



Webinaires des 12 Avril et 10 Mai 2022

Soutènements en zone sismique – Partie II

Séance animée par :

- Fahd CUIRA
 - Delphine BOUTHEON
 - Gaël GOURRIN
 - Gustavo PEREIRA
 - Delphine LAOT et Dominique NIBEL
 - Florent BOUDET et Dominique BATISTA
- TERRASOL – CFMS
ERG – CFMS
SOCOTEC
SOLETANCHE BACHY
BOTTE FONDATIONS
CEREMA

Sommaire

- Murs et écrans de soutènement sous séisme
 - Compléments au webinaire du 12 Avril 2022 F. Caira (Terrasol)
 - Exemple d'un mur gravitaire G. Gourrin (Socotec)
 - Exemple d'un écran en milieu urbain D. Laot (Botte Fondations)
- Les soutènements en milieu portuaire
 - Les points clés à gérer G. Pereira (Soletanche Bachy)
 - Projet de Guide Cerema F. Boudet et D. Batista (Cerema)
- Perspectives normatives F. Caira (Terrasol)

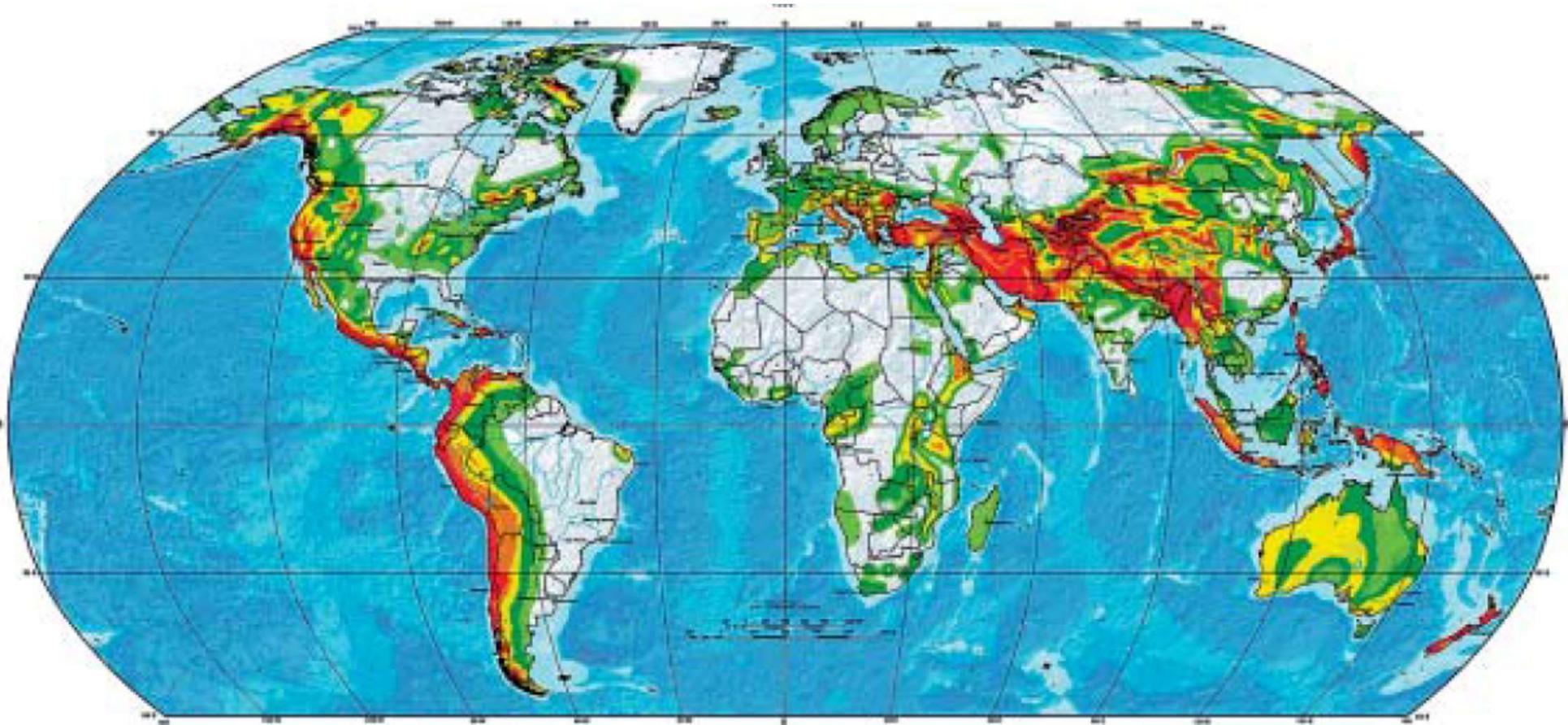
Le cas particulier du milieu portuaire

- Introduction

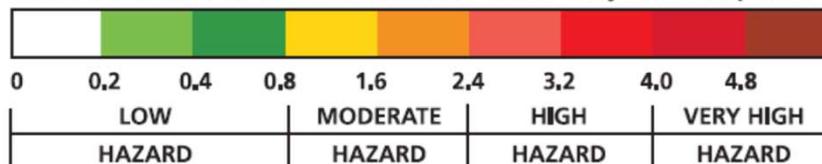
- ⇒ Ouvrages portuaires très souvent localisés dans des sites difficiles sur le plan géotechnique
- ⇒ Retours d'expériences sur des ouvrages maritimes post-séisme (e.g. Oakland, 1989; Kobe, 1995) mettent en évidence l'ampleur des dégâts et l'enjeu économique important lié à la maîtrise du risque sismique
- ⇒ Clients sophistiqués et généralement exigences de performance spécifiques figées contractuellement (e.g. plusieurs niveaux de séisme, déformations limites)

Le cas particulier du 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)

Le cas particulier du milieu portuaire

Principaux types de structures portuaires

⇒ Ecrans de soutènement

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

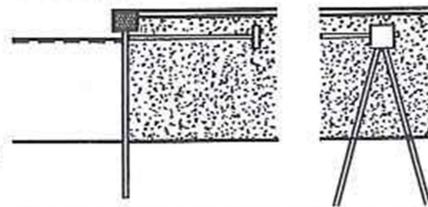
⇒ Structures gravitaires

- ⇒ Caissons, blocs, palplanches cellulaires...

⇒ Quais sur pieux

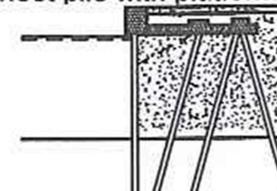
- ⇒ Pieux verticaux, pieux inclinés
- ⇒ Pieux acier, pieux béton

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

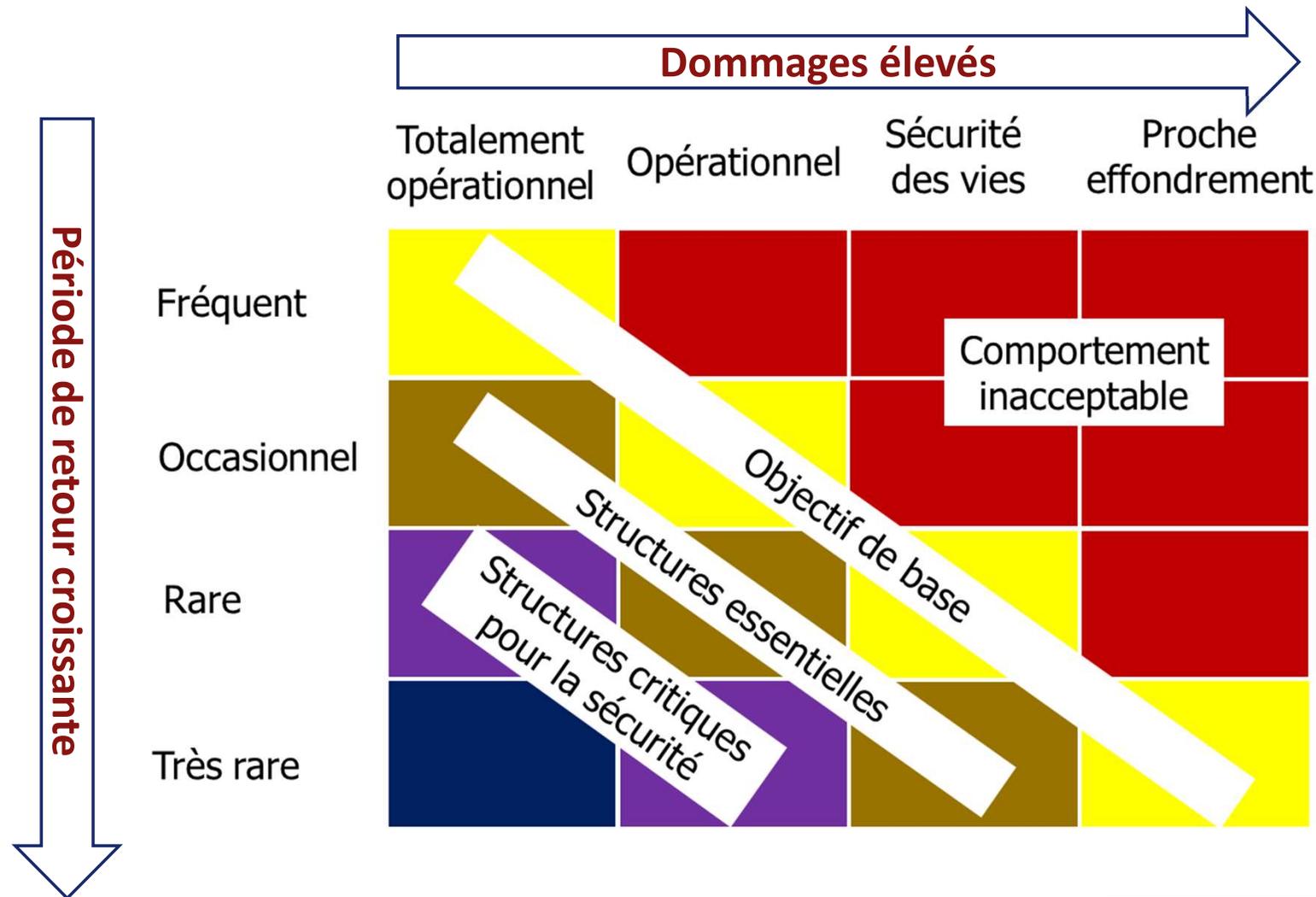


- Structure of columns with auxiliary structures for horizontal force absorption. Some cases partly soil-retaining.
- Column foundation.

Action sismique croissante

1. Définition de l'action sismique

- Notion d'objectif de performance



Source = A. Pecker

1. Définition de l'action sismique

- Niveaux sismiques

Si un seul niveau de séisme (ELU) est courant en France, dans le milieu portuaire on est fréquemment confronté à 2 (voire 3) niveaux de séisme:

Selon la terminologie PIANC:

- Séisme niveau 1
 - Critère d'opérationnalité
- Séisme niveau 2, $T_r=475$ ans
 - Critère de non-effondrement (pour des structures courantes)

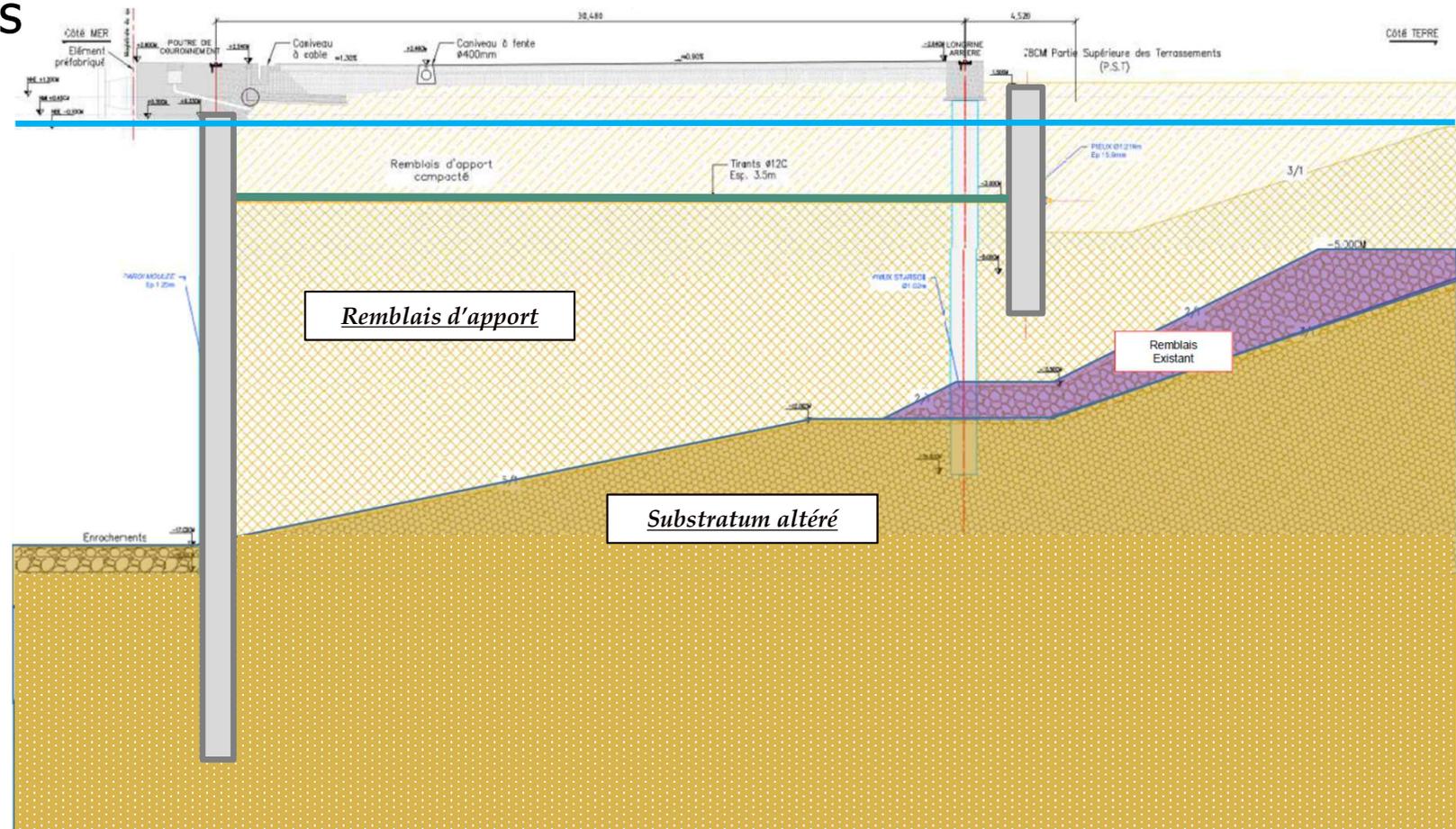
Selon la terminologie USA (ASCE61, POLA, POLB):

- Séisme niveau 1
 - Critère d'opérationnalité
- Séisme niveau 2, $T_r=475$ ans
 - Critère de réparabilité
- Séisme niveau 3, $T_r=2475$ ans
 - Critère de non-effondrement

Les séismes de niveau inférieur sont souvent dimensionnants

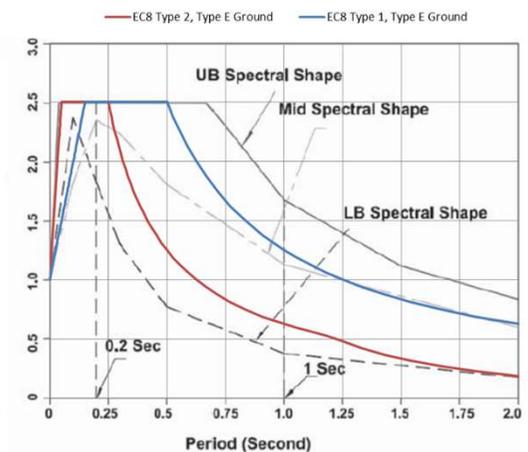
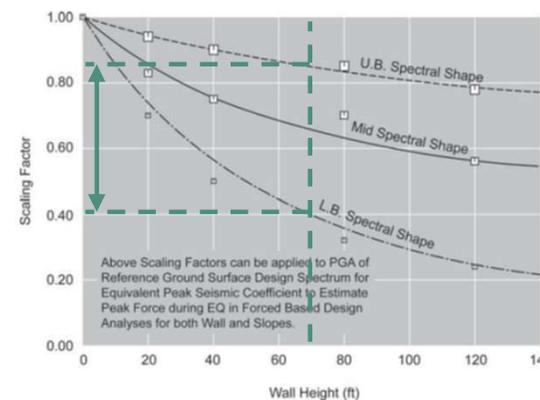
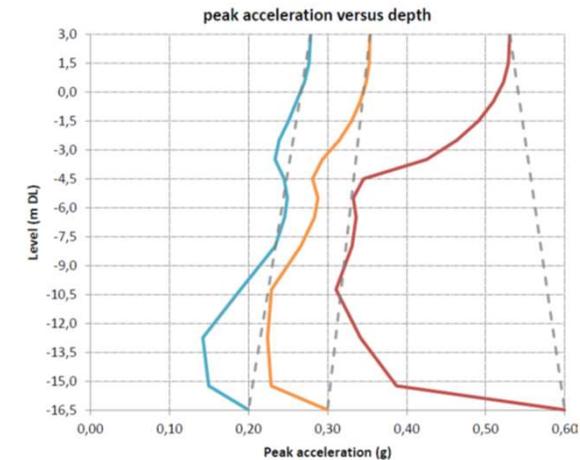
2. Reduction de l'action sismique en hauteur

- L'action sismique est « incohérente » et variable dans l'espace
- Une valeur représentative (inférieure au pic) peut être adoptée dans certains cas



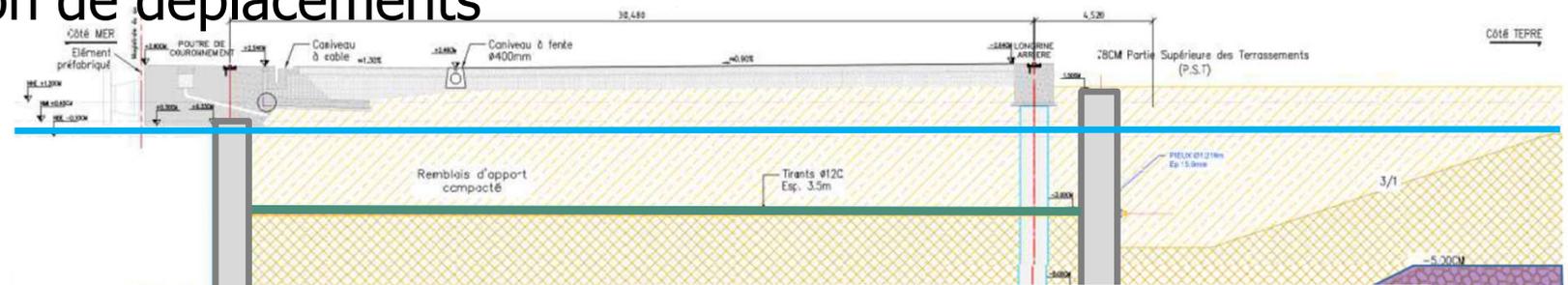
2. Reduction de l'action sismique en hauteur

- Pour $H > 10\text{m}$, EC8 permet de faire la moyenne des accélérations le long de la hauteur du mur, pourvu qu'une méthode de propagation d'onde 1D soit utilisée (SHAKE91, DEEPSOIL, autres)
 - Attention aux conditions de validité: au moins 3 accélérographes, analyses de sensibilité géotechniques...
- A noter que d'autres codes (notamment NCHRP611 et reprises par FHWA) utilisent des méthodes simplifiées, permettant des réductions importantes

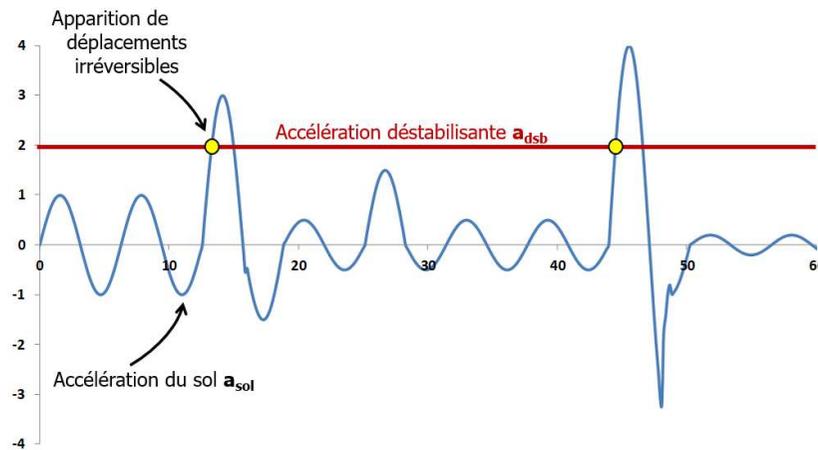


3. Réductions via l'acceptation de déplacements

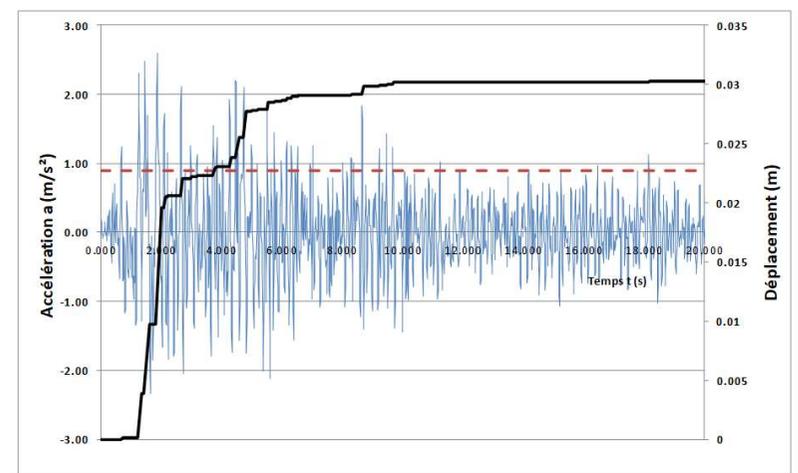
- Si la structure est dimensionnée pour une accélération inférieure à celle qui intervient, la structure peut encore garantir la stabilité, moyennant l'acceptation de déplacements



Modèle de bloc-rigide (déplacements irréversibles)



Modèle de bloc-rigide (déplacements irréversibles)



3. Réductions via l'acceptation de déplacements

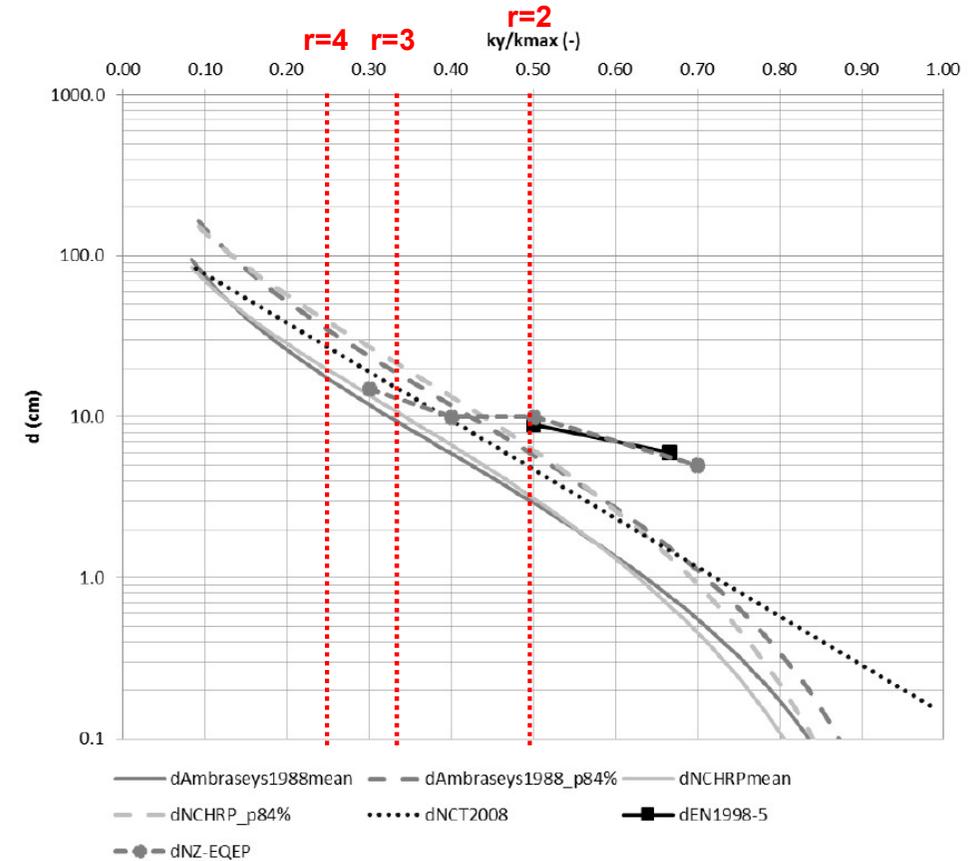
- L'actuelle version de la EN1998-5 permet de diviser le coefficient sismique par $r=2$ si la structure accepte des déplacements $d \geq 300 \alpha S$ (mm)
 - Si $\alpha S=0.15g$, $d \geq 45\text{mm}$
 - Si $\alpha S=0.30g$, $d \geq 90\text{mm}$

Ces valeurs sont assez modérées pour la plupart des ouvrages maritimes

- Cependant, la norme exclut cette opportunité pour tous les soutènements, à l'exception des murs poids.
- Or, cela met en désavantage les autres types de soutènement...

3. Réductions via l'acceptation de déplacements

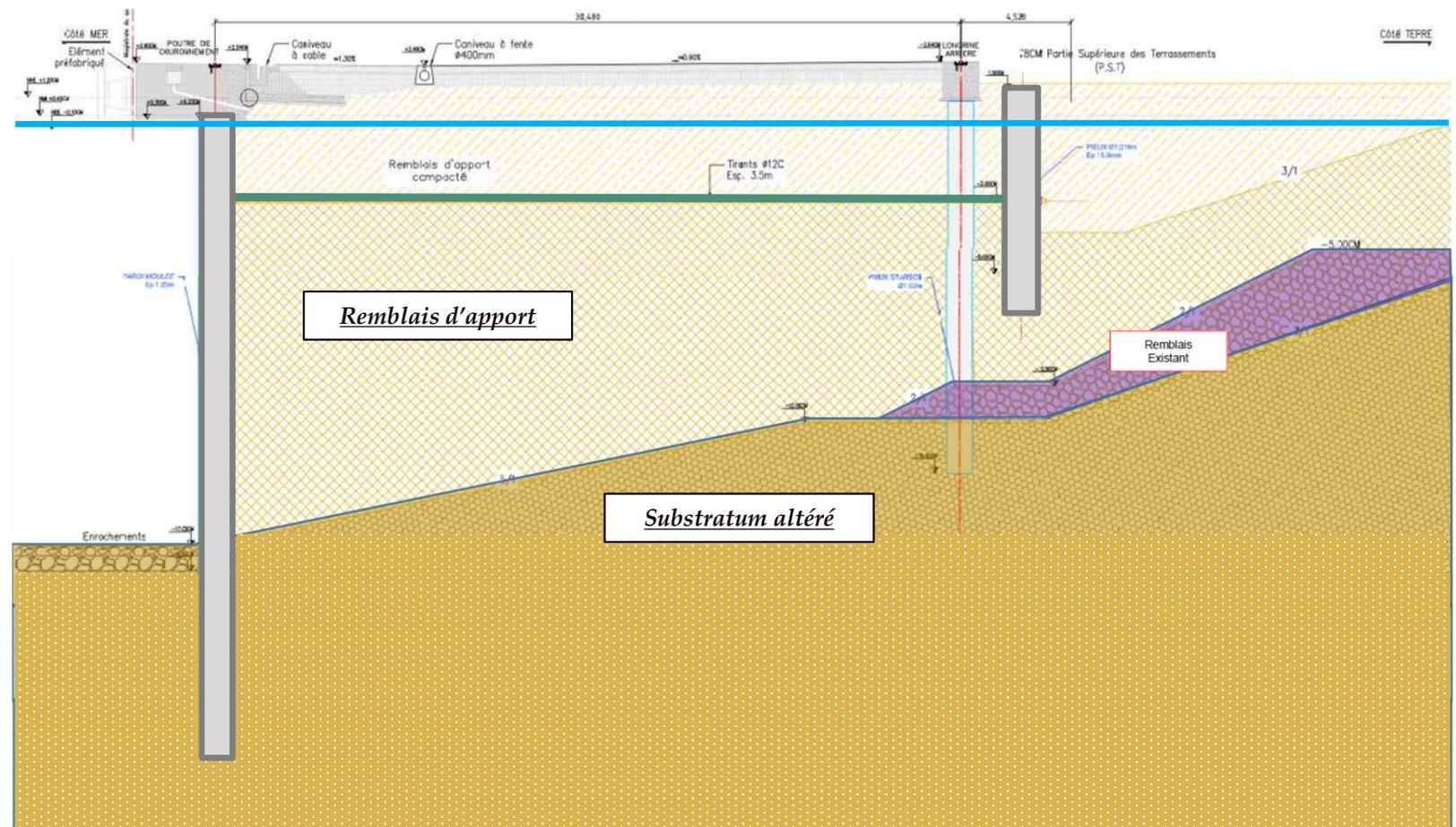
- Plusieurs codes acceptent des réductions supérieures (jusqu'à $r=4$) pour tous les types de structures
- La réduction est accompagnée d'un déplacement résiduel qu'il faut accommoder
- Bien veiller à que tous les éléments du soutènement soient ductiles et capables d'absorber les effets induits par ces déplacements
 - Parois fléchies
 - Ancrages
 - Tirants
 - Etc.



Exemple: relations bibliographiques entre $1/r$ et déplacements résiduels

4. Pressions hydrodynamiques

- L'accélération de la masse d'eau génère des efforts hydrodynamiques, qui s'ajoutent aux poussées hydrostatiques



4. Pressions hydrodynamiques

- Westergaard (1931) a développé une solution pour les réservoirs d'eau. Elle est encore largement utilisé en cas de plan d'eau libre:
- Calcul des pressions d'eau dynamiques :

- Répartition des pressions d'eau :

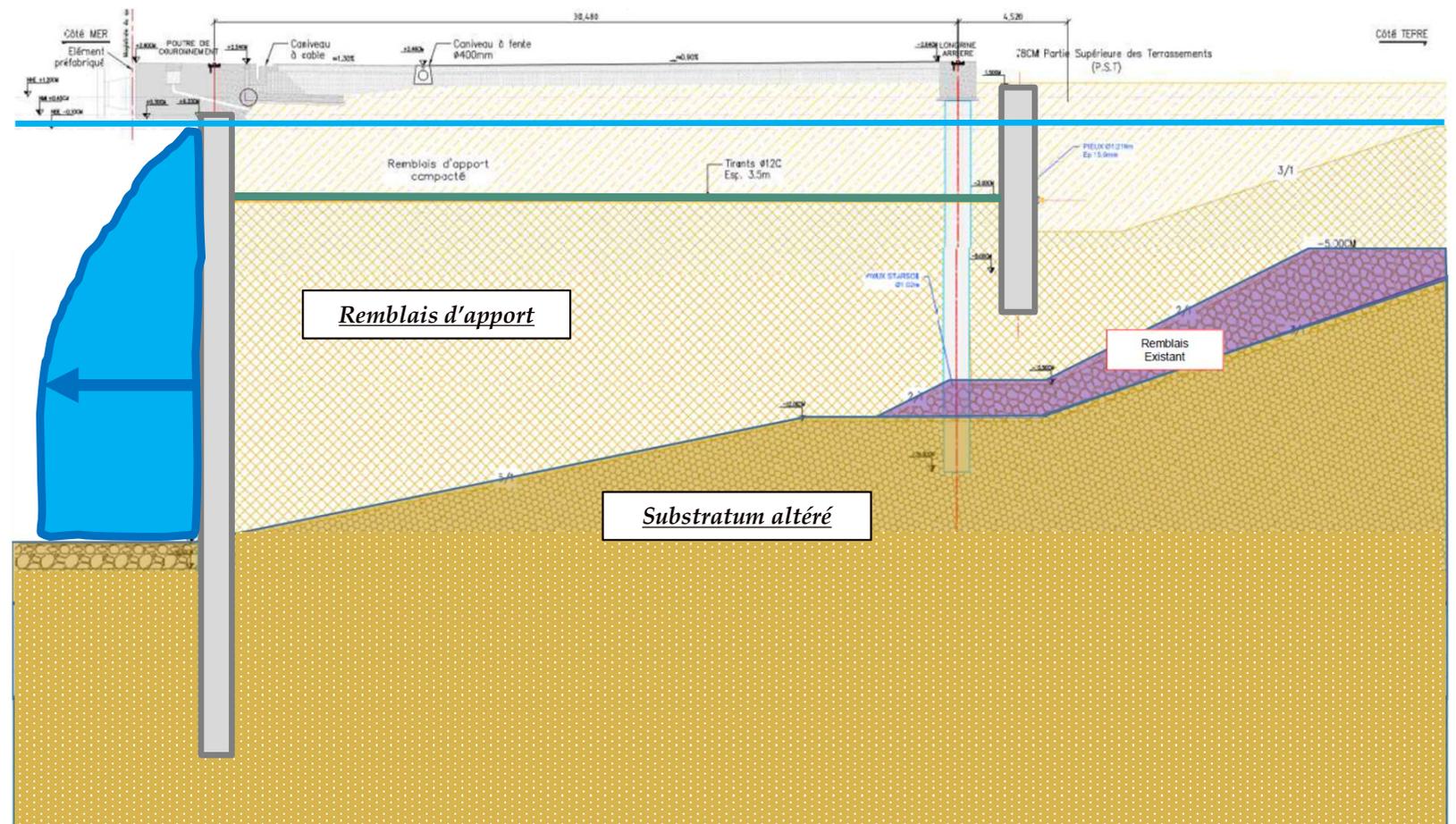
$$q(z) = \pm \frac{7}{8} k_h \cdot \gamma_w \cdot \sqrt{h \cdot z}$$

- Résultante des pressions d'eau :

$$E_{wd} = \frac{7}{12} k_h \cdot \gamma_w \cdot H^2$$

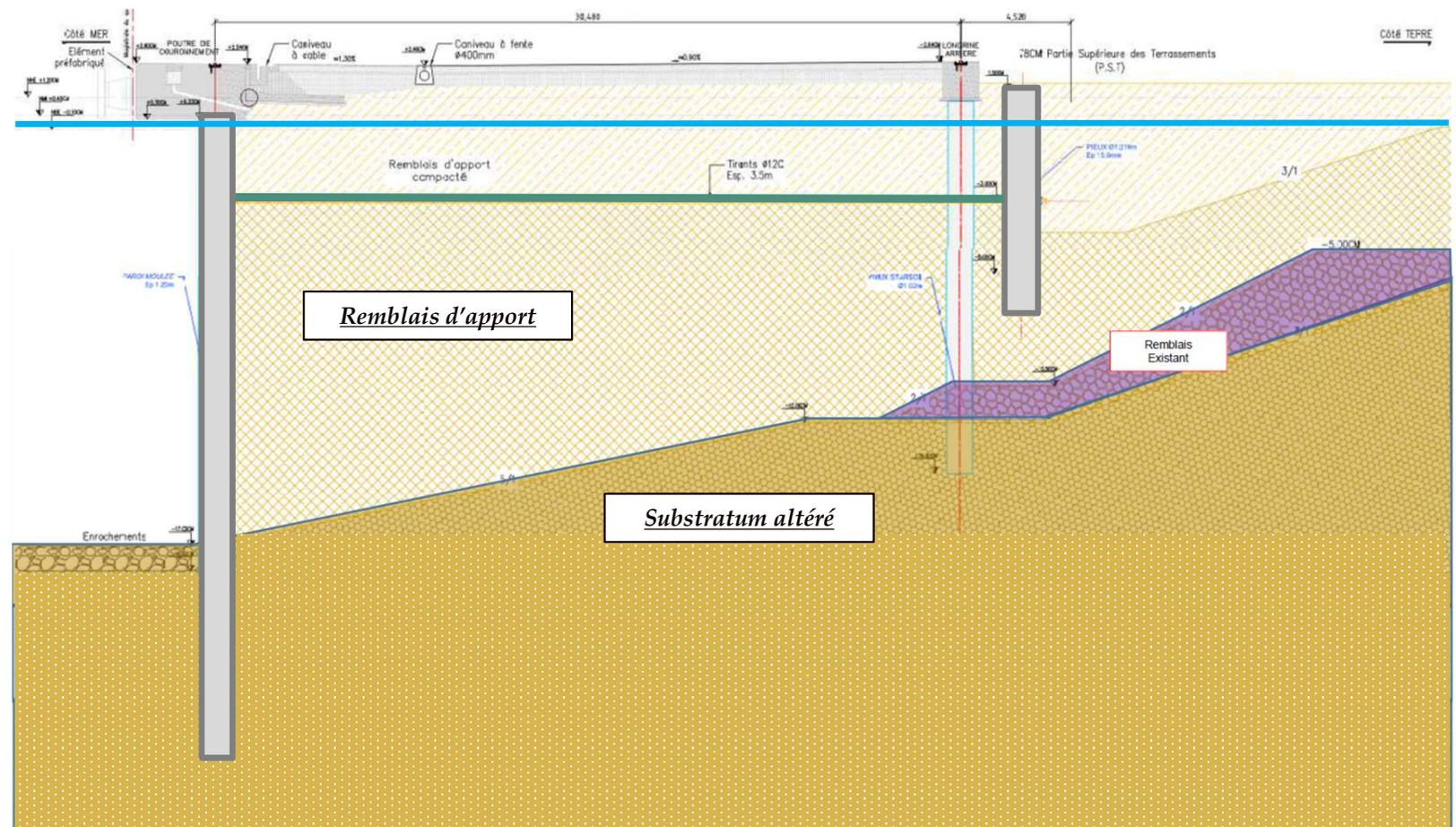
4. Pressions hydrodynamiques: bassin

- Décrément hydrodynamique sur la face exposée du quai



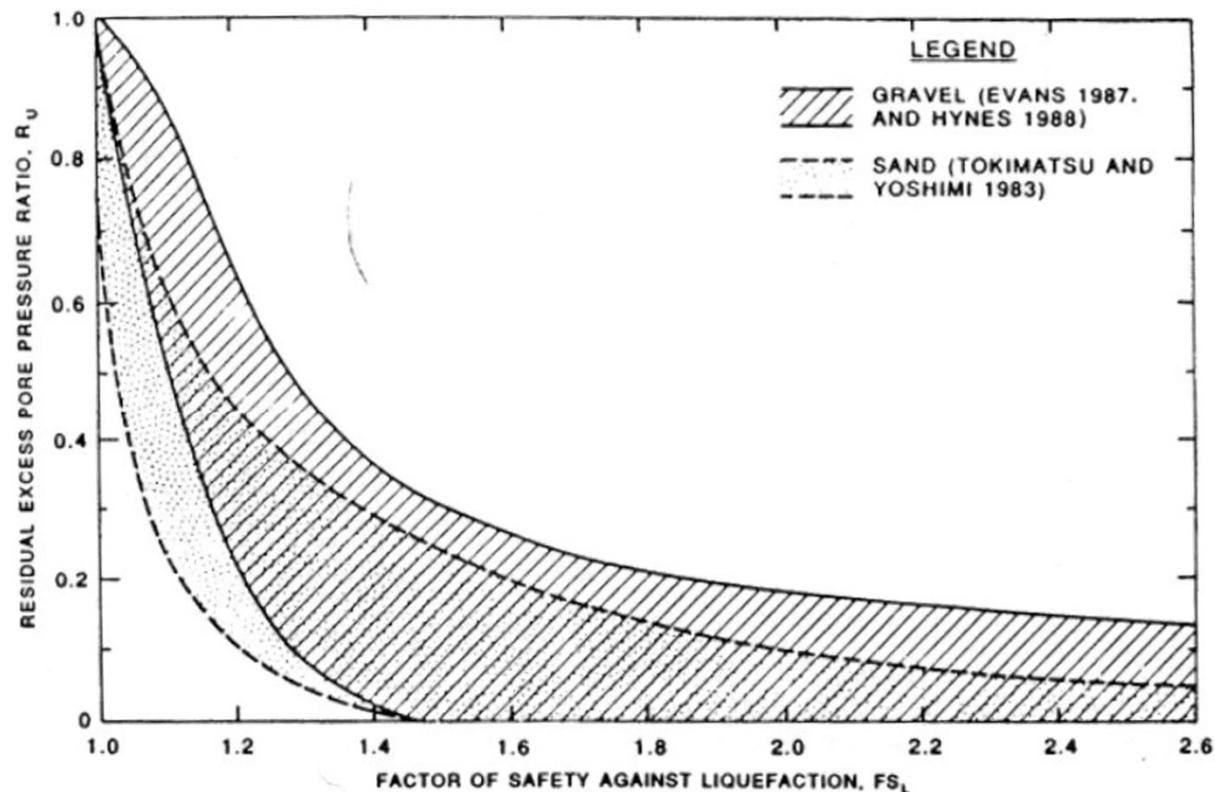
5. Liquéfaction

- Les sites des ouvrages portuaires sont souvent très sensibles à la liquéfaction



5. Liquéfaction

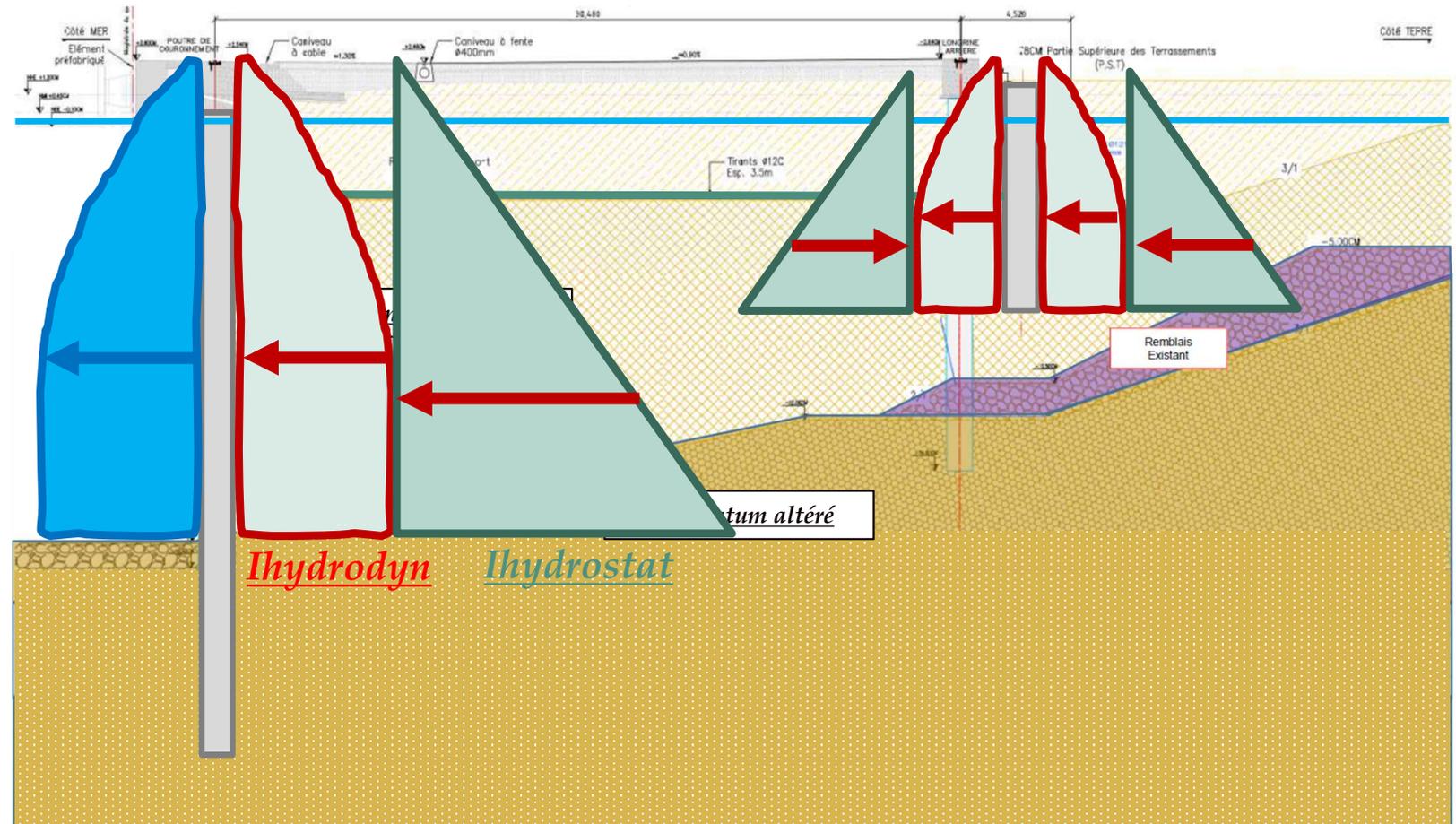
- L'actuelle norme EN1998-5 requiert $FS \geq 1,25$
- Cependant, pour que les effets de génération d'excès de pression de pores soient négligeables, une marge accrue es demandée ($FS \geq 2,00$ pour méthode pseudo-statique)



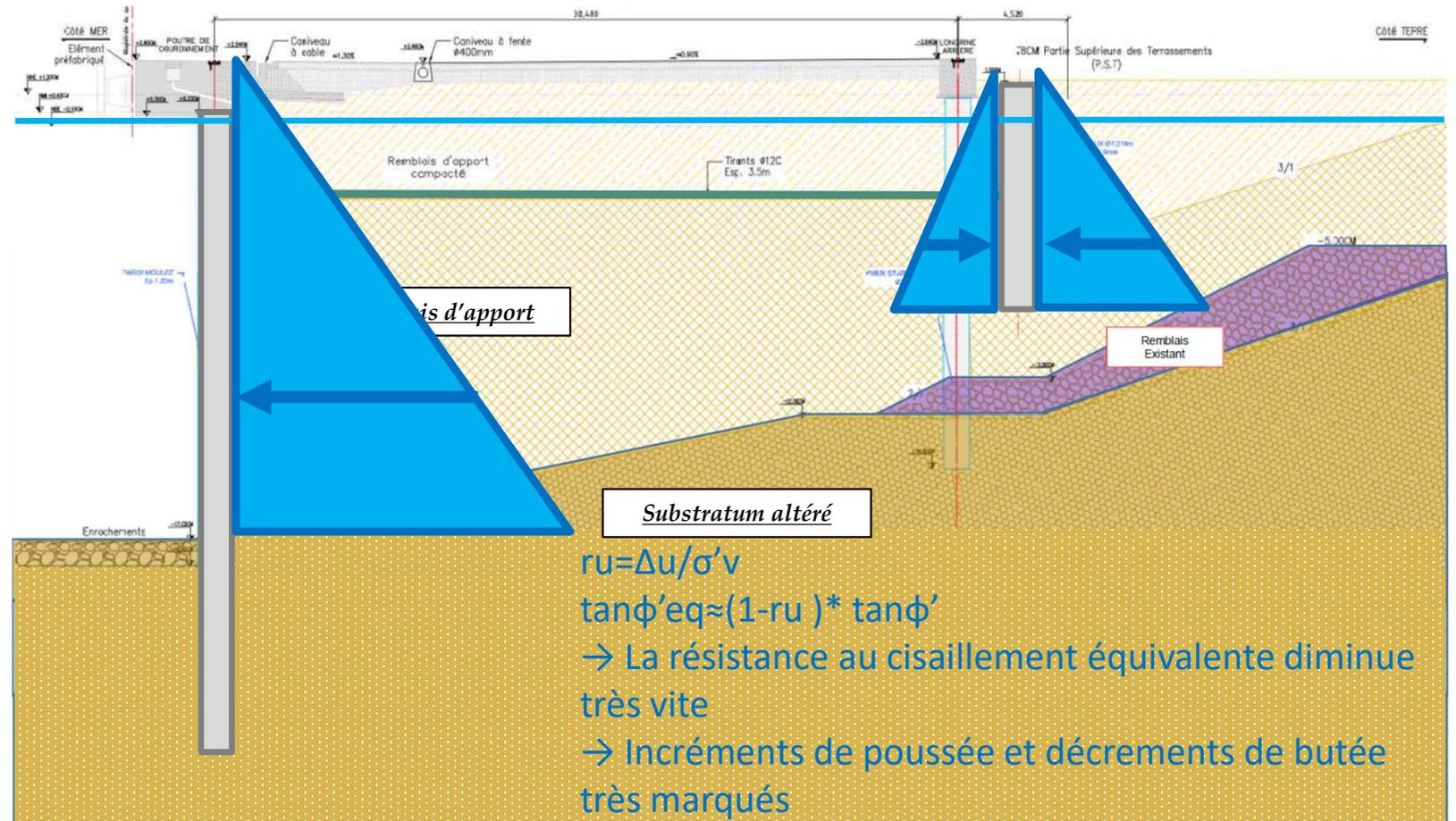
Seed & Harder, 1990

5. Liquéfaction : liquéfaction généralisée

- Liquéfaction généralisée: à la limite, un fluide avec $\gamma \approx 20 \text{ kN/m}^3$
- Effets extrêmes!



5. Liquéfaction : excès de pression de pores



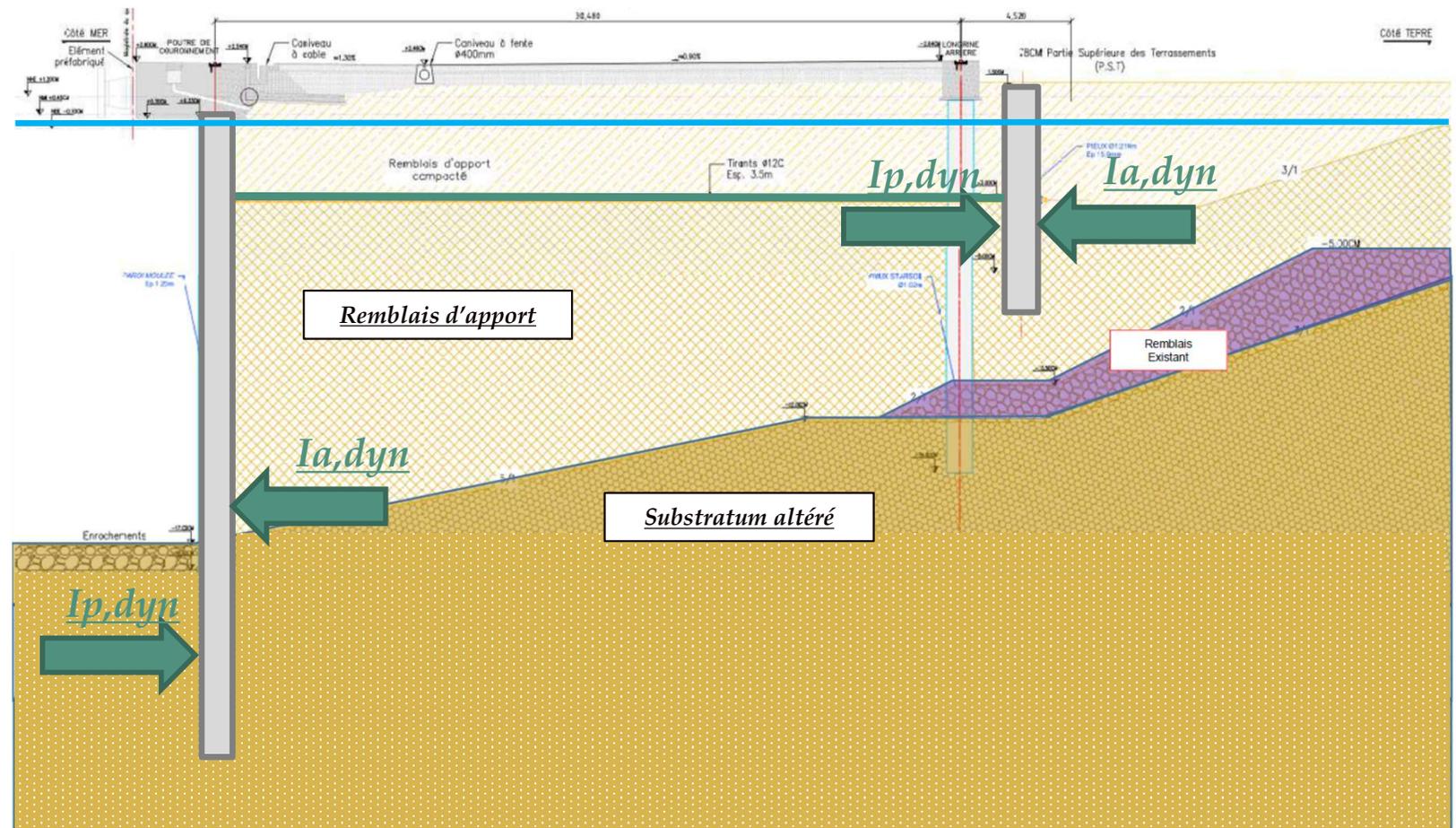
Voir Ebeling & Morrison, 1992

5. Liquéfaction

En général, il vaut mieux réduire au minimum r_u :

- Il faut spécifier les matériaux d'apport en conformité
- Il est préférable de traiter les terrains in situ

6. Pressions dynamiques de terres

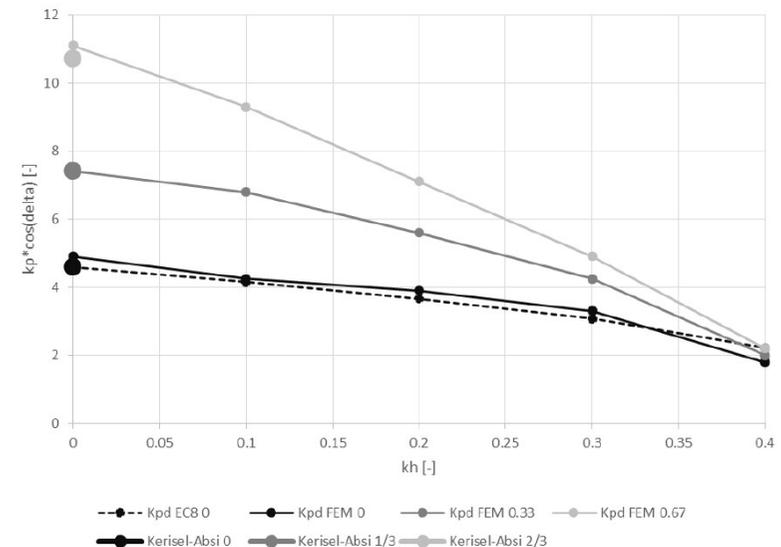
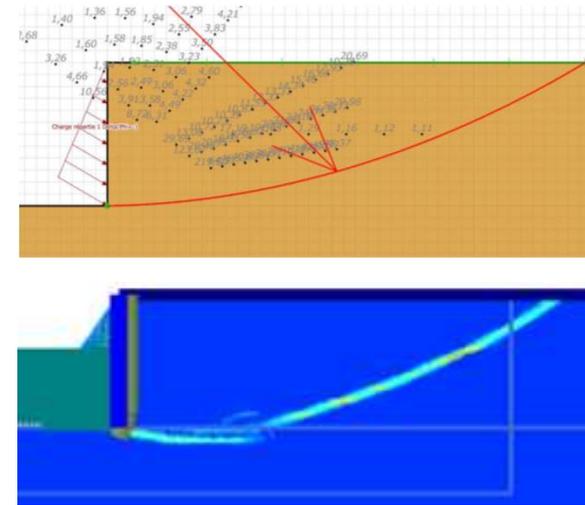


6. Pressions dynamiques de terres: poussée

- Mononobe Okabé donne des résultats acceptables

6. Pressions dynamiques de terres: butée

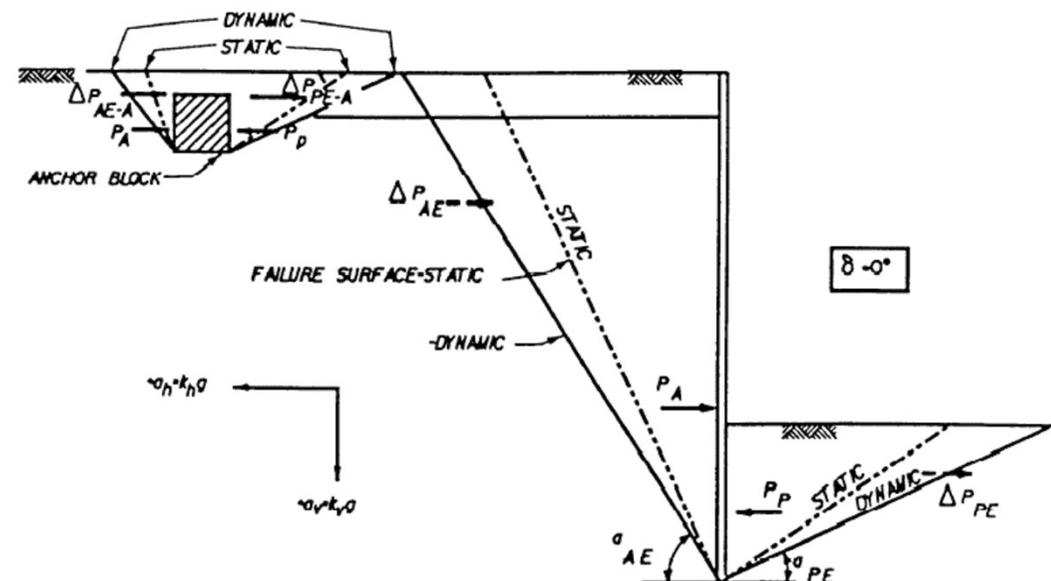
- Selon la méthode décrite dans EN1998-5, le frottement paroi-sol $\delta = 0$
 - Mononobe Okabé dérivé de Coulomb, et $\delta > 0$ est fortement anti-sécuritaire (surface plane)
- Cependant, $\delta = 0$ est très conservateur
 - Des surfaces adaptées (e.g. spiral log), permettent d'y arriver (TALREN, PLAXIS...)



Exemple de sable submergé
 $\gamma=20\text{kN/m}^3$ $\phi'=40^\circ$

6. Pressions dynamiques de terres: stabilité

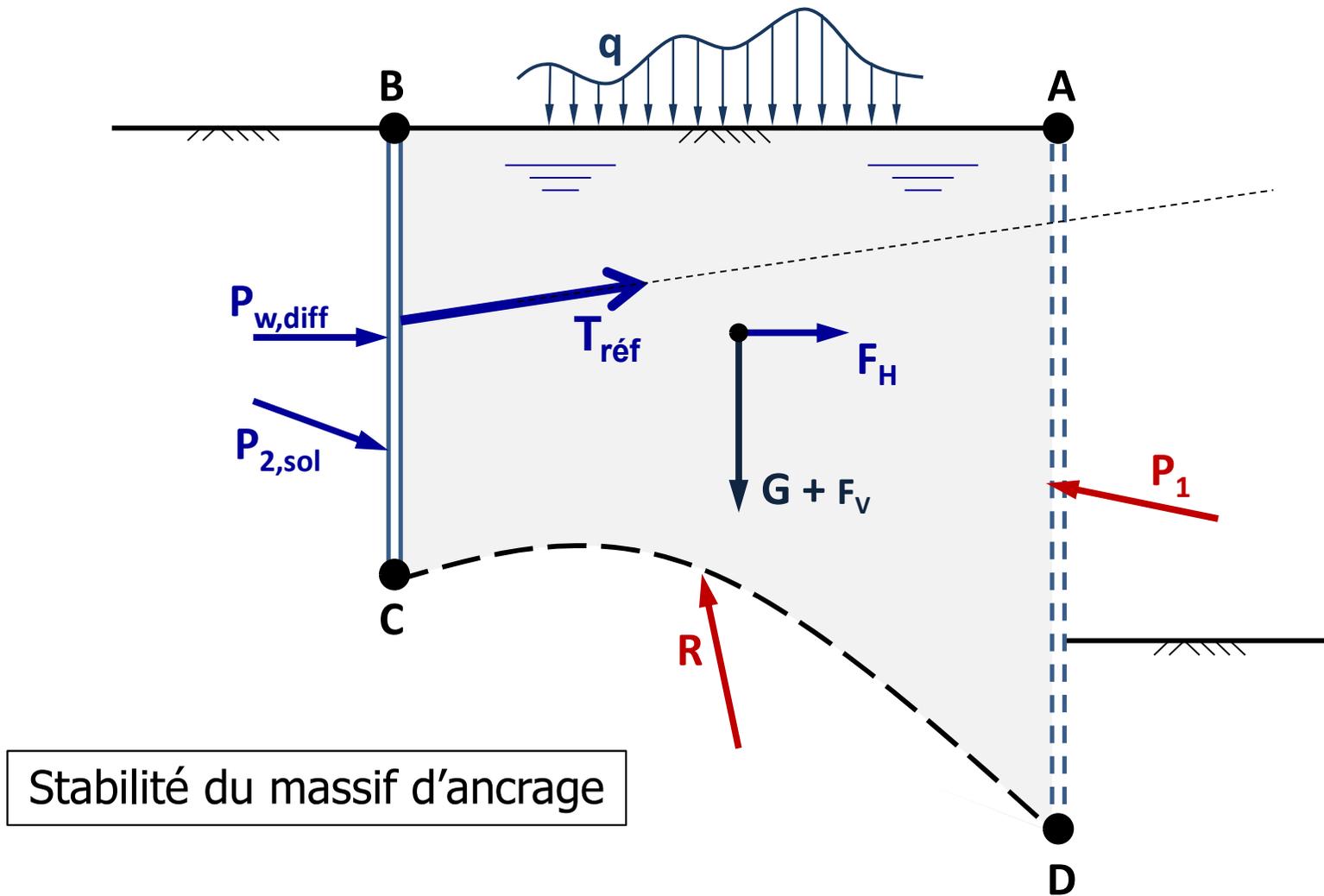
- En situation sismique, les coins de poussée et butée s'aplatissent avec l'augmentation de l'accélération
- Risque d'interaction entre rideau et ancrage



Ebeling & Morrison, 1992

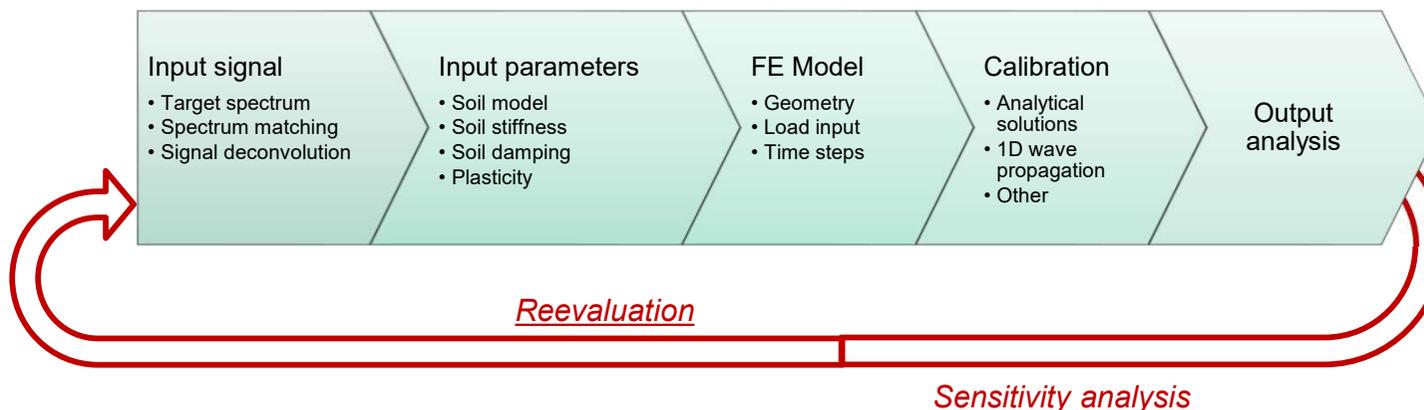
6. Stabilité d'ensemble

- Veiller à garantir la stabilité de l'ancrage



7. Méthodes pseudo-statiques versus FEM

- Les modèles FEM dynamiques sont des outils très puissants, mais restent complexes – aujourd’hui cela reste un outil de vérification, beaucoup plus qu’un outil de conception
- Les méthodes pseudo-statiques sont des outils limités, mais qui moyennant des hypothèses adéquates permettent encore résoudre la majeure partie des projets



Conclusions

- ⇒ Attention aux effets d'excès de pression de pores, la liquéfaction étant la principale cause de désordres dans les ouvrages portuaires
- ⇒ Les ouvrages maritimes autorisent des déformations, ce 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 de votre attention