



HAL
open science

Etude expérimentale et modélisation de l'influence de l'eau sur la réaction alcali-silice

Stéphane Poyet, Alain Sellier, Geneviève Thevenin-Foray, Bruno Capra, Jean-Michel Torrenti, Eric Bourdarot, Hélène Tournier-Cognon

► To cite this version:

Stéphane Poyet, Alain Sellier, Geneviève Thevenin-Foray, Bruno Capra, Jean-Michel Torrenti, et al.. Etude expérimentale et modélisation de l'influence de l'eau sur la réaction alcali-silice. *Revue Française de Génie Civil*, 2004, 8 (2-3), pp.345 - 366. 10.1080/12795119.2004.9692610 . cea-03293500

HAL Id: cea-03293500

<https://cea.hal.science/cea-03293500>

Submitted on 21 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

This article was downloaded by: [CEA Saclay]

On: 29 January 2015, At: 00:49

Publisher: Taylor & Francis

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK

Revue Française de Génie Civil

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/tece18>

Etude expérimentale et modélisation de l'influence de l'eau sur la réaction alcali-silice

Stéphane Poyet ^a, Alain Sellier ^b, Geneviève Thevenin-Foray ^a, Bruno Capra ^c, Jean-Michel Torrenti ^d, Eric Bourdarot ^f & Hélène Tournier-Cognon ^e

^a LaM—UMLV, 5 Boulevard Descartes, F-77454, Marne-la-Vallée cedex 2 E-mail:

^b LMDC, INSA/UPS—Dpt GC, 135 avenue de Ranguel, F-31077, Toulouse cedex 4 E-mail:

^c OXAND SA, 36 bis avenue Franklin Roosevelt, F-77210, Avon E-mail:

^d IRSN, BP 17, F-92262, Fontenay-aux-Roses cedex E-mail:

^e EDF/DER, Site des Renardières, Route de Sens, Ecuelles, F-77818, Moret-sur-Loing E-mail:

^f Direction de l'Equipeement, CIH, Savoie-Technolac, F-73373, Le Bourget-du-Lac E-mail:

Published online: 05 Oct 2011.

To cite this article: Stéphane Poyet, Alain Sellier, Geneviève Thevenin-Foray, Bruno Capra, Jean-Michel Torrenti, Eric Bourdarot & Hélène Tournier-Cognon (2004) Etude expérimentale et modélisation de l'influence de l'eau sur la réaction alcali-silice, *Revue Française de Génie Civil*, 8:2-3, 345-366

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/12795119.2004.9692610>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Taylor & Francis makes every effort to ensure the accuracy of all the information (the "Content") contained in the publications on our platform. However, Taylor & Francis, our agents, and our licensors make no representations or warranties whatsoever as to the accuracy, completeness, or suitability for any purpose of the Content. Any opinions and views expressed in this publication are the opinions and views of the authors, and are not the views of or endorsed by Taylor & Francis. The accuracy of the Content should not be relied upon and should be independently verified with primary sources of information. Taylor and Francis shall not be liable for any losses, actions, claims, proceedings, demands, costs, expenses, damages, and other liabilities whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with, in relation to or arising out of the use of the Content.

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. Terms & Conditions of access and use can be found at <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>

Etude expérimentale et modélisation de l'influence de l'eau sur la réaction alcali-silice

Stéphane Poyet¹ — Alain Sellier² — Geneviève Thevenin-Foray¹
Bruno Capra³ — Jean-Michel Torrenti⁴ — Eric Bourdarot⁶
Hélène Tournier-Cognon⁵

1. LaM – UMLV, 5 Boulevard Descartes, F-77454 Marne-la-Vallée cedex 2
2. LMDC, INSA/UPS – Dpt GC, 135 avenue de Rangueil, F-31077 Toulouse cedex 4
3. OXAND SA, 36 bis avenue Franklin Roosevelt, F-77210 Avon
4. IRSN – BP 17, F-92262 Fontenay-aux-Roses cedex
5. EDF/DER, Site des Renardières, Route de Sens, Ecuelles, F-77818 Moret-sur-Loing
6. Direction de l'Equipement, CIH, Savoie-Technolac, F-73373 Le Bourget-du-Lac

poyet@univ-mlv.fr – sellier@insa-tlse.fr – capra@oxand.com – foray@univ-mlv.fr
jean-michel.torrenti@irsn.fr – helene.cognon@edf.fr – eric.bourdarot@edf.fr

RÉSUMÉ. L'eau est un ingrédient essentiel pour la réaction alcali-silice, elle est à la fois réactif car elle est partie intégrante des produits formés et milieu de transport des espèces ioniques. Le travail présenté propose une nouvelle méthode qui permet de prendre en compte son influence sur la réaction au moyen de lois originales. Ces dernières sont calées à partir de résultats expérimentaux présentés dans cet article. Le modèle est alors validé par l'intermédiaire de simulations numériques d'essais effectués à dessein et issus de la littérature.

ABSTRACT. Water is very important for alkali-silica reaction, it is the diffusion medium for ionic species and in the same time it is part of the reaction products. The work presented in the following article deals with a new method which takes into account the effect of water on alkali-aggregate reaction thanks to original laws. The latter have been determined thanks to experimental results. The modelling is validated by the means of numerical simulations of experiments carried out on purpose or taken from literature.

MOTS-CLÉS : réaction alcali-silice, modélisation, expansion, gonflement, influence de l'eau, degré de saturation, calcul hydro-chemo-mécanique.

KEYWORDS: alkali-silica reaction, modelling, expansion, swelling, water effect, saturation degree, hydro-chemo-mechanic simulation.

1. Introduction

La réaction alcali-silice est une pathologie des bétons mondialement connue. Elle est causée par une réaction chimique interne au béton entre la silice amorphe ou mal cristallisée contenue dans certains granulats et les ions de la solution interstitielle (ions hydroxydes, alcalins et ions calcium). Elle engendre une attaque des granulats réactifs, la précipitation de produits dits « gonflants » et le gonflement du matériau atteint. Au niveau des ouvrages, cela se traduit par des déplacements et des déformations des structures, voire des chutes des caractéristiques mécaniques qui peuvent affecter leur bon fonctionnement.

Après plus de 60 années d'étude, la connaissance des mécanismes réactionnels a permis de définir des techniques de formulation pour pouvoir prévenir de nouveaux cas [LCP 94] [MAT 99]. En revanche, il existe de par le monde un parc important de structures atteintes par cette pathologie pour lesquels des outils prédictifs paraissent nécessaires pour aider les gestionnaires de ces ouvrages à déterminer les tendances de gonflement, l'efficacité et la fréquence des interventions de réhabilitation.

2. Etude bibliographique

2.1. Mise en évidence expérimentale

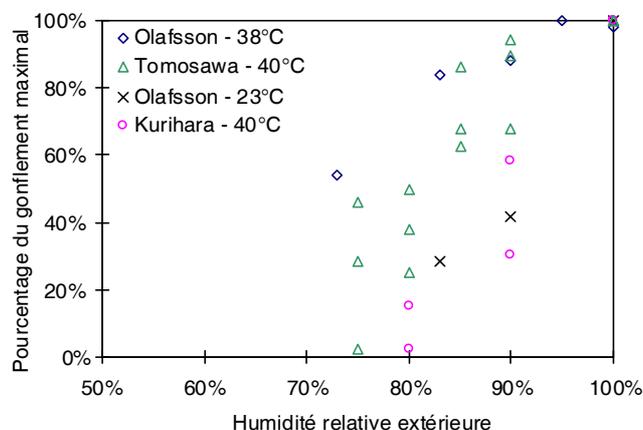


Figure 1. Synthèse des résultats expérimentaux sur l'influence de l'humidité relative

Pour que la réaction alcali-silice se développe, il est impératif d'avoir des alcalins (sodium Na^+ et/ou potassium K^+), des granulats réactifs (c'est-à-dire contenant de la silice réactive) et de l'eau. Cette dernière doit être présente en quantité suffisante car elle sert à la fois de milieu de transport des espèces ioniques

et de réactif (l'eau est un composant des produits formés). Vivian [VIV 81] a observé que les expansions diminuent avec la quantité d'eau disponible. Il en conclut que l'on pouvait arrêter la réaction en séchant le mortier. Ceci est confirmé successivement par Olafsson [OLA 86], Tomosawa *et al.* [TOM 89] et Kurihara *et al.* [KUR 89] (voir figure 1).

L'ensemble des résultats expérimentaux présente une grande dispersion. En ce qui concerne les résultats d'Olafsson à 23 °C et de Kurihara *et al.*, la durée des essais a été trop courte (22 mois pour Olafsson et 12 semaines pour Kurihara *et al.* – voir tableau 1). En effet, les allongements obtenus n'ont pas tous atteint leur valeur finale. Cela pourrait expliquer l'étendue du nuage de points ainsi obtenue.

Auteurs	Olafsson	Tomosawa <i>et al.</i>	Kurihara <i>et al.</i>
Température	23 and 38 °C	40 °C	40 °C
Eprouvettes	Prismatique	Prismatique	?
Dimensions	?	7,5*7,5*40 cm	?
Matériau	Mortier	Béton	Mortier
Durée	22 mois	52 semaines	12 semaines
Données	Allongement	Allongement et variation de masse	Allongement et teneur eau globale

Tableau 1. Récapitulatif des essais sur l'influence de l'humidité relative

Pour un matériau donné, les gonflements sont directement corrélés à la variation de masse. Plus elle est élevée et plus les gonflements sont importants [TOM 89] [KUR 89] [LAR 00]. De plus, l'historique de l'apport d'eau a une grande influence sur les gonflements obtenus [VIV 81] [LAR 00].

De plus, Tomosawa *et al.* [TOM 89] et Kurihara *et al.* [KUR 89] ont montré qu'en deçà d'une certaine teneur en eau globale (définie par rapport à la masse sèche de l'éprouvette), les gonflements sont inhibés. Malheureusement, cette valeur dépend d'une part du matériau utilisé (4 % par rapport à la masse sèche pour Tomosawa *et al.* [TOM 89], 8 % pour Kurihara *et al.* [KUR 89] et 0,15 % de perte de masse pour Larive *et al.* [LAR 98]) et, d'autre part, de l'état hydrique initial du matériau étudié.

Pour Nilsson [NIL 83], il n'y a pas de dégradation quand l'humidité relative extérieure est inférieure à 80 %. Ludwig [LUD 89] définit ce seuil d'humidité relative entre 80 et 85 % à 20 °C. Cette valeur dépend de la température, d'après H. Olafsson [OLA 86] elle passe de 80 % environ à 23 °C à 75 % pour une température de 38 °C. D'après les résultats de Tomosawa *et al.* [TOM 89] et Kurihara *et al.* [KUR 89] elle est inférieure à 75 % à 40 °C (voir figure 2).

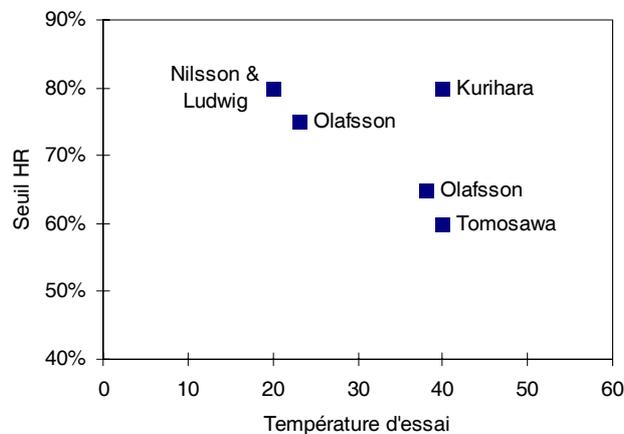


Figure 2. Evolution du seuil d'humidité relative en fonction de la température des essais

De plus, des variations de l'humidité relative extérieure et de la température entraînent des mouvements d'ions et des différences de concentrations dans le matériau [XU 93] [RIV 03]. Il semble que ces phénomènes peuvent modifier le comportement du matériau du point de vue des gonflements [NIS 89].

2.2. Modèles existants

Quelques modélisations permettent de prendre en compte l'effet de l'eau sur la réaction et les gonflements observés. Le modèle proposé par Nielsen *et al.* [NIE 93] relie l'importance des gonflements à l'humidité relative dans les pores au moyen d'une loi empirique (voir figure 3) basée sur les observations de Nilsson [NIL 83].

Capra *et al.* [CAP 98] calculent le gonflement engendré par la réaction au moyen de la loi suivante :

$$\varepsilon^{\text{rg}}(t, h, T, \sigma) = \varepsilon^{100\%}(t) \cdot f(h) \cdot g(T, \sigma) \quad [1]$$

où $\varepsilon^{100\%}(t)$ est l'évolution du gonflement libre pour HR = 100 %, h est l'humidité relative dans les pores et $g(T, \sigma)$ et $f(h)$ sont des fonctions qui décrivent respectivement l'influence de la température et des contraintes et de l'humidité relative dans les pores sur le gonflement. Cette dernière a été calée par l'auteur d'après une étude bibliographique (voir figure 3).

$$f(h) = \left(\frac{h}{100} \right)^8 \quad [2]$$

Selon les modèles de Bažant *et al.* [BAŽ 00] et Li *et al.* [LI 02], la réaction produit un « gel sec » qui évolue au cours du temps. Il s'imbibe en fonction de la quantité d'eau contenue dans les pores. Ce processus de vieillissement (passage d'un « gel sec » à un « gel mouillé ») est décrit par une cinétique du premier ordre. Pour Bažant *et al.* ce processus d'imbibition n'est possible qu'au delà d'une certaine humidité relative dans les pores. Cette valeur seuil est arbitrairement fixée à 85 % (voir figure 3). Li *et al.* ne définissent pas de seuil, le gel s'imbibe en continu en fonction de l'apport d'eau.

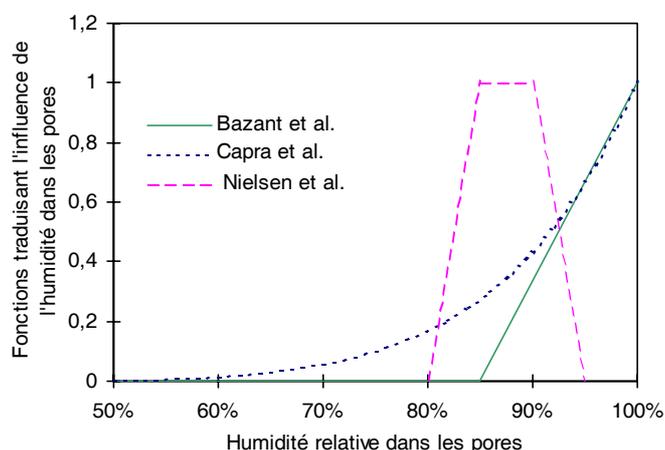


Figure 3. Evolution des fonctions traduisant l'influence de l'humidité relative dans les pores sur la réaction, d'après [NIE 93] [CAP 98] et [BAŽ 00]

Tous les modèles présentés considèrent logiquement que la quantité d'eau qui influence les gonflements est celle qui est présente dans le matériau au voisinage des sites de réaction. La prédiction des gonflements implique donc la connaissance de l'état hydrique du matériau.

Notre objectif est de définir une modélisation qui relie la quantité d'eau disponible localement dans le matériau à la cinétique et à l'amplitude du gonflement libre engendré par la réaction alcali-silice. Une campagne expérimentale nous permettra de caler les lois constitutives de ce modèle qui sera ensuite validé par l'exploitation des données issues d'une seconde série d'essais et de résultats expérimentaux issus de la littérature.

3. Campagne expérimentale

Nous avons soumis des éprouvettes à différentes humidités relatives extérieures. Le protocole expérimental est présenté par ailleurs [POY 03]. Les éprouvettes utilisées sont cylindriques de hauteur 16 centimètres, leur diamètre est de 2 centimètres. Les sens de coulage et de mesure sont les mêmes (sens longitudinal). Deux séries d'éprouvettes sont fabriquées avec deux granulats différents (voir tableau 2) : une référence non réactive (sable calcaire inerte) et une série réactive (sable calcaire siliceux). Les distributions granulaires sont corrigées dans les deux cas pour être semblables. Le mélange est préparé avec de l'eau déminéralisée et la quantité d'alcalins est ajustée en ajoutant des pastilles de soude.

Constituant	Quantité		Unité
	Référence	Réactive	
Ciment	537,8	537,6	kg/m ³ de mortier
Eau déminéralisée	268,8	268,8	l/m ³ de mortier
Sable inerte [0-5mm]	1612,8	806,4	kg/m ³ de mortier
Sable réactif [0-5mm]	-	806,4	kg/m ³ de mortier
Soude NaOH	9,86	9,86	kg/m ³ de mortier

Tableau 2. Formulation du mortier utilisé

Les éprouvettes sont démoulées après 10 jours de cure à 20 °C enveloppées dans un film étanche. Elles sont ensuite conservées à 60 °C dans les ambiances désirées. La masse et la longueur des éprouvettes sont suivies au cours du temps. L'allongement induit par la réaction alcali-silice et son écart type sont alors calculés à partir des valeurs mesurées sur quatre éprouvettes. La valeur de l'humidité relative désirée est maintenue au moyen de solutions saturées, cette méthode a déjà été employée par d'autres auteurs [BAR 99] [RAO 98] [DEL 98]. Deux séries d'essais complémentaires ont été menées. Pour la première, l'humidité relative extérieure est maintenue constante et l'influence de six HR différentes a été étudiée (voir tableau 3).

Sel utilisé	Formule chimique	HR obtenue (60 °C)
Eau pure	H ₂ O	100 %
Sulfate de potassium	K ₂ SO ₄	96 %
Nitrate de potassium	KNO ₃	82 %
Chlorure de potassium	KCl	80 %
Chlorure de sodium	NaCl	76 %
Nitrite de sodium	NaNO ₂	59 %

Tableau 3. Sel utilisé et humidité relative obtenue

Pour la seconde série d'essais, nous avons fait varier l'humidité relative extérieure de manière cyclique. Deux périodes ont été utilisées, une courte de 14 jours pour laquelle le matériau n'est jamais complètement séché et saturé et une longue de 28 jours pour laquelle le matériau est quasiment complètement séché à chaque cycle (voir figure 4). Les deux humidités relatives extérieures extrêmes sont respectivement 59 % et 96 %.

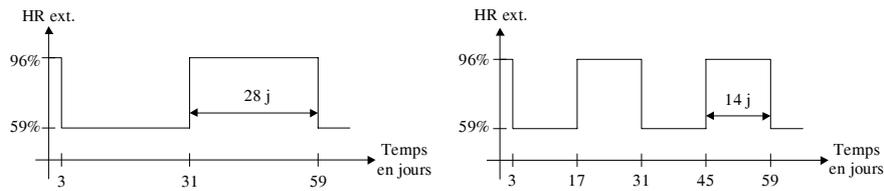


Figure 4. Cycle long (à gauche) et cycle court (à droite)

3.1. Série HR constante

Les variations moyennes de masse des éprouvettes réactives sont présentées sur la figure 5. Les évolutions présentées sont des lissages des points expérimentaux.

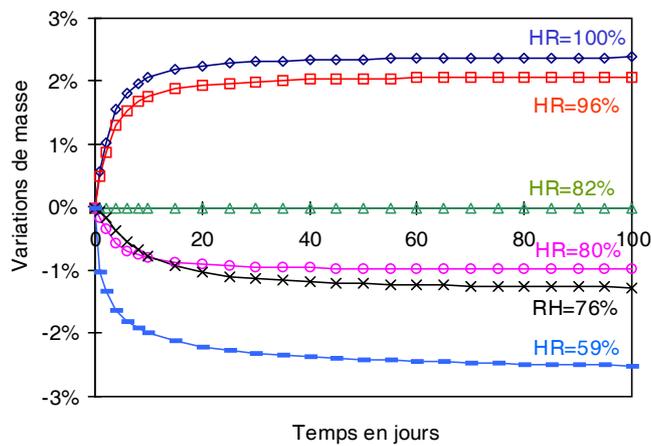


Figure 5. Variations expérimentales de masse pour la série HR constante

Les variations de masse s'échelonnent entre un gain de 2,4 % pour HR = 100 % et une perte de 2,5 % pour HR = 59 % (voir tableau 4). Les éprouvettes

correspondant à HR = 82 % ne montrent pas de variation sensible de leur masse. L'humidité relative initiale dans les pores du matériau est donc *a priori* de 82 %.

Les expansions générées par la réaction sont calculées à partir des allongements des éprouvettes réactives en retirant les variations de longueur des éprouvettes de référence (voir figure 6).

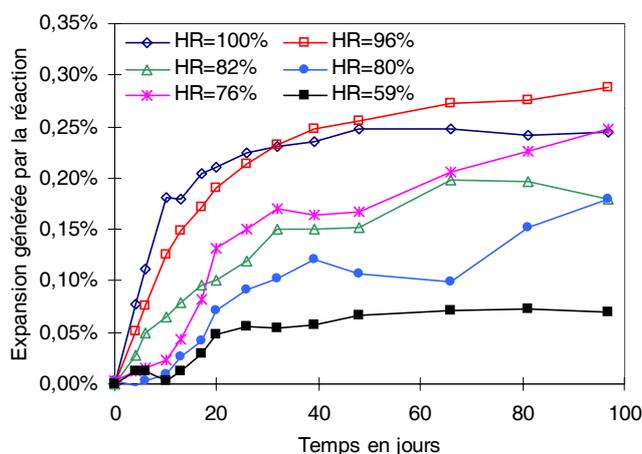


Figure 6. Allongements en fonction de l'humidité relative – série HR constante

Les courbes sont relativement bien étagées en fonction de l'humidité relative ; plus l'humidité relative extérieure est élevée et plus les allongements sont importants. Cela confirme les observations d'Olafsson [OLA 83] Kurihara *et al.* [KUR 89] et Tomosawa *et al.* [TOM 89]. Les allongements sont directement corrélés à la variation de masse (voir figure 5 et tableau 4) comme l'ont déjà observé Vivian [VIV 81] et Larive *et al.* [LAR 00].

HR extérieure	100 %	96 %	82 %	80 %	76 %	59 %
Prise de masse	2,4 %	2,1 %	0 %	-0,983 %	-1,266 %	-2,51 %
Allongement	0,24 %	0,28 %	0,19 %	0,14 %	0,11 %	0,03 %

Tableau 4. Expansion en fonction de la variation de masse

De plus, pour cette température (60 °C) le seuil en deçà duquel les gonflements sont inhibés semble être inférieur à 60 % puisque pour HR = 59 % nous observons un allongement des éprouvettes de 0,03 % après 100 jours.

En revanche, l'expansion à 100 jours pour HR = 100 % est inférieure à celle observée pour HR = 96 % (0,24 % contre 0,28 %). Cela est dû au lessivage des alcalins par l'eau pure qui ruisselle sur les éprouvettes. Ce phénomène a déjà été observé expérimentalement [ROG 91] [WIE 00]. De plus, le fait que l'expansion correspondant à l'humidité extérieure de 76 % soit supérieure à celle de 82 % est dû à un problème expérimental.

3.2. Série HR variable

Les variations de masses obtenues sont présentées sur la figure 7.

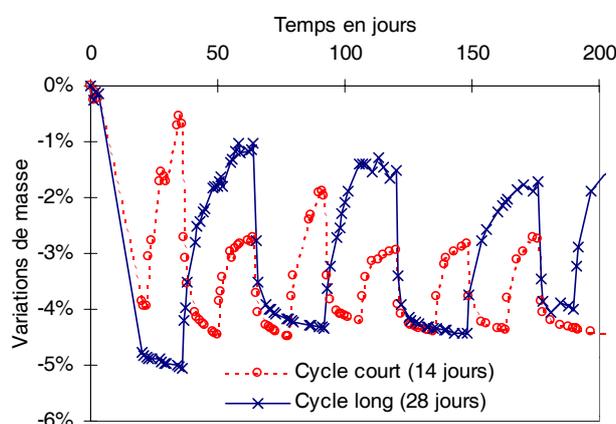


Figure 7. Variations de masse des éprouvettes réactives – série HR variable

Les éprouvettes soumises à des cycles longs regagnent plus de masse que les éprouvettes soumises à des cycles courts. Néanmoins, les premières ne reviennent pas à leur état hydrique initial à chaque cycle comme initialement prévu.

Les expansions obtenues (voir figure 8) sont très proches. La différence d'historique d'apport d'eau entre les deux séries d'essais n'entraîne pas de différence sensible sur le comportement des éprouvettes.

En outre, il apparaît nettement un retrait de cause inconnue de l'ordre de 0,04 % lorsque l'on soumet les éprouvettes à HR = 59 %. Les effets du séchage ont déjà été pris en compte en retirant les allongements des éprouvettes de référence. Une cause probable de ce retrait supplémentaire est la perte d'eau des produits de réaction qui entraîne une diminution de leur volume. Il en résulte une baisse de la pression exercée sur la matrice et donc une chute du gonflement.

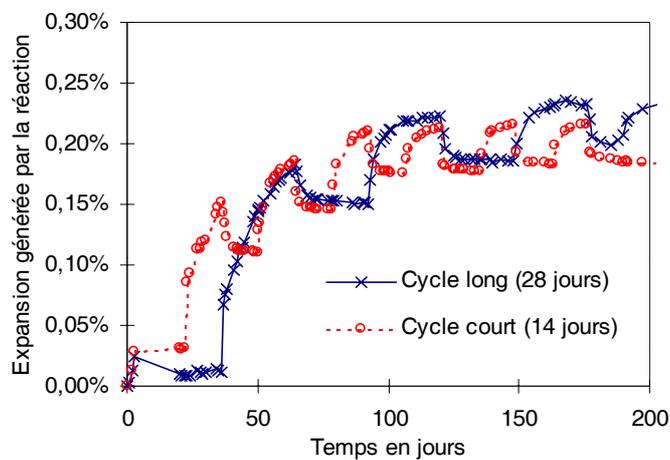


Figure 8. Allongements dus à la réaction pour la série HR variable

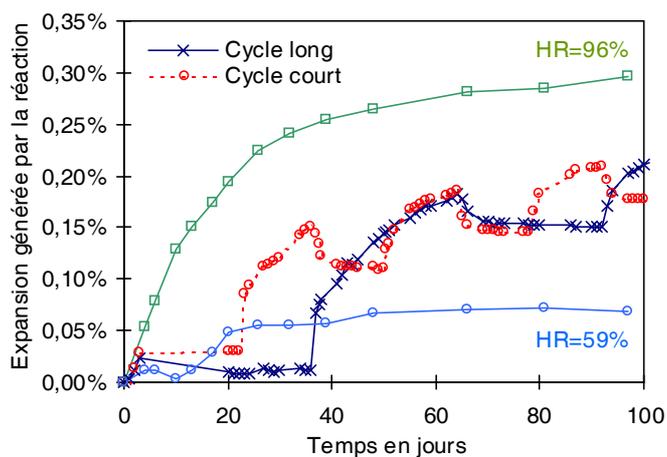


Figure 9. Comparaison entre les allongements pour les deux séries d'essais

De plus, à une échéance donnée l'allongement induit par la réaction alcali-silice des éprouvettes soumises à un cycle d'humidité (court ou long) est toujours inférieur à celui des éprouvettes maintenues à HR = 96 % mais est toujours supérieur à celui des éprouvettes maintenues à HR = 59 % (voir figure 9).

3.3. Conclusion sur les essais

La comparaison entre nos essais et ceux détaillés précédemment est présentée sur la figure 10. Les expansions sont normées par rapport à la valeur maximale observée pour la série concernée. Les résultats présentés sont donc indépendants des granulats utilisés et de la quantité initiale d'alcalins.

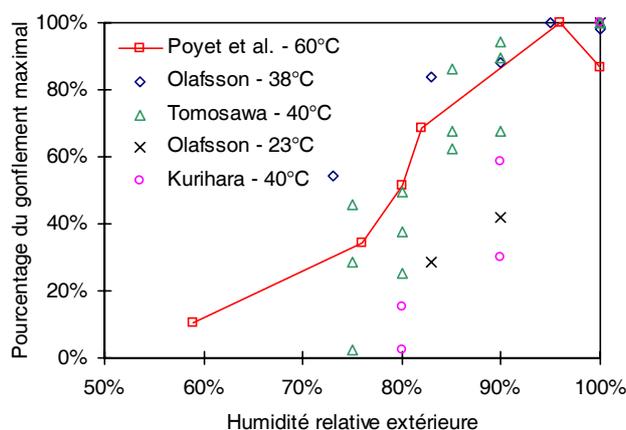


Figure 10. Comparaison des résultats expérimentaux sur l'influence de l'humidité relative extérieure

Les valeurs déterminées grâce à la nouvelle campagne expérimentale s'insèrent dans le nuage de points expérimentaux. Néanmoins, cet ensemble de points est trop large pour pouvoir déterminer une loi reliant les gonflements observés à l'humidité relative (extérieure ou dans les pores). De plus, l'état hydrique du matériau n'est ni uniforme ni constant au cours de ces essais. Il est donc impératif d'en tenir compte dans le dépouillement de ces essais et d'adopter une modélisation hydro-chemo-mécanique adéquate. Les transferts hydriques doivent être modélisés, et le champ de gonflement libre doit être relié à la quantité d'eau disponible localement dans le matériau par l'intermédiaire de lois que nous allons définir pour permettre le calcul de l'expansion générée.

4. Modélisation proposée

Nous avons choisi le degré de saturation S_r comme donnée définissant la quantité d'eau disponible localement dans le matériau pour la réaction. Ce dernier définit le pourcentage de remplissage des pores par l'eau et ne dépend pas de la température ni

de la porosité. Nous définissons aussi une grandeur sans dimension A qui définit l'avancement de la réaction. Il est compris entre 0 et 1 et dépend du temps t et du degré de saturation S_r . Nous supposons que pour un degré de saturation S_r donné inférieur à 1 il ne peut atteindre sa valeur maximale. Les gonflements engendrés dépendent alors des conditions hydriques extérieures comme observé expérimentalement. L'avancement A et le gonflement libre dus à la réaction alcali-silice ε^{rag} suivent les lois suivantes :

$$\dot{A}(S_r, t) = \frac{\partial A}{\partial t}(S_r, t) = \alpha_0 \alpha(S_r) [\beta(S_r) - A(S_r, t)] \quad [3]$$

où α_0 est une constante définissant la cinétique de la réaction. La fonction $\beta(S_r)$ représente l'avancement maximal que peut atteindre la réaction en fonction du degré de saturation. Ses valeurs sont comprises entre 0 (pour $S_r = 0$) et 1 (pour $S_r = 1$), sa forme est à définir. La fonction $\alpha(S_r)$ définit la vitesse avec laquelle l'avancement A tend vers sa valeur maximale $\beta(S_r)$. Ses valeurs sont comprises entre 0 (pour $S_r = 0$) et 1 (pour $S_r = 1$), sa forme est à définir. L'allongement libre est alors :

$$\begin{cases} \text{si } A(S_r, t) < A_0 \text{ alors } \varepsilon^{\text{rag}}(S_r, t) = 0 \\ \text{si } A(S_r, t) \geq A_0 \text{ alors } \varepsilon^{\text{rag}}(S_r, t) = KA(S_r, t) \end{cases} \quad [4]$$

où K est une constante qui relie l'avancement aux gonflements. K dépend des caractéristiques mécaniques du matériau étudié, de la quantité et de la réactivité des granulats utilisés, de la quantité d'alcalins équivalents, etc. A_0 représente l'avancement minimal (c'est-à-dire indirectement la quantité de produits à former pour remplir la porosité autour d'un site réactif, et ainsi mettre en pression la matrice) pour faire apparaître des gonflements. Les paramètres A_0 , α_0 et K caractérisent la cinétique et l'amplitude du gonflement libre induit par la réaction alcali-silice. Ils dépendent du matériau étudié.

Quand le degré de saturation S_r varie au cours du temps, les équations (3) et (4) ne sont pas intégrables directement, il devient nécessaire d'adopter une démarche incrémentale. Nous nous plaçons entre deux pas de temps infiniment proches, l'avancement au temps $t+\delta t$ est calculé à partir de l'avancement au temps t en considérant que le degré de saturation est constant :

$$A(\bar{S}_r, t_1) = \beta(\bar{S}_r) - [\beta(\bar{S}_r) - A(\bar{S}_r, t)] \exp[-\alpha_0 \alpha(\bar{S}_r)(t_1 - t)] \quad [5]$$

où δt est un incrément de temps infiniment petit, \bar{S}_r est le degré de saturation considéré constant sur l'intervalle de temps $[t, t+\delta t]$ et t_1 est un instant quelconque compris dans l'intervalle de temps $[t, t+\delta t]$. Les fonctions α et β sont prises *a priori* de la forme suivante :

$$\beta(\text{Sr}) = \left(\frac{\langle \text{Sr} - \text{Sr}_0^\beta \rangle^+}{1 - \text{Sr}_0^\beta} \right)^{m_\beta} \quad \text{et} \quad \alpha(\text{Sr}) = \left(\frac{\langle \text{Sr} - \text{Sr}_0^\alpha \rangle^+}{1 - \text{Sr}_0^\alpha} \right)^{m_\alpha} \quad [6]$$

où $\langle X \rangle^+$ désigne la partie positive de X, Sr_0^α et Sr_0^β sont des seuils en deçà desquels les fonctions s'annulent et m_α et m_β traduisent la non linéarité éventuelle des fonctions. Le but de ce travail est de caractériser les fonctions α et β , c'est-à-dire de déterminer la valeur des paramètres de seuil Sr_0^α et Sr_0^β et d'exposant m_α et m_β .

5. Application de la modélisation proposée

5.1. Détermination du degré de saturation et de l'allongement correspondant

Afin de déterminer le degré de saturation en tout point d'une éprouvette ou d'une structure, nous nous sommes inspirés des travaux de F. Benboudjema *et al.* [BEN 03] et J.-M. Torrenti *et al.* [TOR 97]. Nous déterminons le champ de degré de saturation en résolvant l'équation définissant les transferts hydriques à l'aide d'un code de calcul (CAST3M) en prenant en compte les variations de la diffusivité en fonction de l'état hydrique du matériau [XI 94].

A partir de la connaissance du degré de saturation en tout point de la structure, l'avancement A et le gonflement engendré par la réaction ϵ^{rag} sont calculés en tout point de la structure au moyen de la formule (5). Le retrait observé lors des essais cycliques (HR variable) est supposé être proportionnel à l'allongement engendré par la réaction et à la pression capillaire :

$$\epsilon_{\text{séch}}^{\text{rag}}(\text{Sr}, t) = \epsilon^{\text{rag}}(\text{Sr}, t) \left[-c_1 \left\langle \frac{\text{Pc} - \text{Pc}_0}{\text{Pc}_0} \right\rangle^+ \right] \quad [7]$$

La pression capillaire est connue dans les pores en fonction du degré de saturation [VAN 80] [BAR 00] :

$$\text{Pc}(\text{Sr}) = a (\text{Sr}^{-b} - 1)^{\frac{1}{b}} \quad [8]$$

L'allongement total des éprouvettes (tenant compte de la réaction et du retrait supplémentaire observé) est alors déterminé à partir du gonflement total engendré par la réaction alcali-silice par une approche élastique. Cette dernière semble valable tant que le matériau n'est pas fissuré [MUL 03].

$$\epsilon_{\text{tot}}^{\text{rag}}(\text{Sr}, t) = \epsilon_{\text{séch}}^{\text{rag}}(\text{Sr}, t) + \epsilon^{\text{rag}}(\text{Sr}, t) \quad [9]$$

5.2. Simulations numériques des essais HR constante

Le degré de saturation est déterminé en tout point des éprouvettes en fonction du temps au moyen des évolutions expérimentales de masse (voir figure 11).

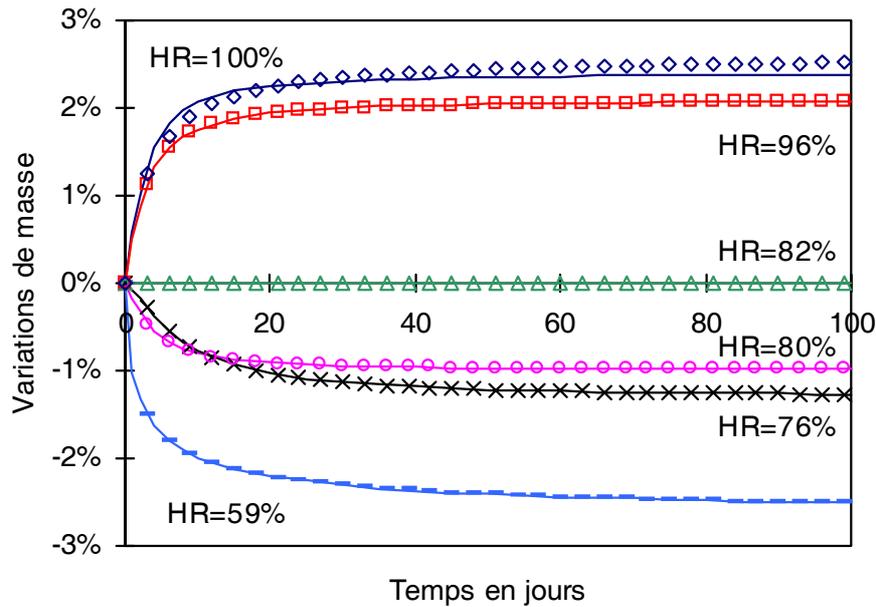


Figure 11. Variations de masse expérimentales et simulées pour la série HR constante

Paramètre	A_0	α_0	K
Valeur	0	0,04	0,35 %

Tableau 5. Valeurs des paramètres A_0 , α_0 et K utilisés pour la simulation

Le calage des paramètres définissant le gonflement intrinsèque du matériau (K , α_0 et A_0) est effectué à partir des résultats expérimentaux (voir tableau 5). La détermination des paramètres de seuil (Sr_0^α et Sr_0^β) et d'exposant (m_α et m_β) des fonctions α et β (voir équation (6)) se fait alors par analyse inverse en cherchant à reproduire le plus fidèlement possible les résultats expérimentaux (voir figure 12).

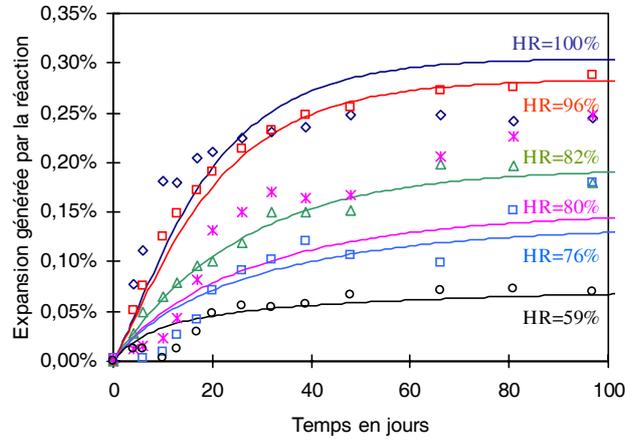


Figure 12. Comparaison entre allongements mesurés et simulés

Les lois α et β ainsi obtenues sont caractéristiques de la réaction alcali-silice, elles ne dépendent ni de la température ni du matériau étudié. Elles sont linéaires en fonction du degré de saturation et sans seuil (voir tableau 6).

Fonction $\alpha(Sr)$		Fonction $\beta(Sr)$	
Seuil Sr_0	Exposant m_α	Seuil Sr_0	Exposant m_β
0	1	0	1

Tableau 6. Valeurs des paramètres des lois α et β

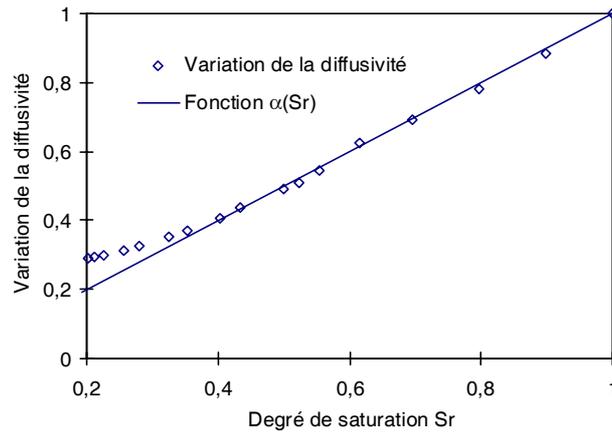


Figure 13. Comparaison entre les variations de la diffusivité et de la fonction α

La fonction α qui représente l'influence de l'eau sur la cinétique de la réaction peut être reliée à la chute de la diffusivité avec la teneur en eau dans les pores. En effet, la variation relative de cette dernière est très proche (dans notre cas) à l'évolution de la fonction $\alpha(S_r)$ (voir figure 13).

6. Validation de la méthode proposée

Les lois α et β ont été calées de manière à reproduire le plus fidèlement possible les essais à HR constante. Il convient maintenant de vérifier que la méthode proposée est valable. Nous l'avons ainsi testée sur les essais à HR variable et sur des essais issus de la littérature.

6.1. Simulations des essais HR variable

Les transferts hydriques ont été modélisés pour chacun des cycles (court et long) en se basant sur les variations expérimentales de masse (voir figure 14 et figure 15).

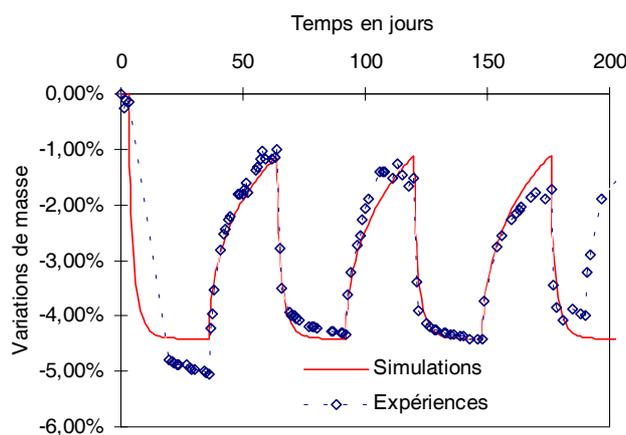


Figure 14. Comparaison des variations de masse expérimentales et simulées pour le cycle long

Les allongements simulés sont alors calculés à partir des champs de degré de saturation (voir figure 16 et figure 17). Les paramètres α_0 , A_0 et K utilisés pour le calcul des allongements sont déterminés pour la série HR constante (voir tableau 5).

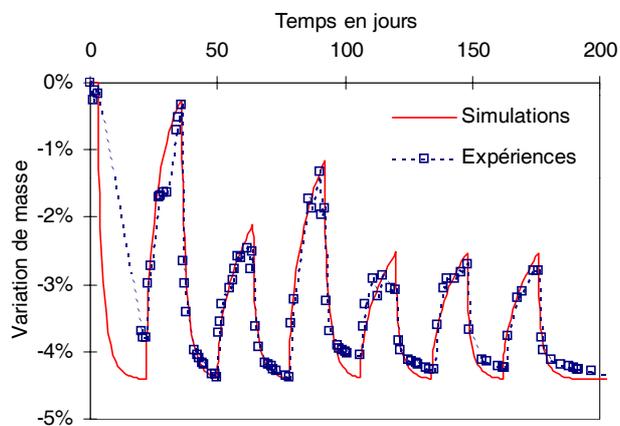


Figure 15. Comparaison des variations de masse expérimentales et simulées pour le cycle court

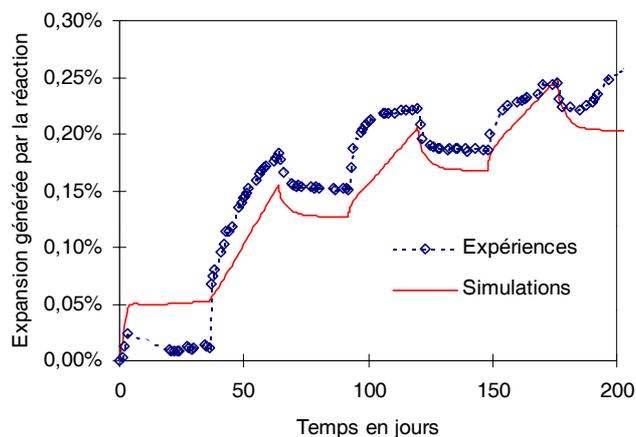


Figure 16. Comparaison des expansions expérimentale et prédite pour le cycle long

Nous pouvons noter la bonne concordance entre les résultats expérimentaux et les allongements simulés. La cinétique et l'amplitude des allongements sont prédits avec une bonne précision.

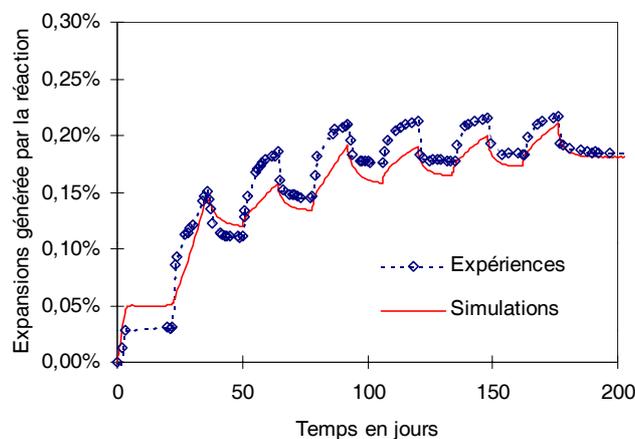


Figure 17. Comparaison des expansions expérimentale et prédite pour le cycle court

6.2. Simulation des essais tirés de la bibliographie

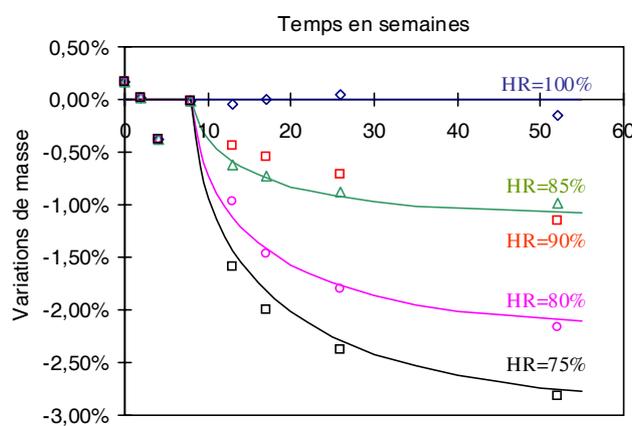


Figure 18. Variations de masse expérimentales et simulées

Quelques auteurs ont présenté des campagnes expérimentales sur l'influence de l'eau dont les résultats peuvent être utilisés par les modélisateurs, citons par exemple les essais de Tomosawa *et al.* [TOM 89], Kurihara *et al.* [KUR 89] et ceux de Larive *et al.* [LAR 98] [LAR 00]. Nous avons choisi de présenter ici la réponse du modèle concernant les essais de Tomosawa *et al.*, ils ont été présentés en détail par ailleurs [TOM 89]. Des éprouvettes de béton réactif ont été placées dans différentes

humidités relatives extérieures, et leur variations de longueur et de masse ont été suivies sur une période d'une année. La détermination du degré de saturation est effectuée d'après le calage des variations de masse (voir figure 18). Les éprouvettes soumises à HR = 85 % et HR = 90 % présentent des variations de masse très proches, une seule simulation hydrique est alors effectuée pour les deux séries.

Les paramètres utilisés pour déterminer les allongement sont déterminés à partir des mesures d'allongement (voir tableau 7). Les allongements prédits sont présentés sur la figure 19.

Paramètre	A_0	α_0	K
Valeur	0,25	0,0114	0,265 %

Tableau 7. Valeurs des paramètres A_0 , α_0 et K utilisés pour la simulation

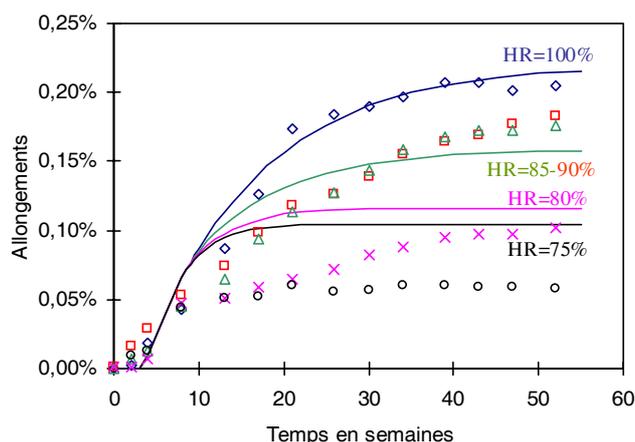


Figure 19. Allongements expérimentaux et simulés

Les allongements simulés présentent une corrélation acceptable avec les résultats expérimentaux compte tenu des données disponibles. Les tendances sont retrouvées, les éprouvettes soumises à HR = 75 % ne gonflent plus après 20 semaines environ alors que pour les humidités relatives de 85 % à 100 %, le gonflement continue.

Néanmoins, il existe un écart entre la prédiction et l'observation pour les faibles HR (75 % et 80 %). Cet écart peut être imputé en grande partie au manque de données nécessaires pour les simulations. Par exemple, la non-caractérisation de l'état hydrique initial et le manque de précision sur la mesure de la valeur de la teneur en eau expérimentale ne permet pas un bon calage du degré de saturation dans les éprouvettes. Or ce dernier est le paramètre essentiel dans notre modélisation.

De plus, la valeur exacte du retrait pour la formulation étudiée n'est pas donnée. Cela fausse l'estimation du gonflement induit par la réaction alcali-silice pour les faibles humidités relatives.

7. Conclusion

Une nouvelle modélisation de la réaction alcali-silice a été présentée. Elle prend en compte l'influence de la quantité d'eau disponible localement dans le matériau par l'intermédiaire du degré de saturation. Elle est basée sur un calcul hydro-chemo-mécanique. Elle permet de prédire la cinétique et l'amplitude des gonflements engendrés par la réaction sur des structures quelconques.

L'utilisation du modèle nécessite la connaissance de trois paramètres (A_0 , α_0 et K) qui définissent le gonflement intrinsèque du matériau étudié et la connaissance de l'état hydrique du matériau en tout point de la structure et à chaque instant (degré de saturation S_r). Ce dernier implique un calcul des transferts hydriques dans la structure au cours du temps. Ainsi, pour une structure et un matériau quelconques, le paramètre qui gère la cinétique et l'amplitude des désordres est le degré de saturation.

Une série d'essais, composée d'éprouvettes réactives maintenues dans diverses humidités relatives extérieures nous a permis de définir les lois constitutives du modèle reliant la cinétique et l'amplitude du gonflement libre au degré de saturation (lois α et β). Ces lois sont indépendantes de la température du matériau étudié et définissent l'influence de l'eau sur la cinétique et l'amplitude du gonflement libre engendré par la réaction alcali-silice.

Le modèle a été validé à travers les simulations d'une seconde campagne expérimentale (éprouvettes réactives soumises à des cycles d'humidité relative extérieure) et d'une partie des essais de Tomosawa *et al.* [TOM 89]. Tous ces résultats montrent, d'une part, la sensibilité du modèle au degré de saturation et, d'autre part, une bonne corrélation entre les allongements simulés et mesurés.

Cette modélisation sera confrontée ultérieurement aux autres essais disponibles dans la littérature et servira de base pour la simulation d'essais structurels de poutres atteintes par la réaction alcali-silice soumises à des gradients hydriques [MUL 03] [POY 03].

8. Bibliographie

- [BAR 00] BAROGHEL-BOUNY V., MAINGUY M., LASSABATERE T., COUSSY O., "Characterization and identification of equilibrium and moisture transfert properties for ordinary and high performance cementitious materials", *Cement and Concrete Research*, vol. 29, p. 1125-1238, 2000.

- [BAŽ 00] BAŽANT Z.P., STEFFENS A., "Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 30, p. 419-428, 2000.
- [BEN 03] BENBOUDJEMA F., MEFTAH F., TORRENTI J.-M., "An unified approach for the modeling of drying shrinkage and basic creep of concrete", *Proceedings of the Euro-C Computational Modeling of Concrete Structures*, Pongau, Austria, p. 391-400, 2003.
- [CAP 98] CAPRA B., BOURNAZEL J.P., "Modeling of induced mechanical effects of alkali-aggregate reactions", *Cement and Concrete Research*, vol. 28, p. 251-260, 1998.
- [DEL 98] DELAGE P., HOWAT M.D., CUI Y.J., "The relationship between suction and swelling properties in an heavily compacted unsaturated clay", *Engineering Geology*, vol. 50, p. 31-48, 1998.
- [KUR 89] KURIHARA T., KATAWAKI K., "Effects of moisture control and inhibition on alkali silica reaction", *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali Aggregate reaction in Concrete*, p. 629-634, Kyoto, Japon, 1989.
- [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*, OA 28, Presses du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1998.
- [LAR 00] LARIVE C., LAPLAUD A., COUSSY O., "The role of water in alkali-silica reaction", *Proceedings of the 11th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete*, p. 61-69, Québec City, Québec, June 2000.
- [LCP 94] *Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction*, Presses du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1994.
- [LI 02] LI K., COUSSY O., "Evaluation de l'état mécanique des ouvrages dégradés par la réaction alcali-granulat", *Revue française de génie civil*, vol. 6, n° 5, p. 835-852, 2002.
- [LUD 89] LUDWIG U., "Effects of environmental conditions on alkali-aggregate reaction and preventive measures", *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali Aggregate reaction in Concrete*, p. 583-596, Kyoto, Japon, 1989.
- [MAT 99] MATHER B., "How to make concrete that not will suffer deleterious alkali-silica reaction", *Cement and Concrete Research*, vol. 29, p. 1277-1280, 1999.
- [MUL 03] MULTON S., SEIGNOL J.-F., TOUTLEMONDE F., "Large girders subjected to alkali-silica reaction", *Proceedings of the 6th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, Thessaloniki, Greece, p. 299-318, 2003.
- [NIE 93] NIELSEN A., GOTTFREDSSEN F., THØGERSSEN F., "Development of stresses in concrete structures with alkali-silica reactions", *Materials and Structures*, vol. 26, p. 152-158, 1993.
- [NIL 83] NILSSON L.O., "Moisture effects on the Alkali-Silica Reaction", *Proceedings of the International Conference on Alkalies in Concrete*, p. 201-208, Copenhagen, Denmark, 1983.
- [OLA 86] OLAFSSON H., "The effect of relative humidity and temperature on alkali expansion of mortar bars", *Proceedings of the 7th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete*, p. 461-465, Ottawa, 1986.

- [POY 03] POYET S., Etude de la dégradation des ouvrages en béton atteints par la réaction alcali-silice : approche expérimentale et modélisation numérique multiéchelles des dégradations dans un environnement hydro-chemo-mécanique variable, Thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, soutenue le 19 décembre 2003.
- [RAO 98] RAOOF A., *Adsorption, distribution et dynamique de l'eau dans les milieux poreux*, SI 6, Presses du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, 196p, 1998.
- [RIV 03] RIVARD P., BERUBE M.A., BALLIVY G., OLLIVIER J.P., "Effect of drying-rewetting on the alkali concentration of the concrete pore solution", *Cement and Concrete Research*, vol. 33, p. 927-929, 2003.
- [ROG 91] ROGERS C.A., HOOTON R.D., "Reduction in mortar and concrete expansion with reactive aggregates due to alkali leaching", *Cement Concrete and Aggregates*, vol. 13, n° 1, p. 42-49, 1991.
- [TOM 89] TOMOSAWA F., TAMURA K., ABE M., "Influence of water content of concrete on alkali-aggregate reaction", *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete*, p. 881-885, Kyoto, Japon, 1989.
- [TOR 97] TORRENTI J.-M., GRANGER L., DIRUY M., GENIN P., "Modélisation du retrait du béton en ambiance variable", *Revue française de génie civil*, vol. 1, n° 4, p. 687-694, 1997.
- [VAN 80] VAN GENUCHTEN M.T., "A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soils Science Society of America*, vol. 44, p. 892-898, 1980.
- [VIV 81] VIVIAN H.E., "The effect of drying on reactive aggregate and mortar expansions", *Proceeding of the 5th International Conference on Alkali Aggregate reaction in Concrete*, S252-28, Cape Town, Afrique du Sud, March 30-April 3 1981.
- [WIE 00] WIEKER W., HUBERT C., HEIDEMANN D., EBERT R., "Some experiences in chemical modelling of the alkali-silica reaction", *Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Québec, p. 119-128, 2000.
- [XI 94] XI Y., BAŽANT Z.P., MOLINA L., JENNINGS H.M., "Moisture diffusion in cementitious materials : moisture capacity and diffusivity", *Advanced Cement Based Materials*, vol. 1, p. 258-266, 1994.
- [XU 93] XU Z., HOOTON R.D., "Migration of alkali ions in mortar due to several mechanisms", *Cement and Concrete Research*, vol. 23, p. 951-961, 1993.