
Modélisation de l'effet des contraintes sur l'anisotropie de l'expansion dans les bétons atteints de réactions de gonflement interne

Nizar Baghdadi^{*}, François Toutlemonde^{*}, Jean-François Seignol^{**}

^{*} LCPC, 58, boulevard Lefebvre 75732 Paris Cedex 15

{Nizar.Baghdadi, Francois.Toutlemonde}@lcpc.fr

^{**} LRPC de Clermont-Ferrand, 8-10 rue Bernard Palissy, 63017 Clermont-Ferrand Cedex 2

Jean-Francois.Seignol@equipement.gouv.fr

RÉSUMÉ. Dans cet article on présente un modèle macroscopique qui décrit l'interaction entre l'état de contraintes et l'expansion due à des réactions de gonflement. Plusieurs études expérimentales ont mis en évidence l'effet de l'état de contraintes sur les déformations imposées par les réactions de gonflement interne (RGI) du béton. Cet effet se traduit à l'échelle microscopique par des directions privilégiées pour la formation du produit expansif selon l'état de contraintes auquel la structure est soumise. Ainsi il est primordial que les modèles de calcul des effets des réactions de gonflement soient dotés d'un outil mathématique qui permettra de tenir compte de ce couplage.

Le modèle proposé prédit l'évolution du gonflement chimique dans les différentes directions de l'espace sous différents états de contraintes, il est calibré et validé par des résultats d'essais expérimentaux tirés de la littérature.

ABSTRACT. This paper presents a macroscopical model describing the effects of stresses on the anisotropic expansion due to Concrete Expansive Reactions (CER). Several experimental programs have shown the effect of stresses on CER-induced strains. This effect is caused by a privileged direction of CER swelling. For this reason the assessment models have to take into account the modification of CER expansions due to applied stresses and the consequences on the mechanical response of damaged structures.

The proposed modeling predicts the evolution of chemical expansion in the different directions under different applied stress states. It is calibrated and validated by the means of experimental results taken from literature.

MOTS-CLÉS : Réaction de gonflement interne, anisotropie, gonflement, modélisation.

KEYWORDS: Internal swelling reaction, anisotropy, swelling, modeling.

1. Introduction

Ce travail se place dans le cadre d'une modélisation macroscopique des bétons atteints de RGI issue des travaux de (K. Li et al. 2004). Dans cet article, on présente le modèle qui permet de décrire l'effet des contraintes sur le tenseur des déformations chimiques imposées. Cette description constitue une amélioration du formalisme actuel (expansion volumique indépendante de la contrainte). L'effet des contraintes a été notamment identifié quantitativement sur des bétons atteints de RAG par (Multon & Toutlemonde 2006). Il est également observé sur les ouvrages (notamment précontraints) atteints de RAG ou de RSI et se traduit par des gonflements fortement anisotropes.

Dans ce qui suit, on présente tout d'abord les constations expérimentales faites sur des éprouvettes chargées atteintes de RGI, ainsi que les différentes modélisations formulées pour décrire les gonflements anisotropes. Ensuite, on explicite les lois de couplage qui permettent de déterminer le gonflement chimique imposé par la RGI à partir de l'état de contrainte auquel la structure est soumise. Enfin, on valide le modèle par des expérimentations tirées de la littérature.

2. Constatations expérimentales et modélisations

Plusieurs études expérimentales ont mis en évidence l'effet de l'état de contraintes sur l'anisotropie du gonflement. Ces expérimentations consistent à appliquer différents états de contraintes (fluage) et/ou de confinement (déformations gênées) sur des éprouvettes en béton réactif.

Dans le cas d'éprouvettes cylindriques confinées latéralement, les expérimentations ont montré que le confinement réduit d'une façon significative le gonflement global observable dans la direction radiale (Hobbs 1988 ; Le Roux et al. 1992 ; Larive et al. 1996 ; Multon 2004).

Dans le cas d'éprouvettes cylindriques chargées axialement, les conclusions varient selon les auteurs : les expérimentations de (Larive 1998 ; Multon 2004) ont montré que le gonflement se reportait dans la direction non chargée, de telle sorte que le gonflement volumique « chimique induit » reste approximativement constant. (May *et al.* 1996 ; Gravel *et al.* 2000) n'observent pas un tel transfert. Gravel a émis l'hypothèse que la nature du gel de la réaction (fluide ou rigide) peut avoir un effet sur le transfert des gonflements.

Dans le cas des éprouvettes soumises à des contraintes triaxiales, les expérimentations de (Multon 2004) ont montré que les gonflements causés par l'alcali-réaction ne sont pas stoppés par application d'un tel état de contrainte, mais les valeurs de gonflement observable sont nettement réduites, sans que soit sensiblement modifiée la déformation volumique imposée. Les expérimentations de (Multon 2004) n'ont ainsi pas permis de relier par une fonction la déformation

volumique imposée à l'état de contrainte. Par contre, ils ont permis de trouver une corrélation entre l'anisotropie des déformations imposée et le déviateur des contraintes (Multon & Toutlemonde 2006).

Plusieurs auteurs ont essayé d'expliquer l'origine de cette anisotropie. Pour (Li *et al* 2004) notamment, l'origine de cette anisotropie peut être recherchée dans le couplage entre la fissuration induite et la mise en pression locale du gel. En effet, les fissurations augmentent l'espace offert au produit expansif aux interfaces ciment-granulat où il se forme.

Parmi les modélisations de l'effet des contraintes sur l'anisotropie du gonflement, on peut citer celle de (Gomes 2004) selon laquelle que l'incrément de déformation volumique sous contrainte est la somme d'un incrément de déformation libre et d'une réduction de déformation à cause de l'état de contraintes. Cette modélisation est calée par rapport au résultat expérimental de (Larive 1998). Une autre modélisation, présentée par (Saouma & Perotti 2006) consiste à affecter à chaque état de contrainte un coefficient de pondération. Ainsi, ces coefficients de pondération jouent le rôle de coefficients d'anisotropie en chaque point. Une autre modélisation proposée par (Grimal 2003) consiste à pondérer la déformation libre dans chaque direction de l'espace par une fonction exponentielle. Cette fonction est calée à partir des données expérimentales de (Multon 2004). Enfin, (Grimal 2007) rend compte de ces mécanismes par une réponse visco-élastique du béton, considéré comme un matériau poreux de caractéristiques mécaniques différentes sous sollicitations sphériques et déviatoriques, à la pression interne de gonflement générée par la réaction.

3. Modèle proposé

L'objectif de la modélisation proposée est de connaître le gonflement sous contrainte dans chaque direction de l'espace à partir du gonflement volumique libre qui constitue souvent la seule et principale donnée raisonnablement accessible. La détermination expérimentale de la valeur du gonflement volumique libre consiste à suivre les expansions libres dans les trois directions de l'espace d'une éprouvette de béton réactif. On peut alors notamment utiliser un robot de mesure (Larive 1998), permettant la mesure des déformations transversales moyennes.

Le calcul prévoit deux étapes successives :

- Première étape, compte tenu des incertitudes actuelles selon les auteurs concernant l'effet de la contrainte moyenne sur le gonflement chimique induit, on prévoit une modulation possible du gonflement volumique sous contrainte par une loi qui tient compte de la contrainte moyenne.
- Deuxième étape, on pondère le gonflement volumique sous contrainte par un tenseur qui tient compte du déviateur des contraintes, afin de déterminer l'expansion chimique dans chacune des directions de l'espace.

On présente dans la suite une description détaillée de ces deux étapes.

3.1. Effet de la contrainte moyenne

Le gonflement volumique s'écrit comme la somme des expansions dans les trois directions principales, on a l'équation [1].

$$\varepsilon_{\chi vol} = \varepsilon_{\chi I} + \varepsilon_{\chi II} + \varepsilon_{\chi III} \quad [1]$$

On doit expliciter une relation entre les déformations volumiques sous contraintes et la déformation volumique libre. Cette relation s'exprime comme une loi de couplage $\delta(\sigma_M)$ fonction de la contrainte moyenne :

$$\varepsilon_{\chi vol}^{S.C.} = \delta(\sigma_M) \varepsilon_{\chi vol}^{libre} \quad [2]$$

- $\varepsilon_{\chi vol}^{libre}$ Expansion chimique volumique libre.
- $\varepsilon_{\chi vol}^{S.C.}$ Expansion chimique volumique sous contrainte.
- σ_M Contrainte moyenne $\sigma_M = \frac{1}{3}(\sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III})$.

Dans le cas des expérimentations faites sur la réaction alcali-silice, la représentation du ratio de déformation volumique d'origine chimique en fonction de la contrainte moyenne ne semble pas suivre tendance claire. D'après (Multon & Toutlemonde 2006), il évolue de façon erratique entre 0.6 et 1.2. Pour ce programme expérimental et compte tenu de la dispersion sur les déterminations expérimentales de $\varepsilon_{\chi vol}^{S.C.}$, on réduit la fonction $\delta(\sigma_M)$ à un coefficient $\delta = 0.89$, calculé comme la moyenne des mesures.

De façon plus générale, la détermination de la fonction $\delta(\sigma_M)$ nécessite d'autres investigations afin de quantifier le cas échéant une loi appropriée, en particulier pour d'autres réactions de gonflement comme la réaction sulfatique interne.

3.2. Effet de la contrainte déviatorique

La deuxième partie de la modélisation consiste à déterminer la déformation chimique sous contrainte dans les différentes directions de l'espace. On multiplie la déformation volumique chimique (scalaire) par un tenseur dont les composantes sont fonction de l'état de contrainte auquel la structure est soumise.

Dans le repère des directions de contraintes principales, la déformation chimique sous contrainte peut s'écrire :

$$\underline{\varepsilon}_{\chi}^{SC} = \varepsilon_{\chi vol}^{libre} \delta(\sigma_M) \underline{b} \quad [3]$$

Avec $\varepsilon_{\chi}^{libre}$: Expansion chimique libre.

$\underline{\varepsilon}_\chi^{SC}$: Expansion chimique sous contrainte (Vecteur formé des trois composantes selon les directions des contraintes principales).

$\underline{b}$ admet la forme suivante :

$$\underline{b} = \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha \cos^2 \beta \\ \cos^2 \alpha \sin^2 \beta \\ \sin^2 \alpha \end{pmatrix} \quad [4]$$

Ce qui assure que la somme de ses composantes vaut 1 et que ces dernières restent positives. On a:

$$tg^2 \alpha = \frac{\varepsilon_{III}^{SC}}{\varepsilon_I^{SC} + \varepsilon_{II}^{SC}} \text{ et } tg^2 \beta = \frac{\varepsilon_{II}^{SC}}{\varepsilon_I^{SC}} \quad [5]$$

Cette écriture permet notamment d'identifier $2tg^2 \alpha$ et le « coefficient d'anisotropie » mis en évidence par (Multon & Toutlemonde 2006) dans des gonflements sous contrainte. Compte tenu des valeurs obtenues, on peut proposer d'exprimer cette relation à partir des caractéristiques mécaniques du béton :

$$2tg^2 \alpha = \left[\frac{f_{ct}^2(1-\vartheta)}{(s_{III}-f_{ct})^2} + \vartheta \right] \quad [6]$$

Avec :

- $S_{III} = \sigma_{III} - \sigma_M$ Composante du déviateur de contrainte dans la direction III
- f_{ct} La résistance à la traction du béton
- ϑ Le coefficient de Poisson du béton

La présentation de l'équation [6] sous cette forme générale donne lieu à trois constatations conformes aux résultats expérimentaux trouvés par (Multon 2004) et généralement admises:

– Pour de fortes contraintes déviatoriques, le coefficient d'anisotropie tend vers la valeur du coefficient de Poisson. Ainsi pour des compressions élevées dans 1 ou 2 directions, le déviateur des contraintes n'a plus d'effet sur l'anisotropie du gonflement chimique imposé et on a un report total dans les directions de moindre compression.

– Pour de faibles contraintes déviatoriques le coefficient d'anisotropie tend vers une valeur égale à 1. Ainsi on retrouve le cas d'un gonflement isotrope d'une éprouvette sous expansion libre ou soumise à une contrainte uniforme dans toutes les directions.

– Pour une contrainte déviatorique de traction qui tend vers la résistance à la traction du béton, on a un coefficient d'anisotropie qui tend vers l'infini, ce qui est tout à fait conforme aux constatations expérimentales. Dans ces conditions en effet l'expansion se produit principalement perpendiculairement aux fissures.

De façon à ne pas privilégier une direction particulière, l'expression de $tg^2\beta$ s'impose :

$$tg^2\beta = \left[\frac{f_{ct}^2(1-\vartheta)}{\left(\frac{1}{2}(\sigma_{II}-\sigma_I)-f_{ct}\right)^2} + \vartheta \right] \quad [7]$$

Ainsi on peut déterminer la déformation chimique imposée dans les trois directions de l'espace, sous différentes conditions de contraintes.

4. Validation du modèle

Pour vérifier la cohérence du modèle avec les données de calibration, on utilise les essais de (Multon 2004). La réaction de gonflement étudiée au cours de ces expérimentations est l'alcali-réaction. Les caractéristiques mécaniques du béton étudié sont $f_{ct} = 3.55\text{MPa}$ et $\vartheta = 0.22$. Les éprouvettes sont soumises à des contraintes de compression de 0 MPa, -10 MPa ou -20MPa et frettées avec des anneaux métalliques périmétriques d'épaisseur 3mm ou 5mm. On présente dans le tableau 1 les déformations longitudinales et transversales trouvées expérimentalement et numériquement à 400 jours, ainsi que les coefficients d'anisotropie.

Sollicitation		Déformation longitudinale (400 j)		Déformation transversale (400 j)		Coef. d'anisotropie	
Compression	Confinement	Modèle	Exp.	Modèle	Exp.	Modèle	Exp.
0 MPa	0 mm	0.095	0.103	0.095	0.09	1	1.14
0 MPa	3 mm	0.104	0.094	0.074	0.069	1.4	1.36
0 MPa	5 mm	0.103	0.128	0.076	0.107	1.34	1.26
10 MPa	0 mm	0.045	0.034	0.103	0.073	0.44	0.46
10 MPa	3 mm	0.047	0.043	0.107	0.08	0.44	0.53
10 MPa	5 mm	0.064	0.04	0.098	0.071	0.63	0.59
20MPa	0 mm	0.036	0.037	0.108	0.107	0.333	0.345
20 MPa	3 mm	0.041	0.039	0.106	0.1	0.387	0.388
20 MPa	5mm	0.0394	0.042	0.093	0.105	0.423	0.49

Tableau 1. Comparaison entre les résultats du modèle et les essais de (Multon 2004)

En analysant le tableau 1, on remarque que le modèle donne dans la majorité des cas une bonne estimation de l'expansion longitudinale, transversale et du coefficient d'anisotropie à 400 jours. Les écarts observés dans le cas des éprouvettes confinées avec des anneaux d'épaisseur 5 mm sont du à une incertitude importante sur les mesures. En effet, un décalage des anneaux constituant le frettage a rendu la surface de mesure imparfaite ce qui a provoqué des imprécisions dans le relever des mesures transversales.

La figure 2 présente l'évolution des déformations longitudinale et transversale expérimentales et déterminées numériquement dans le cas d'une éprouvette soumise à une contrainte de compression de -20MPa et confinée par un anneau d'épaisseur 3mm .

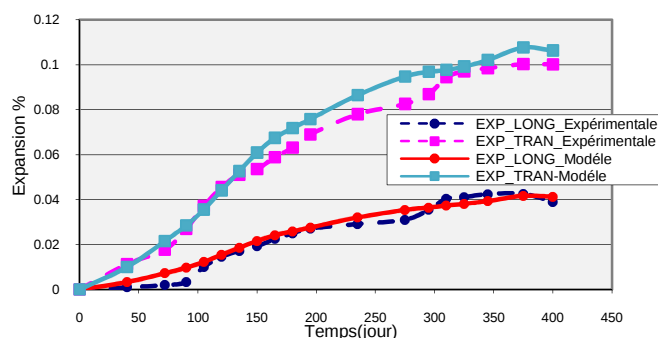


Figure 2. Comparaison entre les résultats du modèle et les données expérimentales pour une éprouvette soumise à une contrainte axiale de 20MPa et un confinement radial (3mm)

Les résultats trouvés par le modèle sont comparables aux données des expérimentations en termes de cinétique et d'amplitude du gonflement dans chaque direction.

Cette cohérence (que l'on retrouve également dans différents états de contrainte indiqués au tableau 1) est liée à une écriture de l'équation [3] en déformation totale, et non incrémentale et dépasse donc la vérification d'auto-cohérence du modèle. Tout se passe donc comme si l'état de contrainte influait sur les directions d'expansion du gel comme sur un fluide, sans « solidification » aux échéances précédentes. Cette interprétation nécessite cependant des compléments d'étude et de validation.

5. Conclusion

L'objectif de ce travail est de construire un modèle simple permettant de tenir compte du couplage existant entre le gonflement chimique imposé et l'état de contrainte appliqué, dans la continuité des travaux de modélisation de (Li et al. 2004) pour des réactions de gonflement comme la réaction alcali-silice. La modélisation qu'on a présentée tient compte: 1°) d'un éventuel effet de la contrainte moyenne sur la déformation chimique volumique; 2°) de l'effet du déviateur des contraintes sur la déformation chimique imposée dans les différentes directions.

Le modèle a été identifié puis validé grâce aux valeurs expérimentales obtenues par S. Multon dans le cas de l'alcali réaction. On envisage, moyennant une

vérification appropriée des hypothèses et calibrages, son utilisation pour d'autres réactions de gonflement comme la réaction sulfatique interne.

6. Bibliographie

- Gomes J. P., «Analysis of concrete dams under swelling processes », *proceedings of the 12th international conference on alkali-aggregate reaction in concrete*, 15-19 october 2004, Beijing, Chine, p.1148-1157.
- Gravel C., Ballivy G., Khayat K. Quirion M., Lachemi M., « Expansion of AAR concrete under triaxial stress: simulation with instrumented concrete block », *11th international conference on alkali-aggregate Reaction*, 2000, Québec, Canada, p.949-958.
- Grimal E., Influence des contraintes mécaniques externes sur la réaction alcali-granulat, Rapport de stage de DEA, INSA/UPS Toulouse, EDF R&D, Juin 2003.
- Grimal E., Caractérisation des effets du gonflement provoqué par la réaction alcali-silice sur le comportement mécanique d'une structure en béton, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2007.
- Hobbs D.W., *Alkali-silica in concrete*, Thomas Telford, 1988, London.
- Larive C., *Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques*, Etudes et recherches des LPC OA 28, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 1998.
- Larive C., Laplaud A., Joly M., « Behavior of AAR-affected concrete: Experimental data », *10th international conference on alkali-aggregate Reaction*, 1996, Melbourne, Australia, p. 670-677.
- Le Roux A., Massieu E., Godart B., Evolution under stress of concrete affected by A.A.R – application to feasibility of strengthening a bridge by prestressing , *9th international conference on alkali-aggregate Reaction*, 1992, Londres, p. 599-606.
- Li K., Coussy O., Larive C., *Modélisation chimico-mécanique du comportement des bétons affectés par la réaction d'alcali-silice. Expertise numérique des ouvrages d'art dégradés*, Etudes et recherches des LPC OA43, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 2004.
- May I.M., Cope R.J., Wen H.X., « Modeling of structural behavior of AAR affected reinforced concrete members », *10th international conference on alkali-aggregate Reaction*, 1996, Melbourne, Australia, p. 434-441.
- Multon S., *Evaluation expérimentale et théorique des effets mécanique de l'alcali-réaction sur des structures modèles*, Etudes et recherches des LPC OA 46, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 2004.
- Multon S., Toutlemonde F., Effect of applied stress on alkali-silica reaction-induced expansion. *Cem. Con. Res.*, 2006, vol. 36, p. 912-920.
- Saouma V., Perotti L., Constitutive Model for Alkali Aggregate Reactions, *American Concrete Institute, Materials Journal*, vol.103, No.3, May-June 2006, p. 194-202.