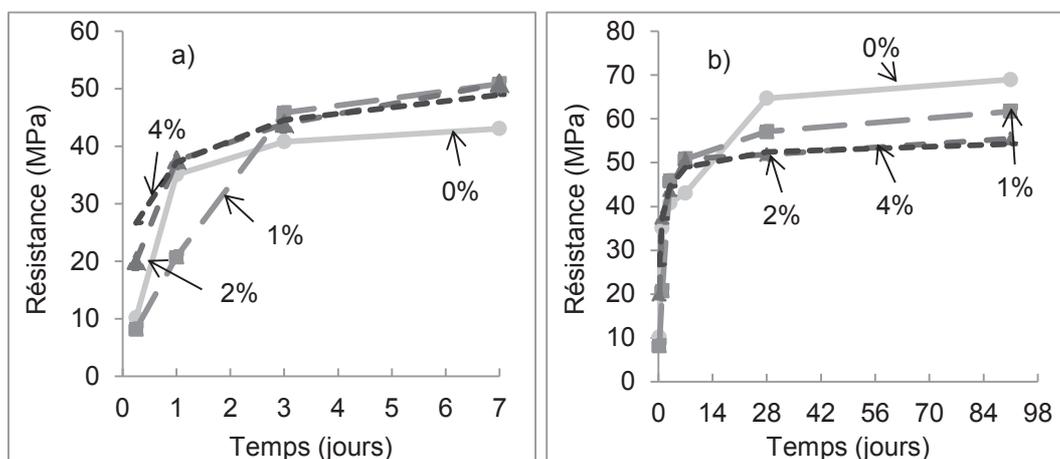
La caractérisation des composés consommés et produits durant l'hydratation a été effectuée par diffraction des rayons X et analyse thermogravimétrique sur poudres. Ces poudres sont issues de pâtes de composition identique à celles utilisées pour la calorimétrie. Elles ont été conservées à 20°C dans un pilulier. A échéance (1, 7 et 28 jours), elles ont été broyées et tamisées à 80µm. L'analyse thermogravimétrique a été réalisée lors d'une montée en température de 20 à 1000°C à une vitesse de chauffe de 10°C/min. La diffraction des rayons X a été effectuée de 5 à 70° en 2θ sur un diffractomètre équipé d'une anticathode de cuivre. Les analyses par microscopie électronique en transmission ont été effectuées après dispersion de la poudre dans l'acétone à l'aide d'un bain à ultrasons.

3. RESULTATS

Les mélanges sont repérés par leur pourcentage de chaux : 0, 1, 2 ou 4%.

3.1 Résistances en compression

Les résistances en compression (Figures 2) indiquent différentes tendances. A 6 heures, l'ajout de chaux (2 et 4%) augmente les résistances (Figure 2a) alors qu'à 28 et 91 jours (Figure 2b), il les diminue.



Figures 2. Résistances en compression à court terme (Figure 2a) et à long terme (Figure 2b).

Entre 6 heures et 28 jours, aucune relation ne peut clairement décrire cette inversion. Par exemple, à 1 jour (Figure 2a), les résistances des mélanges sont proches de 35 MPa, sauf pour celui à 1% de chaux qui présente une résistance de 20 MPa seulement. A 7 jours, pour les ajouts de 1, 2 et 4%, la résistance avoisine 48 MPa, alors que sans chaux (0 %), elle n'atteint que 35 MPa. Ces résultats montrent que l'ajout d'une faible quantité de chaux provoque une modification radicale des résistances durant tout le processus de durcissement, depuis la prise jusqu'à 3 mois.

3.2 Variation dimensionnelle dans l'eau et dans l'air

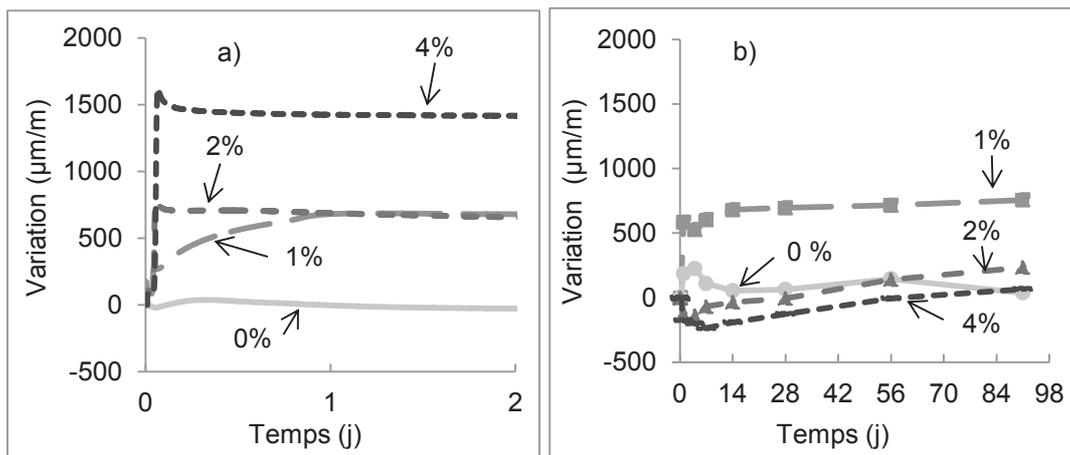
La présence de chaux modifie également les variations dimensionnelles dans l'air (banc de retrait entre 0 et 2 jours) et dans l'eau (éprouvettes 4x4x16 jusqu'à trois mois).

Dans l'air à 20°C et 50% d'humidité (Figure 3a), le témoin (0% de chaux) reste stable durant toute la période de mesure alors que le mélange à 1% subit une expansion conséquente qui atteint environ 700 $\mu\text{m/m}$ après un jour d'hydratation. Pour 2 et 4% de chaux, une expansion plus conséquente encore (700 à 1500 $\mu\text{m/m}$) survient dès les deux premières heures d'hydratation (expansion initiale). Elle est suivie d'une amorce de retrait. Ces expansions ayant lieu durant la prise (avant la mesure de l_0), elles ne peuvent donc pas être enregistrées sur les éprouvettes 4x4x16.

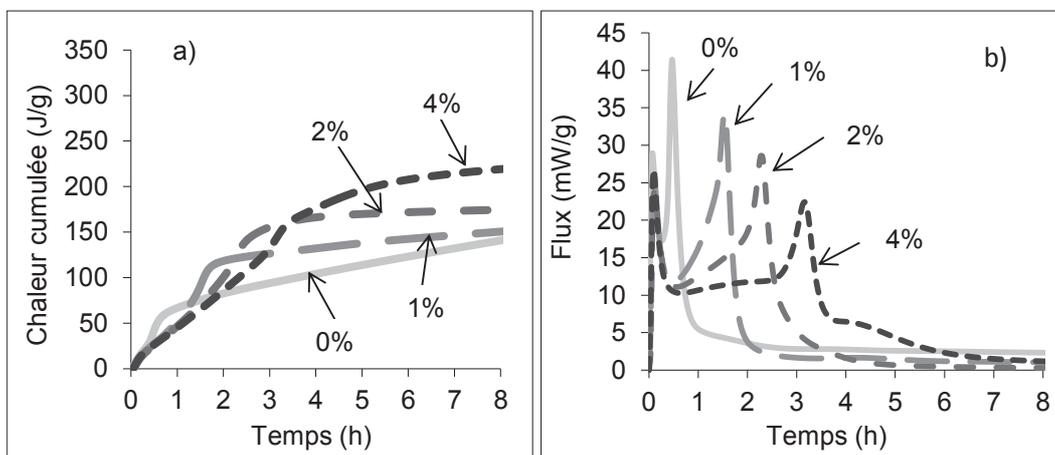
Dans l'eau (Figure 3b), le témoin sans chaux reste relativement stable, malgré quelques fluctuations n'excédant pas 200 $\mu\text{m/m}$. Le mélange incorporant 1% de chaux présente le même signal dans l'eau que dans l'air, c'est-à-dire une expansion progressive qui se stabilise à 700 $\mu\text{m/m}$ environ après 1 jour. Cette similitude entre l'eau et l'air s'explique notamment par le fait que l'expansion s'est encore peu manifestée au moment de la mesure de la longueur initiale l_0 , c'est-à-dire 4 heures après fabrication. C'est l'inverse pour les mélanges à 2 et 4%, pour lesquels l'expansion initiale s'est produite avant la mesure de l_0 (2 heures). Les mesures sur éprouvettes 4x4x16 de ces deux mélanges ne traduisent donc pas leur expansion réelle. Les courbes ne montrent plus qu'un certain retrait (thermique ?) jusqu'à 200 $\mu\text{m/m}$ – probable poursuite de celui observé précédemment dans l'air – suivi d'une légère expansion à partir de 7 jours.

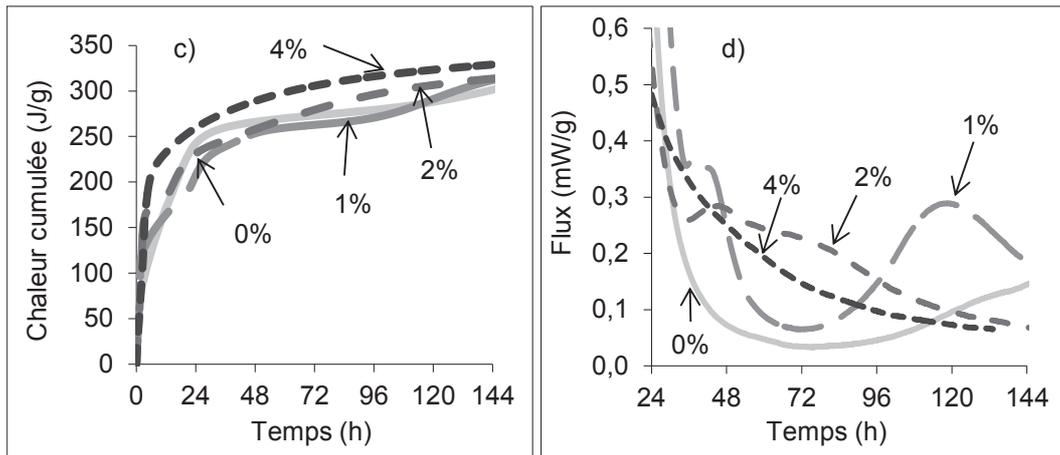
3.3 Calorimétrie isotherme

Durant les huit premières heures d'hydratation, la quantité de chaleur dégagée est directement reliée à la quantité de chaux ajoutée au liant (Figure 4a). Lorsqu'elle augmente, le second pic (Figure 4b) est décalé de plusieurs heures (jusqu'à 3h pour 4%). Dans les 6 jours qui suivent (Figures 4c et 4d), de faibles flux sont détectés et confirment que la chaux modifie les réactions à diverses échéances.



Figures 3. Stabilité dimensionnelle à 20°C et 50% d'humidité relative (Figure 3a) et à 20°C dans l'eau (Figure 3b).

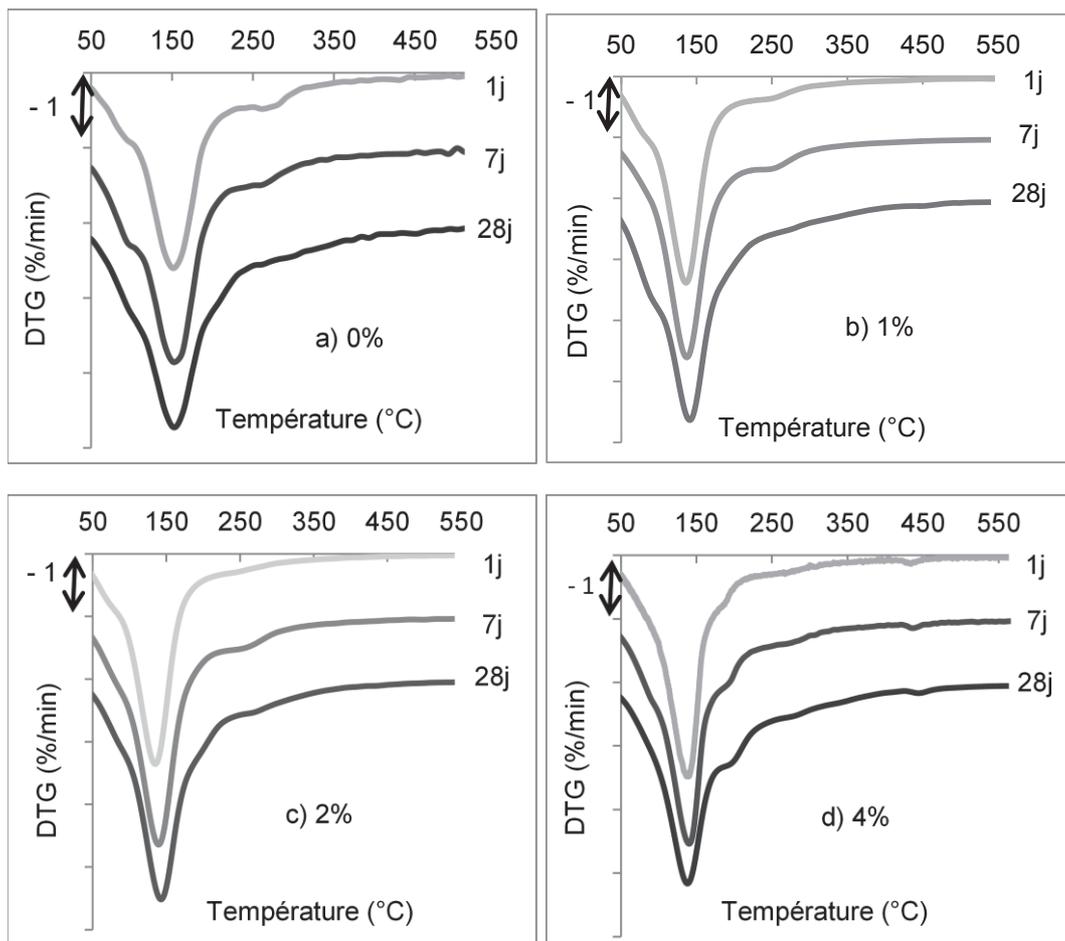




Figures 4. Chaleur cumulée (Figure 4a) et flux (Figure 4b) durant les premières heures et à plus long terme (Figures 4c et 4d).

3.4 Analyses thermogravimétriques

L'analyse thermogravimétrique (Figures 5a à d) permet d'identifier les hydrates formés. On observe dans tous les cas la formation majoritaire d'ettringite (perte à 150°C).



Figures 5. Signal DTG des pâtes avec 0% (Figure 5a), 1% (Figure 5b), 2% (Figure 5c) et 4% (Figure 5d) de chaux.

La gibbsite (perte à 260°C) est également présente à 1 et 7 jours pour les échantillons contenant 0 et 1% de chaux (Figures 5a et b), ainsi qu'à 7 jours pour l'échantillon contenant 2% de chaux (Figure 5c).

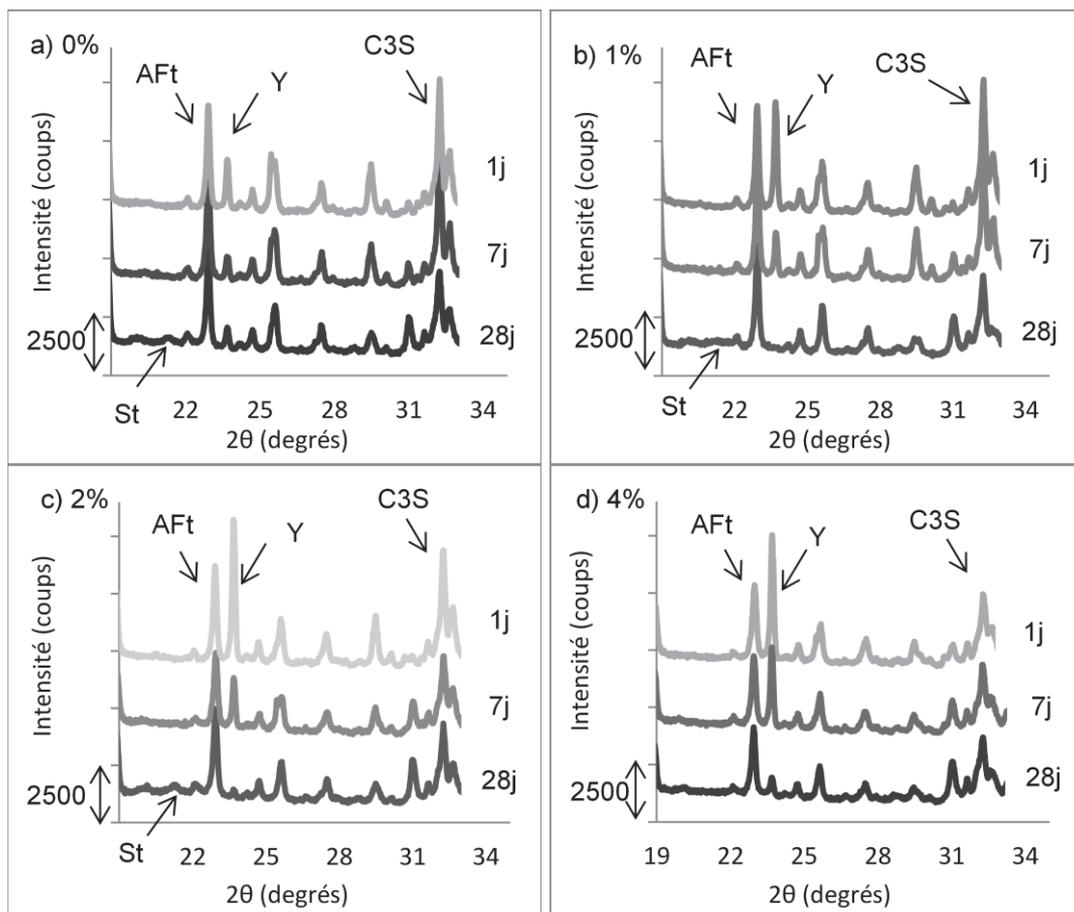
On remarque également la présence de monosulfoaluminate (épaulement à 190°C) d'autant plus marquée que l'ajout de chaux est important. Pour 4% de chaux (Figure 5d), le monosulfoaluminate est observable après un jour d'hydratation seulement.

Avec 4% de chaux, une légère perte de masse est aussi détectée à 430°C. Elle peut correspondre soit à de la chaux qui n'aurait pas réagi, soit à la formation de Portlandite issue de l'hydratation du ciment Portland (réaction 4).

3.5 Diffraction des rayons X

Cette technique permet notamment d'étudier l'hydratation de la yeelimite et de l'alite ainsi que les produits d'hydratation cristallisés (ettringite, strätlingite). Les diffractogrammes obtenus montrent que la yeelimite (Y) réagit fortement le premier jour, tout comme l'anhydrite qui est pratiquement consommée dès cette échéance (quasi disparition du pic). On observe aussi à 1 jour que la variation relative de la quantité de yeelimite consommée et d'ettringite formée (AFt) se corrèle assez bien à la quantité de chaux présente (Figures 6a à 6d). En effet, l'intensité des raies de ces deux constituants évolue de façon complémentaire, indiquant qualitativement que l'hydratation de la yeelimite est contrôlée par la présence de la chaux.

De la strätlingite (St) (faible bombement pour $2\theta=21^\circ$) (Figures 5a, b et c) apparaît après 28 jours. Elle provient de l'hydratation de l'alite (C_3S) qui ne débute qu'après 7 jours, lorsque la yeelimite s'est hydratée.



Figures 6. Diffractogrammes des pâtes avec 0% (Figure 6a), 1% (Figure 6b), 2% (Figure 6c) et 4% (Figure 6d) de chaux.

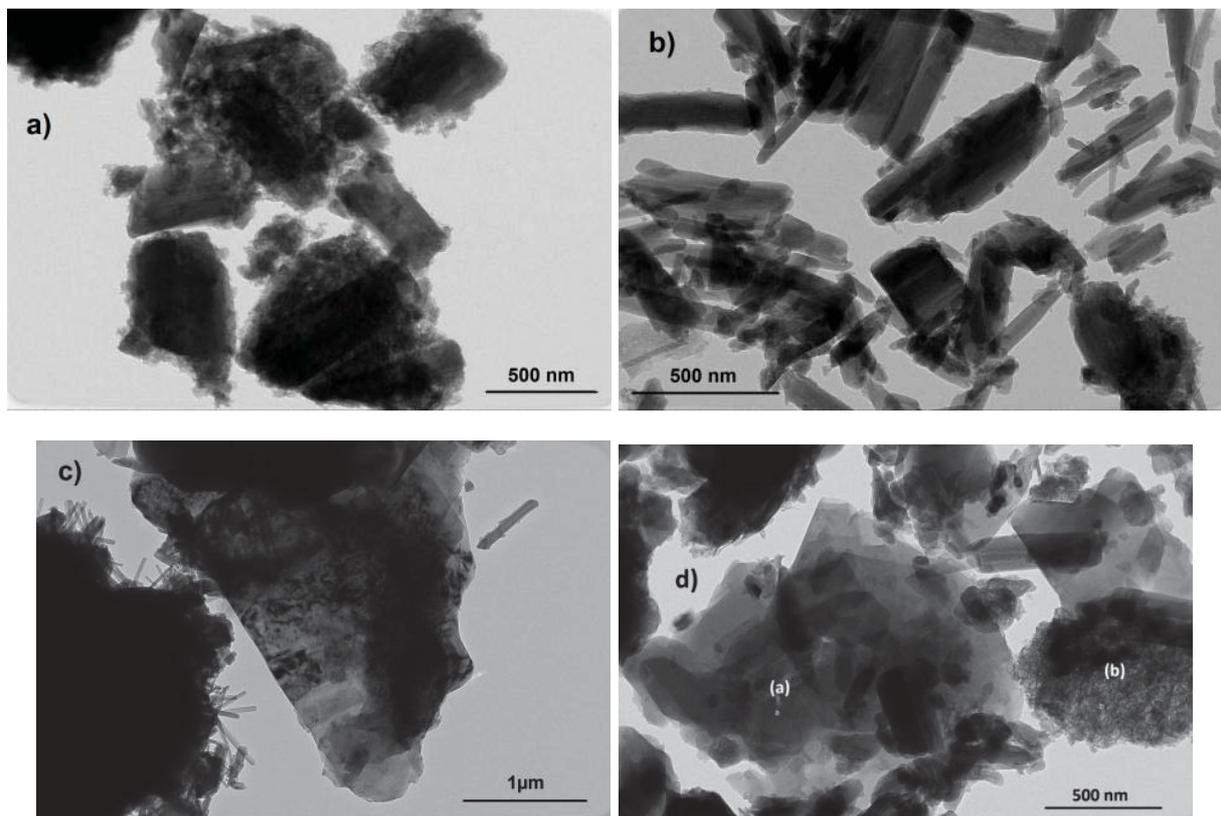
Un bombement de la ligne de base entre 10 et 11° (plage non présentée ici) apparaît également sur les diffractogrammes. On l'attribue à des phases AFm faiblement cristallisées ($C_4A\bar{S}H_{12}$, solution

solide: $C_3A \cdot 1/2\bar{C}\bar{S} \cdot 1/2CA \cdot H_x$). Des essais complémentaires avec étalon interne et analyse Rietveld associée, non présentés ici, montrent que la quantité de phases amorphes varie également au cours du temps.

3.6 Microscopie Électronique en Transmission (MET)

La microscopie électronique en transmission permet d'identifier les hydrates formés et de comparer leurs morphologies (Figures 7a à d). A 1 jour, en absence de chaux (Figure 6a), on observe que les baguettes d'ettringite sont entourées d'un gel amorphe identifié par analyses EDS comme étant de la gibbsite. En présence de 2% de chaux (Figure 6b), ce gel n'est que rarement observé. En présence de 4% de chaux (Figure 6c), un feuillet de Portlandite (au centre de l'image) ainsi que de très petits cristaux d'ettringite à la surface d'un grain non identifié en raison de son épaisseur (à gauche) ont pu être observés. Ces analyses confirment que durant le premier jour, il se forme de l'ettringite et de la gibbsite en absence de chaux, et uniquement de l'ettringite en présence de chaux (réactions 1 et 2).

A plus long terme (28 jours), des feuillettes et des gels amorphes sont observés dans tous les échantillons. Par exemple, les analyses chimiques (tableau 4) de particules du mélange à 2% (Figure 7d) montrent qu'il s'agit de monosulfoaluminate (particule cristallisée repérée (a)) et d'un gel de composition proche de la strätlingite (particule amorphe repérée (b)). Pour un même échantillon, la composition et la cristallinité de ces deux composés varient fortement d'une particule à l'autre.



Figures 7. Clichés après 1 jour d'hydratation avec 0% (Figure 7a), 2% (Figure 7b) et 4% (Figure 7c) de chaux. Cliché après 28 jours du mélange contenant 2% de chaux (Figure 7d).

Éléments	Particule (a) (monosulfoaluminate)	Particule (b) (gel de composition proche de la strätlingite)
Na	-	0,4
Mg	-	2,3
Al	9,4	8,0
Si	1,2	8,3
S	4,9	0,6
Ca	18,6	11,9
O	65,4	67,8
Fe	0,5	0,7

Table 4. Analyses chimiques (pourcentage atomique) des particules (a) et (b) du cliché 7d.

4. BILAN, CONCLUSION

Durant tout le processus de durcissement, la chaux a un impact considérable sur les résistances et la stabilité dimensionnelle du mélange étudié ici, contenant 60% de ciment sulfoalumineux et 40% de ciment Portland.

Sans ajout de chaux, la montée en résistance est rapide (démoulage possible à 4h) et atteint 35 MPa à 1 jour. Les variations dimensionnelles sont faibles (< 200µm/m). Durant les 7 premiers jours, l'hydratation de la yeelimite s'accompagne de la formation de gibbsite et d'ettringite. Par la suite, l'hydratation de l'alite conduit à la formation de strätlingite. Le monosulfoaluminate n'est observé que tardivement.

Le mélange contenant 1% de chaux a une résistance en compression moindre à 1 jour (20 MPa) et une expansion de près de 700 µm/m. Ce faible pourcentage de chaux modifie déjà les flux de chaleur, ainsi que la quantité d'ettringite formée et de yeelimite consommée au cours de l'hydratation.

Les mélanges contenant 2 et 4% de chaux ont des résistances qui augmentent très fortement durant les premières heures (plus de 19 MPa en compression après 6h). Cette augmentation est accompagnée d'un très fort dégagement de chaleur et d'une expansion importante (banc de retrait). Cette phase du durcissement correspond à la réaction 1 qui conduit à la formation massive d'ettringite en présence de chaux. Très rapidement, la vitesse d'hydratation diminue. La formation de monosulfoaluminate dès 24h (DTG) indique un manque de sulfate. La yeelimite réagit alors selon la réaction 3, conduisant également à la formation de monosulfoaluminate et de gibbsite.

Ces travaux montrent donc que la présence de chaux, même en très faible quantité, dans les mélanges "ciment Portland / ciment sulfoalumineux" contenant une forte proportion de ciment sulfoalumineux, modifie significativement les mécanismes réactionnels à court et à long terme (nature des hydrates, proportions, morphologie). Les résistances et la stabilité dimensionnelle des liants fabriqués avec ces produits varient alors considérablement.

Cette chaux peut être apportée directement dans le mélange pour servir de levier en fonction des propriétés recherchées. Elle peut également provenir de la chaux libre contenue dans le ciment Portland utilisé. La provenance du ciment Portland apparaît donc aussi comme un paramètre déterminant dans l'élaboration des mélanges "ciment Portland / ciment sulfoalumineux".

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier en particulier Messieurs J. Ghanbaja, P. Villegier et L. Aranda de l'Université de Lorraine et les équipes techniques du CTG pour leur aide à la réalisation des différentes analyses.

6. REFERENCES

- Cohen, M. (1983). Theories of expansion in sulfoaluminate - type expansive cements: Schools of thought. *Cement and Concrete Research*, 13(6), 809-818.
- Damtoft, J. S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., et Gartner, E. M. (2008). Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 115-127.
- Hanic, F., Kaprálik, I., et Gabrisová, A. (1989). Mechanism of hydration reactions in the system $C_4A_3\bar{S}$ - $C\bar{S}$ - $CaO-H_2O$ referred to hydration of sulfoaluminate cements. *Cement and Concrete Research*, 19(5), 671-682.
- Inconnu (1964). Expansive Cement Opens Era of New Concretes. *Chemical & Engineering News*, 42(32), 38-40.
- Ish-Shalom, M., et Bentur, A. (1974). Properties of type K expansive cement of pure components I. Hydration of unrestrained paste of expansive component — Results. *Cement and Concrete Research*, 4(4), 519-532.
- Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., et Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1232-1243.
- Kaprálik, I., et Hanic, F. (1989). Phase relations in the subsystem $C_4A_3\bar{S}$ - $C\bar{S}$ - H_2O of the system $CaO-Al_2O_3-C\bar{S}$ - H_2O referred to hydration of sulfoaluminate cement. *Cement and Concrete Research*, 19(1), 89-102.
- Marchi, M., et Costa, U. (2011). Influence of the calcium sulphate and W / C Ratio on the Hydration of Calcium Sulfoaluminate Cement. *Evolution*, 1-7.
- Mehta, P. K. (1973). Mechanism of expansion associated with ettringite formation. *Cement and Concrete Research*, 3(1), 1-6.
- Ogawa, K., et Roy, D. M. (1982). $C_4A_3\bar{S}$ hydration, ettringite formation, and its expansion mechanism: II. Microstructural observation of expansion. *Cement and Concrete Research*, 12(1), 101-109.
- Pelletier, L., Winnefeld, F., et Lothenbach, B. (2010). The ternary system Portland cement–calcium sulfoaluminate clinker–anhydrite: Hydration mechanism and mortar properties. *Cement and Concrete Composites*, 32(7), 497-507.
- Pelletier-Chaignat, L., Winnefeld, F., Lothenbach, B., Saout, G. L., Müller, C. J., et Famy, C. (2011). Influence of the calcium sulphate source on the hydration mechanism of Portland cement–calcium sulfoaluminate clinker–calcium sulphate binders. *Cement and Concrete Composites*, 33(5), 551-561.
- Péra, J., et Ambroise, J. (2004). New applications of calcium sulfoaluminate cement. *Cement and Concrete Research*, 34(4), 671-676.
- Winnefeld, F., et Barlag, S. (2009). Influence of calcium sulfate and calcium hydroxide on the hydration of calcium sulfoaluminate clinker. *Zkg International*, 62(12), 42-53.