Fiabilité fonctionnelle résiduelle d'un barrage atteint de réaction alcali-granulats

Ftatsi Mbetmi[1,2], Guy-de-Patience, De Larrard[1] Thomas, Duprat[1] Frédéric

[1] *Université de Toulouse, LMDC UPS/INSA, INSA, 135 avenue de Rangueil, 31077 Toulouse cedex, France*
[2] *Université de Ngaoundéré, LASE, IUT, B.P. 455, Ngaoundere, Cameroun*

RÉSUMÉ. *Cette étude propose d'utiliser le modèle microscopique de RAG développé au LMDC pour l'estimation de la fiabilité du barrage hydro-électrique de Song Loulou. Les modèles de substitution, basés sur des développements en chaos de polynômes des paramètres d'une sigmoïde, ont été constitués à plusieurs échelles, afin notamment de réduire les temps de calculs. A l'échelle de la structure, ils permettent d'obtenir les déplacements aux points d'intérêt, liés aux états limites de fonctionnement des évacuateurs de crue, et procéder ainsi à l'estimation de la fiabilité fonctionnelle résiduelle du barrage.*

ABSTRACT. *This study proposes to use the microscopic AAR model developed at the LMDC to estimate the reliability of the Song Loulou hydropower dam. Surrogate models, based on the polynomials chaos expansion of the parameters of a sigmoid, have been constituted at several scales, in particular to reduce the computation time. At the scale of the structure, they helped to obtain displacements at the points of interest, related to the operating limits states of the spillways, and thus to estimate the residual functional reliability of the dam.*

MOTS-CLÉS : *réaction alcali-granulat, barrage, modèle de substitution, fiabilité*

KEY WORDS: *alkali-aggregate reaction, dam, surrogate model, reliability*

1. Introduction

La réaction alkali-granulats survient entre la solution interstitielle de la matrice cimentaire très fortement chargée en alcalins et des granulats contenant de la silice non ou mal cristallisée, et produit un gel d'alcali-silice susceptible d'absorber de l'eau (Dent Glasser et al. 1981; Poole 1992), dont le gonflement induit des déformations dans la structure jusqu'à des dommages importants (déplacements critiques, fissuration, etc.). La RAG a fait l'objet de nombreuses modélisations (Pan et al. 2012), dont celle développée au LMDC (Multon et al. 2009). Cette étude propose d'utiliser ce modèle pour l'estimation de la fiabilité du barrage hydro-électrique de Song Loulou, en considérant la défaillance relative au blocage de la vanne du barrage évacuateur de crues dû aux déplacements dans les piles suite au gonflement du béton atteint de RAG. Pour ce faire, une modélisation aux éléments finis est proposée pour le comportement mécanique macroscopique de la pile du barrage. En parallèle, une analyse de sensibilité est proposée pour le modèle microscopique de RAG par rapport au cas d'étude du béton de Song Loulou, puis un modèle de substitution est construit pour suppléer le modèle microscopique et être implémenté dans le calcul EF macroscopique du comportement de la pile. C'est sur la base de ces calculs macroscopiques qu'est étudiée la défaillance fonctionnelle du barrage.

2. Méthodologie

Cette méthodologie multi-échelle (**Figure 1**), de l'échelle d'un volume élémentaire représentatif à l'échelle d'un ouvrage, consiste à utiliser des modèles de substitution pour réduire considérablement les temps de calcul.

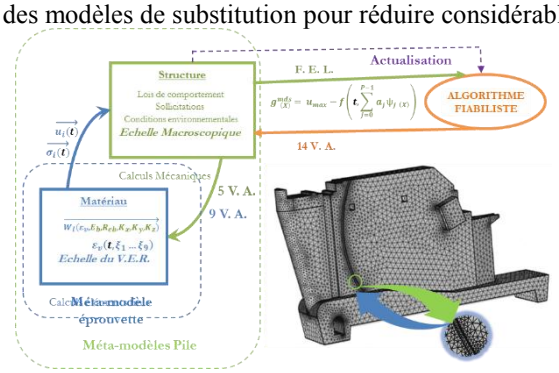


Figure 1. *Détails de la méthodologie proposée*

A l'échelle du VER, la réponse du modèle microscopique est substituée par une courbe de gonflement (**Figure 2**) dont les paramètres sont exprimés sous forme de chaos polynomial de Legendre d'ordre 3 fonction des 9 variables physiques de RAG (**Tableau 1**).

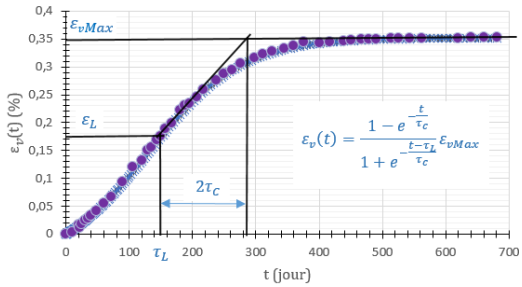


Figure 2. *Détails de la méthodologie proposée*

L'expression du modèle de substitution à l'échelle de l'éprouvette, basé sur des développements en chaos de polynômes, est donnée par les équations [1] et [2].

$$\varepsilon_v(t) = \frac{1-e^{-\frac{t}{\tau_C}}}{1+e^{-\frac{t-\tau_L}{\tau_C}}} \varepsilon_{vMax} \quad [1]$$

$$\text{Avec } \begin{cases} \varepsilon_{vMax}(\xi) = a_0 + \sum_{i=1}^{219} a_i . L_i(\xi) \\ \tau_C(\xi) = e^{\ln 10.\left(b_0 + \sum_{i=1}^{219} b_i . L_i(\xi)\right)} \\ \tau_L(\xi) = e^{\ln 10.\left(c_0 + \sum_{i=1}^{219} c_i . L_i(\xi)\right)} \end{cases}, \quad \xi_{j=1,2,\dots,9} = \frac{2X_j - X_{jmax} - X_{jmin}}{X_{jmax} - X_{jmin}} \quad [2]$$

où $\xi_{j=1,2,\dots,9}$ sont les variables uniformes centrées réduites correspondant respectivement aux variables physiques $X_{j(j=1,2,\dots,9)}$ ayant pour valeur minimale X_{jmin} et pour valeur maximale X_{jmax}.

L'anisotropie du gonflement est introduite via des fonctions poids (Saouma et al. 2006) appliquées dans les directions principales les plus contraintes, décrites pour une dizaine de configurations possibles. On peut alors se servir de ce modèle de substitution à l'échelle de la structure, pour des calculs déterministes aux nœuds d'une modélisation aux éléments finis, de déplacements induit par la RAG. La rapidité de ces calculs autorise, en des points d'intérêt (liés aux états limites considérés), la construction de modèles de substitution de grandeurs telles que le déplacement maximal. Un plan d'expérience numérique de 3000 cinétiques de déplacements au point critique a été pour cela construit à partir de simulations des 14 variables retenues. Les courbes typiques sont données sur la **Figure 3**.

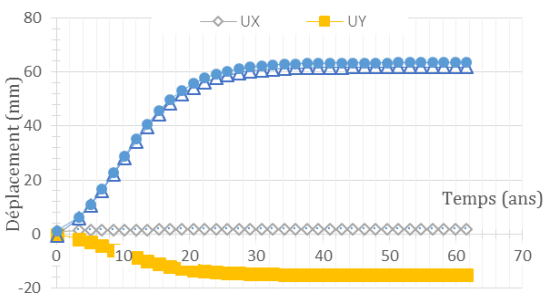


Figure 3. *Courbes des déplacements au point critique de la console d'une pile*

Pour chacune des 3000 courbes correspondante à la norme du déplacement, nous avons déterminé le quadruplet ($\|Uw\|_0$, $\|U\|_{Max}$ τ_C, τ_L), et nous nous sommes servis d'un algorithme classique de développement en chaos de polynômes de Legendre d'ordre 3, pour en calculer les 679 coefficients inconnus. L'expression du modèle de substitution permettant de calculer la norme du déplacement au point critique de la console d'une pile d'évacuateur de crues est donnée ci-après :

$$\|U\|(t) = \frac{1-e^{-\frac{t}{\tau_C}}}{1+e^{-\frac{t-\tau_L}{\tau_C}}} (\|U\|_{Max} - \|U\|_0) + \|U\|_0 \quad [3]$$

$$\text{avec } \begin{cases} \|U\|_{Max}(\xi) = d_0 + \sum_{i=1}^{679} d_i . L_i(\xi) \\ \tau_C(\xi) = e_0 + \sum_{i=1}^{679} e_i . L_i(\xi) \\ \tau_L(\xi) = f_0 + \sum_{i=1}^{679} f_i . L_i(\xi) \\ \|U\|_0(\xi) = g_0 + \sum_{i=1}^{679} g_i . L_i(\xi) \end{cases} \quad [4]$$

Ces méta-modèles à l'échelle de la structure permettent d'avoir une fonction d'état limite explicite et rapide à calculer, et ainsi de procéder à une analyse fiabiliste.

3. Application au cas du barrage de Song Loulou

La géométrie et les conditions de chargement utilisées dans la modélisation aux éléments finis d'une pile d'évacuateur de crues du barrage de Song Loulou sont données sur la **Figure 4**. Le parallélépipède circonscrit à la pile fait 8,5m de large, 52m de long, et une hauteur de 26m.

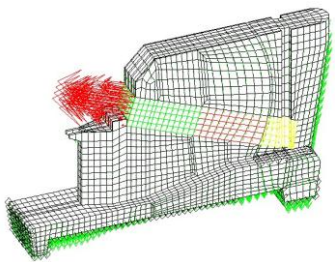


Figure 4. *Pile de l'évacuateur de crues de Song Loulou*

Les surfaces de la pile en contact avec la fondation sont bloquées. Les déplacements en X des surfaces latérales des semelles de la pile sont bloqués. Le béton est supposé avoir un comportement mécanique isotrope. L'anisotropie induite par les contraintes principales étant prise en compte par les fonctions poids présentées précédemment. La pression exercée sur les vannes et reprise par les tirants est supposée constante de l'ordre de 1 MPa (en rouge sur la **Figure 4**, équivalente à une force de 29 MN par vanne). Cela correspond à la hauteur d'eau maximale, ce qui apporte du conservatisme au résultat. Par ailleurs le seuil de déplacement maximal a été fixé à 70 mm, ce qui renforce ce conservatisme. Les résultats obtenus en utilisant la méthode FORM sont présentés dans le **Tableau 2** et le **Tableau 3**.

V.A.	Description	Plage	Loi de probabilité
X_1	Diamètre max. de la plus grande classe granulaire (mm)	60 à 125	$N(\mu = 92.5\,,\ \sigma = 10.8)$
X_2	Concentration volumique de granulat par m^3 de béton	0.6 à 0.75	$U(\mu = 0.675\,,\ \sigma = 0.043)$
X_3	Fraction de la plus petite classe granulaire	0.25 à 0.55	$N(\mu = 0.4\,,\ \sigma = 0.05)$
X_4	Concentration initiale d'alcalin (mol/m^3)	220 à 250	$N(\mu = 235\,,\ \sigma = 5)$
X_5	Porosité du mortier	0.16 à 0.3	$LN(\mu = -1.47\,,\ \sigma = 0.1)$
X_6	Distance de migration du gel (µm)	1 à 10	$U(\mu = 5.5\,,\ \sigma = 2.6)$
X_7	Volume molaire du gel crée (m^3/mol)	$1{,}4.10^{-5}$ à $1{,}6.10^{-5}$	$U(\mu = 1{,}5.10^{-5},\ \sigma = 5{,}77.10^{-7})$
X_8	Nombre de mole de Na réagissant avec 1 mole de Si	0.39 à 0.42	$LN(\mu = -0.9\,,\ \sigma = 0.02)$
X_9	Coefficient de fixation des alcalins (1/s)	-5.10^{-9} à -1.10^{-9}	$-LN(\mu = 19.7\,,\ \sigma = 0.37)$
X_{10}	Module élastique du béton (MPa)	10 à 20	$N(\mu = 15\,,\ \sigma = 1.67)$
X_{11}	Résistance en compression (MPa)	15 à 25	$N(\mu = 20\,,\ \sigma = 1.67)$
X_{12}	Facteur multiplicateur des X	0.95 à 1.05	$N(\mu = 1\,,\ \sigma = 0.0167)$
X_{13}	Facteur multiplicateur des Y	0.9 à 1.1	$N(\mu = 1,\ \sigma = 0.033)$
X_{14}	Facteur multiplicateur des Z	0.9 à 1.1	$N(\mu = 1\,,\ \sigma = 0.033)$

Tableau 1. *Variables aléatoires*

Temps (ans)	β	$P_f = \Phi(-\beta)$
20	1.1632	12,2 %
50	0.91885	17,9 %

Tableau 2. *Indice de fiabilité*

Les coordonnées des points de défaillance dans l'espace standard permettent de connaître le rôle des variables joué dans l'atteinte de la défaillance : celles qui y contribuent (rôle S) ont une coordonnée positive, a contrario pour celles qui s'y opposent (rôle R). Parallèlement, les facteurs d'importance des variables sont portés dans les diagrammes de la **Figure 5**.

On peut constater que la concentration initiale d'alcalins et le volume molaire de gel sont les variables qui contribuent le plus à la défaillance. La concentration volumique de granulat, la fraction de la plus petite classe de

granulat, la porosité du mortier, la quantité de calcium réactif par mole de silice et la distance de migration du gel dans les petits granulats sont les variables principales qui contribuent à prévenir la défaillance. L'incidence des variables n'est pas identique avec l'échéance considérée. On note en particulier, de 20 ans à 50 ans, une déprise de la porosité du mortier au profit de la concentration volumique de granulats et de la fraction de la plus petite classe de granulat.

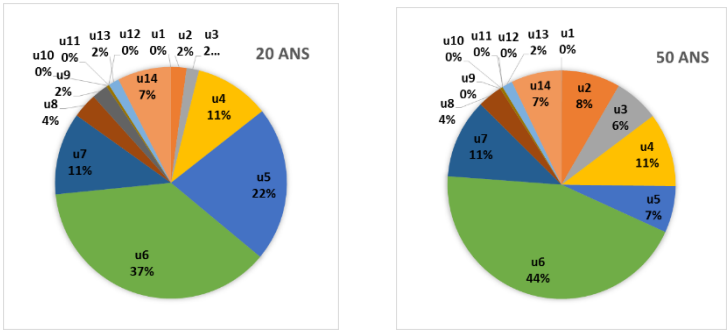


Figure 5. *Facteurs d'importance*

Temps	u_1^*	u_2^*	u_3^*	u_4^*	u_5^*	u_6^*	u_7^*	u_8^*	u_9^*	u_{10}^*	u_{11}^*	u_{12}^*	u_{13}^*	u_{14}^*
20 ans	9,87E-03	-1,71E-01	-1,53E-01	3,77E-01	-5,41E-01	-7,11E-01	3,94E-01	-2,17E-01	-1,75E-01	7,27E-02	-5,49E-03	-6,81E-05	1,43E-01	3,18E-01
	S	R	R	S	R	R	S	R	R	S	R	R	S	S
50 ans	2,05E-02	-2,65E-01	-2,32E-01	2,97E-01	-2,36E-01	-6,12E-01	3,08E-01	-1,72E-01	3,69E-03	5,87E-02	-4,33E-03	-8,58E-04	1,12E-01	2,46E-01
	S	R	R	S	R	R	S	R	S	S	R	R	S	S

Tableau 3. *Indice de fiabilité*

4. Conclusion

L'incidence de la RAG sur le comportement et la sécurité des barrages est questionnée depuis des décennies, mais n'avait pas fait l'objet d'approches probabilistes significatives, à tout le moins quant à la fiabilité fonctionnelle des évacuateurs de crue. La méthodologie que nous avons développée a permis de contribuer à combler cette lacune. La méthodologie s'appuie sur l'emploi successif de quatre modèles de substitution, l'un permettant de connaître en fonction du temps le gonflement isotrope du gel siliceux-alcalin à l'échelle du VER, à partir d'un modèle de RAG développé au LMDC, les trois autres donnant les déplacements dans les trois dimensions du point de déplacement maximal situé sur l'engravure de manœuvre de la vanne. Le modèle de comportement de la pile d'évacuateur tient compte de l'anisotropie de gonflement. Le critère de défaillance retenu est relatif à une valeur seuil de la norme du déplacement maximal. L'approche probabiliste permet alors d'identifier les variables les plus influentes vis-à-vis du blocage de la vanne, et ouvre la porte vers l'utilisation de ses résultats dans maintenance des ces ouvrages.

5. Bibliographie

Dent Glasser, L. S. and Kataoka, N. (1981) 'The chemistry of "alkali-aggregate" reaction', Cement and Concrete Research, 11(1), pp. 1–9. doi: 10.1016/0008-8846(81)90003-X.

Larive, C. (1997) Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Available at: http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00520676/.

Multon, S., Sellier, A. and Cyr, M. (2009) 'Chemo–mechanical modeling for prediction of alkali silica reaction (ASR) expansion', Cement and Concrete Research, 39(6), pp. 490–500. doi: 10.1016/j.cemconres.2009.03.007.

Pan, J. W. et al. (2012) 'Modeling of alkali-silica reaction in concrete: a review', Frontiers of Structural and Civil Engineering, 6(1), pp. 1–18. doi: 10.1007/s11709-012-0141-2.

Poole, A. B. (1992) 'Alkali-silica reactivity mechanisms of gel formation and expansion', in 9th International Conference on Alkal-Aggregate Reaction, pp. 782–789.

Saouma, V. and Perotti, L. (2006) 'Constitutive Model for Alkali-Aggregate Reactions', ACI Materials Journal, 103(3)