

Etude de cas : justification parasismique de trois réservoirs LNG de grand diamètre à Dunkerque



Fahd Cuira
Terrasol

Sommaire

- Contexte du projet
- Réponse sismique de l'ouvrage
- Traitement du risque de liquéfaction
- Etude sous séisme réévalué (post-fukushima)

Contexte du projet

- Trois réservoirs LNG de 90 m de diamètre sur Dunkerque



Contexte du projet

- Trois réservoirs LNG de 90 m de diamètre sur Dunkerque



© HAPPYDAY - Jean-Louis Burnod

Contexte du projet

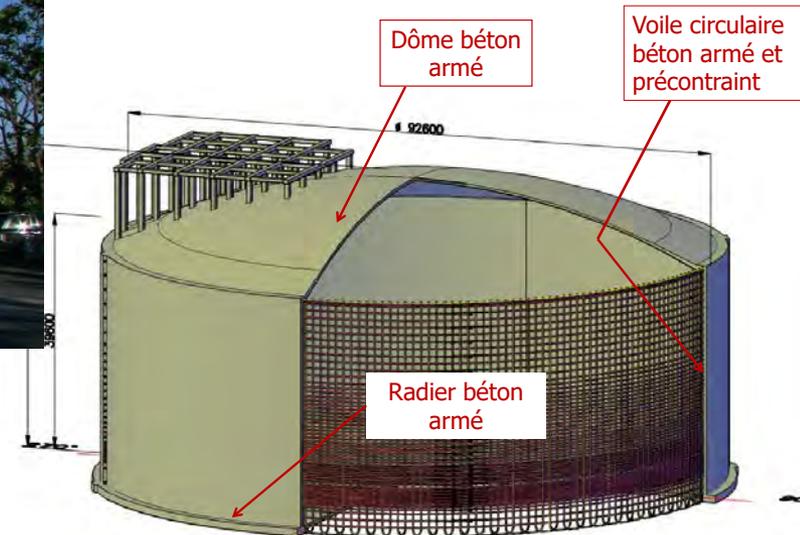
- Trois réservoirs LNG de 90 m de diamètre sur Dunkerque

3 réservoirs d'une capacité de 190 000 m³ pour le passage d'environ 13 milliard de m³ par an.



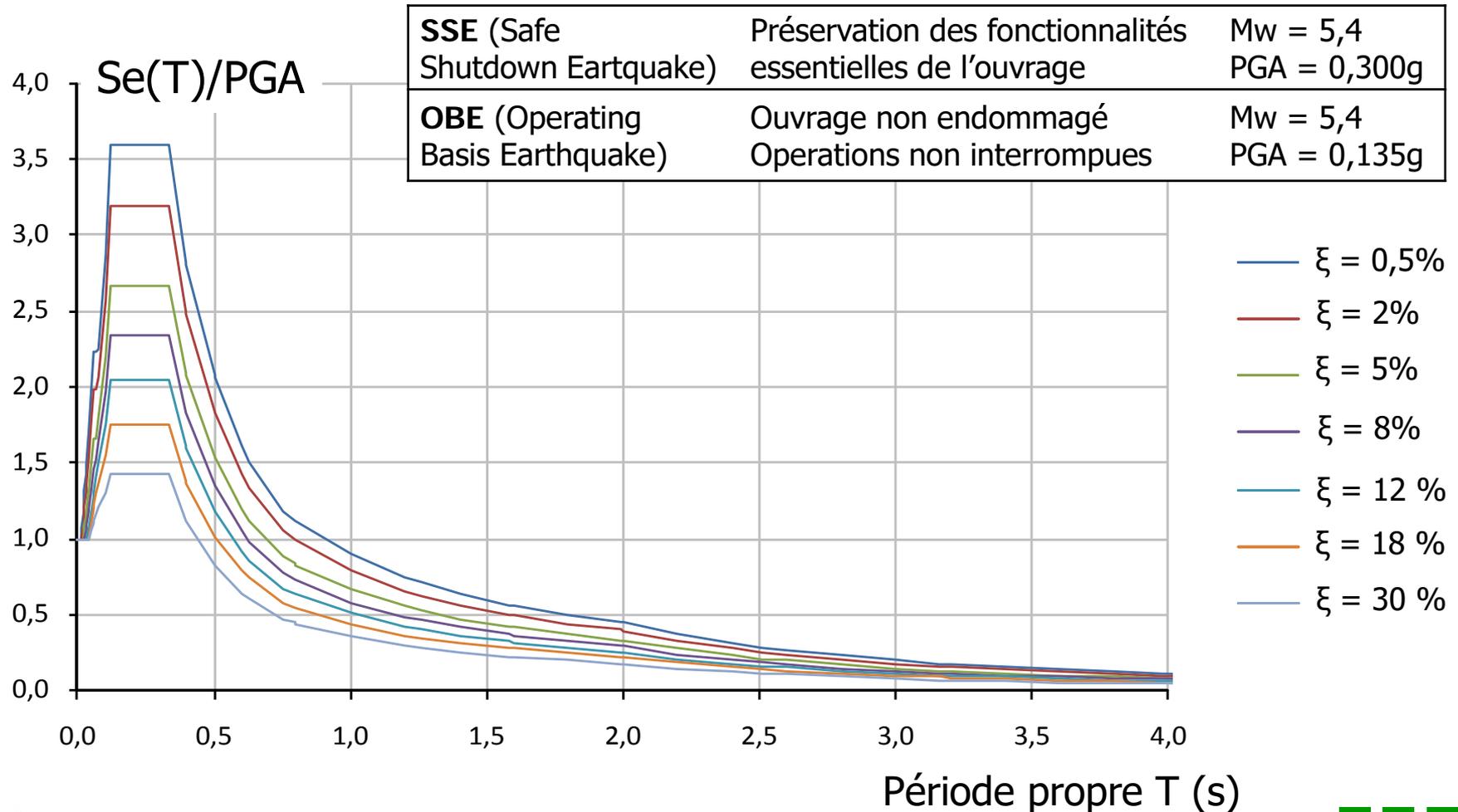
20% de la consommation annuelle du gaz naturel français et belge

$B = 90 \text{ m} / H = 50 \text{ m}$



Contexte du projet

- Contexte sismique du projet : spectre de réponse



Contexte du projet

- Enjeux de la conception

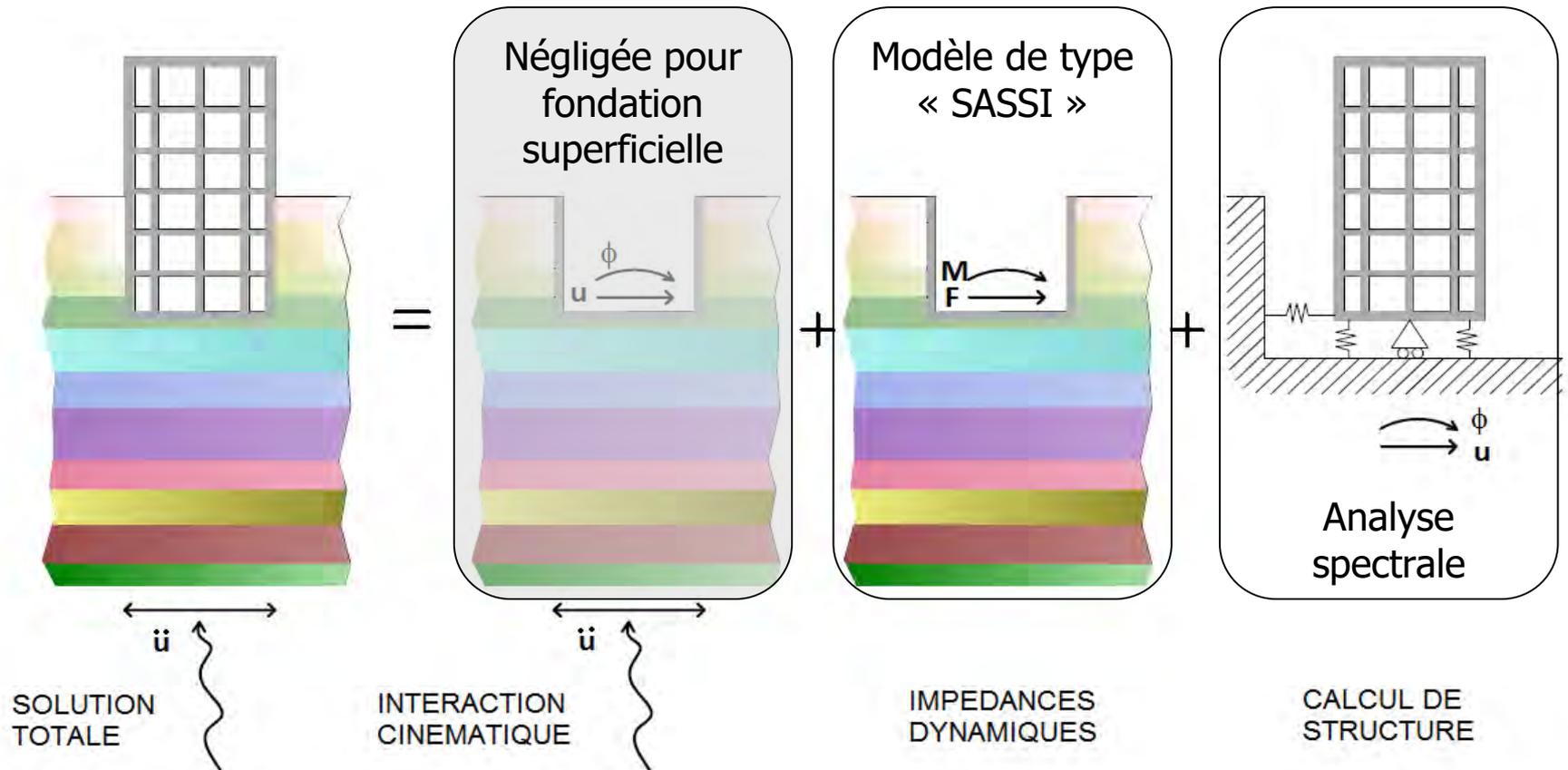
⇒ Fondation sur radier général (superficiel)

⇒ Tassements absolus et différentiels (homogénéisation du terrain d'assise)

⇒ Tenue au séisme : stabilité et déplacements avec prise en compte des effets d'interaction sol-structure

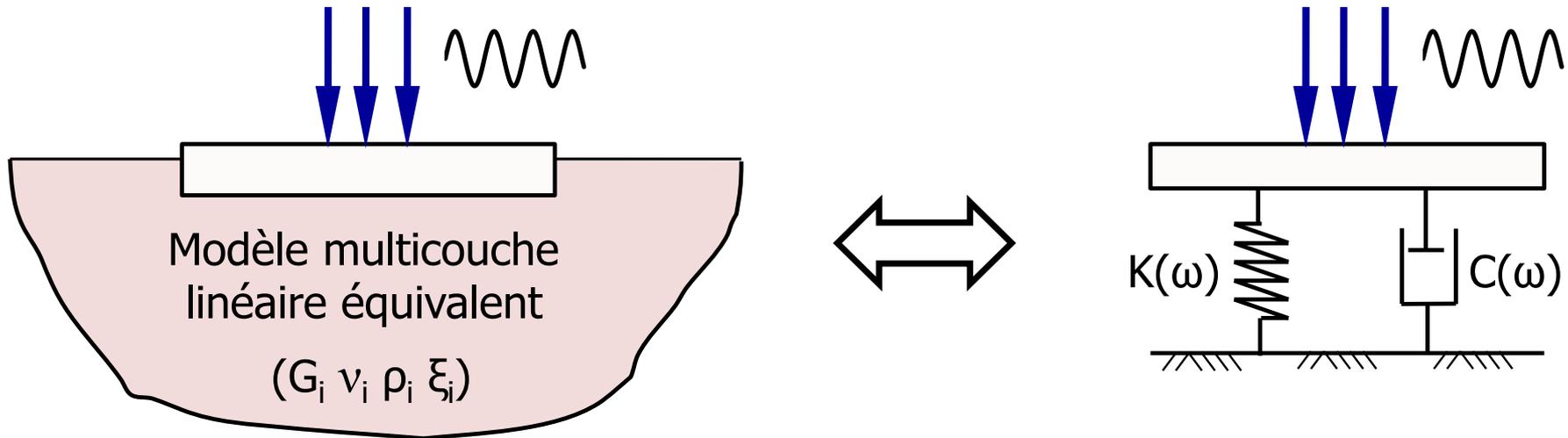
Réponse sismique de l'ouvrage

- Prise en compte des effets d'interaction sol-structure



Réponse sismique de l'ouvrage

- Prise en compte des effets d'interaction sol-structure



$$\underline{Z}(\omega) = K + i\omega C = K_{\text{stat}} \cdot k (1 + 2i \cdot \xi)$$

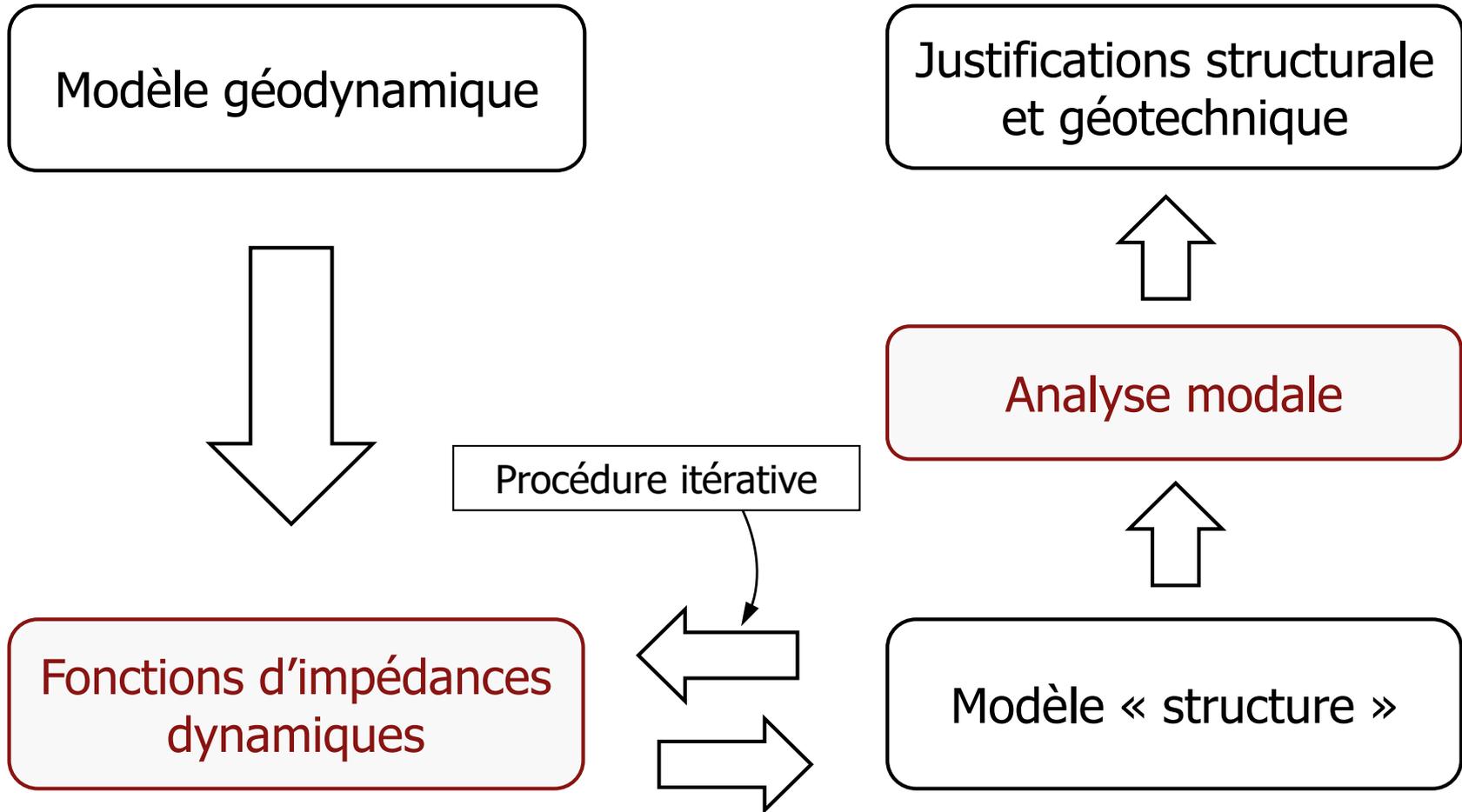
Raideur statique

Effet « dynamique »

Taux amortissement conventionnel

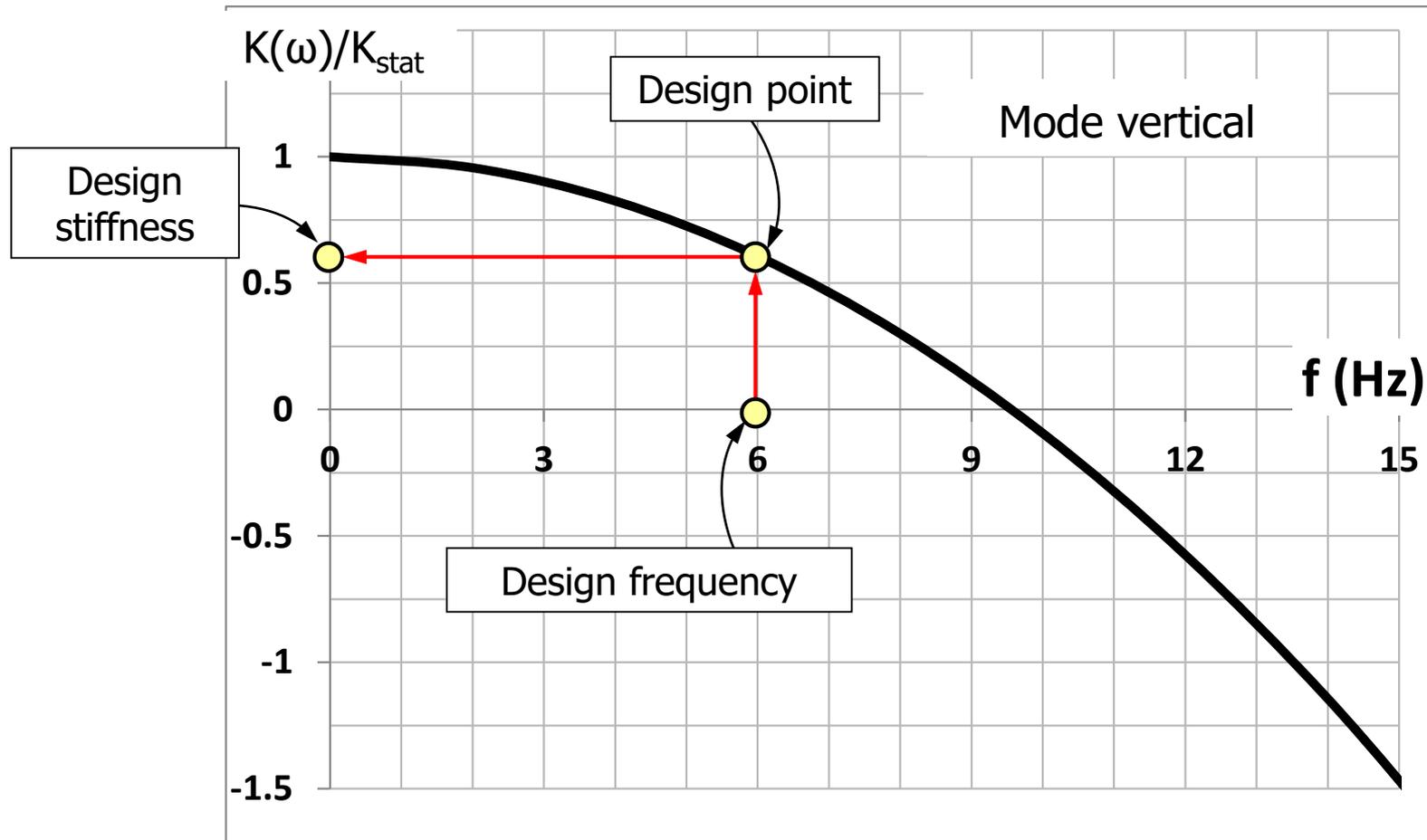
Réponse sismique de l'ouvrage

- Prise en compte des effets d'interaction sol-structure



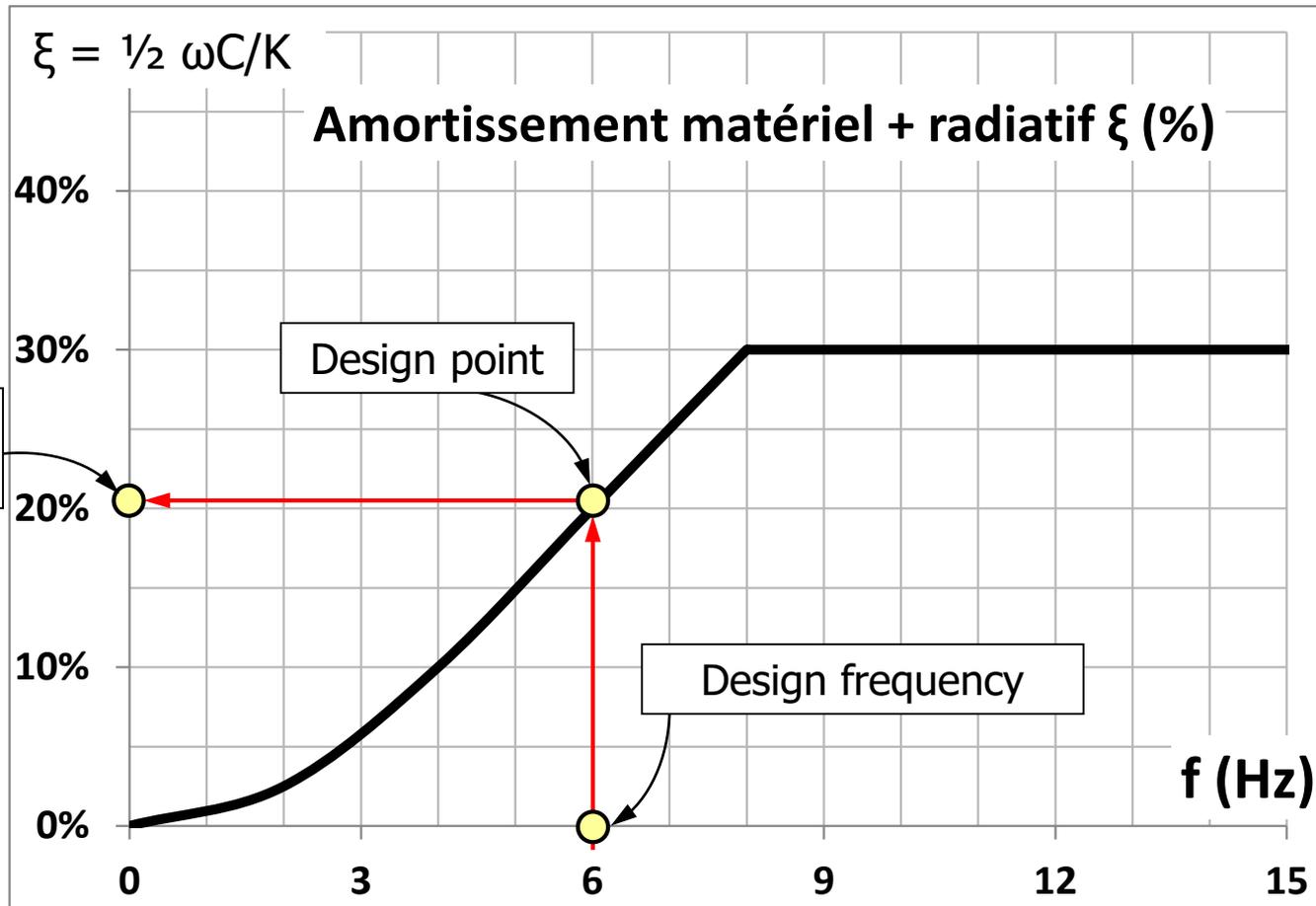
Réponse sismique de l'ouvrage

- Prise en compte des effets d'interaction sol-structure



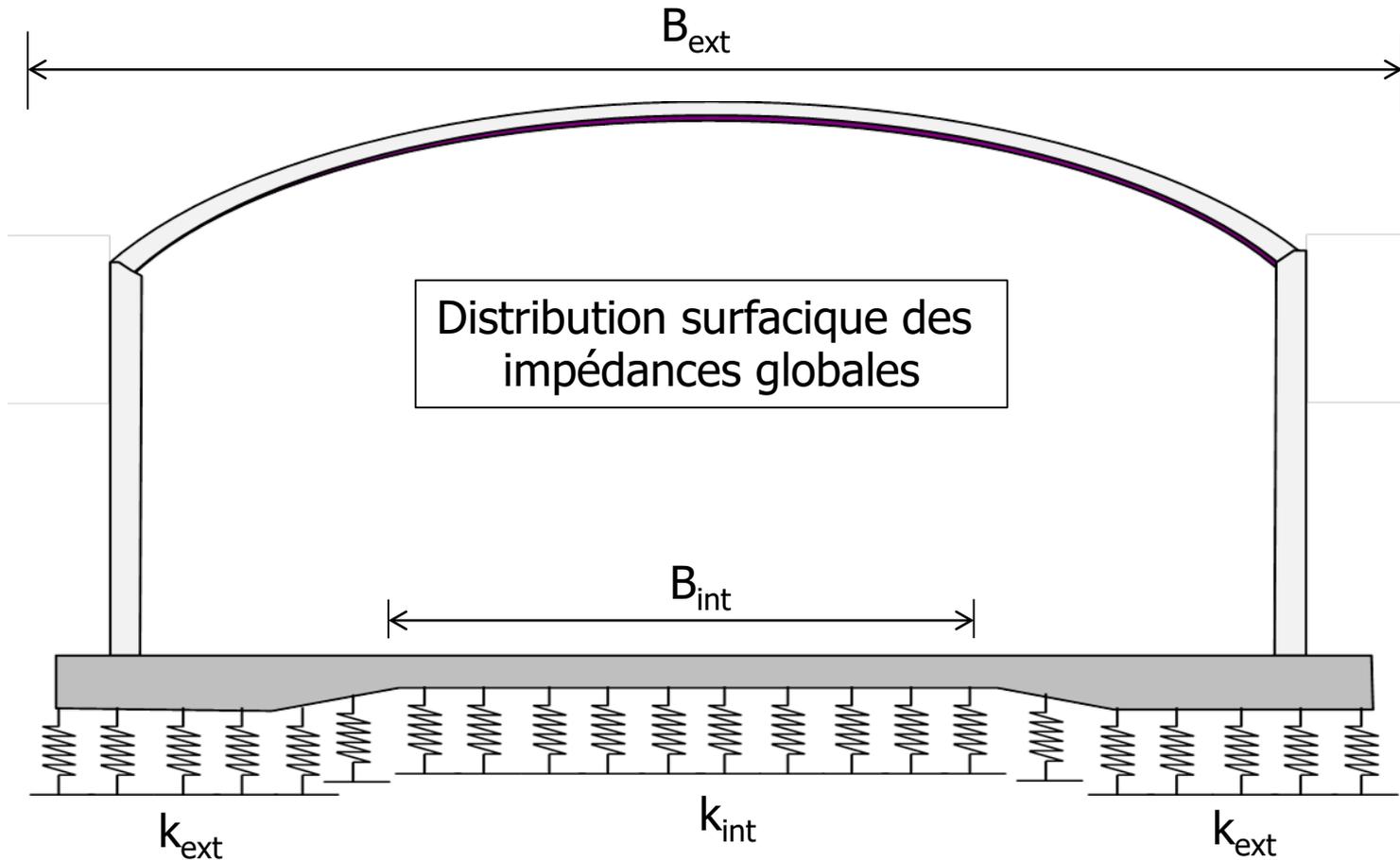
Réponse sismique de l'ouvrage

- Prise en compte des effets d'interaction sol-structure



Réponse sismique de l'ouvrage

- Prise en compte des effets d'interaction sol-structure



Réponse sismique de l'ouvrage

- Stabilité sismique de la fondation (glissement/portance)

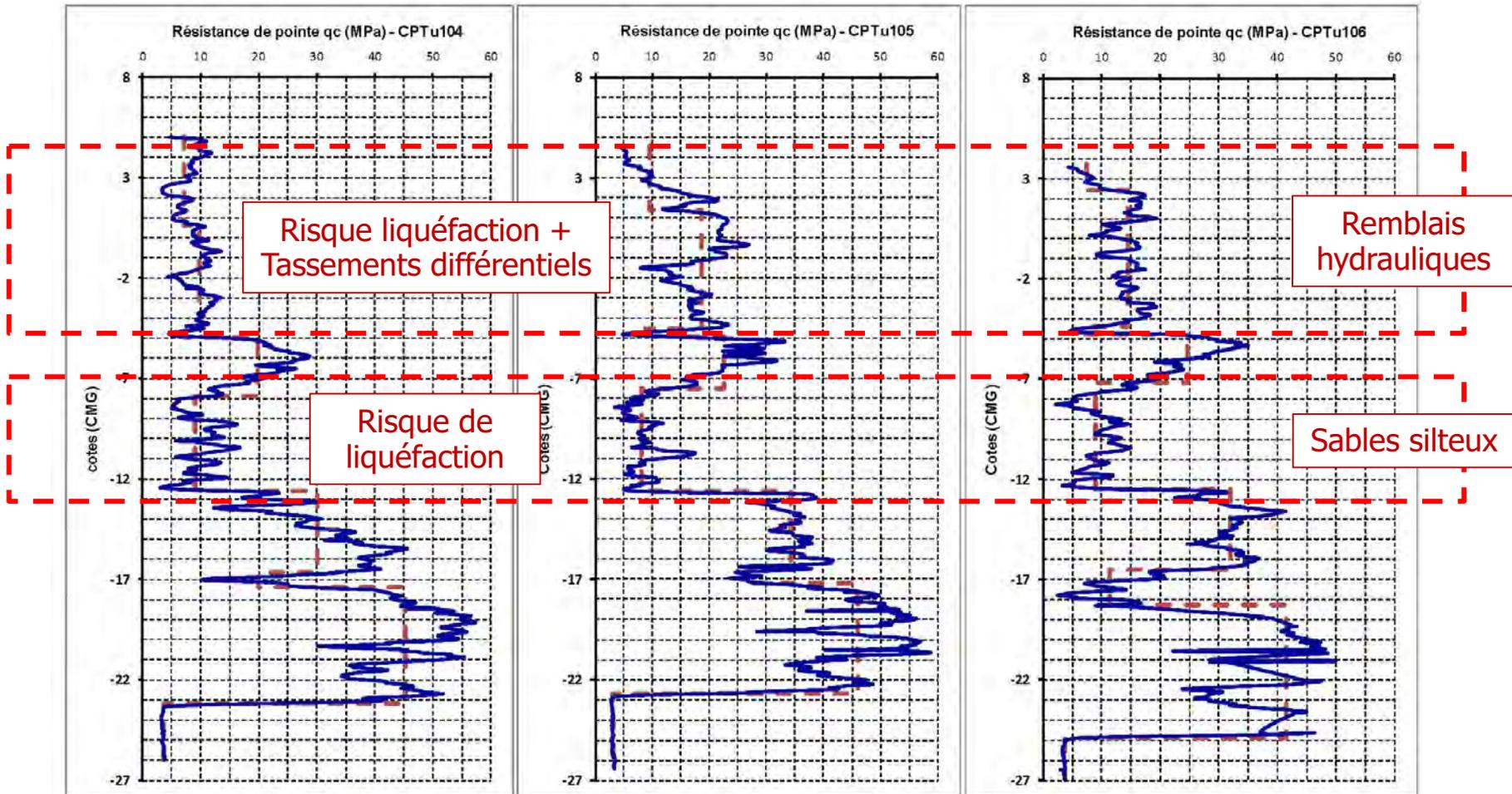
Configuration	$\frac{\Delta H_{sism}}{G}$	$\frac{\Delta V_{sism}}{G}$	$\frac{\Delta M_{sism}}{B \cdot G}$	$F_{sécurité}$
OBE – maj - plein	0.09	0.06	0.03	4,3
OBE – maj - vide	0.13	0.05	0.04	2,8
OBE – min - plein	0.05	0.04	0.02	7,5
OBE – min - vide	0.09	0.04	0.02	4,2
SSE – maj - plein	0.25	0.23	0.10	1,4
SSE – maj - vide	0.36	0.16	0.10	1,0
SSE – min - plein	0.13	0.12	0.05	2,7
SSE – min - vide	0.23	0.10	0.05	1,6

G = poids propre réservoir (vide ou plein)

Propriétés de cisaillement pondérées à la source (EC8)

Traitement du risque de liquéfaction

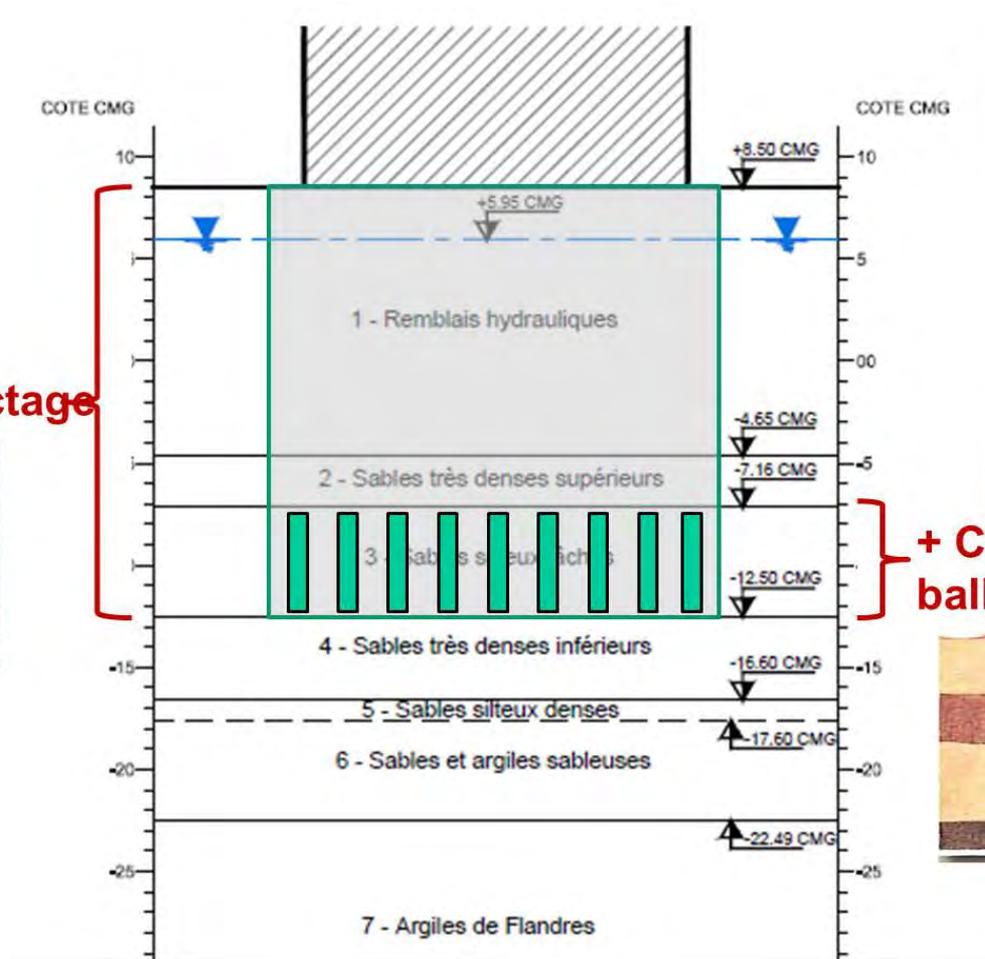
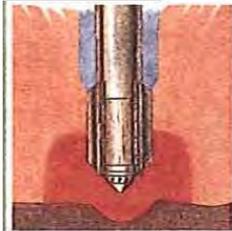
- Identification des horizons liquéfiables



Traitement du risque de liquéfaction

- Traitement anti-liquéfaction

Vibro-comapctage

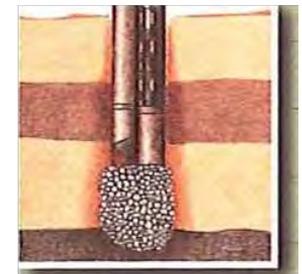
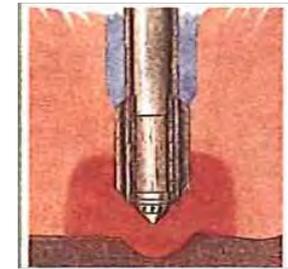
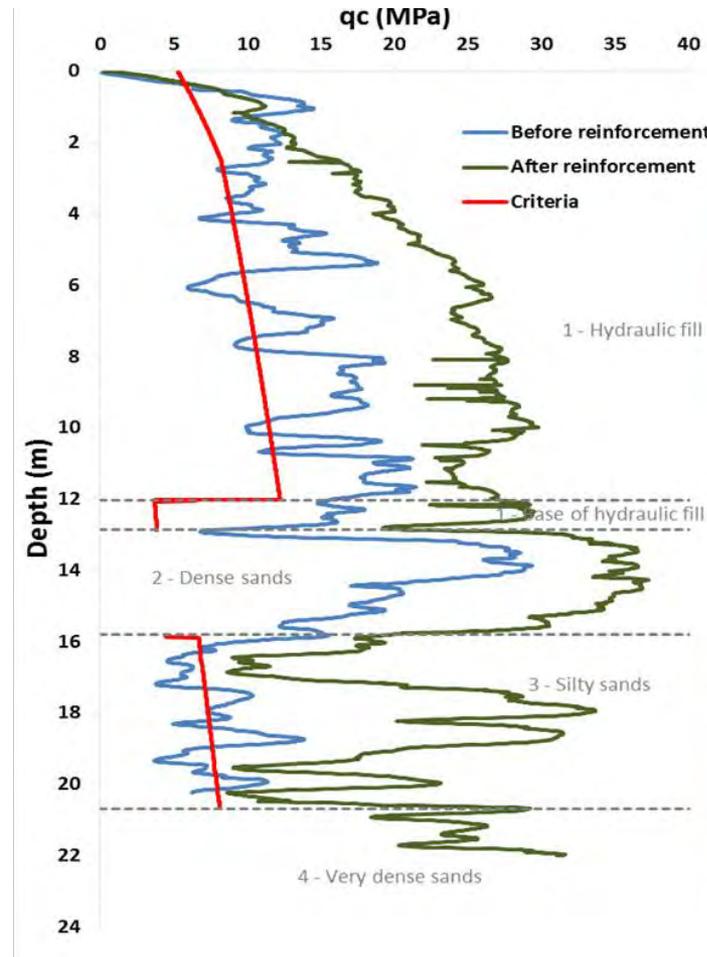


+ Colonnes ballastées



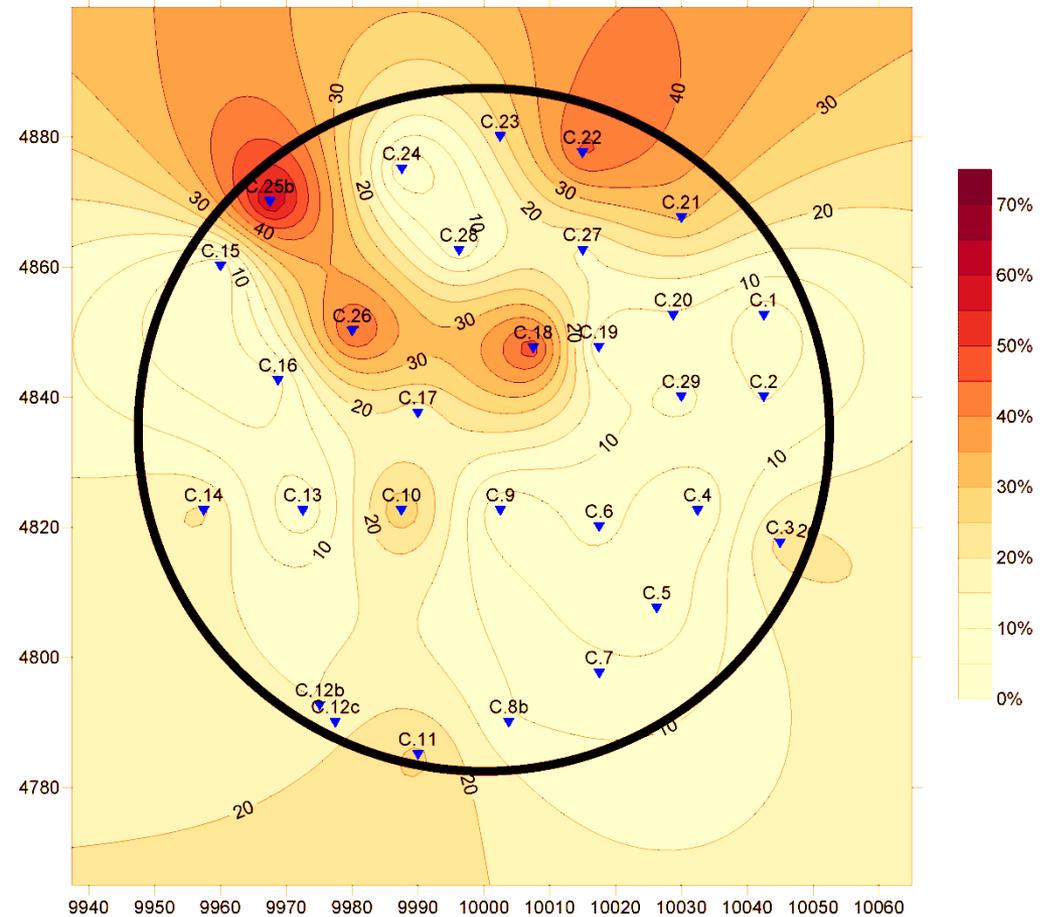
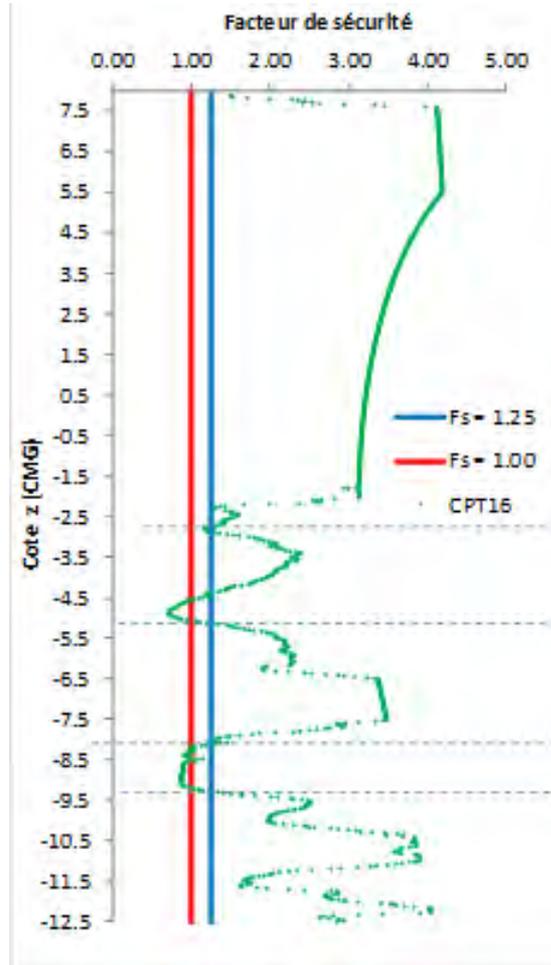
Traitement du risque de liquéfaction

- Sondages de « contrôle » post-traitement (~ 20 CPT / réservoir)



Revue du niveau de sismicité

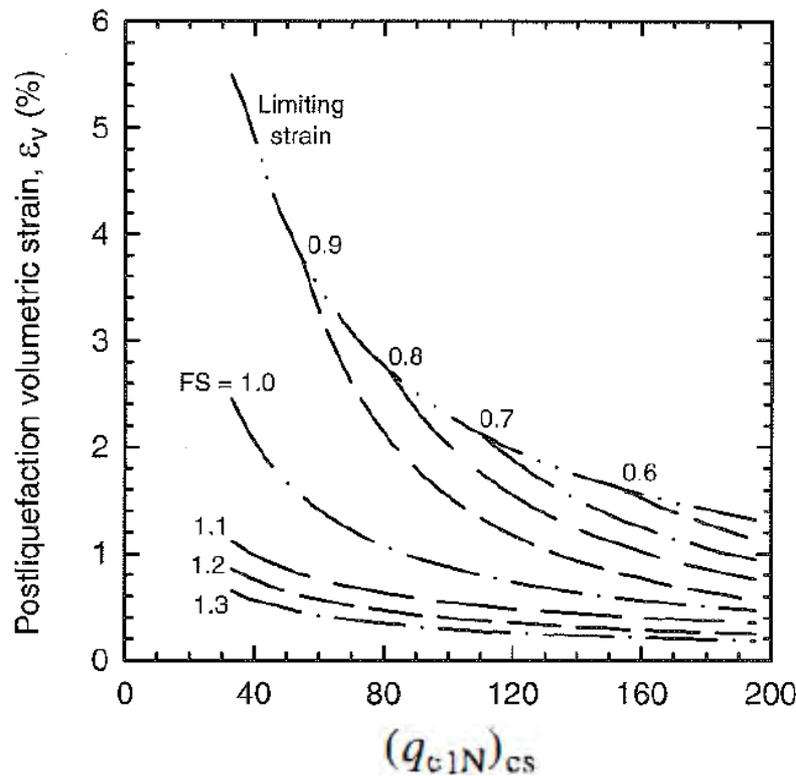
- Etudes post-fukushima : risque liquéfaction sous séisme réévalué



Revue du niveau de sismicité

- Evaluation des tassements post-liquéfaction

$$s_{tot} = \int \varepsilon_{zz}(z) dz \approx \int \varepsilon_v(z) dz$$



if FS = 0.5,	$\varepsilon_v = 102(q_{c1N})_{cs}^{-0.82}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
if FS = 0.6,	$\varepsilon_v = 102(q_{c1N})_{cs}^{-0.82}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 147$
if FS = 0.6,	$\varepsilon_v = 2411(q_{c1N})_{cs}^{-1.45}$	for $147 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
if FS = 0.7,	$\varepsilon_v = 102(q_{c1N})_{cs}^{-0.82}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 110$
if FS = 0.7,	$\varepsilon_v = 1701(q_{c1N})_{cs}^{-1.42}$	for $110 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
if FS = 0.8,	$\varepsilon_v = 102(q_{c1N})_{cs}^{-0.82}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 80$
if FS = 0.8,	$\varepsilon_v = 1690(q_{c1N})_{cs}^{-1.46}$	for $80 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
if FS = 0.9,	$\varepsilon_v = 102(q_{c1N})_{cs}^{-0.82}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 60$
if FS = 0.9,	$\varepsilon_v = 1430(q_{c1N})_{cs}^{-1.48}$	for $60 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
if FS = 1.0,	$\varepsilon_v = 64(q_{c1N})_{cs}^{-0.93}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
if FS = 1.1,	$\varepsilon_v = 11(q_{c1N})_{cs}^{-0.65}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
if FS = 1.2,	$\varepsilon_v = 9.7(q_{c1N})_{cs}^{-0.69}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$
if FS = 1.3,	$\varepsilon_v = 7.6(q_{c1N})_{cs}^{-0.71}$	for $33 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 200$

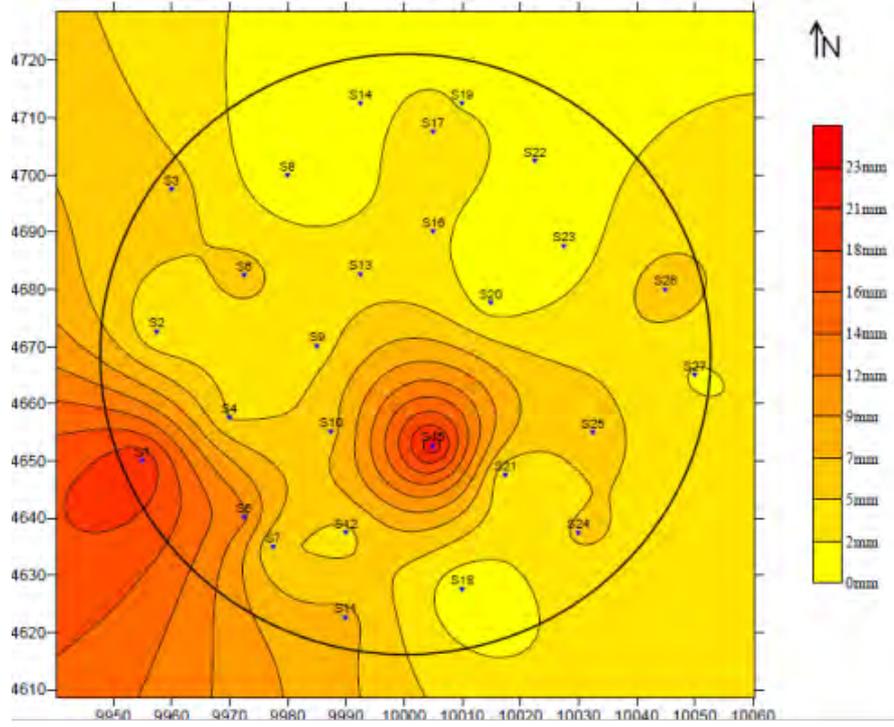
(Ishihara et Yoshimine, 1992)

Revue du niveau de sismicité

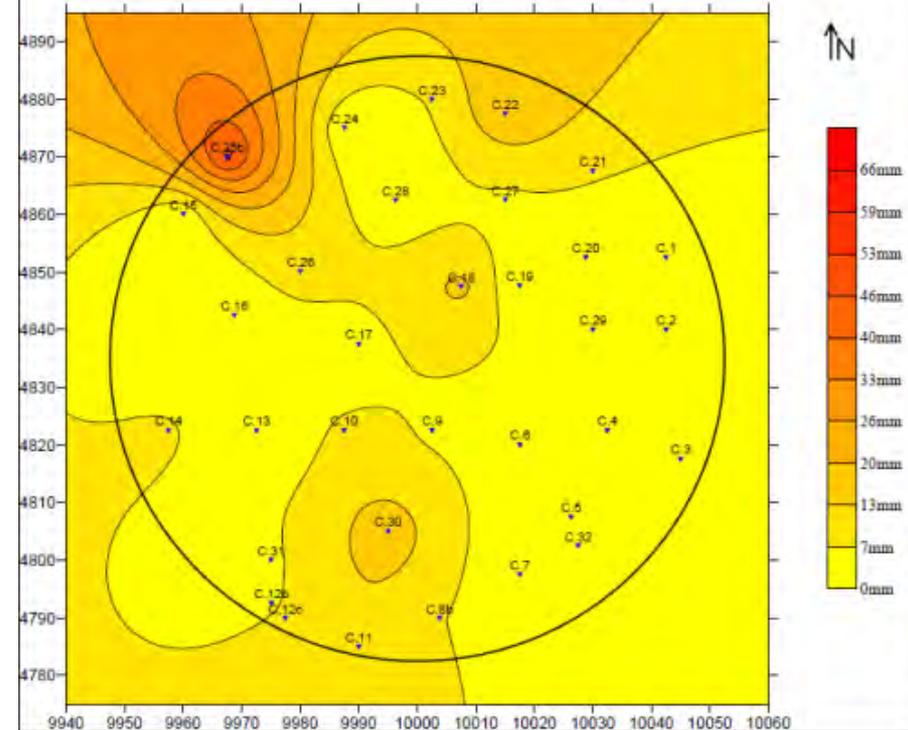
- Evaluation des tassements post-liquéfaction

$$s_{tot} = \int \varepsilon_{zz}(z) dz \approx \int \varepsilon_v(z) dz$$

Reservoir Sud : Mw=5.9 acc=0.4g q=40

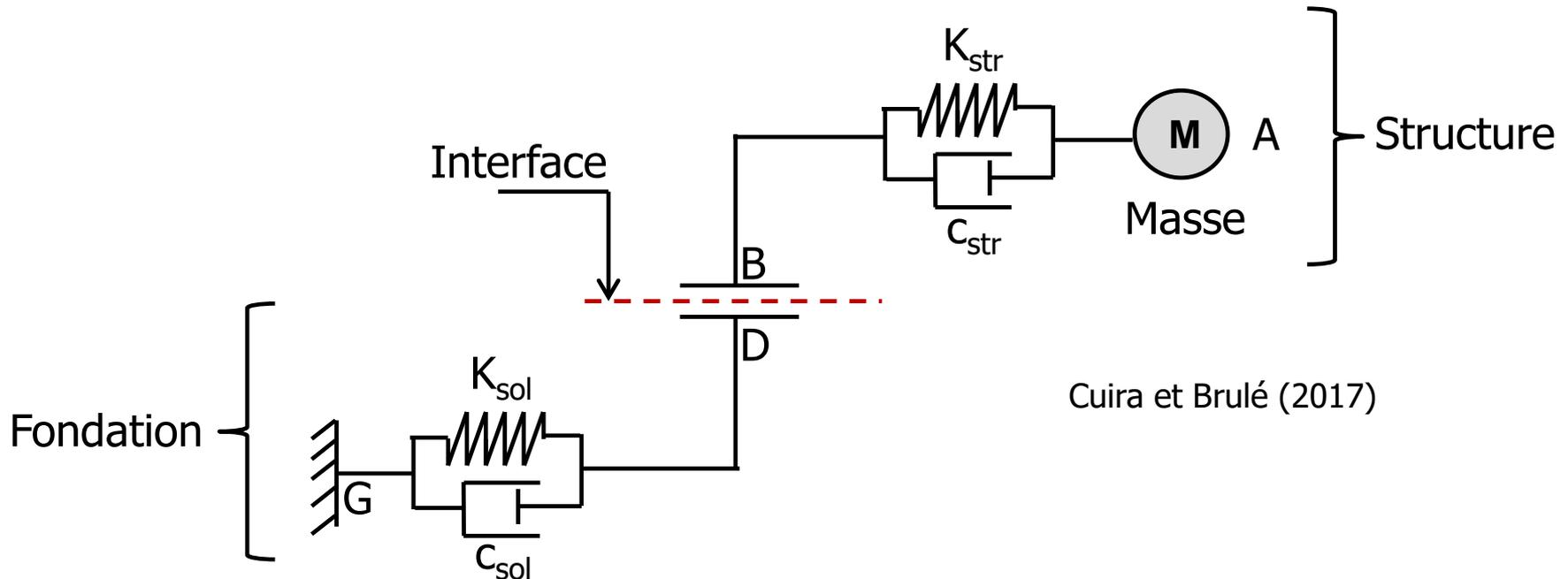


Reservoir Central : Mw=5.9 acc=0.4g q=100



Revue du niveau de sismicité

- Stabilité au glissement : évaluation des déplacements irréversibles

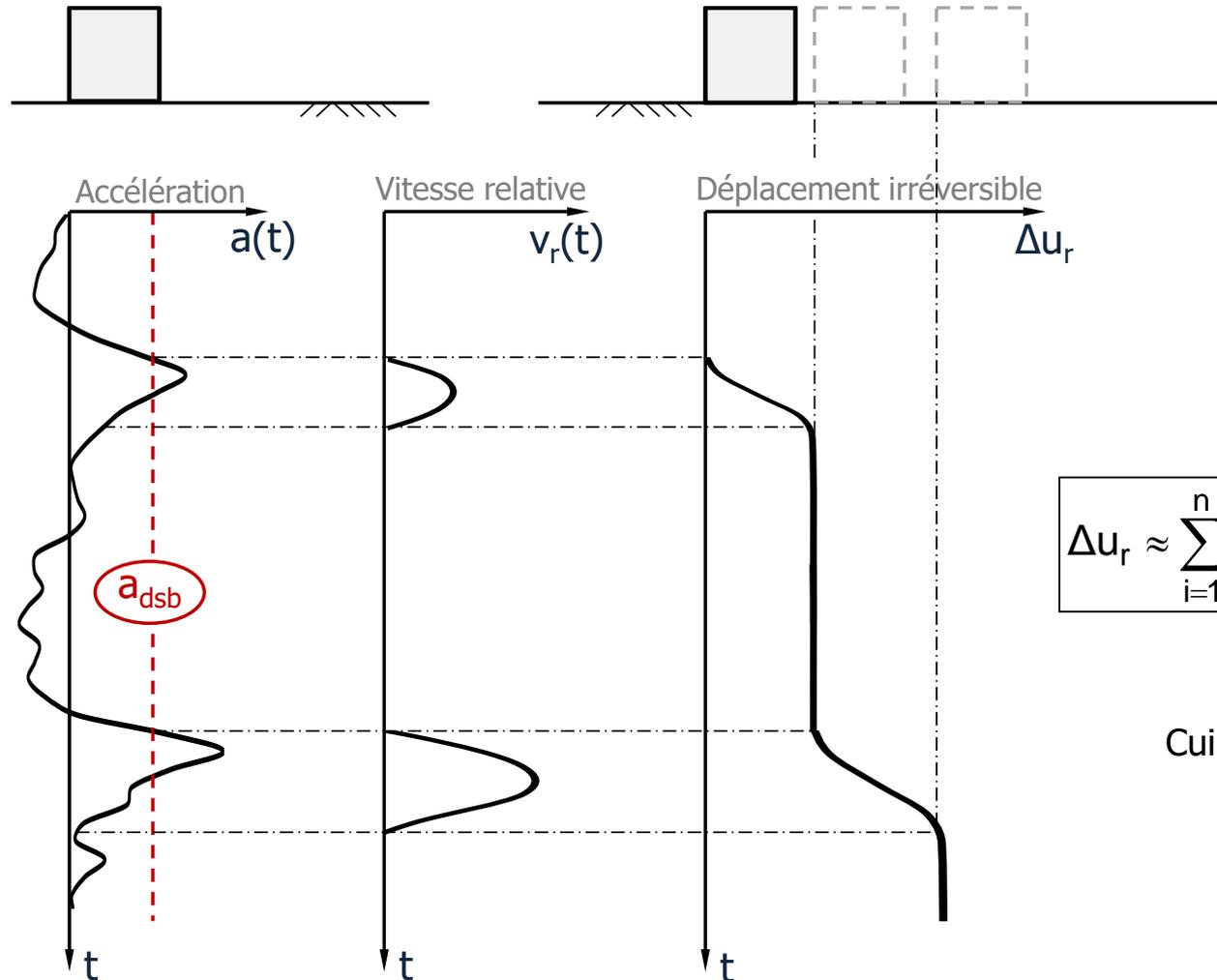


⇒ Si $M \cdot a(t) < H_u$ pas de glissement

⇒ Si $M \cdot a(t) \geq H_u$ glissement tant que vitesse relative $(V_D - V_B) > 0$

Revue du niveau de sismicité

- Stabilité au glissement : évaluation des déplacements irréversibles



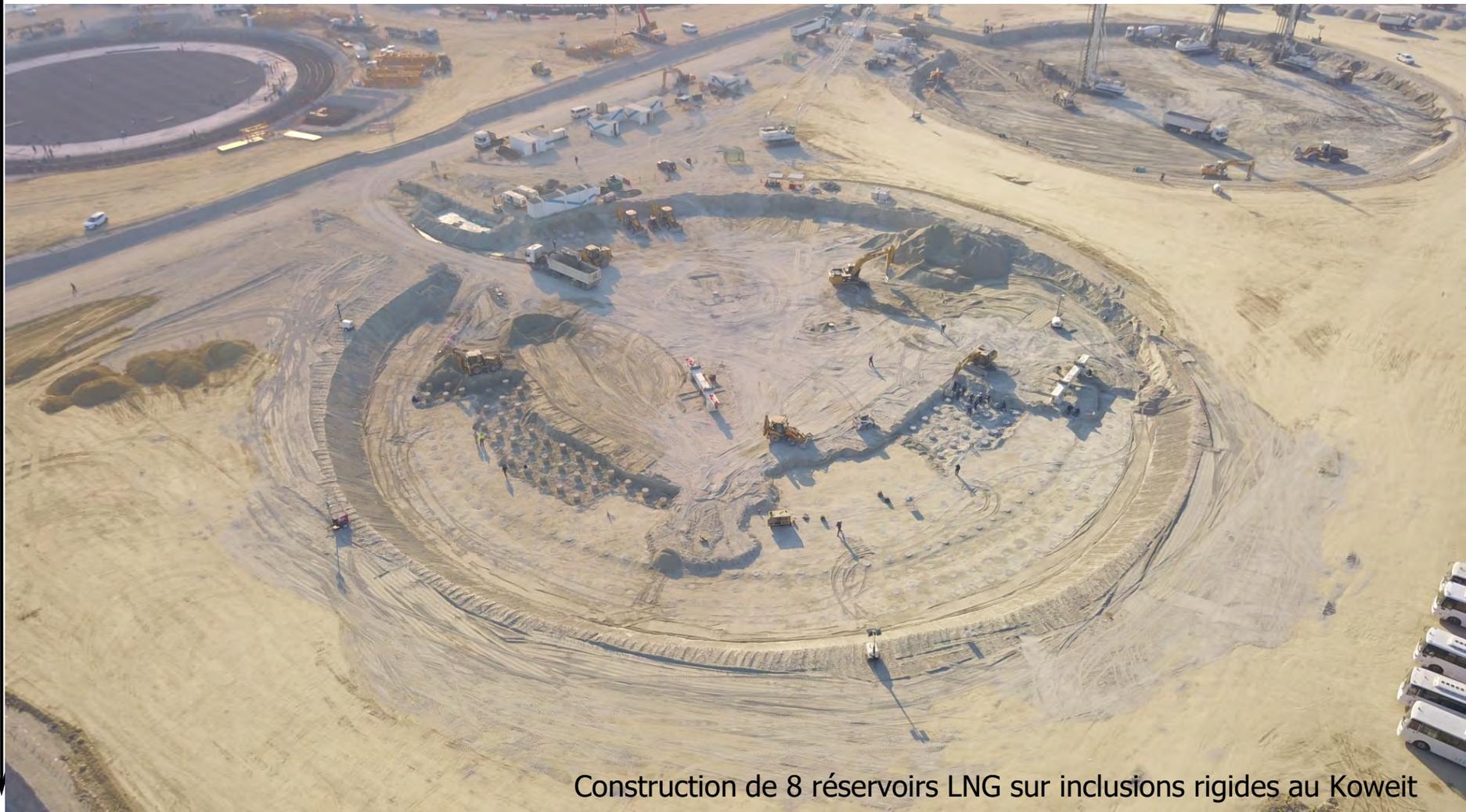
$$\Delta u_r \approx \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i^2}{2} a_{\max,i} \left(\frac{a_{\max,i}}{a_{dsb}} - 1 \right)$$

Cuira et Brulé (2017)

Synthèse

- Justification parasismique d'un ouvrage sur radier général
- Traitement du risque de liquéfaction par vibroflottation avec incorporation « ciblée » du ballast
- Etat limite sismique = « état pour lequel il y a apparition de déplacements irréversibles d'une amplitude inacceptable » (EC8)
- Intérêt des modèles en déplacements en complément des analyses pseudo-statiques classiques

Merci de votre attention !



Construction de 8 réservoirs LNG sur inclusions rigides au Koweït