

COMPOTEMENT AU SÉISME D'UNE COLONNE DE SOL EN LINÉAIRE ÉQUIVALENT

D. Vandeputte (EDF / DIN / CEIDRE)

CONTEXTE

La division Géologie-Géotechnique du département TEGG (Techniques de réalisation et Expertise en Géologie et Génie Civil) du CEIDRE intervient auprès des centres d'ingénierie de la DIN, de la DPIH et du CIT en appui d'expertise, notamment dans le domaine du comportement des sols sous séisme.

L'augmentation des niveaux de séisme à prendre en compte pour le dimensionnement et la vérification des bâtiments conduit à des valeurs d'accélération maximales en champ libre supérieures à 0.2g sur de nombreux sites.

Pour de telles accélérations, le comportement non linéaire du sol devient non négligeable dans l'estimation de la réponse sismique du sol et des structures. La méthode linéaire équivalente est un bon compromis entre le réalisme des résultats et le coût de mise en œuvre pour réaliser cette opération.

COLONNE DE SOL 1D

La prise en compte des non linéarités dans l'évaluation de la réponse sous séisme des différentes couches du sol d'un site donné est nécessaire pour :

- l'évaluation des caractéristiques dynamiques lors du calcul des impédances de fondation : réduction du module dynamique (courbe G- γ) et augmentation de l'amortissement matériel (courbe D- γ) ;
- l'évaluation des profils d'accélération et déformations maximales dans le sol en fonction de la profondeur (déconvolution) pour la vérification et le dimensionnement des ouvrages enterrés

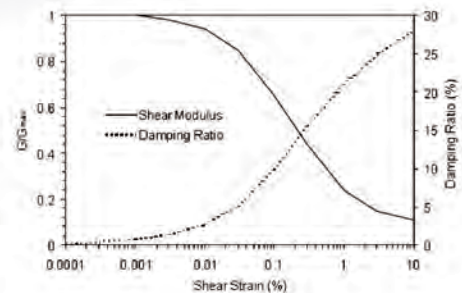
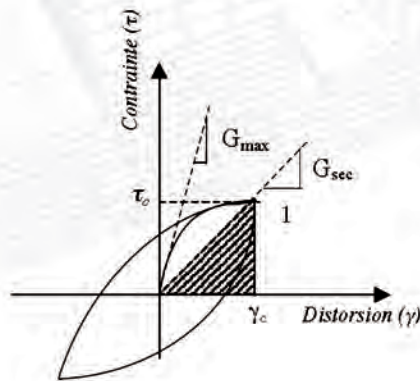


Figure 1 : Illustration du modèle linéaire équivalent du sol en cisaillement.

- qui suivent les déformations du sol : enceintes géotechniques, puits de pompage, galeries, etc ;
- l'évaluation de l'effet de site (1D) en réinjectant à la base d'une colonne de sol un signal sismique déconvolué à un Rocher Affleurant (surface libre fictive) ;
- l'injection de signaux temporels à la base de modèles Éléments Finis intégrant une partie de sol maillée (décollement/glisement à l'interface sol-structure, comportement non linéaire du sol, etc) ;

Cette étape représente un maillon de la chaîne de calcul permettant d'estimer la réponse d'une structure à un niveau de séisme donné.

ALGORITHME

De nombreux logiciels du commerce permettent de mettre en œuvre cette méthode linéaire équivalente : SHAKE (Lysmer, Berkeley), CYBERQUAKE (Foerster, BRGM) ou EERA (Bardet, California).

Le problème est résolu selon le processus itératif suivant :

- estimation pour chaque couche du profil du module de cisaillement G et de l'amortissement hystérétique AH = 2D ;
- résolution harmonique élastique de l'excitation par un bruit blanc à la base de la colonne posée sur un élément de Frontière Absorbante (Rocher Affleurant).
- calcul de la fonction de transfert selon le cas traité : Déconvolution ou Reconvolution ;
- évaluation dans chaque couche de la déformation de cisaillement $\gamma(t)$ au cours du chargement temporel en utilisant une transformée de Fourier rapide (FFT) directe et inverse ;
- à partir des courbes G- γ et D- γ , détermination dans chaque couche des valeurs associées à la moyenne $\gamma_m = 0.65 \gamma_{max}$.

Si ces valeurs sont différentes de celles estimées, le calcul est repris avec ces nouvelles valeurs, et ce jusqu'à ce que la convergence soit obtenue dans chaque couche (en général entre 3 et 8 itérations).

L'utilisation d'un calcul harmonique permet de modéliser au mieux l'amortissement hystérétique des matériaux (indépendant de la fréquence) par rapport à l'utilisation des coefficients de Rayleigh pour une résolution temporelle.

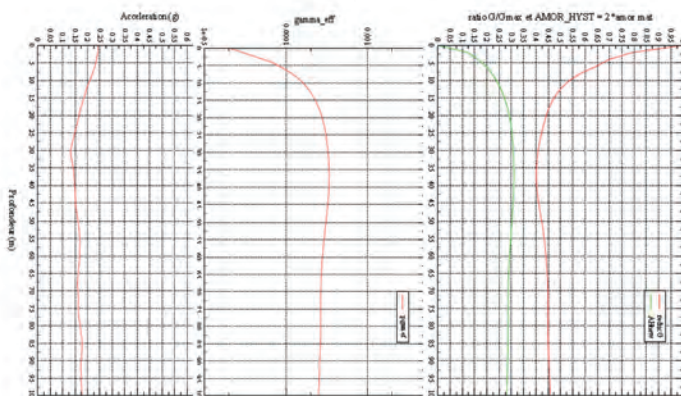


Figure 2 : Profils d'accélération max, déformations max, réduction de module et amortissement obtenus en sortie du calcul Code_Aster.

COMPORTEMENT AU SÉISME D'UNE COLONNE DE SOL EN LINÉAIRE ÉQUIVALENT

D. Vandeputte (EDF / DIN / CEIDRE)

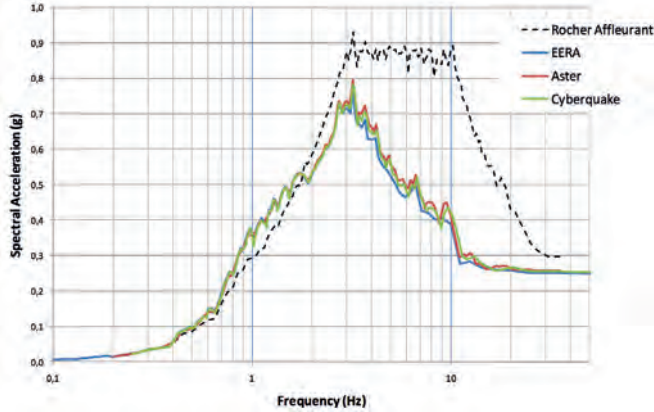


Figure 3 : Comparaison du spectre de sol en champ libre reconvolué obtenu avec les 3 codes.

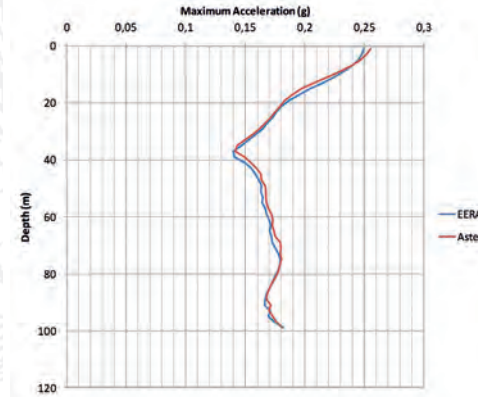


Figure 4 : Comparaison du profil d'accélération max obtenu avec EERA et Code_Aster.

MISE EN ŒUVRE DANS CODE_ASTER

La mise en œuvre de cet algorithme dans Code_Aster présente les avantages suivants :

- continuité des formats de fichier d'entrée / sortie par l'utilisation de TABLE en lecture ou en écriture : colonnes de sol, accélérogrammes, courbes G-γ et D-γ ;
- possibilité de réaliser facilement des études de sensibilité : multi-accélérogrammes ou multi-colonnes de sol ou de variabilité des modules (2/3 - 3/2) en Python ;
- gain de post-traitement par impression automatique des résultats sous forme de TABLE réutilisable directement (Aster et Excel) et de graphiques au format Grace ou PDF ;
- possibilité de vérifier le calage des paramètres de Rayleigh pour la modélisation de l'amortissement interne du sol dans les calculs temporels.

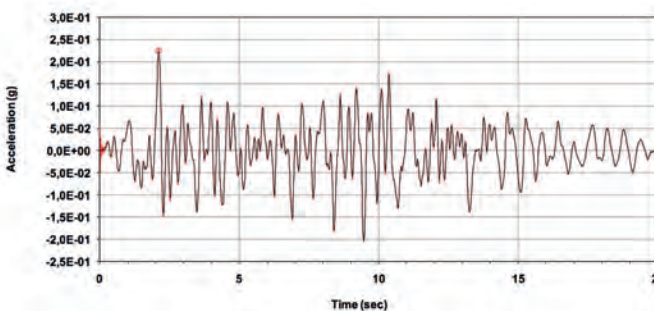


Figure 6 : Exemple de sortie Code_Aster d'étude paramétrique sur les courbes G-γ .

RÉSULTATS - VALIDATION

Une validation du programme a été réalisée en réalisant une reconvolution d'un accélérogramme EUR sol moyen calé à 0.3g sur une colonne de sol alluvionnaire de 100m avec une variation de la vitesse des ondes de cisaillement de 380 à 740 m/s et des courbes G-γ et D-γ issues de la littérature (Seed 1973 – Sables hypothèse basse).

Les résultats ont été comparés à ceux obtenus avec la feuille Excel EERA et le logiciel Cyberquake et valident la modélisation.

PERSPECTIVES

Cette étude montre la possibilité d'utiliser Code_Aster pour calculer les caractéristiques dynamiques des sols adaptées à un accélérogramme donné avec la méthode linéaire-équivalente.

Le fichier de commande actuel peut être adapté pour permettre de modéliser une excitation tri-dimensionnelle avec une colonne d'éléments 3D.

La colonne de sol 1D maillée avec des quadrangles linéaires (QUAD4) peut être "élargie" pour réaliser des calculs d'effets de site 2D sur des bassins de plusieurs centaines de mètres.

Reduction de module et amortissement hysteretique avec la profondeur

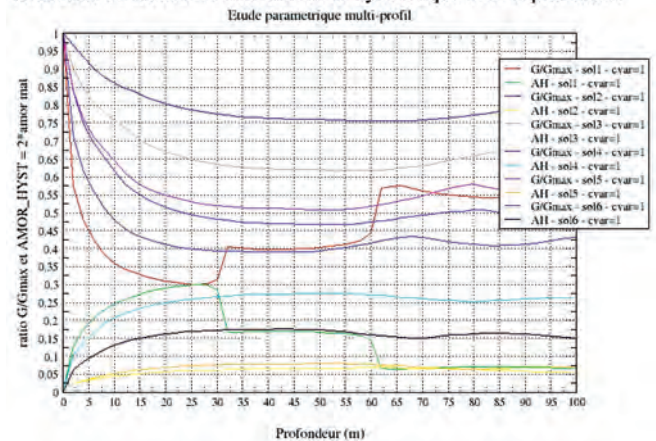


Figure 5 : Comparaison de l'accélérogramme obtenu à -10m avec Code_Aster (rouge) et EERA (noir).