

Journée scientifique et technique CFMS – FNTP du 16 Sept 2021



Ouvrages Portuaires

Prise en compte du risque sismique dans le dimensionnement des structures portuaires

Fahd Cuirra (Terrasol) – Gustavo Pereira (Soletanche Bachy)

Sommaire

- Risque sismique en milieu portuaire
- Choix de l'action sismique
- Les méthodes d'analyse
 - Structures gravitaires
 - Ecrans de soutènement
 - Quai sur pieux
- Conclusion

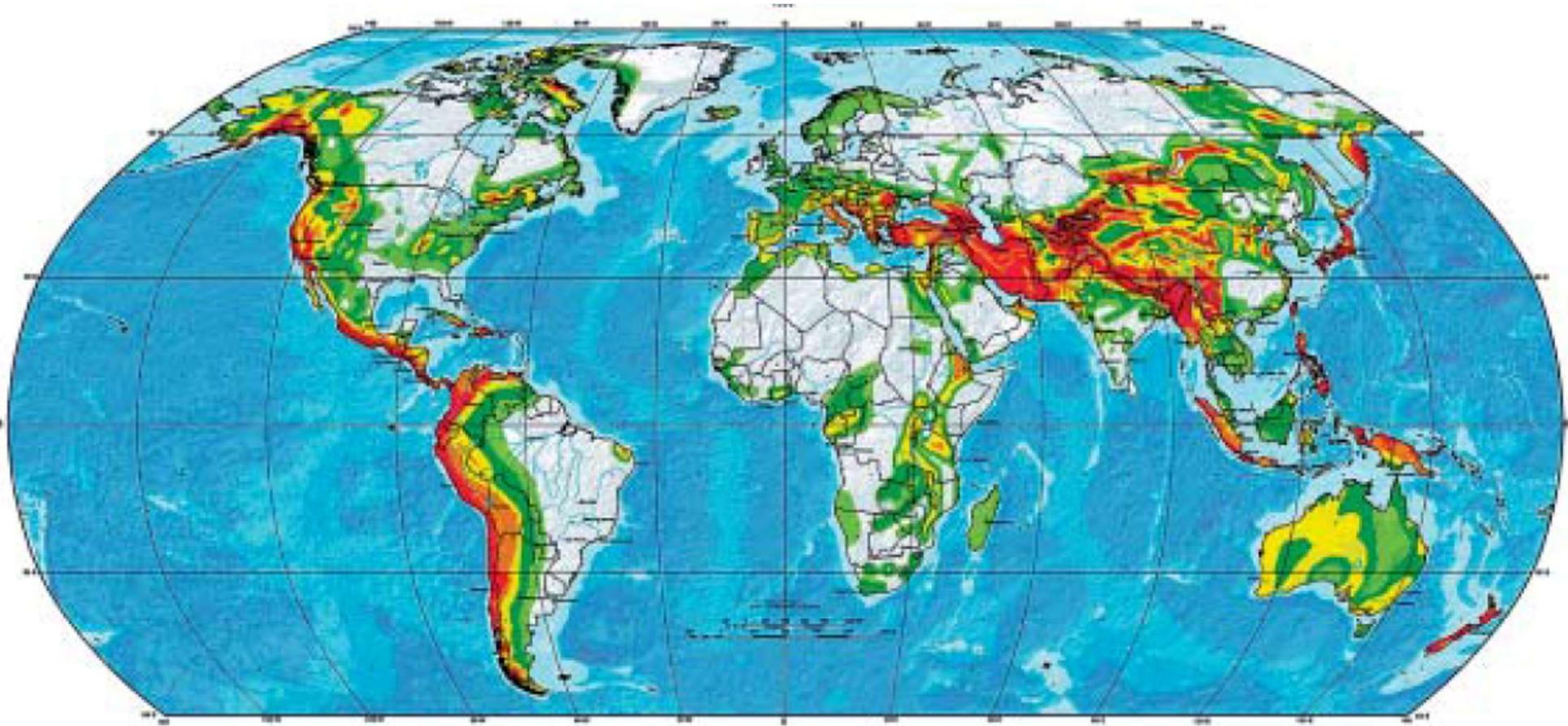
Risque sismique en milieu portuaire

- Introduction

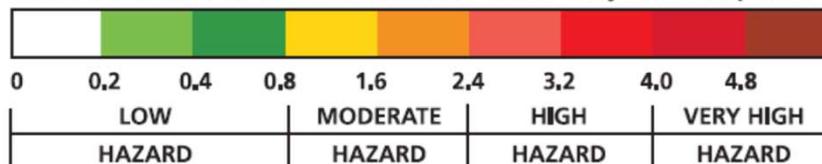
- ⇒ Infrastructures en grand développement au niveau mondial, y compris dans des régions très sismiques
- ⇒ Ouvrages portuaires très souvent localisés dans des sites difficiles sur le plan géotechnique
- ⇒ Retours d'expériences sur des ouvrages maritimes post-séisme (e.g. Oakland, 1989; Kobe, 1995) mettent en évidence l'ampleur des dégâts et l'enjeu économique important lié à la maîtrise du risque sismique

Risque sismique en milieu portuaire

- Niveaux de sismicité et situation géographique à l'échelle mondiale



PEAK GROUND ACCELERATION (m/s²)
10% PROBABILITY OF EXCEEDANCE IN 50 YEARS, 475-year return period



(source = USGS)

Risque sismique en milieu portuaire

• Principaux types de structures portuaires

⇒ Ecrans de soutènement

- ⇒ Paroi moulée, palplanches, combi-wall (tubes + palplanches)
- ⇒ Appui par tirant passif (ou autre)

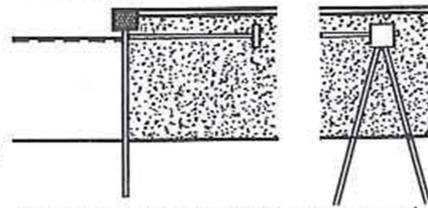
⇒ Structures gravitaires

- ⇒ Caissons, blocs, palplanches cellulaires...

⇒ Quais sur pieux

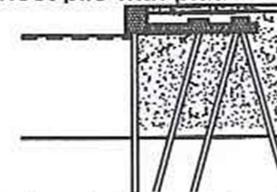
- ⇒ Pieux verticaux, pieux inclinés
- ⇒ Pieux acier, pieux béton

Sheet pile



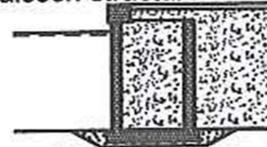
- Soil-retaining sheet pile structure with auxiliary structures for anchoring.
- Sheet pile, fill-soil foundation.

Sheet pile with platform



- Soil-retaining sheet pile structure with horizontal pile-supported slab.
- Sheet pile, pile, fill-soil foundation.

Caisson structure



- Monolithic, gravity, soil-retaining structure
- Foundation on rubble and soil or rock.

Massive



- Monolithic, gravity, soil-retaining structure.
- Foundation on rubble and soil or rock.

Pile



- Pile structure, often partly soil-retaining and with auxiliary structures for anchoring.
- Pile foundation.

Column



- Structure on columns with auxiliary structures for horizontal force absorption. Sometimes partly soil-retaining.
- Column foundation.

Action sismique croissante

Risque sismique en milieu portuaire

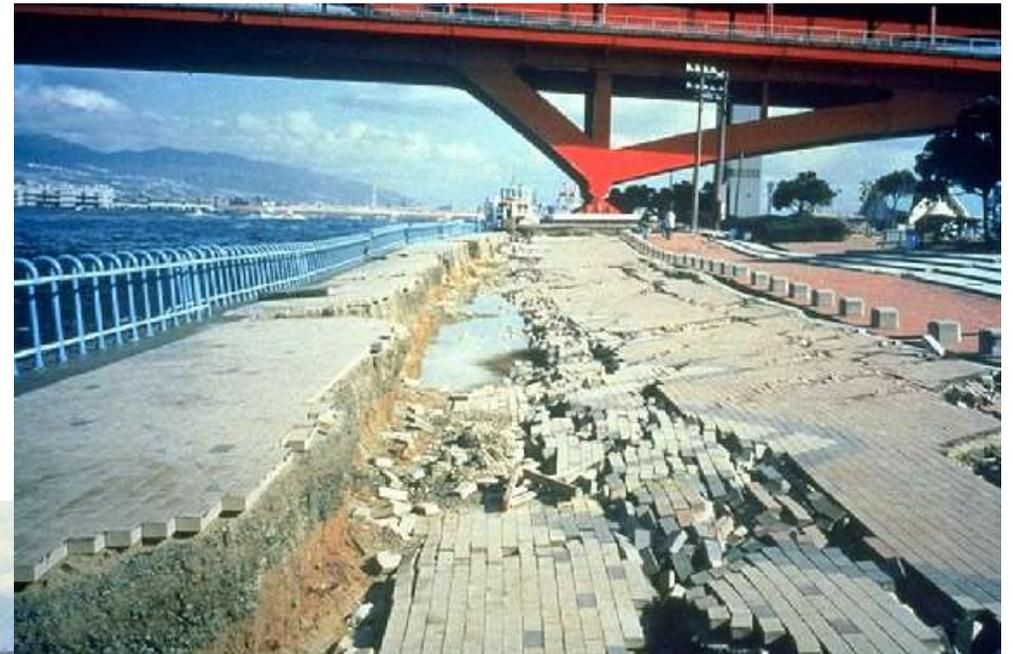
- Les principaux dommages sismiques affectant un ouvrage portuaire

Localisation	Intensité	Dommages	Causes
Chili Alaska Japon Mexique Californie Philippines	Mw = 7 à 9 PGA = 0,1 à 0,3g	Déformations excessives (tassement, flèche, rotation) Rupture des ancrages, flambement des pieux Effondrement des équipements et des canalisations	Liquéfaction du remblai Poussée excessive Perte de butée Défaut de résistance STR

La liquéfaction se révèle être le principal mécanisme : règle de conception en présence d'un terrain liquéfiable = mieux vaut prévenir que calculer

Risque sismique en milieu portuaire

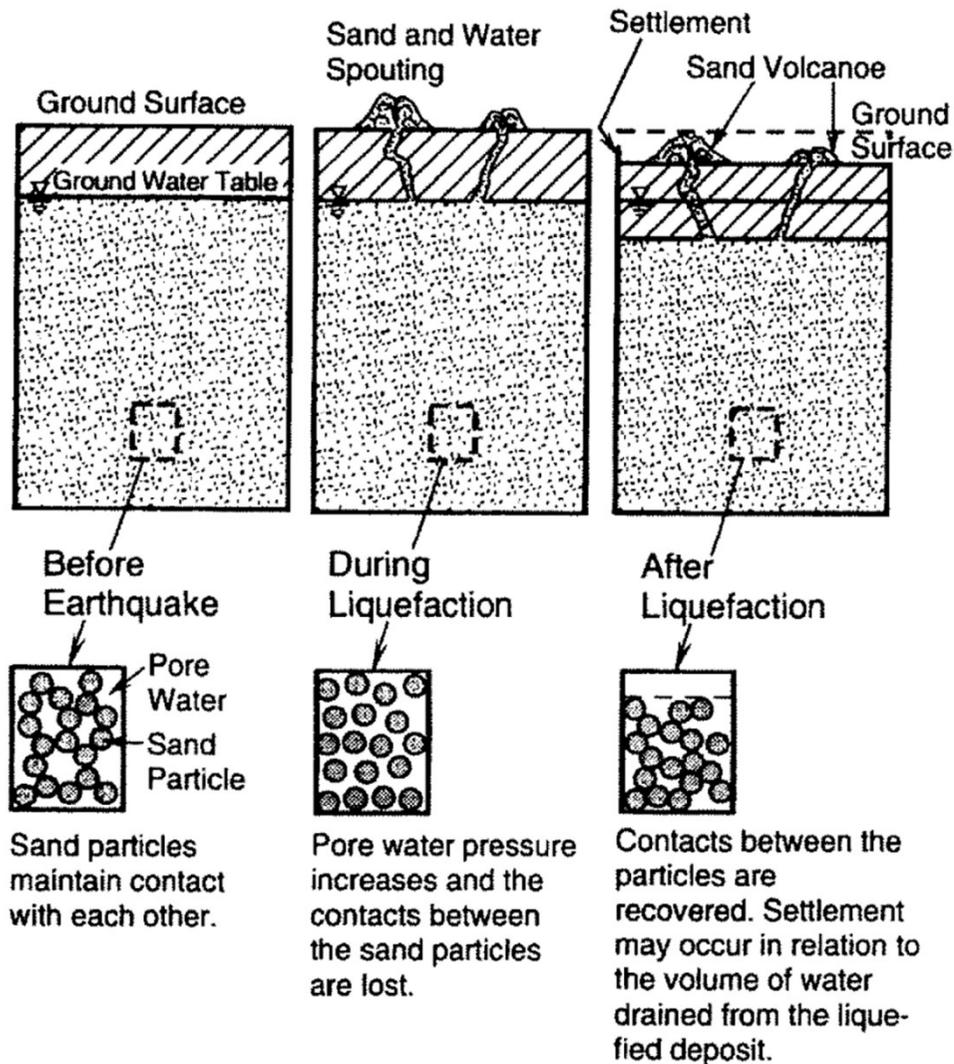
- Dommages sismiques affectant un ouvrage portuaire



d'après A. Pecker (2015)

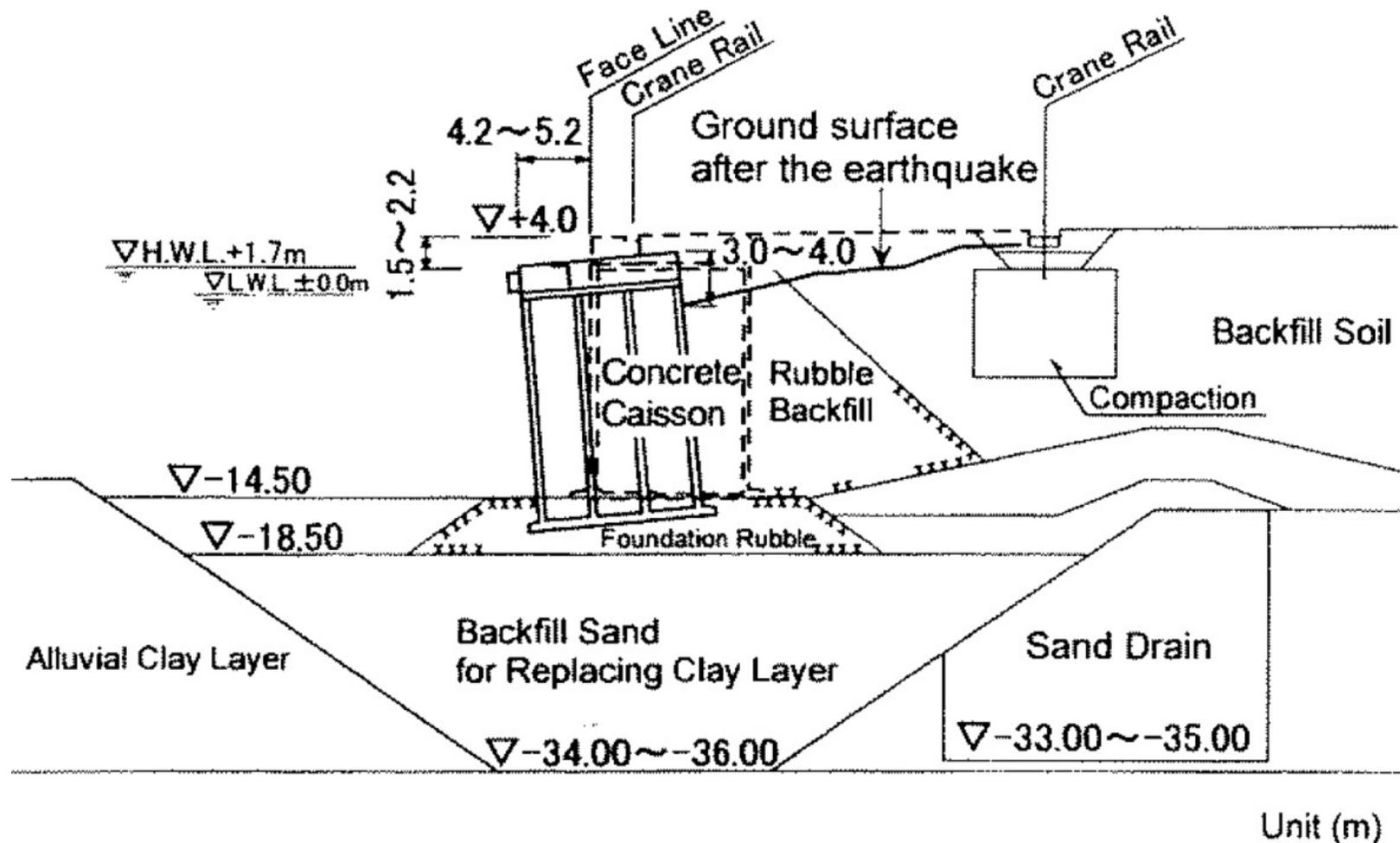
Risque sismique en milieu portuaire

- Dommages sismiques affectant un ouvrage portuaire : la liquéfaction



Risque sismique en milieu portuaire

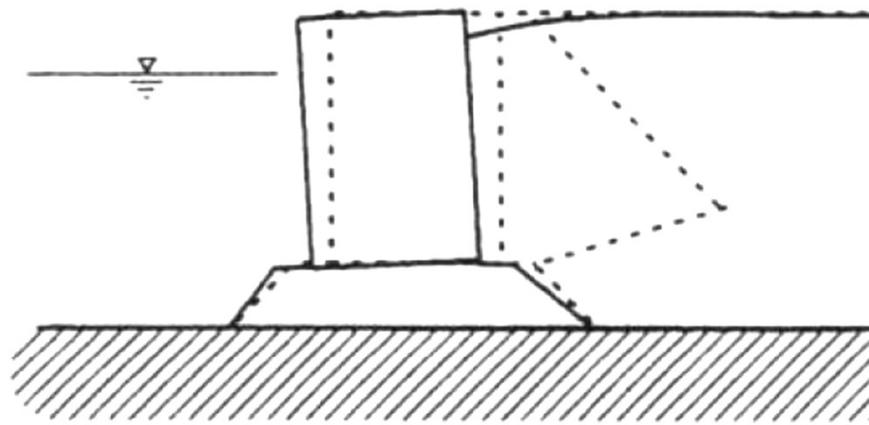
- Dommages sismiques affectant un ouvrage portuaire : Kobe 1995



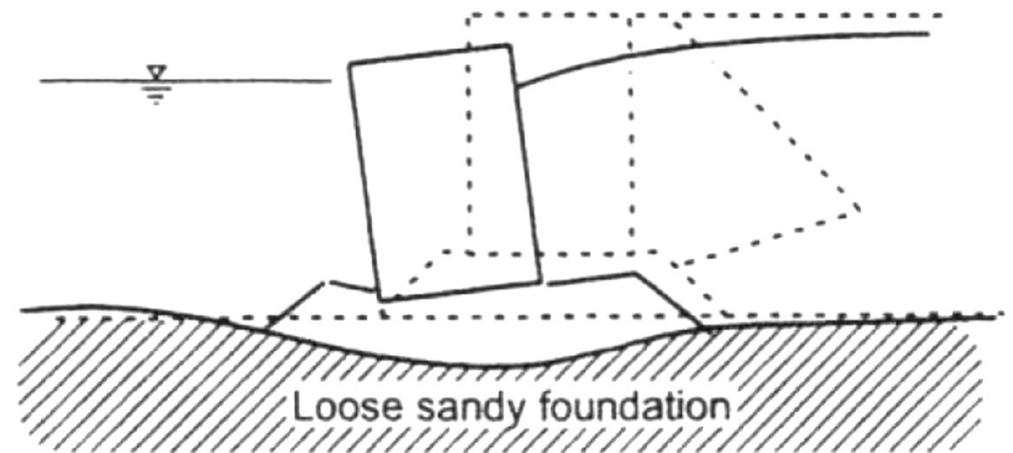
Source = PIANC

Risque sismique en milieu portuaire

- Mécanismes de ruine potentiels : structures gravitaires



(a) On firm foundation

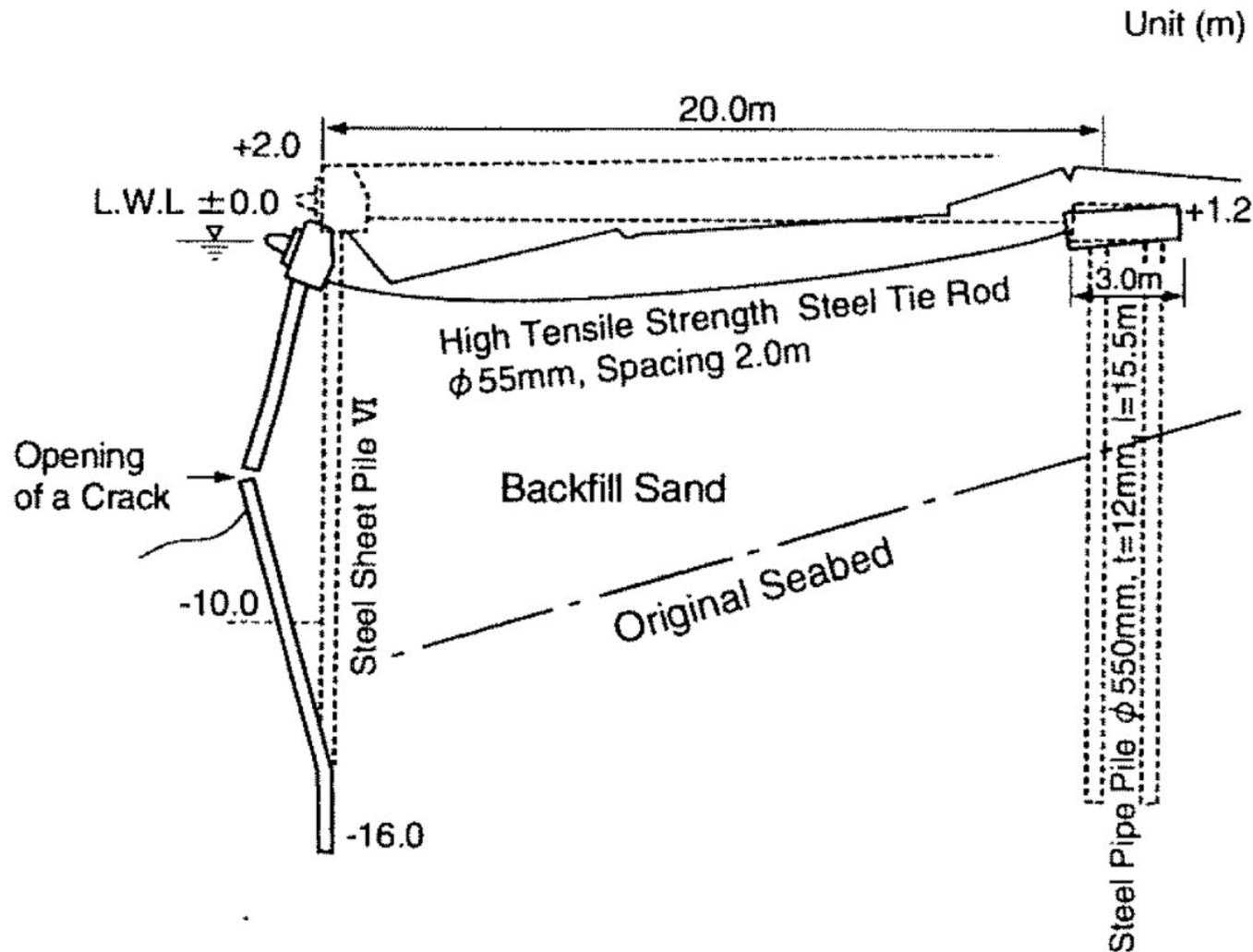


(b) On loose sandy foundation

Source = PIANC

Risque sismique en milieu portuaire

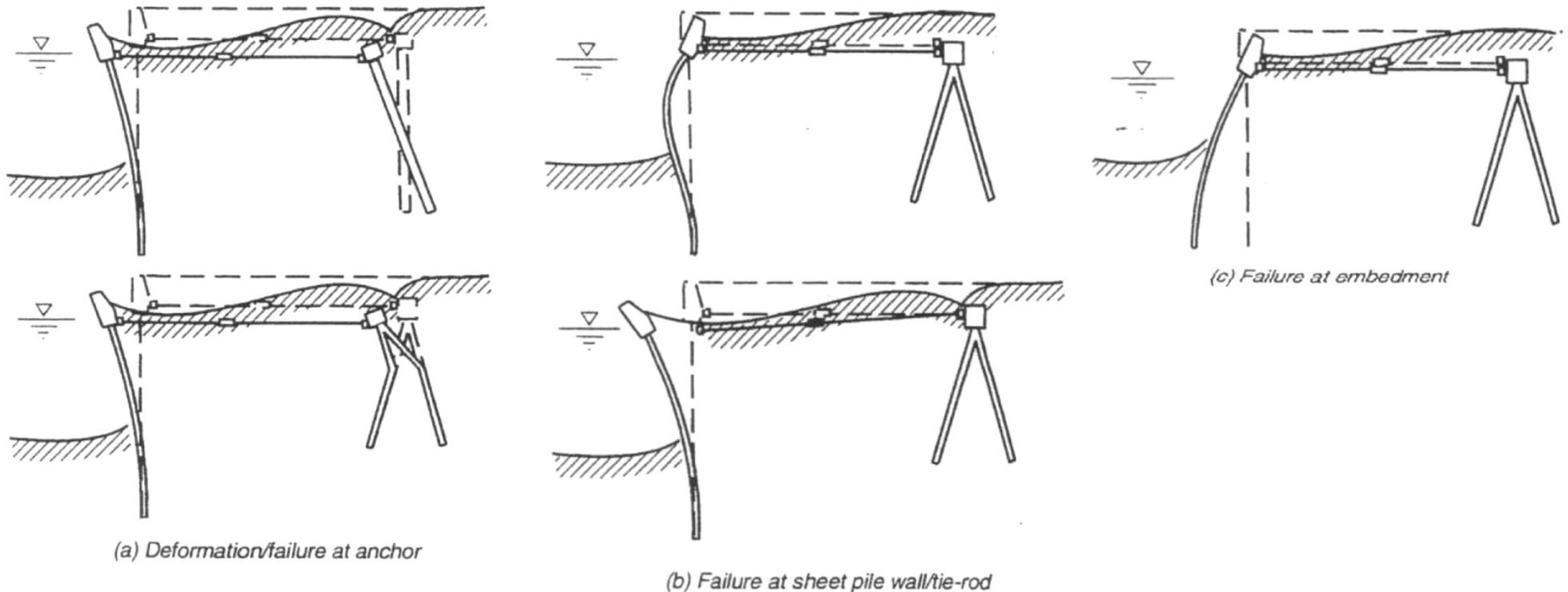
- Dommages sismiques affectant un ouvrage portuaire : Akira 1983



Source = PIANC

Risque sismique en milieu portuaire

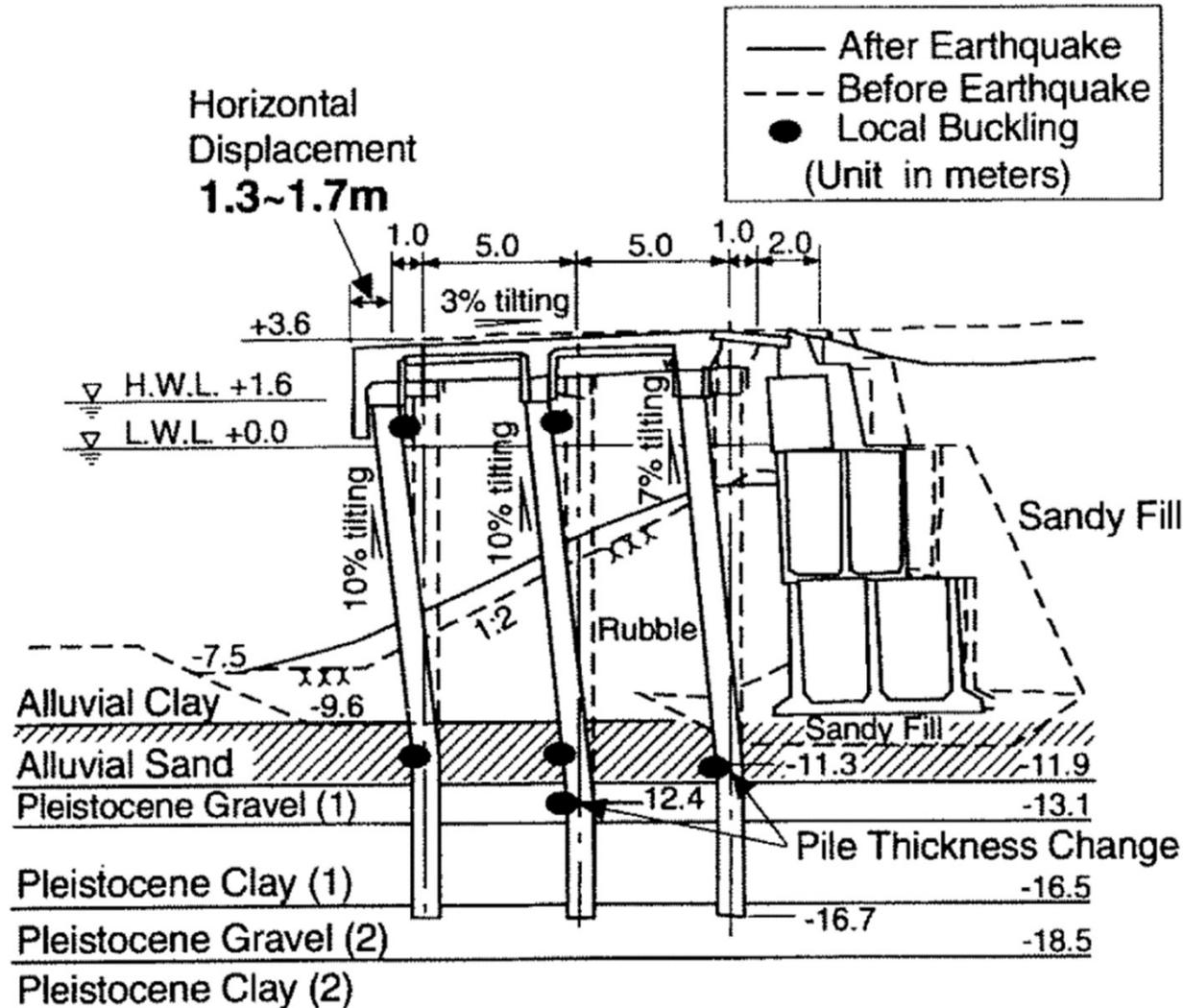
- Mécanismes de ruine potentiels : écrans de soutènement



Source = PIANC

Risque sismique en milieu portuaire

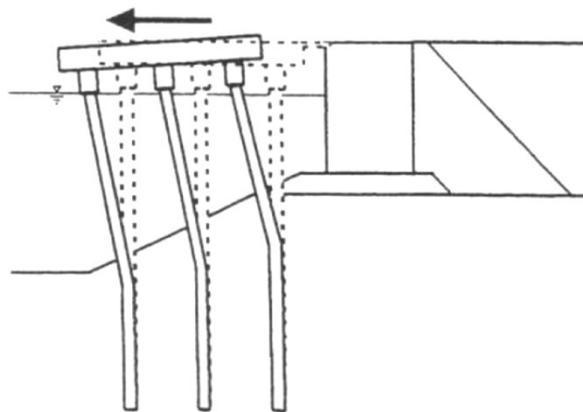
- Dommages sismiques affectant un ouvrage portuaire : Kobe 1995



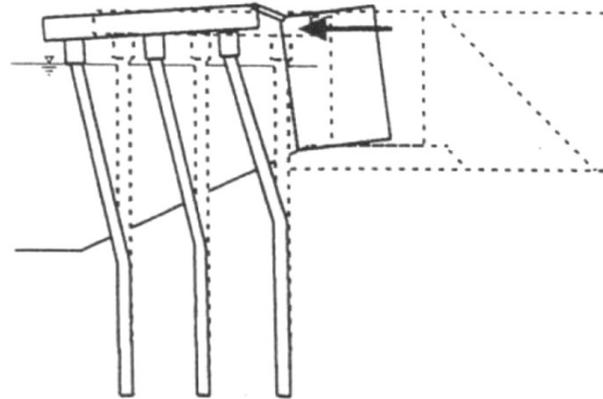
Source = PIANC

Risque sismique en milieu portuaire

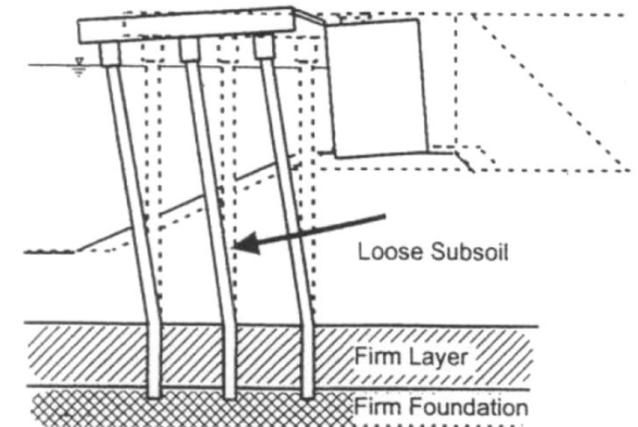
- Mécanismes de ruine potentiels : quai sur pieux



(a) Deformation due to inertia force at deck



(b) Deformation due to horizontal force from retaining wall



(c) Deformation due to lateral displacement of loose subsoil

Source = PIANC

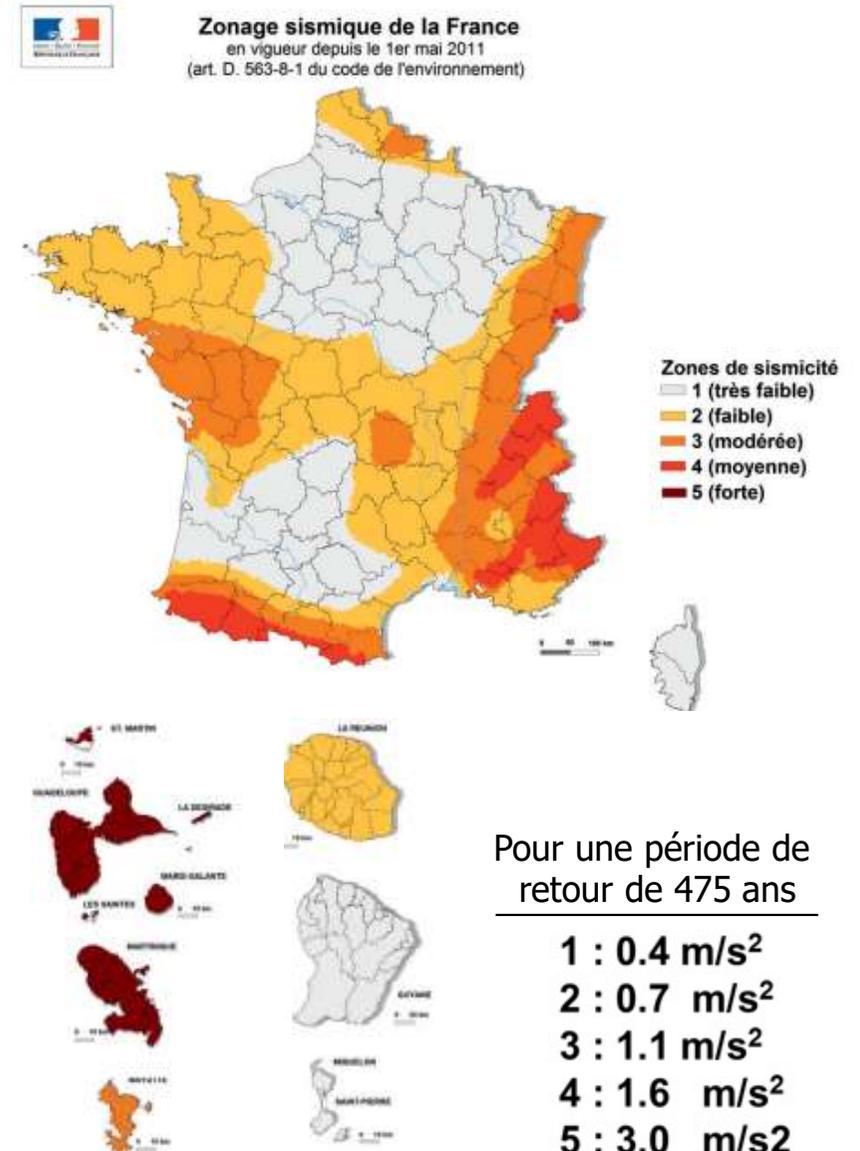
Sommaire

- Risque sismique en milieu portuaire
- **Choix de l'action sismique**
- Les méthodes d'analyse
 - Structures gravitaires
 - Ecrans de soutènement
 - Quai sur pieux
- Conclusion

Choix de l'action sismique

- Zonage sismique administratif

Port / Ville	Zone de sismicité
Le Havre, Rouen	1
Bordeaux, Dunkerque, Marseille, Boulogne-Sur-Mer, Brest, Cherbourg, Toulon, Calais, La Réunion	2
La Rochelle, Saint-Nazaire, Fos-sur-Mer, Bayonne, Mayotte	3
Point à Pitre, Fort de France	5



Choix de l'action sismique

- Accélération nominale (PGA) selon le formalisme de l'Eurocode 8

$$a_N = \underbrace{\gamma_I}_{\text{classe ouvrage}} \times \underbrace{a_{gr}}_{\text{Zone sismique}} \times \underbrace{S}_{\text{classe sol}} \times \underbrace{S_T}_{\text{Topographie}}$$

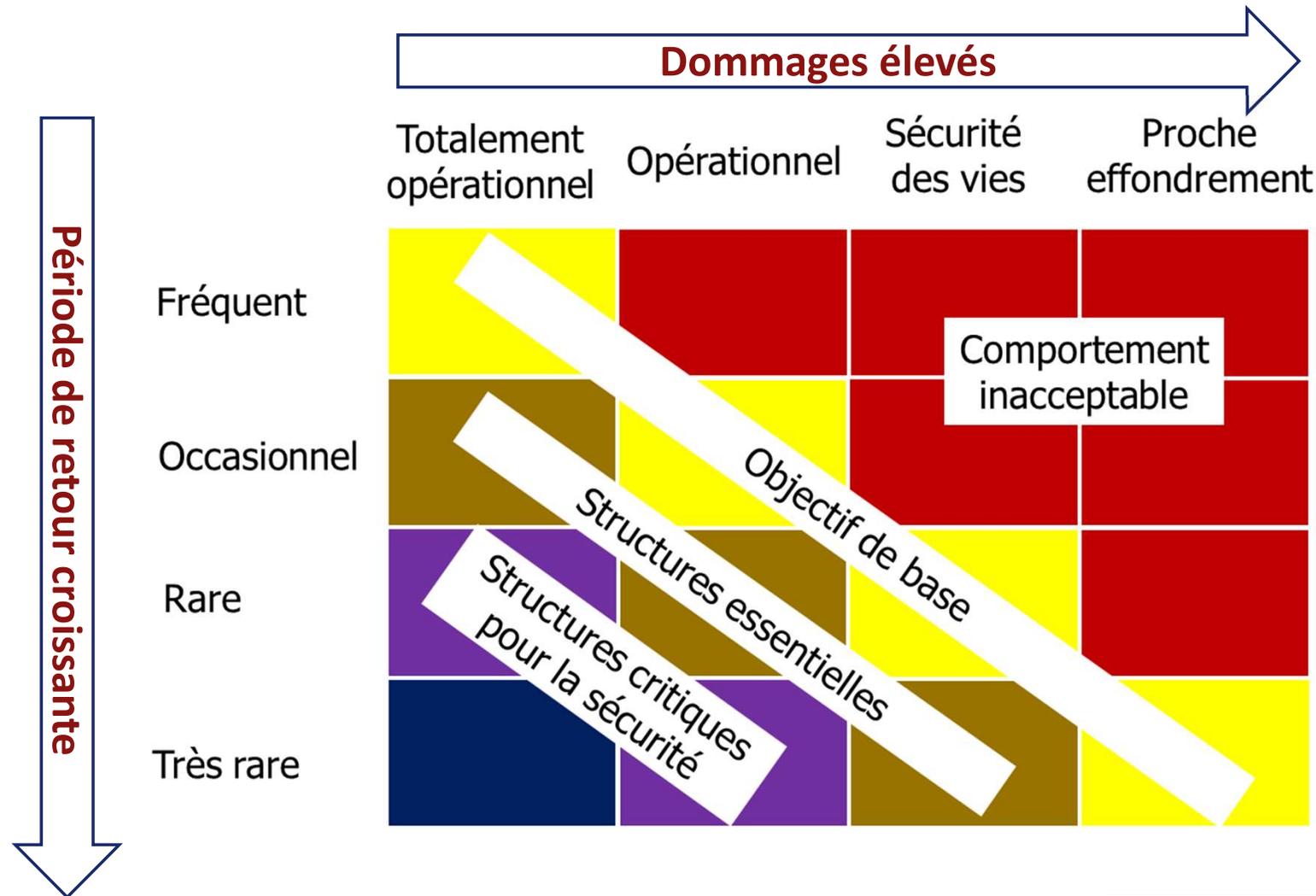
γ_I	Catégorie d'importance de l'ouvrage	I	II	III	IV
	Valeurs du coefficient d'importance γ_I	0,80	1,00	1,20	1,40

a_{gr}	Zone de sismicité	1	2	3	4	5
	Accélération max de référence (m/s ²)	0,40	0,70	1,10	1,60	3,00

S	Classe du sol sous l'ouvrage	A	B	C	D	E
	Valeur de S pour les zones sismiques 1 à 4	1,00	1,35	1,50	1,60	1,80
	Valeur de S pour la zone sismique 5	1,00	1,20	1,15	1,35	1,40

Choix de l'action sismique

- Le rôle du coefficient d'importance – notion d'objectif de performance



Source = A. Pecker

Choix de l'action sismique

- Le rôle du coefficient d'importance – lien avec la période de retour

	Catégorie Importance	Coefficient Importance	Période de retour	Probabilité de dépassement
I	Structures secondaires	0,80	250 ans	18%
II	Structures courantes	1,00	475 ans	10%
III	Structures essentielles	1,20	800 ans	6%
IV	Structures primordiales	1,40	1 300 ans	4%
	ICPE (existantes)	1,85	3 000 ans	2%
	ICPE (neuves)	2,20	5 000 ans	1%

$$\gamma_I = \sqrt[3]{\frac{T_{\text{retour}}}{T_{475}}}$$

$$P(a \geq a_g) = 1 - \exp\left(-\frac{D_{\text{vie}}}{T_{\text{retour}}}\right)$$

Choix de l'action sismique

- Application aux ouvrages portuaires

⇒ Les ouvrages portuaires n'obéissent pas nécessairement aux mêmes objectifs de performance que les bâtiments et les ponts

⇒ Choix des objectifs de performance (et donc de la catégorie d'importance) selon considérations suivantes :

- Occupation humaine faible, peu de public
- Protection environnement (manutention produits dangereux, bacs pétroliers etc.)
- Protection de l'outil économique (perte exploitation / exp. Kobé 95)
- Objectif stratégique (accès pour secours – le cas des îles)

⇒ Les recommandations spécialisées telles que celles du PIANC, POLA, etc. donnent des indications utiles en matière d'objectifs de performance et niveaux de dommages associés

Choix de l'action sismique

- Focus sur les recommandations du PIANC : objectifs de performance

Classe de performance	Pour un séisme rare : période de retour $T = 475$ ans / durée utilisation $D = 50$ ans
-----------------------	---

Classe S (structures critiques)	Dommmages de niveau I = Ouvrage opérationnel
------------------------------------	---

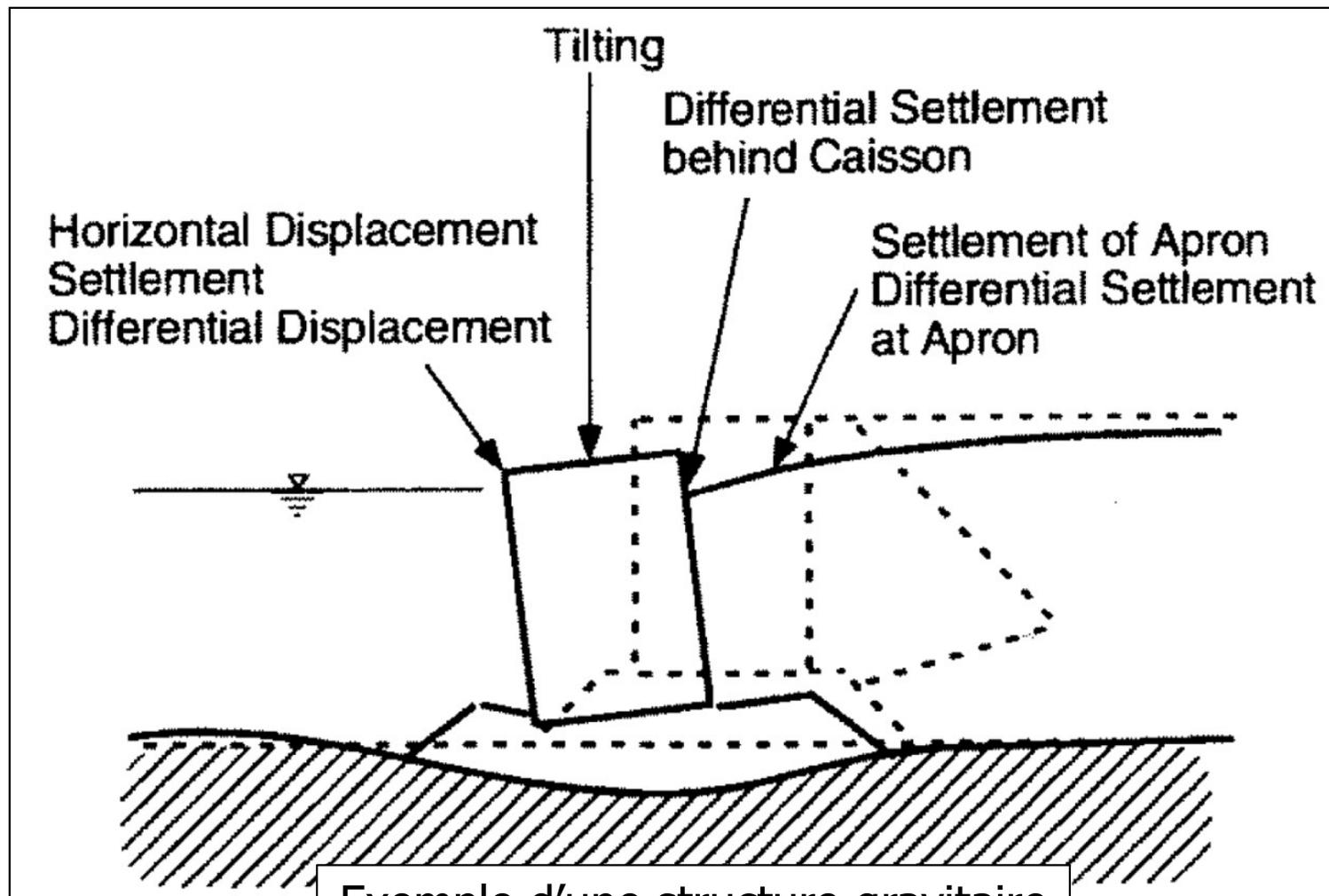
Classe A (structures essentielles)	Dommmages de niveau II = Ouvrage réparable
---------------------------------------	---

Classe B (structures courantes)	Dommmages de niveau III = Ouvrage proche effondrement
------------------------------------	--

Classe C (structures secondaires)	Dommmages de niveau IV = Perte totale de l'ouvrage
--------------------------------------	---

Choix de l'action sismique

- Focus sur les recommandations du PIANC : les niveaux de dommages



Choix de l'action sismique

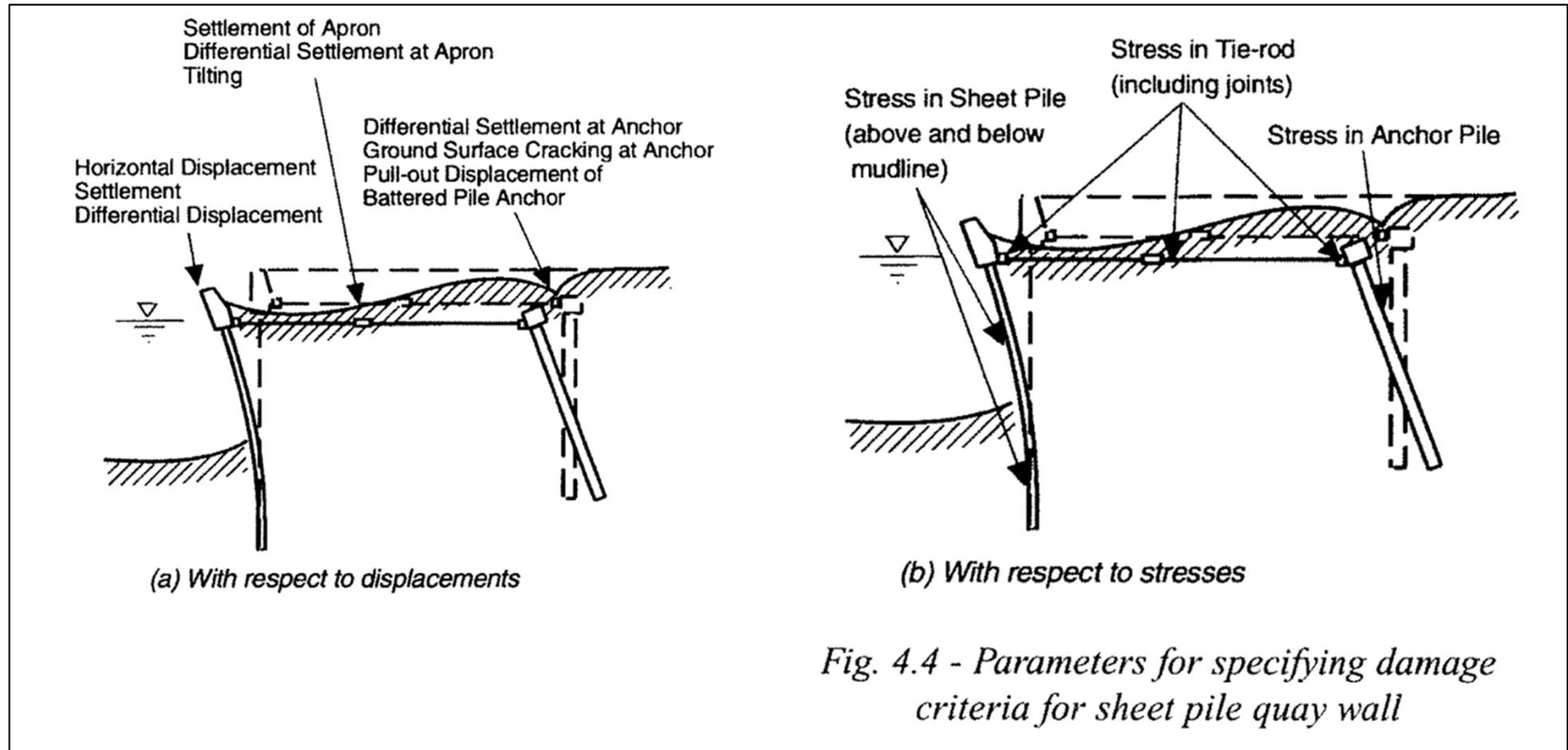
- Focus sur les recommandations du PIANC : les niveaux de dommages

Table 4.1. Proposed damage criteria for gravity quay walls.

Level of damage		Degree I	Degree II	Degree III	Degree IV
Gravity wall	Normalized residual horizontal displacement (d/H)*	Less than 1.5%**	1.5~5%	5~10%	Larger than 10%
	Residual tilting towards the sea	Less than 3°	3~5°	5~8°	Larger than 8°
Apron	Differential settlement on apron	Less than 0.03~0.1 m	N/A***	N/A	N/A
	Differential settlement between apron and non-apron areas	Less than 0.3~0.7 m	N/A	N/A	N/A
	Residual tilting towards the sea	Less than 2~3°	N/A	N/A	N/A
		Opérationnel	Réparable	Proche effondrement	Effondrement

Choix de l'action sismique

- Focus sur les recommandations du PIANC : les niveaux de dommages



Cas d'un quai en double rideaux

Choix de l'action sismique

- Focus sur les recommandations du PIANC : les niveaux de dommages

Table 4.2. Proposed damage criteria for sheet pile quay walls.
(when an anchor is more difficult to restore than a wall).

Level of damage			Degree I	Degree II	Degree III	Degree IV
Residual displacements	Sheet pile wall	Normalized residual horizontal displacement (d/H)*	Less than 1.5%**	N/A	N/A	N/A
		Residual tilting towards the sea	Less than 3°	N/A	N/A	N/A
	Apron	Differential settlement on apron	Less than 0.03~0.1 m	N/A	N/A	N/A
		Differential settlement between apron and non-apron areas	Less than 0.3~0.7 m	N/A	N/A	N/A
		Residual tilting towards the sea	Less than 2~3°	N/A	N/A	N/A
Peak response stresses/ strains	Sheet pile wall	Above mudline	Elastic	Plastic (less than the ductility factor/strain limit above mudline)	Plastic (less than the ductility factor/strain limit above mudline)	Plastic (beyond the ductility factor/strain limit above mudline)
		Below mudline	Elastic	Elastic	Plastic (less than the ductility factor/strain limit below mudline)	Plastic (beyond the ductility factor/strain limit below mudline)
	Tie-rod	Elastic	Elastic	Plastic (less than the ductility factor/strain limit for tie-rod)	Plastic (beyond the ductility factor/strain limit for tie-rod)	
	Anchor	Elastic	Elastic	Plastic (less than the ductility factor/strain limit for anchor)	Plastic (beyond the ductility factor/strain limit for anchor)	

Sommaire

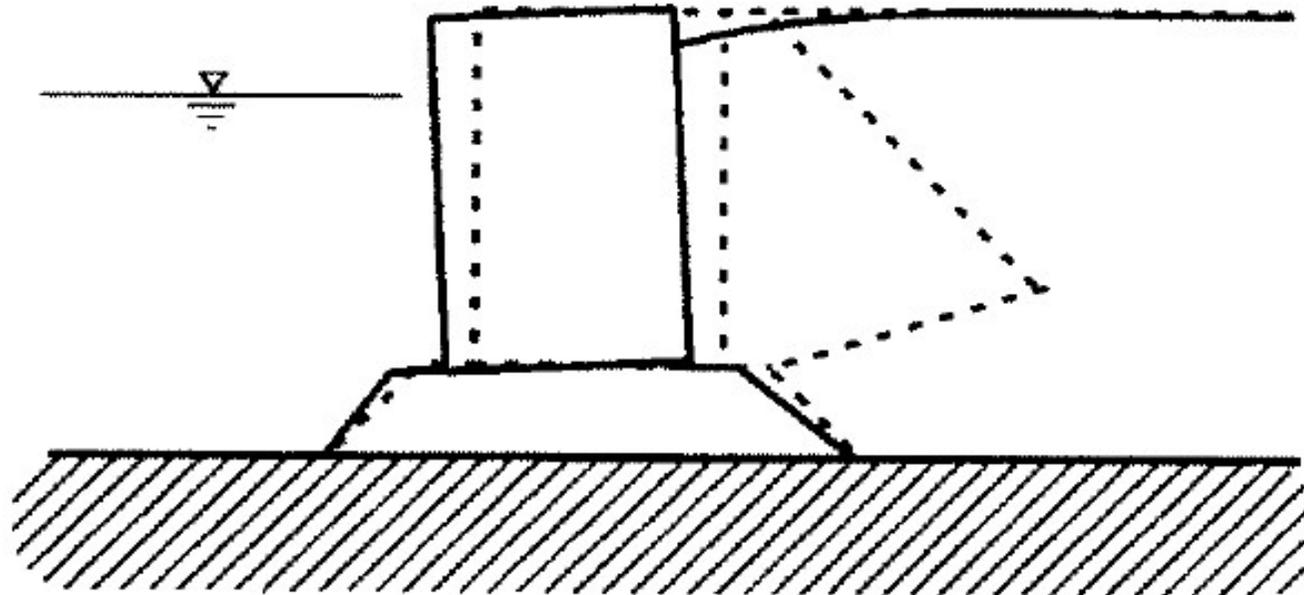
- Risque sismique en milieu portuaire
- Choix de l'action sismique
- **Les méthodes d'analyse**
 - Structures gravitaires
 - Ecrans de soutènement
 - Quai sur pieux
- Conclusion

Méthodes d'analyse

- Analyse de la réponse sismique selon 3 niveaux de complexité
 - ⇒ Niveau 1 Analyse pseudo-statique simplifiée
Modèles pseudo-statiques pour quais poids et écrans
Méthode des spectres de réponse pour quais sur pieux
 - ⇒ Niveau 2 Analyse dynamique simplifiée
Modèle de bloc rigide (Newmark) pour quais poids
Analyse de type Pushover pour quais sur pieux
 - ⇒ Niveau 3 Analyse dynamique
Modèle non-linéaire ou linéaire équivalent pour le sol
Modèle linéaire ou non-linéaire pour les éléments structuraux

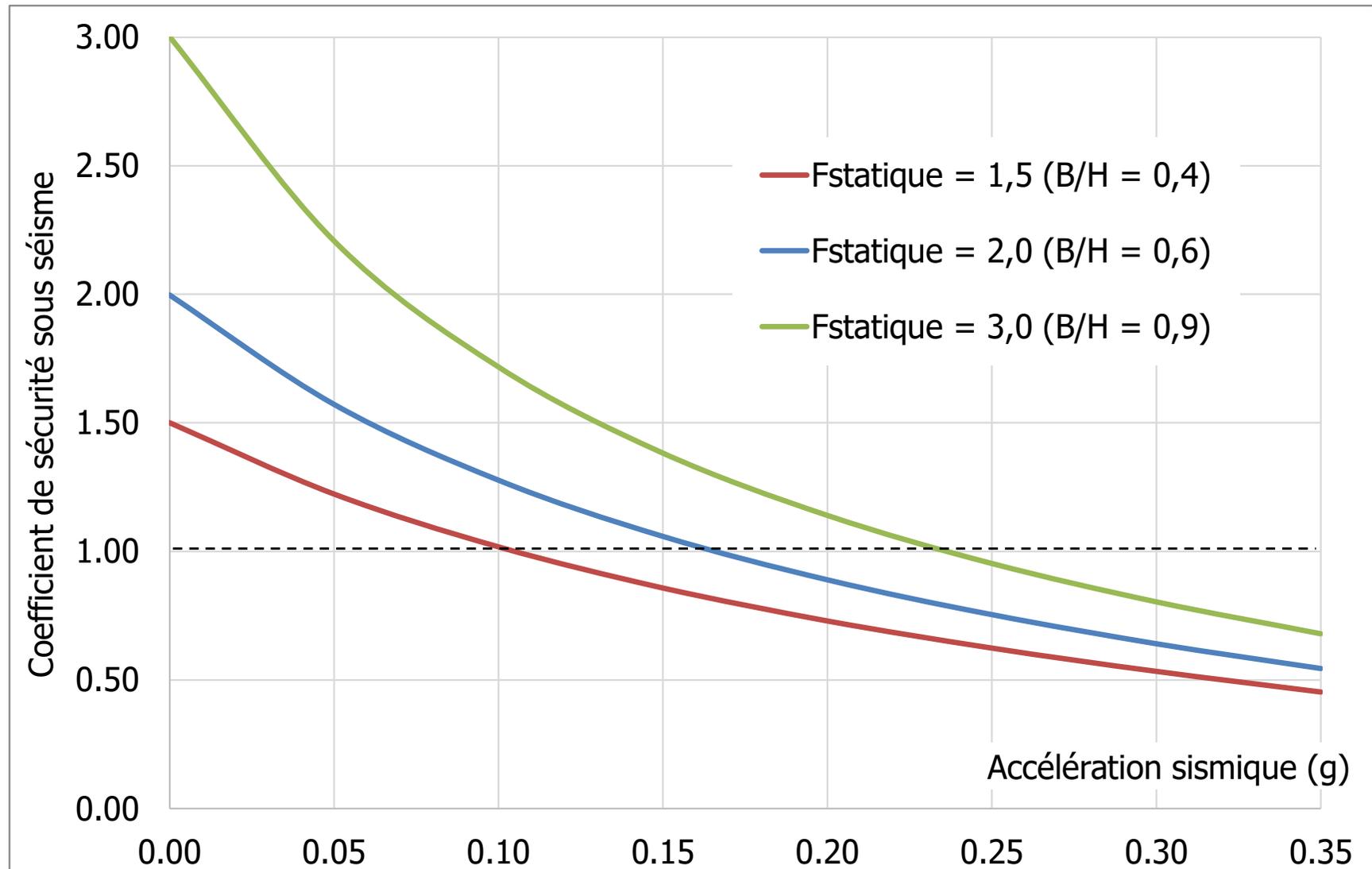
Méthodes d'analyse : structure gravitaire

- Les principaux points clés à gérer
 - ⇒ Risque de liquéfaction des terrains en place et apportés ($F_{\min} = 1,25$ à $2,00$)
 - ⇒ Poussée dynamique des terres (approche pseudo-statique)
 - ⇒ Mononobé-Okabé (approche globale dérivée du modèle Coulomb)
 - ⇒ Calcul à la rupture (calage sous Talren par exemple)
 - ⇒ Théorie de la plasticité (approche locale, futur EC8-5)
 - ⇒ + effets hydrodynamiques éventuels



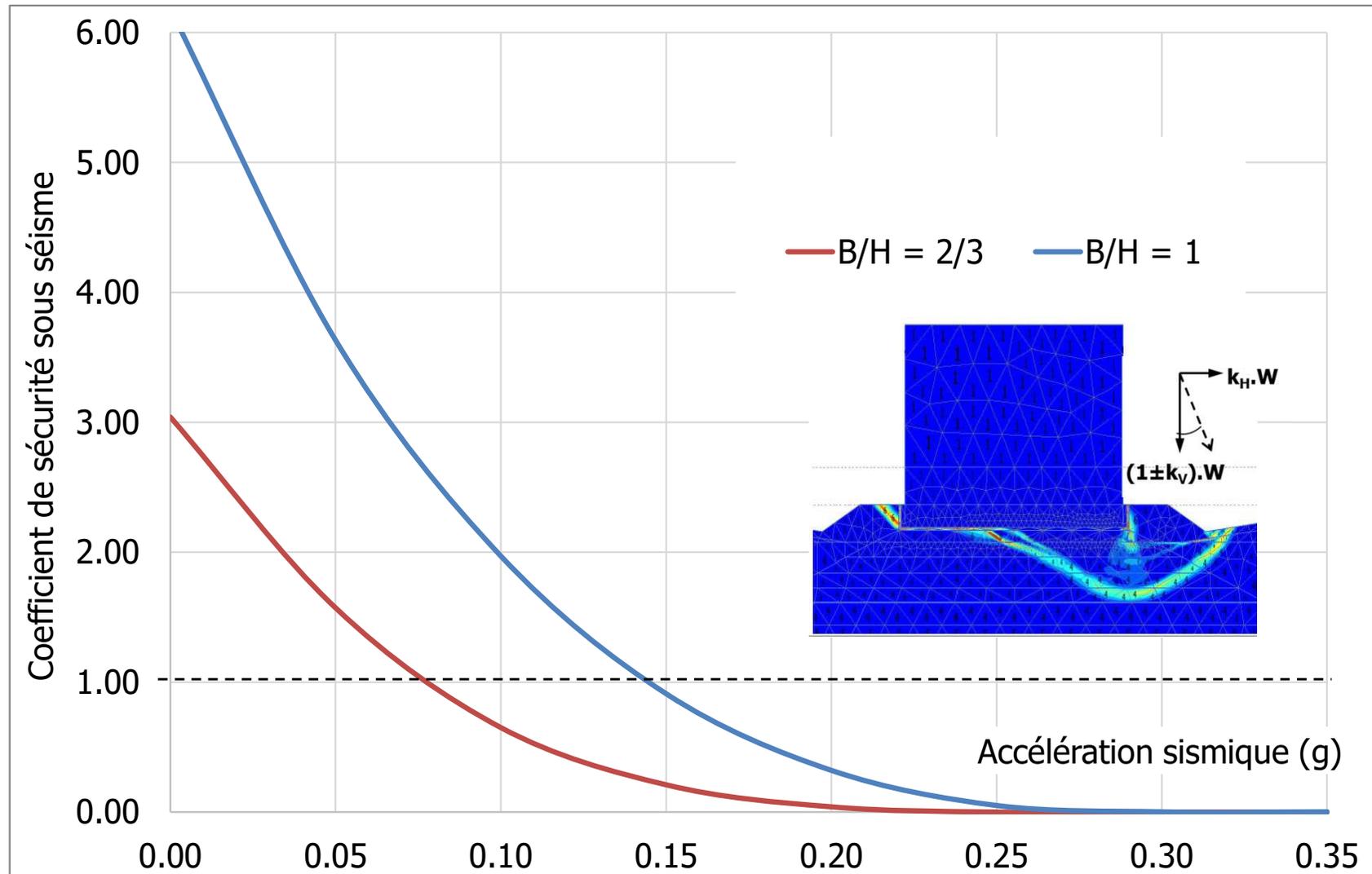
Méthodes d'analyse : structure gravitaire

- Les limites de l'approche pseudo-statique – glissement plan



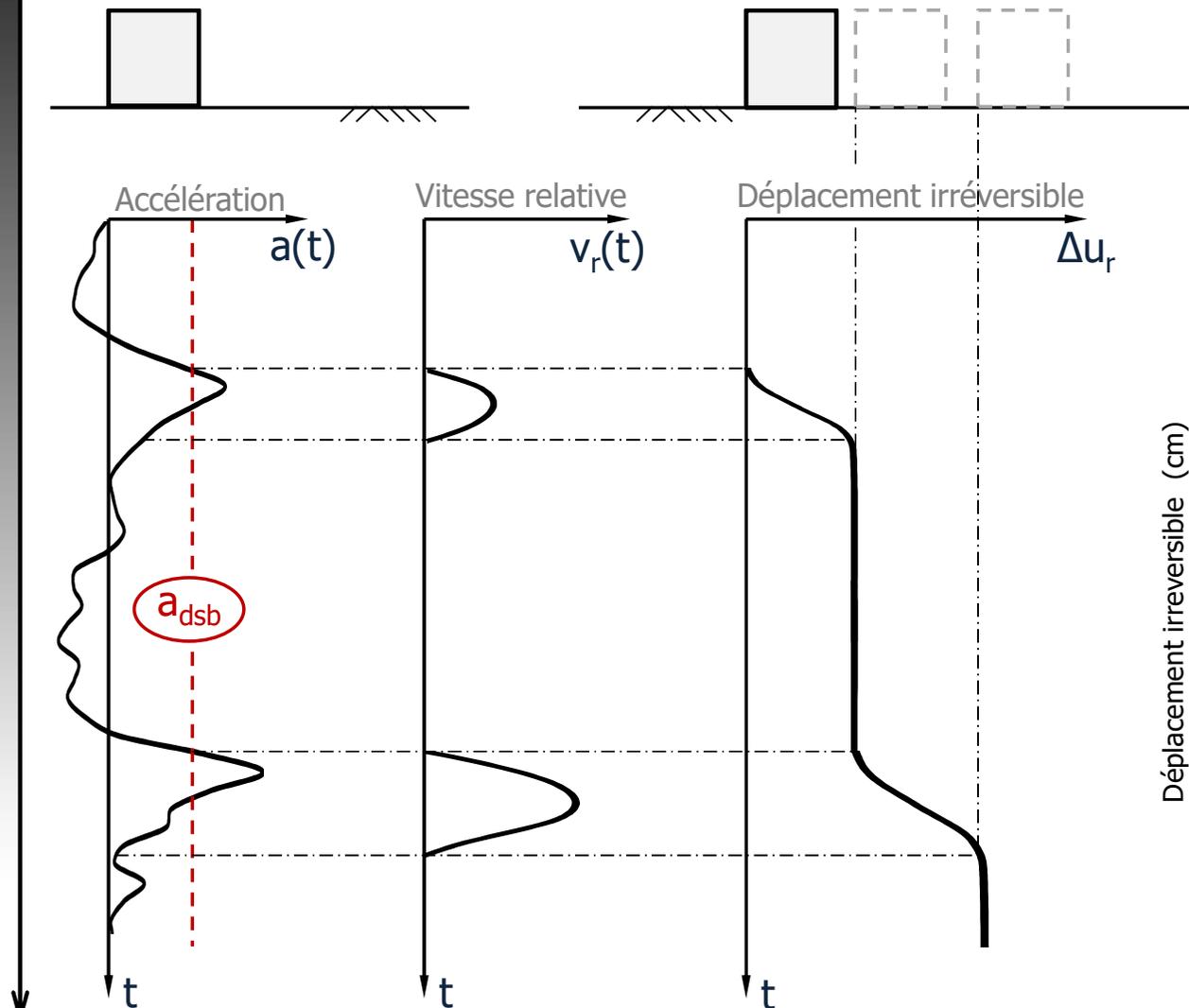
Méthodes d'analyse : structure gravitaire

- Les limites de l'approche pseudo-statique – portance combinée

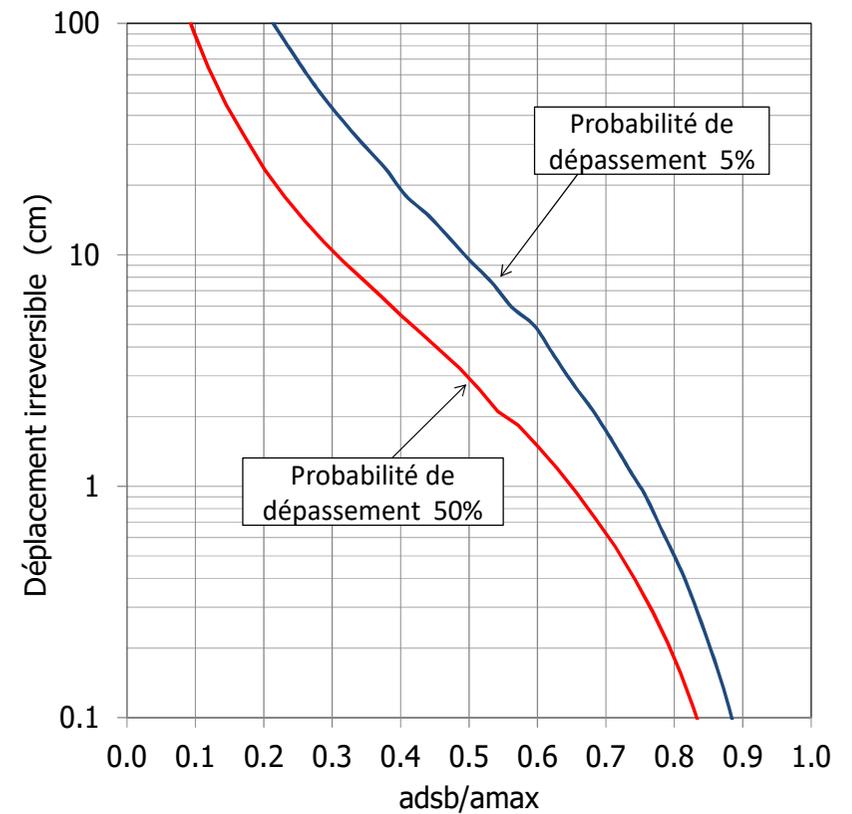


Méthodes d'analyse : structure gravitaire

- Utilisation d'un modèle dynamique simplifié

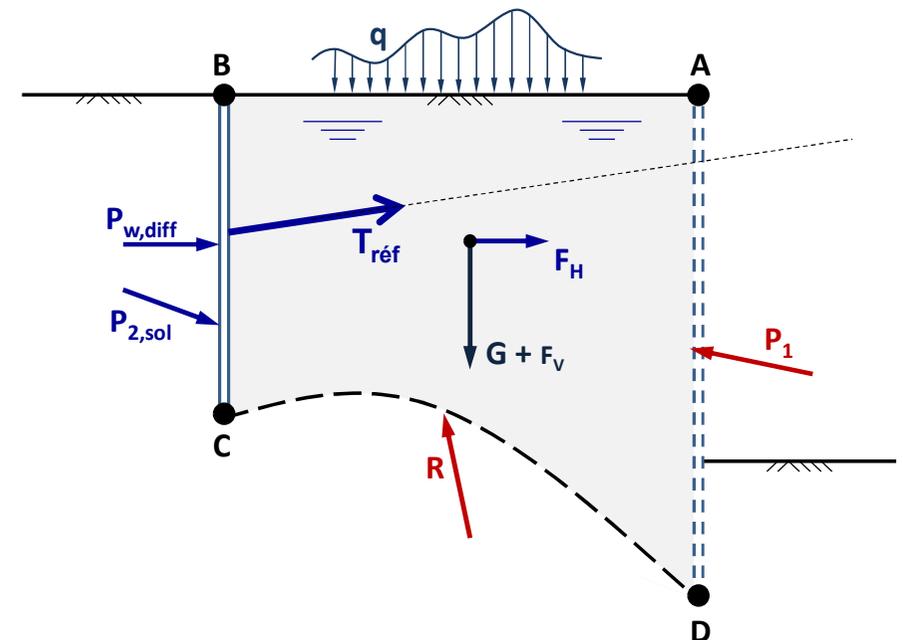
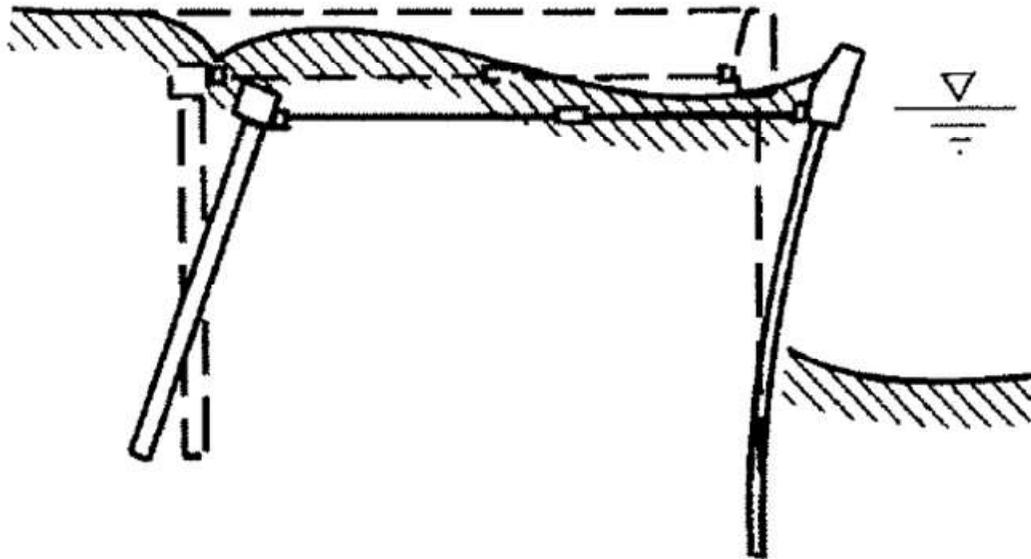


$$\Delta u_r \approx \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i^2}{2} a_{\max,i} \left(\frac{a_{\max,i}}{a_{dsb}} - 1 \right)$$



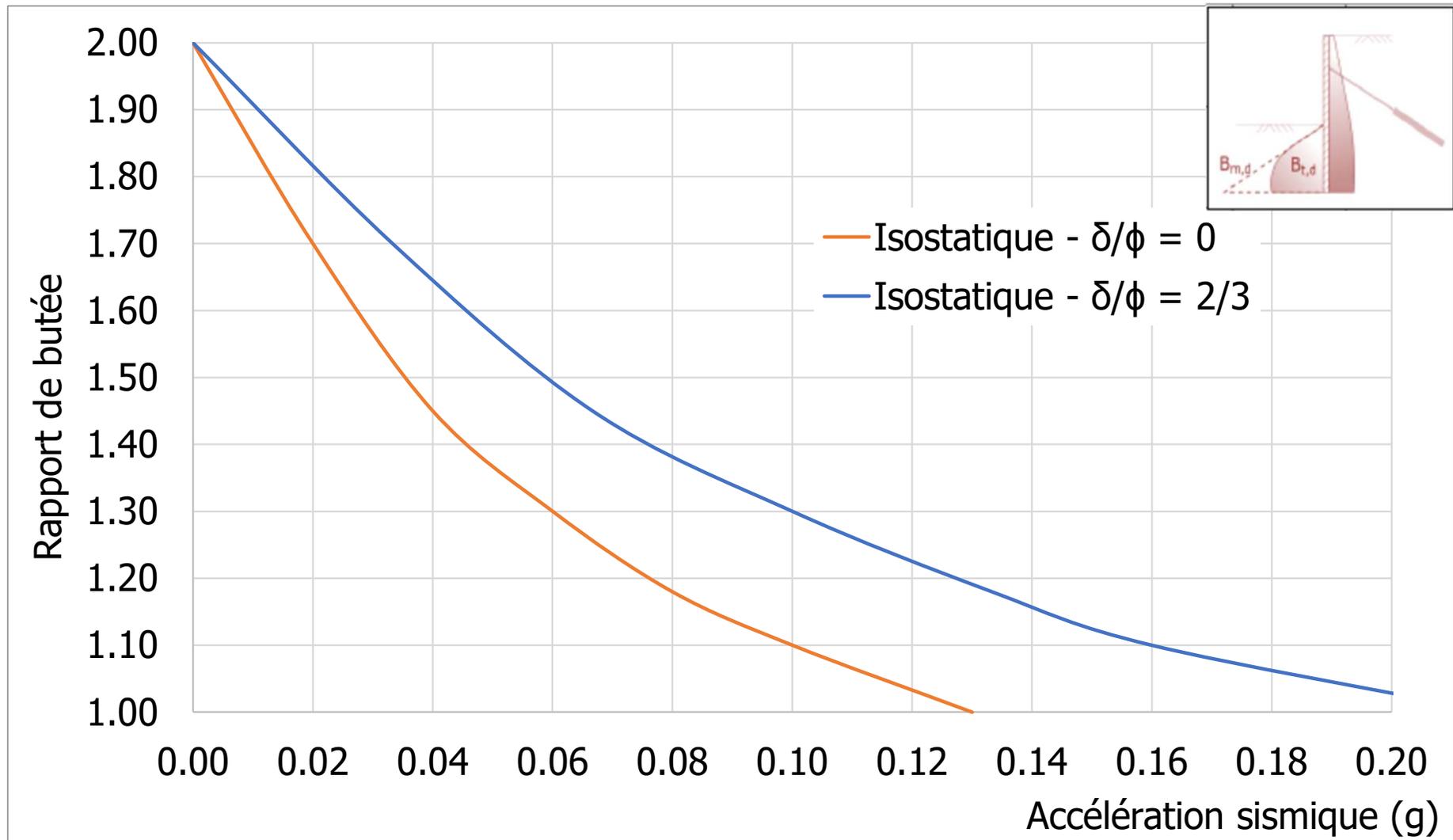
Méthodes d'analyse : écrans ancrés

- Les principaux points clés à gérer :
 - ⇒ Risque de liquéfaction + poussée des terres sous séisme + effets hydrodyn.
 - ⇒ Butée des terres sous séisme (approche pseudo-statique) :
 - ⇒ Mononobé-Okabé (dérivé du modèle Coulomb) uniquement pour $\delta/\varphi = 0$
 - ⇒ Calcul à la rupture (calage sous Talren par exemple)
 - ⇒ Théorie de la plasticité (approche locale, futur EC8-5)
 - ⇒ Stabilité locale (rotationnelle) et globale (grand glissement, kranz etc.)



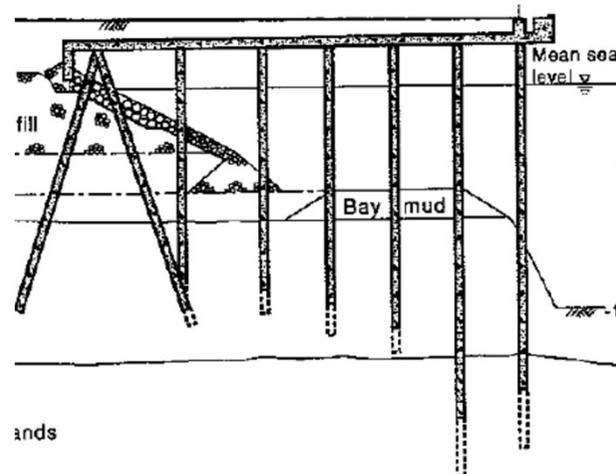
Méthodes d'analyse : écrans ancrés

- Limites de l'approche pseudo-statique (exemple d'un écran iso-statique)



Méthodes d'analyse : quai sur pieux

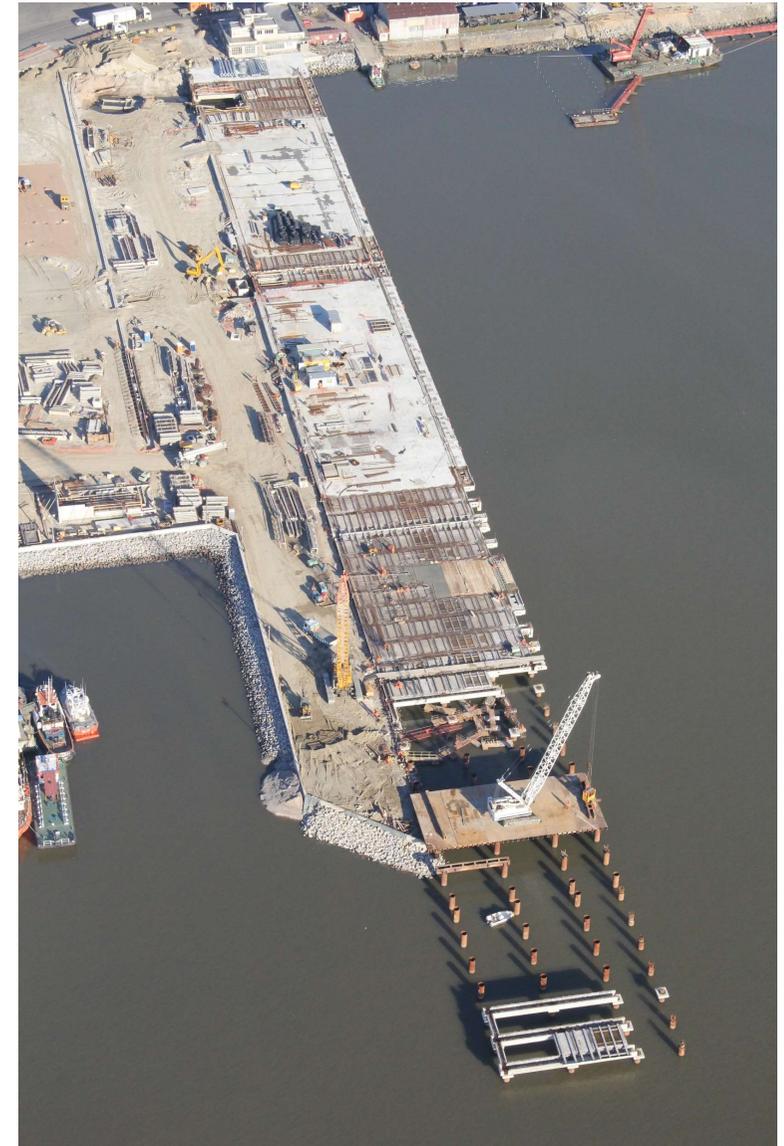
- Concept général
 - ⇒ Une solution généralement compétitive en contexte sismique
 - ⇒ Souvent on retrouve dans des zones sismiques des quais sur pieux avec des pieux inclinés



- ⇒ Cependant, très difficile d'en garantir la ductilité et le bon comportement, notamment au niveau du nœud de connexion des pieux avec la superstructure

Méthodes d'analyse : quai sur pieux

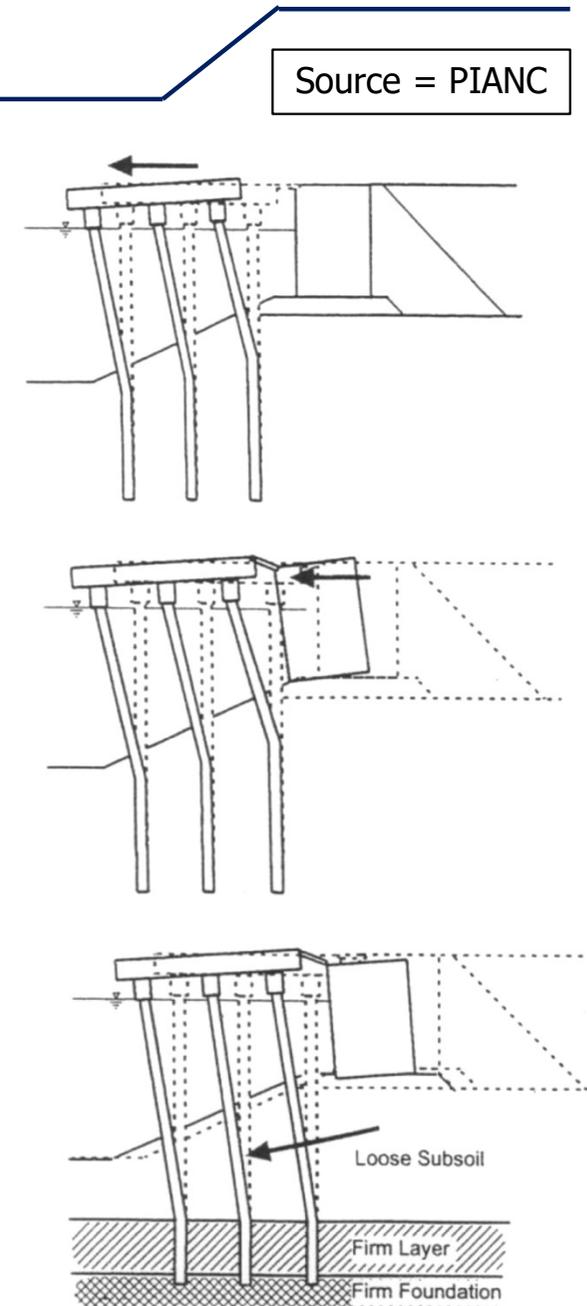
- Concept général – « tendance » actuelle
 - ⇒ Pieux battus typiquement (souvent tubulaires métalliques)
 - ⇒ Superstructure en béton armé (in situ ou partiellement préfabriquée)
 - ⇒ Talus protégé (éventuellement renforcé ou complété par ouvrage de soutènement)



Source = Soletanche Bachy

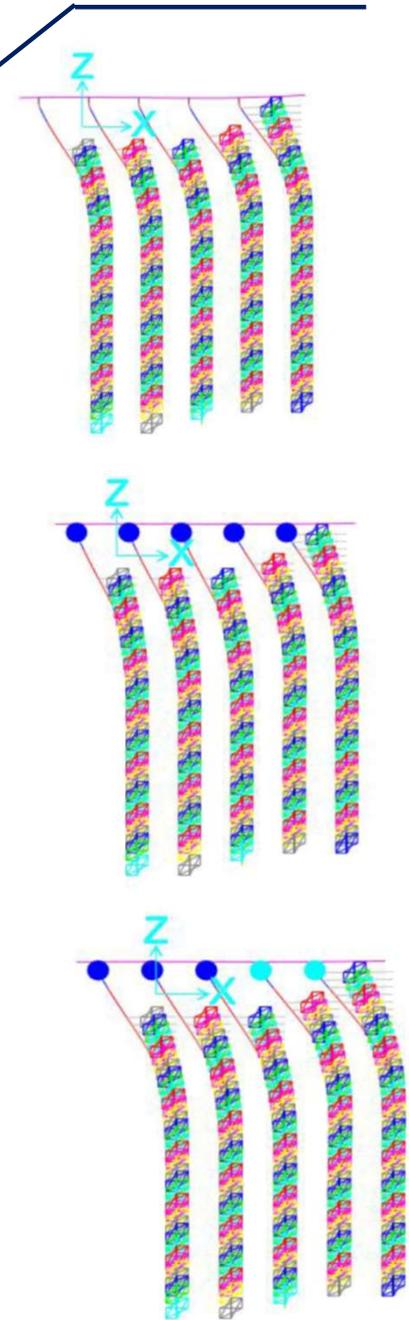
Méthodes d'analyse : quai sur pieux

- Les actions d'origine sismique
 - ⇒ Effets d'interaction inertielle
 - ⇒ Spectres réglementaires ou spécifiques au site; période (masse vs raideur)
 - ⇒ Interaction avec le soutènement amont
 - ⇒ cf. ce qui précède
 - ⇒ Interaction avec le talus et le terrain meuble
 - ⇒ Effets cinématiques (vibration propre du terrain)
 - ⇒ Déformations résiduelles post-glissement



Méthodes d'analyse : quai sur pieux

- Effets d'interaction inertielle
 - ⇒ Hors champ d'application EC8 => utilisation de codes spécialisés tels que ASCE 61, POLA, POLB...
 - ⇒ Pushover – calcul en déplacements, démontrant:
 - ⇒ Réponse initiale élastique
 - ⇒ puis déplacements inélastiques au delà des seuils des séismes de projet : OLE selon terminologie EUA (T = 75 ans) et CLE ou DE (T = 475 à 2500 ans)
 - ⇒ Le dimensionnement des éléments structuraux est fait selon les charges statiques, puis chaque séisme est vérifié de façon à ce que la capacité de déplacement de la structure excède la « demande sismique »



Méthodes d'analyse : quai sur pieux

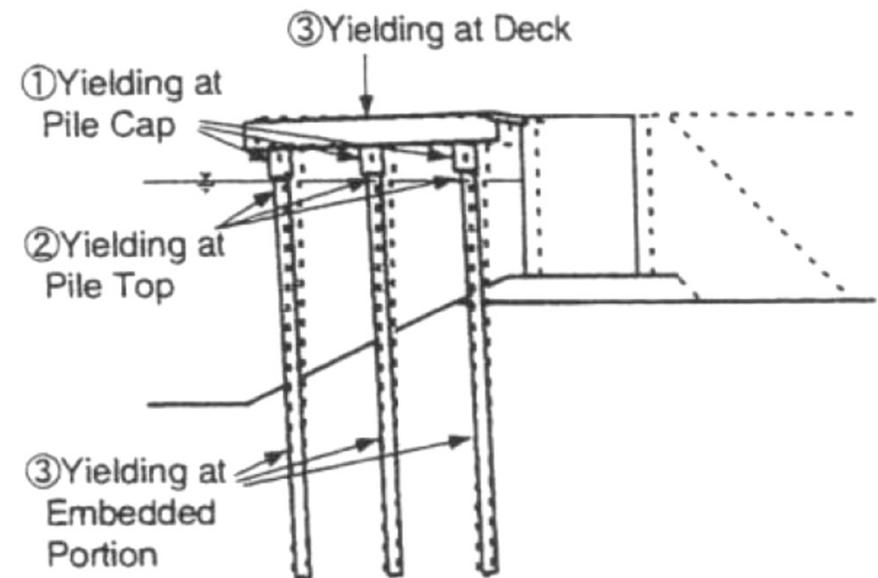
- Pushover : limites de déformation et hiérarchie de performance

Table 3-3. Strain Limits for "Life Safety Protection" per Section 2.4.1

Pile type	Component	Hinge location		
		Top of pile	In ground	Deep In ground (>10D _p)
Solid concrete pile	Concrete	No limit	$\epsilon_c \leq 0.005 + 1.1\rho_s \leq 0.012$	No limit
	Reinforcing steel	$\epsilon_s \leq 0.8\epsilon_{smd} \leq 0.08$		
	Prestressing steel		$\epsilon_p \leq 0.035$	$\epsilon_p \leq 0.050$
Hollow concrete pile ^a	Concrete	$\epsilon_c \leq 0.008$	$\epsilon_c \leq 0.008$	$\epsilon_c \leq 0.008$
	Reinforcing steel	$\epsilon_s \leq 0.6\epsilon_{smd} \leq 0.06$		
	Prestressing steel		$\epsilon_p \leq 0.025$	$\epsilon_p \leq 0.050$
Steel pipe pile	Steel pipe		$\epsilon_s \leq 0.035^b$	$\epsilon_s \leq 0.050$
	Concrete	No limit		
	Reinforcing steel	$\epsilon_s \leq 0.8\epsilon_{smd} \leq 0.08$		

^aIf the interior of the hollow pile is filled with concrete, all strain limits shall be the same as for solid piles.

^bIf the steel pipe pile is infilled with concrete, a value of 0.050 may be used.



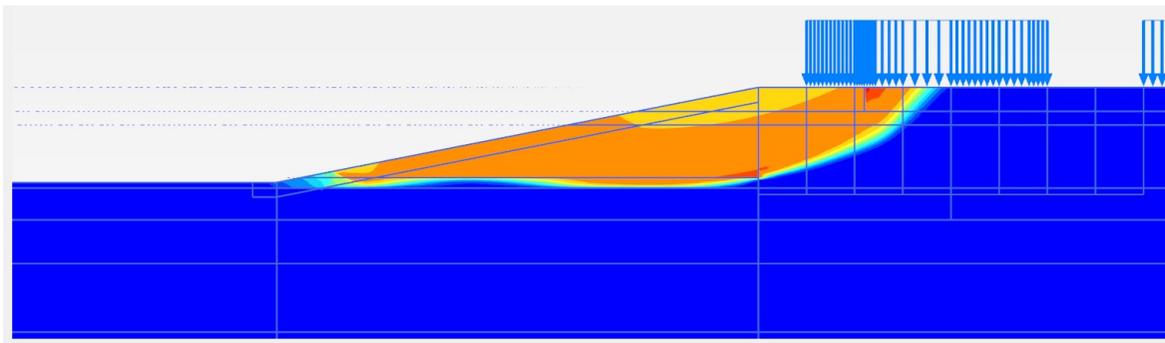
Source = ASCE 61

Source = PIANC

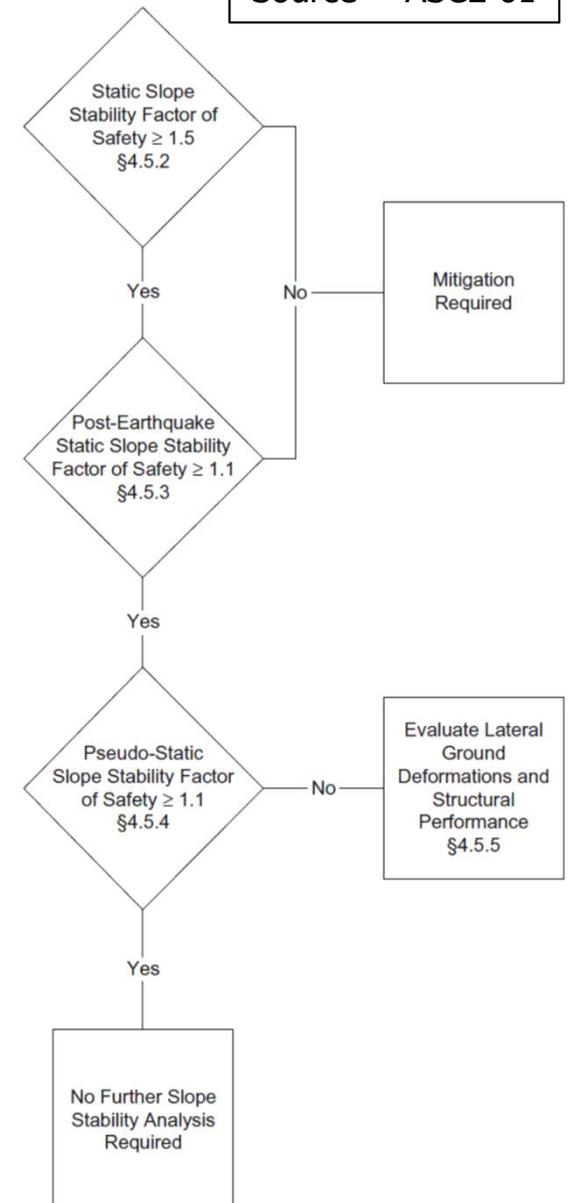
Méthodes d'analyse : quai sur pieux

- Interaction avec le talus – procédure ASCE 61

- ⇒ Stabilité statique avec $F \geq 1,50$
- ⇒ Stabilité sous séisme : pas de sécurité minimale, à condition que les déplacements (irréversibles) post-séisme soient acceptables (structurellement, contractuellement, exploitation etc.)
- ⇒ Stabilité post-sismique avec $F \geq 1,10$ en présence de sables lâches ou argiles sensibles



Source = ASCE 61



Sommaire

- Le risque sismique en milieu portuaire
- Stratégie de dimensionnement sous séisme
- Les méthodes d'analyse
 - Structures gravitaires
 - Ecrans de soutènement
 - Quai sur pieux

- Conclusion

Ce qu'il faut retenir

- ⇒ La liquéfaction est la principale cause de désordres dans les ouvrages maritimes

Voir CT 45 de l'AFPS – <http://www.afps-seisme.org/PUBLI/Cahiers-techniques>

- ⇒ Les ouvrages maritimes autorisent par construction des déformations, une propriété qui peut être mise à profit dans la stratégie de dimensionnement sous sismique
- ⇒ L'évaluation de la performance des structures pour les différents niveaux de demande sera de plus en plus répandue ; le nouvel Eurocode 8 intégrera des prescriptions détaillées dans ce sens

Merci pour votre attention