

Calcul de la fragilité fonctionnelle des enceintes de confinement des réacteurs nucléaires par couplage thermo-mécano-probabiliste

David BOUHJITI¹, Julien CLEMENT¹, Guillaume KIOSEYIAN², Nadia RAHNI²

¹IRSN/PSN-EXP/SES/LMAPS, B.P. 17 - 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex, France david.bouhjiti@irsn.fr

²IRSN/PSN-EXP/SCEPS/BEPAM, B.P. 17 - 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex, France

RESUME Dans le cadre des études probabilistes de sûreté (EPS) de niveau 2, l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) analyse le comportement structural et fonctionnel des enceintes de confinement des réacteurs nucléaires (troisième et dernière barrière du dispositif de défense en profondeur des réacteurs à eau sous pression) dans des conditions d'accident grave. Plusieurs scénarii sont envisagés faisant suite à une séquence impliquant la perte totale des sources en alimentation électrique externe et conduisant à une forte montée en température et en pression à l'intérieur de l'enceinte. Dans de telles conditions, l'objectif des études EPS2 est de quantifier les risques liés aux exigences de sûreté fondamentale attribuée aux enceintes de confinement et de hiérarchiser les modes de défaillance. Dans ce papier, nous nous intéressons particulièrement aux calculs de fragilité (probabilité conditionnelle de défaillance à des chargements thermomécanique d'accident grave donné) alimentant les EPS2 précédentes. Ainsi, ce papier présente une démarche générale de propagation d'incertitudes lors de la prévision du comportement thermomécanique des enceintes de confinement à double parois *via* une modélisation non linéaire du comportement du béton armé et précontraint ; avant de détailler ensuite la démarche de calcul des probabilités conditionnelles par un recours à des techniques de méta modélisation.

Mots-clefs Fragilité fonctionnelle, couplage thermo-mécano-probabiliste, enceinte de confinement nucléaire

I. INTRODUCTION

Les ouvrages de génie civil de grande envergure, notamment ceux dans l'industrie nucléaire, subissent des sollicitations simultanées et différentes de nature chimique, thermique, hydrique et mécanique. Cela influence l'évolution de leurs performances dans le temps ; ce que nous appelons communément le « vieillissement » dans des conditions normales de service (Bouhjiti, 2018). S'agissant de structures stratégiques, il est important d'intégrer ces effets de vieillissement lors de l'évaluation de leurs marges de tenue à des conditions accidentelles avec une probabilité d'occurrence donnée.

Dans ce travail, nous nous intéressons particulièrement à la quantification probabiliste des performances fonctionnelles de telles structures. En ce sens, notre objectif est d'établir une

stratégie permettant une estimation objective des courbes de fragilité de performance à une condition donnée (de service ou accidentelle) tenant compte des incertitudes spatiales et temporelles inhérentes aux propriétés matérielles et structurales.

Il est à noter que la stratégie envisagée est purement numérique et prédictive en aveugle dans le sens où la durée d'exploitation simulée (au-delà de l'âge actuel de l'ouvrage) ainsi que les conditions accidentelles (n'ayant heureusement pas eu lieu jusqu'à date) ne peuvent point être comparées à des mesures in situ. Le but est de fournir une méthodologie permettant d'anticiper et de prévoir le comportement de la structure si de telles conditions sont remplies dans le futur compte tenu de nos meilleures connaissances à l'heure actuelle.

II. Démarche générale de calcul de fragilité

Par soucis de concision, nous considérons ici que les lois de comportement utilisées et le modèle structural (modèle aux éléments finis) associé sont vérifiés et validés pour assurer une représentativité physique objective aux conditions de service ou d'accident simulées (démarche V&V dans (Heitz, 2022)). Par la suite, ces éléments ne sont pas détaillés pour mettre en exergue davantage la méthode de calcul de fragilité que le modèle physique retenu. Nous supposons également que l'utilisateur dispose d'une bonne quantification de ces incertitudes permettant de les décrire selon des lois de distribution données. En fonction de ces éléments, le calcul de fragilité se fait selon le diagramme suivant :

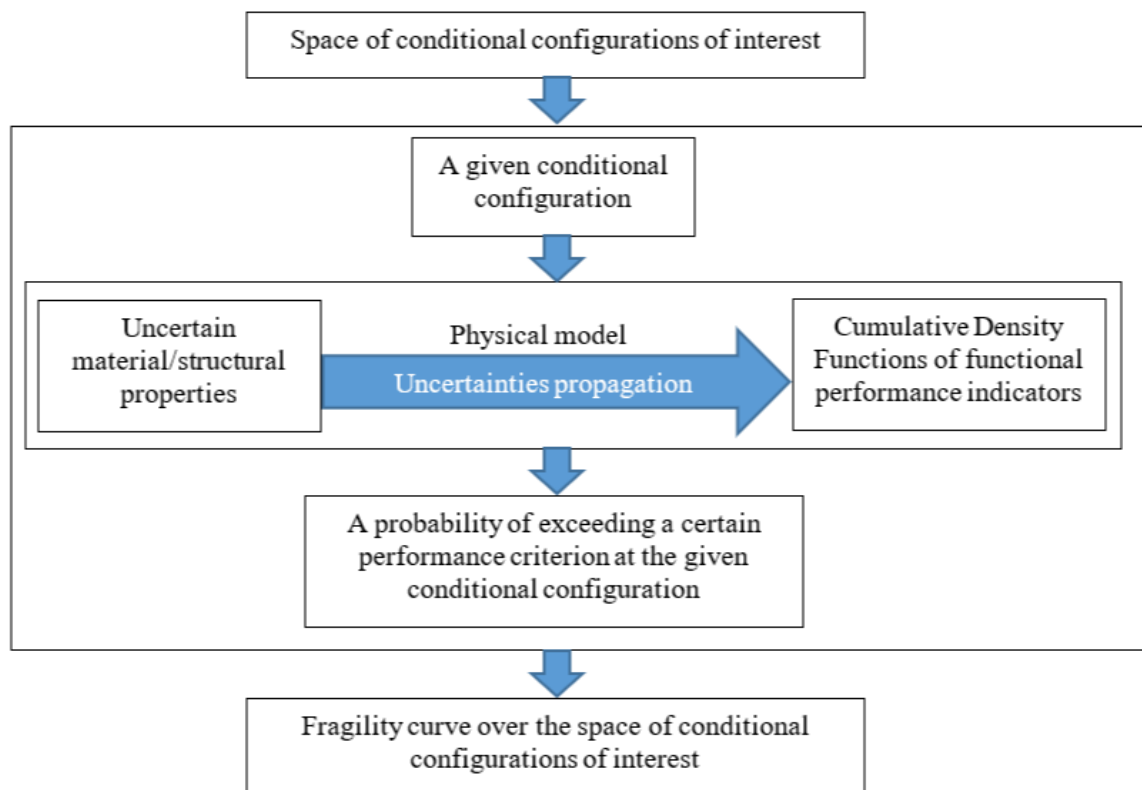


FIGURE 1. Démarche générale du calcul des courbes de fragilité

Bien souvent, le nombre des paramètres d'entrée des modèles non linéaires ainsi que les temps de calcul sont relativement importants. L'utilisation des méthodes de type Monte Carlo ou Quasi Monte Carlo est donc peu adapté aux applications industrielles. Parmi les solutions possibles, la construction des modèles de substitution ou méta modèles (chaos polynomial entre autres (Bouhjiti, 2018) et (Baroth et al., 2007)) est l'une des plus répandues avec un objectif de décrire l'espace des paramètres incertains tout en limitant le nombre de calculs non linéaires à réaliser. La difficulté dans ce cas réside dans le choix des plans d'expérience numérique et dans la sélection des fonctions mathématiques d'ajustement.

Notons que dans le cas présent, la méta modélisation s'applique à deux niveaux distincts, d'abord lors de la propagation des incertitudes matérielles et structurales via le modèle physique à condition de chargement fixé puis au fur et à mesure que l'on explore l'espace des configurations conditionnelles d'intérêt.

III. Fragilité fonctionnelle thermomécanique des enceintes de confinement

La performance fonctionnelle des enceintes de confinement nucléaire en conditions accidentelles est d'un intérêt majeur pour l'évaluation du risque associé et/ou l'analyse par arbre de défaillances lors des EPS2. Ces calculs doivent prendre en compte les phénomènes de vieillissement en conditions de service (principalement comportement au jeune âge du béton, fluages et retraits et déformations thermiques) avant d'envisager (par simulation numérique) un accident grave entraînant une augmentation de la température et de la pression à l'intérieur de l'enceinte de confinement. Cette augmentation induirait des dommages croissants dans l'épaisseur du mur et réduirait finalement la capacité de confinement du bâtiment nucléaire (dégradation de la fonction d'étanchéité).

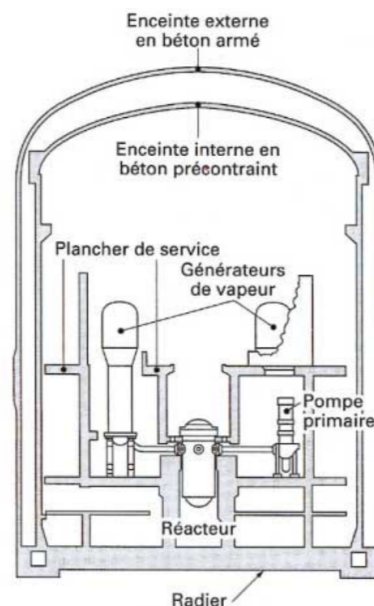


FIGURE 2. Conception type d'une enceinte de confinement à double parois sur le parc nucléaire français (sans liner métallique du côté intrados)

Dans la présente étude, les calculs numériques sont réalisés (avec le logiciel Cast3m) pour des enceintes de confinement à double paroi sans revêtement métallique. Le comportement à long terme du béton est calculé selon l'Eurocode 2 (toutes les formules ont été adaptées aux mesures in situ pour améliorer la représentativité du modèle physique) et est réalisé pour une durée de service prévisionnelle de 60 ans. Les conditions accidentelles (température intérieure et augmentation de la pression) s'appliquent une fois cette durée atteinte. Les calculs thermiques sont effectués selon un régime transitoire à l'aide d'un modèle 3D complet avec 472 289 éléments finis (solides à 20 nœuds). De plus, des calculs mécaniques sont réalisés selon un formalisme d'endommagement continu (Ottosen, 1977) en utilisant un modèle 3D complet avec 272 508 éléments finis (solides à 8 nœuds). Les barres de renforcement et les câbles de précontrainte sont modélisés par des 311 637 segments linéaires avec une liaison parfaite acier-béton (segments à 2 nœuds).

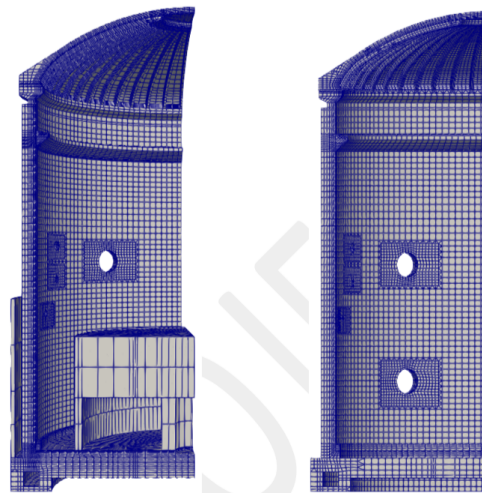


FIGURE 3. 1/4 du maillage du mur de confinement interne d'une enceinte à double parois (à gauche) maillage relativement grossier à destination des calculs mécaniques (à droite) maillage relativement fin à destination du calcul thermique transitoire

Dans un premier temps, et en guise de démonstration de faisabilité, un seul paramètre aléatoire a été considéré (il s'agit de la perméabilité à l'air sec mesurées pendant les essais de pressurisation à l'occasion des visites décennales). Une vingtaine de scénarii d'accident grave sont couverts par les calculs non linéaires. Chaque calcul non linéaire, en ordre de grandeur, nécessite 4 à 6 semaines de calcul. Ces derniers constituent donc le plan d'expérience numérique permettant la construction du modèle de substitution du modèle non linéaire (partie thermomécanique). La définition de ce plan est principalement basée sur les dires des experts thermo hydrauliciens de l'IRSN.

Aussi, pour tenir compte de l'incertitude épistémique associée à la méta modélisation, les courbes de fragilité sont calculées selon un certain niveau de confiance α (la confiance visée ici caractérise les écarts entre le méta modèle et la réponse du modèle non linéaire. Nous supposons que ces écarts suivent une distribution normale centrée).

A l'issu des différents calculs non linéaires, nous disposons de l'état mécanique de l'enceinte de confinement pour plus de 900 configurations de chargements thermomécaniques (tous les instants et tous les scenarii confondus).

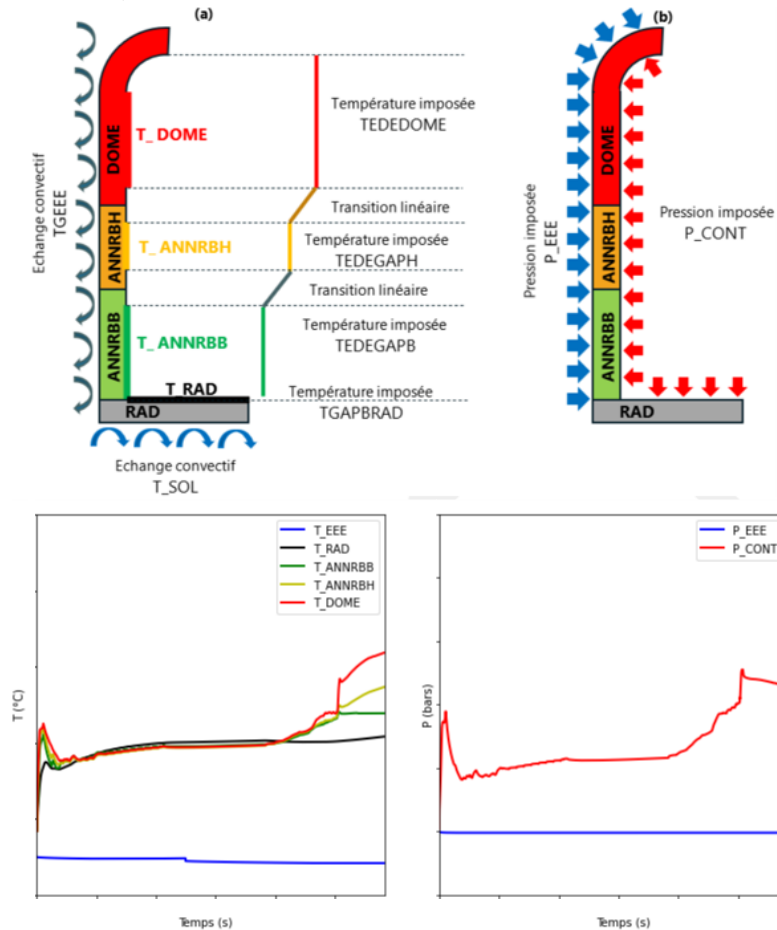


FIGURE 4. Exemple de répartition des conditions thermomécanique en situation d'accident grave

L'analyse de ce nuage de points a permis d'identifier le modèle de substitution suivant de la fonction d'étanchéité visée :

$$f_{\alpha} = f_{DR} [e^{a_0} (I_{T_m})^{a_1} (I_{T_{\Delta}})^{a_2} (I_P)^{a_3}] e^{\pm \frac{t_{\alpha}}{2} \sigma_{\epsilon}}$$

Avec f_{DR} la fonction de performance mesurée pendant le dernier essai de pressurisation décennal, $(I_{T_m}, I_{T_{\Delta}}, I_P)$ sont des indicateurs thermomécaniques du chargement d'accident grave appliqué (température moyenne dans l'épaisseur du mur de confinement, le gradient thermique et la pression interne), σ_{ϵ} l'écart-type associé aux écarts entre le modèle de substitution et le résultat du calcul non linéaire, $a_{0,1,2,3}$ sont des paramètres d'ajustement, t_{α} le coefficient de Student a n-2 degrés de liberté.

Nous pouvons noter, qu'à condition thermomécanique donnée, la distribution de f_{α} est la même que celle de f_{DR} mesurée sur le parc (la caractérisation de cette distribution se base donc sur des mesures couvrant les dizaines de tranches d'un palier donné).

Finalement, le calcul de probabilité conditionnelle de dépassement d'un critère donné devient explicite et accessible à faible coût et peut être mené soit de façon analytique (quand le choix des distributions aléatoires le permet) soit par tirage de Monte Carlo ou quasi-Monte Carlo.

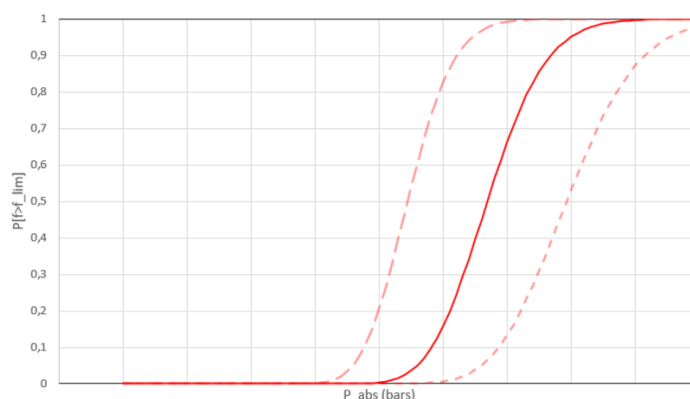


FIGURE 5. Exemple de courbes de fragilité (probabilité conditionnelle à un chargement thermomécanique donné) et l'intervalle de confiance associé à 5%-95%

Notons que la courbe de fragilité précédente caractérise les probabilités de dépassement d'un seuil donné à une condition Pression-Température donnée tenant compte des incertitudes matérielles et structurales. L'intervalle de confiance quant à lui est exclusivement associé à la qualité du méta modèle comparé au modèle originel.

IV. Conclusions

Cette contribution vise à proposer une méthode pratique et opérationnelle pour l'évaluation des courbes de fragilité fonctionnelle des enceintes de confinement dans le cadre des EPS2. Grâce à l'application de techniques de méta modélisation, les coûts de calcul sont considérablement réduits, ce qui permet une estimation de la fragilité sur la base de calculs non linéaires à grande échelle en présence de nombreuses sources d'incertitudes et sans aucune hypothèse préalable sur la forme de la courbe de fragilité.

REFERENCES

Bouhjiti D. 2018. Analyse probabiliste de la fissuration et du confinement des grands ouvrages en béton armé et précontraint. Thèse Communauté Université Grenoble Alpes. Grenoble. France.

Heitz T. 2022. Vérification et validation de modèles non linéaires en génie civil. Techniques de l'ingénieur. Réf : C6006V1.

Baroth J., Bressolette P., Chauviere C., Fogli M. (2007). An efficient SFEM using Lagrange Polynomials: application to nonlinear mechanical problems with uncertain parameters. *Comp. Meth. Appl. Mech.* 196(46-58): 4419-4429

Ottosen, N. S. (1977). A failure criterion for concrete. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 103(4), 527-535.