
Analyse probabiliste de la fissuration et du confinement des grands ouvrages en béton armé et précontraint – Application aux enceintes de confinement des réacteurs nucléaires (Cas de la maquette VeRCoRs)

David E.-M. BOUHJITI¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, F-38000 Grenoble, France

Grenoble INP Partnership Foundation, Industrial chair PERENITI (EDF-SEPTEN/DTG/CIH), France

CEng. Msc. 3rd year PhD candidate: david.bouhjiti@3sr-grenoble.fr / david.elmahdi.bouhjiti@gmail.com

RÉSUMÉ. Ce travail porte sur la modélisation probabiliste du comportement Thermo-Hydro-Mécanique (THM) des ouvrages en béton armé et précontraint. Un intérêt particulier est accordé aux problématiques de fissuration et de perméabilité à l'air sec dans les ouvrages de confinement (Exemple des enceintes de confinement des réacteurs nucléaires). L'approche proposée consiste à coupler les différentes étapes de calcul THM à des méthodes stochastiques non-intrusives (Surfaces de réponse adaptatives, chaos polynomiaux, etc.) moyennant un coût numérique raisonnable et optimisé. Les résultats d'une telle analyse par éléments finis, basée sur des Volumes Structuraux Représentatifs (VSR), permettent de (a) Mieux comprendre le vieillissement du béton dans les grands ouvrages en béton en pointant les paramètres les plus influents et leurs phénomènes physiques associés (analyse de sensibilité)(b) Améliorer la prévision numérique du comportement structurel futur tenant compte des aléas et incertitudes associés au matériau et aux chargements THM appliqués (analyse probabiliste) (c) Faciliter l'anticipation des travaux de maintenance et de réparation si nécessaires (analyse fiabiliste).

ABSTRACT. This contribution aims at the probabilistic modelling of the Thermo-Hydro-Mechanical (THM) behaviour of concrete in large reinforced and prestressed structures. The work particularly focuses on cracking and air tightness issues of containment buildings; nuclear containment walls for instance. The suggested strategy consists of performing the various THM calculation steps within a stochastic framework (using adaptive surface response methods and Polynomial Chaos Expansions for example) at low and optimized computational cost. For that, calculations are performed at the scale of Representative Structural Volumes and a global stochastic strategy is proposed allowing (a) a better understanding of the phenomena behind the ageing of concrete in large structures (sensitivity analysis) (b) the improvement of predictive analyses by incorporating material-related and load-related uncertainties (probabilistic analysis) (c) a predictive scheduling of maintenance and repair operations based on the risk of exceeding regulatory thresholds (reliability analysis).

MOTS-CLÉS : Grandes structures, THM, fissuration, perméabilité, prévision probabiliste, enceintes nucléaires.

KEY WORDS: Large RC structures, THM, cracking, leakage, probabilistic analysis, Nuclear Containment Buildings.

1. Introduction: Effets des aléas et incertitudes sur la durabilité des ouvrages GC

De par sa composition hétérogène et sa nature multiphasée, le béton est un matériau dont les propriétés sont fortement variables dans le temps (phénomènes de vieillissement [BOU 18a]: maturité, séchage, fluage, retraits, etc.) et dans l'espace (variabilité spatiale des propriétés mécaniques [BOU 18b], des propriétés de transfert, etc.). Cela induit naturellement des aléas dans le comportement du béton (vu comme matériau homogène équivalent) et dans la réponse des structures en béton aux différents chargements Thermo-Hydro-Mécaniques (THM) appliqués. En particulier, pour les grands ouvrages en béton armé et précontraint (Echelle ~10 m), telles que les enceintes de confinement des réacteurs nucléaires (Figure 1a), ces variabilités affectent fortement l'évolution de leur comportement dans le temps, ce qui conditionne leur performance et leur durée de vie (Figure 1).

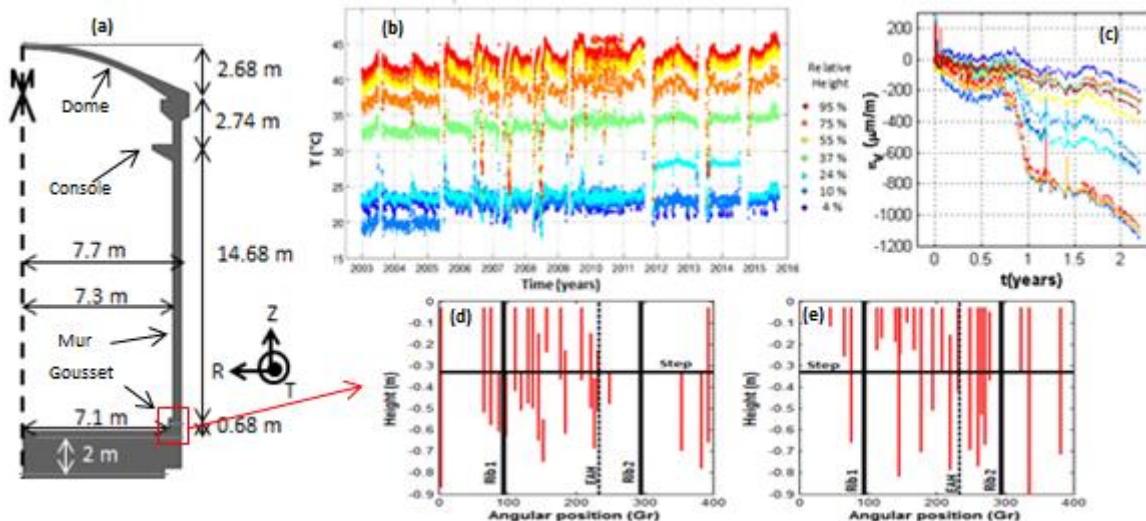


Figure 1. (a) Vue 2D de l'enceinte de confinement VeRCoRs (échelle 1:3) – (b) Variabilité de la température interne en phase opérationnelle – (c) Variabilité observée sur site des déformations verticales – (d&e) Distribution des fissures de jeune âge 12 jours après déversement du gousset (d : intrados – e : extrados)

Ayant un effet non-négligeable sur la réponse structurelle, la prise en compte de ces aléas dans les processus de simulation est, donc, indispensable afin de (a) tenir comptes des incertitudes liées à l'identification des propriétés à l'échelle des éprouvettes, à leur représentativité à l'échelle structurelle (propagation d'incertitudes inter-échelle et effets d'échelle), aux hypothèses simplificatrices des modèles, etc. (b) permettre une meilleure évaluation des comportements globaux (thermo-hydratation, fluage, séchage) et locaux (fissuration et perméabilité) des structures tenant compte de la propagation d'incertitudes depuis la phase de jeune âge jusqu'à la fin de vie (c) réduire le niveau d'erreur épistémique des résultats numériques et améliorer leur fiabilité et leur aptitude à prévoir le comportement futur des structures.

Outre l'amélioration de la compréhension des phénomènes physico-chimiques à l'origine du vieillissement du béton, l'atteinte de ces objectifs reste conditionnée par la représentativité physique des modèles utilisés et par la performance des moyens de calculs actuellement disponibles. Or, si d'importantes avancées ont été réalisées en termes de développement de modèles THM adaptés à l'échelle de grandes structures (~10 m), peu de travaux se sont consacrés au couplage de ces modèles à des approches probabilistes afin de décrire au mieux la variabilité de la réponse du béton à telle échelle. Le sujet est davantage prégnant pour des calculs fortement non-linéaires et couplés (endommagement, fluage, séchage, perméabilité à l'air, etc.), et pour un nombre important de paramètres THM à définir en entrée (~+50 paramètres [BOU 18b]). En effet, dans telles situations, des stratégies alternatives à celles de Monte Carlo sont nécessaires pour des questions de pratique et de faisabilité.

Dans cette contribution, il est, donc, sujet de proposer une stratégie globale stochastique adaptée à la complexité du problème THM traité et à son coût numérique pour des grandes structures. Entre autres, les verrous scientifiques levés sont les suivants :

- Identification des paramètres les plus influents vis-à-vis de la fissuration et de la perméabilité des structures : Même si tous les paramètres en entrée ont une certaine variabilité spatio-temporelle, seuls quelques-uns ont un effet important sur la réponse de la structure. Afin de les identifier, des analyses de sensibilité globales au 1^{er} ordre (type Min-Max par exemple) sont menées [BOU 18c]. Cela va dans le

sens de réduire le nombre de paramètres variables dans le modèle afin de faciliter les analyses de sensibilité à des ordres supérieures [SOB 01] et la propagation d'incertitudes [BOU 18d][BOU 18e]. Aussi, cela permet-il de définir les propriétés dont l'identification nécessiterait une série de mesures suffisamment large pour accomplir une description statistique correcte.

- Modélisation probabiliste du comportement THM du béton : La simulation prévisionnelle du vieillissement du béton dans les enceintes est basée sur un couplage faible THM-F (-F pour fuite) [BOU 18a][BOU 18b][BOU 18g] couvrant les phases pré-opérationnelle et opérationnelle de la structure (Figure 2). Afin de réduire le coût numérique, les calculs sont menés à l'échelle de Volumes Structuraux Représentatifs (Figure 3). Ces derniers restent mieux adaptés pour établir des couplages probabilistes sans altérer la représentativité physique des modèles utilisés (surtout pour les calculs d'endommagement nécessitant un maillage relativement fin). Dans ce travail, les méthodes probabilistes dites non-intrusives sont retenues car elles ne nécessitent aucune modification du code utilisé¹ et sont applicables à toutes les étapes de calcul THM-F. Parmi ces méthodes, nous énumérons celles basées sur les champs aléatoires spatialement corrélés (permettant de décrire la variabilité spatiale d'un paramètre donné) et celles basées sur des méta-modèles (type Surfaces de Réponse et Chaos Polynomiaux entre autres). En fonction, des propriétés de chaque grandeur d'intérêt (discrète/continue, locale/globale, etc.), des méthodes adaptées sont développées afin de simuler la propagation d'incertitude dans le temps et d'une étape de calcul THM-F à une autre moyennant un coût de calcul optimisé.

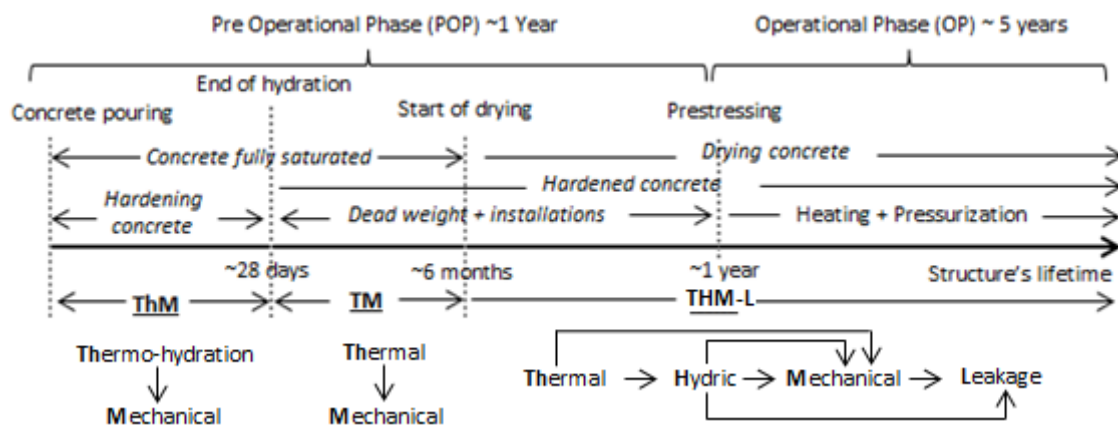


Figure 2. Principe de couplage faible (chaînage) des calculs THM-F appliqué aux VSRs VeRCoRs

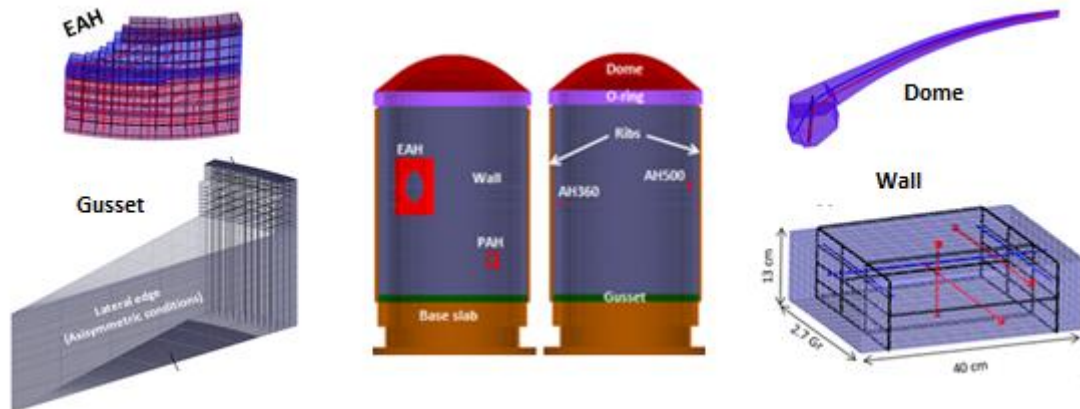


Figure 3. Exemples de VSRs de l'enceinte de confinement VeRCoRs

Dans le cas des enceintes de confinement, l'objectif final est d'aboutir à des courbes de fonctions de répartition (variables dans le temps) de la fuite globale à l'air pendant les essais décennaux de pressurisation. Ces courbes serviront à l'évaluation du risque de dépassement des critères réglementaires de fuite et à la planification préventive des travaux de maintenance et de réparation si nécessaires.

¹ Dans ce travail, le solveur utilisé est Code_Aster® et le logiciel d'implémentation de loi de comportement est Mfront®

2. Contributions à la modélisation probabiliste du comportement THM-F du béton

La première étape consiste à valider l'aptitude des modèles THM-F retenus [BOU 18a][BOU 18b][BOU 18f] à reproduire le comportement du béton sous chargements THM simultanés (configuration déterministe). Ensuite, en deuxième étape, il est question de définir les domaines de variabilité physique des différents paramètres et d'en identifier les plus influents *via* des analyses de sensibilité au 1^{er} ordre (analyses de variance [SOB 01] par exemple). Une fois ces paramètres identifiés, un méta modèle est construit (troisième étape) en se basant sur les méthodes de Surfaces de Réponse. En particulier : (a) un algorithme générique adaptatif est proposé afin de décrire les différents modes de fissuration (réponse discrète) en fonction de la variabilité des propriétés THM du béton et des chargements appliqués [BOU 18d] (b) Pour les réponses de nature continue (température, hydratation, taux de saturation, déformations, débit de fuite, etc.), les chaos polynomiaux [XIU 02] sont utilisés pour définir une surface de réponse adaptée et permettre des analyses de sensibilité plus avancées [SUD 02]. Disposant, d'un méta-modèle explicite, la dernière étape consiste à appliquer la méthode de Monte Carlo, à faible coût numérique, afin de définir les fonctions de répartition et les moments statistiques d'intérêt.

2.1. Validation des modèles THM-F à l'échelle de la structure

Comme illustré dans la Figure 2, les calculs THM-F consistent d'abord à résoudre le problème thermique décrit par l'équation de la chaleur [1]. Pour la phase du jeune âge, un terme source Q (non-linéaire) est considéré afin de reproduire le dégagement de chaleur accompagnant la phase d'hydratation [ULM 98]. Pendant l'hydratation, la porosité du béton est supposée saturée et, du fait des dispositions de cure, aucun échange hydrique avec l'environnement ambiant n'est considéré. En fin d'hydratation, le terme source s'annule et la variation de température dans le béton est pilotée par la température ambiante. Ensuite, des calculs hydriques sont menés [2]. Le problème est exprimé en teneur en eau C_w et le coefficient de diffusivité hydrique (grandeur thermo-activée) est défini de manière phénoménologique [BEN 02]. Les conditions aux bords hydriques quant à eux sont définies en fonction de l'humidité relative. Cette dernière est reliée à la teneur en eau *via* des courbes de sorption-désorption. Pour le problème mécanique, le principe de superposition est appliqué afin de décrire les différentes déformations associées à l'évolution des champs thermique et hydrique dans le temps et aux chargements appliqués [3]. La déformation totale est, donc, la somme des déformations élastiques ϵ_{ELAS} , retraits endogènes $\epsilon_{ES} = \alpha_{ES} < \alpha - \alpha_0 >_+ I_d$, retraits de dessiccation $\epsilon_{DS} = \alpha_{DS} (C_w - C_{w,0}) I_d$ et des déformations de fluage ϵ_{CR} (propre et de dessiccation [BEN 02]) [BOU 18a][BOU 18b]. Pendant la phase de jeune âge, l'évolution des propriétés mécaniques du béton en fonction du taux d'hydratation sont modélisées selon le principe de maturité.

$$d\beta(T)/dt - \nabla \cdot (\lambda_c \nabla T) = Q(\alpha) \exp(-E_a^{th}/(RT(t))) \quad [1]$$

$\beta(T)$ l'enthalpie du béton (J/m³/s), λ_c la conductivité thermique (J/s/m/°K), $Q(\alpha)$ la quantité de chaleur d'hydratation (J/m³/s) fonction du taux d'hydratation normalisé α , E_a^{th} l'énergie d'activation du processus d'hydratation (J/mol).

$$dC_w/dt = \nabla \cdot (A_w \exp(B_w C_w - E_a^w/R(1/T - 1/T_{ref}^w)) T/T_{ref}^w \nabla C_w) \quad [2]$$

A_w est un paramètre de diffusivité (m²/s), B_w un paramètre numérique à ajuster selon les résultats d'essais de perte de masse, T_{ref}^w est la température d'essais (°K), E_a^w est l'énergie d'activation du processus de diffusion.

$$\epsilon_{TOT} = \epsilon_{ELAS} + \epsilon_{TH} + \epsilon_{ES} + \epsilon_{DS} + \epsilon_{CR} \quad [3]$$

$$\epsilon_{TH} = \alpha_{th}(T - T_0) I_d \quad \epsilon_{ES} = \alpha_{ES} < \alpha - \alpha_0 >_+ I_d \quad \epsilon_{DS} = \alpha_{DS} (C_w - C_{w,0}) I_d$$

α_{th} (/°K), α_{ES} et α_{DS} sont les coefficients de déformation thermique, de retrait endogène et de retrait de dessiccation respectivement. I_d le tenseur identité et $< X >_+ = \max(X, 0)$.

La loi de comportement définissant l'adoucissement post-pic est basée sur la théorie de l'endommagement [4]: la formulation du problème est locale – ce qui requiert une régularisation énergétique –, le critère d'endommagement est celui proposé dans [MAZ 15] et la loi adoucissante correspond au modèle de [FIC 99]. La contribution du fluage à l'endommagement est également prise en compte *via* un couplage faible fluage-endommagement [BOU 18b]. Afin d'accéder aux ouvertures de fissures, un post-traitement des champs de déformation et d'endommagement est implémenté selon la stratégie suggérée dans [SCI 17].

$$\sigma = (1 - d) C_0 \epsilon_{ELAS} \quad [4]$$

Un sujet majeure quand on s'intéresse à la fissuration des grandes structures en béton est celui des effets d'échelle statistique et matériau. Dans ce travail, des champs aléatoires spatialement corrélés sont affectés au module de Young et sont couplés à la loi d'échelle, descriptive de la résistance à la traction, proposée dans [SEL

12]. Cela permet (a) d'avoir une réponse locale aléatoire dans le volume et pour les phases pré- et post-pic et (b) de faciliter la localisation des fissures en présence de contraintes homogènes de traction [BOU 18a].

Finalement, le problème de fuite est résolu [5]. A cette dernière étape de calcul THM-F, il s'agit de définir la perméabilité du béton en fonction de la teneur en eau (Flux de Darcy) et des ouvertures de fissures (flux de Poiseuille). Des lois dites de raccordement sont utilisées afin d'assurer une description continue de la perméabilité du béton sain au béton macro fissuré [BOU 18g][BOU 18f].

$$\mu \frac{dP}{dt} - \text{div}(k_{eq} P \text{ grad } P) = 0 \quad [5]$$

P la pression de l'air dans le béton (Pa), k_{eq} la perméabilité équivalente (m^2) tenant compte du flux de Darcy et de Poiseuille par EF, μ la viscosité dynamique de l'air.

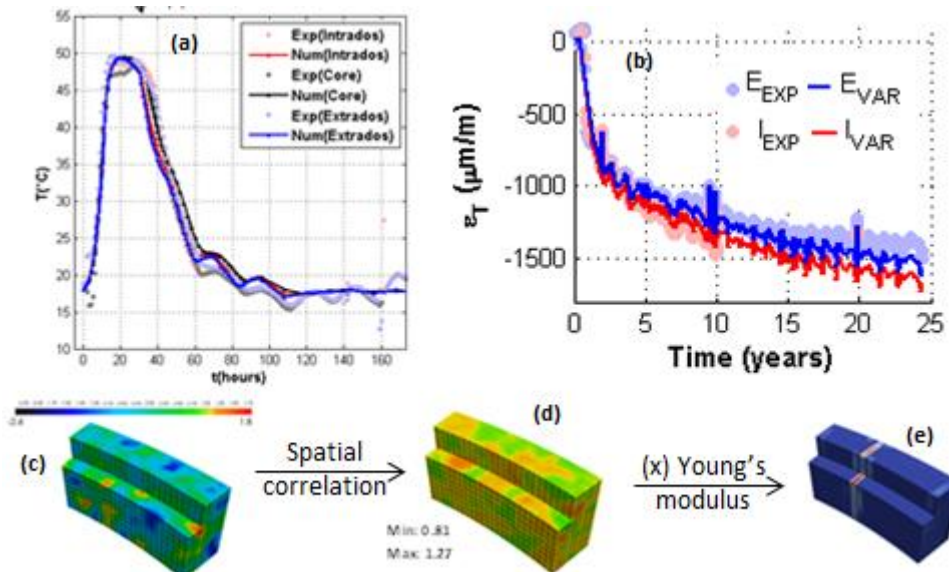


Figure 4. Exemples de résultats THM-F à l'échelle de VSRs (a) Evolution de la température en phase d'hydratation dans le gousset (b) Evolution de la déformation tangentielle dans la zone courante du mur (c) Réalisation du champ aléatoire normal non corrélé (d) Champs Lognormal spatialement corrélé associé à la variabilité spatiale du module de Young (e) Profil de fissuration résultant au jeune âge

Appliqué au VSRs de la Figure 3, le modèle décrit brièvement ci-dessus permet de reproduire le comportement global (au sens moyen) observé sur site en termes de température, d'humidité relative et de déformations pour une configuration donnée de chargement (Figure 4). Le modèle est aussi capable de fournir des profils de fissuration (spatialement aléatoires) et de tenir compte de ces singularités lors de l'évaluation des débits de fuite. Il peut donc être utilisé comme support à la propagation d'incertitudes THM-F afin de reproduire la variabilité du comportement observé sur site (Figure 1) induite par les aléas du matériau et des chargements.

2.2. Propagation d'incertitudes THM-F à l'échelle structurelle

2.2.1. Analyse de sensibilité et paramètres influents

Dans le modèle THM-F retenu, le nombre de paramètres à identifier est supérieur à 60 (y compris les paramètres de fuite) et le temps de calcul d'une seule simulation à l'échelle de VSR couvrant toute la durée de vie de la maquette varie entre 4 heures (en absence d'endommagement) et 2 jours (en présence d'endommagement). Il est donc quasiment impossible d'appliquer directement les méthodes de Monte Carlo pour des analyses de fiabilité et est toujours difficile d'identifier une Surface de Réponse physiquement représentative pour chaque grandeur d'intérêt de la chaîne THM-F. Une première étape d'analyse de sensibilité s'impose, alors, afin d'identifier les paramètres et hypothèses de modélisation les plus influents. Tenant compte du chaînage THM-F, l'analyse de sensibilité couvre d'abord une étape de calcul à la fois et ne considère, pour les étapes à venir, que les paramètres les plus influents des étapes précédentes (Figure 5). Cela permet de réduire largement le nombre d'appels au modèle sans pour autant affecter la hiérarchisation des entrées selon leur influence sur la réponse du modèle.

Dans le cas VeRCoRs, suite à une analyse de variance basée sur une approche Min-Max (représentant le moindre coût numérique), les résultats suivants, entre autres, sont obtenus [BOU 18c]:

- Pendant la phase d'hydratation, le comportement thermique du béton et sa cinétique d'hydratation sont principalement affectés par la variabilité de la chaleur d'hydratation et de la capacité thermique (représentant plus de 90 % de la variance observée). Par analyse inverse des mesures de températures sur site, leurs coefficients de variation avoisineraient les 10 %.
- La variabilité spatiale des propriétés mécaniques (modélisée par des champs aléatoires) et leur corrélation n'explique que partiellement la variabilité de la fissuration au jeune âge (Figure 1d). En effet, pour une moyenne et un coefficient de variation constants, différentes réalisations de champs permettent d'identifier deux modes seulement (sur quatre) de ceux observés sur site. Toutefois, il est possible de retrouver numériquement tous les modes en variant la moyenne des différentes propriétés mécaniques d'un VSR à un autre (en particulier : la résistance à la traction, le module de Young, les coefficients de retrait endogènes et thermiques, les propriétés viscoélastiques). Ce résultat est intéressant car il permet de limiter le rôle du champ aléatoire à un facilitateur de l'initiation des fissures et à la localisation aléatoire de ces dernières. L'identification du nombre de fissures nécessiterait, quant à elle, la définition d'un plan d'expérience numérique constitué par les paramètres jugés les plus influents et représentatif de leur fonctions de répartition (méthode de la quadrature de Gauss par exemple).
- Après mise en tension des câbles de précontrainte, et même dans les zones où la précontrainte effective serait faible, les contraintes en traction rencontrées usuellement en phase opérationnelle ne suffisent pas pour créer de nouvelles fissures. Il est donc raisonnable de considérer que le régime de fissuration au jeune âge est bien le régime établi de fissuration de la structure (cas du gousset).
- Les ouvertures de fissures en phase opérationnelle sont principalement pilotées par la précontrainte initiale appliquée, les pertes de précontrainte dues au séchage et l'effort de traction appliqué (ils seraient responsables de plus de 99 % de la variance observée).

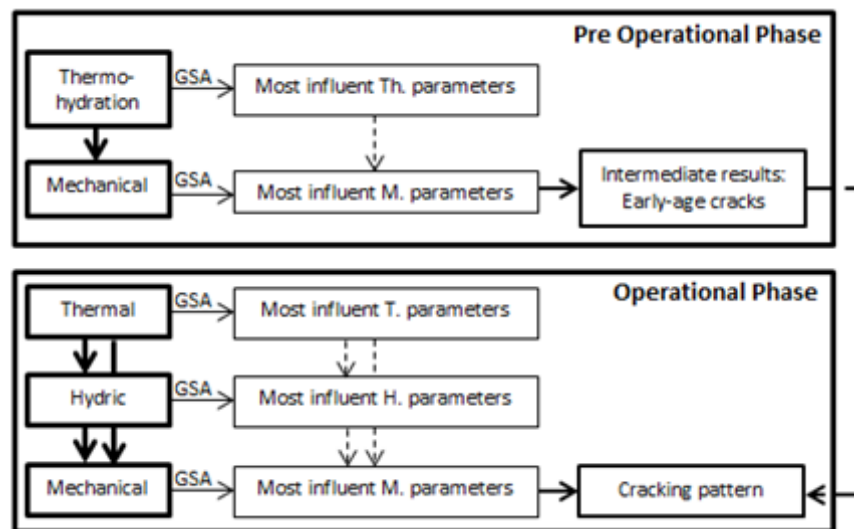


Figure 5. Stratégie globale d'analyse de sensibilité et de propagation d'incertitudes

2.2.2. Propagation d'incertitudes à l'échelle structurelle du jeune âge à la fin de vie

Vis-à-vis de la fuite, la priorité des calculs au jeune âge est de quantifier le risque de fissuration (principalement le nombre de fissures). Pour ce faire, les méthodes de Surfaces de Réponses adaptatives sont utilisées. L'algorithme mis au point [BOU 18d] consiste à définir d'abord un plan d'expérience numérique (de dimensions égales au nombre de paramètres influents retenus). Chaque dimension est discrétisée à une précision donnée définie par l'utilisateur (pouvant être liée à la précision des mesures ou à l'écart type par exemple). Le nombre de point appartenant au plan d'expérience est le nombre maximal d'appel au modèle ThM (cas d'une approche non-adaptative). Afin d'éviter l'identification du même mode de fissuration sur un domaine donné du plan d'expérience, l'appel au modèle ThM ne se fait que si le point de calcul est entouré de modes de fissuration différents. En effet, si un mode est identifié sur un contour donné, le même mode de fissuration devrait être

retrouvé pour tout point à l'intérieur de ce contour. L'algorithme s'arrête quand la précision du plan d'expérience est atteinte ou quand la performance (définie comme le ratio du nombre de modes de fissuration sur le nombre d'appels au modèle) devient inférieure à une valeur seuil définie par l'utilisateur. Appliqué au gousset VeRCoRs, l'algorithme permet d'identifier tous les modes de fissuration observés sur site (Figure 6a) en considérant les coefficients de retraits thermique et endogène – dist. Log –, la résistance à la traction et le module de Young – dist. Log – comme paramètres influents (coût réduit de plus de 50 % ~15 jours). En appliquant Monte Carlo à cette surface de réponse de quatre dimensions, et de manière prédictive, les fréquences de chaque mode de fissuration sont estimées convenablement par rapport aux observations sur site (Figure 6a).

Les profils de fissuration étant définis au jeune âge, les calculs sont poursuivis pour couvrir la phase opérationnelle. Les surfaces de réponse des différentes grandeurs d'intérêt (taux de saturation, déformations, ouvertures de fissures, taux de fuite) sont décrites au moyen de chaos polynomiaux d'ordre 3 [XIU 02]. Dans le cas de la fuite (dernière étape de calcul), 13 paramètres sont retenus (coef. de retrait thermique – dist. Log –, coef. de retrait endogène – dist. Log –, module de Young – dist. Log –, résistance à la traction – dist. Log –, teneur en eau initiale – dist. Log –, paramètre de diffusivité – dist. Uni –, précontrainte initiale – dist. Log –, efforts de pressurisation – dist. Uni –, coef. de retrait de dessiccation – dist. Log –, perméabilité intrinsèque – dist. Log –, coef. de Klinkenberg – dist. Uni –, 2 paramètres modélisant les effets de rugosité et de tortuosité sur le débit à travers les fissures – dist. Uni –). Les coefficients de la fonction polynomiale sont identifiés par la méthode de quadrature de Gauss à 4 points d'intégration [SUD 02] – ce qui résulte en $\sim 4.10^6$ appel au modèle THM –. Sachant que, pour la phase de jeune âge, une surface de réponse explicite est disponible, le nombre de simulations par EF est de $\sim 2.10^4$ seulement. Toutefois, cela n'est valable que pour les VSRs représentant un risque de fissuration au jeune âge (cas du gousset VeRCoRs où le mode de Poiseuille est activé). En effet, pour les autres VSRs où le risque de fissuration est considérablement inférieur, seuls 4 paramètres (teneur en eau initiale, paramètre de diffusivité, perméabilité intrinsèque, coef. de Klinkenberg) suffisent pour identifier la surface de réponse du flux (principalement de Darcy). Finalement, grâce à des hypothèses simplificatrices supplémentaires d'axisymétrie et de découplage entre phases [BOU 18d][BOU 18e] et à la parallélisations des calculs (30 nœuds), la surface de réponse de la fuite est accessible à un coût de ~ 1 mois. Cette dernière peut servir de support pour appliquer Monte Carlo est accéder aux fonctions de répartition de la fuite (Figure 6b).

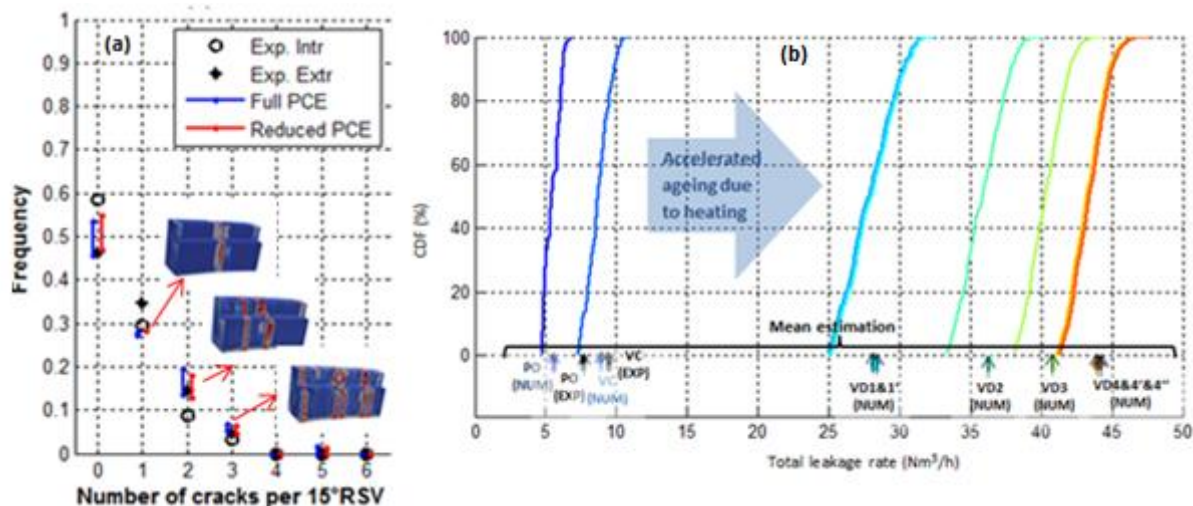


Figure 6. Analyse probabiliste de (a) la fissuration du gousset au jeune âge (b) la fuite globale VeRCoRS

3. Conclusions et perspectives

Ce travail répond au besoin de réaliser des calculs THM-F dans un cadre probabiliste à l'échelle de grandes structures en béton armé et précontraint. La stratégie proposée permet d'analyser les effets de propagation d'incertitudes, dans le temps (du jeune âge au long terme) et d'une étape de calcul THM-F à une autre, sur la réponse de la structure à un coût raisonnable tout en préservant la représentativité physique du modèle chaîné. Ayant démontré la faisabilité de ce genre d'analyse et défini les hypothèses permettant sa réalisation, les travaux futurs devraient consister en (a) l'amélioration des mesures des paramètres fortement incertains et influents (b) l'optimisation des méthodes de définition de Surfaces de réponse (chaos polynomiaux adaptatifs par exemple) (c) l'actualisation des données par analyse inverse afin de reproduire la variabilité observée sur site (particulièrement pour les structures existantes et dont l'information à l'échelle de l'éprouvette est très restreinte).

4. Bibliographie

- [BEN 02] BENBOUDJEMA F., Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations bi axiales. Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires, Thèse de doctorat, UMLV, 2002.
- [BOU 18a] BOUHJITI D. E.-M., BOUCHER M., BRIFFAUT M., DUFOUR F., BAROTH J., MASSON B., « Accounting for realistic Thermo-Hydro-Mechanical boundary conditions whilst modeling the ageing of concrete in nuclear containment buildings: Model validation and sensitivity analysis », *Eng. Struct.*, vol. 166, 2018, p. 314-338.
- [BOU 18b] BOUHJITI D. E.-M., BAROTH J., BRIFFAUT M., DUFOUR F., MASSON B., « Statistical modelling of cracking in large concrete structures under Thermo-Hydro-Mechanical loads: Application to Nuclear Containment Buildings. Part 1: Random field effects (reference analysis) », *Nucl. Eng. and Des.*, vol. 333, 2018, p. 196–223.
- [BOU 18c] BOUHJITI D. E.-M., BLASONE M. C., BAROTH J., DUFOUR F., MICHEL-PONNELLE S., MASSON B., « Statistical modelling of cracking in large concrete structures under Thermo-Hydro-Mechanical loads: Application to Nuclear Containment Buildings. Part 2: Sensitivity analysis », *Nucl. Eng. and Des.*, (accepted for publication).
- [BOU 18d] BOUHJITI D. E.-M., BAROTH J., DUFOUR F., BRIFFAUT M., MASSON B., « Quantification of cracking risk in large concrete structures using non-intrusive Stochastic Finite Elements Analyses – Application to Nuclear Containment buildings at early age », *Solids and Structures*, (under 1st review)
- [BOU 18e] BOUHJITI D. E.-M., BAROTH J., DUFOUR F., BRIFFAUT M., MASSON B., MICHEL-PONNELLE S., « Probabilistic prediction of long term ageing and air tightness in large concrete structures using non-intrusive Stochastic Finite Elements Analysis – Application to Nuclear Containment buildings », *Structural Safety*, (under preparation)
- [BOU 18f] BOUHJITI D. E.-M., EL DANDACHY E. M., DUFOUR F., DAL PONT S., BRIFFAUT M., BAROTH J., MASSON B., « New continuous strain-based description of concrete's damage-permeability coupling », *Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, (under 2nd review)
- [BOU 18g] BOUHJITI D. E.-M., BAROTH J., DUFOUR F., MASSON B., « Prediction of air permeability in large RC structures using FE THM modelling strategy », *Proc. of EURO-C conference*, Bad Hofgastein, 26 Feb-01 Mar 2018, Austria, Editors: G. Meschke, B. Pichler & J. G. Rots , p. 237-248
- [FIC 99] FICHANT S., LA BORDERIE C., PIAUDIER-CABOT G., « Isotropic anisotropic description of damage in concrete structures. Mechanics of cohesive-frictional materials », *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, vol. 4, 1999, p. 399-359
- [MAZ 15] MAZARS J., HAMON F., GRANGE S., « A new 3D damage model for concrete under monotonic, cyclic and dynamic loadings », *Mater. And Struct.*, vol. 48, 2015, p. 3779-3793
- [SCI 17] SCIUME G., BENBOUDJEMA F., « A viscoelastic unitary crack opening strain tensor for crack width assessment in fractured concrete structures », *Mech Time-Depend Mater*, vol. 21, 2017, p. 223-243
- [SEL 12] SELLIER A., MILLARD A., « Weakest link and localization WL²: a method to conciliate probabilistic and energetic scale effects in numerical models », *Eur. Jour. of Envir. & Civ. Eng.*, vol. 10, 2014, p.1177-1191
- [SOB 01] SOBOLOV I. M., « Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates », *Mathematica and computers in simulation*, vol 55, 2001, p. 271-280.
- [SUD 02] SUDRET B., « Global Sensitivity analysis using polynomial chaos expansions », *Reliab. Eng. Safety*, vol. 93, 2002, p. 619–644.
- [ULM 98] ULM F.-J., COUSSY O., « Couplings in early-age concrete: From material modeling to structural design », *Sol. And Struct.*, vol. 31, 1998, p. 4295-4311
- [XIU 02] XIU D., KARNIAKIS G., « The Wiener-Askey polynomial chaos for stochastic differential equations », *SIAM J. Sci. Comput*, vol. 24, 2002, p. 619–644.