





## **SYNTHÈSE :**

Lorsque des études de fiabilité doivent être menées en prolongement des calculs déterministes en mécanique, il est nécessaire de prendre en compte les variabilités des paramètres d'entrée liés aux différentes sources d'incertitude. Cela nécessite alors de calculer des intégrales pour évaluer le risque de défaillance, soit par des méthodes de simulation, soit d'approximation (FORM/SORM). Or, les modèles mécaniques font souvent appel à des codes de calcul et ceux-ci doivent alors être couplés avec les calculs fiabilistes.

Ces codes peuvent conduire à des temps de calcul importants lorsqu'ils sont invoqués de nombreuses fois lors de séquences de simulations ou dans des procédures itératives complexes. La méthode de surface de réponse permet d'effectuer une approximation de la réponse réelle à partir d'un nombre réduit de points en lesquels le code aux éléments finis est invoqué. Ainsi, lorsqu'elle est associée aux méthodes FORM/SORM, un couplage peut être réalisé en un temps de calcul satisfaisant.

Une application de la méthode des surfaces de réponse au couplage mécano-fiabiliste pour un modèle mécanique faisant appel à un code aux éléments finis est présenté. Il correspond à l'étude probabiliste de la rupture de la cuve d'un réacteur à eau pressurisée.

## **EXECUTIVE SUMMARY :**

When reliability studies are extended from deterministic calculations in mechanics, it is necessary to take into account input parameters variabilities which are linked to the different sources of uncertainty. Integrals must then be calculated to evaluate the failure risk. This can be performed either by simulation methods, or by approximation ones (FORM/SORM). Model in mechanics often require to perform calculation codes. These ones must then be coupled with the reliability calculations.

These codes can involve large calculation times when they are invoked numerous times during simulations sequences or in complex iterative procedures. Response surface method gives an approximation of the real response from a reduced number of points for which the finite element code is run. Thus, when it is combined with FORM/SORM methods, a coupling can be carried out which gives results in a reasonable calculation time.

An application of response surface method to mechanics reliability coupling for a mechanical model which calls for a finite element code is presented. It corresponds to a probabilistic fracture mechanics study of a pressurized water reactor vessel.

# Couplage mécano-fiabiliste - Application à l'évaluation de la sûreté des cuves de réacteurs à eau pressurisée

V. Vénturini, P. Pitner

*EDF, Direction des Etudes et Recherches, 25 allée Privée, Carrefour Pleyel, 93206 Saint-Denis Cedex 1 (France)*

## 1. Introduction

Un modèle mécanique adéquat pour l'étude probabiliste de la rupture d'une structure peut généralement être formulé par la donnée d'un vecteur  $X$  de variables représentant l'état des paramètres de base (déterministes ou aléatoires) et une fonction d'état  $G$  associée à un critère de défaillance (cf. [MAD 86]).  $G$  est appelée fonction d'état limite ou de défaillance et pour chaque réalisation des variables de

base du modèle, sa valeur définit si la structure est dans un état d'intégrité ( $G > 0$ ) ou de défaillance ( $G \leq 0$ ). La probabilité de défaillance  $P_f$  est alors exprimée par :

$$P_f = \text{Prob} [ G(\mathbf{X}) \leq 0 ] = \int_{G(\mathbf{X}) \leq 0} f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) \cdot d\mathbf{X} \quad (1)$$

où  $f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X})$  est la fonction de densité de probabilité conjointe des variables de base.

Il n'est en général pas possible de calculer directement l'intégrale donnée par (1) et il faut donc avoir recours à des méthodes numériques d'intégration. Pour les méthodes d'évaluation par simulations (Monte Carlo et ses dérivées), le nombre de simulations requis est inversement proportionnel au résultat. Ainsi, pour les très faibles probabilités comme celles visées dans le domaine de la sûreté nucléaire, le temps de calcul devient rédhibitoire tandis que les méthodes récentes d'approximation (FORM/SORM, 'First and Second Order Reliability Methods') se montrent alors les plus performantes [MAD 86].

En mécanique des structures, il est couramment fait appel à des codes aux éléments finis dans la modélisation. Ceux-ci peuvent conduire à des temps de calcul qui restent importants lorsqu'ils sont invoqués de nombreuses fois lors de séquences de simulations ou dans des procédures itératives complexes. C'est le cas de la recherche du point de conception, étape fondamentale des méthodes d'approximation (FORM/SORM).

Les méthodes d'approximation peuvent converger en un nombre raisonnable d'itérations si le modèle n'est pas trop complexe et si l'on parvient à effacer le bruit numérique en parvenant à déterminer correctement le gradient de  $G$ . Un couplage peut alors être réalisé en un temps de calcul satisfaisant si, en outre, on parvient à déterminer une approximation de la surface de réponse qui traduit correctement le comportement de celle-ci relativement à la recherche du point de conception à partir d'un nombre réduit de points en lesquels le code aux éléments finis est invoqué. Les méthodes de surfaces de réponse permettent d'effectuer, jusqu'à un certain degré (nombre raisonnable de variables, complexité du modèle, durée des calculs élémentaires), une approximation de ce type.

Une étude probabiliste de la rupture de la cuve d'un réacteur nucléaire à eau pressurisée a ainsi été réalisée à l'aide des méthodes FORM/SORM et d'une méthode de surface de réponse. Le modèle probabiliste et la méthode de couplage utilisés sont décrits dans leurs grandes lignes et les résultats trouvés sont exposés et brièvement commentés.

## 2. Description du modèle probabiliste

Parmi tous les composants d'une centrale REP, la cuve du réacteur nucléaire est celui qui présente la plus grande importance pour la sûreté. Le risque de rupture

brutale dans le domaine fragile est celui qui doit être étudié afin de s'assurer que les effets de l'irradiation sont conformes aux prévisions. Une étude probabiliste de mécanique de la rupture peut permettre une évaluation précise des marges disponibles ainsi que la réalisation d'études de sensibilité permettant d'identifier les paramètres les plus influents, d'optimiser les inspections en service et d'évaluer les effets des facteurs de sévérité et des conservatismes dans les analyses déterministes.

Pour se placer dans les situations les plus pénalisantes vis-à-vis du risque de rupture brutale, on considère que la surface interne de la paroi de la cuve présente des défauts de type fissure, que le matériau a perdu de sa ductilité en fin de vie par irradiation et qu'il est soumis à des chargements de pression et chocs thermiques. Les risques évalués correspondront donc à des probabilités conditionnelles de rupture.

Le modèle probabiliste est basé sur l'introduction de concepts probabilistes dans les calculs déterministes usuels de mécanique de la rupture. Le critère de rupture est caractérisé par le dépassement de la ténacité  $K_{1C}$  par le facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  :  $K_I \geq K_{1C}$ . Le modèle déterministe de base est construit selon les règles du RCC-M [RCC 88] et est décrit dans les références [NOE 90, PEL 90]. La démarche générale est illustrée sur la figure 1.

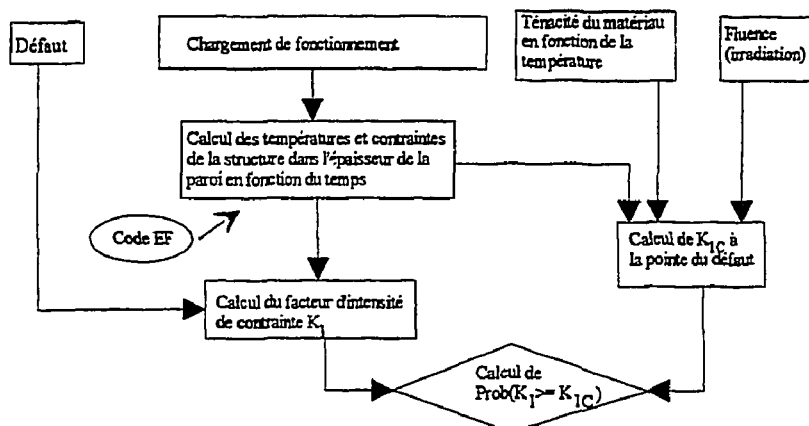


Figure 1 : Organigramme simplifié du modèle.

Les défauts postulés dans cet exemple sont d'orientation circonférentielle et placés juste sous l'interface revêtement inoxydable-métal de base. Chaque chargement est défini par une variation de la température et de la pression du fluide en fonction du temps écoulé depuis le début du transitoire. Un calcul aux éléments finis (EF) permet d'évaluer la répartition des températures  $T$  et des contraintes  $\sigma$  dans l'épaisseur de la cuve en fonction du temps, lors du transitoire, à partir des paramètres géométriques et thermo-mécaniques. Ces données ( $T$  et  $\sigma$ ) sont

nécessaires pour l'évaluation des facteurs  $K_1$  et  $K_{1C}$ . Un couplage entre les méthodes probabilistes et les calculs thermo-mécaniques doit donc être effectué.

### 3. Couplage Mécano-fiabiliste

Lors des calculs de fiabilité menés à l'aide des méthodes d'approximations FORM/SORM, on recherche le point de conception, i.e. le point de défaillance le plus probable. Cette recherche prend la forme d'un algorithme d'optimisation. Lors de cette recherche effectuée dans l'espace transformé des variables normales standards indépendantes (cf. [MAD 86]), les valeurs de la réponse du modèle sont requises pour de nombreuses valeurs des paramètres d'entrée. Les points nécessaires lors de ce processus itératif ne sont pas connus à l'avance; la réponse du modèle à un point lors d'une itération doit ainsi pouvoir être facilement calculée par un sous-programme directement lié au code d'analyse probabiliste utilisé PROBAN [OLE 92].

Il est alors souhaitable d'avoir recours à une approximation de la relation fonctionnelle reliant les paramètres d'entrée non fixes et sorties ( $T$  et  $\sigma$ ) du code aux éléments finis à partir de la connaissance de valeurs calculées en un nombre fini de points. Cette opération correspond à la projection de la fonction inconnue sur un espace de fonctions adéquat. La famille de fonctions simples la mieux adaptée pour ce type d'ajustement est constituée des polynômes de degré 2.

Cette démarche correspond à la Méthode dite de Surface de Réponse (MSR). Celle-ci permet une diminution du nombre de réalisations de la fonction, une simplification due à une utilisation de fonctions approximées simples et rapides à déterminer, la possibilité d'utiliser le caractère analytique de ces fonctions, ce qui permet de déterminer simplement une approximation du gradient et par suite, de réduire le bruit numérique et donc de faciliter la convergence.

La température  $T$  et la contrainte  $\sigma$  vont être calculées par déterminations successives de polynômes de degré 2 à une seule variable ajustés selon chacun des paramètres, les autres étant fixées. Les seuls paramètres d'ajustement considérés ici sont la coordonnée radiale  $x$  et le temps  $tps$ . Pour un point  $(x, tps)$  donné de l'espace des paramètres d'entrée, les points les plus proches du maillage sont considérés. Cette méthode correspond à une succession d'opérations simples et rapides mais nécessite néanmoins une réévaluation à chaque itération. La démarche globale est la suivante :

- On réalise un fichier des paramètres d'entrée du code EF qui contient les paramètres thermo-mécaniques et géométriques, un ensemble d'instant  $t_i$  couvrant la durée du transitoire et un ensemble de coordonnées radiales  $x_i$  couvrant l'épaisseur de la paroi de la cuve.



- T et  $\sigma$  sont calculées par le code EF pour ces données d'entrée. Ceci engendre un fichier de sortie que l'on trie. Ce maillage des deux espaces position×temps×température et position×temps×contrainte fournit ainsi un fichier résultat utilisable par les programmes de surface de réponse.
- Les 2 sous programmes correspondant aux fonctions T et  $\sigma$  sont liés à PROBAN sous forme de surfaces de réponse.
- On transfère dans PROBAN des valeurs T(x,tps) et  $\sigma(x,tps)$  et des expressions analytiques correspondantes aux points (x,tps) pour lesquels cela est requis.

#### 4. Résultats et conclusions

Le scénario d'accident envisagé correspond à un "choc froid sous pression" dû à un transitoire sévère provoqué par une brèche dans une tuyauterie primaire. Afin de déterminer l'évolution de la probabilité conditionnelle de rupture au cours du transitoire, des études paramétriques sont effectuées pour 24 pas de temps à l'aide des méthodes d'approximations FORM/SORM (cf. Figure 3). Afin de valider le modèle, des études similaires sont réalisées sur un modèle équivalent sans couplage. Pour ce dernier, T et  $\sigma$  sont représentées par des fonctions qui ont été ajustées statistiquement à partir de données originales du code EF.

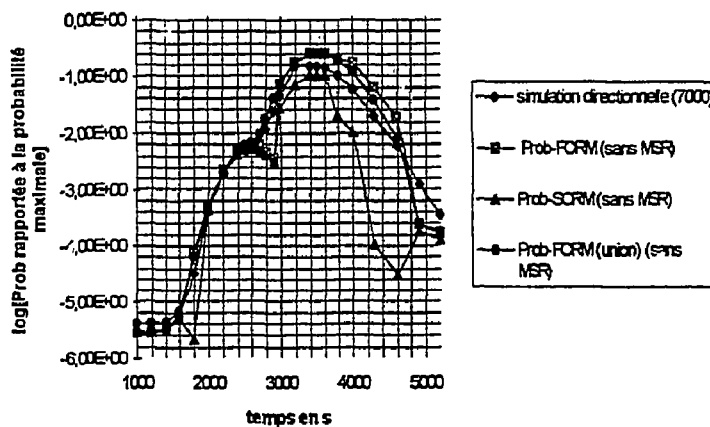


Figure 2 : Courbes d'évolution du logarithme de la probabilité de rupture rapportée à la probabilité maximale au cours du transitoire pour le modèle sans couplage.

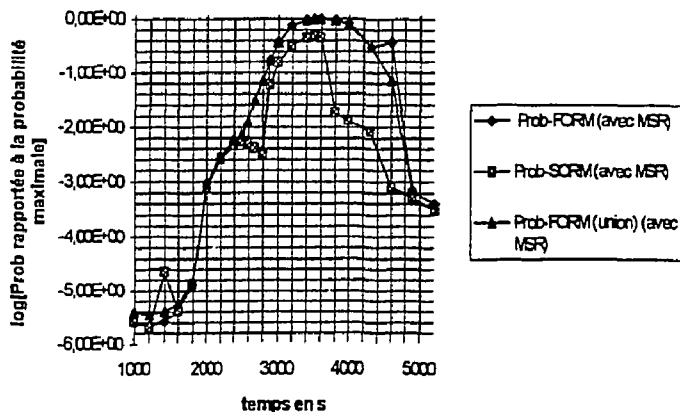


Figure 3 : Courbes d'évolution du logarithme de la probabilité de rupture rapportée à la probabilité maximale au cours du transitoire pour le modèle avec couplage.

Toutes les probabilités trouvées ont été divisées par la probabilité maximale déterminée lors de toutes les analyses. La modélisation par union résulte en la correction de la discontinuité observée entre les instants 2900s et 3000s car elle tient compte de l'existence de deux modes de rupture dont les contributions respectives ne peuvent alors pas être négligées l'une devant l'autre. Pour le modèle sans couplage, la simulation directionnelle ainsi que la méthode FORM (avec ou sans union) présentent des évolutions semblables ce qui valide l'utilisation de FORM. Pour le modèle avec couplage, les résultats trouvés sont comparables sur les intervalles [1000s; 2600s] et [4900s; 5200s] avec le modèle sans couplage. Sur l'intervalle [2700s; 4600s], les écarts proviennent de la faiblesse des ajustements statistiques. Le modèle avec MSR associé aux méthodes FORM/SORM donne des résultats cohérents sur ce problème avec des temps de calculs très faibles.

## 5. Bibliographie

- [NOE 90] NOËL R., "A PWR Pressure Vessel Safety Assessment", EDF, prepared for OCDE NEA-CSNI Workshop Espoo, 8-9 Nov. 1990.
- [RCC 88] RCC-M, *Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands*, AFCEN Edition, Annex ZG, Paris (available in english), 1988.
- [PEL 90] Pelissier-Tanon A. et al., French Verification of PWR Vessel Integrity, Final Report EPRI NP-6713, 1990.
- [MAD 86] Madsen H.O., Krenk S. et Lind N.C., *Methods of structural safety*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
- [OLE 92] Olesen R., PROBAN, General Purpose Probabilistic Analysis Program, User's Manual, Det Norske Veritas Sesam Systems, Høvik, 1992.



*Direction des Etudes  
et Recherches*

*Service Information  
Prospective et Normalisation*

CLAMART

Le 17/01/96

*Département Systèmes d'information  
et de documentation*

*Groupe Exploitation  
de la Documentation Automatisée*

1, avenue du Gal de Gaulle  
92141 CLAMART Cedex  
tel : 47 65 56 33

CEA

MIST/SBDS/SPRI  
CENTRE DE SACLAY

91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

à l'attention de :

## MEMOIRE TECHNIQUE ELECTRONIQUE

\*\*\*\*\*  
Cette feuille est détachable grâce à la microperforation sur le coté droit.  
\*\*\*\*\*

Référence de la demande : **F558901**

Votre commande :

Origine : **CATALOGUE DES NOTES DER**

Numéro du document : **95NB00108**

**Titre : COUPLAGE MECANO-FIABILISTE - APPLICATION A L'EVALUATION DE LA SURETE DES CUVES DE REACTEURS A EAU PRESSURISEE**

**Auteurs : PITNER P./VENTURINI V.**

**Source : COLL. NOTES INTERNES DER. PRODUCTION D'ENERGIE (HYDRAULIQUE, THE**  
**Serial :**

Référence du document : **SANS**

Nombre de pages: **0010**

Nombre d'exemplaires : **001**

Support : **P**