

Méthodes d'essais de vieillissement accéléré des bétons à l'échelle des ouvrages

Jacques Jabbour^{1, 2, 3}

¹ Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)

² LMT-Cachan, ENS Cachan, CNRS, Université Paris Saclay, Cachan, France

³ Département Matériaux et Structures (IFSTTAR/MAST) - IFSTTAR

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ. Un protocole expérimental visant à accélérer les réactions de gonflement interne du béton à l'échelle de la structure a été développé pour permettre de les étudier et de les caractériser à une telle échelle. Trois maquettes représentatives d'un ouvrage massif ont été réalisées dans des conditions maîtrisées et optimisées afin de favoriser respectivement le développement de la réaction sulfatique interne (RSI), de la réaction alcali-granulat (RAG) et de la concomitance des deux pathologies, RAG et RSI. L'effet d'échelle sur la cinétique de gonflement est mis en évidence grâce à une étude expérimentale permettant de comparer l'évolution des réactions dans les maquettes avec leur évolution dans des éprouvettes en béton reconstitué et des carottages. Une méthode d'instrumentation innovante par fibres optiques a été spécifiquement développée pour ces maquettes, permettant de suivre l'évolution des pathologies dans la masse et d'en déduire les champs de déformation dans plusieurs plans d'intérêt. Les mesures sont utilisées pour décrire finement les mécanismes évolutifs du gonflement et la dégradation des structures. Ces mesures sont aussi utilisées comme référence pour des simulations numériques ultérieures.

ABSTRACT. An experimental protocol to accelerate internal swelling reactions of concrete on a structure scale has been developed to allow better observation and understanding of swelling reactions at structure scale. Three representative massive concrete structures were realized under controlled and optimized conditions for the development of delayed ettringite formation (DEF), alkali silica reaction (ASR) and the concomitant ASR-DEF case respectively. The scale effect on swelling kinetics is demonstrated by an experimental study comparing the evolution of swelling reaction in the massive samples with the evolution in reconstituted concrete laboratory specimens as well as coring specimens. An innovative instrumentation method using optical fibers is also developed thus allowing the monitoring of the pathologies in the massive structures and the tracking of the respective deformation fields in several two-dimensional plans of interest. The measurements are to finely describe and help in understanding the evolutionary mechanisms of structural degradation and can be used subsequently as a reference for numerical simulations.

MOTS-CLÉS : Réactions Sulfatiques Internes, Réaction Alkali-Granulats, couplage, échelle de la structure, accélération, fibre optique

KEYWORDS: Delayed Ettringite Formation, Alkali-Silica Reaction, coupling, structural scale, acceleration, fibre optic

1. Introduction

Les réactions de gonflement internes font partie des pathologies susceptibles d'affecter certains ouvrages en béton. Ces pathologies peuvent être attribuées à deux types de réactions chimiques : la réaction sulfatique interne (RSI) et la réaction alcali-granulats (RAG). Ces réactions, dans leur phase de développement, conduisent à des contraintes de traction au sein du béton et à la création de fissures dans les ouvrages où elles apparaissent. Dans les ouvrages nucléaires, l'éventualité d'apparition de ces phénomènes ne peut pas être écartée. Ce risque doit d'autant plus être étudié que le prolongement de la durée de vie des installations est envisagé. Cependant, la cinétique du développement de ces réactions dans les ouvrages est en général lente, pouvant aller jusqu'à quelques dizaines d'années. Cela a été montré par plusieurs études [AUB 09] [BRU 05] [BAR 02] [PAV 03] [PET 03]. Parmi les solutions pratiquées dans les laboratoires de recherche afin de réduire la phase latente de ces pathologies, l'une consiste à utiliser des protocoles d'essais accélérés mis au point sur des éprouvettes en béton reconstitué ou des échantillons extraits par carottage. Cependant la transposition à l'échelle de l'ouvrage des résultats obtenus sur de telles éprouvettes est toujours un sujet de recherche à explorer.

Différents essais accélérés ont été proposés dans la littérature afin d'évaluer le potentiel réactif de mortiers ou de bétons vis-à-vis de la formation différée d'ettringite ou de la réaction alcali-granulat [BRU 05] [PAV 03] [PET 03]. La plupart de ces essais sont essentiellement basés sur un pré-endommagement des éprouvettes (par des cycles de gel-dégel ou par des cycles de séchage/humidification) ou sur des traitements thermiques très élevés. Ces essais sont critiquables, d'une part, du fait des températures élevées imposées à plusieurs reprises à des échantillons dont les dimensions restent faibles et, d'autre part, quant à la nature de l'endommagement initial.

La RAG a pour caractéristique la réaction des alcalins K^+ et Na^+ présents en solution avec des granulats contenant de la silice mal cristallisée (quartz microcristallin, cristobalite, trydimite, opales...) en présence d'eau, créant des gels expansifs [SHA 96] [TAY 90]. Ces réactions consommant les alcalins - phénomène assimilable à une sorte de lixiviation vis à vis de la RSI - ont tendance à favoriser le déclenchement de la RSI. Ceci est dû sans doute à la baisse du pH que la RAG occasionne dans les ouvrages où les conditions initiales pour la RSI sont réunies (ciment réactif, traitement thermique au jeune âge, humidité relative suffisante...) [DIA 00] [DIV 01]. En effet, des gels d'alcali-silice ont souvent été observés à proximité de l'ettringite différée. Du fait de cette proximité, il y a souvent confusion sur les causes des dommages au sein des matériaux, ces réactions, RSI et RAG, ayant toutes deux pour conséquence la formation de produits expansifs.

Sachant que les bétons sont des matériaux complexes, et notamment multiphasique, plusieurs physiques coexistent avec des couplages entre les phénomènes associés. Ces pathologies agissent à différentes échelles : microscopique, mésoscopique et macroscopique. Les approches multi-échelles apparaissent de plus en plus nécessaires dans le développement d'outils de prédiction dans ce domaine [SAL 13].

Dans ce contexte, trois maquettes représentatives d'un ouvrage massif ont été réalisées dans des conditions maîtrisées et optimisées afin de favoriser respectivement le développement de la RSI, RAG et de la concomitance des deux réactions, RAG et RSI. Une étude expérimentale est menée afin de comparer l'évolution de ces réactions dans les ces maquettes avec celle observée dans des éprouvettes en béton reconstitué et des carottages.

2. Protocole d'accélération proposé

2.1. Description des maquettes: dimensions, matériaux et formulation, traitement thermique et environnement de conservation

Les maquettes construites font 2,4 mètres de longueur, 1,4 mètres de hauteur et 1 mètre d'épaisseur. Les dimensions sont en partie liées à des contraintes logistiques afin de permettre la manutention et la fabrication des maquettes. Cependant l'épaisseur d'un mètre est la dimension recherchée, représentative des ouvrages d'intérêt à l'échelle 1 pour cette étude. Il s'agit d'éléments en béton brut (sans armatures). Les formulations des bétons choisis pour chacune des maquettes ont été sélectionnées afin que leur composition chimique soit favorable au développement des pathologies. Elles se composent d'un ciment Portland composé CEM II/A-LL 42,5 R, de granulats ayant trois coupures granulaires 0-5 mm (sable), 5-12,5 mm et 12,5-20 mm (gravillons) et d'un plastifiant réducteur d'eau à haute performance. Les proportions massiques et les courbes granulométriques de ces constituants sont identiques pour toutes les maquettes, cependant l'origine des granulats varie d'une maquette à l'autre ainsi que le traitement thermique.

Les granulats utilisés pour la maquette RSI sont des granulats calcaires de la carrière de Civaux (0/20 mm). Cependant, pour la maquette RAG et la maquette RAG/RSI: le sable (0/5 mm) est un sable calcaire non réactif NR provenant des carrières du Boulonnais et les gravillons (5/20 mm) proviennent de la carrière de Cimescaut (région du Tournaisis) comportant un réseau de silice diffuse (granulats réactif PR) [GUE 00].

En ce qui concerne le traitement thermique, les maquettes RSI et RAG/RSI (diamètre 1,3 m) sont maintenues à 80°C pendant 80 heures (3 jours environ) puis refroidies graduellement. Un soin particulier dans la maîtrise des conditions thermiques a été nécessaire afin que le gradient de température entre le cœur et la peau du béton ne dépasse pas les 10°C, ceci afin d'éviter toute fissuration due à la dilatation thermique du béton. Enfin, la température maximale de la maquette RAG n'a pas dépassé les 62°C afin de ne pas atteindre les conditions d'initiation de la RSI.

Ensuite, les maquettes sont immergées dans trois piscines dont on contrôle les températures respectives [Figure 1]. Les maquettes RAG et RAG/RSI sont conservées à 38°C alors que la maquette RSI est conservée à 20°C. Les maquettes subissent 12 cycles de changement d'eau au cours de cette étude. La durée d'un cycle est établie de façon à maintenir les maquettes à température constante pendant 28 jours. En effet, cette durée a été optimisée vis-à-vis de la lixiviation des alcalins mais aussi de point de vue économique et écologique sachant qu'un bassin contient 20 m³ d'eau du réseau. La transition entre deux cycles consécutifs est effectuée de manière progressive en imposant la même limite de 10°C sur le gradient thermique entre le cœur du béton et son environnement de conservation.



Figure 1. (a) Vue aérienne de la plateforme expérimentale dédiée aux maquettes. (b) Maquette RAG/RSI installée dans son bassin.

2.2. Stratégie d'accélération : facteurs de cinétique

Dans le domaine de la chimie, un facteur cinétique désigne un paramètre physique capable d'influencer la vitesse d'une transformation chimique. En conséquence, un facteur cinétique modifie la durée d'évolution d'un système chimique. Plusieurs facteurs cinétiques peuvent être envisagés comme la température, la concentration des réactifs, un catalyseur, la pression etc. Cependant, un facteur cinétique n'a pas systématiquement une influence sur une transformation chimique quelconque. Le déroulement d'une transformation chimique nécessite que les réactifs entrent en contact or ils sont initialement dispersés dans le solvant et animés de mouvements aléatoires. La réaction est donc d'autant plus accélérée que la "rencontre" des réactifs est facilitée. L'énergie cinétique d'une molécule donnée est fonction de son agitation thermique et la vitesse à laquelle se réalise une réaction chimique est d'autant plus élevée que les concentrations des réactifs sont importantes.

Afin d'accélérer les réactions de gonflement internes dans le béton notre approche est en conséquence de maximiser les quantités de réactifs disponibles d'une part, et de maintenir une température optimale d'autre part. Ceci doit être réalisé dans des conditions réalistes et représentatives des conditions réelles qu'un ouvrage pourrait subir et tout en évitant le pré-endommagement du matériau, que ce soit d'origine thermique, mécanique ou hydrique.

Dans le cas de la RAG, ceci revient à maximiser la quantité de silice réactive disponible dans le système, la concentration des alcalins ou les deux, et à déterminer la température la plus favorable à la réaction à laquelle il faut maintenir le système. En effet, la combinaison (sable NR et granulat PR) a été choisie à partir d'une étude pétrographique effectuée par le LCPC sur la réactivité de ces granulats avec les alcalins. [GUE 00] [LAR 98]. Les bétons fabriqués à partir de granulats provenant de la carrière de Cimescaut à Antoing ont présenté des gonflements importants pour un dosage d'alcalin à partir de 1,6 Kg/m³. Étant donné que la formulation utilisée dans le cas présent contient 4 Kg/m³ d'alcalins, il a été retenu de ne pas doper le mélange avec des alcalins supplémentaires afin de faciliter le découplage avec la maquette RAG/RSI. Parmi les conditions de conservation, la température a un effet prépondérant sur le déroulement de la réaction alcali-granat. Elle a d'abord un rôle cinétique qui a été utilisé dans de nombreuses expériences de laboratoires. En effet, à la température ambiante, l'alcali-réaction met plusieurs années avant de se déclarer et plusieurs dizaines d'années avant d'arriver à son terme. À *contrario*, pour des températures élevées, la réaction est accélérée et les déformations apparaissent vite. Ainsi, à 38°, les déformations commencent dès la fin de la cure, alors qu'il faut attendre plus longtemps à 23°. Dans des conditions extrêmes, en élevant la température jusqu'à 60°, le gonflement final peut même être obtenu

en 2 mois [LAR 98], D17-p&MPEI-Ve-tο2 une hausse de la température (5 min) une baisse de la solubilité de la portlandite et une augmentation de celle de la silice, ce qui devrait avoir pour conséquence une aggravation des désordres. En raisonnant ainsi, une température de 38° a été déterminée comme étant optimale pour la conservation des maquettes afin de favoriser l'apparition de RAG et de RAG/RSI.

Dans le cas de la RSI, l'accélération est essentiellement obtenue en maximisant la quantité d'ettringite déstabilisée au jeune âge, dictée par le profil thermique au jeune âge de la maquette. Étant donné que le ciment utilisé présente une composition satisfaisant les conditions pour développer la pathologie ($Al/S = 0,7$, $Na_2eq = 1 \%$), le profil thermique dans le volume des maquettes au jeune âge devient le facteur clé pour l'initiation de la réaction. Afin d'optimiser ce paramètre, la quantité d'ettringite formée a été maximisée en fonction du traitement thermique appliqué par le biais d'une modélisation [BAG 08] [MAR 10] [KCH 15]. Cette modélisation fait apparaître un paramètre dénommé « EU » (« Énergie Utile ») correspondant au temps (en heures) passé au-dessus de 65°C, à l'origine de la déstabilisation de l'ettringite au jeune âge et de sa précipitation ultérieurement [KCH 15]. La [Figure 2-a] présente l'évolution d'un indicateur d'ettringite (I_{AFt}) correspondant au produit de la solubilité de l'ettringite, fonction des teneurs en sulfates, en aluminium et en alcalins initiales dans le béton, et de l'énergie thermique utile (EU). La partie décroissante de la courbe correspond à la baisse de la quantité d'aluminium, devenant insuffisante pour réagir avec les sulfates désorbés des CSH dans le but de former l'ettringite. La concentration des aluminates dans la solution interstitielle diminue avec l'augmentation de la durée du traitement thermique par substitution des Si des CSH par Al afin de former des CASH voire des CAH [FAM 02] [BRU 05] [SAL 13]. Il s'agit d'une adsorption définitive qui a pour conséquence la chute du rapport Al/S limitant ainsi la précipitation tardive de l'AFt.

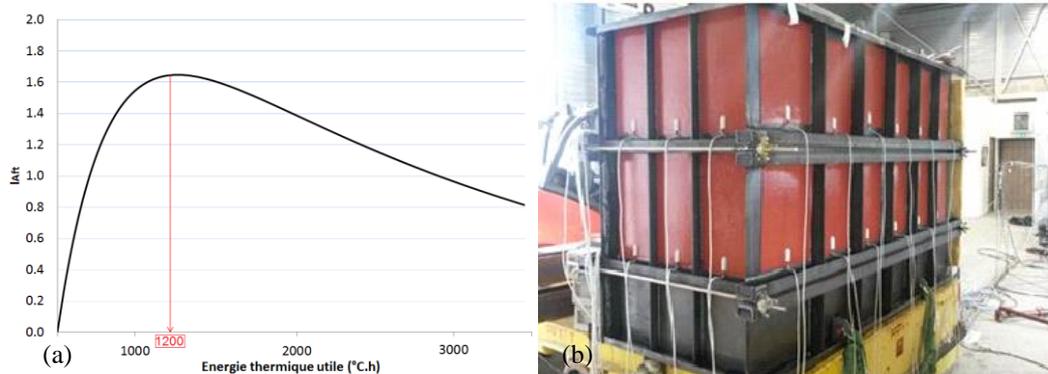


Figure 2. (a) Évolution de l'indicateur d'ettringite (I_{AFt}) en fonction de l'EU (b) Dispositif expérimental assurant le traitement thermiques des maquettes RSI et RAG-RSI.

Ainsi il a été démontré que pour cette formulation de béton, l'énergie thermique utile (EU) nécessaire pour maximiser la quantité d'ettringite déstabilisée (donc présente dans le système) est d'environ 1200°C.h. Ceci peut être obtenu par plusieurs traitements thermiques : maintien à 70°C pendant 10 jours (240 heures), à 80°C pendant 3 jours (80 heures), à 90°C pendant 48 heures, etc. Cependant, un traitement thermique pendant une longue durée est susceptible de réduire l'expansion finale du béton [BRU 05] et un traitement thermique à des températures très élevées (comme 90°) est susceptible de changer la nature des hydrates [DIV 01]. En prenant en compte ces deux facteurs, le traitement thermique retenu pour les maquettes RSI et RAG-RSI est de 80°C pendant environ 3 jours (80 heures). Ce traitement thermique est assuré via une peau chauffante installée sur le coffrage conçue de manière à maintenir une température homogène dans la maquette [Figure 2-b].

Les conditions de conservation après le traitement thermique ont une influence significative mais complexe sur les gonflements dus à la RSI en termes d'amplitude et de cinétique. Plusieurs travaux [FLA 08] [BAG 08] ont montré que la température de conservation après cure thermique influe sur l'amplitude et la cinétique des expansions des corps d'épreuves. Ainsi, une température de conservation élevée (38°C) est défavorable vis-à-vis de l'amplitude de l'expansion mais accélère la cinétique en comparaison d'une température de conservation de 23°C. À une température de conservation élevée, les faibles expansions peuvent être expliquées par l'augmentation de la solubilité de l'ettringite, ce qui peut engendrer des pressions de cristallisation moins importantes au sein du matériau. L'accélération de la cinétique est due à l'augmentation des vitesses de transfert ionique au niveau de la matrice poreuse [FLA 08]. Au final, une température de conservation de 20±2°C a été identifiée comme présentant un bon compromis permettant une expansion significative et une cinétique adaptée aux observations à réaliser sur la maquette RSI.

En laboratoire comme sur des ouvrages, l'influence des apports d'eau sur les gonflements pathologiques du béton a été largement constatée [BER 92] [VIV 81]. Dans le déroulement des réactions, l'eau a deux fonctions :

une fonction de réaction des quantités disponibles [LAR 98], et une fonction de milieu réactionnel en permettant le transport et donc la mise en contact des réactants [LAR 98]. Des valeurs-seuils d'humidités relatives ont été mises en évidence dans le cadre de différents travaux que ça soit pour la RAG (HR compris entre 80 et 100%) ou pour la RSI (HR compris entre 92% et 100% [GRA 07]). En pratique, le choix d'immerger les maquettes a été fait, car plus simple au plan technologique que le maintien en atmosphère à humidité contrôlée.

2.3. Profils de température et simulation numérique de la lixiviation dans les maquettes

L'une des principales difficultés avec l'accélération des cinétiques de réaction de gonflement pour des maquettes de grande taille est la maîtrise et l'homogénéité des conditions au sein du volume de ces maquettes. Une modélisation a été proposée pour traiter cet aspect. En outre, il doit être vérifié que les conditions obtenues dans les maquettes sont effectivement représentatives des conditions présentes au sein des ouvrages d'intérêt.

Pour mener cette vérification, ont été déterminés par simulation puis comparés : (a) le champ de température au sein de la maquette RSI, dans les conditions de l'expérimentation ; (b) le champ de température au sein d'un ouvrage massif ayant les mêmes dimensions que les maquettes, mais en l'absence d'apport de chaleur de l'extérieur.

Deux différences majeures sont mises en évidence. En premier lieu, l'énergie thermique utile (EU) dans le cas de l'ouvrage est de l'ordre de 600°C.h, soit environ 50 % de l'énergie communiquée à la maquette par le dispositif mis en place pour développer la RSI. Ce facteur a un impact significatif sur la période latente et l'expansion finale. En second lieu, cette simulation met en évidence un champ de température non-homogène (avec une $T_{max} > 65^{\circ}\text{C}$ à cœur et $T_{max} < 65^{\circ}\text{C}$ près des bords) dans le cas de l'ouvrage. Ce constat vient confirmer l'intérêt des précautions prises au coulage de la maquette avec la mise en place d'une peau chauffante, ayant ainsi permis de garantir un champ de température homogène et maîtrisé.

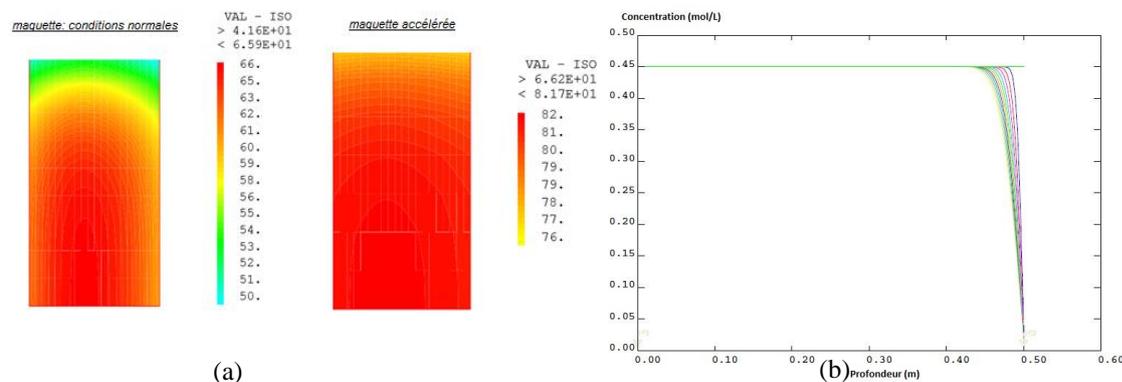


Figure 3. (a) Champs de température dans les maquettes à l'instant T_{max} : conditions normales et conditions accélérées (b) Profil de Na_2eq dans les maquettes suite à 12 cycles de changement d'eau.

Sachant que la lixiviation des alcalins intervient principalement en bordure du béton, comme le montre la modélisation après 12 cycles de changement d'eau, la pathologie devrait d'abord se développer en surface dans les maquettes concernées [Figure 3-b]. Dans le cas de l'ouvrage, étant donné que les conditions thermiques ($T \geq 65^{\circ}\text{C}$) du développement ne sont atteintes qu'à cœur et sachant que les effets de l'environnement (lixiviation des alcalins) agissent principalement en surface, ceci pourrait expliquer partiellement la durée importante avant la manifestation des désordres dans les ouvrages massifs traditionnels.

3. Instrumentation des maquettes

L'instrumentation est un aspect très important de ce projet scientifique dont l'objectif est notamment de pouvoir suivre l'évolution des propriétés du béton depuis le jeune âge (notamment le dégagement de chaleur), jusqu'à la maturation, puis le gonflement et la fissuration au long terme. Dans ce but, un système d'auscultation complet a été mis au point intégrant des mesures traditionnelles (thermocouples, sondes platines PT100, extensomètres à cordes vibrantes) et mesures innovantes (fibres optiques). Certaines mesures sont redondantes pour garantir la robustesse des mesures.

Un plan transversal de la maquette a été instrumenté par des capteurs de température (thermocouple et sonde à résistance de platine PT100) le long de deux axes, afin de relever le profil thermique au jeune âge et

La mesure de la déformation MPa dans le béton est assurée par trois (3) sondes de (15 cm) vibrantes installées à trois niveaux différents de la maquette (donc différents niveau de confinement dû au poids propre du béton). Chaque rosette contient trois extensomètres à corde vibrante orientés dans les trois directions (X, Y, Z) respectivement permettant de suivre continuellement les déformations au cours du temps avec une précision de l'ordre du $\mu\text{m/m}$. Les rosettes sont disposées dans la maquette comme illustré sur la [Figure 4]. Quant à la mesure de la déformation globale dans le béton, une méthode de suivi par fibre optique a été développée. Les capteurs à fibre optique permettent des mesures réparties et sur des longueurs importantes [KHA 13]. Ce sont des avantages indéniables par rapport aux autres techniques lorsqu'on s'intéresse à la surveillance d'ouvrages de grandes dimensions. En s'appuyant sur le principe de l'*Optical Frequency Domain Reflectometry* (OFDR), il est possible de mesurer la déformation et la température le long de la fibre grâce, respectivement, à la mesure de rétrodiffusion du spectre de Rayleigh et à la mesure de la puissance du spectre Raman. Les plans présentés en [Figure 4] illustrent le positionnement de la fibre dans les maquettes. La fibre est positionnée en serpentín afin d'obtenir des champs de déformation (et de température) dans le plan, moyennant certaines corrections, projections et interpolations des profils linéaires. Étant donné l'environnement agressif (température au jeune âge associée à un pH élevé) auquel sera soumise la fibre, une étude de faisabilité a été nécessaire afin de sélectionner une fibre optique pouvant résister à ces conditions. La longueur totale de la fibre noyée étant de 35 mètres, l'équivalent de 350 points de mesures est inclus dans la maquette par fixant le pas d'interrogation à 10 cm.

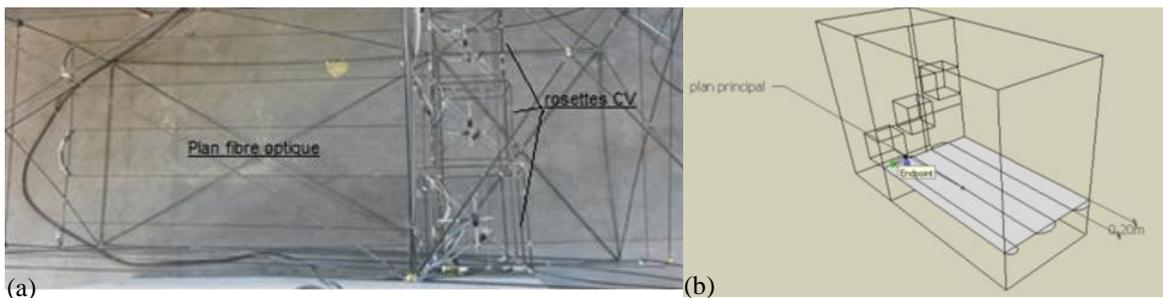


Figure 4. Mise en place de la fibre optique dans les maquettes (a) Photo (b) Plan de conception.

L'avantage que procure la réalisation de maquettes de telles dimensions est la possibilité d'un suivi macroscopique au moyen de méthodes industrielles éprouvées. Ainsi, la détermination de l'indice de fissuration d'un parement en béton selon une méthode développée à l'IFSTTAR (*Méthode d'essai des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°47*) est applicable pour évaluer l'état de dégradation des maquettes au cours du temps [FAS 97]. Cette méthode a pour objet de quantifier de façon simple et rapide l'état de fissuration d'une zone d'un parement d'ouvrage en béton atteint de pathologie de gonflement. Elle permet de caractériser de manière conventionnelle l'état d'endommagement à un instant donné de structures en béton afin d'en établir un classement mais aussi d'en suivre l'évolution dans le temps. Ainsi, le parement d'une zone non-instrumentée de la maquette a été choisi à cet effet.

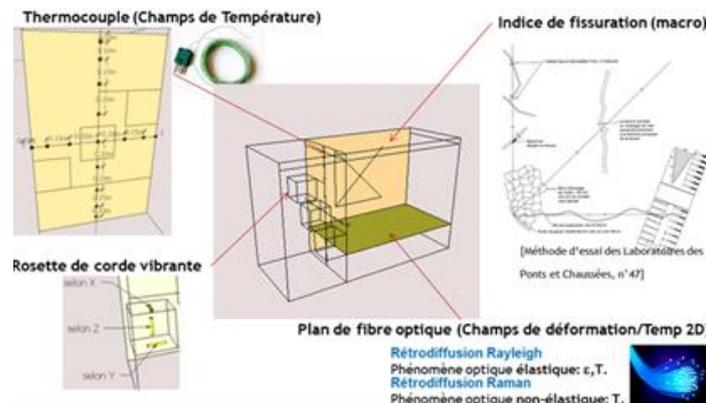


Figure 5. Schéma de mise en place de l'instrumentation dans les maquettes.

4. Programme expérimental multi-échelle

Le programme expérimental établi a pour objectifs de :

- Valider le protocole de vieillissement accéléré mis au point à l'échelle des maquettes ;

- Faire le lienage des essais développés sur des éprouvettes en béton reconstitué afin de dégager l'effet d'échelle sur la cinétique de développement des pathologies dans le cas des structures non-armées ;
- Étudier le couplage RAG-RSI.

Dans cette perspective, une campagne de mesures est menée avec trois échelles d'intérêt : l'échelle de la structure, l'échelle mésoscopique et l'échelle microscopique. La durée de cette étude est de 12 mois débutant en mi-décembre 2016.

À l'échelle de la structure, soit au niveau des maquettes, cette étude consiste à suivre les déformations mesurées par les extensomètres à cordes vibrantes fournissant la déformation locale selon une dimension, à suivre les champs de déformation dans les différents plans de la fibre optique et à suivre l'indice de fissuration en surface.

À l'échelle mésoscopique, trois séries d'éprouvettes cylindriques $11 \times 22 \text{ cm}^3$ et $16 \times 32 \text{ cm}^3$ ont été fabriquées avec les mêmes granulats et les mêmes formulations que les maquettes RAG, RAG-RSI et RSI respectivement. Le même profil de température que celui enregistré au jeune âge à cœur des maquettes (jusqu'à retour à température ambiante) a été appliqué à ces éprouvettes dans une enceinte climatique maintenue à 100 % d'humidité relative. Ces éprouvettes sont ensuite placées dans des bacs d'eau aux mêmes températures et avec le même rapport $V_{\text{eau}}/S_{\text{béton}}$ que les maquettes dans les piscines respectives.

De plus, trois carottages par maquette ont été effectués au début du programme expérimental et trois sont prévus à la fin. Les carottes sont de mêmes dimensions que les éprouvettes en béton reconstitué ($11 \times 22 \text{ cm}^3$). Les carottes extraites de la maquette RSI subissent la *Méthode d'essai des LPC n°67* (Essai d'expansion résiduelle sur carotte de béton extraite de l'ouvrage), elles sont donc immergées dans de l'eau à $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Les carottes extraites de la maquette RAG subissent la *Méthode d'essai des LPC n°44*, elles sont donc conservées à $38 \pm 2^\circ\text{C}$ à 100 % d'humidité relative. Parmi les trois carottes extraites de la maquette RAG-RSI, deux subissent la *Méthode d'essai des LPC n°67* et une subit la *Méthode d'essai des LPC n°44*. Le gonflement libre des éprouvettes est ainsi caractérisé jusqu'à ce que les variations dimensionnelles soient jugées stables. Ce qui permettra de quantifier le potentiel de gonflement libre susceptible de se développer dans les maquettes.

Pour conforter les conclusions éventuelles des suivis d'expansion, des observations microscopiques au microscope électronique à balayage (MEB) et des analyses par diffractométrie de rayons X (DRX) sont prévues afin de confirmer l'origine des gonflements observés aux échelles supérieures.

5. Premiers résultats : effet de la température de conservation sur les réactions de gonflement à grande échelle

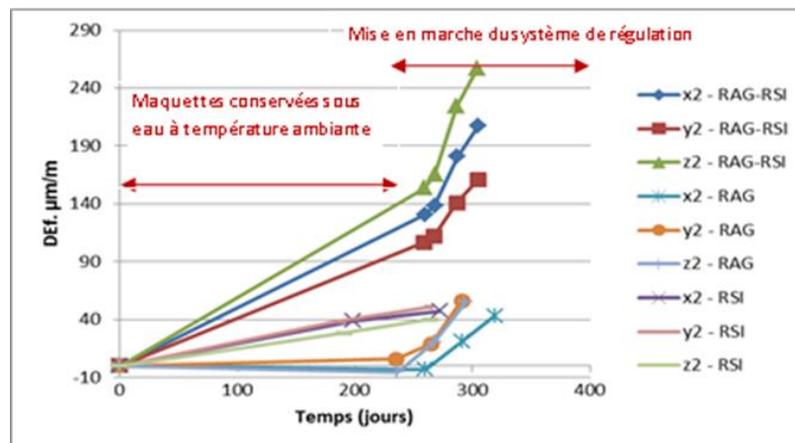


Figure 6. Mesure de gonflement en fonction du temps au niveau de la rosette centrale.

La [Figure 6] montre les mesures de gonflement par la rosette centrale dans les trois maquettes. On distingue deux phases : la phase où les maquettes sont conservées sous eau à température ambiante pendant la construction de la plateforme expérimentale dédiée à cet essai et la phase suivant la mise en marche du système de régulation de température. Dans la première phase, la maquette RAG n'a présenté aucun gonflement avant l'élévation de la température à 38°C .

Quant aux autres maquettes ALPHEA, noter que l'expansion 2017 maquette RAG/RSI est nettement supérieure à celle de la maquette RSI. Ceci pourrait être expliqué par deux facteurs : d'une part la nature des granulats et d'autre part la concomitance des deux pathologies. En effet, [BRU 05] a comparé l'effet de granulats calcaires et siliceux (non réactif) sur la RSI. Cet auteur a observé une différence au niveau de l'interface pâte-granulat (ITZ) après un échauffement au jeune âge. Ainsi, l'auréole de transition au niveau des granulats calcaire est moins poreuse que dans le cas de l'utilisation des granulats siliceux. Ceci est attribué à la différence des coefficients de dilatation entre la pâte et les granulats : cette différence est moins importante pour les granulats calcaires que les granulats siliceux. D'ailleurs, [MAR 10] a montré que l'initiation et la cinétique des gonflements liés à la formation d'ettringite différée sont plus rapides en cas de couplage RSI/RAG. En revanche, il semblerait que dans le cas mentionné par cet auteur, le niveau final d'expansion ne soit pas plus important lorsque les deux pathologies sont concomitantes.

Une fois le système de régulation de la température mis en marche, le gonflement associé à la RAG commence : celui-ci est mesurable par la variation de déformation en fonction du temps pour les maquettes RAG et RAG-RSI. Ainsi on rejoint les résultats de la littérature portant sur l'influence de la température sur la cinétique de développement de la RAG sur éprouvettes. La cinétique de gonflement de la maquette RSI ne semble pas impactée quant à elle après la mise en marche du système de régulation.

Quant aux fibres optiques, une comparaison entre deux états thermiques de la maquette a permis de valider de manière préliminaire la pertinence des champs de déformation mesurés car en bonne correspondance avec les prévisions associées à l'effet de la dilatation thermique [Figure 7]. Dans la suite de l'étude, des mesures à différentes échéances seront comparées à la mesure de référence afin de suivre l'évolution dans le plan.

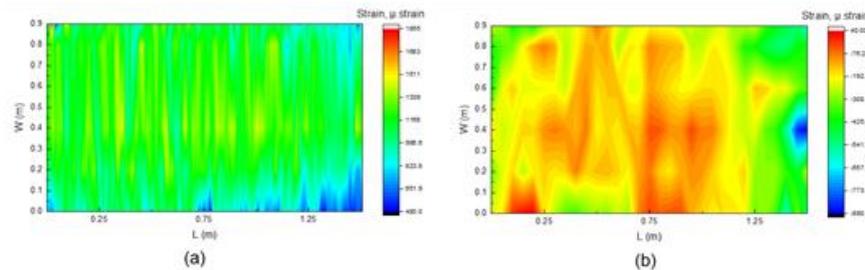


Figure 7. Champs de déformations mesurées par fibre optique (a) Mesure de référence à $T=20^{\circ}\text{C}$ (b) Mesure à $T=38^{\circ}\text{C}$.

6. Conclusion

La campagne expérimentale présentée, menée sur trois maquettes représentatives d'un ouvrage massif a pour objectif de développer un protocole visant à accélérer les pathologies de gonflement interne à l'échelle des structures. L'influence du couplage RAG-RSI et de la température de conservation ont été mis en évidence à la lumière des premiers résultats. Une méthode d'instrumentation innovante par fibres optiques permet de suivre l'évolution des pathologies dans la masse et d'obtenir une image des champs de déformation. Une importante campagne expérimentale multi-échelle permettra de faire le lien avec les méthodes et les protocoles d'essais pratiqués dans les laboratoires sur des éprouvettes en béton reconstitué ou extraites par carottage.

En conclusion, la maîtrise des réactions de gonflement découle de l'analyse des conditions initiales d'un ouvrage (profil de température, analyses pétrographiques, type de ciment, formulation...) mais aussi de l'impact des conditions d'environnement (hydriques, thermiques, mécaniques...) au cours de sa vie.

Le travail effectué notamment au niveau de la conception et la réalisation des maquettes et le retour d'expérience ont permis de développer plusieurs outils expérimentaux, numériques et logistiques qui sont actuellement valorisés dans le cadre du projet ODOBA de l'IRSN. Les résultats obtenus à ce stade et par la suite seront mis à profit dans le cadre du projet ODOBA pour l'étude de maquettes de dimensions plus importantes, avec/sans armatures, avec/sans précontrainte et en testant plusieurs formulations représentatives du parc nucléaire français. Ceci permettra de développer et de valider de meilleurs outils prédictifs concernant l'évolution des caractéristiques des ouvrages au cours du temps.

7. Bibliographie

- [BAG 08] BAGHDADI N., SEIGNOLPHI M., MARTIN R., PRENÉ S., MARCHAND J., 2008, *Effect of early age thermal history on the expansion due to delayed ettringite formation: experimental study and model calibration*, Advances in Geomaterials and Structures.
- [BAR 02] BARBARULO R., PEYCELONA H., PRENÉ S., MARCHAND J., 2005, *Delayed ettringite formation symptoms on mortars induced by high temperature due to cement heat of hydration or late thermal cycle*, Cement and Concrete Research 35, 125– 131.
- [BRU 05] BRUNETAUD X., 2005, *Étude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne*. Thèse de l'Ecole Centrale de Paris.
- [DIA 00] DIAMOND S. (2000), The relevance of laboratory studies on delayed ettringite formation to DEF in field concretes, Cement and Concrete Research, 30, 1987-1991
- [DIV 01] DIVET L. (2001), Les réactions sulfatiques internes au béton : contribution à l'étude des mécanismes de la formation différée de l'ettringite, thèse de doctorat, Conservatoire National des Arts et Métiers
- [FAM 02] FAM Y. C., SCRIVENER K.-L., ATKINSON A., BROUGH A. R. (2002), Influence of the storage conditions on the dimensional changes of heat-cured mortars. Cement and Concrete Research, Vol. 31, n° 5, p. 795-803
- [FAS 97] FASSEU P., 1997, "Alcali-Réaction du béton : Essai d'expansion résiduelle sur béton durci", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Projet de méthode d'essai LPC N°44, 12 p.
- [FLA 08] FLATT & SCHERER G. W., 2008, *Factors affecting crystallisation pressure, International RILEM TC 186-ISA workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Switzerland, 139-154.
- [GUE 00] GUEDON-DUBIED J.-S., CADORET G., DURIEUX V., MARTINEAU F., FASSEU P., VAN OVERBECKE V., « Étude du calcaire Tournaisien de la carrière Cimescaut à Antoing (Belgique) Analyse pétrographique et chimique et réactivité aux alcalins », *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 226, 2000, p. 57-66.
- [KCH 15] KCHAKECH B. Étude de l'influence de l'échauffement subi par un béton sur le risque d'expansions associées à la Réaction Sulfatique Interne. Matériaux. Université Paris-Est, 2015.
- [KHA 13] KHADOUR A., BABY F., HERRERA A., TAILLADE F., MARCHAND P., RIVILLON P., SIMON A., QUIERTANT M., TOUTLEMONDE F., « Distributed Strain Monitoring Of Reinforcement Bars Using Optical Fibers For Shm », CONSEC13 Seventh International Conference on Concrete under Severe Conditions–Environment and Loading, p. pp–1620, 2013.
- [LAR 98] LARIVE C., Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques, ERLPC, Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris, 1998.
- [MAR 10] MARTIN R.-P. (2010), Analyse sur structures modèles des effets mécaniques de la réaction sulfatique interne, thèse de doctorat, Université Paris-Est
- [PAV 03] PAVOINE A., 2003, *Evaluation du potentiel de réactivité des bétons vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite*, Mémoire de thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie- Paris 6.
- [PET 03] PETROV N., TAGNIT-HAMOU A., 2003, *Is microcracking really a precursor to DEF and consequent expansion?*, ACI Materials Journal, 101(6), 442-447.
- [SAL 13] SALGUES M., 2013, *Modélisation des effets structuraux des réactions sulfatiques internes et alcaligranulats : Application aux barrages en béton*, Mémoire de thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- [SHA 96] SHAYAN A., QUICK G.-W. (1992), Microscopic features of cracked and uncracked concrete railway sleepers, ACI Materials, vol. 89, n°4, pp. 384-361
- [TAY 90] TAYLOR H.-F.-W. (1990), Sulfate Reactions in Concrete – Microstructural and Chemical Aspects, Cement Technology, Vol. 40, p. 61-78