



HAL
open science

Étude de sensibilité d'un modèle d'alcali-réaction

Guy-De-Patience Ftatsi Mbetmi, Frederic Duprat, Thomas de Larrard

► **To cite this version:**

Guy-De-Patience Ftatsi Mbetmi, Frederic Duprat, Thomas de Larrard. Étude de sensibilité d'un modèle d'alcali-réaction. Rencontres de l'AUGC, May 2016, Liège, Belgique. hal-01874010

HAL Id: hal-01874010

<https://hal.insa-toulouse.fr/hal-01874010>

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.

Etude de sensibilité d'un modèle d'alcali-réaction

Guy-de-Patience Ftatsi Mbetmi¹, Frédéric Duprat², Thomas de Larrard³

¹LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS, France, mail : ftatsimb@insa-toulouse.fr

²LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS, France, mail : frederic.duprat@insa-toulouse.fr

³LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS, France, mail : thomas.de-larrard@insa-toulouse.fr

RÉSUMÉ. L'alcali-réaction est une dégradation délétère significative pour de nombreux ouvrages en béton, notamment ceux dans lesquels le taux de saturation du béton reste élevé en permanence, comme les barrages. Les approximations associées aux hypothèses de modélisation de la RAG à l'échelle d'un volume élémentaire représentatif (VER), et les nombreuses incertitudes affectant les paramètres des modèles, rendent aléatoire la prévision du phénomène de RAG et imposent d'opérer en contexte probabiliste. Pour limiter la dimension stochastique lors de l'analyse probabiliste, une étude de sensibilité par la méthode de Morris a été entreprise sur le modèle de RAG développé au LMDC en conditions accélérées. Les sorties du modèle visées ont été le gonflement maximal et ses niveaux intermédiaires, ainsi que les temps correspondant à ces gonflements respectifs. Cette étude permet d'écartier environ la moitié des paramètres du modèle comme étant peu influents sur la variabilité des sorties et qui pourront donc être considérés comme déterministes par la suite.

ABSTRACT. The alkali aggregate reaction (AAR) is a significant deleterious degradation for many concrete structures, particularly those in which the saturation rate of the concrete remains constantly high, such as dams. The approximations associated with the modeling assumptions of AAR on the scale of a representative elementary volume (REV), and the many uncertainties that affect the parameters of the models, make the prediction of AAR phenomenon random, and thus require to operate in probabilistic context. To limit the stochastic dimension for a probabilistic analysis, a sensitivity analysis by the Morris method was conducted on the AAR model developed by LMDC in accelerated conditions. The outputs of model involved were the maximum and intermediate levels of swelling, as well as the time corresponding to each of these levels of swelling. This study helps to remove about half of the model parameters having little influence on the variability of outputs and can therefore be considered as deterministic subsequently.

MOTS-CLÉS : alcali-réaction, analyse de sensibilité, méthode de Morris.

KEY WORDS: alkali aggregate reaction, sensitivity analysis, Morris method.

1. Introduction

L'alcali-réaction constitue une dégradation délétère significative pour de nombreux ouvrages en béton, notamment ceux dans lesquels le taux de saturation du béton reste élevé en permanence, comme les barrages. La réaction alcali-granulats (RAG) étudiée ici est la réaction alcali-silice qui a lieu entre les phases siliceuses mal cristallisées des granulats réactifs et la solution interstitielle alcaline du béton. Cette réaction conduit à la formation d'un gel qui peut mettre sous pression le béton environnant conduisant celui-ci à gonfler et à se fissurer. La modélisation de la RAG à l'échelle d'un Volume Élémentaire Représentatif (VER) fait intervenir le transport des ions hydroxyles et alcalins dans le granulat, le transport des ions calcium et la conservation des masses ioniques au cours des processus réactifs (rupture des liaisons silanol et siloxane pour créer des gels siliceux, dissolution de la portlandite). Le passage à l'échelle structurale impose de considérer en premier lieu une cinétique de gonflement puis d'y superposer l'évolution de l'état mécanique dépendant à la fois du chargement de la structure et de l'effet du gonflement imposé, et qui en retour modifie ce dernier si une partie du gel peut s'étendre dans les fissures consécutives à l'état mécanique.

Hormis les approximations associées aux hypothèses admises, de nombreuses incertitudes affectent les paramètres de la modélisation, rendent aléatoire la prévision du phénomène de RAG et imposent d'opérer en contexte probabiliste. Dans un objectif d'analyse probabiliste de la fiabilité fonctionnelle des barrages, une méthodologie basée notamment sur l'utilisation de modèles de substitution à deux niveaux a ainsi été prévue : le premier niveau concerne le gonflement à l'échelle du VER tandis que le second concerne l'état limite mécanique visé (blocage des évacuateurs de crue). Pour limiter la dimension stochastique lors de l'analyse probabiliste, une étude de sensibilité a été entreprise sur le modèle de RAG à l'échelle du VER couplé à la cinétique de gonflement libre. Le modèle retenu est celui développé au LMDC [MUL 2009].

Après la présentation de la méthode de Morris [MOR 91], une estimation des plages de variabilité envisageables des paramètres est effectuée sur la base de résultats expérimentaux des essais accélérés LPC N°44 obtenus sur des corps d'épreuve extraits du barrage étudié (barrage de Song Loulou situé au Cameroun) [GUI 2013]. Ensuite, l'étude de sensibilité est conduite sur les sorties du modèle choisies, à savoir le gonflement maximal et ses niveaux intermédiaires, ainsi que les temps correspondant à ces gonflements respectifs. Les variables de forte influence sont identifiées.

2. Modèle de RAG

2.1. Equations constitutives

Le modèle développé au LMDC se base sur les principales hypothèses suivantes :

- Les effets d'un chargement extérieur ne sont pas considérés (gonflement libre) ;
- La libération des alcalins par substitution par les ions calcium n'est pas prise en compte ;
- Le mécanisme réactionnel est celui de la diffusion des espèces ioniques suivie de la formation des gels ;
- La réaction n'est effective que pour une concentration en alcalin supérieure à un seuil Na_{th} ;
- Les granulats réactifs ainsi que le VER sont supposés sphériques ;
- On considère que les granulats de même taille gonflent avec les mêmes cinétiques, amplitudes et épaisseurs de porosité connectée ;
- Seule la diffusion dans le granulat est considérée, celle dans la pâte de ciment étant considérée instantanée ;
- Le volume de gel produit remplit d'abord la porosité connectée avec de faire gonfler le VER.

Il décrit le phénomène de RAG à partir des équations [1], avec $\langle X \rangle^+ = X$ si $X > 0$ et 0 sinon. Les symboles sont décrits dans le Tableau 1, α_a est associé à la classe granulaire a (ici $a = 1,2,3$).

$$R_{VER}^a = R_a / \sqrt[3]{\phi_a \cdot C_{agg}} \cdot \partial / \partial t (P_{agg} S_r C_{Na}) = 1 / r^2 \cdot \partial / \partial r \left(D_a \cdot r^2 \left(\frac{dC_{Na}}{dr} \right) \right) + S(C_{Na}),$$

$$S(C_{Na}) = f \langle C_{Na} - Na_{th} \rangle^+, \quad C_{Na}^{cp} = 2 \cdot M_{Na2O} / (0.062 S_r \cdot (P_{mort} - P_{agg} C_{agg})), \quad V_{g,a}(t) = n_g^a \cdot V_{gel}^{mol}, \quad [1]$$

$$n_g^a = 4/3 \pi R_a^3 \times \int_0^t (S(C_{Na})/2) \cdot dt, \quad V_{por,a} = 4\pi ((R_a - t_{ca})^3 - R_a^3) ((P_{mort} - P_{agg} C_{agg})) / (3 \cdot (1 - C_{agg}))$$

2.2. Paramètres incertains

Une vingtaine de paramètres incertains a été identifiée (Tableau 2) dans le modèle, en considérant que la plus petite classe granulaire (sable) a des propriétés physico-chimiques différentes des classes moyennes et grandes (graviers et cailloux), contrairement à l'hypothèse de similitude faite habituellement. Les incertitudes de modèle, concentrant l'effet des hypothèses simplificatrices notamment, ne sont pas prises en tant que telles sous forme par exemple d'une variable multiplicative ou additive venant pondérer les résultats des calculs. En effet, elle aurait un poids trop significatif et occulterait l'importance des autres paramètres. La température n'est pas retenue comme paramètre étant donné qu'elle est constante à 38 °C au cours des essais de RAG accélérée LPC N°44 réalisés.

3. Méthode de Morris

Cette méthode [MOR 91] [CAM 2007] [KIN 2013] permet de classer des variables d'entrée selon leur importance au regard de leur influence sur la réponse d'un modèle. Elle s'appuie sur l'hypothèse qu'en faisant varier tour à tour des paramètres du même pas relatif, celui qui cause la plus grande variation sur la sortie est le plus important.

3.1. Trajectoires et Effets Élémentaires (EE)

La première étape consiste à construire des trajectoires, bases du plan d'expérience qui permettra de calculer les effets élémentaires et les paramètres de Morris. Pour se faire, pour chacune des k variables d'entrées, on divise son intervalle de variation en p niveaux ($p > k$) pour partir du minimum au maximum avec un pas (ou perturbation) $\Delta = 1/(p - 1)$. Ensuite, on construit r trajectoires constituées chacune de $k + 1$ points et de leurs réponses respectives, le premier point étant tiré aléatoirement et les k autres calculés tels qu'une seule des k variables change de $\pm\Delta$ d'un point calculé à un autre. Ainsi, chaque trajectoire permet de déterminer un Effet Élémentaire (EE) de chacune des entrées suivant l'expression [2].

$$EE_i = f(X_1, \dots, X_i + \Delta, \dots, X_k) - f(X_1, \dots, X_i, \dots, X_k) / \Delta \quad [2]$$

Le calcul des indicateurs de Morris requiert plusieurs effets élémentaires par variables donc le calcul de plusieurs trajectoires. La Figure 1 présente 7 trajectoires pour deux variables ($r = 7, k = 2$), en indiquant les expressions de quelques-uns des effets élémentaires qui en découle. Le premier point de chacune de ces trajectoires est tiré aléatoirement et les deux autres (il y a $k + 1 = 3$ points par trajectoire) sont calculés de manière à n'avoir qu'une variation relative de $\pm\Delta$ entre deux points consécutifs.

Plus généralement, une trajectoire peut être construite par calcul matriciel suivant les équations [3] et [4] dont les détails sont donnés dans [KIN 2013]. $X_{1 \times k}^*$ est le premier point de la trajectoire tiré aléatoirement, et $B_{(k+1) \times k}^*$ la matrice finale tels que :

$$B_{(k+1) \times k}^* = J_{(k+1) \times 1} \cdot X_{1 \times k}^* + (\Delta/2) \cdot [(2B_{(k+1) \times k} - J_{(k+1) \times k}) \cdot D_{k \times k} + J_{(k+1) \times k}] \cdot P_{k \times k}^* \quad [3]$$

Les points de la trajectoire sont donnés par :

$$X_{i=1,2,\dots,k+1;j=1,2,\dots,k}^{i,j} = X_{min}^j + B_{i,j}^* (X_{max}^j - X_{min}^j) \quad [4]$$

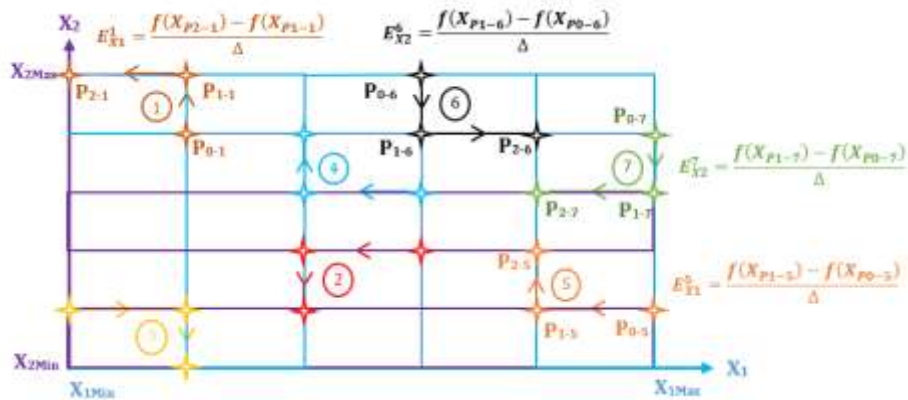


Figure 2. Exemple d'effets élémentaires pour $k = 2, r = 7, p = 6 (\Delta = 0, 2)$

Une fois que les couples $(X, f(X))$ de chaque point de l'ensemble des trajectoires sont calculés ainsi que les effets élémentaires, on peut évaluer les indicateurs de Morris utiles au tri des variables.

3.2. Indices de sensibilité globale SM_i^* et sélection de variables

Il est calculé à partir des statistiques sur les effets élémentaires, équations [5] et [6]. Le nombre de trajectoires requis est celui à partir duquel cet indicateur devient constant. Plus ce nombre est grand, plus les résultats sont précis, mais le coût de calcul augmente aussi.

$$\mu_i^* = \sum_{j=1}^r |EE_{i,j}|/r, \quad \sigma_i = \sqrt{\frac{1}{(r-1)} \times \sum_{j=1}^r (EE_{i,j} - \mu_i)^2} \quad [5]$$

$$SM_i^* = (\mu_i^{*2} + \sigma_i^2) / \sum_{i=1}^n (\mu_i^{*2} + \sigma_i^2) \quad [6]$$

Les variables sont classées par ordre décroissant d'indice de sensibilité globale, ce qui permet de déterminer l'indice de sensibilité globale cumulé pour une variable comme la somme de tous les indices individuels des variables qui la précèdent auquel s'ajoute l'indice pour la variable en question. Les variables considérées comme influentes sont celles dont l'indice cumulé est inférieur ou égal à 95%.

4. Variables d'entrée indépendantes du modèle et plages de variation

Suite à une étude commandée par AES-SONEL auprès du cabinet ISL, des échantillons ont été prélevés du barrage de prise et de l'évacuateur de crue de Song Loulou pour subir différents tests au rang desquels l'essai de gonflement accéléré LPC N°44 réalisé par l'IFSTTAR en 2011.

Tableau 1. Plages de variations recalées des variables d'entrées du modèle [MUL 2009]

| V.A. | Description | Abréviation | Symbole | Plage | Unité |
|-----------------|---|-----------------------|--|---|-----------------------------------|
| X ₁ | Diamètre minimal de la plus petite classe granulaire | DMIN(1) | $R_{(a=1,2,3)} = (DMIN(a) + DMAX(a)) / 2$ | 0 à 2 | mm |
| X ₂ | Diamètre minimal de la classe granulaire intermédiaire | DMIN(2) = DMAX(1) | | 4 à 6 | mm |
| X ₃ | Diamètre minimal de la plus grande classe granulaire | DMIN(3) = DMAX(2) | | 10 à 20 | mm |
| X ₄ | Diamètre maximal de la plus grande classe granulaire | DMAX(3) | | 32 à 125 | mm |
| X ₅ | Concentration volumique de granulat par m ³ de béton | CONGRA | C_{agg} | 0.6 à 0.75 | - |
| X ₆ | Fraction de la plus petite classe granulaire dans les granulats | FRAGRA(1) | $\phi_{(a=1,2,3)} = Fonction (FRAGRA(a), SILSOL(a))$ | 0.25 à 0.55 | - |
| X ₇ | Fraction de la classe granulaire intermédiaire dans les granulats | FRAGRA(2) = FRAGRA(3) | | 0.05 à 0.25 | - |
| X ₈ | Concentration initiale d'alcalin dans la pâte de ciment | CNA0 | C_{Na}^{cp} | 100 à 250 | mol/m ³ |
| X ₉ | Quantité de silice soluble pour la plus petite classe granulaire (Sable) | SILSOL(1) | $\phi_{(a=1,2,3)} = Fonction (FRAGRA(a), SILSOL(a))$ | 1000 à 3000 | mol/m ³ de gran. |
| X ₁₀ | Quantité de silice soluble prise identique pour les autres classes granulaires et réactivité moyenne | SILSOL(2) = SILSOL(3) | | 1000 à 3000 | mol/m ³ de gran. |
| X ₁₁ | Porosité du mortier | POROMO | P_{mort} | 0.1 à 0.3 | - |
| X ₁₂ | Porosité des petits granulats | POROG(1) | P_{agg1} | 0.01 à 0.05 | - |
| X ₁₃ | Porosité des granulats prise identique pour les autres classes granulaires | POROG(2) = POROG(3) | $P_{agg2,3}$ | 0.01 à 0.05 | - |
| X ₁₄ | Distance sur laquelle le gel peut migrer pour les petits granulats | COLC(1) | $t_{c(a=1)}$ | 1 à 10 | µm |
| X ₁₅ | Distance sur laquelle le gel peut migrer pour les autres granulats | COLC(2) = COLC(3) | $t_{c(a=2,3)}$ | 1 à 10 | µm |
| X ₁₆ | Coefficients de diffusion des alcalins pour les petits granulats | DIFFG(1) | $D_{(a=1)}$ | 2.10 ⁻¹³ à 7.10 ⁻¹³ | m ² /s |
| X ₁₇ | Coefficients de diffusion des alcalins pour les autres granulats | DIFFG(2) = DIFFG(3) | $D_{(a=2,3)}$ | 2.10 ⁻¹³ à 7.10 ⁻¹³ | m ² /s |
| X ₁₈ | Volume molaire du gel crée | VMGEL | V_{gel}^{mol} | 1.10 ⁻⁵ à 1,6.10 ⁻⁵ | m ³ /mol |
| X ₁₉ | Nombre de mole de Na réagissant avec 1 mole de Si pour former le gel (dépend de Na ₂ O _{eq} /SiO ₂) | RNS | $Ratio Na_2O/SiO_2$ | 0,39 à 0,59 | - |
| X ₂₀ | Coefficient de fixation des alcalins pris idem pour toutes les classes | FIXNA | f | -1.10 ⁻⁷ à -1.10 ⁻⁹ | m ³ /m ³ /s |

Sur l'ensemble des résultats obtenus de ces essais effectués sur une dizaine de carottes [GUI 2013], nous avons choisi comme données de référence, représentant les cinétiques maximale, minimale et moyenne respectivement, celles extraites aux points ci-après du barrage de Song Loulou : à la base du contrefort 45 (C45-1), sur le sommet de la pile 12 de l'évacuateur de crue (P12-1), sur le bajoyer rive droite de la passe 1 de l'évacuateur de crue (P12-2). Les codes entre parenthèses sont ceux utilisés sur la Figure 2. Les 7 premières variables (X_1 à X_7), voir Tableau 3, sont des paramètres physiques déduits de la formulation du béton du barrage de Song Loulou. Nous avons défini les plages de variation des 13 autres à partir de la littérature, puis nous avons affiné ces plages par recalage sur nos valeurs expérimentales à l'aide de simulations de Monte Carlo, 2000 dans un premier temps, puis 18 000 simulations une fois que les valeurs calculées ont bien enveloppées les courbes expérimentales. Les intervalles correspondant, avec lesquels nous allons effectuer l'analyse de sensibilité par la suite sont représentés dans le Tableau 4.

La Figure 2, tracée à partir des statistiques découlant de ces simulations montre qu'on encadre bien les valeurs expérimentales entre les centiles 5% et 95%, ce qui permet de statuer sur la cohérence des plages retenues pour les paramètres incertains.

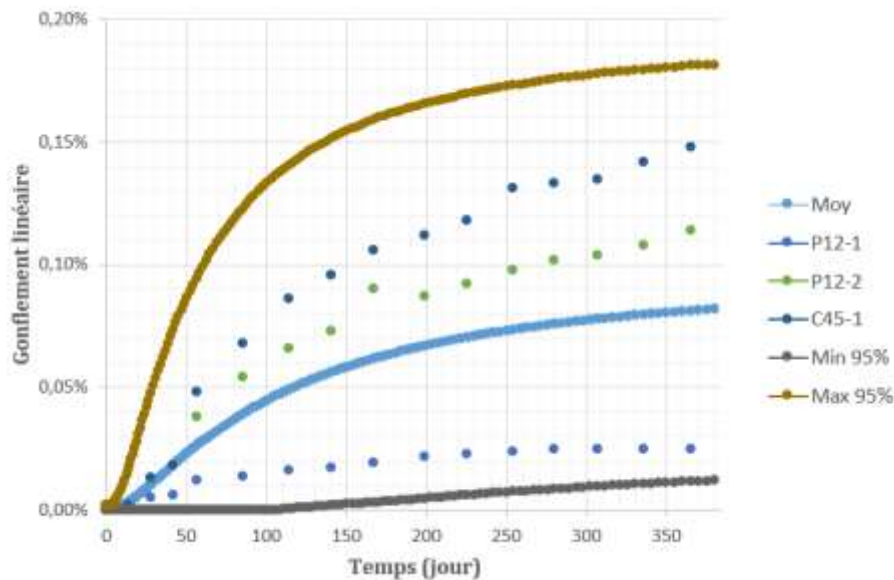


Figure 2. Cinétiques de gonflement Min-Moy et Max pour un quantile de 95% - 18 000 tirages - Plages finales

5. Analyse de sensibilité en conditions accélérées

Le modèle de RAG [MUL 2009] rend compte de la production du gel au cours de l'essai accéléré LPC N°44 sur une éprouvette qui se déroule à 38 °C et 100% d'humidité relative. En considérant les plages de variation précédemment définies pour les variables d'entrée, nous avons utilisé la méthode de Morris, avec les paramètres $k = 20$, $r = 600$, $p = 81$ ($\Delta = 0,0125$), pour étudier leurs incidences respectives sur diverses grandeurs d'intérêt déduites du modèle étudié. Nous rappelons que nous avons utilisés trois classes granulaires lors de l'implémentation du modèle. Les chiffres 1,2 et 3 sont associés aux petite, moyenne et grande classes respectivement. Les sorties calculées à partir des équations [1], avec $P =$ Pourcentage sont :

- Divers pourcentages du gonflement maximal, $\% \varepsilon_{VMax} = P \cdot \max_t \sum_1^3 (3 \cdot (V_{g,a}(t) - V_{por,a}) / (4\pi \cdot R_{VER}^a)^3)$;
- Temps à chacun des pourcentages du gonflement maximal, $t_{\% \varepsilon_{VMax}}$.

Le gonflement maximal ε_{VMax} est obtenu dès que le volume total de gel produit dans le VER atteint son maximum et stagne ou qu'il ne varie quasiment plus.

5.1. Résultats pour divers pourcentage du gonflement maximal $\% \varepsilon_{VMax}$

Nous avons effectué cette analyse pour 7 pourcentages différents de gonflement maximal, à savoir : 5, 25, 50, 75, 90, 95, et 100%. La Figure 3 présente les résultats obtenus à 90% de gonflement maximal. Les 8 variables de forte influence (ayant un indice global de sensibilité décroissant cumulé supérieur ou égal à 1% du précédent) sont celles dont les barres d'histogramme ont un motif de couleur marron.

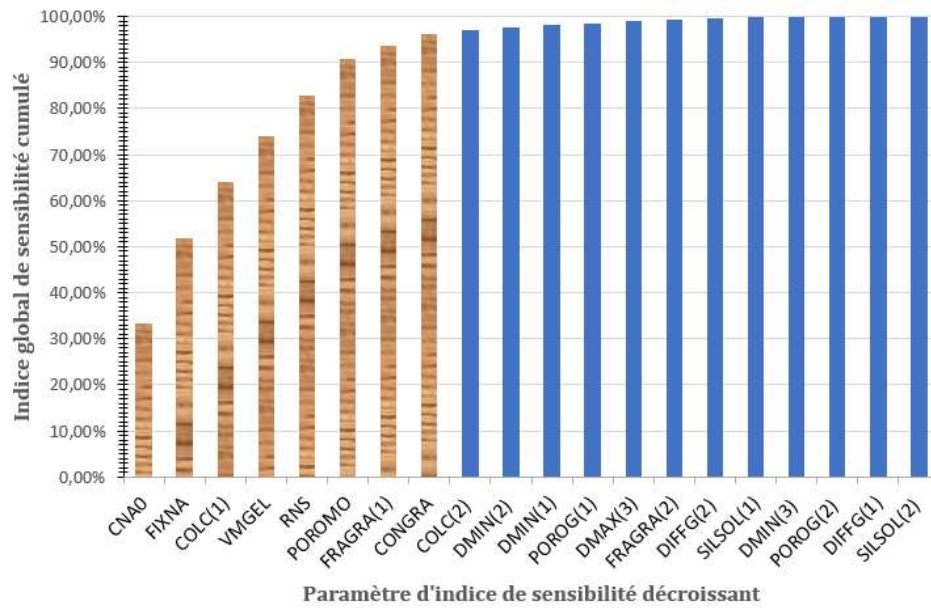


Figure 3. Indice global de sensibilité cumulé de 90% de $\% \epsilon_{V_{Max}}$ en conditions accélérées

Tableau 2. Classement des variables en fonctions de leur impact sur divers pourcentages de $\% \epsilon_{V_{Max}}$

| Rang Pourcentage | Rang | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|---------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 1er | 2e | 3e | 4e | 5e | 6e | 7e | 8e | 9e | 10e | 11e | 12e | 13e | 14e | 15e | 16e | 17e | 18e | 19e | 20e | | |
| 5% | <i>POROMO</i> | <i>FIXNA</i> | <i>CNA0</i> | <i>COLC(1)</i> | <i>COLC(2)</i> | <i>RNS</i> | <i>VMGEL</i> | <i>POROG(1)</i> | <i>DMAX(3)</i> | <i>CONGRA</i> | <i>FRAGRA(2)</i> | <i>POROG(2)</i> | <i>DIFFG(2)</i> | <i>DMIN(1)</i> | <i>DMIN(2)</i> | <i>FRAGRA(1)</i> | <i>DMIN(3)</i> | <i>DIFFG(1)</i> | <i>SILSOL(1)</i> | <i>SILSOL(2)</i> | | |
| 25% | <i>FIXNA</i> | <i>POROMO</i> | <i>COLC(1)</i> | <i>CNA0</i> | <i>VMGEL</i> | <i>RNS</i> | <i>COLC(2)</i> | <i>DMAX(3)</i> | <i>DIFFG(2)</i> | <i>FRAGRA(1)</i> | <i>CONGRA</i> | <i>DMIN(1)</i> | <i>POROG(1)</i> | <i>DMIN(2)</i> | <i>FRAGRA(2)</i> | <i>DIFFG(1)</i> | <i>POROG(2)</i> | <i>DMIN(3)</i> | <i>DMIN(3)</i> | <i>DIFFG(1)</i> | <i>SILSOL(1)</i> | <i>SILSOL(2)</i> |
| 50% | <i>CNA0</i> | <i>FIXNA</i> | <i>COLC(1)</i> | <i>POROMO</i> | <i>VMGEL</i> | <i>RNS</i> | <i>CONGRA</i> | <i>FRAGRA(1)</i> | <i>POROG(1)</i> | <i>COLC(2)</i> | <i>FRAGRA(2)</i> | <i>DMAX(3)</i> | <i>DMIN(1)</i> | <i>DMIN(2)</i> | <i>DIFFG(2)</i> | <i>POROG(2)</i> | <i>DMIN(3)</i> | <i>DIFFG(1)</i> | <i>SILSOL(1)</i> | <i>SILSOL(2)</i> | | |
| 75% | <i>CNA0</i> | <i>FIXNA</i> | <i>COLC(1)</i> | <i>VMGEL</i> | <i>POROMO</i> | <i>RNS</i> | <i>CONGRA</i> | <i>FRAGRA(1)</i> | <i>CONGRA</i> | <i>COLC(2)</i> | <i>DMAX(3)</i> | <i>POROG(1)</i> | <i>DIFFG(2)</i> | <i>DMIN(1)</i> | <i>DMIN(2)</i> | <i>FRAGRA(2)</i> | <i>DMIN(3)</i> | <i>DIFFG(1)</i> | <i>SILSOL(1)</i> | <i>SILSOL(2)</i> | | |
| 90% | <i>CNA0</i> | <i>FIXNA</i> | <i>COLC(1)</i> | <i>VMGEL</i> | <i>RNS</i> | <i>POROMO</i> | <i>FRAGRA(1)</i> | <i>CONGRA</i> | <i>COLC(2)</i> | <i>DMIN(2)</i> | <i>DMIN(1)</i> | <i>POROG(1)</i> | <i>DMAX(3)</i> | <i>FRAGRA(2)</i> | <i>DIFFG(2)</i> | <i>SILSOL(1)</i> | <i>DMIN(3)</i> | <i>POROG(2)</i> | <i>DIFFG(1)</i> | <i>SILSOL(1)</i> | <i>SILSOL(2)</i> | |
| 95% | <i>CNA0</i> | <i>FIXNA</i> | <i>COLC(1)</i> | <i>VMGEL</i> | <i>RNS</i> | <i>POROMO</i> | <i>FRAGRA(1)</i> | <i>CONGRA</i> | <i>COLC(2)</i> | <i>DMIN(2)</i> | <i>DMIN(1)</i> | <i>POROG(1)</i> | <i>DMAX(3)</i> | <i>FRAGRA(2)</i> | <i>SILSOL(1)</i> | <i>DIFFG(2)</i> | <i>DMIN(3)</i> | <i>POROG(2)</i> | <i>DIFFG(1)</i> | <i>SILSOL(1)</i> | <i>SILSOL(2)</i> | |
| 100% | <i>CNA0</i> | <i>FIXNA</i> | <i>COLC(1)</i> | <i>VMGEL</i> | <i>RNS</i> | <i>POROMO</i> | <i>CONGRA</i> | <i>FRAGRA(1)</i> | <i>COLC(2)</i> | <i>DMIN(2)</i> | <i>DMIN(1)</i> | <i>SILSOL(1)</i> | <i>POROG(1)</i> | <i>DMAX(3)</i> | <i>FRAGRA(2)</i> | <i>FRAGRA(2)</i> | <i>DIFFG(2)</i> | <i>DIFFG(1)</i> | <i>POROG(2)</i> | <i>SILSOL(2)</i> | <i>SILSOL(2)</i> | |

Le Tableau 2 donne les classements obtenus pour chacun des sept pourcentages du gonflement maximal auxquels on s'est intéressé. Pour ne pas présenter les graphes obtenus pour chaque pourcentage, à l'instar de celui de 90%, nous avons marqué les variables de forte influence en *italique gras*.

5.2. Résultats sur les temps pour atteindre divers pourcentage du gonflement maximal $t_{\% \varepsilon_{VMax}}$

Le Tableau 3 donne les classements obtenus pour les temps respectifs pour atteindre chacun des 7 pourcentages de gonflement maximal auxquels on s'est intéressé. Les variables de forte influence sont marquées en marron.

Tableau 3. Classement des variables en fonctions de leur impact sur le temps $t_{\% \varepsilon_{VMax}}$ à $\% \varepsilon_{VMax}$

| Rang Pourcentage | 1er | 2e | 3e | 4e | 5e | 6e | 7e | 8e | 9e | 10e | 11e | 12e | 13e | 14e | 15e | 16e | 17e | 18e | 19e | 20e |
|---------------------|--------------|--------------|----------------|---------------|---------------|---------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|
| | 5% | FIXNA | POROMO | COLC(2) | COLC(1) | DMAX(3) | FRAGRA(2) | CNA0 | DIFFG(2) | VMGEL | CONGRA | FRAGRA(1) | RNS | POROG(1) | POROG(2) | DMIN(1) | DMIN(3) | DMIN(2) | DIFFG(1) | SILSOL(1) |
| 25% | FIXNA | POROMO | COLC(1) | COLC(2) | CNA0 | CONGRA | DIFFG(2) | DMAX(3) | FRAGRA(1) | DMIN(2) | VMGEL | POROG(1) | RNS | DMIN(3) | DMIN(1) | FRAGRA(2) | POROG(2) | DIFFG(1) | SILSOL(1) | SILSOL(2) |
| 50% | CNA0 | FIXNA | COLC(1) | POROMO | VMGEL | RNS | CONGRA | FRAGRA(1) | POROG(1) | COLC(2) | FRAGRA(2) | DMAX(3) | DMIN(1) | DMIN(2) | DIFFG(2) | POROG(2) | DMIN(3) | DIFFG(1) | SILSOL(1) | SILSOL(2) |
| 75% | CNA0 | FIXNA | COLC(1) | VMGEL | POROMO | RNS | FRAGRA(1) | CONGRA | COLC(2) | DMAX(3) | POROG(1) | DIFFG(2) | DMIN(1) | DMIN(2) | FRAGRA(2) | POROG(2) | DMIN(3) | DIFFG(1) | SILSOL(1) | SILSOL(2) |
| 90% | CNA0 | FIXNA | COLC(1) | VMGEL | RNS | POROMO | FRAGRA(1) | CONGRA | COLC(2) | DMIN(2) | DMIN(1) | POROG(1) | DMAX(3) | FRAGRA(2) | DIFFG(2) | SILSOL(1) | DMIN(3) | POROG(2) | DIFFG(1) | SILSOL(2) |
| 95% | CNA0 | FIXNA | COLC(1) | VMGEL | RNS | POROMO | FRAGRA(1) | CONGRA | COLC(2) | DMIN(2) | DMIN(1) | POROG(1) | DMAX(3) | FRAGRA(2) | SILSOL(1) | DIFFG(2) | DMIN(3) | POROG(2) | DIFFG(1) | SILSOL(2) |
| 100% | CNA0 | FIXNA | COLC(1) | VMGEL | RNS | POROMO | CONGRA | FRAGRA(1) | COLC(2) | DMIN(2) | DMIN(1) | SILSOL(1) | POROG(1) | DMAX(3) | FRAGRA(2) | FRAGRA(2) | DMIN(3) | POROG(2) | POROG(2) | SILSOL(2) |

5.3. Bilan des analyses de sensibilité

Le Tableau 4 établi, pour chaque variable, le décompte des résultats des analyses de sensibilités effectuées en conditions accélérées (à 38 °C) sur l'ensemble des sept pourcentages considérés. Pour chacune des deux sorties $\% \varepsilon_{VMax}$ et $t_{\% \varepsilon_{VMax}}$, déterminée pour sept valeurs de pourcentage (5, 25, 50, 75, 90, 95, 100), une note de 1/7 est attribuée chaque fois qu'une variable est de forte influence pour un pourcentage donné.

Les huit variables retenues, pour avoir un **score total supérieur à 1.5/2**, donc qui passent le test dans au moins 75% des cas, sont dans l'ordre décroissant : le **coefficient de fixation des alcalins** (FIXNA = X₂₀), la **concentration initiale d'alcalin dans la pâte de ciment** (CNA0 = X₈), la **porosité du mortier** (POROMO = X₁₁), la **distance sur laquelle le gel peut migrer dans le sable** (COLC(1) = X₁₄), le **volume molaire du gel crée** (VMGEL = X₁₈), le **nombre de mole de sodium réagissant avec 1 mole de silice pour former le gel** (RNS = X₁₉), la **concentration volumique de granulat par m³ de béton** (CONGRA = X₅), et la **fraction de sable dans les granulats** (FRAGRA(1) = X₆).

On retrouve là un résultat cohérent par rapport au phénomène analysé. Si certains des paramètres sont expérimentalement identifiables de façon relativement aisée, on constate que d'autres sont en revanche très difficile à estimer, comme la distance de migration du gel.

Tableau 4. Bilan des analyses de sensibilités effectuées en conditions accélérées

| V.A. | Description | % ϵ_{VMax} | t_% ϵ_{VMax} | TOTAL |
|-----------------|-------------|---------------------|-----------------------|-------|
| X ₁ | DMIN(1) | 0,43 | 0,14 | 0,57 |
| X ₂ | DMIN(2) | 0,43 | 0,14 | 0,57 |
| X ₃ | DMIN(3) | | | 0,00 |
| X ₄ | DMAX(3) | 0,57 | 0,29 | 0,86 |
| X ₅ | CONGRA | 1,00 | 0,71 | 1,71 |
| X ₆ | FRAGRA(1) | 0,86 | 0,71 | 1,57 |
| X ₇ | FRAGRA(2) | 0,43 | 0,14 | 0,57 |
| X ₈ | CNA0 | 1,00 | 0,71 | 1,71 |
| X ₉ | SILSOL(1) | | | 0,00 |
| X ₁₀ | SILSOL(2) | | | 0,00 |
| X ₁₁ | POROMO | 1,00 | 0,71 | 1,71 |
| X ₁₂ | POROG(1) | 0,57 | 0,29 | 0,86 |
| X ₁₃ | POROG(2) | 0,14 | | 0,14 |
| X ₁₄ | COLC(1) | 1,00 | 0,71 | 1,71 |
| X ₁₅ | COLC(2) | 0,86 | 0,43 | 1,29 |
| X ₁₆ | DIFFG(1) | | | 0,00 |
| X ₁₇ | DIFFG(2) | 0,57 | 0,43 | 0,70 |
| X ₁₈ | VMGEL | 1,00 | 0,71 | 1,71 |
| X ₁₉ | RNS | 1,00 | 0,71 | 1,71 |
| X ₂₀ | FIXNA | 1,00 | 1,00 | 2,00 |

6. Conclusion

L'étude de sensibilité par la méthode de Morris entreprise sur le modèle de RAG développé au LMDC en conditions accélérées a été menée pour limiter la dimension stochastique lors de l'analyse probabiliste envisagée. Les sorties du modèle visées ont été le gonflement maximal et ses niveaux intermédiaires, ainsi que les temps correspondant à ces gonflements respectifs. Cette étude permet d'écarter environ la moitié des paramètres du modèle comme étant peu influents sur la variabilité des sorties et qui pourront donc être considérés comme déterministes par la suite. Les paramètres soulignés comme incidents sont bien ceux dont la connaissance du phénomène de RAG montre qu'ils le pilotent. Pour être complète, cette étude sera prolongée par une analyse de sensibilité en conditions naturelles avec adaptation de certains paramètres du modèle par thermoactivation.

7. Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le Gouvernement français à travers son Service de Coopération et d'Action Culturelle (SCAC) de l'Ambassade de France au Cameroun pour son soutien financier.

8. Bibliographie

- [CAM 2007] CAMPOLONGO F., CARIBONI J., SALTELLI A., « An effective screening design for sensitivity analysis of large models ». Modelling, computer-assisted simulations, and mapping of dangerous phenomena for hazard assessment, vol. 22, n° 10, 2007, p. 1509-18.
- [GUI 2013] GUILLEMOT T., LINO L., NZALLI E., « Diagnostic et mise en sécurité du barrage de Song Loulou au Cameroun vis-à-vis des désordres liés à l'alcali-réaction. ». Actes du colloque « Modernisation des barrages » du Comité français des barrages et réservoirs (Cfbr), Chambéry, 2013, p. 153-62.
- [KIN 2013] KING D., PERERA B., LINO L., NZALLI E., « Morris method of sensitivity analysis applied to assess the importance of input variables on urban water supply yield – A case study ». Journal of Hydrology, vol 477, n° 0, 2013, p. 17-32.
- [MOR 91] MORRIS M.D., « Factorial sampling plans for preliminary computational experiments », Technometrics, vol. 33, 1991, p. 161-174.
- [MUL 2009] MULTON S., SELIER A., CYR M., « Chemo-mechanical modeling for prediction of alkali silica reaction (ASR) expansion ». Cement and Concrete Research, vol. 39, n° 6, 2009, p. 490-500.