
Analyse par plans d'expériences numériques du couplage entre température au jeune âge et risque de RSI

Jean-François Seignol¹, Lina Amar², Pierre Argoul³, Boumédiene Neijjar⁴

¹ IFSTTAR, département matériaux et structures, 14-20, boulevard Newton, 77420 Champs-sur-Marne - jean-francois.seignol@ifsttar.fr

² INSA de Rennes, département génie civil et urbain

³ IFSTTAR, département matériaux et structures

⁴ IFSTTAR, département matériaux et structures

RÉSUMÉ. Cette étude aborde le problème de l'identification des paramètres des modèles de comportement d'ouvrages en béton atteints de réaction sulfatique interne (RSI), notamment les paramètres qui influencent l'histoire thermique au jeune âge subie par le béton, facteur-clé du déclenchement de la RSI, difficile à évaluer des années après la construction de l'ouvrage. On utilise la méthode des plans d'expériences numériques pour quantifier l'influence de plusieurs d'entre eux, liés aux propriétés thermo-chimiques du ciment, aux conditions de préfabrication (traitement thermique par étuvage) ou aux conditions de coulage sur chantier (conditions climatiques). Cette méthode, appliquée à deux exemples caractéristiques des ouvrages touchés par la RSI (un seul exemple est détaillé par la suite) distingue les facteurs les plus influents, sur lesquels doivent porter les efforts de collecte d'information, de ceux qui ne modifient que marginalement le potentiel de gonflement chimique. Cette étude s'inscrit dans une recherche visant à améliorer les méthodes d'ajustement des modèles de couplage thermo-chimico-mécaniques utilisés pour le recalcul des ouvrages dégradés par les réactions de gonflement interne.

ABSTRACT. This study deals with parameters identification for models representing concrete structures affected by Delayed Ettringite Formation (DEF), mainly parameters influencing concrete early-age thermal history, known to be a major element in DEF initiation. This thermal history is usually difficult to assess long time after the structure building. Numerical design of experiments (DOX) technique is applied to quantify the influence of several factors such as cement thermochemical properties, prefabrication conditions (e.g. steam curing) or on-site casting conditions (weather,...). This technique is applied to two characteristic examples of DEF-affected structures (only one is presented in the following) and it allows to distinguish the most influent factors (for which important work is needed to obtain trustable informations) from the ones which barely affect DEF-swelling potential. This study is part of a larger research project aiming at improving fitting techniques for thermo-chemico-mechanical numerical models used for re-assessing concrete structures affected by internal swelling reactions.

MOTS-CLÉS : réaction sulfatique interne, plans d'expérience, couplage thermo-chimique, identification, sensibilité, béton.

KEY WORDS: Delayed Ettringite Formation, Design of Experiments, thermo-chemical coupling, identification, sensitivity, concrete.

1. Contexte : le recalcul d'ouvrages atteints de RSI

1.1. Causes et conséquences de la RSI

La réaction sulfatique interne (RSI) désigne la formation d'ettringite tardive au sein de la pâte de ciment durcie (PCD) du béton sous l'action des sulfates déjà présents dans le matériau. La forme la plus courante, qui est celle qui nous intéresse ici, a pour origine une température élevée (supérieure à 65 °C) durant le jeune âge du matériau, *i.e.* les premiers jours suivant le coulage durant lesquels se produit l'essentiel des réactions d'hydratation du ciment [IFS 17]. Ceci peut survenir principalement dans deux cas : étuvage excessif de pièces de béton préfabriquées ou conséquence de l'exothermie du ciment lors du coulage d'éléments massifs.

Se formant dans la PCD, l'ettringite tardive, expansive, exerce des pressions sur le réseau poreux et déforme la matrice cimentaire. À l'échelle macroscopique, des déformations, des contraintes de gonflement gêné et une dégradation des performances mécaniques du béton liée à la microfissuration apparaissent, avec des conséquences préoccupantes pour l'ouvrage, tant en termes d'aptitude au service que de sécurité structurale.

1.2. Problématique liée au recalcul d'ouvrages existants

La gestion d'ouvrages atteints de RSI nécessite souvent la réalisation d'une simulation numérique du comportement de la structure et des conséquences qui découlent de l'évolution de la RSI ; plusieurs modèles ont été développés dans ce but [MAL 18, MOR 17, SEI 09,...]. Ils intègrent le fait que la quantité d'ettringite délétère qui sera formée au cours de la vie de l'ouvrage dépend fortement de l'histoire thermique au jeune âge, celle-ci doit donc être reconstituée avec précision.

Il existe, là encore, des outils numériques pour l'évaluer mais ils requièrent comme données d'entrée des informations souvent manquantes, entachées d'incertitudes et d'erreurs, ou encore coûteuses à obtenir (par exemple via des essais de laboratoire sur des bétons reconstitués).

Afin d'optimiser les ressources employées pour retrouver ces informations, il est important de connaître l'influence de chacun de ces paramètres sur le potentiel de gonflement du béton. La méthode des plans d'expériences [GOU 17] appliquée à des simulations numériques est un moyen simple et efficace de quantifier le rôle de chaque facteur, individuellement, puis en combinaison avec les autres. Nous allons donc appliquer cette méthode à deux exemples représentatifs des éléments structuraux qui peuvent être affectés par la RSI.

2. Présentation des deux problèmes -types

2.1 Modèles de température au jeune âge et coulage avec le potentiel de gonflement

Pour déterminer l'histoire thermique $T(x,t)$ en chaque point x de l'élément structurel durant le coulage, on utilise le modèle TEXO [TOR 96] qui couple l'équation de la chaleur et l'avancement chimique des réactions d'hydratation. Ce modèle nécessite les données suivantes : conductivité K et capacité thermique volumique du béton C ; température initiale du béton T_0 telle que $\forall x, T(x,0) = T_0$; température imposée sur une partie de la frontière $T_i(t)$; température de l'air $T_a(t)$ et coefficient d'échange par convection h_e pour la partie complémentaire de la frontière ; une courbe $T_a(t)$ de la température d'un échantillon de béton qui s'hydrate en conditions adiabatiques et qui permet de connaître l'exothermie des réactions ; l'énergie d'activation de ces réactions d'hydratation E_a .

Plusieurs modèles ont été proposés pour relier le potentiel de gonflement à l'histoire thermique au jeune âge [BAG 08, MAR 12, KCH 15]. Ils prennent tous en compte les observations issues de l'expérience, à savoir l'existence d'une température seuil T_s en-dessous de laquelle il n'y a pas de risque de RSI et l'influence à la fois de la température atteinte et de la durée pendant laquelle cette température élevée est appliquée. De façon générale, ils s'écrivent

$$\varepsilon(x) = \mathfrak{F}\{f(T(x,t) ; 0 \leq t \leq t_m \text{ et } T > T_s)\},$$

la forme de la fonction f dépendant selon les auteurs. Dans cette communication, nous restreignons notre étude au seul modèle proposé par [BAG 08].

2.2 Poutre PRAD préfabriquée

Le premier problème modélise une poutre à fils adhérents précontrainte par pré-tension et préfabriquée en usine, telle qu'on en utilise pour des tabliers à poutres sous chaussée dans une gamme de portées allant de 10 à 35 m (voir l'exemple Fig. 1a). Dans certains cas d'ouvrages atteints de RSI, on manque d'informations sur les conditions de préfabrication (température du béton frais, étuvage, exothermie du ciment...)

On s'intéresse en particulier ici aux rôles respectifs de l'exothermie du ciment et de l'étuvage qui permet d'accélérer la montée des caractéristiques mécaniques. On choisit donc une poutre à la section relativement importante, comme une poutre de rive dans laquelle une saillie sur la face supérieure joue le rôle de corniche

intégrée (voir Fig. 1b). On suppose que durant tout le coulage, la température est invariante par translation le long de l'axe de la poutre, ce qui permet de traiter un problème bidimensionnel.

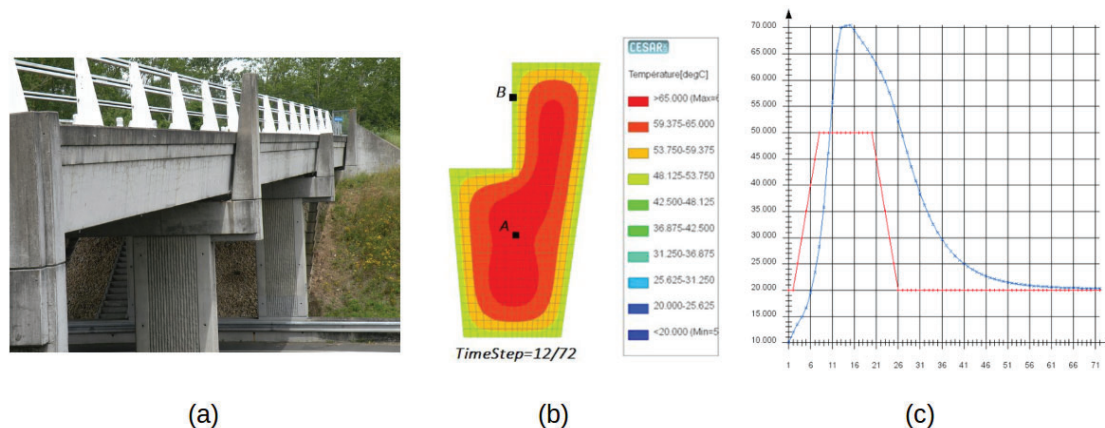


Figure 1. Exemple de pont à poutre PRAD (a) ; Section de la poutre PRAD étudiée et isothermes obtenues (b) ; Température imposée au bord et température à cœur (c).

2.3 Chevêtre de culée de PSDP

Le second problème (non détaillé ici par manque de place) cherche à déterminer la température et le potentiel de gonflement dans un chevêtre de culée de pont-dalle (PS autoroutier). Ici, l'élément est coulé en place en une seule phase, et l'échauffement résulte de la seule exothermie du ciment, refroidi par l'air environnant.

3. Analyse par plans d'expériences numériques

3.1. Principe

La méthode des plans d'expériences (voir par exemple [GOU 17]) a été développée pour étudier les effets de différents paramètres (les *facteurs* F_i) sur les résultats d'un processus (la *réponse* Y), et ce en minimisant le nombre d'expériences à réaliser. Le principal avantage de ce modèle est qu'il permet de quantifier très simplement la contribution de chacun des facteurs. Pour les plans d'expériences numériques, chaque *expérience* consiste en une simulation numérique du problème présenté *supra*. Le résultat de l'expérience est le potentiel de gonflement, fonction de l'histoire thermique. On cherche alors à l'écrire

$$Y = a_0 + \sum a_i \cdot X_i + \sum a_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum a_{ijk} \cdot X_i \cdot X_j \cdot X_k + \sum a_{ijkl} \cdot X_i \cdot X_j \cdot X_k \cdot X_l + \dots$$

où les X_i sont les facteurs normalisés calculés à partir de F_i qui peut varier entre les bornes $F_{i,\min}$ et $F_{i,\max}$:

$$X_i = [2F_i - (F_{i,\max} + F_{i,\min})] / (F_{i,\max} - F_{i,\min}) ; -1 \leq X_i \leq 1.$$

Pour déterminer les différents *effets* a , nous utilisons des plans d'expériences factoriels à deux niveaux. Si on dispose de k facteurs, il faut réaliser 2^k expériences (ici, des simulations numériques).

3.2. Application à la poutre PRAD

Dans le cadre de ce travail, nous avons considéré quatre facteurs. Soient F_1 : température initiale du béton frais T_0 (de 10 °C à 30 °C) ; F_2 : l'étuvage, *i.e.* une température imposée $T_i(t)$ sur le pourtour de la poutre pour laquelle deux courbes sont données, l'une avec un palier à 50 °C pendant 12 h, l'autre à 75 °C ; F_3 : énergie d'activation E_a variant entre 33,2 et 58 kJ/mol ; F_4 : courbe d'échauffement en conditions adiabatiques, l'une représentative d'un béton peu exothermique l'autre d'un béton très exothermique. Les paramètres thermiques du béton (C et K) ainsi que ceux qui permettent de transformer une histoire thermique au jeune âge en potentiel de gonflement sont supposés parfaitement déterminés (c'est une simplification, mais à ce stade de l'étude elle permet de mener les calculs des plans d'expériences sans recourir à des logiciels dédiés).

On présente sur la Fig. 1 (b) et (c) un exemple de résultats issu de l'une des $2^4 = 16$ simulations réalisées. Le traitement de l'ensemble des simulations conduit à calculer les effets. L'effet a_0 , soit la valeur moyenne du potentiel de gonflement, vaut 1,57 ‰ (homogène à une déformation). Les autres effets sont filtrés (on ne retient que ceux supérieurs à $2 \cdot 10^{-5}$), ce qui donne un potentiel de gonflement (exprimé en ‰)

$$Y = 1,57 + 0,04 \cdot X_1 + 1,02 \cdot X_2 + 0,44 \cdot X_4 + 0,04 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,03 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,07 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,03 \cdot X_3 \cdot X_4.$$

Ceci montre le poids prépondérant de l'étuvage X_2 sur les autres facteurs, comme attendu, mais l'exothermie du ciment X_4 joue aussi un grand rôle, ce qui était moins intuitif en préfabrication. Les autres facteurs et les interactions entre eux ont beaucoup moins de d'influence, en particulier la température initiale du béton frais.

4. Conclusion

Cette étude montre l'application de la méthode des plans d'expériences numériques à des modèles permettant de reconstituer l'histoire thermique au jeune âge et d'en déduire le potentiel de gonflement de la RSI qui peut en résulter. Pour une poutre PRAD préfabriquée, on met en évidence le rôle majeur du cycle d'étuvage, mais aussi la contribution non négligeable de l'exothermie du ciment, les autres facteurs étant de peu de conséquences. Dans le cas d'un chevêtre coulé en place (non détaillé ici), on a montré que trois facteurs intervenaient avec la même intensité : l'exothermie du ciment, la température initiale du béton frais (ce qui montre que l'utilisation de matériaux refroidis est une bonne technique de prévention de la RSI) et les coefficients d'échange entre le béton et l'air environnant (d'où l'importance de bien connaître la nature des coffrages) ; la température extérieure influence aussi le résultat final, mais pas de façon aussi forte. Au-delà de ces deux exemples, cette étude montre l'intérêt des plans d'expériences pour réaliser des études de sensibilité des modèles numériques d'ouvrages en béton atteints de RSI aux différents paramètres représentant les conditions de fabrication des éléments structurels. On peut ainsi choisir quelles sont les informations importantes à connaître pour recalculer un ouvrage touché par la RSI, et quelles sont celles pour lesquelles on peut se contenter d'une estimation grossière.

Volontairement limitée à quelques paramètres pour alléger les calculs, ce travail sera développé en intégrant davantage de paramètres et en ajoutant un modèle de couplage chimicomécanique, lui aussi comportant de nombreux paramètres souvent difficiles à estimer (effets des contraintes, du fluage, etc.). Cette étude de sensibilité est l'un des éléments clés pour l'identification de paramètres des modèles de calcul de structures atteintes de réactions de gonflement interne, objet de nos recherches actuelles et qui visent, *in fine*, à améliorer les méthodes de recalcul d'ouvrages appliquées à des ouvrages réels dégradés par les RGI.

5. Bibliographie

- [BAG 08] BAGDHADI N., SEIGNOL J.-F., MARTIN R.-P. *et al.*, « Effect of early-age thermal history on the expansion due to delayed ettringite formation: experimental study and model calibration », *AGS 2008, Second Euro-mediterranean symposium on advances in geomaterials and structures*, Hammamet, Tunisie, 2008.
- [GOU 17] GOUPY J., *Les plans d'expériences – optimisation du choix des essais et de l'interprétation des résultats*, Paris, Dunod, 2017.
- [IFS 17] *Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne*, Marnes-la-Vallée, IFSTTAR, 2017.
- [KCH 15] KCHAKECH B., Étude de l'influence de l'échauffement subi par un béton sur le risque d'expansion associé à la réaction sulfatique interne, Thèse de doctorat, Université de Paris-Est, 2015.
- [MAL 18] MALBOIS M., NEIJAR B., DIVET L. *et al.*, « A finite element implementation of Delayed Ettringite formation in Concrete Structures », *Computational Modelling of Concrete Structures Euro-C 2018*, Bad-Hofgastein, Autriche, 2018.
- [MAR 12] MARTIN R.-P., BAZIN C., BILLO J. *et al.*, « Experimental Evidence for understanding DEF sensitivity to early-age Thermal history », *Concrack 3 -- Rilem-JCI International Workshop on Crack Control of Mass Concrete and Related Issues concerning Early-Age of Concrete Structures*, Paris, mars 2012.
- [MOR 17] MORENON P., Modélisation des réactions de gonflement interne des bétons avec prise en compte des couplages pomécaniques et chimiques, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2017.
- [SEI 09] SEIGNOL J.-F., BAGDHADI N., TOUTLEMONDE F., « A macroscopic chemo-mechanical model aimed at re-assessment of delayed-ettringite-formation affected concrete structures », *First Int. Conf. on Computational Technologies in Concrete Structures*, Jeju, République de Corée, 2009. [TOR 96] TORRENTI J.-M., *Comportement mécanique du béton ; bilan de six années de recherche*, Paris, Laboratoire central des ponts et chaussées, 1996.