

# Effets des échauffements tardifs sur les propriétés d'un béton sensible à la RSI

Marius Nanfack<sup>1</sup>, Hector Gomart<sup>1</sup>, Adrien Bouvet<sup>1</sup>, Albert Noumowe<sup>1</sup>, Pierre Seguin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>L2MGC, CY Cergy Paris Université, 5 Mail Gay Lussac, 95000 Neuville-sur-Oise, France

<sup>2</sup>EDF, Direction Industrielle, Département TEGG, Aix-en-Provence, France

## RESUME

Ce travail porte sur l'étude de la Réaction Sulfatique Interne (RSI) d'un béton chauffé tardivement (après 28 jours de maturation) à une température élevée de 175 °C en conditions séchantes. L'objectif est d'étudier l'impact des durées d'exposition sur les propriétés mécaniques et physiques d'un béton sensible à la RSI. Un traitement thermique a été appliqué pendant 2 jours et 14 jours et les résultats ont été comparés à ceux du béton de référence n'ayant pas subi de chauffe. Le risque de développement de la RSI a été évalué en effectuant le suivi temporel des indicateurs suivants : suivi de masse et de déformation, résistivité électrique, module d'élasticité dynamique et vitesse ultrasonore. Des essais complémentaires ont été effectués : résistance à la compression, module d'élasticité statique, porosité et perméabilité, ainsi que des observations au MEB afin d'identifier l'évolution des différentes morphologies d'ettringite. Les résultats montrent tout d'abord que seuls les bétons ayant subi un traitement thermique présentent un gonflement lié à la RSI. L'amplitude et la cinétique d'expansion sont d'autant plus importantes que la durée de chauffe a été prolongée.

**Mots-clefs** Béton, réaction sulfatique interne, échauffement tardif, températures élevées, ettringite.

## I. INTRODUCTION

De nos jours, des ouvrages en béton sont sujets à de nombreuses dégradations. Ceci est une conséquence de la manifestation de certaines pathologies à l'instar de la réaction sulfatique interne (RSI). Celle-ci survient à la suite d'un échauffement tardif ou au jeune âge du béton, avec une température critique supérieure à 65 °C [Scrivener et al., 1999], entraînant l'instabilité de l'ettringite formée au cours de l'hydratation du ciment. La RSI se manifeste par la formation et la croissance de cristaux d'ettringite différée. Cette cristallisation engendre des gonflements à l'origine de fissures sur le long terme, dégradant ainsi les propriétés physiques et mécaniques du béton. Plusieurs études [Brunetaud et al., 2007] [Kchakech et al., 2015] montrent en effet que le développement de la RSI présente un optimum pour un couple de température et de durée d'exposition appelé « *pessimum* ». La présente étude porte sur des bétons soumis à différentes durées d'exposition à une température élevée (~175 °C), dans le cas d'échauffements tardifs. Ces conditions peuvent survenir dans des cas de fonctionnement normal (enceintes de confinement à proximité des traversées de vapeur) ou lors d'accidents (incendies). Les cas d'études résultant d'un échauffement tardif restent encore rares. Néanmoins, [Lion et al., 2022] montrent que pour

un échauffement tardif à 130 °C en conditions séchantes, les expansions du béton varient fortement en fonction de la nature du liant utilisé. De plus, un échauffement tardif en conditions humides à 85 °C engendre des expansions plus importantes que celles d'un échauffement à 130 °C en conditions séchantes. Les travaux de [Divet et al., 2018] montrent que pour un échauffement tardif à 80 °C, le traitement de courte durée (3 jours) entraîne plus de désordre que celui de 10 jours. Dans la présente étude, deux traitements thermiques à 175 °C ont été appliqués pendant 2 jours et 14 jours. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux du béton de référence n'ayant pas subi de chauffe. La campagne expérimentale ainsi menée, visait d'une part, à observer les cinétiques et les amplitudes de l'expansion, et d'autre part, à évaluer la variation des propriétés mécaniques et physiques du béton au cours du temps. Le suivi temporel des paramètres est présenté sur 250 jours mais l'étude reste en cours jusqu'à la stabilisation des expansions. Des observations au MEB ont également été effectuées pour confirmer la présence ou non d'ettringite différée dans la matrice cimentaire.

## II. MATERIAUX ET METHODES

### A. Matériaux

L'étude a été réalisée sur un béton de classe de résistance C40/45 et de classe de consistance S2 (béton plastique), confectionné avec un ciment Calcia de la cimenterie Airvault CEM I 52.5 N CE CP2 NF, susceptible de développer la RSI. En effet sa composition chimique (cf. Tableau 1), notamment les teneurs en aluminés ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et en alcalins actifs ( $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ), contribue à la recristallisation de l'ettringite [Pavoine et al., 2012]. Le rapport molaire  $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  égal à 0,94, est supérieur au seuil de 0,67 proposé par [Heinz et Ludwig, 1987] comme un indicateur de risque de développement de la RSI. Les granulats utilisés sont des sables et des gravillons (composés de quartz et de silice), roulés lavés, extraits de carrières Palvadeau (85). Ces granulats ont été sélectionnés pour deux raisons. La première, ils sont siliceux, favorisant ainsi le développement de la RSI, comme l'ont montré [Malbois et al., 2017]. La seconde, ils sont non réactifs aux alcalis [NF P18-594], afin d'éviter un gonflement parasite lié à l'alcali réaction. Après formulation, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à  $T = 20 \pm 2$  °C, conformément à la norme [NF EN 12390-2] pendant 28 jours. Le Tableau 2 présente la composition du béton. Il est à noter que l'ensemble des éprouvettes a été confectionné lors d'une unique gâchée, afin de limiter les biais de mesures.

**Tableau 1. Composition massique chimique du ciment (%)**

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$
20,7	4,6	3,3	0,3	64,4	1,3	3,4	0,07	1,33	0,95

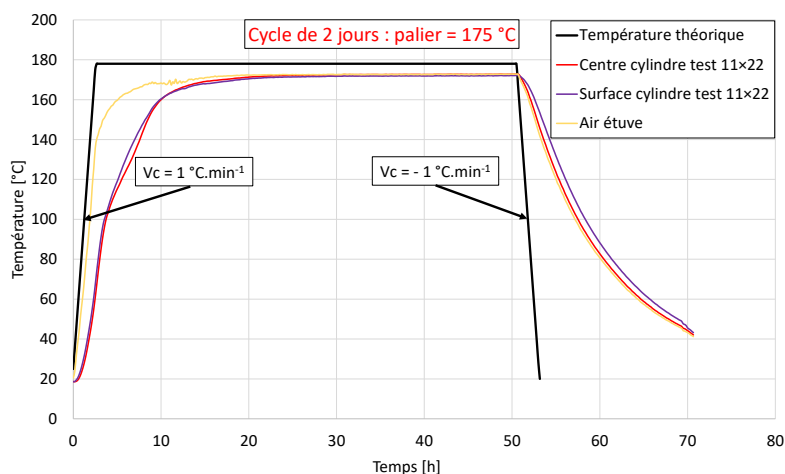
**Tableau 2. Quantités des matériaux.**

Ciment (CEM I 52,5)	Eau ajoutée	E/C	Adjuvant (superplastifiant)	Masse totale de sable	Masse totale de gravillons
350 $\text{kg.m}^{-3}$	185 $\text{kg.m}^{-3}$	0,5	0,15 % du ciment	741 $\text{kg.m}^{-3}$	1075 $\text{kg.m}^{-3}$

### B. Traitement thermique

Au terme de la maturation, deux traitements thermiques à 175 °C et en conditions séchantes (*i.e.* étuvage des éprouvettes à sec) ont été appliqués sur les éprouvettes, l'un pendant 2 jours, noté BT2, et l'autre pendant 14 jours, noté BT14. Des éprouvettes non chauffées servent de béton de référence, noté BT0. Les échantillons ont été chauffés en conditions séchantes dans une étuve à convection forcée, en suivant les recommandations de [RILEM, 2004]. Ainsi les variations de température sont limitées à 1 °C/min, en chauffe et en refroidissement. Ceci permet d'éviter un gradient supérieur à 10 °C/cm à l'intérieur des éprouvettes.

Les cycles de chauffe, ainsi que les valeurs du gradient thermique, ont été contrôlés grâce à une éprouvette 11×22 cm instrumentée, au centre et en surface. La Figure 1 présente ainsi l'évolution des températures mesurées lors du traitement thermique de 2 jours. Les éprouvettes atteignent une température supérieure à 65 °C (valeur seuil de déclenchement de la RSI) au bout de 3 h et sont maintenues à une température de 175 °C pendant 38 h, ce qui est suffisant pour dissoudre l'ettringite primaire. Le gradient le plus élevé (1,2 °C/cm) au sein de l'éprouvette instrumentée est rencontré au bout de 3 h environ, ce qui est bien inférieur aux recommandations [RILEM, 2004].



**Figure 1. Traitement thermique de 2 jours. La courbe continue noire correspond au cycle théorique.**

Les allures observées sont similaires lors du traitement à 14 jours. Dans ce cas, les éprouvettes sont soumises à une température supérieure à 65 °C dès 3 h et sont maintenues à une température de 175 °C pendant 13,5 jours. Le gradient maximum est cette fois-ci de l'ordre de 1,1 °C/cm au bout de 3 h de chauffe. Après la phase de chauffe, les éprouvettes sont réimmergées et conservées dans un bac d'eau à 20 ± 2 °C.

### C. Essais

Des mesures de résistance à la compression et du module d'élasticité statique ont été réalisées après les traitements thermiques. Pour chaque configuration (BT0, BT2 et BT14), 3 éprouvettes cylindriques 11×22 cm ont été utilisées afin de retenir la valeur moyenne. La caractérisation mécanique a été complétée par des mesures du module dynamique et de la vitesse de propagation des ondes ultra-sonores. Concernant les propriétés physiques des bétons, la perméabilité au gaz (essai Cembureau) et la porosité à l'eau ont été mesurées. Enfin, afin

d'évaluer l'évolution de l'endommagement du béton au cours du temps, les indicateurs suivants ont fait l'objet d'un suivi temporel :

- Suivi de masse et de déformation selon la norme [NF P18-427]. Pour chaque configuration, 3 éprouvettes prismatiques 7×7×28 cm ont été confectionnées afin de retenir les valeurs moyennes.
- Suivi des propriétés mécaniques : module d'élasticité dynamique transversal mesuré sur une 11×22 et une 7×14 cm et vitesse de propagation des ondes ultra-sonores sur trois éprouvettes 6×12 cm.
- Suivi de la résistivité électrique, mesurée grâce à des spectres d'impédance sur des éprouvettes 6×12 cm.

### III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### A. Influence du traitement thermique

Les essais de caractérisation mécanique et physique effectués à la suite du traitement thermique sont présentés dans le Tableau 3. Ces résultats doivent permettre d'évaluer les effets directs des cycles de chauffe à 175 °C sur le béton pour les deux durées.

**Tableau 3. Caractéristiques des bétons en fonction des traitements thermiques.**

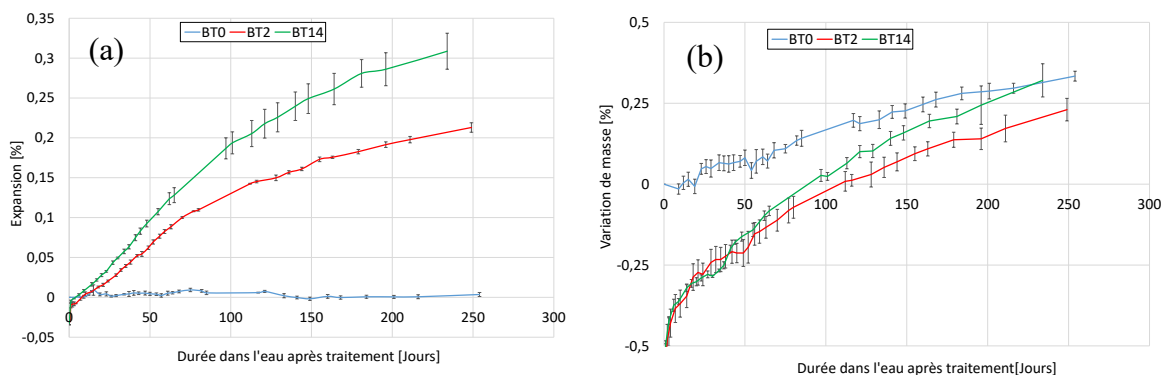
	BT0	BT2	BT14
Résistance en compression [MPa]	45,0 ± 3,0	46,2 ± 2,4	42,6 ± 3,7
Module d'élasticité statique [GPa]	41,6 ± 1,2	33,3 ± 0,5	32,0 ± 0,6
Module d'élasticité dynamique [GPa]	46,5 ± 0,1	31,5 ± 2,1	31,3 ± 2,4
Vitesse ultrasonore [km.s <sup>-1</sup> ]	4,84 ± 0,08	4,36 ± 0,08	4,26 ± 0,10
Porosité à l'eau [%]	12,1 ± 0,4	13,9 ± 0,1	14,6 ± 0,1
Perméabilité au gaz (N <sub>2</sub> ) ×10 <sup>-16</sup> [m <sup>2</sup> ]	1,2 ± (0,7×10 <sup>-2</sup> )	1,3 ± (1,6×10 <sup>-2</sup> )	1,7 ± (1,1×10 <sup>-2</sup> )
Perte de masse [%]	--	5,62 ± 0,30	5,63 ± 0,10

Les résultats des essais mécaniques et physiques montrent tous une dégradation des caractéristiques du béton après traitement thermique. Le module d'élasticité statique passe de 41,6 GPa à 33,3 GPa et 32,0 GPa pour BT2 et BT14 respectivement. Le module dynamique et la vitesse ultrasonore suivent le même comportement. Il est également constaté une augmentation de la porosité (de +14,9 % pour BT2 et de +20,7 % pour BT14) et de la perméabilité (+8,3 % pour BT2 et +41,7 % pour BT14) signe d'une altération de la microstructure.

Les essais de compression n'ayant pas été réalisés au même âge du béton (BT0 à 28 jours, BT2 à 34 jours et BT14 à 50 jours), la résistance moyenne à la compression de BT0 a été extrapolée à partir de l'Eurocode 2 (cf. eq. 3.2 du paragraphe 3.1.2 [NF EN 1992-1-1]) et donne 45,8 MPa à 34 jours et 47,3 MPa à 50 jours. Ainsi la résistance à la compression reste stable à la suite du cycle thermique de 2 jours, le phénomène de détérioration lié au traitement thermique étant compensé en partie par l'hydratation de la matrice cimentaire. Ce comportement a déjà été observé par d'autres auteurs [Matsuzawa et al., 2016] et [Kakae et al., 2017]. Pour BT14, une diminution de 4,7 MPa est constatée, montrant cette fois-ci un impact plus marqué de la durée de chauffe sur la résistance à la compression.

### B. Expansions des bétons

La Figure 2 présente l'évolution de l'expansion et de la masse des bétons en fonction du temps. Les pourcentages sont calculés à partir des valeurs initiales avant traitement thermique.



**Figure 2. (a) Évolutions des expansions et (b) des masses au cours du temps**

Sur la Figure 2 (a), les expansions observées sur les bétons chauffés pendant 2 jours (BT2) et 14 jours (BT14) présentent une augmentation significative ce qui confirme le développement de la RSI dans le béton. [Leklou et al., 2008] ont défini une valeur seuil d'expansion de 0,04 %, à partir de laquelle le béton est considéré comme sujet à une RSI. Les bétons étudiés atteignent ce seuil au bout de 35 jours pour le BT2 et au bout de 27 jours pour le BT14. Cependant, le béton de référence BT0, ne dépassant pas 0,01 %, reste donc largement en dessous de cette valeur durant tout le suivi, et ne développe donc pas de RSI. La température de 175 °C pour les 2 cycles de chauffe provoque bien l'instabilité de l'ettringite.

Plusieurs constats sont faits ici : (i) le BT14 atteint le seuil de RSI avant le BT2, (ii) l'amplitude d'expansion est plus élevée pour BT14 que pour BT2 et (iii) la cinétique d'expansion est plus importante pour BT14. Ainsi la microstructure de BT14 subit des modifications plus importantes que celles de BT2, probablement liée à une densification plus importante de la matrice suite à la formation des ettringites différées dans les zones microporeuses du béton [Leklou et al., 2008], notamment dans les pores capillaires et dans les auréoles de transition. Par ailleurs, ces résultats viennent confirmer les tendances observées par [Lion et al., 2022]. Les auteurs ont étudié un béton de même composition (cf. Tableau 2) et l'ont soumis à une cure thermique à 85 °C (conditions humides) et une à 130 °C (conditions séchantes) pendant différentes durées. Quelques soient les durées, les résultats montrent d'une part que l'expansion maximale atteinte décroît

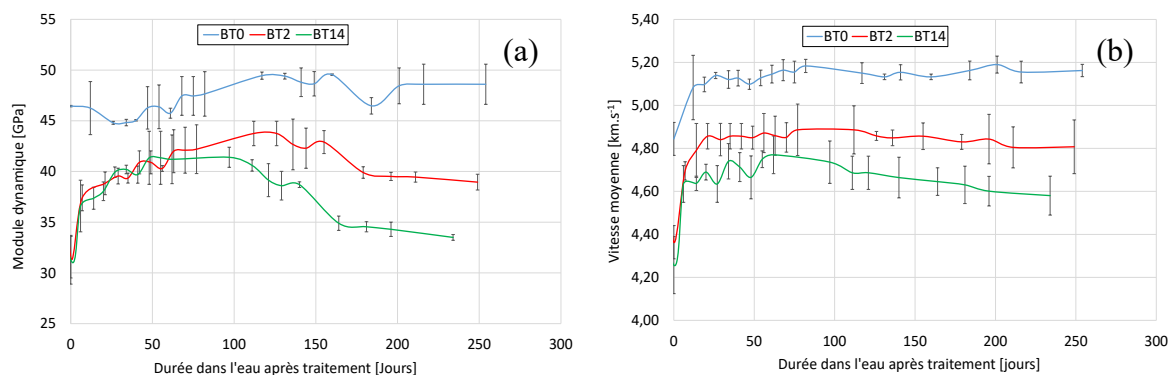
lorsque la température du traitement thermique augmente (à titre de comparaison dans la présente étude, l'expansion maximale atteint 0,3 % à 200 jours, contre 0,52 % à 130 °C et 1,5 % à 85 °C) ; d'autre part, il est à noter que la cinétique ralentit avec l'augmentation de la température. Enfin, à cette température, les durées de chauffe étudiées ici ne permettent pas d'observer un effet *pessimum*, tels qu'il a pu être montré dans plusieurs études [Brunetaud et al., 2007] [Kchakech, 2015].

La Figure 2 (b) montre l'évolution de la masse au cours du temps, corrélée au phénomène de RSI. Il est à noter que les masses de références des 3 bétons ont été prises à 28 jours à l'état saturé avant traitement thermique, ce qui explique les valeurs négatives des variations de masse de BT2 et BT14. Après étuvage ( $t = 0$ ) les pertes de masses sont de l'ordre de 5,4 % et 5,6 % respectivement (non représentées sur le schéma). À partir de  $t = 0$ , le béton de référence BT0 présente une augmentation de sa masse pratiquement linéaire au cours des 250 premiers jours pour atteindre 0,33 %, liée à l'hydratation du ciment. Au contraire, les bétons BT2 et BT14 présentent une cinétique non linéaire, liée d'une part à la saturation des éprouvettes lors de leur immersion après les cycles de chauffe et d'autre part à l'hydratation de la matrice cimentaire. De plus, l'extrapolation des courbes montre que les masses de BT2 et BT14 vont être supérieures à celle de BT0, signe d'un troisième phénomène lié à la densification de la matrice par reformation de l'ettringite.

La conclusion à tirer de cette partie est qu'après un échauffement tardif à 175 °C en conditions séchantes, et immersion, le développement des expansions est effectif sur les bétons BT2 et BT14. Les amplitudes de ces expansions sont plus élevées sur le BT14. Le béton témoin BT0 ne développe pas d'expansion conséquente.

### C. Suivi non destructif des propriétés mécaniques

Le suivi mécanique non destructif s'est fait au travers de 2 paramètres : le module d'élasticité dynamique et la vitesse ultrasonore. Leur évolution en fonction du temps est présentée à la Figure 3.



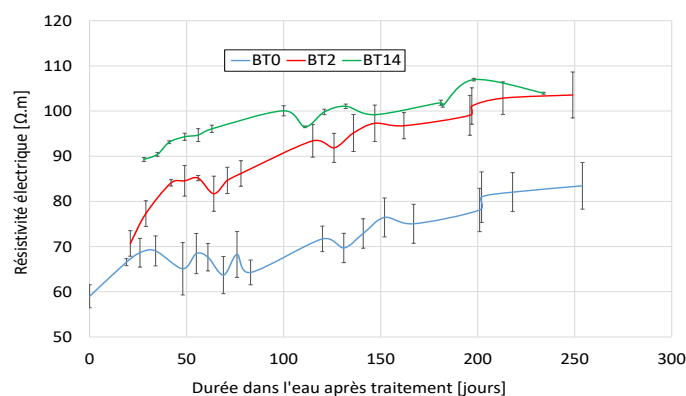
**Figure 3.** Évolution (a) du module dynamique et (b) de la vitesse ultrasonore.

Tout d'abord on constate que BT0 présente une légère augmentation du module dynamique et passe de 46,5 GPa à 48,0 GPa au bout de 250 jours, ce qui s'explique par l'hydratation de la matrice cimentaire. Pour BT2 et BT14, on observe tout d'abord pour la première mesure, à la

sortie de l'étuve, une diminution de l'ordre de 30 % du module dynamique liée au séchage au cours du traitement thermique (cf. perte de masse dans le Tableau 3). Ensuite, les propriétés augmentent avec la reprise d'eau des bétons après immersion des éprouvettes, couplée à l'hydratation du ciment, pour atteindre un plateau à 47,0 GPa à 120 jours pour BT2 et 41,0 GPa à 50 jours pour BT14. Dans les deux cas étudiés ici, les valeurs des plateaux restent inférieures à celle de BT0 (de l'ordre de 5 GPa), le traitement thermique ayant provoqué une rupture irréversible de certaines liaisons chimiques, entraînant une perte de rigidité de la matrice. Après ce maximum, le phénomène de RSI prend le dessus et engendre une décroissance du module dynamique liée à la microfissuration, propre à chaque durée de chauffe. Le même comportement est observé pour les vitesses ultrasonores, confortant ainsi les résultats précédents.

#### D. Suivi de la résistivité électrique

Un suivi a été réalisé sur la résistivité électrique des bétons. La Figure 4 présente l'évolution de cette grandeur. Celle-ci augmente au cours du temps pour les trois bétons BT0, BT2 et BT14. Pour BT0, cette augmentation s'explique là encore par la densification de la matrice cimentaire. Pour BT2 et BT14, on observe le même comportement. Deux raisons peuvent expliquer cette augmentation. D'une part, la formation des cristaux d'ettringite, qui occupent ensuite les micropores de la matrice, densifie le matériau et donc réduit la conductivité électrique. D'autre part, l'eau absorbée par le béton contribue à la précipitation des cristaux d'ettringites et donc les différents ions responsables de la conduction du courant électrique sont consommés. Il est également observé que la cinétique du BT14 est supérieure à celle du BT2. Cela renvoie à la cinétique de gonflement observée aux paragraphes précédents.

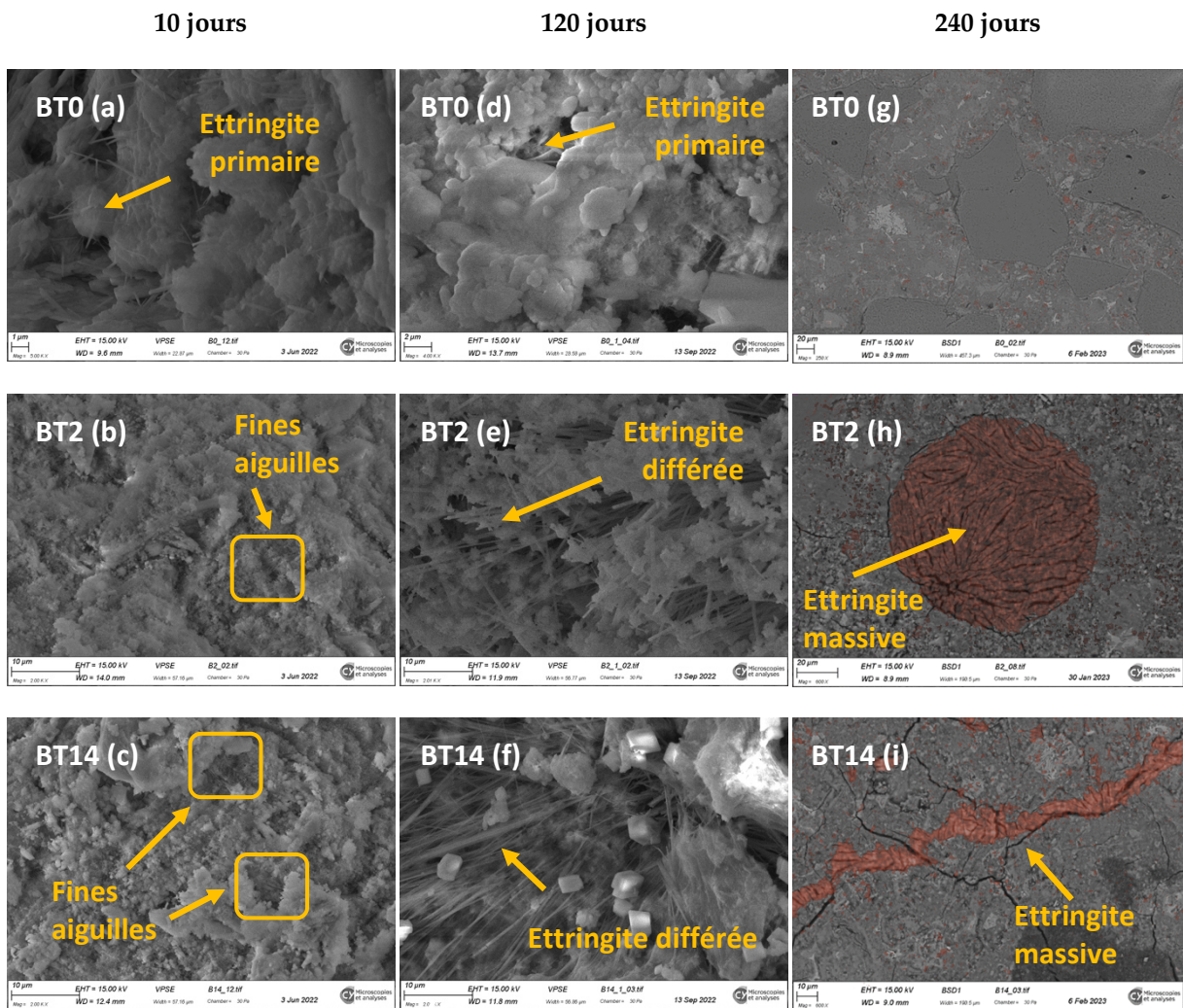


**Figure 4.** Évolution de la résistivité électrique.

#### E. Observations au microscope électronique à balayage

Des analyses MEB ont été effectuées à trois échéances : après traitement thermique (10 jours), à 120 jours et à 240 jours. La Figure 5 présente les images obtenues pour chaque béton (BT0, BT2 et BT14) aux trois dates. Il est à noter que les échantillons observés à 240 jours ont été polis, afin d'effectuer une étude EDX. À cette échéance les images sont ainsi complétées par une cartographie qui présente le soufre (S), l'un des constituants de l'ettringite. Pour la première échéance, le béton BT0 n'ayant pas subi de traitement thermique présente des aiguilles d'ettringite primaire. En revanche, pour les bétons chauffés BT2 et BT14, il paraît difficile de les discerner clairement, exceptées quelques zones où seules quelques fines aiguilles subsistent, cf.

zones encadrées Figure 5 (b) et (c). Ces observations montrent ainsi que l’ettringite s’est dissoute sous l’effet du traitement thermique. Lors de la deuxième échéance, BT0 présente la même morphologie de sa microstructure. En revanche, BT2 et BT14 montrent une quantité importante d’aiguilles liées à la formation d’ettringite différée, participant ainsi à la densification de la matrice. Il est à noter que la quantité d’ettringite est plus importante pour BT14 que pour BT2. À 240 jours, les échantillons de BT2 et BT14 présentent cette fois de l’ettringite massive dans les pores, cf. Figure 5 (h) et au niveau de l’aurole de transition pâte granulats et dans les microfissures Figure 5 (i). La pression exercée par les cristaux d’ettringite est ainsi responsable du gonflement [Leklou et al., 2008]. Il est à noter que des microfissures sont clairement identifiables pour BT14. L’ensemble de ces observations corrobore ainsi les résultats obtenus pour le suivi d’expansion ainsi que les différents indicateurs macroscopiques.



**Figure 5 : Images MEB des bétons BT0, BT2 et BT14 à 10, 120 et 240 jours. À 240 jours, une analyse spectroscopie EDX (zones orangées) a été superposée aux images et présente l’élément soufre (S).**

#### IV. CONCLUSION

Cette étude a permis de répondre à la question, peu étudiée dans la littérature, de l'influence d'un échauffement tardif à une température élevée (175 °C) sur un béton sensible à la RSI maturé 28 jours, pour deux durées de chauffe (2 jours et 14 jours) en conditions séchantes. Les différentes variations induites tant sur l'aspect mécanique que physique ont été présentées. Les résultats obtenus ont montré d'une part l'impact du traitement thermique sur les bétons, et d'autre part la dégradation dans le temps des bétons chauffés et immergés à la suite du développement de la RSI. Il en ressort plusieurs conclusions :

- Le béton BT0 n'ayant pas subi de traitement thermique ne présente pas de réaction sulfatique interne. L'évolution des indicateurs mesurés pour ce béton témoigne exclusivement du phénomène d'hydratation du ciment.
- À 175 °C, le phénomène d'expansion lié à la RSI est d'autant plus important et plus rapide que la durée de chauffe est longue. Il reste cependant inférieur au cas d'un même béton soumis à un échauffement tardif à 130 °C [Lion et al., 2022].
- L'étude du béton soumis à 2 durées de chauffe (2 jours et 14 jours), n'a pas permis de distinguer d'effet *pessimum*. Par extrapolation des travaux de [Brunetaud et al., 2007], ce phénomène devrait intervenir pour un traitement thermique plus court. Il serait ainsi intéressant de compléter cette campagne expérimentale par différentes durées de cures thermiques, afin d'identifier cet optimum.
- L'ensemble des indicateurs mesurés, qu'ils soient mécaniques (module d'élasticité dynamique, vitesse ultrasonore) ou physiques (variation de masse et de déformation et résistivité), montrent tous un comportement distinct qui permet de discriminer clairement BT0, BT2 et BT14.
- Dans un premier temps, la densification de la matrice, liée à la cristallisation de l'ettringite, améliore les performances mécaniques du béton, comme en témoigne l'évolution du module dynamique et de la vitesse ultrasonore. À partir du 100<sup>e</sup> jour environ, la décroissance de ces indicateurs montre que la RSI engendre un début de microfissurations. Ces microfissures sont identifiables au MEB à partir de 240 jours, en particulier pour BT14.
- Les observations au MEB à trois échéances (10, 120 et 240 jours) montrent que le traitement thermique a dissout l'ettringite primaire et que des aiguilles d'ettringite se sont formées au bout de 120 jours. À 240 jours, les cristaux d'ettringite, sous forme massive, remplissent les pores et les auréoles de transition, générant ainsi une pression cristalline qui favorise le gonflement [Leklou et al., 2008]. Ces observations permettent de confirmer les résultats macroscopiques d'expansion et de dégradation des performances mécaniques.

#### V. REFERENCES

X. Brunetaud, R. Linder, L. Divet, D. Duragrin, & D. Damidot (2007). Effect of curing conditions and concrete mix design on the expansion generated by delayed ettringite formation. *Materials and Structures*, 40, 567–578.

D. Heinz, & U. Ludwig (1987). Mechanism of Secondary Ettringite Formation in Mortars and Concretes Subjected to Heat Treatment. *Materials Science, Engineering*, 100, 2059-2072.

N. Kakae, K. Miyamoto, & T. Momma (2017). Physical and Thermal Properties of Concrete Subjected to High Temperature. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 15, 190-212.

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*.

B. Kchakech, R.-P. Martin, O. Metalssi, & F. Toutlemonde (2015). Experimental study of the influence of the temperature and duration of heat treatments at early age on the risk of concrete expansion associated with Delayed Ettringite Formation. *10th International Conference on Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete and Concrete Structures*.

N. Leklou, J.-E. Aubert, & G. Escadeillas (2008). Microscopic Observations of Samples Affected by Delayed Ettringite Formation [DEF]. *Materials and Structures*, 42, 1369–1378.

M. Lion, J. Philippot, & H. Hérin (2022). Etude du comportement de bétons exposés à des échauffements tardifs. *NoMaD 2022, Mines d'Alès*.

M. Malbois, L. Divet, S. Lavaud, & M. Torrenti (2017). Influence de la nature pétrographique des granulats et de cycles de séchage sur le développement de la réaction sulfatique interne dans le béton. *23ème Congrès Français de Mécanique, Lille*.

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*, 711, 519-524.

NF P18-594 (2015). Granulats - Méthodes d'essai de réactivité aux alcalis.

NF P18-427 (1996). Détermination des variations dimensionnelles entre deux faces opposées d'éprouvettes de béton durci.

NF EN 12390-2 (2019). Essais pour béton durci : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance.

NF EN 1992-1-1 (2005). Calcul des structures en béton, partie 1-1 : Règles générales et règles pour bâtiments.

A. Pavoine, X. Brunetaud, & L. Divet (2012). The Impact of Cement Parameters on Delayed Ettringite Formation. *Cement and Concrete Composites*, 34, 521-528.

RILEM TC 129-MHT (2004). Test methods for mechanical properties of concrete at high Temperatures. *Materials and Structures*, 37, 139-144.

K. Scrivener, D. Damidot, & C. Famy (1999). Possible mechanisms of expansion of concrete exposed to elevated temperatures during curing (also known as DEF) and implications for avoidance of field problems. *Cement Concrete and Aggregates*, 21, 93-101.