

Développement de béton projeté par voie sèche à haute résistance initiale

Jean-Daniel Lemay, *Université Laval*

Marc Jolin, Richard Gagné, Vanessa Durand

Résumé

La composition des systèmes cimentaires a énormément évolué au cours des dernières années. Plusieurs avancées ont permis la formulation de béton permettant l'obtention d'une (très) haute résistance initiale. Ces résistances mécaniques élevées s'accompagnent cependant souvent d'une prise initiale très rapide (de l'ordre d'une dizaine de minutes) rendant la coulée de ce type de béton sans adjuvant difficile, voire impossible. Ce problème peut être contourné avec l'utilisation de béton projeté par voie sèche. En raison du faible temps de contact entre l'eau et le ciment avant la mise en place, il n'est pas nécessaire d'utiliser d'adjuvant retardateur de prise. Dans le cadre d'un projet de maîtrise effectué à l'Université Laval, un système à gain rapide en résistance mécanique, soit les mélanges ternaires à base de ciment Portland (OPC), de ciment d'aluminate de calcium (CAC) et de sulfate de calcium (\bar{S}), a été étudié. La composition et l'hydratation de ce système bien différent des matrices cimentaires traditionnelles à base de ciment Portland seront brièvement présentées. La composition joue un rôle majeur dans ces matrices, car, en cas d'erreur, il en résulte un mélange au comportement expansif incontrôlé. Dans ce projet, une matrice ternaire a été développée à partir de matériaux disponibles localement. Des essais faits sur des cubes de mortier à partir de deux sources de sulfate de calcium ont été étudiés. En se basant sur la stabilité volumique ainsi que sur les résistances en jeune âge (3heures), une formulation a été retenue et a servi à une projection de béton conventionnelle complète. Les résultats de cette projection, soit les résistances mécaniques obtenues et les considérations pratiques, seront présentés.

1. Introduction

L'utilisation de mélanges de béton acquérant rapidement des résistances mécaniques représente un avantage économique important. Le développement de tels mélanges, sans l'utilisation d'adjuvant à prise rapide, requiert l'utilisation de matrices cimentaires non traditionnelles. Utilisant généralement l'ettringite comme hydrate principal, ce type de matrice cimentaire peut présenter une expansion incontrôlée si la formulation est mal effectuée. Ces liants, en plus de permettre un gain rapide de la résistance mécanique, ont un temps de prise très rapide ne permettant pas une mise en place traditionnelle. Pour contrer ce problème et permettre une mise en place adéquate, l'utilisation de béton projeté par voie sèche est toute indiquée. Le béton projeté, qui est une méthode de placement couramment utilisée pour le support de terrain, le support minier et les réparations d'ouvrages d'arts, permet de profiter des avantages des matrices à prise rapide sans en subir les inconvénients. Cette technique permet la mise en place de ce type de matériau sans aucun adjuvant. Dans le cadre d'un projet de maîtrise effectué à l'Université Laval, une matrice à haute résistance initiale a été développée à partir de ciment Portland (OPC), de ciment d'aluminate de calcium (CAC) et de sulfate de calcium (\bar{S}). À terme, cette matrice servira de base pour la production d'un béton projeté par voie sèche.

2. Hydratation des matrices à base d'ettringite

Puisque l'ettringite est l'hydrate principal de ce type de matrice, son hydratation diffère des matrices traditionnelles. Une des problématiques majeures de ce système est que si la formulation est mal effectuée, il peut en résulter une matrice instable volumétriquement. Une bonne compréhension des mécanismes d'hydratation en jeu est donc importante afin d'assurer la durabilité de ce type de matrice.

2.1. Hydratation des systèmes OPC-CAC- \bar{S}

L'utilisation de ce type de système présente de nombreux défis. Une des grandes difficultés provient de sa formulation. La matrice cimentaire est produite à partir de 2 types de ciments qui contiennent chacun des phases minéralogiques bien distinctes en proportion et en composition. Ceci joue un rôle clé dans l'hydratation des systèmes OPC-CAC- \bar{S} . Le type de sulfate intégré au système, sous forme de sulfate de calcium anhydre, hemihydrate ou dihydrate, joue également un rôle important dans la cinétique des réactions. Ces systèmes peuvent être classifiés selon leur constituant majeur, soit un système possédant une proportion massique supérieure en CAC et un système possédant une proportion supérieure en OPC.

La figure 2 illustre la formulation de ce type de mélange ternaire et les limites associées. La quantité de sulfates ajoutée qui produit une expansion incontrôlée est bien différente que l'on soit en présence d'un système majoritairement CAC ou OPC. Il en découle donc que l'hydratation de ces types de systèmes n'est pas identique.

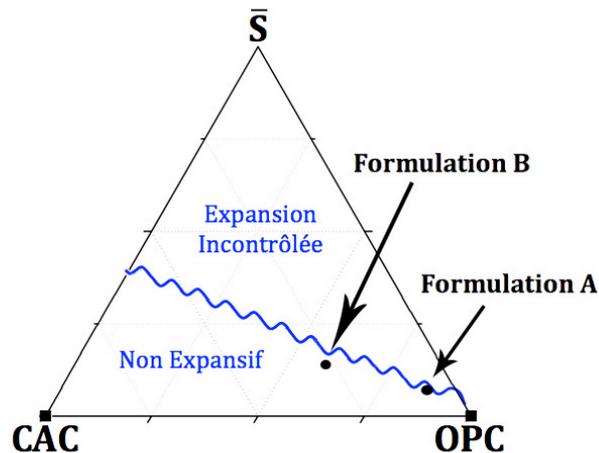


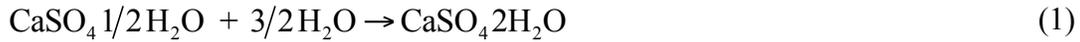
Figure 1 Limite de l'expansion incontrôlée d'un système OPC-CAC- \bar{S} [1]

2.1.1. CAC comme constituant majeur

Un béton composé de ce type de matrice comporte de nombreux avantages par rapport à une composition classique, les principaux étant un temps de prise et de développement des résistances rapides et une compensation du retrait [2]. Ces avantages sont reliés à l'hydratation et celle-ci est fonction de la source de sulfate utilisée [3]. Les sources de sulfate utilisées dans ces systèmes sont principalement le sulfate de calcium hemihydrate et anhydre.

Source de sulfate : sulfate de calcium hemihydrate (CaSO₄1/2H₂O)

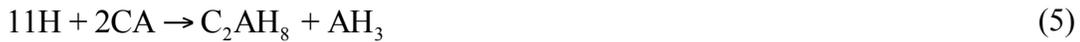
L'hydratation théorique idéalisée, soit l'hydratation ne considérant que les principales réactions, en présence de sulfate de calcium hemihydrate comporte 5 réactions de base qui sont basées sur l'enthalpie générale du système et des produits formés [3]. Dès le contact entre l'eau et les liants, deux réactions se produisent simultanément. La réaction 1 mène à la formation de gypse, tandis que la réaction 2 forme à la fois de l'ettringite et des C-S-H. Puisqu'il s'agit de cas idéalisés, la formulation utilise comme simplification que les CACs ne sont constitués que de CA et le ciment Portland de C₃S. Une différence majeure entre ce type de système et un système traditionnel est que les ions calcium en surplus du ciment Portland ne contribuent pas à la création de la Portlandite, mais plutôt à la précipitation de l'ettringite.



Ces réactions se produisent jusqu'à l'épuisement du sulfate de calcium hemihydrate. Par la suite, une réaction similaire à la réaction 2 se produit, mais ayant comme source de sulfate le gypse créé précédemment :



Cette réaction se poursuit jusqu'à ce que tout le sulfate disponible soit incorporé à l'ettringite. Il s'ensuit la formation de C₂AH₈ qui s'apparente à une phase d'Afm aluminate sans sulfate (réaction 4). Dans cette réaction, les C₃S sont l'agent limitant et lorsque la source est épuisée (lorsqu'il n'y a plus d'OPC), la réaction 5 se produit.



Il est important de noter que l'ettringite formée à partir de ces systèmes est plus stable que l'ettringite formée dans des systèmes classiques. L'ettringite formé durant les réactions 2 et 3 est stable et ne se transforme pas en Afm ou en C₂AH₈ avec le temps [2]. Les réactions précédentes ont été démontrées expérimentalement à l'aide de coulis possédant un E/C=1 et des proportions massiques de liant de 25% OPC, 50% CAC, 25% C $\bar{\text{S}}\text{H}_{0.5}$. L'importance relative des phases à travers le temps est illustrée sur la figure 2. Les résultats sur la figure ayant été déterminés par diffraction au rayon X (DRX), il est impossible de déterminer les phases non cristallines telles que les C-S-H.

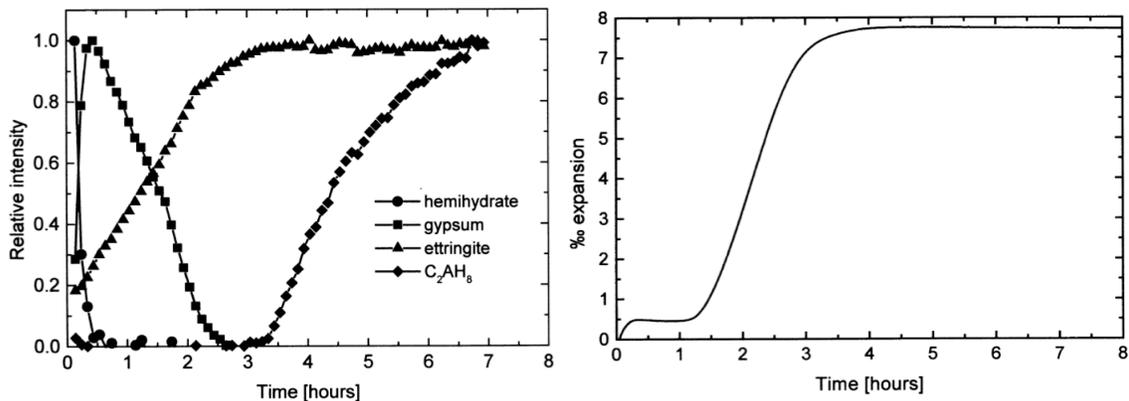
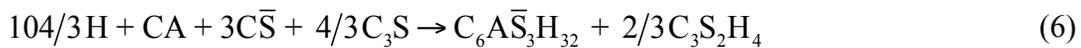


Figure 2 Évolution à travers le temps de différents composés lors de l'hydratation et ainsi que de l'expansion y étant associée (adapté de [3])

On peut observer que l'expansion associée à ce mélange se produit en deux temps et correspond à deux périodes distinctes de l'hydratation. La première phase d'expansion se produit jusqu'à la dissolution complète du $C\bar{S}H_{0,5}$. La deuxième phase expansive, qui est beaucoup plus importante, commence dès que le sulfate de calcium s'est épuisé et se termine lorsque le gypse est épuisé. Le remplacement du gypse par une matrice d'ettringite s'accompagne par une expansion linéaire de 0,7% [2], mais par une expansion globale supérieure (figure 2). Evju et Hansen ont effectué des études à partir d'images prises au MEB et ont déterminé que l'ettringite précipite en deux étapes, soit en une couche de petits cristaux sur les grains de ciments et par la suite en des cristaux plus gros [3].

Source de sulfate : sulfate de calcium anhydre ($CaSO_4$)

L'hydratation en présence de sulfate de calcium anhydre est beaucoup moins bien comprise. La réaction majeure, basée sur l'enthalpie générale du système est :



Cependant, des résultats expérimentaux ont démontré que la réaction 6 est seulement valide durant les 6 premières heures de l'hydratation [3]. Par la suite, une réaction supplémentaire semble se produire, mais celle-ci mène à un hydrate non cristallin qui ne peut être identifié par DRX. De par les quantités de sulfates fixés à l'ettringite, l'hydrate inconnu ne peut être de l'Afm et doit être un hydrate ne contenant pas d'ions SO_3^- .

2.1.2. OPC comme constituant majeur

L'étude des systèmes avec OPC comme constituant majeur fait l'objet de moins d'attention du milieu scientifique que sa contrepartie présentée précédemment. Bien que ces systèmes possèdent des prises rapides, leur hydratation au jeune âge est beaucoup plus lente [1]. Il s'ensuit que les résistances au jeune âge de ces compositions sont inférieures à leurs contreparties majoritairement à base de CAC, bien que les résistances à 28 jours des deux systèmes sont du même ordre de grandeur. Les produits d'hydratations au jeune âge de ce type de matrice sont constitués d'une proportion d'ettringite supérieure à celle d'une matrice à base de ciment Portland pure. L'ettringite formée n'est pas complètement stable et a tendance à se transformer en Afm avec le temps. Ceci pourrait être expliqué par le fait que ce type de matrice possède moins de sulfates facilement accessibles dans le mélange que les systèmes à CAC majoritaire. L'ajout de sulfate est généralement beaucoup plus faible (en volume totale) si on le compare à son vis-à-vis CAC (hauteur relative de la ligne bleu sur la figure 1). La conversion de l'ettringite en Afm est particulièrement visible au pourtour des grains de C_3A , où l'ettringite devient la seule source de sulfate localement disponible. Les hydrates majeurs précipités sont, encore une fois, fortement dépendants de la formulation. Le tableau 1 illustre deux formulations ainsi que leurs hydrates majeurs. Les nombreuses réactions agissant sur ce type de système ne sont toujours pas comprises. Cependant, certains points restent similaires aux systèmes majoritairement CAC. La source de sulfate de calcium utilisée, soit anhydre, hemihydrate ou dihydrate, semble avoir une influence sur la cinétique réactionnelle. Cela serait dû à la vitesse de dissolution différente entre les différentes formes du sulfate de calcium [1]. L'expansion dans ce type de système est également peu comprise. Malgré que l'ettringite ne soit pas un hydrate majeur dans le mélange A et que seule une petite quantité de sulfates de calcium est présente, le mélange se situe à la limite de la zone expansive. L'expansion ne serait donc pas nécessairement due à la simple formation d'ettringite traditionnelle (figure 1).

Tableau 1 Hydrates majeurs en fonction des constituants initiaux (adapté de [1])

Formulation, % massique de liants				Hydrate majeur
Désignation	OPC	CAC	\bar{S}	
A	85,9	6,9	6,9 (anhydre)	C-S-H
B	58	15	27 (anhydre)	Ettringite

3. Programme expérimental

Le programme expérimental développé est divisé en deux parties. La phase 1 se concentre sur l'obtention de la matrice cimentaire adéquate tandis que la phase 2 se concentre sur la caractérisation de la projection et la comparaison du mélange développé avec les mélanges commerciaux. Dans le cadre de cette présentation, seule la phase 1 sera traitée.

3.1. Phase 1 Détermination de la matrice cimentaire

La matrice cimentaire recherchée doit répondre à 2 objectifs primordiaux, soit la stabilité volumique et l'obtention d'une résistance mécanique élevée en jeune âge. Afin de satisfaire ces objectifs, 49 formulations furent testées sur des blocs de mortiers de béton équivalents (MBE). Le MBE est une technique de dosage conçue pour la création de béton adjuvanté qui permet de prendre en compte la surface spécifique réelle d'un mélange et de la reporter en mortier [4, 5]. Ainsi, la surface spécifique apportée par la proportion de pierre d'une formulation de béton projeté classique, soit environ 600 kg/m^3 , est ajoutée au mortier sous forme de sable. Bien qu'initialement cette technique ne fût pas développée à cet usage, l'utilisation de MBE permet d'obtenir un mortier au comportement rhéologique se rapprochant davantage du comportement d'un béton puisqu'il possède les mêmes proportions de surfaces spécifiques de granulat et de liant.

Les paramètres de base des mélanges formulés se trouvent au tableau 2. La proportion de liants doit par les suites être divisée en trois pourcentages massiques selon le mélange étudié. Durant cette phase, le volume de gâché de chaque formulation est de 3 litres.

Tableau 2 Composition générale des mélanges de MBE

	Proportion	
	Massique	Volumique
E/C	0,44	
% Pâtes	25,2	35,0
% d'eau	7,7	18,0
% liants	17,5	13,0
% d'air	---	4,0
% Granulats	74,8	65,0
Sable	48,6	42,2
Pierre	26,2	22,8

Chaque mélange est malaxé manuellement à l'aide d'un couteau à mastic jusqu'à l'obtention d'un mortier homogène. Cette opération s'effectue entre 1 min 30 s et 3 minutes selon le mélange. Un malaxage plus important est impossible puisqu'il ne permet pas la mise en place adéquate de certaines formulations de MBE dans les moules. Selon le mélange, un dosage de superplastifiant doit être ajouté pour obtenir la fluidité nécessaire pour une mise en place adéquate. Le démoulage des échantillons s'effectue deux heures après le contact eau-ciment, lorsque possible. Pour les formulations moins performantes, le démoulage s'effectue dès que la prise est jugée suffisante.

Pour chaque formulation, 15 cubes de mortier sont coulés. De ce nombre, 12 éprouvettes sont utilisées pour effectuer le suivi du développement des résistances à l'aide d'essais de compression (ASTM C 109) à raison de 2 éprouvettes par pas de temps. Entre chaque pas de temps, les échantillons sont entreposés dans une chambre humide (H.R. = 100 %) à température contrôlée. Les échéances utilisées sont 3h, 6h, 1j, 3j, 7j et 28j. Deux cubes sont placés dans une cuve d'eau et mesurés aux mêmes échéances à l'aide d'un pied à coulisse afin de suivre l'évolution des dimensions de l'échantillon. Le dernier cube de mortier est utilisé comme substitut si un cube présente des défauts.

Tel que présenté précédemment à la *Section 2*, la stabilité volumique pour une même formulation est fonction de la source de sulfate. Pour cette raison, deux sources de sulfates ont été étudiées soit du sulfate de calcium hemihydrate et anhydre. La formulation des premières combinaisons testée est basée sur des travaux effectués antérieurement [1]. Les mélanges subséquents sont déterminés en analysant les premiers mélanges en fonction des objectifs recherchés dans ce projet. Ainsi, des 49 mélanges mis à l'essai au cours de cette étude, 16 ont été produits avec du sulfate de calcium hemihydrate, 29 avec du sulfate de calcium anhydre et 4 sans sulfate de calcium (formulation binaire OPC-CAC).

4. Résultats phase 1

Les formulations à base des deux types de sulfate de calcium ont chacun produit des matériaux ayant des résistances en compression de zéro à 30 MPa à 3h. La figure 5 présente les résistances en compression à 3h et 28j de l'ensemble des mélanges utilisant du sulfate de calcium anhydre tandis que la figure 6 présente les résistances des formulations utilisant du sulfate de calcium hemihydrate. Les points bleus correspondent à des mélanges stables après 28j de cure à l'eau tandis que les points rouges correspondent à des formulations ayant démontré une expansion après cette exposition. L'expansion peut être modérée (figure 3) ou très importante, comme on peut l'observer sur la figure 4.

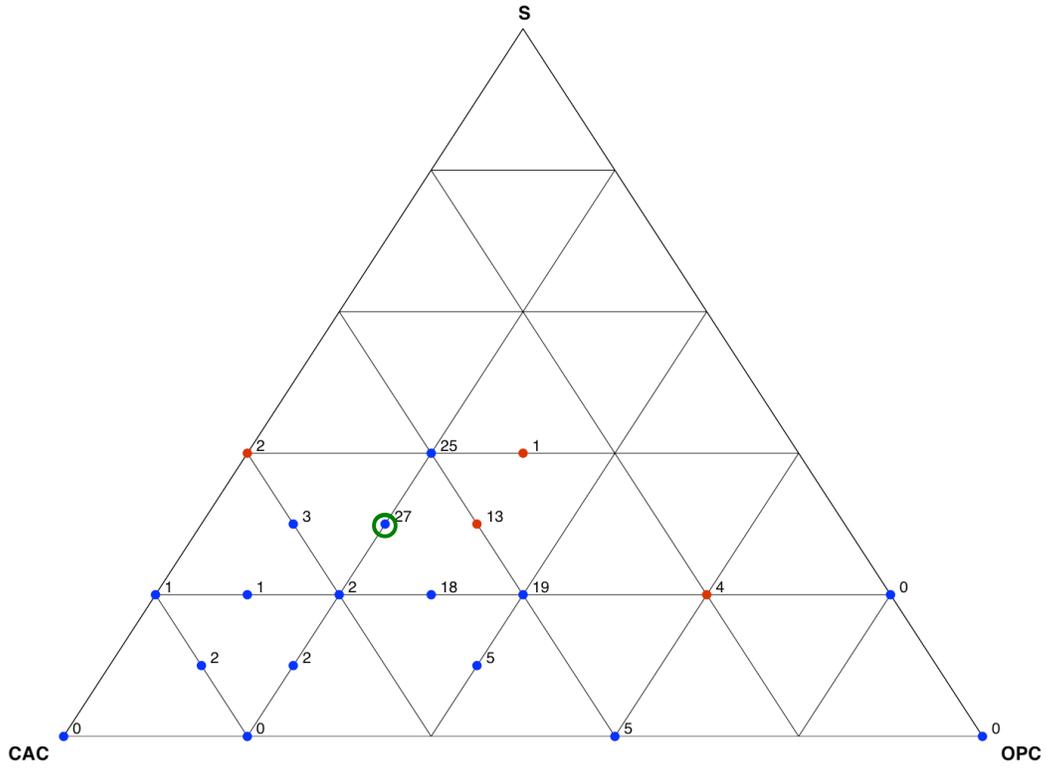


Figure 3 Bloc de MBE moyennement expansif



Figure 4 Bloc de MBE très expansif et bloc de MBE de ciment Portland

Résistance en compression à 3h [MPa]



Résistance en compression à 28j [MPa]

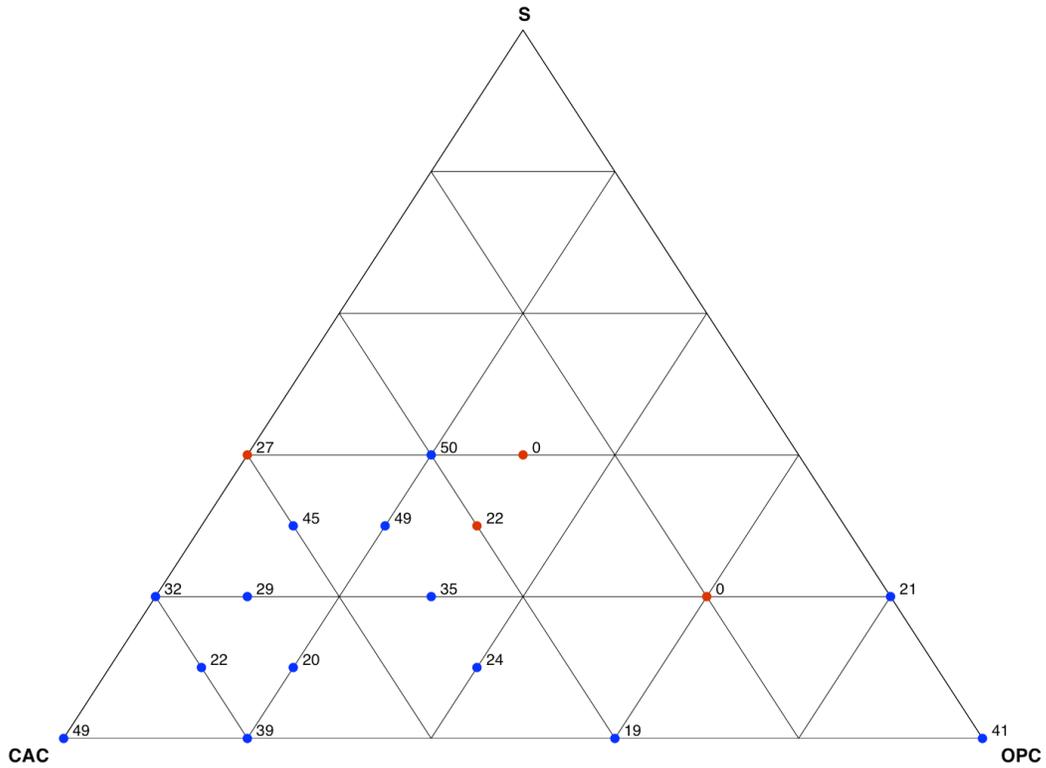


Figure 6 Résumé des résistances en compression moyenne - sulfate de calcium hemihydrate [valeurs en MPa]

Les temps de prises initiales des formulations les performantes (formulations développant plus de 15 MPa en 3h) étaient toutes sous les 5 minutes et celles-ci atteignent, pour la plupart, leurs résistances finales à 1j.

Les cubes possédant les résistances initiales les plus élevées ont tous présenté le même comportement lors de la cure, soit une demande en eau très importante. Cela était visible au fait que malgré leur présence dans un environnement à humidité relative de 100 %, les parois des spécimens restaient sèches durant les premières 24h à 48h.

5. Discussion

Les résistances en compression au jeune âge des formulations les plus performantes sont semblables, environ 30 MPa, peu importe le type de sulfate de calcium utilisés. Cependant, tel que discuté à la *Section 2*, l'hydratation est très sensible au type de sulfate de calcium utilisé. Par exemple, la formulation encerclée d'un cercle vert sur les figures 5 et 6 exprime bien cette différence. Pour la même formulation 20%/50%/30% (OPC/CAC/ \bar{S}), mais avec deux sources de sulfates différentes, les deux mélanges possèdent des résistances de 27 MPa avec un sulfate hemihydrate et de 3 MPa avec un sulfate anhydre à 3 heures, contre 49 MPa et 59 MPa à 28 jours respectivement.

Une différence majeure entre les deux matériaux est la composition des mélanges aux résistances les plus élevées. Pour une formulation à base de sulfate anhydre, les mélanges possédant les meilleures résistances à jeune âge (3h) se situent au centre du triangle de composition. Pour les formulations à base de sulfate hemihydrate, celles-ci se situent à gauche du centre du triangle de formulation. Cela tend à indiquer que les mélanges avec sulfates hemihydrate nécessitent plus de CAC ou moins de OPC au jeune âge pour le développement de ses résistances comparativement aux mélanges avec sulfate anhydre. Pour des considérations purement économiques, les formulations contenant plus d'OPC, soit celles contenant du sulfate anhydre, ont été favorisées. Le ciment d'aluminate de calcium étant plus dispendieux que le ciment Portland, à résistance semblable, le choix de privilégier le sulfate de calcium anhydre s'est imposé.

L'expansion des matrices est très variable pouvant être nulle, moyenne ou encore très importante. L'importance de la formulation adéquate est primordiale pour ce type de matrice. La figure 4 illustre une expansion moyenne de 35% des arêtes du cube tandis que le cube à base de ciment Portland seul n'a subi aucune expansion à condition de cure égale. Également, l'expansion semble pouvoir se manifester selon deux « patrons ». Le premier, illustré à la figure 4, est une expansion globale de l'élément qui mène à sa ruine. Le deuxième est illustré à la figure 3 et il s'agit d'une expansion concentrée en surface. Dans ce type d'expansion, l'augmentation de volume semble n'avoir touché que la partie la plus exposée à l'eau et le centre semble garder une résistance résiduelle. Il est également possible que les patrons observés soient dus au même phénomène, mais d'intensité différente. Des essais supplémentaires seraient nécessaires pour mieux caractériser ce phénomène.

6. Conclusion

Dans le cadre de ce projet de maîtrise, la création de matrices à base de OPC-CAC- \bar{S} à haute résistance initiale fut développée. Il a été démontré que la formulation de ce type de matrice est possible à l'aide de matériaux disponibles localement. Les hautes résistances en compression obtenues sont prometteuses et ce type de matrice aurait de grandes utilités dans le support minier ou dans toutes applications nécessitant une réouverture rapide. La composition la plus intéressante a récemment été incorporée à un mélange de béton projeté par voie sèche. La mise en place a été faite au laboratoire et les premiers résultats semblent très prometteurs.

7. Références

- [1] S. Lamberet, Durability of Ternary Binders Based on Portland Cement, Calcium Aluminate Cement and Calcium Sulfate, Faculté des Sciences et techniques de l'ingénieur, section des matériaux, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2005, pp. 237.
- [2] C. Evju, S. Hansen, Expansive properties of ettringite in a mixture of calcium aluminate cement, Portland cement and B-calcium sulfate hemihydrate, *Cement and Concrete Research*, 31 (2001) 257-261.
- [3] C. Evju, S. Hansen, The kinetics of ettringite formation and dilatation in a blended cement with β -hemihydrate and anhydrite as calcium sulfate, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005) 2310-2321.
- [4] A. Schwartzenruber, C. Catherine, La méthode du mortier de béton équivalent (MBE)—Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés, *Materials and Structures*, 33 (2000) 475-482.
- [5] M. Martin, J.-L. Gallias, R. Pleau, Influence des paramètres de composition sur les propriétés rhéologiques des bétons et des mortiers équivalents, XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil, Nancy, 2008.