

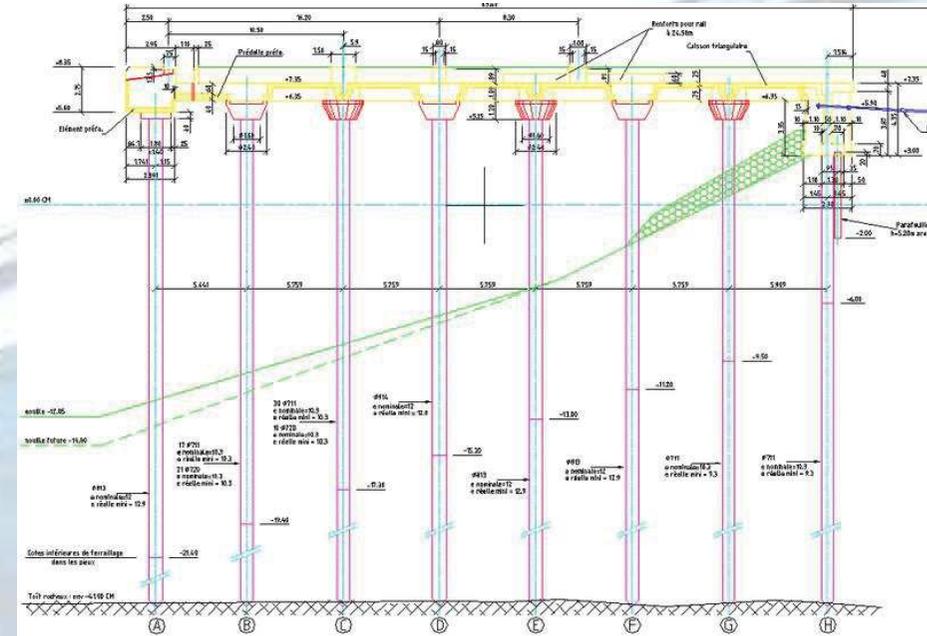
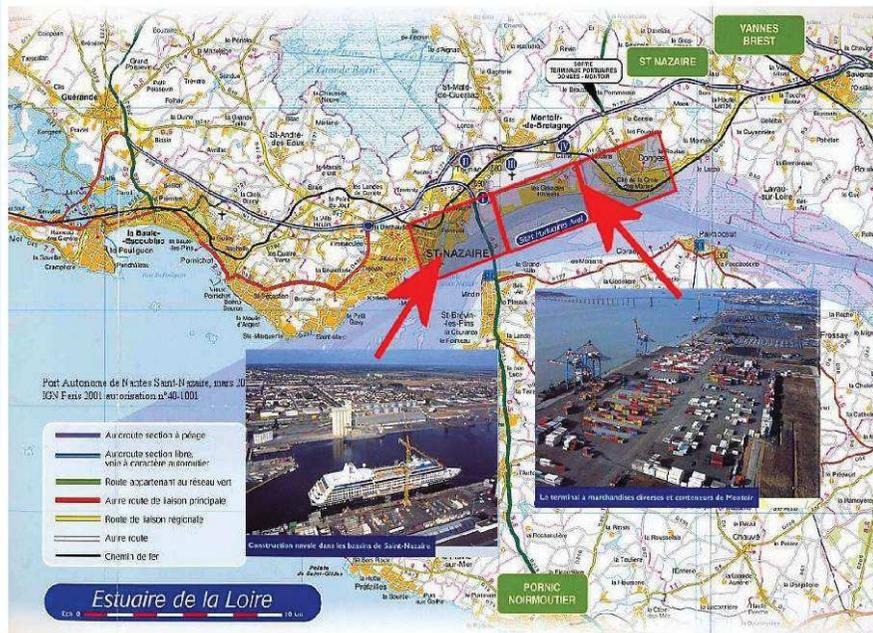
Journées Techniques Ouvrages d'Art 2016



Analyse du comportement
non-linéaire des structures
de quais portuaires sous
solicitations sismiques

Scott GRAINGER (ENTPE/DTecITM)
Denis DAVI (DTerMed)

Présentation de la structure étudiée



- Structure de quai maritime « classique »
- Caractéristiques fournies par le GPMNSN, nouvellement concerné par l'évolution du zonage sismique national

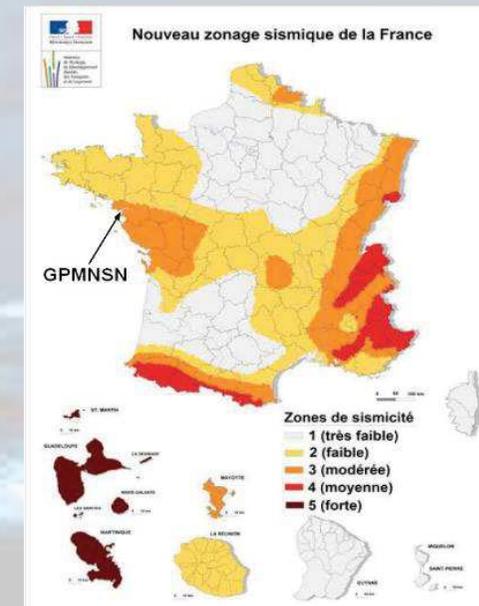
Présentation de la structure étudiée

Spécificités / irrégularités structurales :

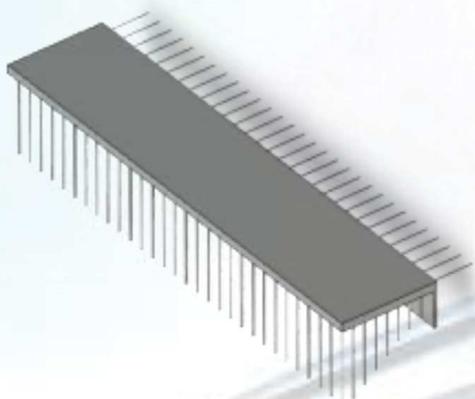
- Forte variabilité des hauteurs d'appui (pieux)
- Dissymétrie du comportement selon la direction transversale (traction des tirants / butée du remblai arrière)

Contexte sismique :

- Zone 3 (modérée) : $a_{gr} = 1,1 \text{ m/s}^2$
- Cat. III ($\gamma_I=1,2$; $a_g = 1,32 \text{ m/s}^2$)
- Classe de sol D ($S = 1,6$)

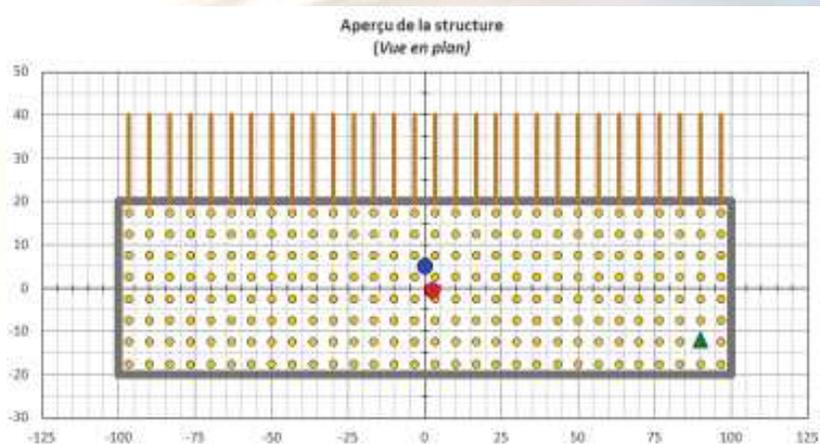


Présentation de la structure



Simplifications géométriques adoptées :

- Dimensions : 200x40x2 m (dalle parallélépipédique rectangulaire)
- 8 files de pieux bi-encastrés de hauteurs variables mais de même section
- 30 tirants arrière de même raideur
- Analyse transversale dans le sens « vers la mer » (dimensionnante)



Objectifs et démarche de l'étude

- Poursuivre l'analyse du comportement d'une structure aux fortes irrégularités structurales
- Intégrer les potentielles sources de non-linéarité par différentes méthodes « quasi-statiques »
- Confronter les résultats obtenus avec une analyse dynamique temporelle non-linéaire menée sur modèle réduit
- Statuer sur la capacité d'une structure de quai « classique » à résister à un séisme de niveau réglementaire

Résultats obtenus par différentes méthodes non-linéaires « quasi-statiques »

- Analyse spectrale en déplacement
- Analyse en poussée progressive « monomodale »
- Analyse en poussée progressive « multimodale »

Analyse spectrale en déplacement

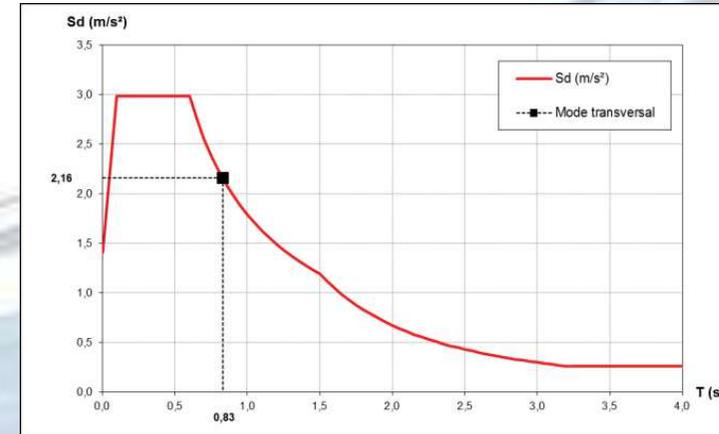
Démarche de calcul

- Calcul des modes propres de vibration (modèle à tablier rigide)
- Évaluation du déplacement sollicitant à partir du spectre de réponse élastique
- Calcul du niveau de ductilité ($\mu_d = \frac{d}{d_y}$) appelée dans les différents éléments (tirants, pieux)
- Comparaison avec les ductilités maximales admissibles

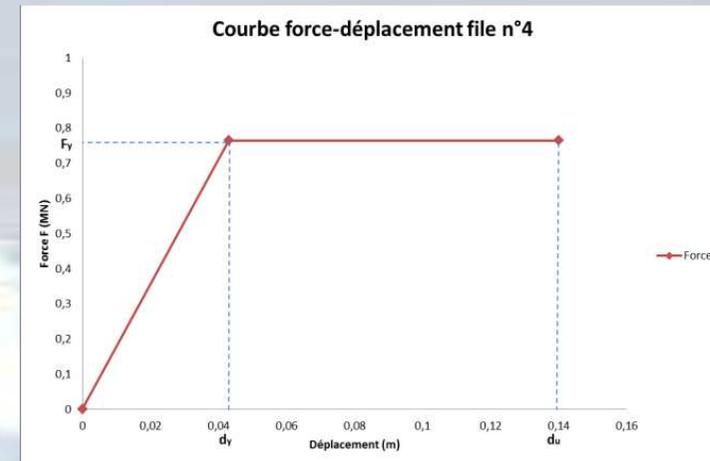
Analyse spectrale en déplacement

Résultats selon la direction transversale :

- $d_{\max} = 6,7$ cm
- $d_y = 3,8$ cm
- $\mu_d = 1,8$
- $\mu_{d \text{ adm}} = 3,7$
- $a_{\max} = 2,2$ m/s²
- Plastifications : tirants + 1 file pieux



Spectre de réponse structure



Courbe force-déplacement pieu

Analyse en poussée progressive « monomodale »

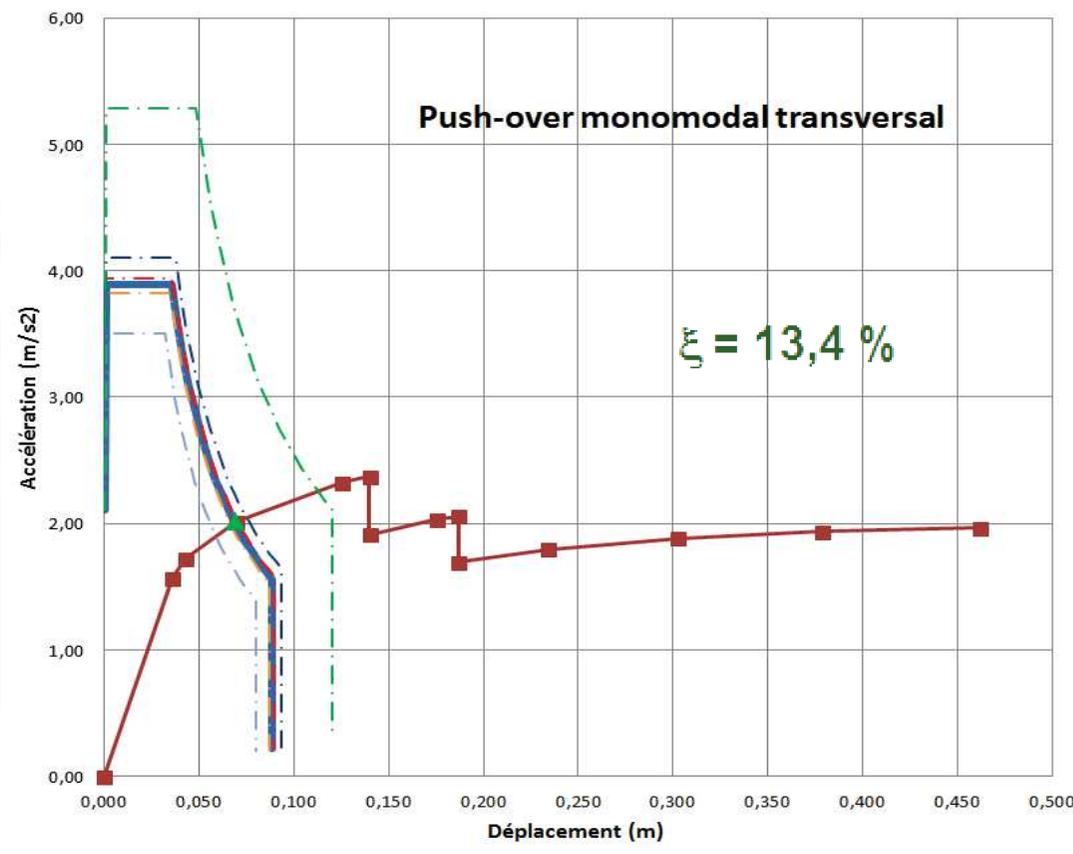
Démarche de calcul

- Poussée selon le mode fondamental (translation horizontale)
- Force horizontale croissante appliquée au centre de gravité de la dalle
- Prise en compte des plastifications/ruptures successives des pieux et des tirants et redistribution des efforts internes
- Tracé de la courbe force-déplacement, puis accélération-déplacement de la structure
- Détermination du point de fonctionnement par intersection avec le spectre réglementaire (itérations sur l'amortissement)

Analyse en poussée progressive « monomodale »

Résultats selon la direction transversale :

- $d_{\max} = 6,9 \text{ cm}$
- $d_y = 3,8 \text{ cm}$
- $\mu_d = 1,8$
- $\mu_{d \text{ adm}} = 3,68$
- $a_{\max} = 2,0 \text{ m/s}^2$
- Plastifications : tirants + 1 file pieux

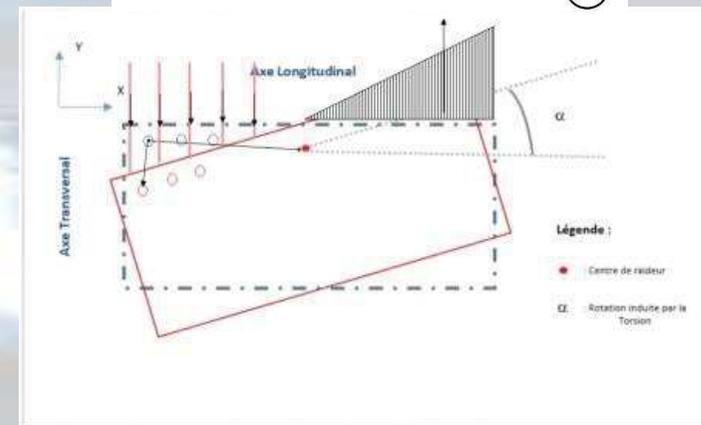
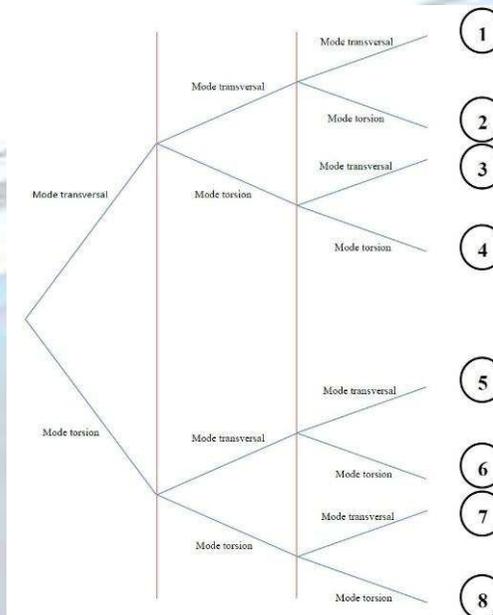


Courbe accélération-déplacement

Analyse en poussée progressive « multimodale »

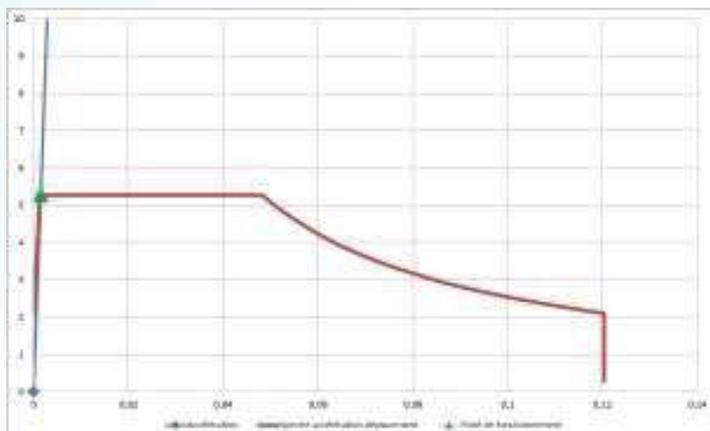
Démarche de calcul :

- Prise en compte du mode de torsion sur l'ouvrage
- Alternance des modes translations/torsion à chaque nouvelle rotule plastique formée
- 8 scénarios différents dans les 2 directions étudiées
- On conserve le scénario le plus défavorable pour lequel la ductilité globale est la plus importante

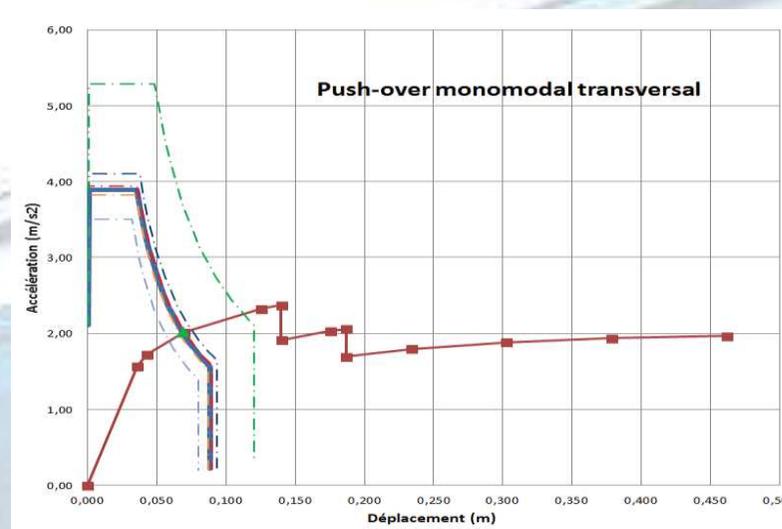


Analyse en poussée progressive « multimodale »

Résultats :



Scénario « torsion uniquement »



Scénario « translation uniquement »

- Mode de torsion « bridé » par la raideur en butée du remblai arrière
- Résultats identiques au push-over monomodal pour chaque direction (longitudinale et transversale)

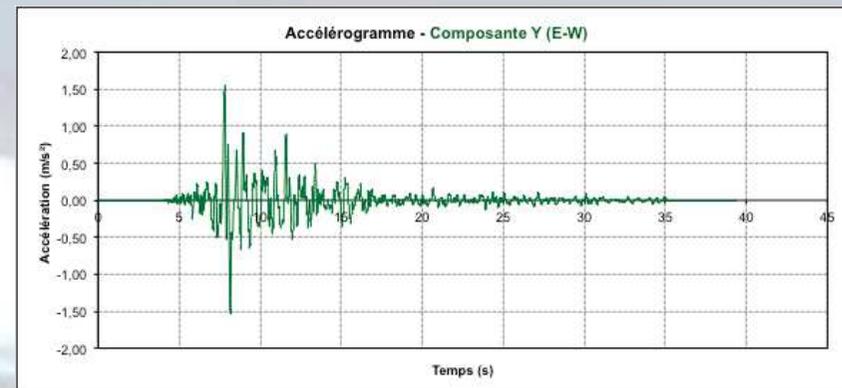
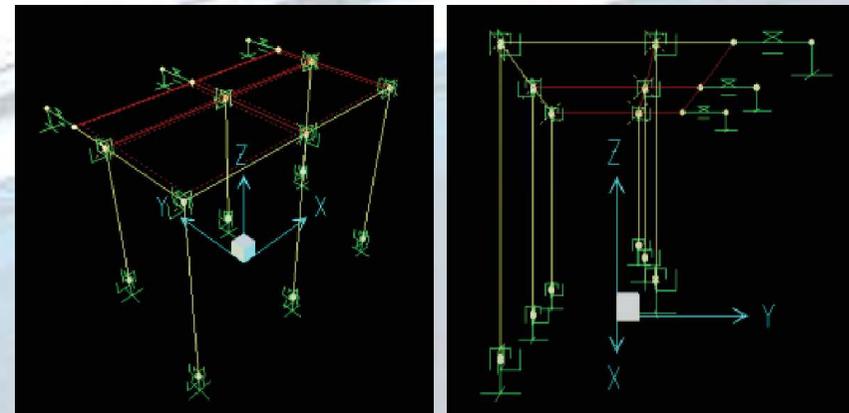
Confrontation avec une analyse dynamique temporelle non-linéaire sur un modèle réduit

Modélisation :

- Logiciel de calcul spécifique SAP 2000 (limité 30 nœuds)
- Modèle réduit correspondant à une portion représentative de la structure complète
- Lois bilinéaires de rotule plastique

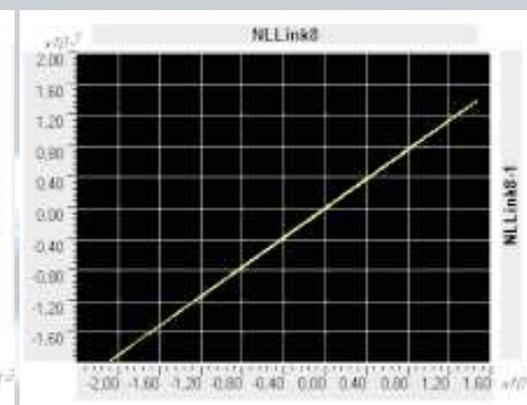
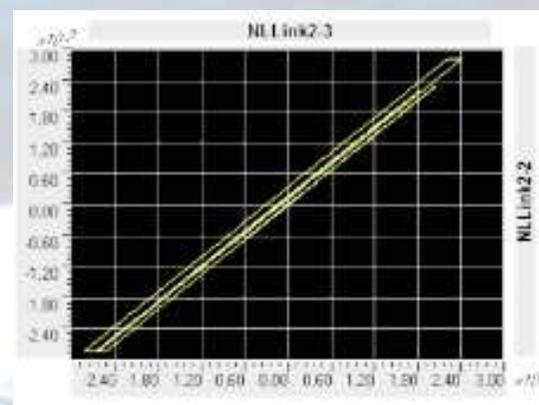
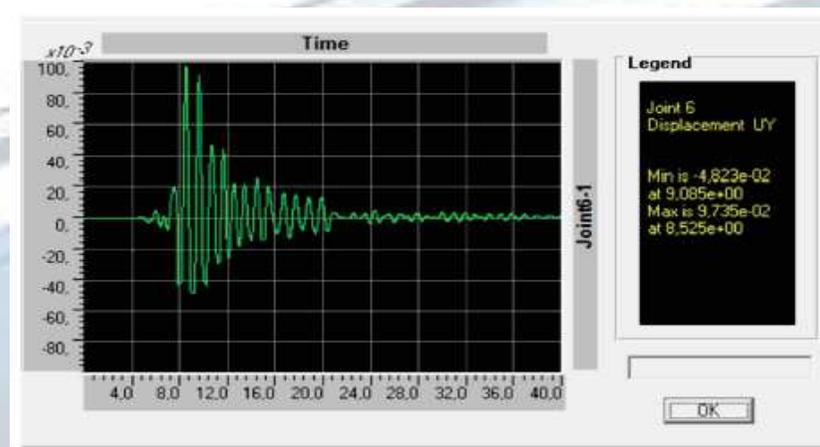
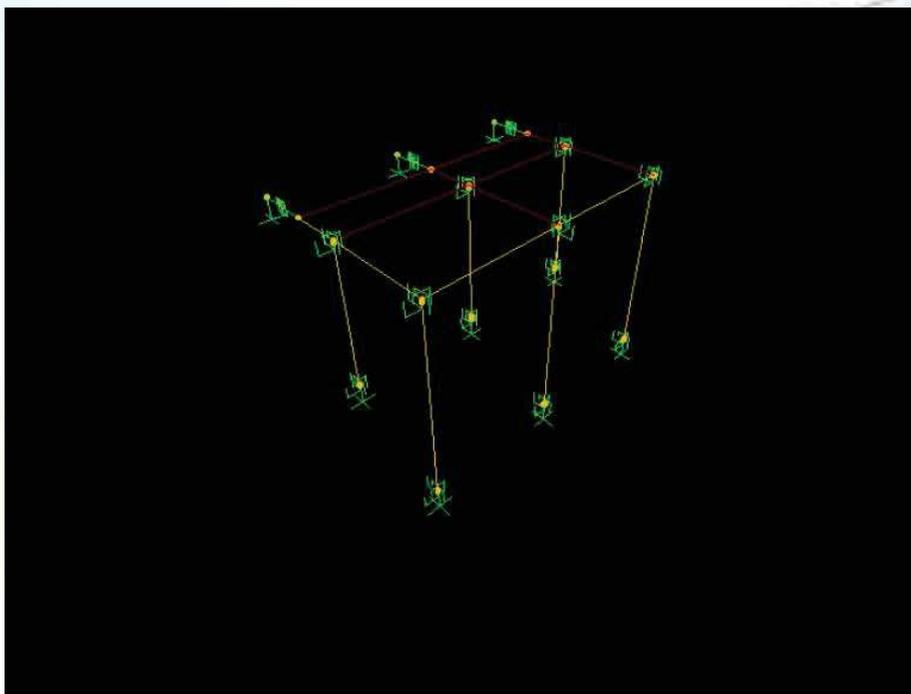
Sollicitation sismique :

- Accélérogramme réel conforme aux conditions sismiques du site
- Calcul par pas de temps (0,05 s)



Confrontation avec une analyse dynamique temporelle non-linéaire sur un modèle réduit

Résultats (direction transversale) :



Confrontation avec une analyse dynamique temporelle non-linéaire sur un modèle réduit

Tableau récapitulatif (direction transversale) :

| | Analyse spectrale | Push-over monomodal | Push-over multimodal | Dynamique temporelle |
|---------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Déplacement | 4,0 cm | 4,2 cm | | 8,1 cm |
| Ductilité appelée μ_d | 1,0 | 1,1 | | 2,2 |
| Accélération dalle | 5,3 m/s ² | 4,7 m/s ² | | 4,5 m/s ² |
| Plastifications | Tirants + 1 file de pieux (pieds) | | | |

Interprétation des résultats

- Déplacements sensiblement plus importants dans le cas de l'analyse dynamique temporelle non-linéaire (x1,6 en long ; x1,9 en trans)
- Pouvant s'expliquer par :
 - Sollicitations et méthodes d'analyse différentes (spectre/accéléro)
 - Prise en compte de la souplesse de la dalle
 - Prise en compte de plastifications pieds/têtes de pieux non-simultanées
 - Effet de « rebond » sur le remblai arrière

Conclusions

- Convergence satisfaisante des méthodes d'analyse non-linéaires quasi-statiques (10 à 15%)
- Réserves de robustesse importantes liées aux non-linéarités (plastifications voire ruptures) et aux redistributions d'efforts internes
- Bonne performance de la structure étudiée sous l'effet des sollicitations sismiques réglementaires définies par la nouvelle législation (zone 3)
- Majoration des niveaux de déplacement dans la direction transversale par l'analyse dynamique avec mise en évidence d'un effet de « rebond » et conservation partielle de l'énergie sismique
- Étude à approfondir (modèle dynamique global EF 3D + étude expérimentale centrifugeuse) dans le cadre d'un partenariat avec l'IFSTTAR

Merci de votre participation



Scott GRAINGER

Cerema / DTecITM

scott.grainger@cerema.fr

Denis DAVI

Cerema / DTerMed

denis.davi@cerema.fr