

Analyses sismiques non-linéaires des structures de Génie Civil

N. Bonfils, N. Suin, F. Turpin (EDF / DIN / SEPTEN)

Contexte et objectifs

Les résultats présentés s'intègrent au benchmark KARISMA (Kashiwazaki-Kariwa Research Initiative for Seismic Margin Assessment), organisé à la suite du séisme de Niigataken-Chuetsu-Oki (NCOE), survenu sur le site de la centrale nucléaire japonaise de Kashiwazaki-Kariwa le 16 juillet 2007. Durant le séisme et ses répliques, des données d'accélération ont pu être mesurées, révélant que le niveau sismique était supérieur au niveau de dimensionnement de la centrale ; pourtant, aucun dégât sensible n'a été relevé sur le bâtiment réacteur. Ce benchmark représente une opportunité certaine d'évaluer la robustesse des méthodes de calcul des installations nucléaires autour d'un cas réel tout en se confrontant aux pratiques internationales.

L'objectif est d'exposer les méthodes avancées de calculs sismiques d'EDF en matière de prise en compte de l'interaction sol/structure et de représentation du comportement non-linéaire des struc-

tures de génie civil et de le comparer à la pratique internationale. L'enjeu important de cette étude fut d'appliquer, à l'échelle d'un exemple industriel, les méthodes de calcul non-linéaires disponibles dans *Code_Aster* et particulièrement une des lois de comportement non-linéaire prenant en compte l'endommagement du béton armé : GLRC_DM.

Modélisation des phénomènes

Le bâtiment :

La structure étudiée est un bâtiment réacteur. D'une hauteur totale de 60 mètres environ, elle est enfoncée sur ses 30 premiers mètres. Le modèle a été élaboré selon les données disponibles du benchmark. Composée d'éléments de coques (voiles et plancher) et de poutres (structures métalliques et cuve du réacteur), la structure a été maillée dans Salome-Meca selon un script python permettant de contrôler les tailles de mailles (voir figure 1 : les parties de couleur marron correspondent aux voiles enfoncées en contact avec le sol).

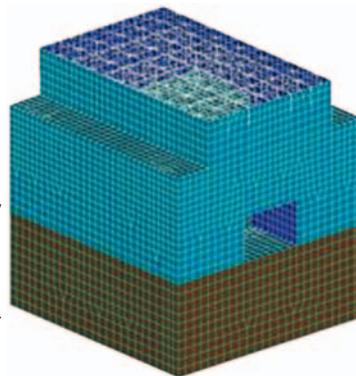


Figure 1 : Modèle éléments-finis du bâtiment réacteur.

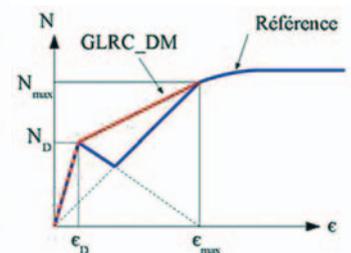


Figure 2 : Loi de comportement GLRC_DM.

Les lois de comportement :

Les non-linéarités de comportement ont été appliquées aux voiles porteurs et aux planchers principaux. L'hypothèse d'élasticité linéaire a été retenue pour les autres éléments structuraux (poutres, poteaux, charpente métallique).

La modélisation des phénomènes non-linéaires du béton armé s'est faite par l'implémentation de la loi de comportement GLRC_DM (voir figure 2) développée par EDF R&D. Cette modélisation est particulièrement adaptée aux chargements sismiques. Le modèle global n'étant pas adoucissant, la modélisation est très robuste en terme de convergence et permet de prendre en compte les

phénomènes d'endommagement, de refermeture de fissure et de reprise de raideur par les aciers avec des temps de calcul CPU permettant une application industrielle. Cette loi de comportement se définit par une approche globale et un jeu de paramètres de caractérisation en nombre réduit. L'ensemble de ces paramètres a été défini à l'aide de la commande DEFI_GLRC. Cet opérateur permet de déterminer les six paramètres non-linéaires à partir de la géométrie des voiles et des planchers, de la position des nappes d'acier et des paramètres matériau. Le calage par la commande DEFI_GLRC permet un gain de temps significatif dans l'étape de mise en données.

Analyses sismiques non-linéaires des structures de Génie Civil

N. Bonfils, N. Suin, F. Turpin (EDF / DIN / SEPTEN)

La plastification des aciers a été prise en compte grâce à un modèle élasto-plastique à écrouissage linéaire. Le couplage numérique des modèles endommageants et élastoplastiques a été réalisé par le biais du kit DDI implémenté dans *Code_Aster*.

Finalement, le modèle de comportement utilisé dans cette étude a permis de représenter l'endommagement en flexion et membrane grâce à la loi GLRC_DM et la plasticité en membrane grâce à la loi VMIS_CINE_LINE.

Conditions aux limites :

Deux hypothèses de conditions aux limites ont été considérées. La première considère que le radier est encastré. La seconde, sans considérer l'enfoncement de la structure, prend en compte l'interaction sol/structure au moyen d'un tapis de ressorts dont les caractéristiques ont été déterminées à l'aide de la stratigraphie réelle et des logiciels MISS3D et *Code_Aster*.

Calculs mis en œuvre

Dans un premier temps, une analyse statique de type push-over a été menée. Un champ d'accélération uniforme croissant est imposé comme chargement sur toute la structure (du niveau du radier jusqu'à la toiture du bâtiment).

La courbe reliant l'effort de réaction en fonction du déplacement du centre de gravité est ensuite superposée au chargement sismique pour déterminer les points de fonctionnement de la structure.

Dans un second temps, des analyses transitoires non-linéaires ont été menées pour des niveaux de séisme croissants (1XNCOE, 2XNCOE, 4XNCOE, 6XNCOE).

Pour chacune de ces analyses (quasi-statique et dynamique), deux situations de liaisons au sol ont été considérées :

- la structure est considérée avec une base encastrée ;
- la structure est posée sur des ressorts de sol modélisant l'ISS.

Résultats

La figure 3 présente les résultats obtenus par les différents participants au benchmark pour l'analyse push-over avec ressorts de sol pour l'interaction sol-structure. Les résultats obtenus par EDF se situent dans la moyenne des résultats obtenus par les autres participants.

Concernant l'analyse dynamique sur ressort de sol (figure 4), les résultats obtenus sont cohérents avec les enregistrements.

Pour des niveaux de séisme supérieurs, l'ensemble des résultats montre une forte dispersion par rapport à la valeur moyenne lorsque les structures rentrent dans le domaine non-linéaire.

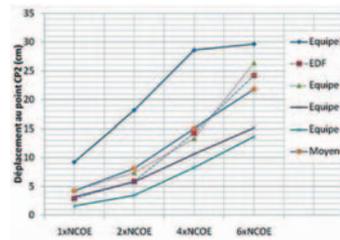


Figure 3 : Déplacement obtenu au point CP2 (+ 23.5 m) par les différents participants et pour différents niveaux de demande (résultat push-over).

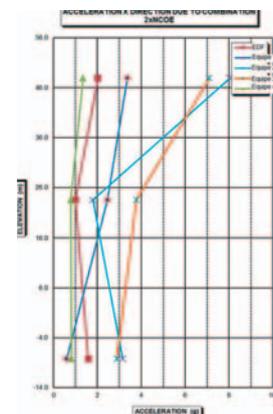
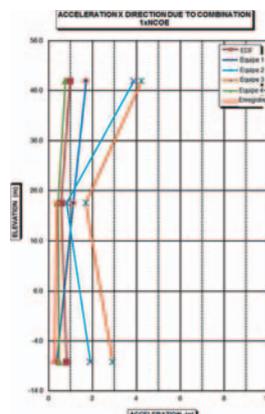


Figure 4 : Accélérations maximales en fonction de l'élévation aux points d'enregistrement.

Conclusion

La participation de EDF / SEPTEN à ce benchmark a permis de confronter les modèles non-linéaires de béton armé utilisés par EDF à d'autres participants internationaux et à mettre en pratique les méthodes de calcul développées par EDF R&D sur un bâtiment complet.

Une partie seulement de la structure (voiles et planchers principaux) a été modélisée en utilisant la loi de comportement GLRC_DM. Les poutres et poteaux n'ont pu être modélisés par des lois de comportement endommageantes car des difficultés de convergence sont apparues lors de l'utilisation de ces dernières avec des modèles PMF (poutres multi-fibres). Des travaux sont en cours à EDF R&D pour résoudre les problèmes rencontrés et pour permettre

d'intégrer la prise en compte du comportement non-linéaire des poutres et des poteaux dans la méthodologie.

Pour autant, les résultats obtenus par EDF restent cohérents aux enregistrements et avec les autres participants tant que l'incursion dans le domaine non-linéaire reste modérée. Pour des niveaux de sollicitation élevés, la modélisation non linéaire reste robuste grâce à la modélisation non adoucissante GLRC_DM.

Lorsque l'incursion dans le domaine non-linéaire devient importante, nous constatons une forte dispersion autour de la moyenne des résultats entre les participants. Les résultats obtenus par EDF se situent généralement dans la moyenne des résultats des candidats.