

Etude du comportement de bétons exposés à des échauffements tardifs.

Maxime Lion¹, Johan Philippot¹, Hugo Hérin¹

¹ EDF, Direction Industrielle, Département TEGG, Aix-en-Provence, France

ABSTRACT Cet article présente les résultats d'une campagne d'essais dédiée à l'évaluation du comportement de bétons exposés tardivement (après 90 jours de maturation) à des températures de 85°C (en conditions humides) et 130°C (en conditions séchantes). Des durées d'échauffements variables ont été appliquées de manière à étudier leur impact sur le comportement des bétons, au niveau des propriétés mécaniques résiduelles et vis-à-vis du risque de développer une réaction sulfatique interne après immersion dans l'eau.

Keywords bétons, températures élevées, propriétés résiduelles, réaction sulfatique interne

I. INTRODUCTION

Les ouvrages en béton peuvent être exposés à des températures élevées dans certaines situations. Lors d'une exposition au feu, la température peut par exemple atteindre 1000°C. D'autres situations peuvent induire des niveaux de température moindres (< 200 °C); c'est le cas notamment de certaines conditions, accidentelles ou opérationnelles, pouvant être rencontrées dans des installations industrielles. Dans ce cas, les durées d'exposition peuvent être relativement variées : durées plus ou moins longues en situations accidentelles et durées forcément longues en conditions de service. Si l'effet des températures élevées sur le comportement mécanique des bétons a fait, et continue à faire, l'objet de nombreuses études, les effets de la durée d'exposition restent peu appréhendés. Une étude a alors été entreprise dans le but d'investiguer ce sujet. La campagne expérimentale réalisée est décomposée en deux parties : une partie focalisée sur la variation des propriétés mécaniques après des échauffements tardifs de durées variables, et une partie focalisée sur le risque RSI potentiellement induit après remise en eau de bétons ayant subi des échauffements tardifs de durées variables.

II. VARIATION DES PROPRIETES MECANIQUES APRES ECHAUFFEMENT TARDIF

A. Présentation de la campagne d'essais

Cette partie dédiée aux aspects mécaniques a concerné l'étude de trois bétons exposés à une température de 130°C. Les échauffements ont été réalisés sur des éprouvettes de bétons cylindriques (11 x 22 cm) âgées de 90 jours et préalablement stockées conformément à la norme

NF EN 12390-2 (éprouvettes soumises à une aspersion en eau continue dans notre cas, soit proches de la saturation). Trois durées d'échauffement ont été retenues : 17 heures, 7 jours et 28 jours. La montée en température a été limitée à 1°C/min de manière à limiter la fissuration d'origine thermique alors que la phase de refroidissement a consisté en un refroidissement « naturel » au sein du four éteint (les éprouvettes étant sorties lorsque la température du four affiche 30°C de manière à limiter les chocs thermiques). Les échauffements à 130°C ont été réalisés en conditions séchantes (pas de régulation en hygrométrie, éprouvettes non enrubannées).

Le tableau ci-après synthétise les formules de béton, ainsi que les propriétés initiales mesurées à 90 jours (moyennes sur 3 éprouvettes) : porosité accessible à l'eau selon NF P 18-459, résistance à la compression selon NF EN 12390-3 et module d'élasticité statique selon NF EN 12390-13. On note que les formules retenues permettent de couvrir une certaine diversité en termes de compositions et de propriétés de bétons.

TABLEAU 1. Propriétés des bétons étudiés

	Béton à hautes performances "BHP"	Béton « Vercors »	Béton aux laitiers «B50%S »
Ciment CEM I 52,5 (composition du clinker et teneur en alcalins du ciment)	400 kg/m ³ (C ₃ S = 67 %, C ₂ S = 17 %, C ₃ A = 4 %, C ₄ AF = 7 %, Na ₂ O _{eq.} = 0,2 %)	320 kg/m ³ (C ₃ S = 68 %, C ₂ S = 10 %, C ₃ A = 9 %, C ₄ AF = 7 %, Na ₂ O _{eq.} = 0,65 %)	175 kg/m ³ (C ₃ S = 67 %, C ₂ S = 17 %, C ₃ A = 4 %, C ₄ AF = 7 %, Na ₂ O _{eq.} = 0,2 %)
Eau totale	138 kg/m ³	195,6 kg/m ³	185 kg/m ³
Laitier de haut-fourneau	-	-	175 kg/m ³
Fumée de silice	40 kg/m ³	-	-
Porosité accessible à l'eau après 90 jours	7,9 % (représentant une teneur massique en eau de 3,2%)	14,9 % (représentant une teneur massique en eau de 6,4%)	13,3 % (représentant une teneur massique en eau de 5,6%)
Résistance à la compression à 90 jours (Rc0)	113,2 MPa	52,7 MPa	54,9 MPa
Module d'élasticité statique à 90 jours (E0)	48,8 GPa	38,8 GPa	44,7 GPa

A l'issue de l'échauffement à 130°C, les propriétés résiduelles suivantes ont été mesurées : masse, résistance à la compression et module d'élasticité statique.

B. Présentation des résultats

La Figure 1 présente les pertes de masse moyennes mesurées sur les éprouvettes de béton après échauffement à 130°C. Ces pertes peuvent être comparées aux teneurs en eau massiques

indiquées dans le Tableau 1 et qui représentent les quantités d'eau perdues dans le cadre de la détermination de la porosité accessible à l'eau (séchage continu à 105°C), que l'on peut nommer par soucis de simplification « eau libre ».

On peut tout d'abord noter que l'échauffement durant 17 heures induit une perte d'eau partielle ; les éprouvettes de béton ne sont donc pas complètement séchées dans ce cas. Les pertes de masse sont moindres pour le BHP, ce qui s'explique logiquement par le fait que ce béton contient moins d'eau et qu'il doit bénéficier de meilleures propriétés de transfert. L'échauffement à 130°C durant 7 jours montre que la perte de masse des bétons Vercors et B50%S sont du même ordre de grandeur que leurs teneurs respectives en « eau libre », alors que la perte de masse du BHP ne l'a pas encore atteinte. Après un échauffement de 28 jours, les trois bétons ont des pertes de masse qui sont légèrement supérieures à leurs teneurs en « eau libre » respectives ; ce qui peut témoigner d'une déshydratation des CSH. La différence entre la perte de masse après 7 jours d'échauffement et celle après 28 jours d'échauffement est surtout notable pour le BHP ; en lien avec les propriétés de transfert améliorées d'un BHP qui induit une cinétique de perte de masse plus lente.

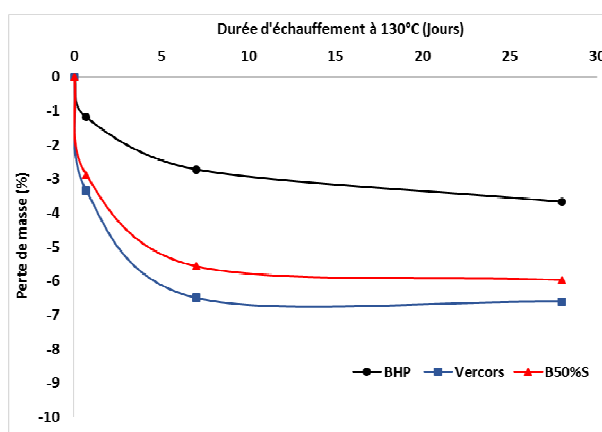


FIGURE 1. Variation de masse des éprouvettes 11 x 22 cm

La Figure 2 illustre les variations de la résistance à la compression et du module d'élasticité statique. Pour la variation de la résistance à la compression, on remarque que les bétons ne montrent pas tous une perte de résistance ; le béton aux laitiers voit en effet sa résistance augmenter après échauffement à 130°C. Une augmentation de la résistance à ces niveaux de température a été régulièrement mise en évidence dans la littérature (Naus, 2010). Une explication souvent apportée est le rôle joué par la déshydratation progressive des CSH, et le rapprochement induit des feuillettes, consolidant la matrice à ces niveaux de température. Ce phénomène pourrait expliquer l'augmentation de la résistance du béton B50%S et également la remontée en résistance du béton Vercors observée après 7 jours d'exposition à 130°C. Dans le cas du béton B50%S, il peut aussi se poser la question d'une réaction des laitiers, non complète après les 90 jours de conditionnement préalable, et accélérée par l'échauffement. Dans tous les cas, il est observé que la résistance à la compression résiduelle après la durée d'échauffement la plus longue (28 jours) a diminué tout au plus de 15% environ.

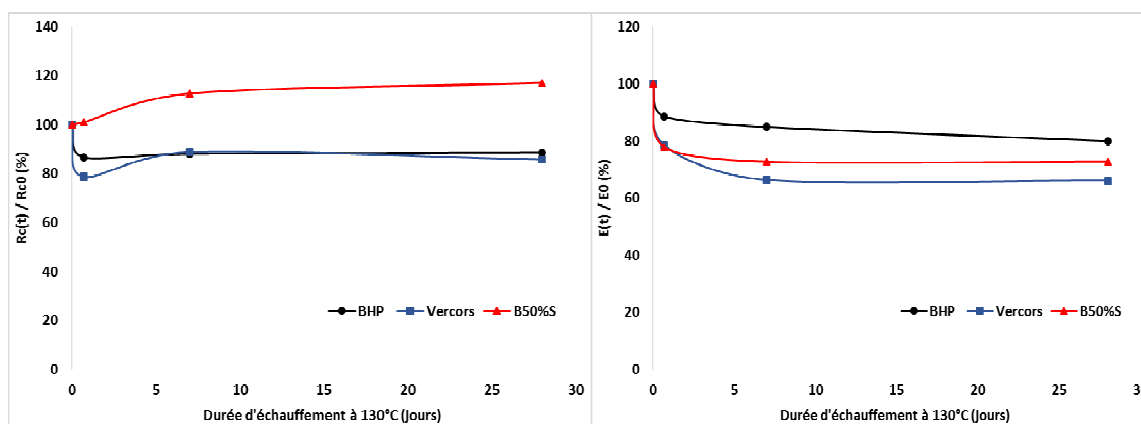


FIGURE 2. Variation de la résistance à la compression (à gauche) et du module d'élasticité statique (à droite)

Concernant la variation du module d'élasticité statique, on observe systématiquement une diminution après échauffement à 130°C. L'impact de la durée de l'échauffement apparaît relativement similaire à ce qui est observé pour la perte de masse : la variation est moindre pour le BHP dans l'absolu mais plus graduée en fonction de la durée d'exposition. Ces résultats sont en accord des travaux antérieurs (Kakae et al, 2017 ; Matsuzawa et al., 2016) qui montrent que le module n'évolue quasiment plus lorsque la perte de masse est stabilisée. La diminution du module d'élasticité qui est observée dans le cas présent pour l'échauffement le plus long est de l'ordre de 20 à 35 %.

II. APPREHENSION DU RISQUE RSI APRES ECHAUFFEMENT TARDIF

A. Présentation de la campagne d'essais

L'appréhension du risque RSI a consisté à effectuer un suivi de déformation et de fréquence de résonance (appareil Grindosonic) d'éprouvettes prismatiques (7 x 7 x 28 cm) immergées dans l'eau après avoir préalablement subi un échauffement tardif ; l'eau étant régulée à 20 +/- 2°C et périodiquement renouvelée de manière à favoriser le déclenchement de la RSI (effet de lessivage des alcalins en particulier).

La campagne d'essais a concerné :

- l'étude des 3 bétons évoqués dans de § 1 (bétons « BHP », « Vercors » et « B50%S ») ayant subi des échauffements à 130°C pendant 17 heures, 7 jours ou 28 jours.
- L'étude de 2 autres bétons, l'un réputé très sensible à la RSI (en particulier en lien avec les teneurs élevées en alcalins et en C3A du ciment) et nommé « BRSI » et l'autre consistant à lui substituer 50% du ciment par des laitiers de haut-fourneau « BRSI50%S ». Le Tableau 2 fournit des éléments sur leurs propriétés. Ces 2 bétons ont subi les mêmes échauffements tardifs à 130°C que les 3 bétons précédemment évoqués. Ils ont de plus subi des échauffements à 85°C en hygrométrie contrôlée (HR > 95%) de manière à évaluer leur

comportement dans des conditions d'étude de la RSI « plus habituelles ». Les durées d'échauffement retenues sont également 17 heures, 7 jours ou 28 jours.

TABLEAU 2. Propriétés des 2 bétons étudiés en complément

	Béton sensible à la RSI « BRSI »	Béton « BRSI » auquel 50% du ciment a été substitué par des laitiers « BRSI50%S »
Ciment CEM I 52,5 (composition du clinker et teneur en alcalins du ciment)	350 kg/m ³ (C ₃ S = 67 %, C ₂ S = 11 %, C ₃ A = 7 %, C ₄ AF = 10 %, Na ₂ O _{eq.} = 0,97%)	175 kg/m ³ (C ₃ S = 67 %, C ₂ S = 11 %, C ₃ A = 7 %, C ₄ AF = 10 %, Na ₂ O _{eq.} = 0,97%)
Eau totale	185 kg/m ³	185 kg/m ³
Laitier de haut-fourneau	-	175 kg/m ³
Résistance à la compression à 90 jours	47,6 MPa	58,0 MPa

B. Présentation des résultats

La Figure 3 montre les variations dimensionnelles des éprouvettes de bétons « BHP », « Vercors » et « B50%S » mesurées en fonction du temps d'immersion dans l'eau. Le point « 0 » de l'abscisse correspond au moment de l'immersion des éprouvettes, soit à l'issue de l'échauffement et du refroidissement qui a suivi. Concernant les variations dimensionnelles, l'état de référence qui a été choisi est celui avant échauffement, permettant de cette manière de mettre en évidence les variations dimensionnelles induites par l'échauffement, avant immersion des éprouvettes.

On observe en particulier le comportement du béton Vercors qui engendre des expansions non négligeables qui atteignent environ 0,2 % quelle que soit la durée d'échauffement considérée. Les autres bétons ne révèlent pas de gonflement particulier ; autre que celui inhérent à la reprise en eau.

L'évolution du module d'élasticité dynamique pour ces 3 bétons, exprimée à partir du ratio des fréquences de résonance au carré, est illustrée dans la Figure 4 pour une durée d'échauffement de 7 jours à 130°C (tendances globalement identiques quelle que soit la durée de l'échauffement).

On observe que le maintien dans l'eau entraîne pour le « BHP » et le béton « B50%S » une augmentation du ratio qui tend vers la valeur originelle (*ie.* avant échauffement), ce qui est cohérent avec les déformations observées imputables à une reprise d'eau et donc un retour à l'état initial. Cette tendance n'est pas observée pour le béton « Vercors » qui montre une dégradation irréversible.

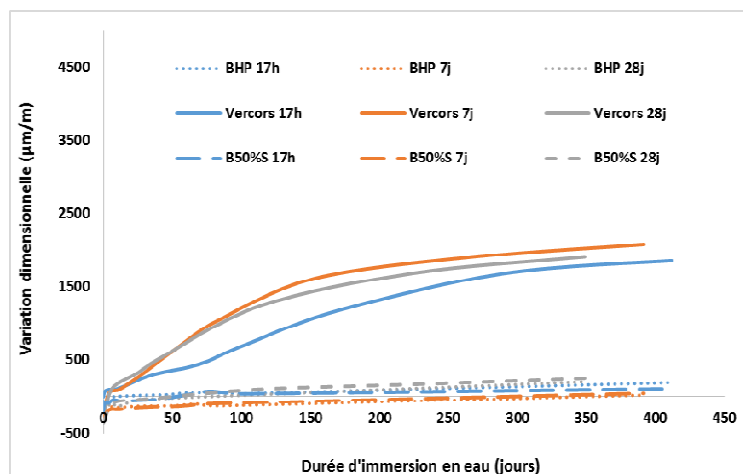


FIGURE 3. Variation dimensionnelle des bétons « BHP », « Vercors » et « B50%S » - Echauffement à 130°C

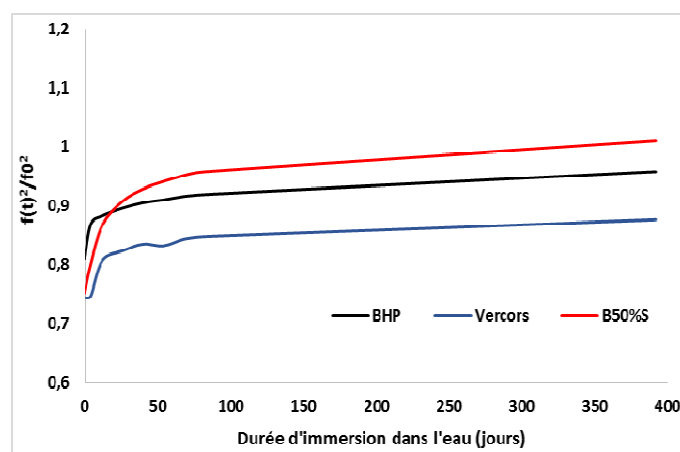


FIGURE 4. Variation de la fréquence de résonance des bétons « BHP », « Vercors » et « B50%S » - Echauffement à 130°C pendant 7 jours

Concernant l'étude des 2 bétons « BRSI » et « BRSI50%S », la Figure 5 illustre les variations dimensionnelles mesurées après échauffements à 130°C et 85°C . On voit que le béton « BRSI » affiche des expansions très importantes, de l'ordre de 1,5%, pour des échauffements à 85°C pendant 17 heures et 7 jours.

En revanche, aucune expansion n'est observée après un an de suivi dimensionnel à l'issue de l'échauffement à 85°C pendant 28 jours.

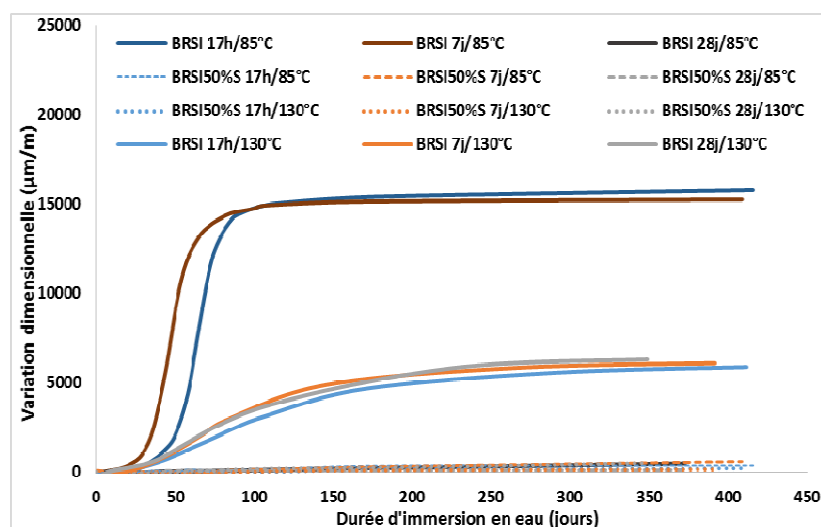


FIGURE 5. Variation dimensionnelle des bétons « BRSI » et « BRSI50%S » - Echauffements à 85°C et 130°C

Après échauffement à 130°C, le béton « BRSI » montre une expansion de l'ordre de 0,6% quelle que soit la durée d'échauffement. Ces niveaux d'expansion sont nettement moindres que ceux observés après échauffement à 85°C (pendant 17 heures et 7 jours) ; témoignant d'un probable effet de la température d'exposition mais aussi du niveau d'humidité durant l'exposition (l'échauffement à 130°C a été réalisé en conditions séchantes alors que l'échauffement à 85°C a été réalisé en conditions humides). On notera par ailleurs que le béton « BRSI » montre une expansion après échauffement à 130°C qui est trois fois plus importante que celle mesurée pour le béton « Vercors ».

Les résultats obtenus pour le béton « BRSI50%S » permettent de montrer qu'une substitution de 50% du ciment par des laitiers de haut-fourneau a permis d'inhiber le gonflement dans toutes les configurations d'essais.

Des exemples d'évolution du module d'élasticité dynamique (exprimé par le ratio des fréquences de résonance au carré) sont illustrés dans la Figure 6. On observe une chute brutale du module pour le béton « BRSI » après échauffement à 85°C pendant 7 jours (ratio de l'ordre de 0,2), en lien avec les expansions très importantes mesurées et associées à une importante microfissuration témoignant de l'intensité de la pathologie engendrée. Ce même béton, après échauffement à 130°C pendant 7 jours, voit son module également chuter mais se stabiliser à un niveau supérieur (valeur de 0,6 environ). Dans le cas du béton « BRSI » ayant subi un échauffement à 85°C pendant 28 jours, il n'est pas observé de chute de module mais il n'est pas observé non plus de retour à l'état originel, ce qui témoigne de transformations irréversibles.

Pour les bétons « BRSI50%S », on observe que les valeurs de module originelles sont retrouvées, après un certain temps après échauffement à 130°C, en lien avec la reprise en eau progressive.

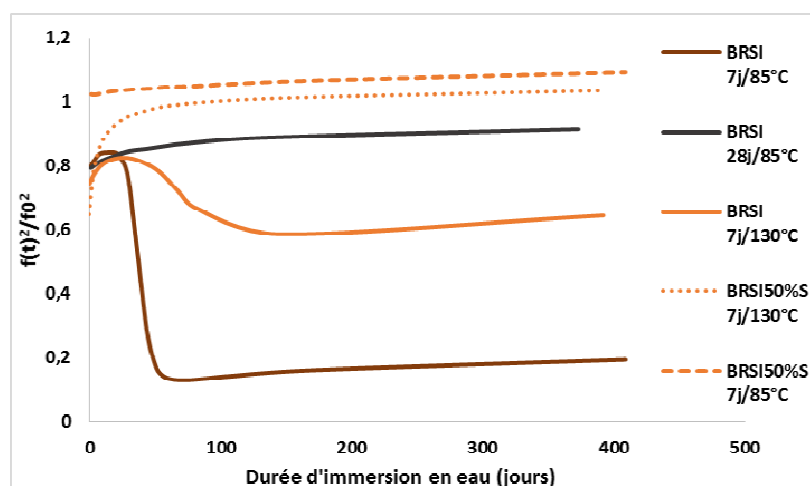


FIGURE 6. Exemples de variation de la fréquence de résonance des bétons « BRSI », « BRSI50%S »

C. Observations au MEB

Des analyses MEB ont été réalisées sur cinq prismes à l'issue du suivi. Le Tableau 3 synthétise l'ensemble des observations réalisées. Il ressort que ces analyses permettent de confirmer le fait que les expansions non négligeables mesurées est en relation avec le phénomène de réaction sulfatique interne. L'ampleur du gonflement est proportionnelle à la quantité d'ettringite massive présente dans le béton. La Figure 7 illustre des observations réalisées sur le béton « BRSI » après échauffement à 85°C pendant 7 jours (configuration ayant entraîné les expansions les plus élevées).

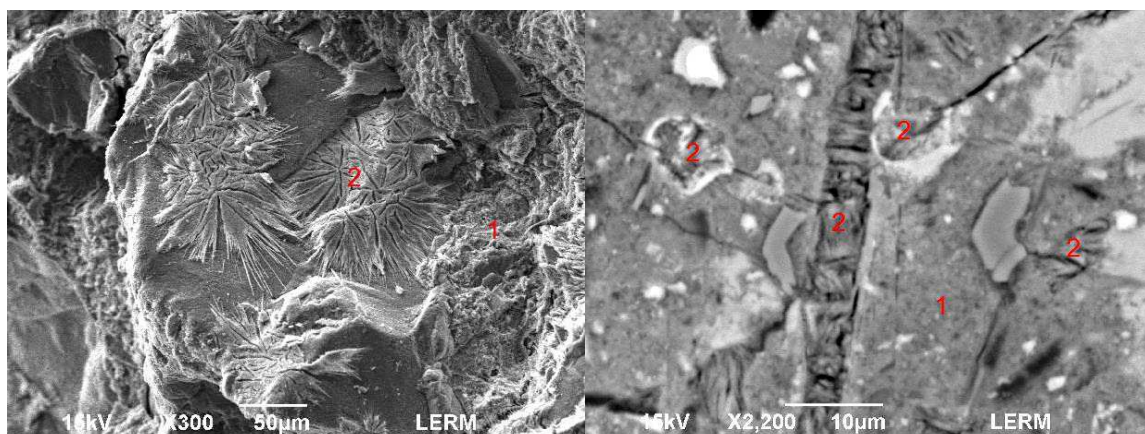


FIGURE 7. Béton « BRSI » après échauffement à 85°C pendant 7 jours – à gauche : aspect d'ettringite palissadique au droit d'un granulat (1 : matrice, 2 : ettringite palissadique) – à droite : détail de la matrice cimentaire de l'échantillon (1 : matrice, 2 : ettringite dans des résidus de grain de clinker ou dans une microfissure)

La substitution importante de ciment par du laitier de haut fourneau doit réduire la teneur en CaO et le rapport molaire SO_3/Al_2O_3 dans la matrice cimentaire, induisant une formation moindre d'ettringite massive telle qu'observée pour le béton « BRSI50%S ». Concernant le béton « BRSI » exposé 28 jours à 85°C et ayant témoigné un comportement particulier (absence de gonflement), il est possible qu'une partie plus ou moins importante de l'aluminium, vraisemblablement sous forme d'aluminates de calcium et/ou de monosulfoaluminates de calcium, n'ayant pas pu être observée au MEB serait diffuse dans les C-S-H. Les phénomènes d'effet pessimum au niveau des expansions atteintes en fonction du temps d'échauffement, voire d'inhibition, ont déjà pu être constatés dans certains travaux (Kchakech, 2015 ; Salgues, 2013). Des études sont en cours dans le but d'évaluer plus finement la composition chimique des CSH.

TABLEAU 3. Synthèse des observations MEB

Béton / échauffement / Gonflement observé	Cohésion générale et microfissuration	Localisation de l'ettringite	Proportion relative	
			Mono-sulfo- aluminates de calcium	Ettringite massive
Vercors 7j/130°C ≈ 0,2 %	Bonne cohésion Microfissuration relativement marquée	Bulles d'air, interface granulat/matrice et dans microfissures	+	++
BRSI50%S 7j/85°C Pas de gonflement	Bonne cohésion	Bulles d'air, interface granulat/matrice	++	+
BRSI 7j/85°C ≈ 1,5 %	Relativement faible cohésion Microfissuration marquée	Bulles d'air, interface granulat/matrice et dans microfissures	+	+++
BRSI 28j/85°C Pas de gonflement	Bonne cohésion	Bulles d'air, interface granulat/matrice	+	+
BRSI 7j/130°C ≈ 0,6 %	Bonne cohésion Microfissuration marquée	Bulles d'air, interface granulat/matrice et dans microfissures.	+	++

III. CONCLUSIONS

L'étude synthétisée dans cet article contribue à une meilleure connaissance des effets induits par des échauffements tardifs sur les bétons. Elle a permis en particulier d'apporter des éléments nouveaux quant à l'appréhension du risque de développement d'une RSI lorsque les bétons sont ensuite immergés dans l'eau :

- Le développement de la RSI a été observée après des échauffements supérieurs à 100°C en conditions séchantes (conditions peu étudiées dans la littérature). Les gonflements observés sont plus faibles que ceux pouvant être générés après un échauffement à 85°C en

condition humide et apparaissent indépendants de la durée d'échauffement (pas d'effet pessimum particulièrement observé).

- Une inhibition du gonflement a été observée après un échauffement pendant 28 jours à 85°C en condition humide. Ces résultats mériteraient d'être consolidés/vérifiés en reproduisant ces essais ; mais certaines hypothèses pourraient expliquer ce phénomène (rôle de l'aluminium dans les CSH en particulier). Il sera intéressant également d'approfondir la compréhension du mécanisme en jeu le cas échéant (sulfates stabilisées sous quelle forme, conditions de stabilité,...). On peut noter que l'inhibition du gonflement pour un échauffement durant 28 jours n'a pas été observée pour une exposition à 130°C en conditions séchantes, laissant entrevoir un effet de la température d'exposition et/ou de l'hygrométrie.
- L'effet inhibiteur des laitiers de haut-fourneau est conforté pour un taux de substitution de 50 %.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Mailys ABATE qui a contribué à cette étude (stage Polytech Montpellier) ainsi que le LERM qui a réalisé les observations au MEB (en particulier Nam-Nghia BUI et Noureddine RAFAI).

REFERENCES

D. Naus (2010). A Compilation of Elevated Temperature Concrete Material Property Data and Information for Use in Assessments of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures. *United States Nuclear Regulatory Commission*.

N. Kakae, K. Miyamoto, T/ Momma, S. Sawada, H. Kumagai, Y. Ohga, H. Hirai & T. Abiru (2017). Physical and Thermal Properties of Concrete Subjected to High Temperature, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 15, 190 – 212.

K. Matsuzawa, Y. Kitsutaka, M. Abe, H. Kasami, T. Tayama & H. Nishi (2016). Effects of Exposure Term on the Strength and Elasticity of Concrete Subjected to Elevated Temperature up to 175°C. *Key Engineering Materials*, Vol. 711, *Concrete under Severe Conditions – Environment and Loading*, 519 – 524.

B. Kchakech (2015). Etude de l'influence de l'échauffement subi par un béton sur le risque d'expansions associées à la Réaction Sulfatique Interne. *Thèse de doctorat, Université Paris-Est*.

M. Salgues (2013). Modélisation des effets structuraux des réactions sulfatiques internes : application aux barrages en béton. *Thèse de doctorat. Université de Toulouse*.