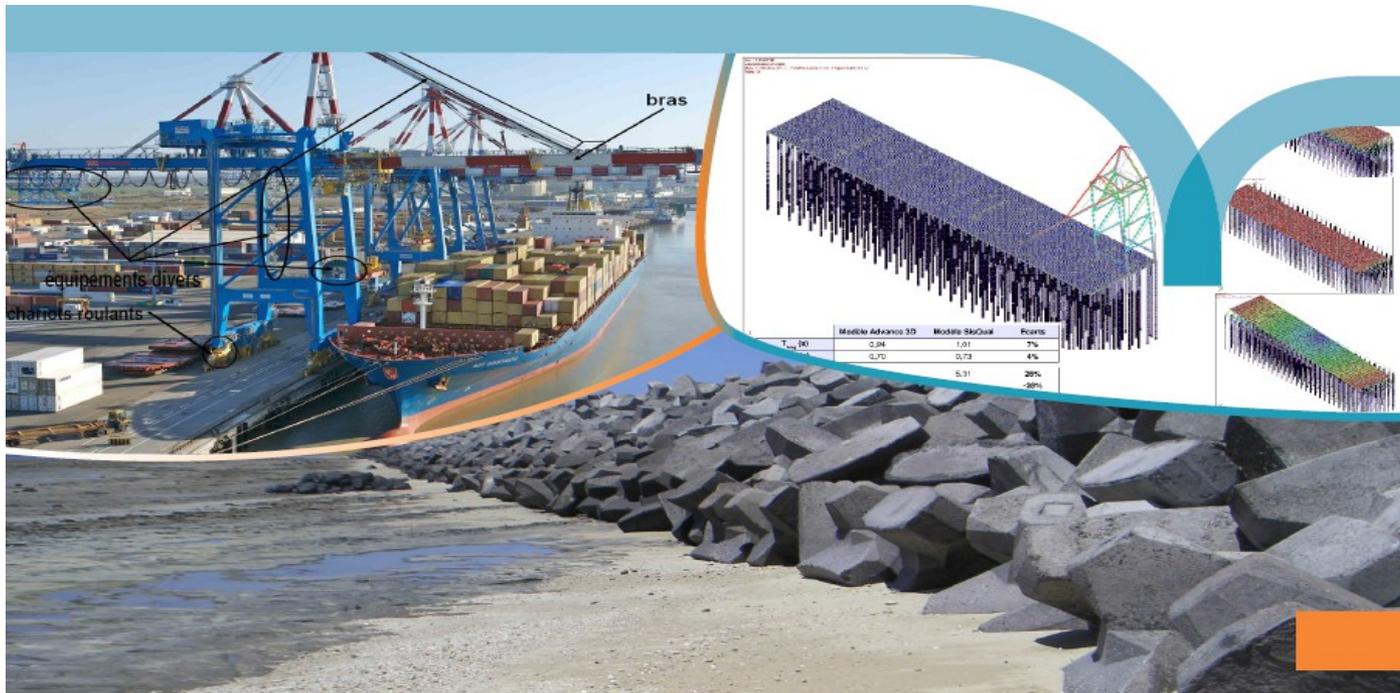


Évaluation du risque sismique sur les structures de type quai sur pieux



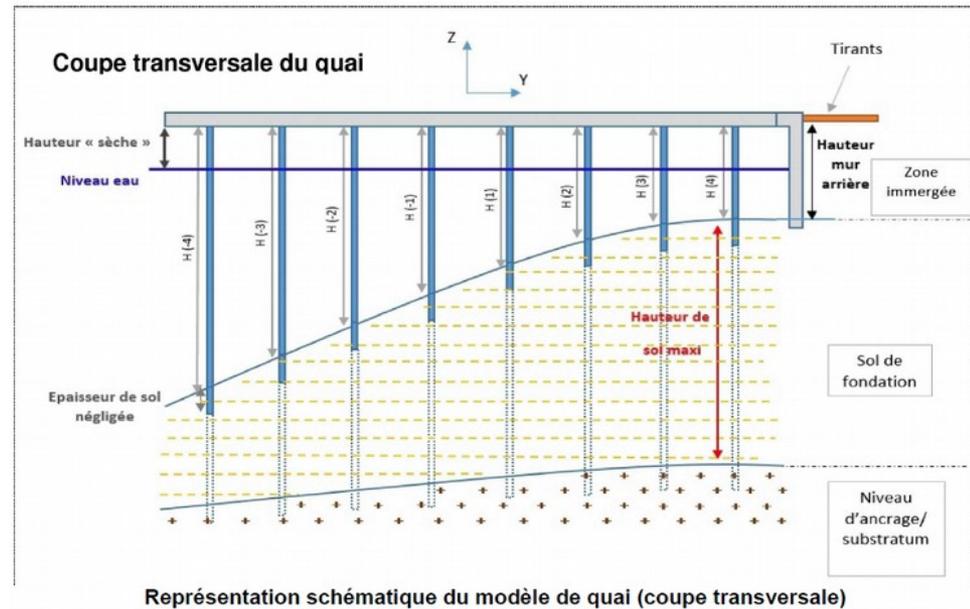
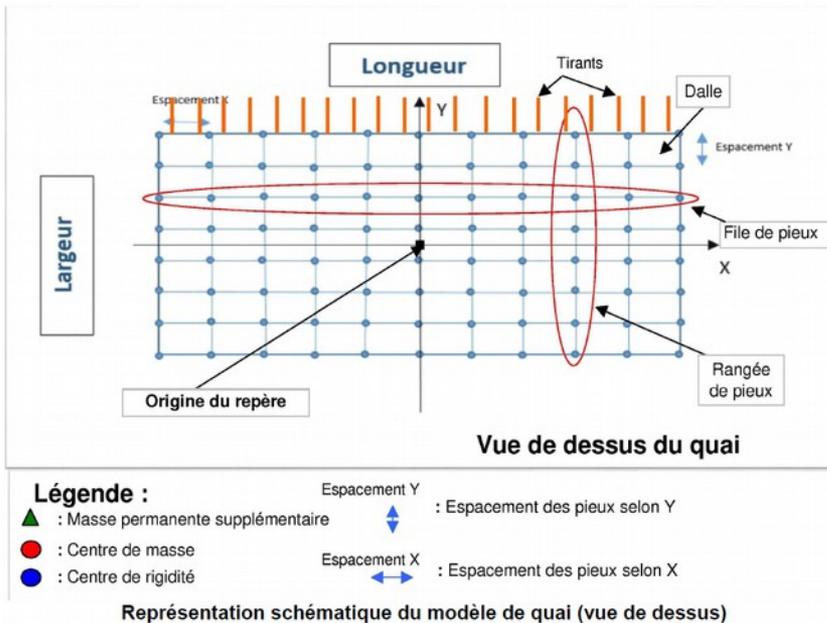
Plan de l'exposé

- Présentation de la méthode d'évaluation simplifiée SisQuai
- Interaction dynamique portique de levage/quai
- Prise en compte des sources de comportement non-linéaires (matériaux et structure)

Plan de l'exposé

- • Présentation de la méthode d'évaluation simplifiée SisQuai
- Interaction dynamique portique de levage/quai
- Prise en compte des sources de comportement non-linéaires (matériaux et structure)

Un outil d'analyse paramétrique simplifiée pour les structures de quai courantes



Un outil d'analyse paramétrique simplifiée pour les structures de quai courantes

Reposant sur :

- Une description simplifiée de la structure
(dalle sur pieux circulaires tubés + tirants arrières)
- Un calcul semi-automatisé des masses, raideurs et résistances locales
- Une analyse spectrale basée uniquement sur le mode fondamental
(1^{er} mode pour chaque direction horizontale)
- La prise en compte simplifiée des effets de torsion
(excentrement forfaitaire des forces horizontales)
- La prise en compte de la poussée arrière des terres et de l'effet cinématique *(déplacement imposé par le sol)*

Un outil d'analyse paramétrique simplifiée pour les structures de quai courantes

Aboutissant au calcul :

- Des efforts internes (V_{pieux} , M_{pieux} , $F_{tirants}$) pour chaque combinaison sismique réglementaire
- D'un facteur de sécurité ($FS = R / S$) associé à chaque élément
- **D'un indice de risque global pour la structure**

Présentation de l'outil

Microsoft Excel - SisQuai_V0.xls

Fichier Edition Affichage Insertion Format Outils Données Fenêtre ? Adobe PDF

80% Arial 10

DONNEES STRUCTURE

Dalle		Tirants		Pieux	
Longueur :	200 m	Nombre :	30	Nombre de rangées (selon X) :	30
Largeur :	40 m	Espacement (selon X) :	5,67 m	Nombre de files (selon Y) :	8
Epaisseur :	2,00 m	Longueur :	20,0 m	Espacement (selon X) :	6,67 m
Masse volumique du béton :	2,5 t/m ³	Diamètre :	85 mm	Espacement (selon Y) :	5,00 m
Masse dalle :	49 000 t	Epaisseur sacrifiée à la corrosion :	3 mm	Diamètre béton :	0,750 m
Masse permanente supplémentaire :	1 236 t	Section de calcul :	0,00490 m ²	Section béton :	0,4418 m ²
Position sur la dalle :		Module de rigidité :	200 000 MPa	Masse volumique du béton :	2,5 t/m ³
- selon X :	90,00 m	Raideur unitaire :	49,6 MN/m	Hypothèse calcul raideur pieux :	hertie fissurée
- selon Y :	-12,00 m	Contrainte limite :	360 MPa	Nature liaison pieux / dalle :	Encastrement
Hauteur mur arrière :	4,0 m	Résistance de calcul $F_{R, tirant}$:	1,76 MN	Inertie de calcul béton :	0,04621 m ⁴
Nature sol à l'arrière de la dalle :	Remblais			$I_{a, béton pieux}$:	35 MPa
Raideur sol à l'arrière de la dalle :	54 000 kN/m ² /m			Module béton pieux (selon BAEL) :	35 942 MPa
				Moment résistant BA $M_{R, BA}$:	1,20 MNm
				Effort tranch. résistant BA $V_{R, BA}$:	0,88 MN
				Diamètre intérieur tube métallique :	0,750 m
				Epaisseur origine (selon plans) :	13 mm
				Epaisseur sacrifiée à la corrosion :	3 mm
				Epaisseur de calcul :	10 mm
				Section de calcul tube :	0,0239 m ²
				Masse volumique de l'acier :	7,5 t/m ³
				Inertie de calcul tubage :	0,04172 m ⁴
				σ_a tubage :	360 MPa
				Module acier tubage :	210 000 MPa
				Moment résistant tube $M_{R, tube}$:	1,81 MNm
				Effort tranch. résistant tube $V_{R, tube}$:	4,24 MN
				Moment résistant total $M_{R, pieu}$:	2,81 MNm
				Effort tranch. résistant total $V_{R, pieu}$:	5,42 MN
				Hauteur sèche :	3,35 m
				Hauteur de sol max :	14,00 m

Aperçu de la structure (Vue en plan)

(Coupe transversale)

Données sismiques / Hypothèses et géométrie / Récapitulatif et résultats / Détails - Spectre a(T) / Détails - Schéma structure / Détails - Analyses & calculs / Détails - Paramètres

Différents onglets

Présentation de l'outil

SPECTRE SISMIQUE EC8-2 - Arrêté 2011

Remarque : → Données à sélectionner ou à saisir

Zone sismique :

$a_{gr} = 1,1 \text{ m/s}^2$

→

Catégorie d'importance :

$\gamma_l = 1,2$

$a_{v,g} = 1,19 \text{ m/s}^2$

Classe de sol :

Direction d'étude :

Spectre de type :

Spectre type 2

Coef de comportement q : (spectre calcul)

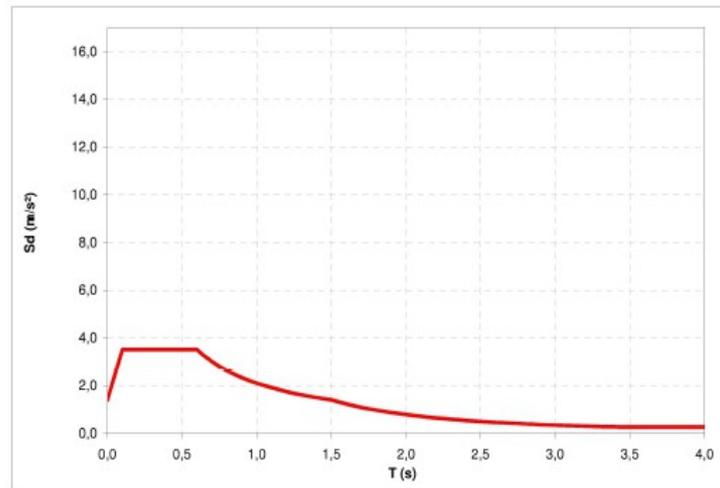
Amortissement matériau :

$\xi = 0,05$

sans csq sur Sd : intégré dans q>1)

Coefficient d'amplification topographique :

$\tau =$



Onglet "Données sismiques"

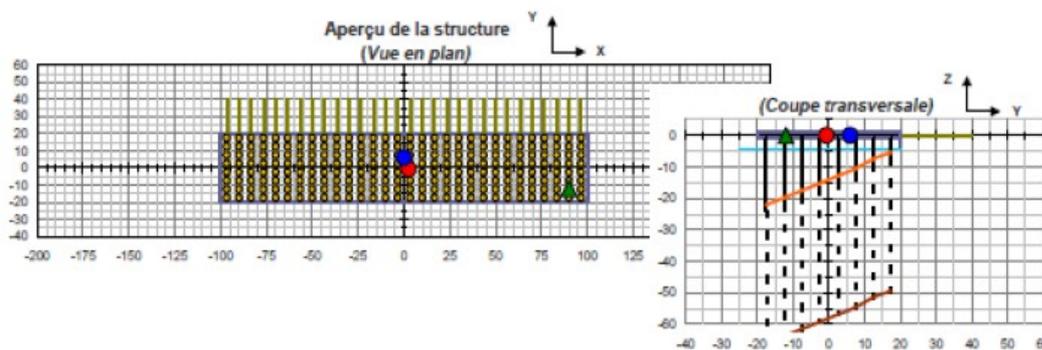
Présentation de l'outil

DONNEES STRUCTURE

Dalle	
Longueur :	200 m
Largeur :	40 m
Epaisseur :	2,00 m
Masse volumique du béton :	2,5 t/m ³
Masse dalle :	40 000 t
Masse permanente supplémentaire :	1 236 t
Position sur la dalle :	
- selon X :	90,00 m
- selon Y :	-12,00 m
Hauteur mur arrière : 4,0 m	
Nature sol à l'arrière de la dalle : Remblais	
Raideur sol à l'arrière de la dalle : 54 000 kN/m ² /m	

Tranch	
Nombre :	30
Espacement (selon X) :	6,67 m
Longueur :	20,0 m
Diamètre :	85 mm
Epaisseur sacrifiée à la corrosion :	3 mm
Section de calcul :	0,00490 m ²
Module de rigidité :	200 000 MPa
Raideur unitaire :	49,0 MN/m
Contrainte limite :	360 MPa
Résistance de calcul $F_{Rd,trans}$:	1,76 MN

Pieux	
Nombre de rangées (selon X) :	30
Nombre de files (selon Y) :	8
Espacement (selon X) :	6,67 m
Espacement (selon Y) :	5,00 m
Diamètre béton :	0,750 m
Section béton :	0,4418 m ²
Masse volumique du béton :	2,5 t/m ³
Hypothèse calcul raideur pieux :	Inertie fissurée
Nature liaison pieux / dalle :	Encastrement
Inertie de calcul béton :	0,00621 m ⁴
f_{ck} béton pieux :	35 MPa
Module béton pieux (selon BAEL) :	35 982 MPa
Moment résistant BA $M_{Rd,BA}$:	1,20 MNm
Effort tranch. résistant BA $V_{Rd,BA}$:	0,88 MN
Diamètre intérieur tube métallique :	0,750 m
Epaisseur origine (selon plans) :	13 mm
Epaisseur sacrifiée à la corrosion :	3 mm
Epaisseur de calcul :	10 mm
Section de calcul tube :	0,0239 m ²
Masse volumique de l'acier :	7,5 t/m ³
Inertie de calcul tubage :	0,00172 m ⁴
f_{yk} tubage :	360 MPa
Module acier tubage :	210 000 MPa
Moment résistant tube $M_{Rd,tube}$:	1,61 MNm
Effort tranch. résistant tube $V_{Rd,tube}$:	4,24 MN
Moment résistant total $M_{Rd,tot}$:	2,81 MNm
Effort tranch. résistant total $V_{Rd,tot}$:	5,12 MN
Hauteur sèche :	3,35 m
Hauteur de sol maxi :	44,00 m
Type de sol couche superficielle :	Sables
Epaisseur de sol négligée :	3,0 diamètres



Files de pieux														File de tranch				
Y (m)	-	-	-	-	-17,50	-12,50	-7,50	-2,50	-	2,50	7,50	12,50	17,50	-	-	-	-	-
H_{max} (m)	-	-	-	-	21,00	16,75	16,45	14,15	-	11,85	9,55	6,35	4,35	-	-	-	-	-
H_{min} (m)	-	-	-	-	23,25	21,00	18,70	16,40	-	14,10	11,80	8,60	6,60	-	-	-	-	-
- Caractéristiques unitaires																		
K (MN/m)	-	-	-	-	0,96	0,76	1,07	1,59	-	2,51	4,28	11,05	24,44	-	-	-	-	40,02
$M_{Rd,unitaire}$ (t)	-	-	-	-	14,32	13,48	12,00	10,53	-	9,05	7,57	5,52	4,24	-	-	-	-	-
$M_{Rd,unitaire}$ (t)	-	-	-	-	3,85	3,33	2,79	2,26	-	1,72	1,19	0,44	0,00	-	-	-	-	-
- Caractéristiques files																		
K (MN/m)	-	-	-	-	16,77	22,76	32,24	47,79	-	75,21	128,31	331,45	733,30	-	-	-	-	1470,50
$M_{Rd,unitaire}$ (t)	-	-	-	-	447,63	404,31	360,03	315,75	-	271,47	227,19	165,58	127,07	-	-	-	-	-
$M_{Rd,unitaire}$ (t)	-	-	-	-	115,60	99,88	83,82	67,75	-	51,69	35,62	13,27	0,00	-	-	-	-	-

Onglet "Récapitulatif et résultats"

Présentation de l'outil

Masse totale M = 44 023 t
 Raideur totale selon X : $K_{\text{total}} = 1\,388$ MN/m
 Raideur totale selon Y : $K_{\text{total}} = 2\,858$ MN/m

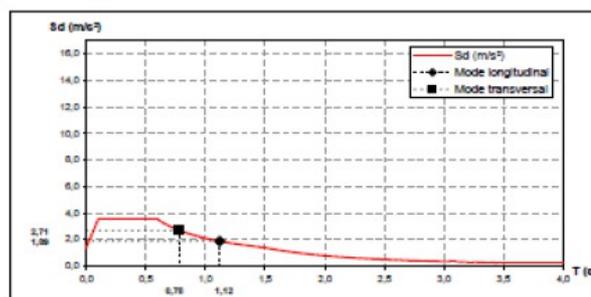
Position centre de masse :
 - selon X : 2,53 m
 - selon Y : -0,64 m

Position centre de rigidité :
 - selon X : 0,00 m
 - selon Y : 6,01 m

ANALYSE SISMIQUE

Effets inertiels (réponse vibratoire)

Récapitulatif des données sismiques		
Zone	Z3 - modérée	$a_{0,0} = 1,1$ m/s ²
Cat. Imp III : Moyenne	$\tau = 1,2$	
Sol	Classe D	$a_{0,5} = 1,32$ m/s ²
Topo	$\tau = 1,0$	
q	1,5	
Spectre de calcul		$a_{1,0} = 1,10$ m/s ²
Direction	Horizontale	
Type	Métropole	



Période selon X : $T_{\text{long}} = 1,12$ s
 Période selon Y : $T_{\text{trans}} = 0,78$ s

Analyse longitudinale (selon X)

• Effet translation :

Réponse spectrale :
 $S_d = 1,89$ m/s²
 $d_{\text{long}} = 0,090$ m

Effort total :
 $F_{\text{long,tot}} = 83,08$ MN

Efforts maxi dans les pieux :
 $V_{\text{max},\text{long,tot}} = 1,46$ MN
 $V_{\text{min},\text{long,tot}} = 0$ MN
 $M_{\text{max},\text{long,tot}} = 4,83$ MNm
 $M_{\text{min},\text{long,tot}} = 0$ MNm

Efforts maxi dans les tirants :
 $F_{\text{long,tir,tot}} = 0$ MN

• Effet torsion :

Excentr théorique Y : 6,65 m
 Excentr accidentel Y : 2,00 m (= Largeur x 5%)

Moment torsion total :
 $M_{\text{long,tot}} = 718,67$ MNm
 $\theta_{\text{long}} = 9,04E-06$ rad

Efforts maxi dans les pieux :
 $V_{\text{max},\text{long,tot}} = 0,00$ MN
 $V_{\text{min},\text{long,tot}} = 0,02$ MN
 $M_{\text{max},\text{long,tot}} = 0,01$ MNm
 $M_{\text{min},\text{long,tot}} = 0,07$ MNm

Efforts maxi dans les tirants :
 $F_{\text{long,tir,tot}} = 0,04$ MN

Analyse transversale (selon Y)

• Effet translation :

Réponse spectrale :
 $S_d = 2,71$ m/s²
 $d_{\text{trans}} = 0,063$ m

Effort total :
 $F_{\text{trans,tot}} = 119,24$ MN

Efforts maxi dans les pieux :
 $V_{\text{max},\text{trans,tot}} = 0$ MN
 $V_{\text{min},\text{trans,tot}} = 1,02$ MN
 $M_{\text{max},\text{trans,tot}} = 0$ MNm
 $M_{\text{min},\text{trans,tot}} = 3,36$ MNm

Efforts maxi dans les tirants :
 $F_{\text{trans,tir,tot}} = 2,04$ MN

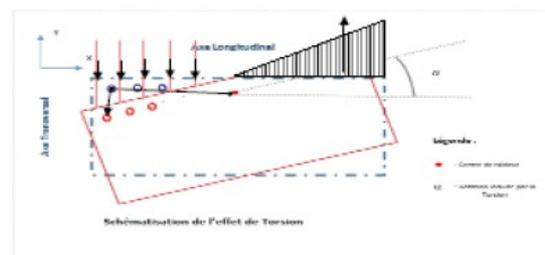
• Effet torsion :

Excentr théorique X : 2,53 m
 Excentr accidentel X : 10,00 m (= Longueur x 5%)

Moment torsion total :
 $M_{\text{trans,tot}} = 1\,493,66$ MNm
 $\theta_{\text{trans}} = 1,88E-05$ rad

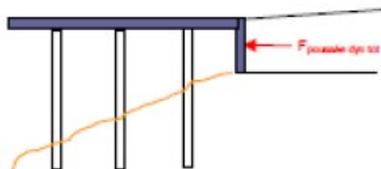
Efforts maxi dans les pieux :
 $V_{\text{max},\text{trans,tot}} = 0,01$ MN
 $V_{\text{min},\text{trans,tot}} = 0,04$ MN
 $M_{\text{max},\text{trans,tot}} = 0,02$ MNm
 $M_{\text{min},\text{trans,tot}} = 0,15$ MNm

Efforts maxi dans les tirants :
 $F_{\text{trans,tir,tot}} = 0,09$ MN



Onglet "Récapitulatif et résultats"

Présentation de l'outil



• Effet poussée dynamique des terres à l'arrière du mur (selon Monobe-Okabe) :

Effort de poussée total :
 $F_{poussée\ dyn\ tot} = 19,94$ MN

Efforts maxi dans les pieux :
 $V_{max_x_poussée} = 0$ MN
 $V_{max_y_poussée} = 0,17$ MN
 $M_{max_x_poussée} = 0$ MNm
 $M_{max_y_poussée} = 0,56$ MNm

Efforts maxi dans les tirants :
 $F_{tirant_max_poussée} = 0,34$ MN

Analyse longitudinale (selon X)

• Effet cumulé (translation + torsion) :

Efforts maxi dans les pieux :

$V_{max_x} = 1,47$ MN
 $V_{max_y} = 0,02$ MN
 $M_{max_x} = 4,84$ MNm
 $M_{max_y} = 0,07$ MNm

Efforts maxi dans les tirants :

$F_{tirant_max} = 0,04$ MN

Analyse transversale (selon Y)

• Effet cumulé (translation + torsion + poussée terre) :

Efforts maxi dans les pieux :

$V_{max_x} = 0,01$ MN
 $V_{max_y} = 1,23$ MN
 $M_{max_x} = 0,02$ MNm
 $M_{max_y} = 4,07$ MNm

Efforts maxi dans les tirants :

$F_{tirant_max} = 2,48$ MN

• Combinaison 1 : $E_{stat} + 0,3 E_{dyn}$

Efforts maxi dans les pieux :

$V_{x,z} = 1,47$ MN
 $V_{x,y} = 0,39$ MN
 $M_{x,z} = 4,84$ MNm
 $M_{x,y} = 1,29$ MNm

Efforts maxi dans les tirants :

$F_{tirant} = 0,79$ MN

⇒ Résultante des composantes X, Y

$V_{résult} = 1,52$ MN
 $M_{résult} = 5,01$ MNm

• Combinaison 2 : $0,3 E_{stat} + 1,0 E_{dyn}$

Efforts maxi dans les pieux :

$V_{x,z} = 0,45$ MN
 $V_{x,y} = 1,24$ MN
 $M_{x,z} = 1,47$ MNm
 $M_{x,y} = 4,10$ MNm

Efforts maxi dans les tirants :

$F_{tirant} = 2,49$ MN

⇒ Résultante des composantes X, Y

$V_{résult} = 1,32$ MN
 $M_{résult} = 4,35$ MNm

• Enveloppe (combi 1 ; combi 2) :

Efforts inertiels maxi dans les pieux :

$V_{pieux_inertiel} = 1,52$ MN
 $M_{pieux_inertiel} = 5,01$ MNm

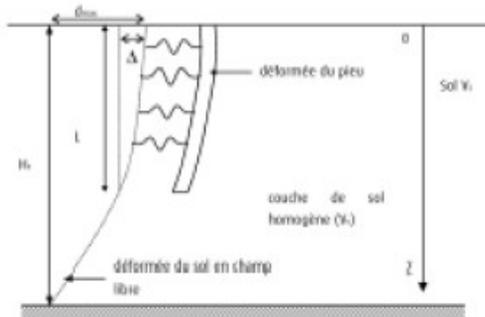
Efforts inertiels maxi dans les tirants :

$F_{tirant_inertiel} = 2,49$ MN

Onglet "Récapitulatif et résultats"

Présentation de l'outil

Effet cinématique (déplacement imposé)



$H_s = 44,00$ m
 Classe de sol : D
 $V_s = 92$ m/s2
 $d_{max} = 0,104$ m
 $d_p = 0,048$ m

$d_{max} = 0,048$ m

Efforts cinématiques maxi dans les pieux :

$V_{pieux_cinematique} = 0,00$ MN
 $M_{pieux_cinematique} = 0,04$ MNm

Efforts cinématiques maxi dans les tirants :

$F_{tirant_cinematique} = 2,33$ MN

Sollicitations enveloppes et niveaux de risque

• Sollicitations enveloppe (effet inertiel ; effet cinématique) :

Efforts maxi dans les pieux :

$V_{sol_max} = 1,52$ MN
 $M_{sol_max} = 5,01$ MNm

Efforts maxi dans les tirants :

$F_{tirant_max} = 2,40$ MN

• Facteurs de sécurité :

$V_{sol_max} / V_{sol_max} = 3,37$
 $M_{sol_max} / M_{sol_max} = 0,56$

$F_{tirant_max} / F_{tirant_max} = 0,71$

• Niveaux de risque :

$R_{pieu\ tranch.} = 0,00$ Risque de rupture de pieu par effort tranchant peu probable
 $R_{pieu\ flexion} = 0,91$ Risque de rupture de pieu par flexion avéré
 $R_{tirant} = 0,75$ Risque de rupture de tirant avéré

Onglet "Récapitulatif et résultats"

Présentation de l'outil

Pieux	V _{z,y}															F ₂ Tirants				
	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6		7	8		
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60	-	
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58	-
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	56	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	54	-
26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52	-
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	-
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	46	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	44	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36	-
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	2,40
14	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,22	0,56	1,24	-	-	-	-	-	28	2,49
13	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,22	0,56	1,23	-	-	-	-	-	26	2,48
12	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,22	0,56	1,23	-	-	-	-	-	24	2,47
11	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,21	0,55	1,23	-	-	-	-	-	22	2,46
10	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,21	0,55	1,22	-	-	-	-	-	20	2,46
9	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,21	0,55	1,22	-	-	-	-	-	18	2,45
8	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,55	1,22	-	-	-	-	-	16	2,44
7	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,55	1,21	-	-	-	-	-	14	2,44
6	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,55	1,21	-	-	-	-	-	12	2,43
5	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,55	1,21	-	-	-	-	-	10	2,42
4	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,54	1,20	-	-	-	-	-	8	2,41
3	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,54	1,20	-	-	-	-	-	6	2,41
2	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,54	1,20	-	-	-	-	-	4	2,40
1	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,54	1,19	-	-	-	-	-	2	2,39
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-1	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,54	1,19	-	-	-	-	-	-	-
-2	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,54	1,20	-	-	-	-	-	-	-
-3	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,54	1,20	-	-	-	-	-	-	-
-4	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,54	1,20	-	-	-	-	-	-	-
-5	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,55	1,21	-	-	-	-	-	-	-
-6	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,55	1,21	-	-	-	-	-	-	-
-7	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,55	1,21	-	-	-	-	-	-	-
-8	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,55	1,22	-	-	-	-	-	-	-
-9	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,21	0,55	1,22	-	-	-	-	-	-	-
-10	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,21	0,55	1,22	-	-	-	-	-	-	-
-11	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,21	0,55	1,23	-	-	-	-	-	-	-
-12	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,22	0,56	1,23	-	-	-	-	-	-	-
-13	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,22	0,56	1,23	-	-	-	-	-	-	-
-14	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,22	0,56	1,24	-	-	-	-	-	-	-
-15	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,22	0,56	1,24	-	-	-	-	-	-	-
-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

max : 1,24 MN
min : 0,03 MN

2,49 MN
2,39 MN

Onglet "Détails – Analyses & calculs" - Combinaison 1, composante Vy

Application sur un cas d'étude test

Structure « type » du Grand Port Maritime de Nantes St-Nazaire, partenaire de l'étude dans le cadre d'une convention avec la DTecEMF du Cerema

- GPMNSN = 1^{er} port de la façade atlantique française
- 3 000 escales de navires marchands /an
- trafic extérieur annuel de l'ordre de 30 M de tonnes
- 2,7 milliards d'euros de valeur ajoutée et + de 25 000 emplois dans les régions du grand Ouest
- Désormais en zone de sismicité 3 (modérée), autrefois en zone 0 (négligeable)



Application sur un cas d'étude test

Structure « type » du Grand Port Maritime de Nantes St-Nazaire, partenaire de l'étude dans le cadre d'une convention avec la DTecEMF du Cerema

Résultats obtenus :

- Hypothèse 1 :

*Cat. III (période retour 800 ans)
q=1,5 (duct. limitée)*

- Niveaux de risque :

$R_{\text{pieu tranch.}} = 0,00$ Risque de rupture de pieu par effort tranchant peu probable
 $R_{\text{pieu flexion}} = 0,85$ Risque de rupture de pieu par flexion avéré

$R_{\text{tirant}} = 0,79$ Risque de rupture de tirant avéré

- Hypothèse 2 :

*Cat. II (période retour 475 ans)
q=3 (ductile)*

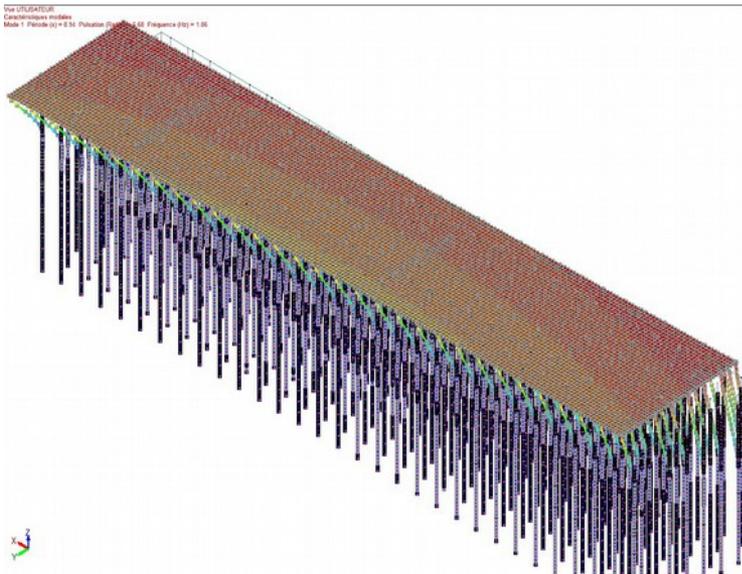
- Niveaux de risque :

$R_{\text{pieu tranch.}} = 0,00$ Risque de rupture de pieu par effort tranchant peu probable
 $R_{\text{pieu flexion}} = 0,24$ Risque de rupture de pieu par flexion peu probable

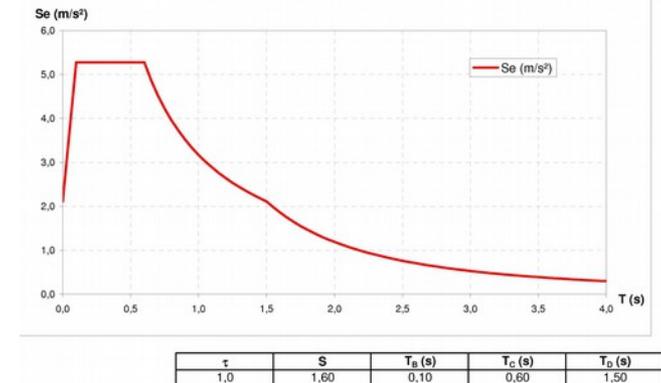
$R_{\text{tirant}} = 0,57$ Risque de rupture de tirant possible

Application sur un cas d'étude test

- Validation par comparaison avec modèle EF – 3D
 - Méthode d'analyse retenue : spectrale multi-modale



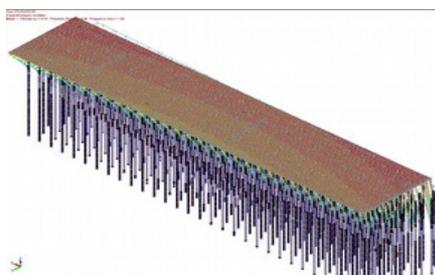
- Zone 3 (modérée) : $a_{gr} = 1,1 \text{ m/s}^2$
- Classe de sol D ($S=1,6$)
- Cat. III ($\gamma_I=1,2$; $a_g = 1,32 \text{ m/s}^2$)
- $q = 1$
- Amortissement $\xi = 5 \%$



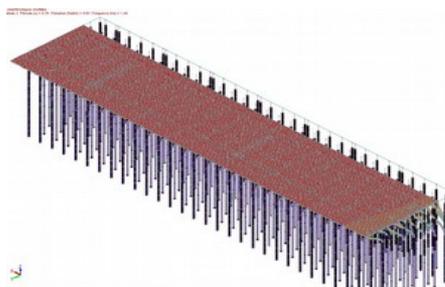
Se : Spectre élastique horizontal

Application sur un cas d'étude Test

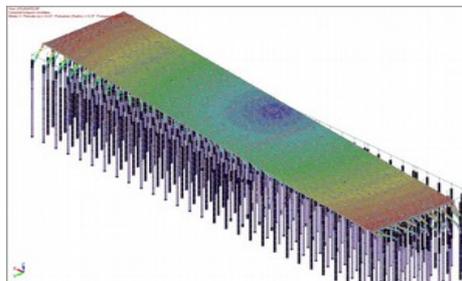
- Validation par comparaison avec modèle EF – 3D
 - Plus-values du modèle EF par rapport à SisQuai



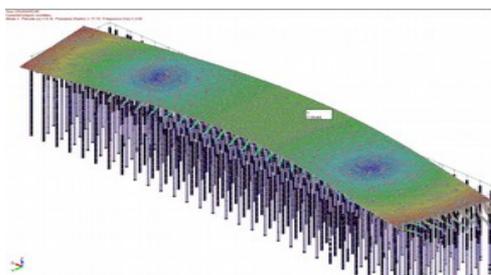
Mode 1 : $T = 0,94 \text{ s}$
(translation X)



Mode 2 : $T = 0,70 \text{ s}$
(translation Y)



Mode 3 : $T = 0,67 \text{ s}$
(torsion axe Z)



Mode 4 : $T = 0,35 \text{ s}$
(Déformation transversale dalle)

- Prise en compte déformabilité dalle
- Modélisation directe raideur sol autour des pieux (*pénétration déformation pieux dans sol calculée automatiquement*)
- Prise en compte des modes supérieurs de vibration
- Calcul direct du mode de torsion et de sa réponse spectrale (*mais soumis à approche en fourchette*)

Application sur un cas d'étude Test

- Validation par comparaison avec modèle EF – 3D
 - Limites du modèle EF-3D

Analyse symétrique

- ➔ Modes transversaux valables pour un seul sens
- ➔ Mode de torsion erroné

➔ Nécessite un calcul en fourchette (ou enveloppe)

- Modèle raideur tirant
- Modèle raideur sol arrière en butée

	Raideur tirants (=> mer)	Raideur butée (=> terre)	Enveloppe
$M_{\max \text{ pieu_BA}}$ (MNm)	4,20	3,64	4,20
$V_{\max \text{ pieu_BA}}$ (MN)	1,99	1,71	1,99
$F_{\max \text{ tirant}}$ (MN)	3,05	-	3,05

Application sur un cas d'étude Test

- Validation par comparaison avec modèle EF – 3D
 - Résultats

	Modèle Advance 3D	Modèle SisQuai	Ecart
T_{long} (s)	0,94	1,01	7%
T_{trans} (s)	0,70	0,73	4%
$M_{\text{max pieu_BA}}$ (MNm)	4,20	5,31	26%
$V_{\text{max pieu_BA}}$ (MN)	1,99	1,44	-28%
$F_{\text{max tirant}}$ (MN)	3,05	3,01	-1%

- Écarts de 4 à 7 % sur les périodes propres
- Écarts de l'ordre de ± 30 % sur les sollicitations induites dans les différents éléments

Application sur un cas d'étude Test

- Validation par comparaison avec modèle EF – 3D
 - Analyse de l'influence de la variabilité de certains paramètres de calcul sur les résultats :
 - Masse de portique rajoutée
 - Niveau marée : **haute / basse**
 - Caractéristiques de sol : **sol rocheux / sol très mou**
 - Caractéristiques des pieux :
 - **avec ou sans chemisage,**
 - **hypothèse béton fissuré ou non fissuré**

Application sur un cas d'étude Test

- Validation par comparaison avec modèle EF – 3D
 - Analyse de l'influence de la variabilité de certains paramètres de calcul sur les résultats :
 - ➔ Écarts très majoritairement inférieurs à $\pm 40\%$
 - ➔ Interprétation à rechercher essentiellement dans la relation M/V dans les pieux :
 - *Déformabilité de la dalle*
 - *Variabilité des diamètres de pieux*
 - *Évaluation forfaitaire de la hauteur de sol négligée autour des pieux, semblant dépendre du rapport de rigidité sol/pieu*

Conclusions et suites à donner

- Élaboration d'une feuille de calcul paramétrée pour l'analyse simplifiée de la vulnérabilité sismique des structures portuaires classiques de type « dalles sur pieux ancrées latéralement par tirants »
- Nombre de paramètres volontairement limité à saisir par l'utilisateur, permet de traiter rapidement un nombre important d'ouvrages (ou de *familles d'ouvrages*)
- Aboutit au calcul des sollicitations maximales dans pieux et tirants et à l'évaluation d'un indice de risque de rupture en fonction du contexte sismique
- Précision de l'ordre de $\pm 40\%$ par rapport à une modélisation plus sophistiquée (et beaucoup plus consommatrice) aux EF 3D

Conclusions et suites à donner

- Jugé acceptable compte tenu :
 - des objectifs de l'outil SisQuai (évaluation sommaire préliminaire)
 - du niveau d'incertitude classiquement associé aux analyses sismiques
- Étude à poursuivre (version V1) pour :
 - Analyser (et si possible neutraliser) les sources de divergence les plus importantes
 - Rendre l'outil systématiquement défavorable et sécuritaire par rapport aux résultats de l'analyse plus sophistiquée par EF
 - Intégrer les risques d'instabilité de pente (glissement), notamment en cas de liquéfaction des sols (*à aborder dans une note de problématique spécifique aux aspects géotechniques*)
 - Évaluer les effets de l'interaction dynamique quai/portique et des potentielles sources de non-linéarité

Plan de l'exposé

- Présentation de la méthode d'évaluation simplifiée SisQuai
- • Interaction dynamique portique de levage/quai
- Prise en compte des sources de comportement non-linéaires (matériaux et structure)

Présentation de la structure étudiée

- Structure du portique porte-conteneurs (1 236 t)

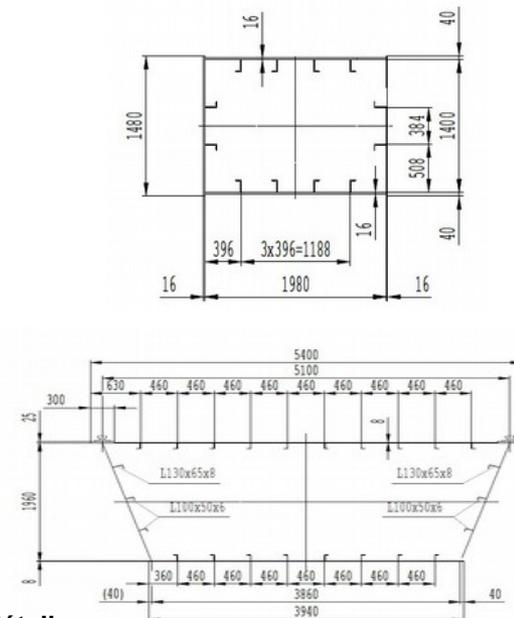
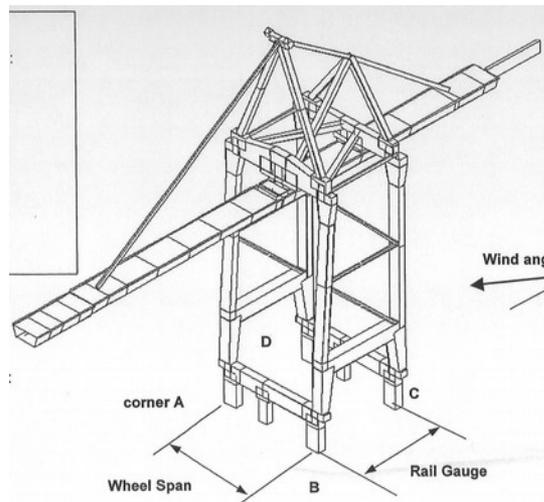
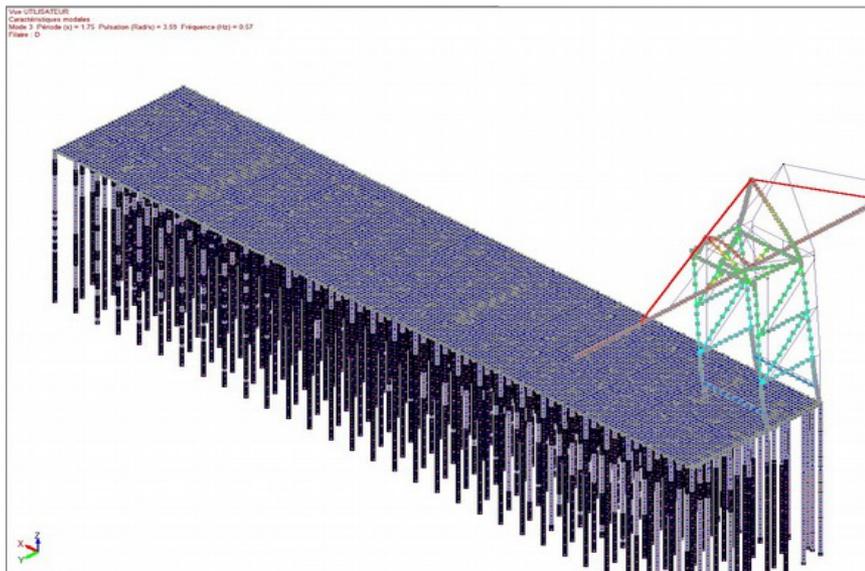


Schéma général du portique et plans de détail des sections des jambes (haut) et du bras (bas)
Plans Copyright Konecranes

Modèle de calcul



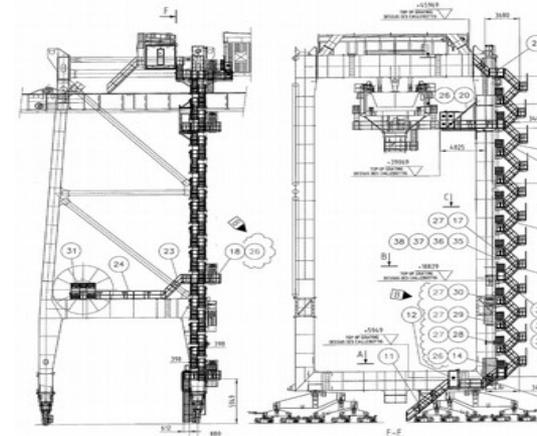
Modèle de calcul général Advance@

2 configurations testées :

- Portique centré
- Portique excentré (dimensionnante)

Simplifications admises :

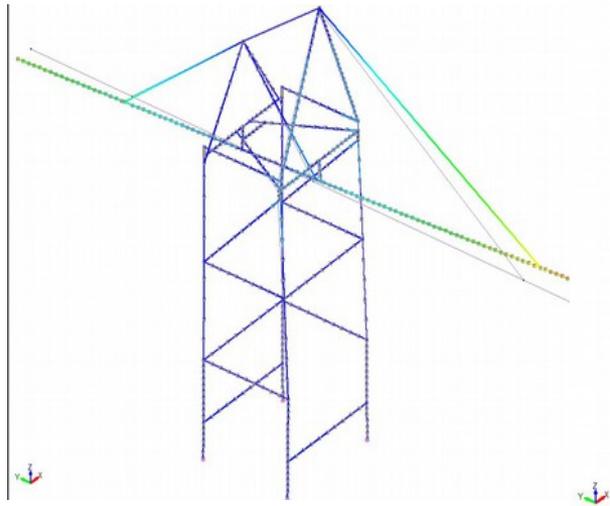
- Simplification structure dalle
- Adhérence pieu/tube négligée
- $\rho_{\text{acier_portique}}$ majorée artificiellement pour intégrer poids équipements



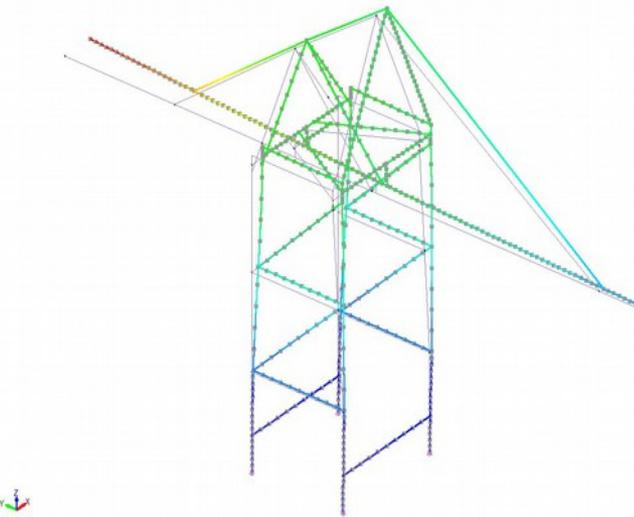
Équipements du portique
Plans Copyright Konecranes

Résultats

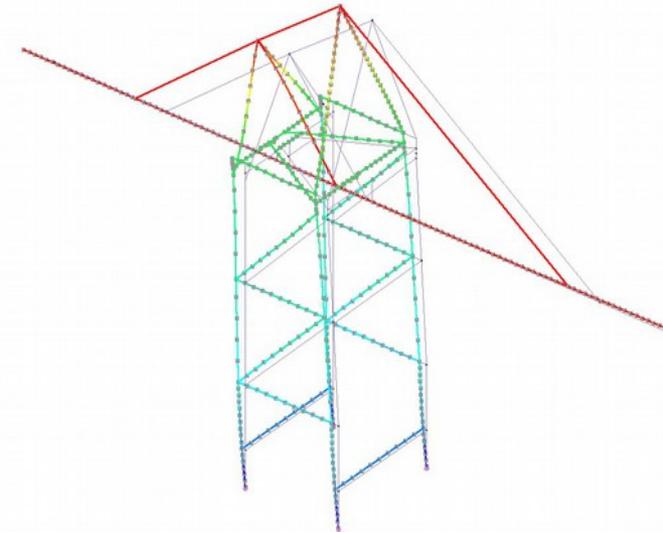
- Réponse portique seul



Mode 1 : $T = 4,34 \text{ s}$
(rotation du bras)



Mode 2 : $T = 2,40 \text{ s}$
(balancement selon X)



Mode 3 : $T = 1,68 \text{ s}$
(balancement selon Y)

Résultats

- Réponse quai + portique
 - Périodes propres (portique excentré)

Périodes propres « quai + portique excentré » Raideur tirants traction (sollicitations « vers la mer »)		
N° mode	Période	Écarts par rapport au quai seul (%)
	(s)	
5	0,95	1,00%
8	0,69	-0,84%
9	0,66	-1,58%
14	0,36	1,53%

Périodes propres « quai + portique excentré » Raideur sol butée (sollicitations « vers la terre »)		
N° mode	Période	Écarts par rapport au quai seul (%)
	(s)	
5	0,96	4,35%
21	0,20	-3,84%
22	0,20	-1,93%
23	0,19	-2,75%

- Sollicitations (portique excentré)

	Raideur tirants (=> mer)	Raideur butée (=> terre)	Enveloppe	Écarts par rapport au quai seul (%)
$M_{\max \text{ pleu_BA}}$ (MNm)	4,18	3,77	4,18	-0,50%
$V_{\max \text{ pleu_BA}}$ (MN)	1,99	1,78	1,99	-0,15%
$F_{\max \text{ tirant}}$ (MN)	3,36	-	3,36	10,16%

- Sollicitations (portique centré)

	Raideur tirants (=> mer)	Raideur butée (=> terre)	Enveloppe	Écarts par rapport au quai seul (%)
$M_{\max \text{ pleu_BA}}$ (MNm)	4,13	3,61	4,13	-1,71%
$V_{\max \text{ pleu_BA}}$ (MN)	1,96	1,69	1,96	-1,66%
$F_{\max \text{ tirant}}$ (MN)	2,89	-	2,89	-5,25%

Résultats

- Écarts de l'ordre de -3 % à +4 % sur caractéristiques modales (*périodes propres*)
- Écarts de l'ordre de -5 % à +10 % sur valeurs des sollicitations (*pieux et tirants*)
- Relativement négligeable % niveau de précision analyses sismiques (*nombreuses incertitudes qualification aléa + évaluation structurale*)
- Écarts les plus importants sont obtenus dans les tirants (*< 2% dans les pieux*)
- Sollicitations les plus importantes obtenues pour système avec :
 - raideur transversale imposée par les tirants en traction (*vers la mer*)
 - position portique excentré

Résultats

- Présence du portique favorable dans certains cas :

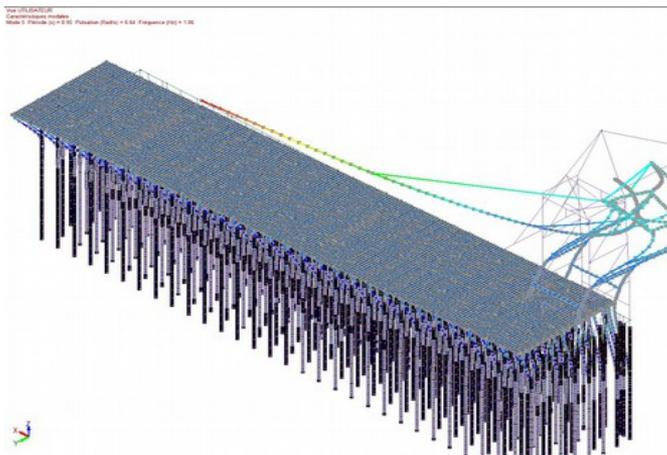
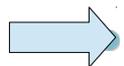


Illustration de l'effet potentiellement favorable lié à la présence du portique (1^{er} mode)

➔ Modélisation simplifiée du portique par « masse rigide » systématiquement plus défavorable que modèle complet

Résultats

- Influence de la variabilité des paramètres de calcul :
 - marée basse (0 m) / marée haute (+6 m)
 - sol rocheux très raide / sol marécageux très mou
 - pieux avec / sans tubage métallique
 - Calcul en section brute / fissurée des pieux
- Résultats (écarts « quai seul » / « quai + portique »)
 - -6 à +3 % sur périodes des principaux modes propres
 - -4 à 0 % sur sollicitations dans les pieux
 - +3 à +11 % sur sollicitations dans les tirants



Reste donc relativement négligeable

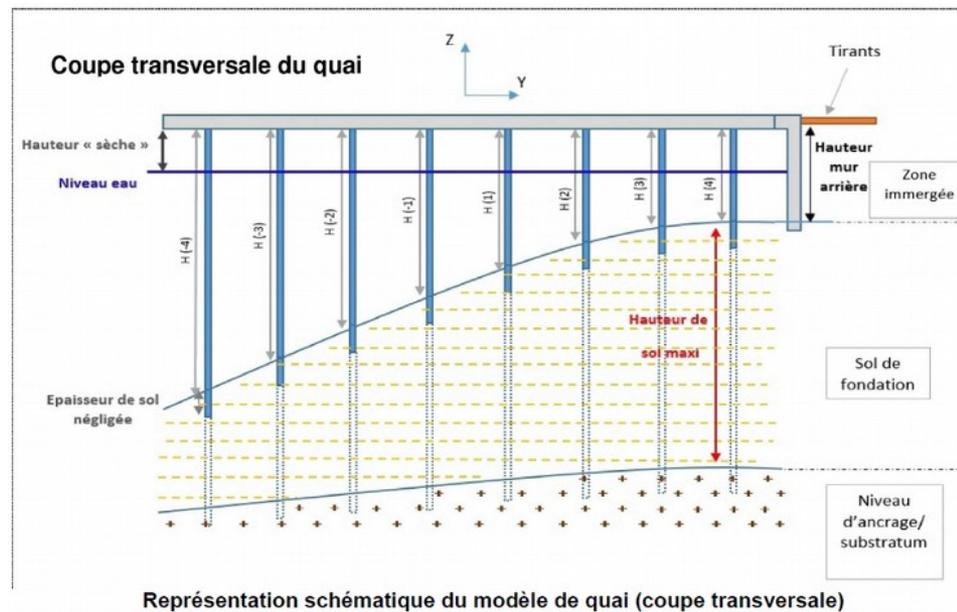
Plan de l'exposé

- Présentation de la méthode d'évaluation simplifiée SisQuai
- Interaction dynamique portique de levage/quai
- • **Prise en compte des sources de comportement non-linéaires (matériaux et structure)**

Problématique et objectifs de l'étude

Spécificités / irrégularités structurales :

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



Problématique et objectifs de l'étude

- Mieux appréhender, tant qualitativement que quantitativement, le comportement réel de ce type de structures très irrégulières
- Intégrer les potentielles sources de non-linéarité par différentes approches et en tester la fiabilité
- Statuer sur la capacité d'une structure de quai « classique » du GPMNSN à résister à un séisme de niveau réglementaire

Résultats obtenus par différentes méthodes d'analyse non-linéaires

- Analyse spectrale en déplacement (*approche quasi-statique*)
- Analyse en poussée progressive (*approche quasi-statique*)
- Analyse *dynamique* temporelle non-linéaire

Résultats obtenus par différentes méthodes d'analyse non-linéaires

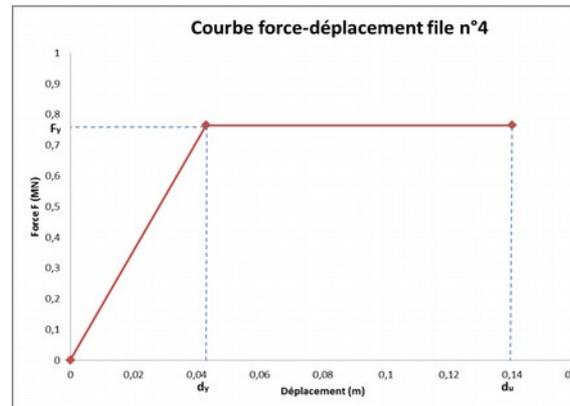
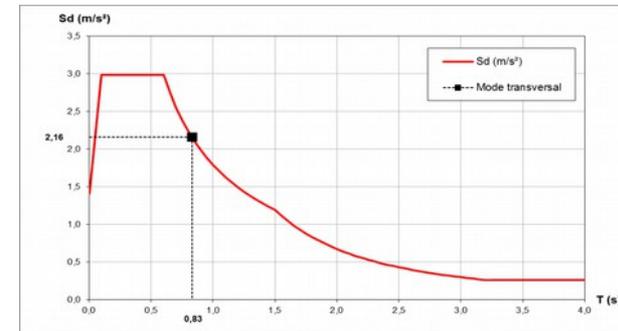
- Analyse spectrale en déplacement
 - Démarche de calcul
 - Calcul des modes propres de vibration (modèle à tablier rigide)
 - Évaluation du déplacement sollicitant à partir du spectre de réponse élastique
 - Calcul du niveau de ductilité ($\mu_d = d/d_y$) appelée dans les différents éléments (tirants,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

Résultats obtenus par différentes méthodes d'analyse non-linéaires

- Analyse spectrale en déplacement
 - Résultats

- Selon la direction transversale :

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



Hypothèse de formation simultanée des rotules en pied et en tête de pieux :

$$\phi_y = \frac{M_{Rd}}{EI} = \frac{M_{Rd}}{(E_{\text{béton}} \cdot I_{\text{béton}} + E_{\text{acier}} \cdot I_{\text{acier}})}$$

$$d_y = \phi_y \cdot \frac{H^2}{6}$$

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{su}}{d}$$

$$d_u = \min(d_{u1} ; d_{u2} = q \cdot d_y ; d_{u3} = 0,02 \cdot H_{\text{calcul}})$$

Résultats obtenus par différentes méthodes d'analyse non-linéaires

- Analyse en poussée progressive
 - Démarche de calcul
 - Poussée selon le mode fondamental (translation horizontale)
 - Force horizontale croissante appliquée au centre 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)

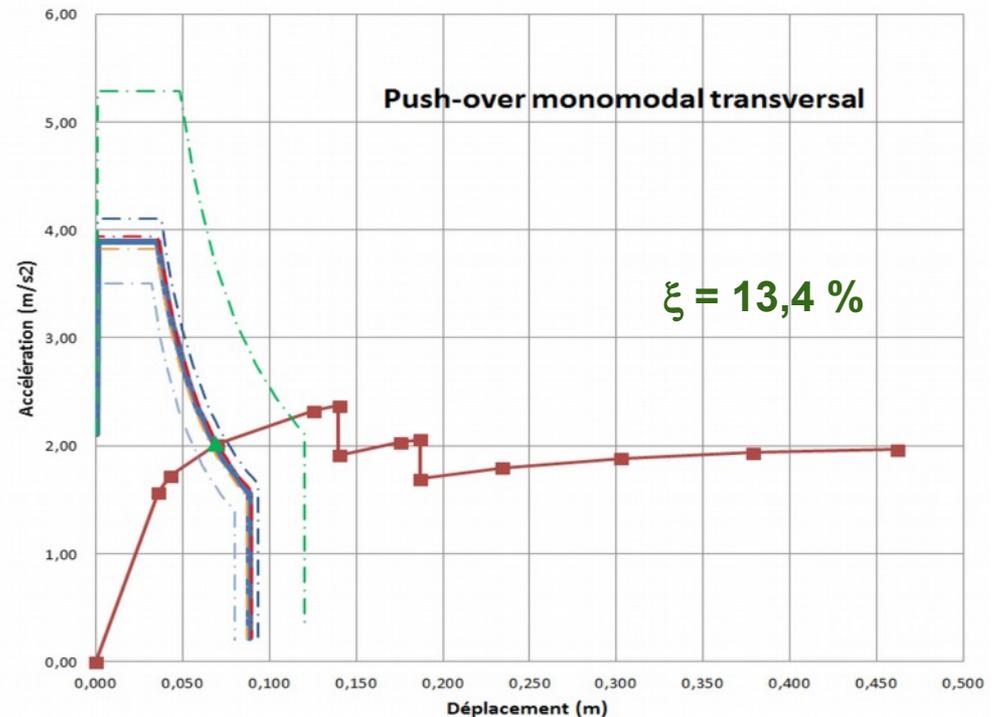
Résultats obtenus par différentes méthodes d'analyse non-linéaires

- Analyse en poussée progressive

- Résultats

- Selon la direction transversale :

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



Résultats obtenus par différentes méthodes d'analyse non-linéaires

- Tableaux récapitulatifs
 - Direction transversale

	Analyse spectrale	Push-over monomodal	Push-over multimodal	Ecart
Déplacement	6,7 cm		6,9 cm	
Ductilité appelée μ_d	1,8		1,8	3 %
Accélération dalle	2,2 m/s ²		2,0 m/s ²	10 %
Plastifications	Tirants + 1 file de pieux (<i>la + courte</i>)			

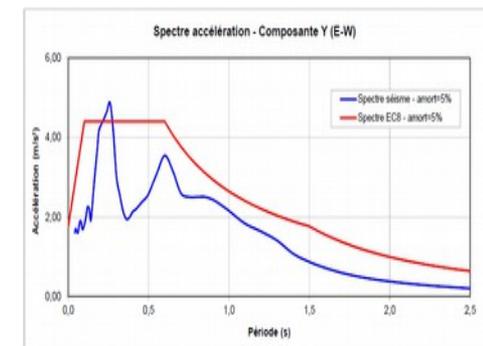
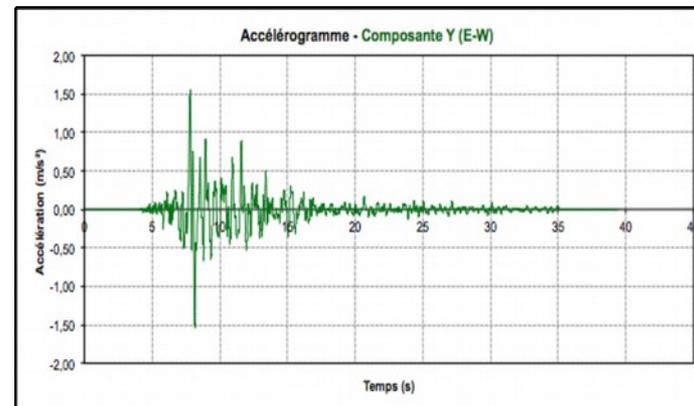
Confrontation avec une analyse dynamique temporelle non-linéaire sur un modèle réduit

- Principes de calcul
 - Sollicitation sismique

- Accélérogramme réel conforme aux conditions sismiques du site

- Calcul par pas de temps (0,05 s)

Sismicité :	Z3	Basso Tirreno		
Sol :	D	15/04/78	23:33:48	38.27°N - 14.86°E (Italie)
Séisme :	Magnitude :	Mw = 6,1	Ms = 5.83	
	Mécanisme :	décrochant		
Site :	Imperial College	Dist. Epicentrale : 18 km	Profondeur : 15 km	
Composante		000170xa		000170ya
Orientation		NS		EW
PGA		0,709	m/s ²	1,560
Durée		39.450s		39.420s



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

- Principes de calcul
 - Modélisation

- Logiciel de calcul spécifique (*SAP 2000 – version gratuite tutorielle limitée à 30 nœuds*)

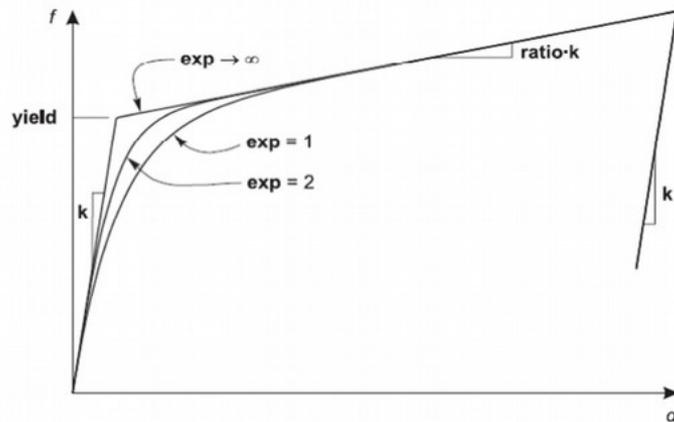


Figure 44 – Loi bilinéaire de rotule plastique

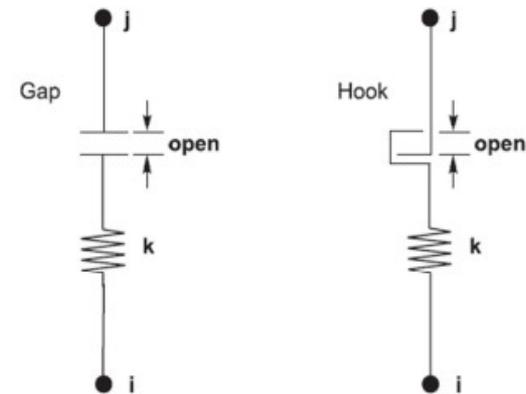
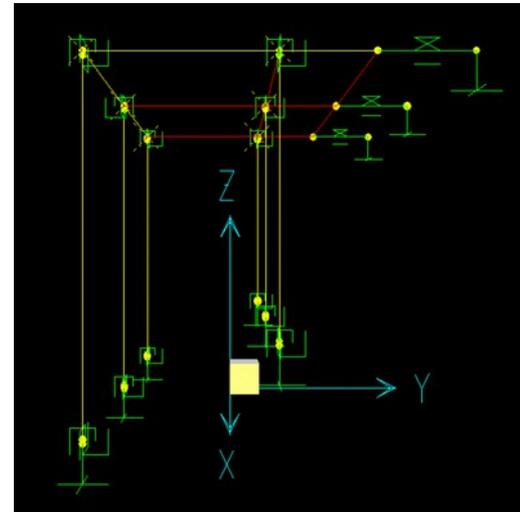
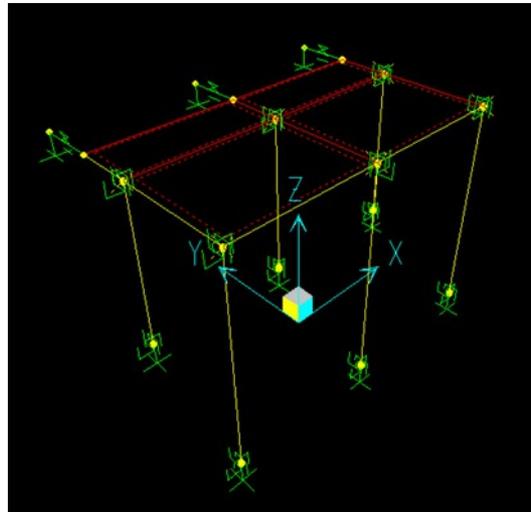


Figure 45 – Éléments de butée (gap) et de crochet (hook)

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

- Principes de calcul
 - Modélisation

- Modèle réduit correspondant à une portion représentative de la structure complète



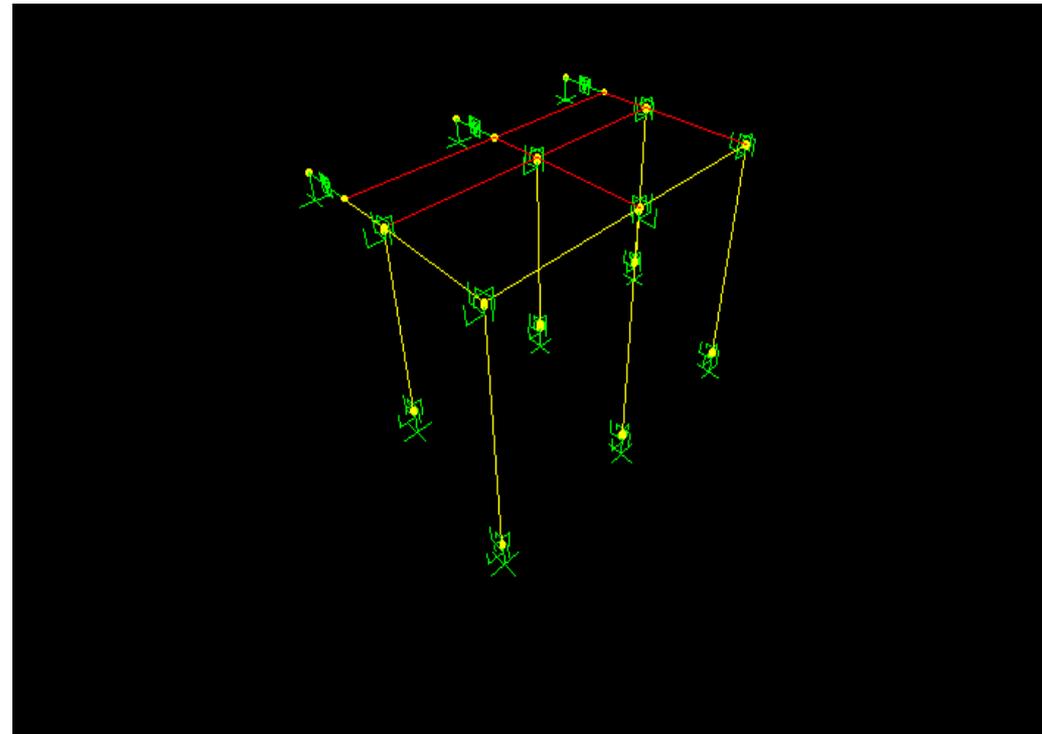
Confrontation avec une analyse dynamique temporelle non-linéaire sur un modèle réduit

- Résultats

- Direction longitudinale :

- $d_{\max} = 9,4 \text{ cm}$

(5,8 cm par méthode quasi-statique)



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

- Résultats

- Direction longitudinale :

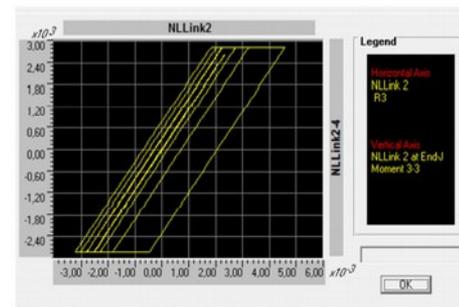
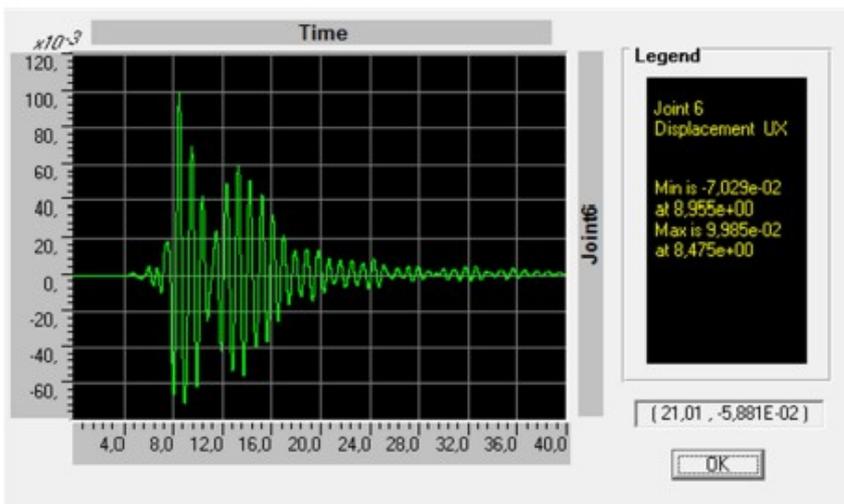


Figure 59 – Loi moment-rotation pieu file n°1 (pieu)

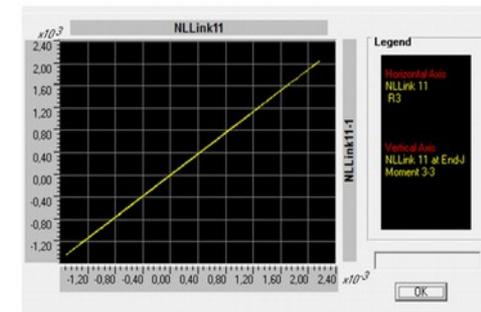


Figure 61 – Loi moment-rotation pieu file n°2 (pieu)

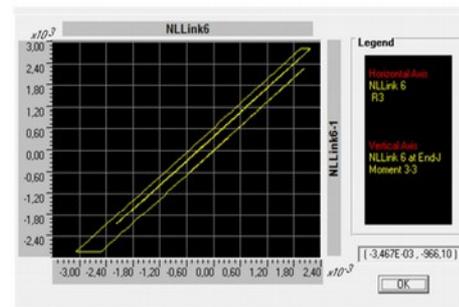


Figure 60 – Loi moment-rotation pieu file n°1 (tête)

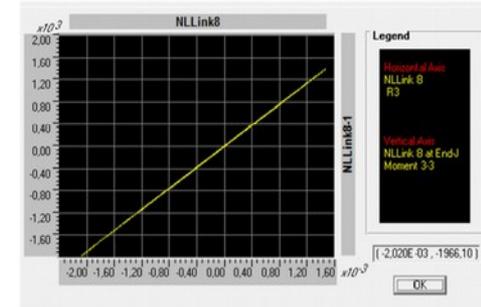


Figure 62 – Loi moment-rotation pieu file n°2 (tête)

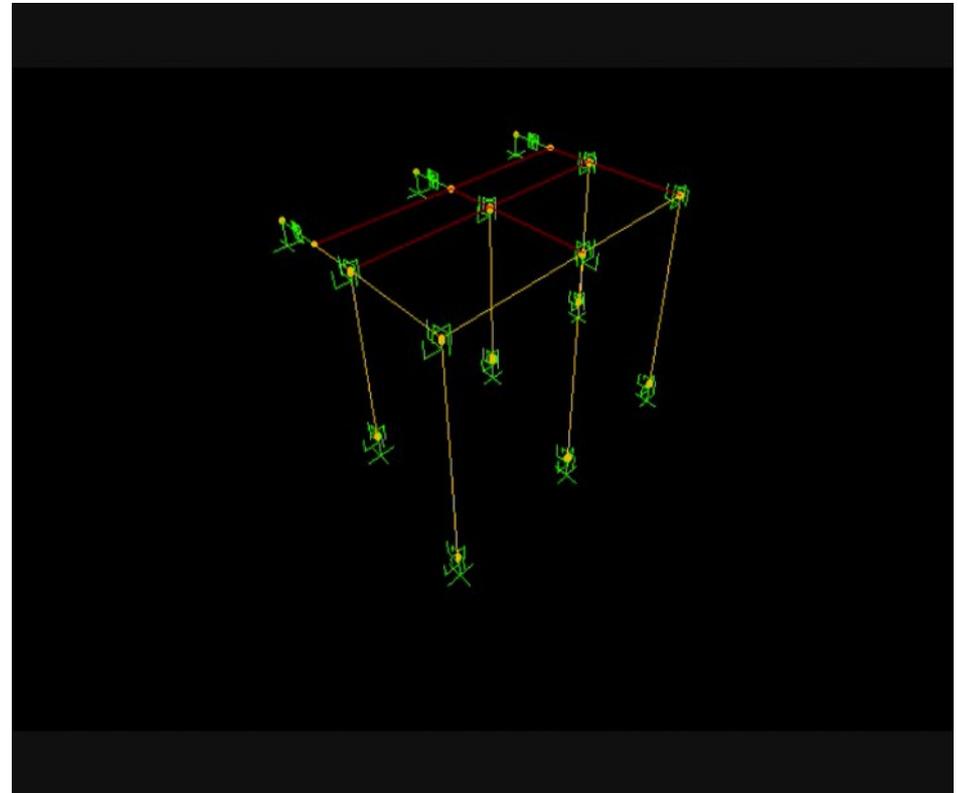
Confrontation avec une analyse dynamique temporelle non-linéaire sur un modèle réduit

- Résultats

- Direction transversale :

- $d_{\max} = 8,1 \text{ cm}$

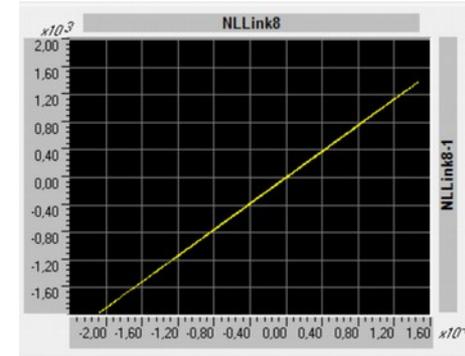
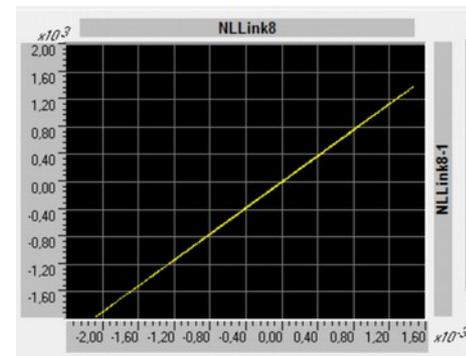
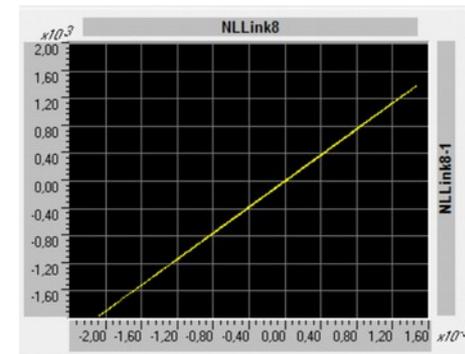
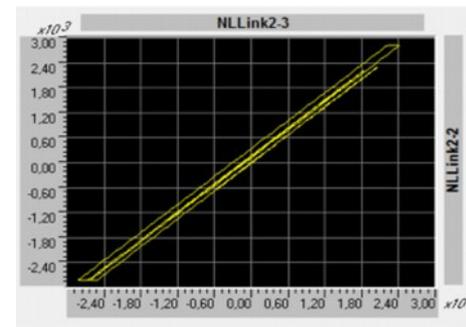
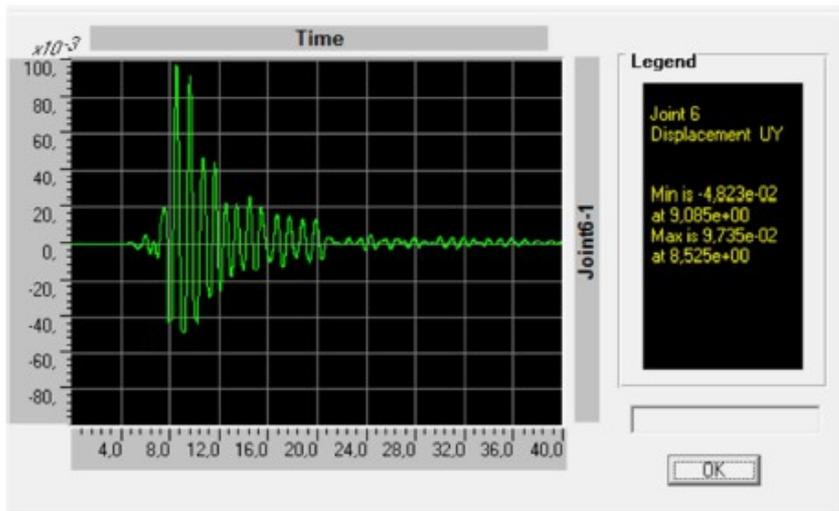
(4,2 cm par méthode quasi-statique)



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

- Résultats

- Déplacements sensiblement plus importants dans le cas de l'analyse dynamique temporelle non-linéaire :
(x1,6 en long et 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 plastification pieds/têtes de pieux non-simultanées
 - Effet de « rebond » sur le remblai arrière (*part d'énergie conservée dans la dissymétrie du comportement?*)

Conclusions (1/2)

- Convergence satisfaisante des méthodes d'analyse non-linéaire quasi-statiques (*10 à 15%*)
- Réserves de robustesse importantes liées aux non-linéarités (*plastifications voire ruptures*) et aux redistributions d'efforts internes (+ *assouplissement structural et amortissement*)
- Bonne performance sismique de la structure étudiée sous l'effet des sollicitations sismiques réglementaires définies par la nouvelle législation (*zone 3, cat. III, sol D*)

Conclusions (2/2)

- L'analyse dynamique temporelle non-linéaire tend toutefois à montrer une **majoration (env. +30%) des niveaux de déplacement dans la direction transversale**
- Mise en évidence d'un effet de « rebond » sur le remblai arrière avec conservation partielle de l'énergie sismique
- Étude éventuellement à poursuivre / approfondir (**Modèle dynamique global EF 3D + étude expérimentale centrifugeuse**) dans le cadre d'un **partenariat avec l'IFSTTAR**



Cerema

Centre d'études et d'expertise sur les risques,
l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Direction territoriale Méditerranée

Merci de votre participation

Denis DAVI

Cerema / Direction territoriale Méditerranée

PCI « Vulnérabilité des ouvrages de Génie Civil aux aléas sismiques et hydrauliques »

04 42 24 76 81 ou 04 67 20 95 83

denis.davi@cerema.fr