



HAL
open science

D'un modèle à l'échelle microscopique à la détermination à l'échelle de la structure de la fiabilité d'un barrage atteint de réaction alcali-granulats

Guy-De-Patience Ftatsi Mbetmi, Thomas de Larrard, Frederic Duprat,
Stéphane Multon, Daniel Tieudjo, Tibi Beda

► To cite this version:

Guy-De-Patience Ftatsi Mbetmi, Thomas de Larrard, Frederic Duprat, Stéphane Multon, Daniel Tieudjo, et al.. D'un modèle à l'échelle microscopique à la détermination à l'échelle de la structure de la fiabilité d'un barrage atteint de réaction alcali-granulats. Journées Fiabilité des Matériaux et des Structures, Mar 2018, Bordeaux, France. hal-01873868

HAL Id: hal-01873868

<https://hal.insa-toulouse.fr/hal-01873868>

Submitted on 13 Sep 2018

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.

D'un modèle à l'échelle microscopique à la détermination à l'échelle de la structure de la fiabilité d'un barrage atteint de réaction alcali-granulats

FTATSI MBETMI Guy-de-Patience^{1,2}, DE LARRARD Thomas¹, DUPRAT Frédéric¹,
MULTON Stéphane¹, TIEUDJO Daniel³, BEDA Tibi⁴,

¹ Université de Toulouse, LMDC UPS/INSA, INSA, 135 avenue de Ranguel, 31077
Toulouse cedex, France

² Université de Ngaoundéré, LASE, IUT, B.P. 455, Ngaoundere, Cameroun

³ Université de Ngaoundéré, LAMEX, ENSAI, B.P. 455, Ngaoundere, Cameroun

⁴ Université de Ngaoundéré, LA2MP, Faculté des sciences, B.P. 455, Ngaoundere, Cameroun
ftatsimb@insa-toulouse.fr

RÉSUMÉ.

Le barrage hydroélectrique de Song Loulou, au Cameroun, est sujet au gonflement induit par la Réaction Alcali-Granulat (RAG) à l'instar de nombreuses autres installations de ce type dans le monde. Des modèles macroscopiques de RAG ont été développés pour décrire de façon approchée les observations à l'échelle de la structure, tandis que des modèles microscopiques rendent compte précisément de la physico-chimie de la RAG, avec malheureusement des coûts de calculs prohibitifs. 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, et procéder ainsi à l'estimation de la fiabilité résiduelle du barrage.

ABSTRACT.

The Song Loulou hydropower dam in Cameroon is affected by alkali-aggregate reaction (AAR) as many others dams worldwide. Macroscopic models of AAR have been developed to describe approximately observations at structure-scale, while accurate microscopic models are based on the physico-chemistry of AAR, with unfortunately prohibitive computational costs. 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 reliability of the dam.

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

KEYWORDS: alkali-aggregate reaction, dam, microscopic model, structural reliability, Surrogate model

Introduction

Le barrage hydroélectrique de Song Loulou, au Cameroun, est atteint de Réaction Alcali-Granulat (RAG) à l'instar de nombreuses autres installations de ce type dans le monde. Cette réaction 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 and Kataoka, 1981; Poole, 1992). En conséquence, l'expansion volumique de ces gels dans le béton 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; Esposito and Hendriks, 2017). D'une part, des modèles macroscopiques de RAG ont été développés pour estimer le comportement à long-terme des structures atteintes, en combinant une approximation de la

cinétique de la réaction chimique à des lois de comportement mécanique, linéaires ou non. D'autre part, des modèles microscopiques chémo-mécanique ont été développés pour estimer plus précisément les cinétiques locales de la diffusion des alcalins dans les granulats, de la formation des gels et de leur absorption d'eau. Malgré la pertinence des simulations issues de ces modèles microscopiques, ils ne sont pas utilisés pour des simulations à l'échelle de la structure en raison de coûts de calculs prohibitifs. 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, 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 du barrage évacuateur de crues, liée au blocage de la vanne.

Méthodologie

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

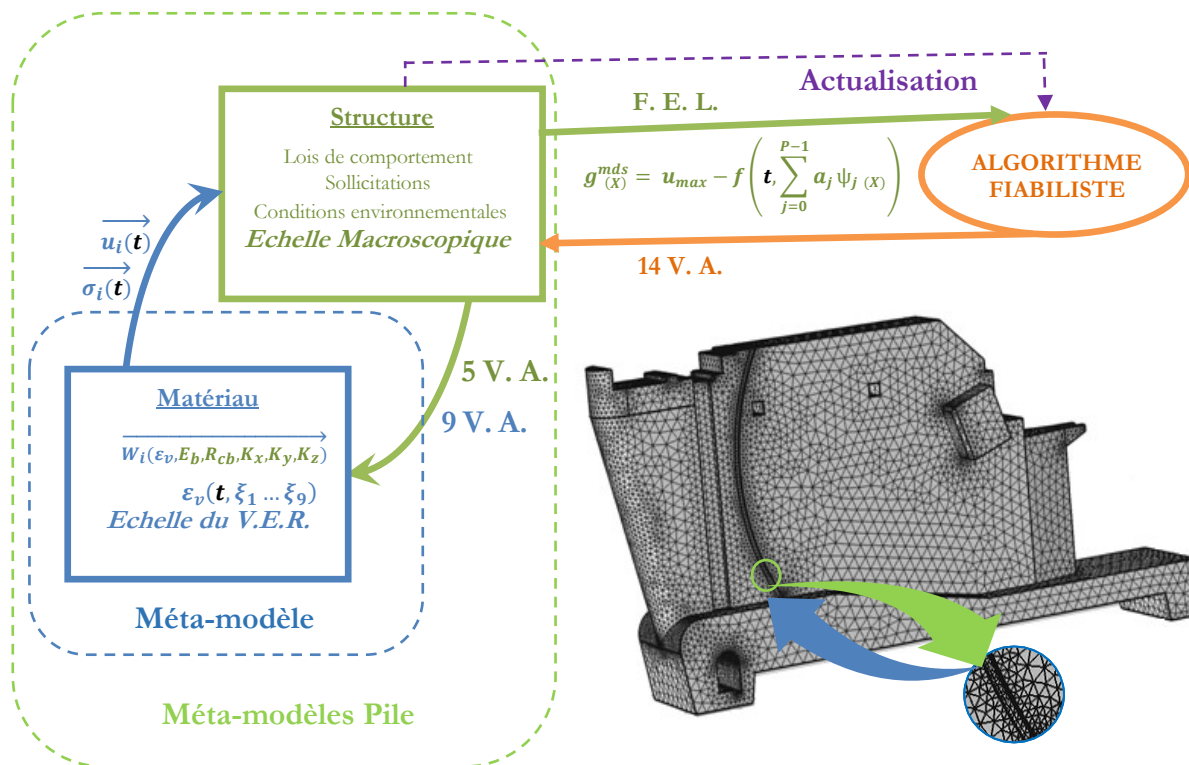


Fig. 1 : Détails de la méthodologie proposée

A l'échelle du VER, le modèle microscopique est utilisé dans de nombreuses simulations de Monte Carlo, dont les couples entrées-sortie permettent de construire le modèle de substitution (Méta-modèle) à cette échelle (Matériau). 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. 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.

Modèle de substitution du modèle de RAG à l'échelle de l'éprouvette

A cette échelle, une vingtaine de paramètres potentiellement aléatoires interviennent dans le calcul du gonflement (déformation volumique) isotrope induit par la RAG dans le temps avec le modèle de (Multon, Sellier and Cyr, 2009). A l'issue d'une analyse de sensibilité selon la méthode de Morris (Morris, 1991; Ftatsi Mbetmi, Duprat and De Larrard, 2016), neuf variables aléatoires ont été retenues dans la construction du modèle de substitution : X_{R1}, \dots, X_{R9} (voir Tab. 1). Le même plan d'expérience numérique, comprenant 3000 points, a été utilisé pour déterminer les 220 coefficients de chacun des trois développements en chaos polynomiaux. En observant quelques-unes des 3000 courbes correspondantes (voir courbe type sur la Fig. 2), nous avons pensé à nous servir de l'expression de la sigmoïde donnée par Larive (Larive, 1997) comme expression de forme de notre modèle de substitution.

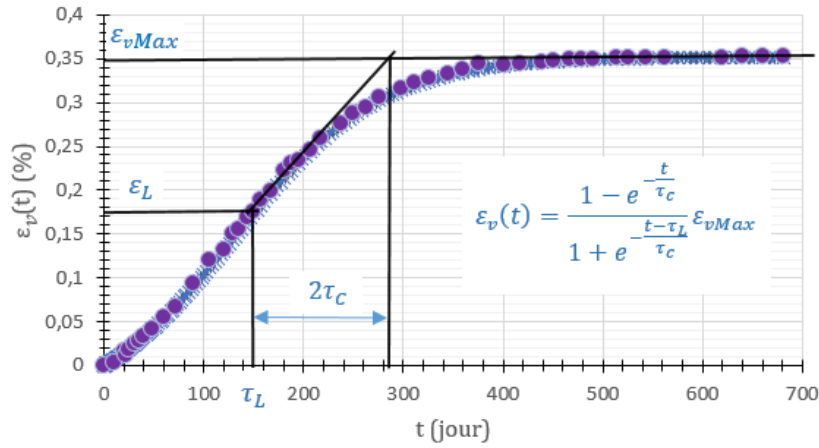


Fig. 2 : Courbe type obtenue avec le modèle (Multon, Sellier and Cyr, 2009)

Pour chacune des courbes, nous avons déterminé le triplet $(\varepsilon_{vMax}, \tau_C, \tau_L)$, et nous nous sommes servi d'un algorithme classique de développement en chaos polynomial, pour calculer nos coefficients a_i, b_i et c_i ($i = 0, 1, \dots, 219$). L'expression du modèle de substitution à l'échelle de l'éprouvette, basé sur des développements en chaos de polynômes de Legendre d'ordre 3 (L_i) des paramètres d'une sigmoïde fonction des neuf variables physiques de RAG X_1, \dots, X_9 , est donnée par les équations ci-après.

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

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

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'utilisation de ce modèle de substitution à la prédiction des effets mécaniques du gonflement dû à la RAG sur une pile d'évacuateur de crue nécessite de prendre en compte l'anisotropie de ces effets en modifiant les fonctions poids proposées par (Saouma and Perotti, 2006; Saouma,

2014). Ces fonctions permettent globalement d’avoir moins de gonflement dans les directions principales les plus contraintes, le cas isotrope correspondant à des poids de 1/3 dans chacune des trois directions principales. Leurs nombreuses expressions, fonction des dix configurations possibles, ne peuvent être explicitées dans le cadre de cette communication.

Modélisation d’une pile d’évacuateur de crue 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 les figures ci-après. Le parallélépipède circonscrit à la pile fait 8.5m de large, 52m de long, et une hauteur de 26m.

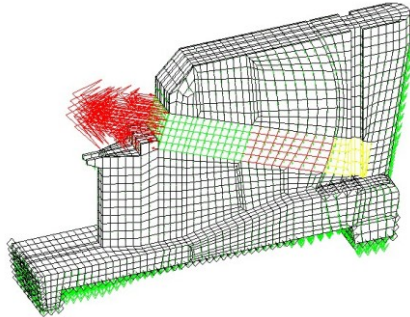


Fig. 3 : Pile de l’évacuateur de crues de Song Loulou

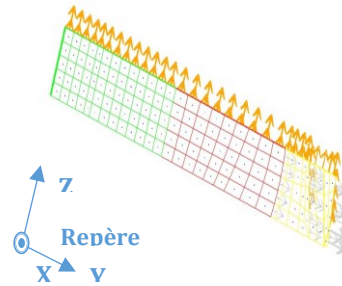


Fig. 4 : Tirants dans chaque pile

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. Les trois sections du tirant la pile, incliné de 19.12° par rapport à l’horizontal, représenté sur la figure ci-dessus en vert, rouge et jaune respectivement, ont été modélisées comme constituées de bétons orthotropes équivalents au béton armé (Fig. 4). En considérant un module d’Young E_s de 210 GPa pour l’acier de ferrailage, le module d’Young équivalent pour chacune des trois sections des tirants dans la direction Y est donné par :

$$E_{t1Y} = \frac{(198000E_c + 1640.6(E_s - E_c))}{198000}, E_{t2Y} = \frac{(198000E_c + 1093.7(E_s - E_c))}{198000}, E_{t3Y} = \frac{(198000E_c + 546.9(E_s - E_c))}{198000}$$

Où, E_c est le module d’Young du béton. La pile est soumise à son poids propre. La pression exercée sur les vannes et reprise par les tirants, est appliquée comme indiqué (Fig. 3).

Le tableau Tab. 1, donne des précisions sur l’ensemble des paramètres utilisés dans notre application à la pile d’évacuateur de crues du barrage de Song Loulou.

Tab. 1 : Paramètres portant l’aléa pour le calcul de la pile

Paramètres de RAG				
V.A.	Description	Plage	Unité	Loi de probabilité
X_1	Diamètre maximal de la plus grande classe granulaire	60 à 125	mm	$N(\mu = 92.5, \sigma = 10.8)$
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 dans les granulats	0.25 à 0.55	-	$N(\mu = 0.4, \sigma = 0.05)$

X_4	Concentration initiale d'alcalin dans la pâte de ciment	220 à 250	mol/m ³	$N(\mu = 235, \sigma = 5)$
X_5	Porosité du mortier	0.16 à 0.3	-	$LN(\mu = -1.47, \sigma = 0.1)$
X_6	Distance sur laquelle le gel peut migrer pour les petits granulats	1 à 10	μm	$U(\mu = 5.5, \sigma = 2.6)$
X_7	Volume molaire du gel crée	$1,4 \cdot 10^{-5}$ à $1,6 \cdot 10^{-5}$	m ³ /mol	$U(\mu = 1,5 \cdot 10^{-5}, \sigma = 5,77 \cdot 10^{-7})$
X_8	Nombre de mole de Na réagissant avec 1 mole de Si pour former le gel (dépend de Na_2O_{eq}/SiO_2)	0.39 à 0.42	-	$LN(\mu = -0.9, \sigma = 0.02)$
X_9	Coef. de fixation des alcalins pris idem pour toutes les classes	$-5 \cdot 10^{-9}$ à $-1 \cdot 10^{-9}$	m ³ /m ³ /s	$-LN(\mu = 19.7, \sigma = 0.37)$
Paramètres Matériaux				
V.A.	Description	Plage	Unité	Loi de probabilité
X_{10}	Module en compression du béton	10 à 20	GPa	$N(\mu = 15, \sigma = 1.67)$
X_{11}	Résistance en compression	15 à 25	MPa	$N(\mu = 20, \sigma = 1.67)$
Paramètres Géométriques				
V.A.	Description	Plage	Unité	Loi de probabilité
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	-	$N(\mu = 1, \sigma = 0.033)$

Construction de modèles de substitution à l'échelle de la pile

Nous avons effectué un plan d'expérience numérique pour constituer, à partir de simulations de Monte Carlo de tirages sur les quatorze variables aléatoires (neuf du modèle de RAG, deux paramètres mécaniques du béton et trois paramètres géométriques, voir Tab. 1), une base de données de 3000 cinétiques de déplacements au point critique de la console (point de déplacement maximal). Les courbes types sont données sur la figure (Fig. 5). Nous nous sommes particulièrement intéressés à la norme du déplacement en première approche. Pour chacune des 3000 courbes correspondante à la norme du déplacement, nous avons déterminé le quadruplet ($\|U_w\|_0, \|U\|_{Max}, \tau_C, \tau_L$), et nous nous sommes servi d'un algorithme classique de développement en chaos de polynômes de Legendre d'ordre 3 (L_i), pour calculer nos coefficients d_i, e_i, f_i et g_i ($i = 0, 1, \dots, 679$). 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 :

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

$$\text{avec } \begin{cases} \|U\|_{Max}(\xi) = d_0 + \sum_{i=1}^{679} d_i \cdot L_i(\xi) \\ \tau_C(\xi) = e_0 + \sum_{i=1}^{679} e_i \cdot L_i(\xi) \\ \tau_L(\xi) = f_0 + \sum_{i=1}^{679} f_i \cdot L_i(\xi) \\ \|U\|_0(\xi) = g_0 + \sum_{i=1}^{679} g_i \cdot L_i(\xi) \end{cases}, \quad \xi_{j=1,2,\dots,14} = \frac{2X_j - X_{jmax} - X_{jmin}}{X_{jmax} - X_{jmin}}$$

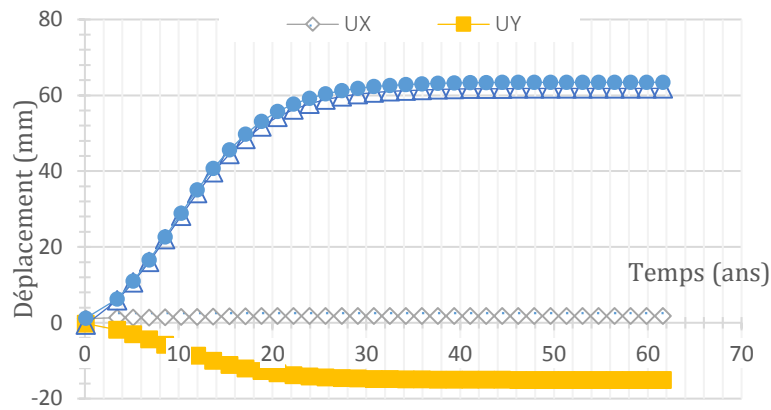


Fig. 5 : Courbes types des déplacements au point critique de la console d'une pile

Analyse fiabiliste d'une vanne d'évacuateur de crues

Nous considérons pour notre application, le blocage potentiel de la vanne d'évacuateur de crue (en rouge sur la figure ci-après) associé aux déformations mécaniques consécutives à la RAG et au chargement.

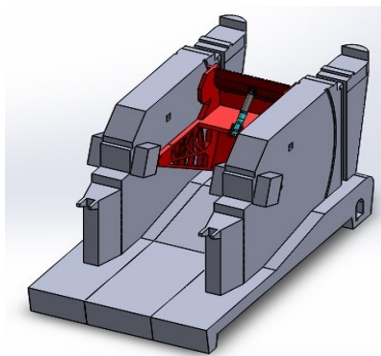


Fig. 6 : Dessin 3D de l'évacuateur de crues de Song Loulou



Fig. 7 : Photo de l'évacuateur de crues de Song Loulou

Pour la détermination des seuils critiques des déplacements de la console, plusieurs approches ont été envisagées. La norme DIN 19704 est utilisée dans la conception des évacuateurs de crues, mais ne précise les valeurs des tolérances que pour les pièces mécaniques mobiles. Nous avons proposé un calcul des tolérances et ajustement sur la base de la cotation fonctionnelle (Ftatsi Mbetmi, De Larrard and Duprat, 2015). Cependant, les valeurs de certaines données importantes dans ce calcul ont été approchées de façon imprécise, nous amenant ainsi à chercher une autre alternative. Nous sommes finalement partis d'une probabilité de défaillance a priori de 0.1 à 60 ans d'âge du barrage, étant donné que le mode défaillance traité est un dysfonctionnement de service. La valeur seuil proposée de la norme du déplacement maximal de la console est 67mm.

Nous rappelons que pour simplifier l'approche, la pression exercée sur les vannes et reprise par les tirants (Fig. 3), est supposée constante à 1.0646 MPa (équivalent à une force de 21,079 MN par vanne). Cela correspond à la hauteur d'eau maximale, ce qui apporte du conservatisme au résultat. Les résultats obtenus en utilisant la méthode FORM sont présentés dans les tableaux Tab. 2 et 3.

Tab. 2 : Indice de fiabilité et probabilité

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

Tab. 3 : Points de défaillance dans les espaces standard et physique

Temp _s	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

Les coordonnées des points de défaillance dans l'espace standard permettent de connaître le rôle des variables joué dans l'atteinte de la défaillance, porté dans le Tab. 3 : 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 Fig.8.

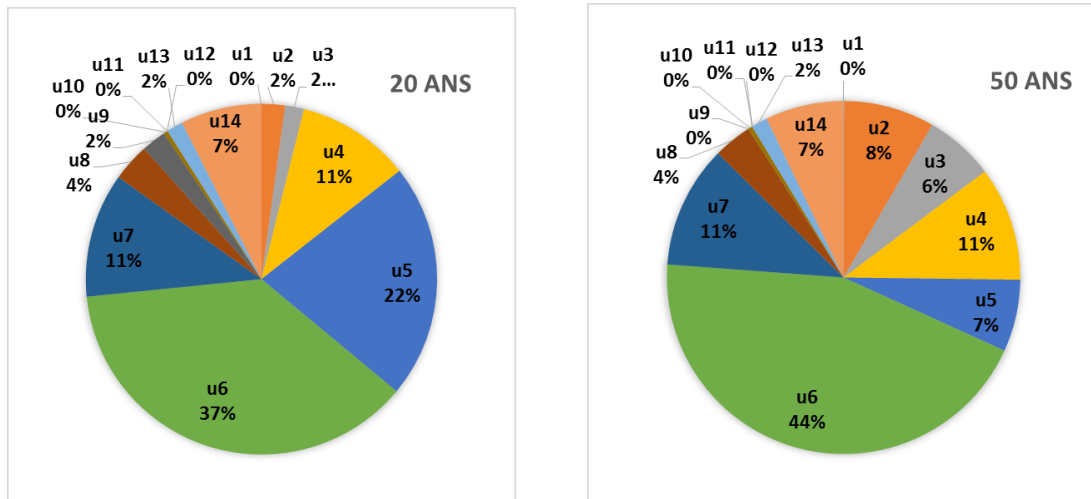


Fig. 8 : Facteurs d'importance

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.

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-alkalin 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, implémenté sous CASTEM, 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 ces résultats dans la maintenance des ouvrages en béton.

Références

- 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.
- Esposito, R. and Hendriks, M. A. N. (2017) 'Literature review of modelling approaches for ASR in concrete: a new perspective', *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pp. 1–21.
- Ftatsi Mbetmi, G., Duprat, F. and De Larrard, T. (2016) 'Etude de sensibilité d'un modèle d'alcali-réaction', in Liège: 34èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil (RUGC), p. 8.
- Ftatsi Mbetmi, G., De Larrard, T. and Duprat, F. (2015) 'Structural damage prediction of an AAR affected dam', in *Innovations in construction*. Paris, France: 3ème Congrès International de Géotechnique - Ouvrages - Structures (CIGOS), p. 9.
- 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/>.
- Morris, M. D. (1991) 'Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments', *Technometrics*, 33(2), p. 161. doi: 10.2307/1269043.
- 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 Alkali-Aggregate Reaction*, pp. 782–789.
- Saouma, V. (2014) *Numerical Modeling of AAR*. CRC Press. Available at: <http://books.google.fr/books?id=4bJiAgAAQBAJ>.
- Saouma, V. and Perotti, L. (2006) 'Constitutive Model for Alkali-Aggregate Reactions', *ACI Materials Journal*, 103(3). doi: 10.14359/15853.