

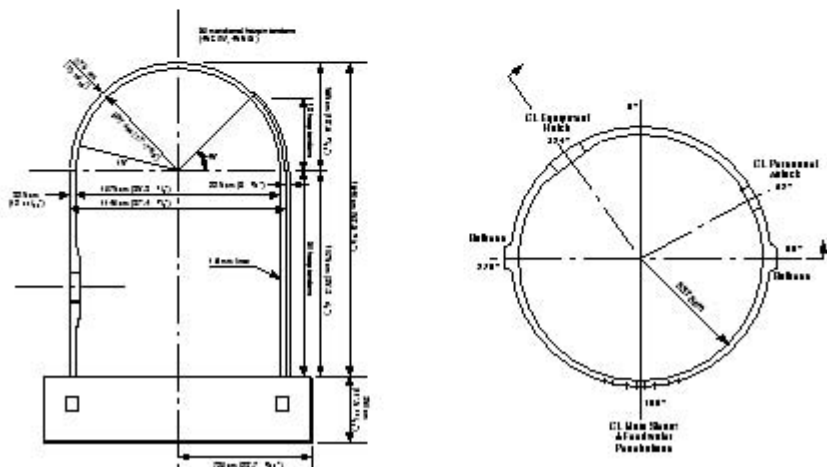
## Résultats des calculs SANDIA II.

*C. Rospars, S. Ghavamian (EDF R&D, Dépt AMA),  
A. Courtois (EDF DPI SEPTEN).*

Depuis 1997, de nombreux développements dédiés aux études de Génie Civil ont été réalisés dans *Code\_Aster*. Une grande partie de ces modèles a pour objectif de pouvoir simuler le comportement des ouvrages du parc en situation accidentelle, et en particulier la tenue des enceintes de confinement pré-contrainte en situation d'accident grave. Les outils ayant atteint une certaine maturité, il est maintenant nécessaire de les qualifier sur des structures réelles. La R&D, via le Projet MECEN, et le SEPTEN, via le Projet T2, ont participé à plusieurs exercices de comparaisons simulations/essais, en vue de confronter leurs méthodes d'analyse à des résultats expérimentaux sur structures et aux pratiques d'autres équipes de recherche ou de bureaux d'études reconnus. La participation d'EDF au benchmark organisé par l'OCDE autour de la maquette SANDIA 2 s'inscrit dans cette démarche.

La maquette SANDIA 2 a été construite à Sandia Laboratories, Nouveau Mexique [1]. Cette structure reproduit à l'échelle 1:4 une enceinte de confinement existante (Ohi-3, PWR de 1127 MWe), construite au Japon. La structure de l'enceinte est composée de béton précontraint par des câbles horizontaux et verticaux, ainsi qu'une peau métallique venant en garantir l'étanchéité. Cette conception se rapproche donc de celle des tranches 900 MWe du Parc EDF.

La maquette SANDIA 2 a été soumise à un chargement de pression interne jusqu'à la rupture complète. Sous ce cas de charge, la rupture finale de



**Figure 1 : SANDIA II**  
*Enceinte de confinement réelle et modèle 3D utilisé pour l'analyse comparative essais-simulation*

l'enceinte s'est traduite par une véritable explosion consécutive à la fissuration progressive du béton, à la plastification puis à la rupture des câbles. Au cours de l'essai, plusieurs types de mesures ont pu être réalisées en divers points de la structure : déplacements, déformation des armatures et des câbles de précontraints, déformation du béton, déformation du liner, efforts dans les câbles et température interne. Au total, 55 points de mesu-

res ont été sélectionnés pour le benchmark de l'OCDE.

Pour simuler la ruine de SANDIA 2 et tester la capacité de *Code\_Aster* à prédire le comportement de la structure au voisinage de la ruine, EDF a conduit des simulations numériques 3D non linéaires, avec l'appui des bureaux d'études Geonumeric (pour la partie maillage) et Séchaud Ingénierie (pour la partie calcul).

## Résultats des calculs SANDIA II.

C. Rospars, S. Ghavamian (EDF R&D, Dépt AMA),  
A. Courtois (EDF DPI SEPTEN).

La maquette a été complètement maillée en 3D, en vue se rapprocher au mieux de la structure réelle. Une des difficultés majeure de cette étude était la réalisation du maillage, qui a été généré par un script Gibi permettant de créer des modèles avec différents niveaux de discrétisation. Des choix sur les phénomènes prépondérants à modéliser ont du être faits pour la simulation numérique. A partir des conclusions d'un programme préliminaire de simulation réalisé avant l'expérience et des résultats de l'essai, il a été choisi d'inclure dans le modèle les parties prépondérantes pour le comportement, soit :

- les parties en béton (radier, jupe cylindrique, dôme, ...) sont représentées par des éléments volumiques isoparamétriques ;
- le cylindre et le dôme suivent un comportement élastique endommageable, le radier restant élastique linéaire ;
- tous les câbles ont été maillés, par des éléments de barre, liés au maillage de la partie béton de la structure par des relations cinématiques ;
- les armatures passives ont été représentées par des éléments de plaques à comportement unidirectionnel, superposées dans les deux directions horizontales et verticales ;
- la peau métallique a été représentée par des coques (triangles et quadrilatères à interpolation linéaire) affectées d'un comportement élasto-plastique.

Les pertes de précontraintes dues à la déformation instantanée du béton, et le frottement entre les câbles et les gaines sont évalués par les commandes *Code\_Aster*. Les phénomènes à long terme comme le fluage et le retrait ne sont pas intégrés dans la

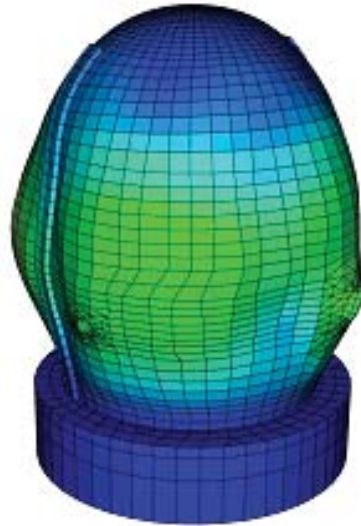


Figure 2 : Déformée du maillage pour le niveau de pression interne maximum  
Les couleurs présentent le niveau de déformation

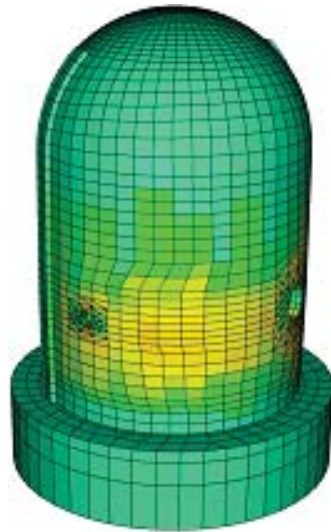


Figure 3 : Réponse du modèle de Mazars pour une pression interne à 40% de la pression maximale  
(bleu = non endommagé, jaune = endommagement maximum)

modélisation. Par ailleurs, dans cette modélisation, on a fait l'hypothèse d'un déplacement relatif nul entre les câbles et le béton, alors qu'en réalité les gaines n'ont pas été injectées par un coulis de ciment.

Pour représenter la fissuration du béton, on a choisi la loi d'endommagement isotrope Mazars, qui simule le comportement endommagé du béton par un adoucissement post-pic aussi bien en traction qu'en compression. Les éléments métalliques (armatures, câbles et liner) suivent une loi classique élasto-plastique.

Les cas de charge reproduits dans le calcul sont le poids propre, les précontraintes, une mise en pression interne produite par le remplissage en eau (pression hydraulique) et une surpression progressive par une injection d'air (pression pneumatique) jusqu'à atteindre la rupture ultime de la structure par fissuration du béton accompagnée d'une plastification et rupture des câbles et des armatures.

Des comparaisons entre l'expérience et les simulations numériques ont été réalisées pour différents niveaux du chargement. Ceci a permis de mesurer l'efficacité du modèle pour prédire le comportement structural de l'enceinte pour différents niveaux de dégradation, de la fissuration initiale jusqu'à la rupture en fin d'expérience. Ces résultats montrent les possibilités offertes par le calcul pour la prédiction du comportement mécanique d'une structure aussi complexe, en non linéaire, mais la mise en données du calcul est complexe et relève encore de l'expertise.

[1] Hessheimer M.F., Klamerus E.W., Rightly G.S., Lambert L.D. and Dameron R.A., 2003. Overpressurization Test of a 1 : 4-scale prestressed concrete containment vessel model. NUREG/CR-6810, SAND2003-0840P, Sandia National Laboratories, Albuquerque NM. ■