

# Journées Techniques Ouvrages d'Art 2015



Outil SisQuai pour l'analyse paramétrique simplifiée de la vulnérabilité sismique des structures de quai courantes

Denis Davi - CEREMA DTer Méditerranée  
Jérôme Etienne - PolyTech Marseille

## Cadre général de l'étude

Étude sur la prise en compte du séisme sur les ouvrages portuaires  
(*Convention Cerema / GPM Nantes St-Nazaire*)

- Tâche 1 : Analyse de risque et catégories d'importance
- Tâche 2 : Avis sur études de liquéfaction Arcadis / Géodynamique et structures
- Tâche 3 : Analyse paramétrique simplifiée des structures de quai courantes
- Tâche 4 : Étude de l'interaction dynamique portique / quai

## Cadre général de l'étude

Étude sur la prise en compte du séisme sur les ouvrages portuaires  
(*Convention Cerema / GPM Nantes St-Nazaire*)

- Tâche 1 : Analyse de risque et catégories d'importance
- Tâche 2 : Avis sur études de liquéfaction Arcadis / Géodynamique et structures
- ➔ • Tâche 3 : Analyse paramétrique simplifiée des structures de quai courantes
- Tâche 4 : Étude de l'interaction dynamique portique / quai

## Tâche 3 : Analyse paramétrique simplifiée de la vulnérabilité sismique des structures de quai courantes



**Cerema**  
Direction territoriale Méditerranée  
PCI 57 : « Vulnérabilité des ouvrages de Génie Civil  
aux aléas sismiques et hydrauliques »

Convention Cerema / GPM Nantes St-Nazaire  
Étude sur la prise en compte du séisme  
sur les ouvrages portuaires

**Tâche 3 : Analyse paramétrique simplifiée de la vulnérabilité  
sismique des structures de quai courantes – Outil SisQuai**

The screenshot displays the SisQuai software interface. On the left, there is a 3D perspective view of a quay structure. To the right, the interface is divided into several sections: a 'GÉNÉRAL' section with various input parameters, a 'RÉSULTATS' section with a table of results, and a 'GRAPHES' section with a line graph showing the relationship between seismic hazard and structural vulnerability. The graph has a logarithmic scale on the x-axis and a linear scale on the y-axis.

# Développement d'un outil d'analyse paramétrique semi-automatisé, baptisé SisQuai

Reposant sur :

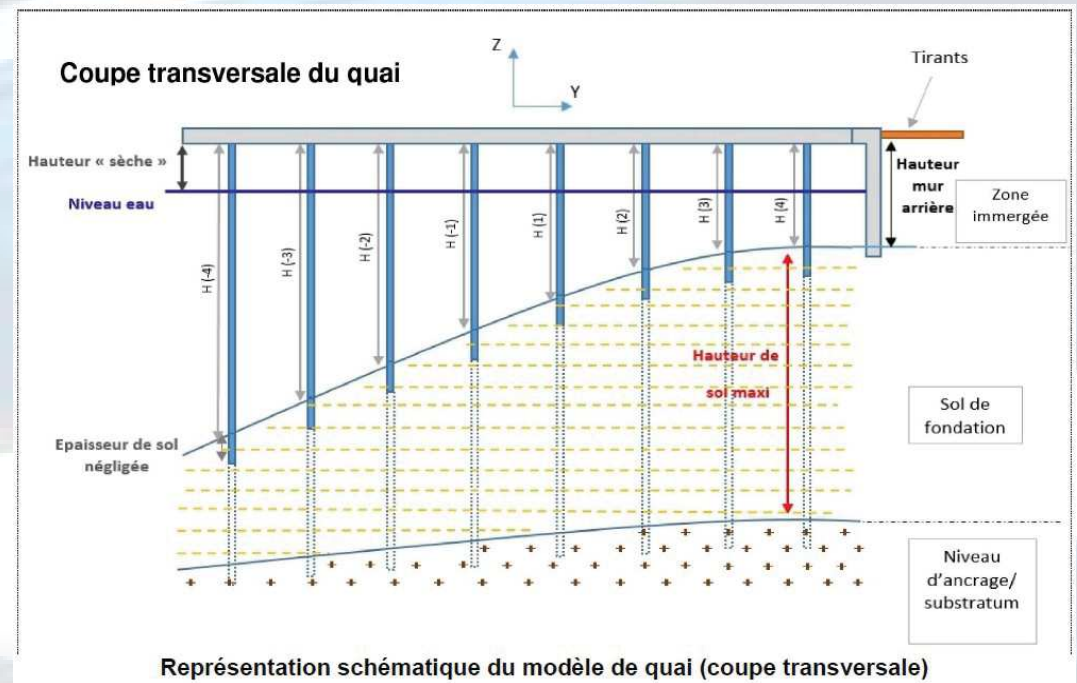
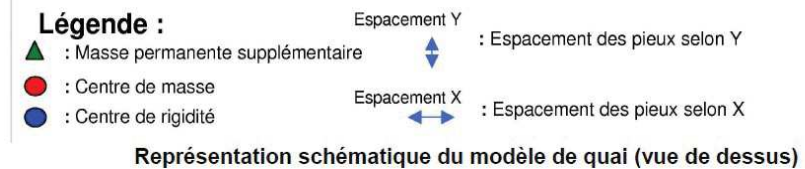
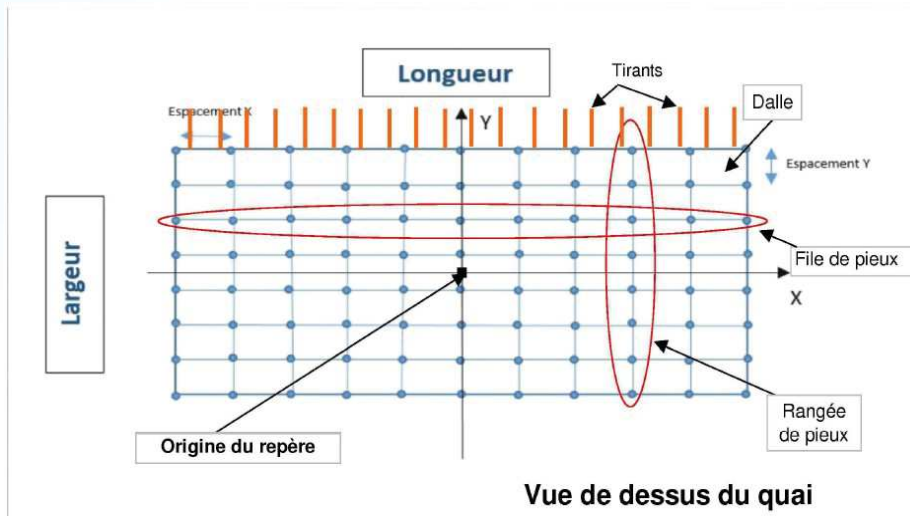
- Une description simplifiée de la structure  
*(dalle sur pieux circulaires tubés + tirants arrières)*
- Un calcul semi-automatisé des masses, raideurs et résistances locales
- Une analyse spectrale basée uniquement sur le mode fondamental  
*(1<sup>er</sup> mode pour chaque direction horizontale)*
- 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)*

# Développement d'un outil d'analyse paramétrique semi-automatisé, baptisé SisQuai

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 et application au précédent cas d'étude



# Présentation de l'outil et application au précédent cas d'étude

Microsoft Excel - SisQuai\_V0.xls

Zone Nom

### DONNEES STRUCTURE

Dalle			Tirants			Pieux		
Longueur :	200	m	Nombre :	30		Nombre de rangées (selon X) :	30	
Largeur :	40	m	Espacement (selon X) :	6,67	m	Nombre de files (selon Y) :	8	
Épaisseur :	2,00	m	Longueur :	20,0	m	Espacement (selon X) :	6,67	m
Masse volumique du béton :	2,5	t.m <sup>3</sup>	Diamètre :	85	mm	Espacement (selon Y) :	5,00	m
Masse dalle :	49 900	t	Épaisseur sacrifiée à la corrosion :	3	mm	Diamètre béton :	0,750	m
Masse permanente supplémentaire :	1 236	t	Section de calcul :	0,00430	m <sup>2</sup>	Section béton :	0,4418	m <sup>2</sup>
Position sur la dalle :			Module de rigidité :	200 000	MPa	Masse volumique du béton :	2,5	t.m <sup>3</sup>
- selon X :	90,00	m	Raideur unitaire :	49,0	MN/m	Hypothèse calcul raideur pieux :	Inertie fissurée	
- selon Y :	-12,00	m	Contrainte limite :	360	MPa	Nature liaison pieux / dalle :	Encastrement	
			Résistance de calcul $F_{Rd, tirant}$ :	1,76	MN	Inertie de calcul béton :	0,0621	m <sup>4</sup>
						$f_{ctd}$ béton pieux :	35	MPa
Hauteur mur arrière :	4,0	m				Module béton pieux (selon BAEL) :	35 982	MPa
Nature sol à l'arrière de la dalle :	Remblais					Moment résistant BA $M_{Rd, BA}$ :	1,20	MNm
Raideur sol à l'arrière de la dalle :	54 900	kN/m <sup>2</sup> /m				Effort tranch. résistant BA $V_{Rd, BA}$ :	0,88	MN
						Diamètre intérieur tube métallique :	0,750	m
						Épaisseur origine (selon plans) :	13	mm
						Épaisseur sacrifiée à la corrosion :	3	mm
						Épaisseur de calcul :	10	mm
						Section de calcul tube :	0,0239	m <sup>2</sup>
						Masse volumique de l'acier :	7,5	t.m <sup>3</sup>
						Inertie de calcul tubage :	0,06172	m <sup>4</sup>
						$\sigma_s$ tubage :	360	MPa
						Module acier tubage :	210 000	MPa
						Moment résistant tube $M_{Rd, tube}$ :	1,81	MNm
						Effort tranch. résistant tube $V_{Rd, tube}$ :	4,24	MN
						Moment résistant total $M_{Rd, pieu}$ :	2,84	MNm
						Effort tranch. résistant total $V_{Rd, pieu}$ :	5,12	MN
						Hauteur sèche :	3,35	m
						Hauteur de sol max :	4,40	m

Aperçu de la structure (Vue en plan)

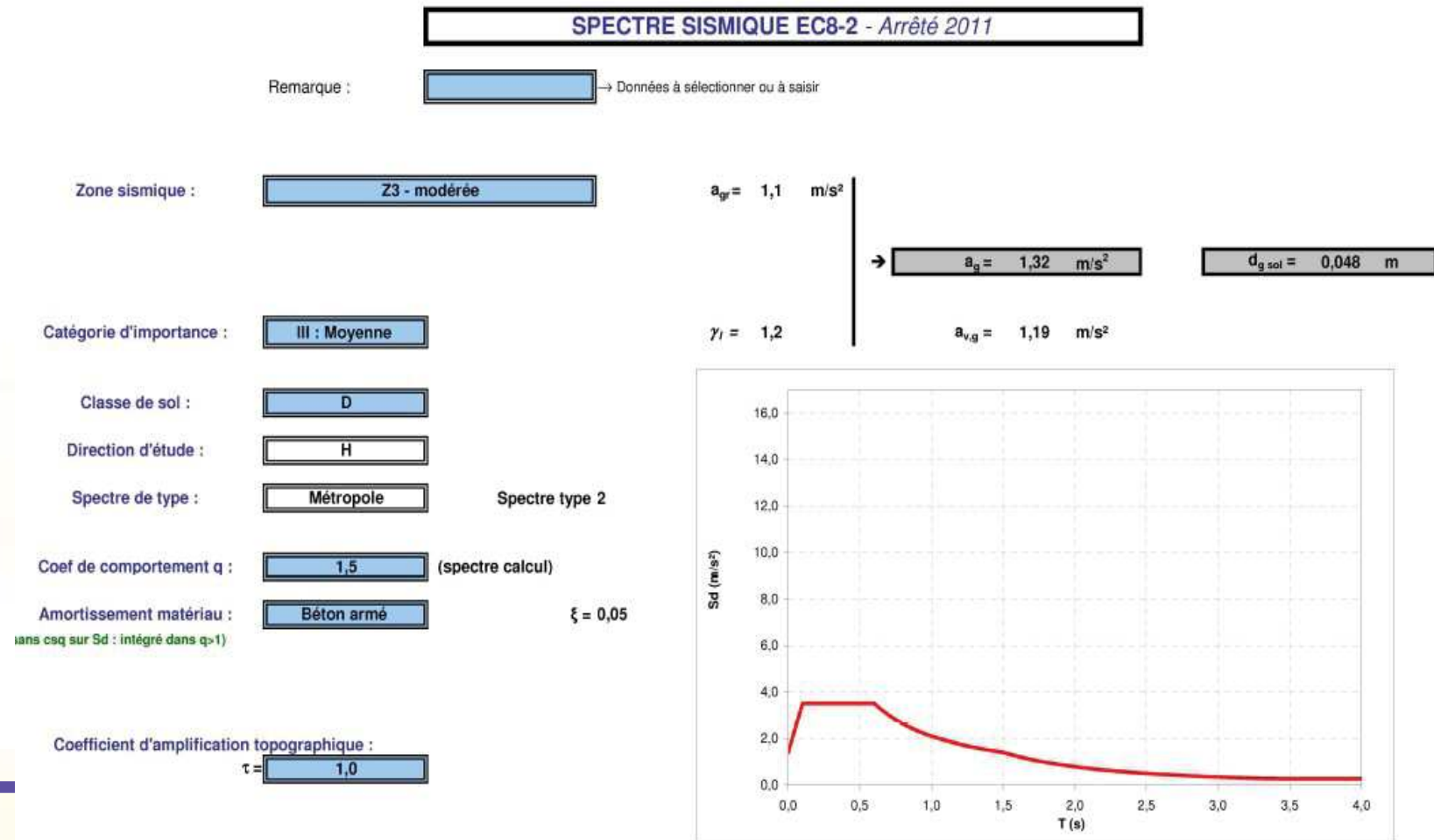
(Coupe transversale)

Différents onglets

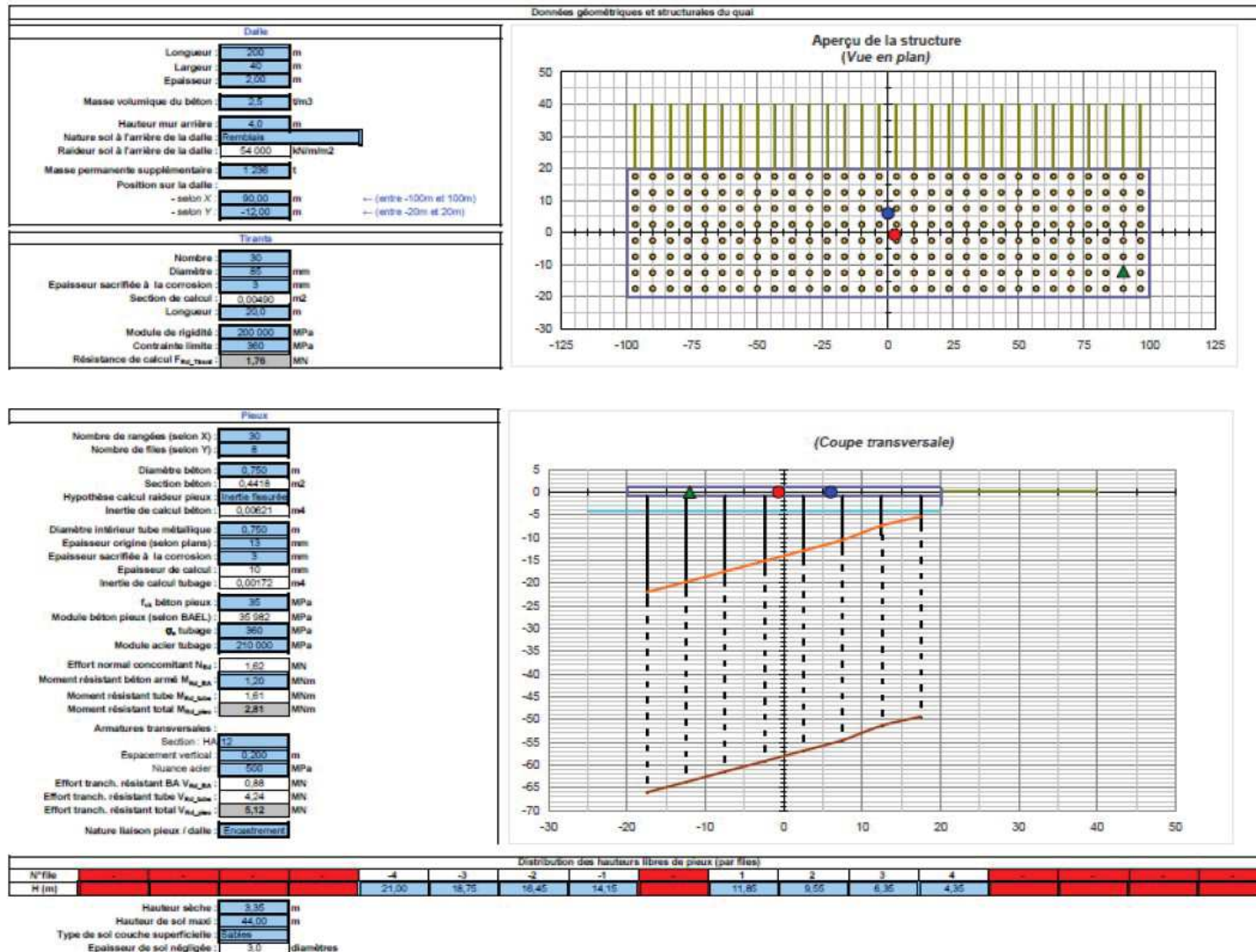




# Présentation de l'outil et application au précédent cas d'étude



## Présentation de l'outil et application au précédent cas d'étude



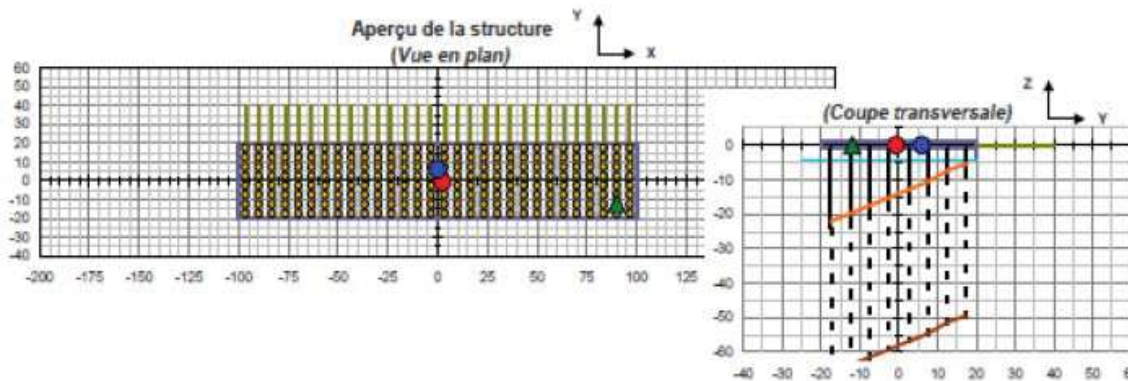
# Présentation de l'outil et application au précédent cas d'étude

### DONNEES STRUCTURE

Dalle	
Longueur :	200 m
Largeur :	40 m
Epaisseur :	2,00 m
Masse volumique du béton :	2,5 t/m <sup>3</sup>
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 <sup>2</sup> /m	

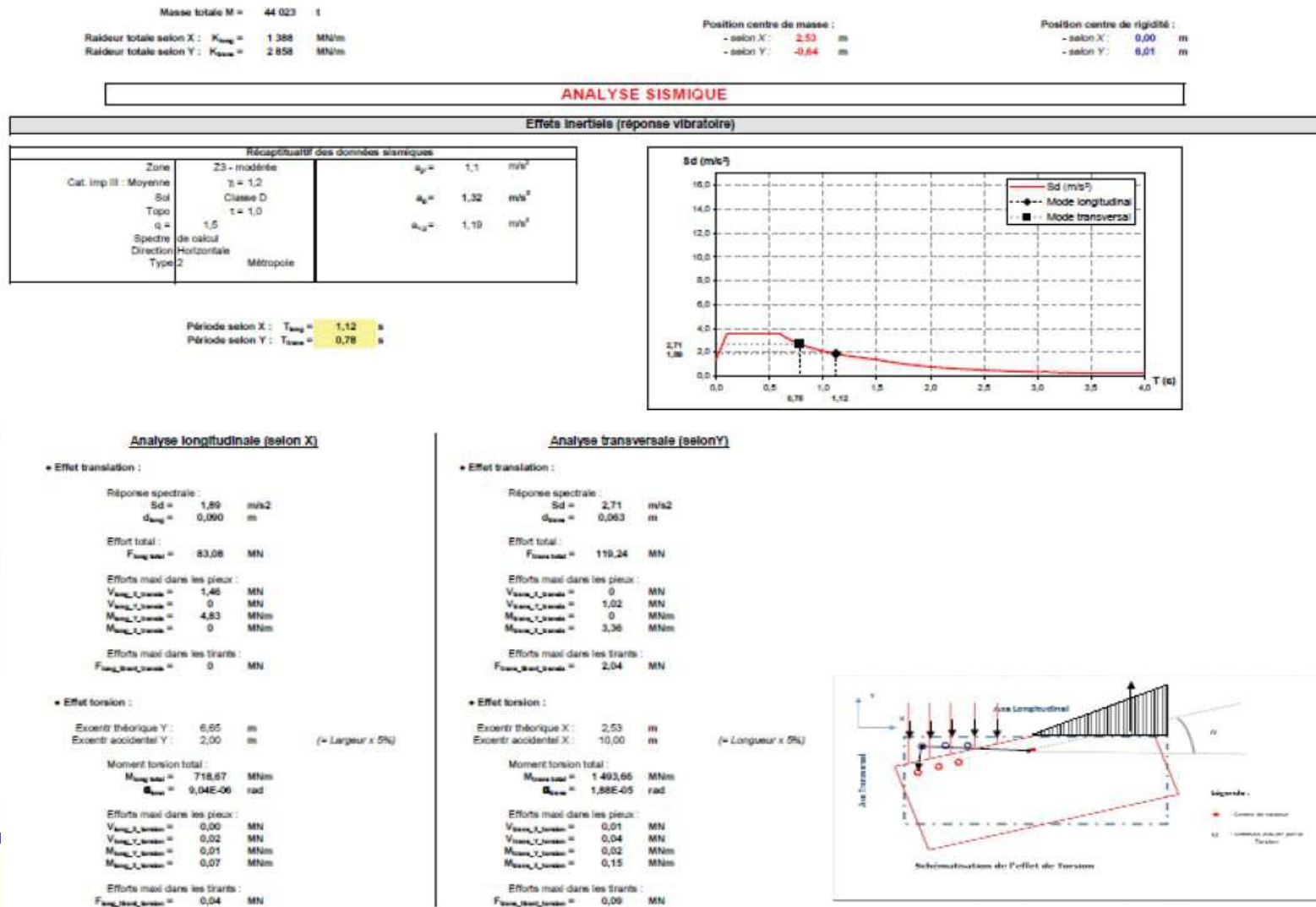
Tirants	
Nombre :	30
Espacement (selon X) :	6,67 m
Longueur :	20,0 m
Diamètre :	85 mm
Epaisseur sacrifiée à la corrosion :	3 mm
Section de calcul :	0,00450 m <sup>2</sup>
Module de rigidité :	200 000 MPa
Raideur unitaire :	49,0 MN/m
Contrainte limite :	360 MPa
Résistance de calcul $F_{Rd\_tirant}$ :	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 <sup>2</sup>
Masse volumique du béton :	2,5 t/m <sup>3</sup>
Hypothèse calcul raideur pieux :	Inertie fissurée
Nature liaison pieux / dalle :	Encastrement
Inertie de calcul béton :	0,00821 m <sup>4</sup>
$f_{td}$ 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 $V_{Rd\_BA}$ :	0,68 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 <sup>2</sup>
Masse volumique de l'acier :	7,5 t/m <sup>3</sup>
Inertie de calcul tubage :	0,00172 m <sup>4</sup>
$\sigma_{tubage}$ :	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 $M_{Rd\_total}$ :	2,81 MNm
Effort tranch. résistant total $V_{Rd\_total}$ :	5,12 MN
Hauteur sèche :	3,35 m
Hauteur de sol mal :	44,00 m
Type de sol couche superficielle :	Sables
Epaisseur de sol négligée :	3,0 diamètres

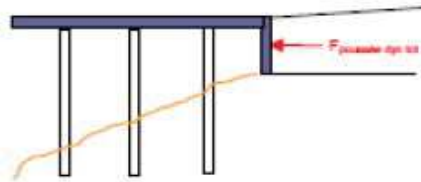


Files de pieux														File de tirants		
Y (m)	-	-	-	-	-17,50	-12,50	-7,50	-2,50	2,50	7,50	12,50	17,50	-	-	-	-
H <sub>max</sub> (m)	-	-	-	-	21,00	18,75	16,45	14,15	-	11,85	9,55	6,35	4,35	-	-	-
H <sub>min</sub> (m)	-	-	-	-	23,25	21,00	18,70	16,40	-	14,10	11,80	8,60	6,60	-	-	-
- Caractéristiques unitaires																
K (MN/m)	-	-	-	-	0,96	0,76	1,07	1,59	-	2,51	4,28	11,05	24,44	-	-	-
M <sub>max</sub> caract. (t)	-	-	-	-	14,02	13,48	12,00	10,53	-	9,05	7,57	5,52	4,24	-	-	-
M <sub>min</sub> caract. (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	32,34	47,79	-	75,21	128,31	331,45	733,30	-	-	-
M <sub>max</sub> caract. (t)	-	-	-	-	447,63	404,31	360,03	315,75	-	271,47	227,19	165,58	127,07	-	-	-
M <sub>min</sub> caract. (t)	-	-	-	-	115,60	99,88	83,80	67,76	-	51,80	35,40	13,27	0,00	-	-	-

## Présentation de l'outil et application au précédent cas d'étude



# Présentation de l'outil et application au précédent cas d'étude



• 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 max dans les pieux :	
$V_{max\_1\_pousse}$	0 MN
$V_{max\_2\_pousse}$	0,17 MN
$M_{max\_1\_pousse}$	0 MNm
$M_{max\_2\_pousse}$	0,56 MNm
Efforts max dans les tirants :	
$F_{tirant\_max\_pousse}$	0,34 MN

### Analyse longitudinale (selon X)

• Effet cumulé (translation + torsion) :

Efforts max 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 max dans les tirants :	
$F_{tirant\_max}$	0,04 MN

### Analyse transversale (selon Y)

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

Efforts max dans les pieux :	
$V_{max\_Y}$	0,01 MN
$V_{max\_X}$	1,23 MN
$M_{max\_Y}$	0,02 MNm
$M_{max\_X}$	4,07 MNm
Efforts max dans les tirants :	
$F_{tirant\_max}$	2,48 MN

• Combinaison 1 :  $E_{s1} + 0,3 E_{s2}$

Efforts max dans les pieux :	
$V_{1\_X}$	1,47 MN
$V_{1\_Y}$	0,39 MN
$M_{1\_X}$	4,84 MNm
$M_{1\_Y}$	1,29 MNm
Efforts max dans les tirants :	
$F_{1\_tirant}$	0,79 MN

⇒ Résultante des composantes X, Y

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

• Combinaison 2 :  $0,3 E_{s1} + 1,0 E_{s2}$

Efforts max dans les pieux :	
$V_{2\_X}$	0,45 MN
$V_{2\_Y}$	1,24 MN
$M_{2\_X}$	1,47 MNm
$M_{2\_Y}$	4,10 MNm
Efforts max dans les tirants :	
$F_{2\_tirant}$	2,49 MN

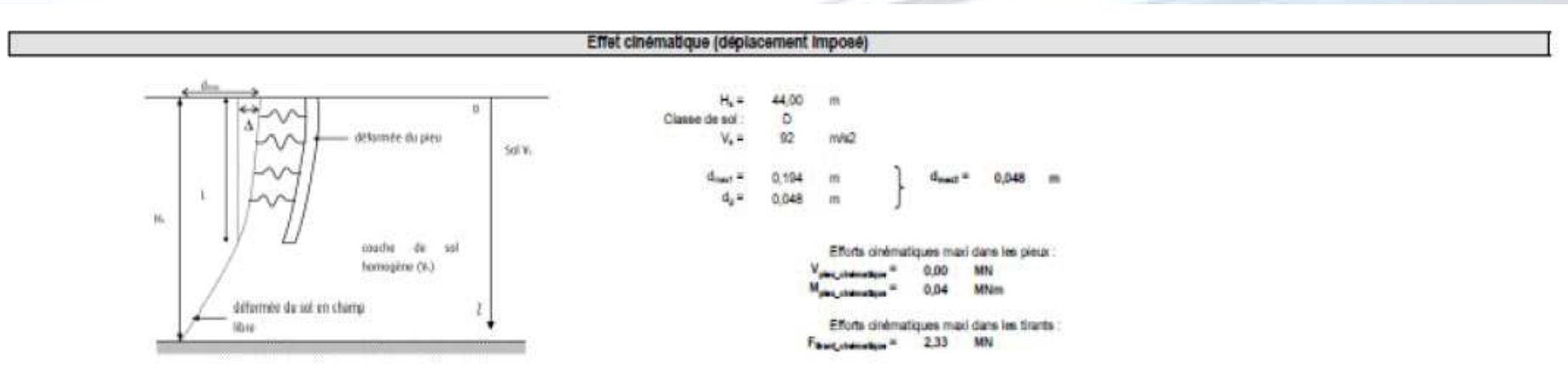
⇒ Résultante des composantes X, Y

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

• Enveloppe (combi 1 ; combi 2) :

Efforts inertels max dans les pieux :	
$V_{inertel}$	1,52 MN
$M_{inertel}$	5,01 MNm
Efforts inertels max dans les tirants :	
$F_{tirant\_inertel}$	2,49 MN

# Présentation de l'outil et application au précédent cas d'étude



**Sollicitations enveloppes et niveaux de risque**

• Sollicitations enveloppe (effet inertiel ; effet cinématique) :

Efforts maxi dans les pieux :

$V_{max\_pieux} = 1,52$  MN  
 $M_{max\_pieux} = 5,01$  MNm

Efforts maxi dans les tirants :

$F_{max\_tirant} = 2,49$  MN

• Facteurs de sécurité :

$V_{max\_pieux} / V_{adm\_pieux} = 3,37$   
 $M_{max\_pieux} / M_{adm\_pieux} = 0,56$

$F_{max\_tirant} / F_{adm\_tirant} = 0,71$

• Niveaux de risque :

$R_{pieux\ tranch} = 0,00$  Risque de rupture de pieu par effort tranchant peu probable

$R_{pieux\ flexion} = 0,51$  Risque de rupture de pieu par flexion avéré

$R_{tirant} = 0,75$  Risque de rupture de tirant avéré

# Présentation de l'outil et application au précédent cas d'étude

Pieux	V <sub>2,Y</sub>								F <sub>2</sub>								
	-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
14	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,22	0,56	1,24	-	-	-	28
13	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,22	0,56	1,24	-	-	-	26
12	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,22	0,56	1,23	-	-	-	24
11	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,21	0,55	1,23	-	-	-	22
10	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,21	0,55	1,22	-	-	-	20
9	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,13	0,21	0,55	1,22	-	-	-	18
8	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,55	1,22	-	-	-	16
7	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,55	1,21	-	-	-	14
6	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,55	1,21	-	-	-	12
5	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,55	1,21	-	-	-	10
4	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,54	1,20	-	-	-	8
3	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,54	1,20	-	-	-	6
2	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,54	1,20	-	-	-	4
1	-	-	-	-	0,03	0,04	0,05	0,08	-	0,12	0,21	0,54	1,19	-	-	-	2
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	0,55	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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

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

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

2,49 MN  
2,39 MN



# Présentation de l'outil et application au précédent cas d'étude

Résultats pour la structure de quai du port de Nantes St-Nazaire

- Hypothèse 1
  - *Cat. III (période retour 800 ans)*
  - *q=1,5 (duct. limitée)*
- Hypothèse 2
  - *Cat. II (période retour 475 ans)*
  - *q=3 (ductile)*

• Niveaux de risque :

$R_{\text{pieu tranch.}}$ =	<b>0,00</b>	Risque de rupture de pieu par effort tranchant peu probable
$R_{\text{pieu flexion}}$ =	<b>0,85</b>	Risque de rupture de pieu par flexion avéré
$R_{\text{tirant}}$ =	<b>0,79</b>	Risque de rupture de tirant avéré

• Niveaux de risque :

$R_{\text{pieu tranch.}}$ =	<b>0,00</b>	Risque de rupture de pieu par effort tranchant peu probable
$R_{\text{pieu flexion}}$ =	<b>0,24</b>	Risque de rupture de pieu par flexion peu probable
$R_{\text{tirant}}$ =	<b>0,57</b>	Risque de rupture de tirant possible

## Tests de validation

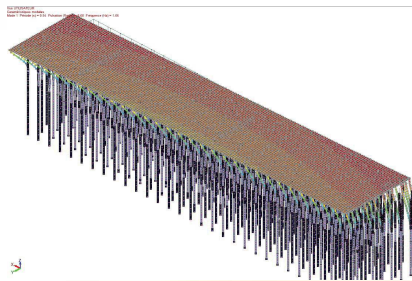
### Comparaison avec modèle EF – 3D

- Adaptations de l'outil nécessaires à la comparaison
  - Raideur du sol arrière prise équivalente à celle des tirants (x 1/27) pour calcul effets torsion,
  - Suppression excentremets accidentels dans calcul effets torsion
  - Poussée dynamique des terres et effet cinématique neutralisés
  - $q = 1$  (*calcul élastique*) et inertie brute (*non-fissurée*) des pieux
  - Efforts pieux multipliés par le rapport  $I_{\text{béton}} / (I_{\text{béton}} + I_{\text{tube}})$  : sollicitations dans section BA uniquement

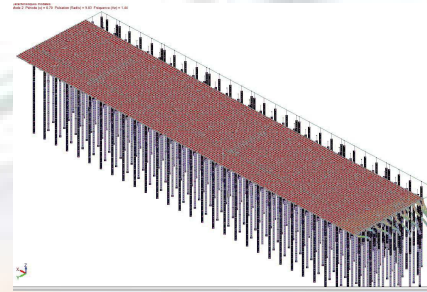
# Tests de validation

## Comparaison avec modèle EF – 3D

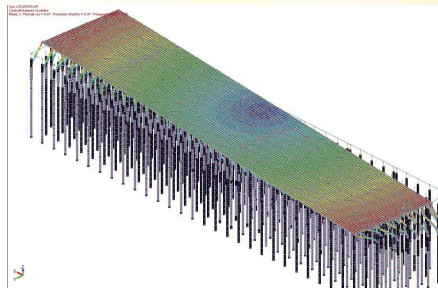
- Plus-values du modèle EF par rapport à SisQuai



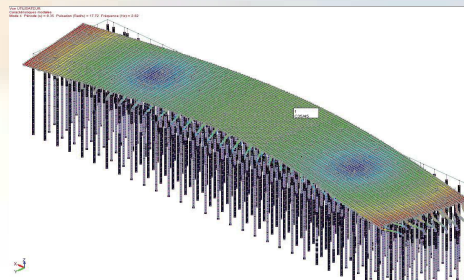
Mode 1 :  $T = 0,94 \text{ s}$



Mode 2 :  $T = 0,70 \text{ s}$



Mode 3 :  $T = 0,67 \text{ s}$



Mode 4 :  $T = 0,35 \text{ s}$

- 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*)

# Tests de validation

## Comparaison avec modèle EF – 3D

- Résultats

	Modèle Advance 3D	Modèle SisQuai	Ecart
$T_{\text{long}}$ (s)	0,94	1,01	7%
$T_{\text{trans}}$ (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%

- Écart de 4 à 7 % sur les périodes propres
- Écart de l'ordre de  $\pm 30$  % sur les sollicitations induites dans les différents éléments

# Tests de validation

## Comparaison avec modèle EF – 3D

- Influence de la variabilité de certains paramètres de calcul

	Influence masse portique rajoutée		
	Modèle Advance 3D	Modèle SisQuai	Ecart
$T_{long}$ (s)	0,96	1,02	6%
$T_{trans}$ (s)	0,71	0,74	4%
$M_{max\ pieu\_BA}$ (MNm)	4,30	5,42	26%
$V_{max\ pieu\_BA}$ (MN)	2,02	1,48	-27%
$F_{max\ tirant}$ (MN)	3,50	3,26	-7%

	Influence marée haute		
	Modèle Advance 3D	Modèle SisQuai	Ecart
$T_{long}$ (s)	0,95	1,01	6%
$T_{trans}$ (s)	0,70	0,74	6%
$M_{max\ pieu\_BA}$ (MNm)	4,25	5,33	25%
$V_{max\ pieu\_BA}$ (MN)	2,08	1,45	-30%
$F_{max\ tirant}$ (MN)	3,08	3,02	-2%

	Influence marée basse		
	Modèle Advance 3D	Modèle SisQuai	Ecart
$T_{long}$ (s)	0,93	1,00	8%
$T_{trans}$ (s)	0,69	0,73	6%
$M_{max\ pieu\_BA}$ (MNm)	3,96	5,29	34%
$V_{max\ pieu\_BA}$ (MN)	1,99	1,44	-28%
$F_{max\ tirant}$ (MN)	3,04	3,00	-1%

# Tests de validation

## Comparaison avec modèle EF – 3D

- Influence de la variabilité de certains paramètres de calcul

	Influence sol rocheux			Influence sol très mou		
	Modèle Advance 3D	Modèle SisQuai	Ecart	Modèle Advance 3D	Modèle SisQuai	Ecart
$T_{long}$ (s)	0,72	0,52	<b>-28%</b>	1,50	1,54	<b>3%</b>
$T_{trans}$ (s)	0,58	0,42	<b>-28%</b>	0,87	0,88	<b>1%</b>
$M_{max\ pieu\_BA}$ (MNm)	5,78	7,29	<b>26%</b>	2,47	3,87	<b>57%</b>
$V_{max\ pieu\_BA}$ (MN)	3,37	3,35	<b>-1%</b>	0,81	0,75	<b>-7%</b>
$F_{max\ tirant}$ (MN)	2,56	1,58	<b>-38%</b>	3,51	3,54	<b>1%</b>

# Tests de validation

## Comparaison avec modèle EF – 3D

- Influence de la variabilité de certains paramètres de calcul

	Influence suppression tubage		
	Modèle Advance 3D	Modèle SisQuai	Ecart
$T_{long}$ (s)	0,98	1,29	32%
$T_{trans}$ (s)	0,71	0,82	15%
$M_{max\ pieu\_BA}$ (MNm)	8,67	6,64	-23%
$V_{max\ pieu\_BA}$ (MN)	2,98	1,81	-39%
$F_{max\ tirant}$ (MN)	3,14	3,32	6%

	Influence fissuration pieux		
	Modèle Advance 3D	Modèle SisQuai	Ecart
$T_{long}$ (s)	1,08	1,26	17%
$T_{trans}$ (s)	0,75	0,82	9%
$M_{max\ pieu\_BA}$ (MNm)	2,45	2,61	7%
$V_{max\ pieu\_BA}$ (MN)	1,63	0,71	-56%
$F_{max\ tirant}$ (MN)	3,24	3,31	2%

	Influence suppr. tubes + fiss. pieux		
	Modèle Advance 3D	Modèle SisQuai	Ecart
$T_{long}$ (s)	1,45	2,03	40%
$T_{trans}$ (s)	0,85	0,95	12%
$M_{max\ pieu\_BA}$ (MNm)	5,32	3,06	-42%
$V_{max\ pieu\_BA}$ (MN)	1,82	0,83	-54%
$F_{max\ tirant}$ (MN)	3,54	3,75	6%

- Écart 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 (1/2)

- 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



## Conclusions (2/2)

- Précision de l'ordre de  $\pm 40 \%$  par rapport à une modélisation plus sophistiquée (*et beaucoup plus consommatrice*) aux EF 3D
- 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

## Suites à donner

- Intégration des risques d'instabilité de pente (glissement), notamment en cas de **liquéfaction des sols** (*à aborder dans une note de problématique spécifique aux aspects géotechniques*)
- Exploration du comportement de ce type d'ouvrages à poursuivre (*dans le cadre d'une action de recherche Cerema/Ifsttar*) :
  - **Approche push-over** (*en cours sur la base des recommandations port LA*)
  - **Modélisation aux EF de type César** (*analyse quantitative par modélisation massif de sol + réponse dynamique temporelle non-linéaire à une sollicitation de type accélérogramme*)
  - **Test sur modèle réduit en centrifugeuse** (*analyse qualitative*)
- **Travail préparatoire à la rédaction d'un Arrêté spécifique sur les infrastructures portuaires...**

# Merci de votre attention



## **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 72 14 32 25

[denis.davi@cerema.fr](mailto:denis.davi@cerema.fr)