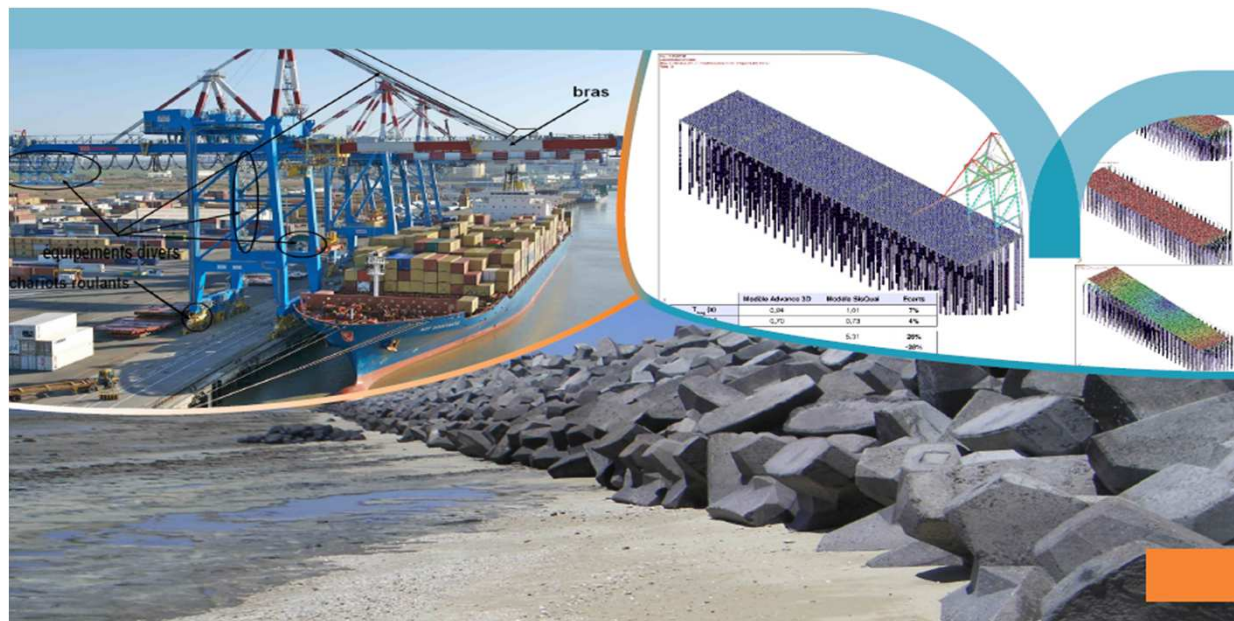


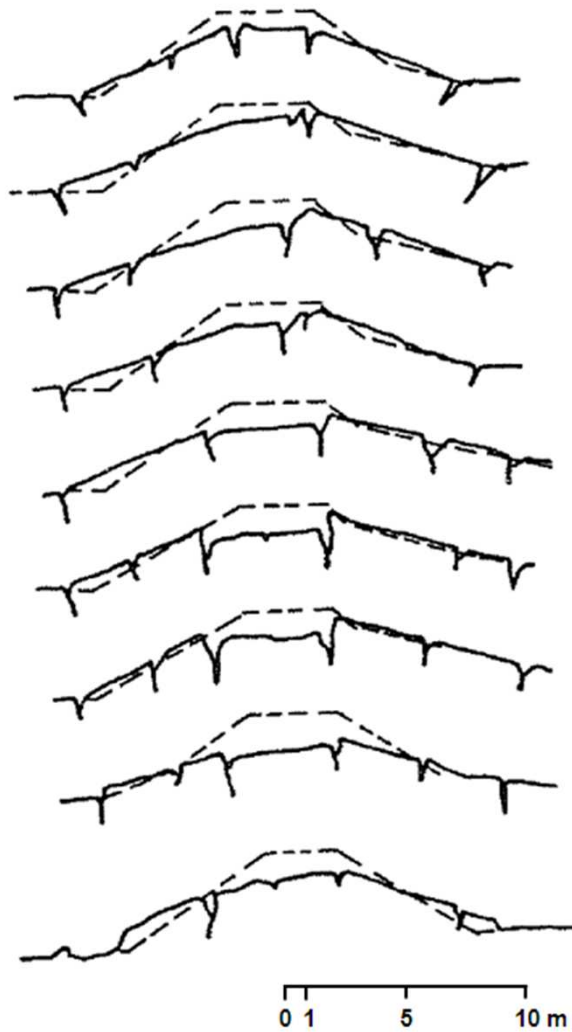
Analyse du comportement sismique des digues



✓ **Mécanismes de rupture**

- Digues fluviales et maritimes
- Barrages
- Remblais routiers et ferroviaires
- Remblais d'accès aux ouvrages

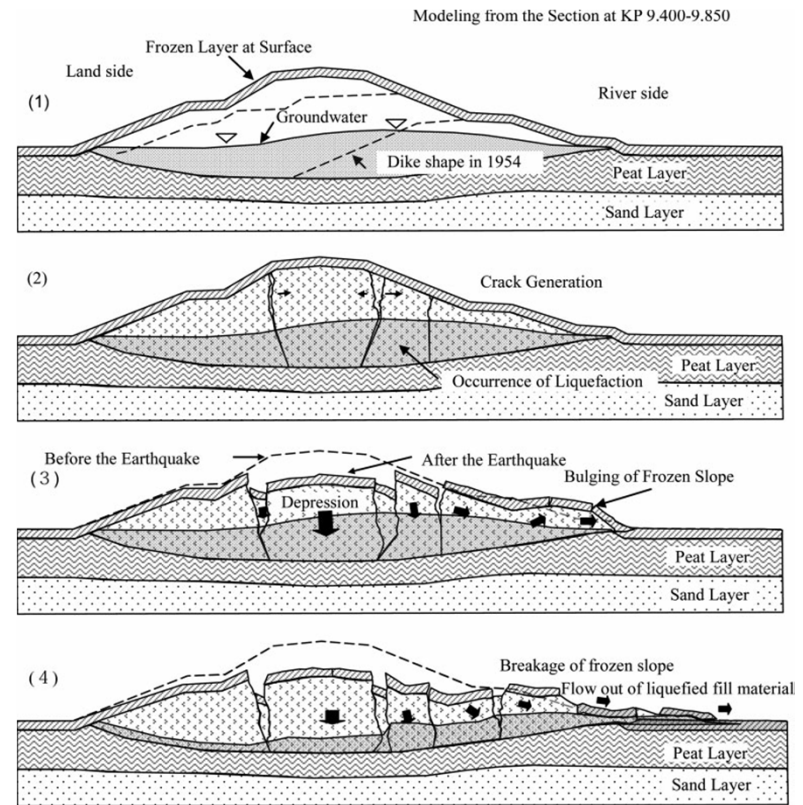
Exemples de dommages constatés



D'après Ambraseys et Menu (1988)

Remblai détruit au Japon
Séisme de Tokachi-Oki, 4 mars 1952

Digue détruite au Japon
Séisme de Kushiro-Oki, 15 janvier 1993



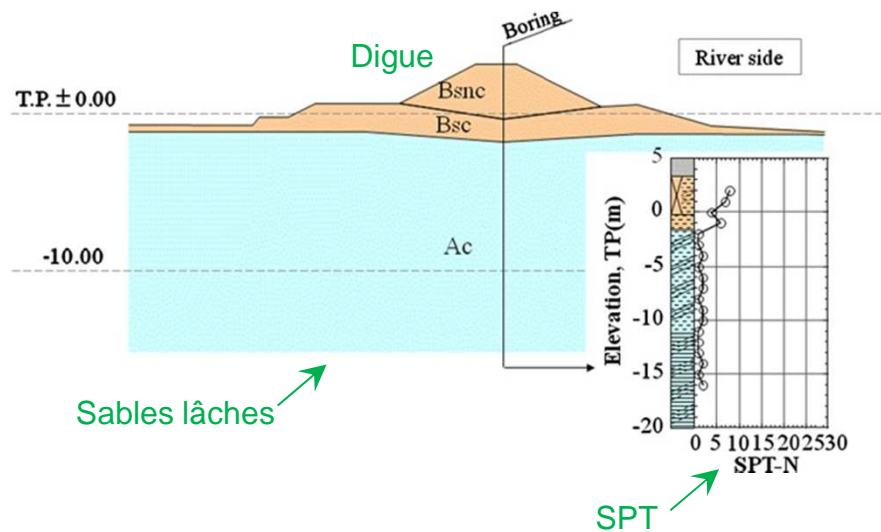
D'après Sasaki (2009)

Modes de rupture de digues

Digue endommagée, lac Hunuma, Shjimo-Ishizaki, Japon
Séisme de Tohoku, 11 mars 2011



Digue endommagée, rivière Naka, Mitanda, Japon
Séisme de Tohoku, 11 mars 2011



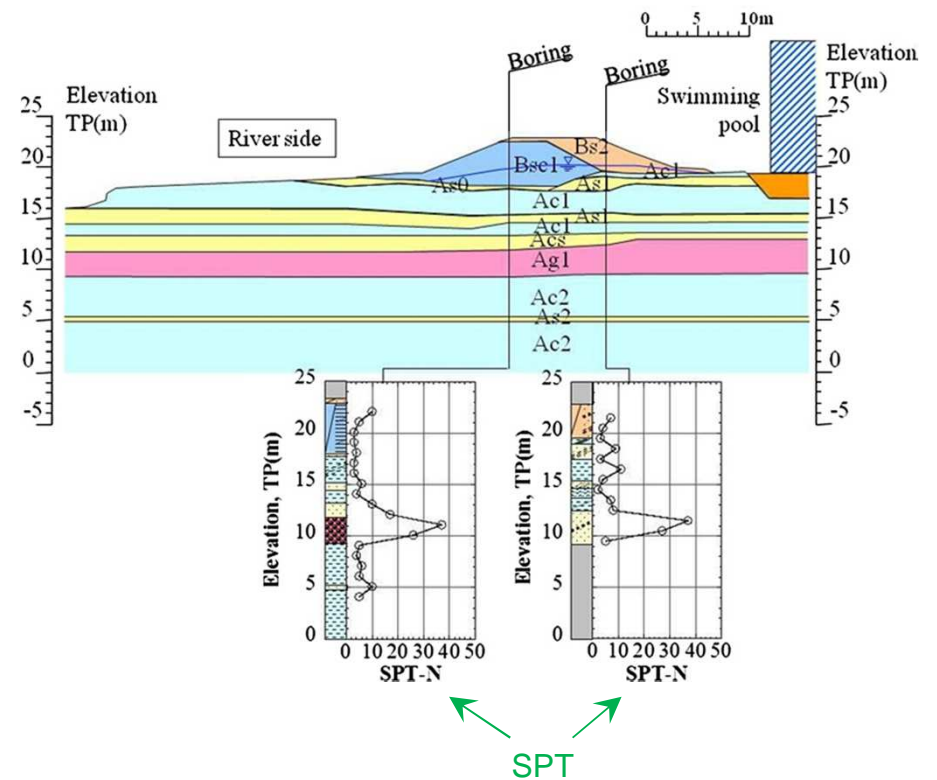
D'après Sasaki et al. (2012)

Rupture d'une digue et de la berge



D'après Sasaki et al. (2012)

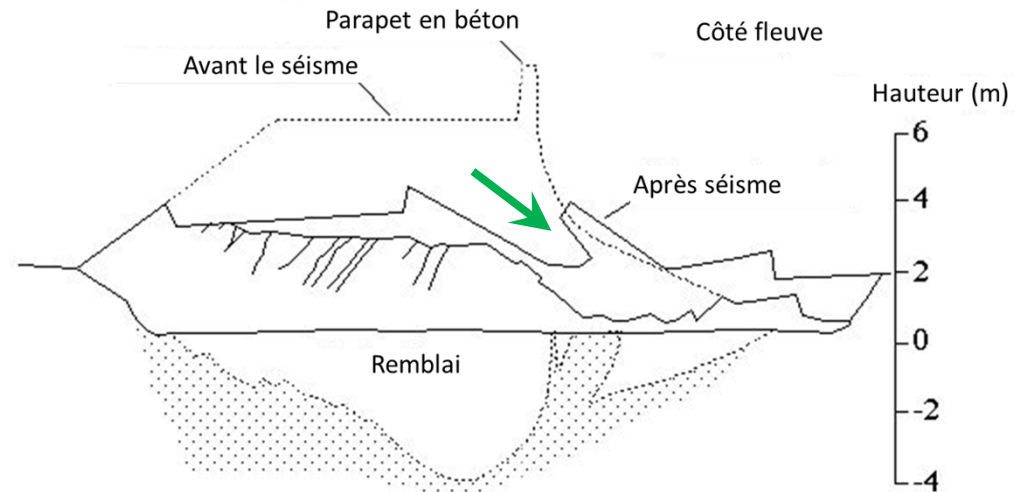
Digue endommagée, rivière Eai, Kukunuma, Japon
Séisme de Tohoku, 11 mars 2011



Exemple d'une digue maritime



D'après Matsuo (1996), Matsuo et al. (2000)



D'après Sasaki (1998)

Rupture d'une digue de la rivière Yodo-gawa, baie d'Osaka
Séisme de Hyogo-ken-Nambu, 17 janvier 1995

Exemple d'une digue maritime

Route d'accès au State Park, Moss Landing, Californie
Séisme de Loma Prieta, 17 octobre 1989



Kutter

The Regents of the University of California, UC Davis

Remblais d'accès aux ouvrages

Remblai d'accès, Moss Landing, Californie
Séisme de Loma Prieta, 17 octobre 1989



The Regents of the University of California, UC Davis

Analyse du comportement des digues sous l'effet des séismes

✓ **Classification**

des mécanismes

- Affaissements, tassements différentiels
- Ruptures localisées
- Ruptures généralisées

Observations

- ✓ **Les ruptures catastrophiques de remblais ou de digues**
 - résultent de la liquéfaction des sols de fondation
 - pendant des mouvements sismiques forts
- ✓ **Le mode de rupture se traduit par**
 - des fissures et crevasses longitudinales
et la dislocation du remblais en blocs séparés
 - des déplacement latéraux importants
 - des tassements

Observations

- ✓ **Mais, les mouvements faibles**
peuvent entraîner
 - un affaissement du remblai
 - des tassements différentiels

- ✓ **Dans tous les cas**
 - la fonction principale du remblai est mise en cause
 - fermeture d'un itinéraire routier ou ferroviaire
 - mise en défaut de la capacité de protection
d'une digue

Une classification

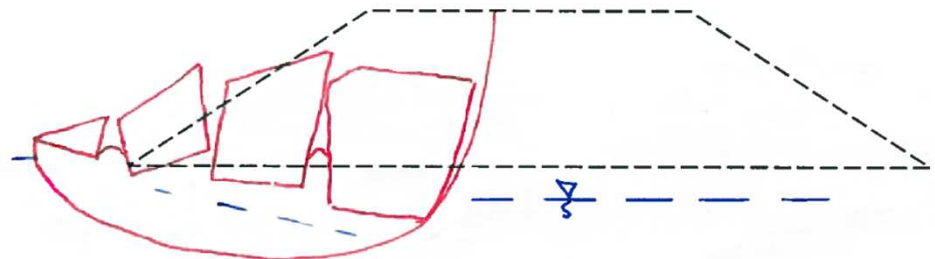
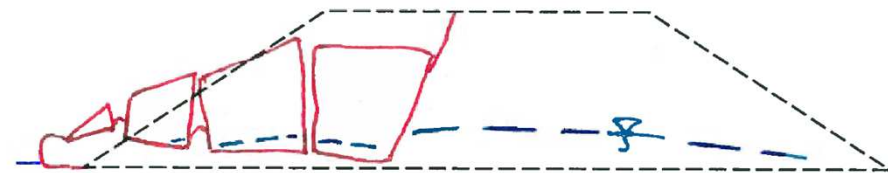
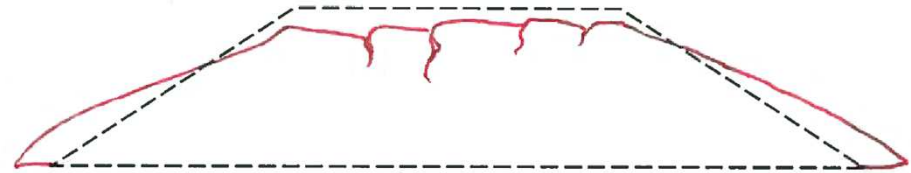
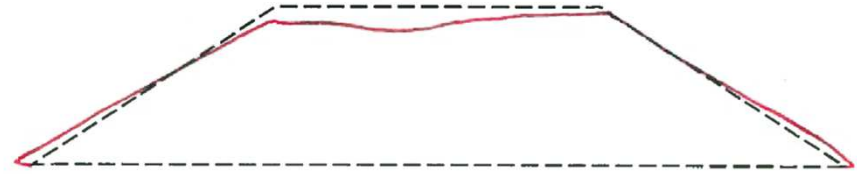
Affaissement
Tassements différentiels

Tassement en tête
Fissuration longitudinale
Décrochement
Étalement en pied

Ruptures localisées des flancs

Rupture de la couche basale
ou d'une couche mince du sol
et extrusion

Rupture profonde du sol de
fondation
Rupture possible très en aval



Analyse du comportement des digues sous l'effet des séismes

- ✓ **Techniques particulières**
 - Caractérisation du risque
de liquéfaction des sols
 - Calculs de stabilité
par la méthode des blocs

Méthode de caractérisation du potentiel de liquéfaction des sols

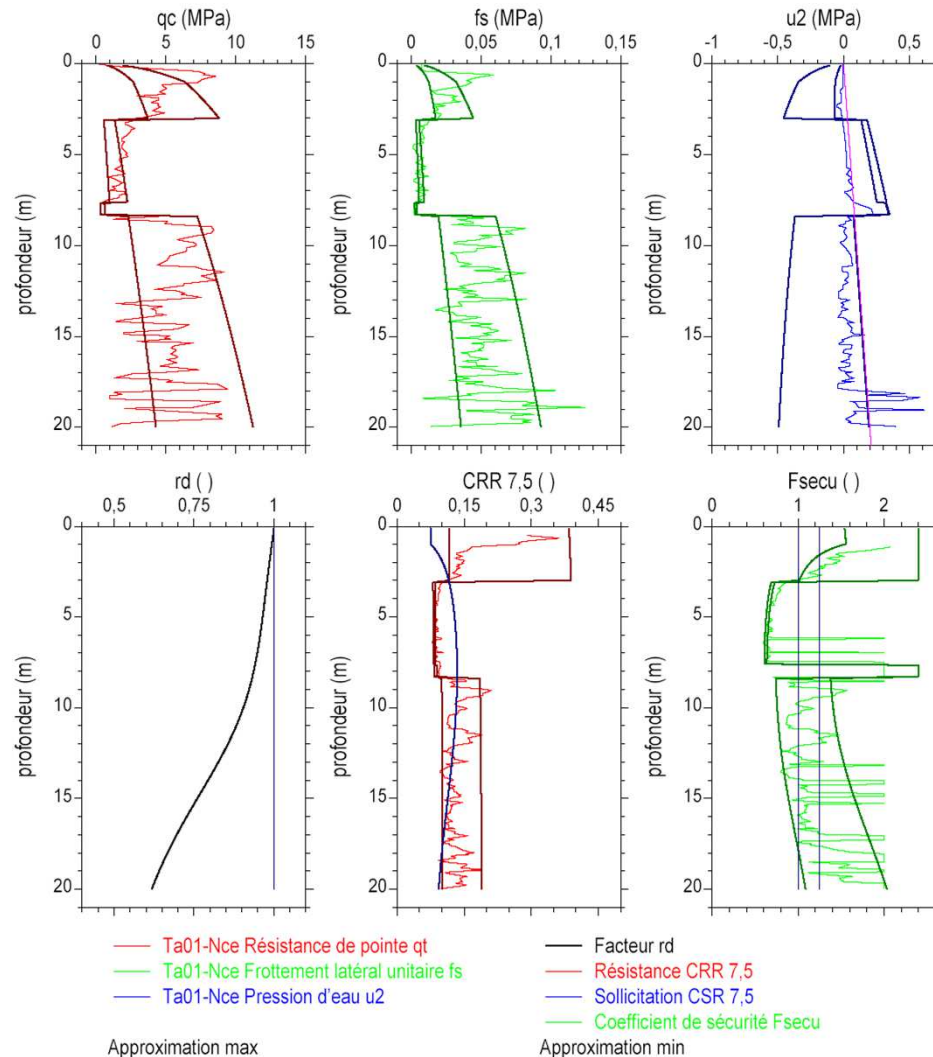
✓ **Reconnaissance in-situ**

- Sondages pénétrométriques CPT, CPTu (piézocône)
- Sondages au carottier battu SPT
- Sondages pressiométriques

✓ **Méthode simplifiée EC8**

- Résistance cyclique CRR
- Sollicitation sismique CSR
- Evaluation du coefficient de sécurité $F_s(z)$

Exemple de caractérisation du potentiel de liquéfaction des sols



Sondage au piézocône (CPTu)

Mesures directes

q_t résistance de pointe

f_s frottement unitaire

u_2 pression d'eau

Encadrements conformes aux règles
d'évolution avec la profondeur

Variables calculées par la méthode
simplifiée

coefficient d'atténuation r_d

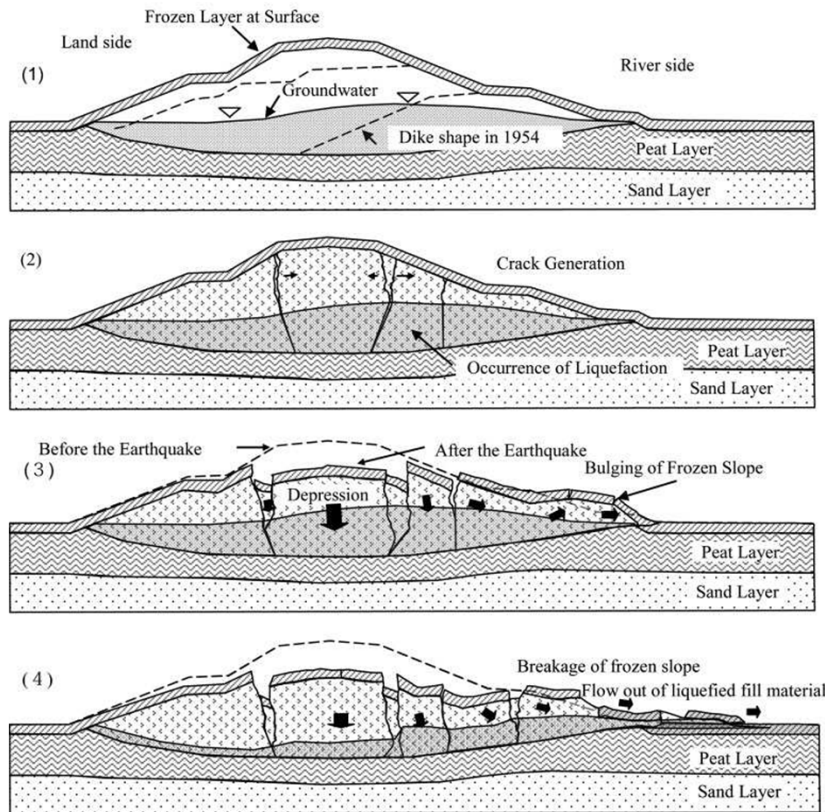
résistance cyclique $CRR_{7,5}$

coefficient de sécurité F_s

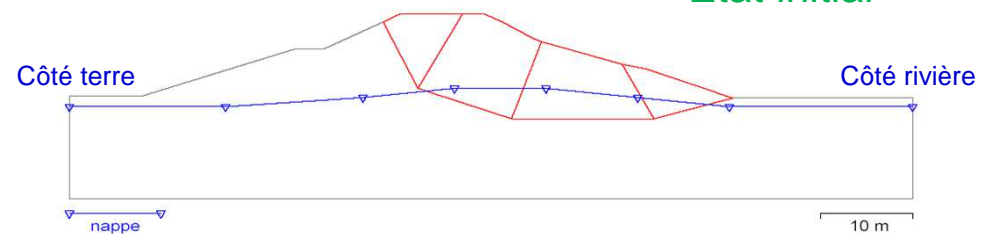
Méthode des blocs (calcul de la stabilité)

Digue détruite au Japon
Séisme de Kushiro-Oki, 15 janvier 1993

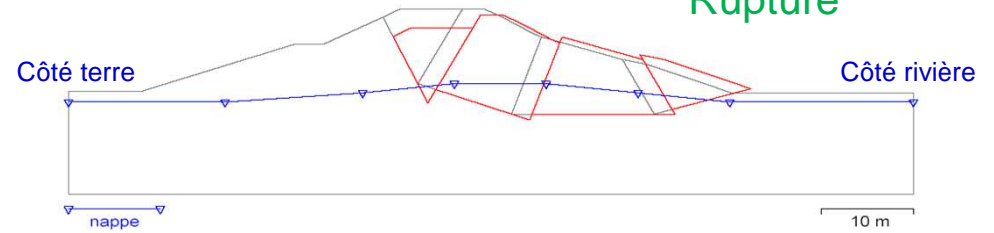
Modeling from the Section at KP 9.400-9.850



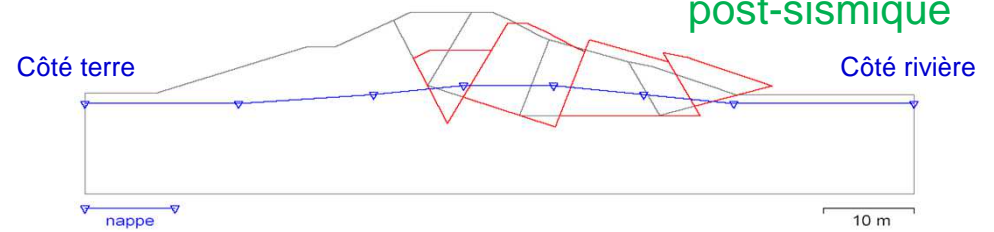
État initial



Rupture



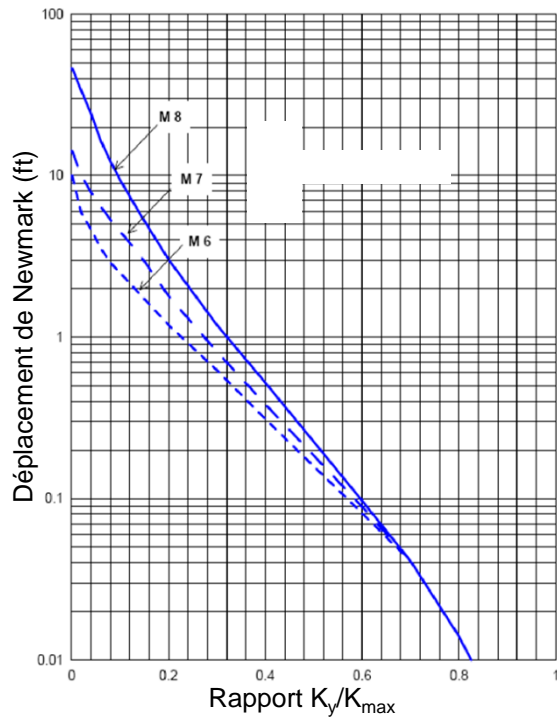
Mouvement post-sismique



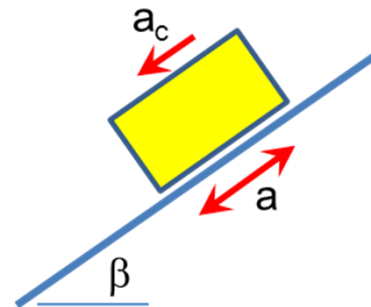
Méthode de Newmark

✓ Déplacement pendant la durée du séisme

- abaque (rapport de résistance, magnitude, durée)
- par intégration directe de l'accélérogramme

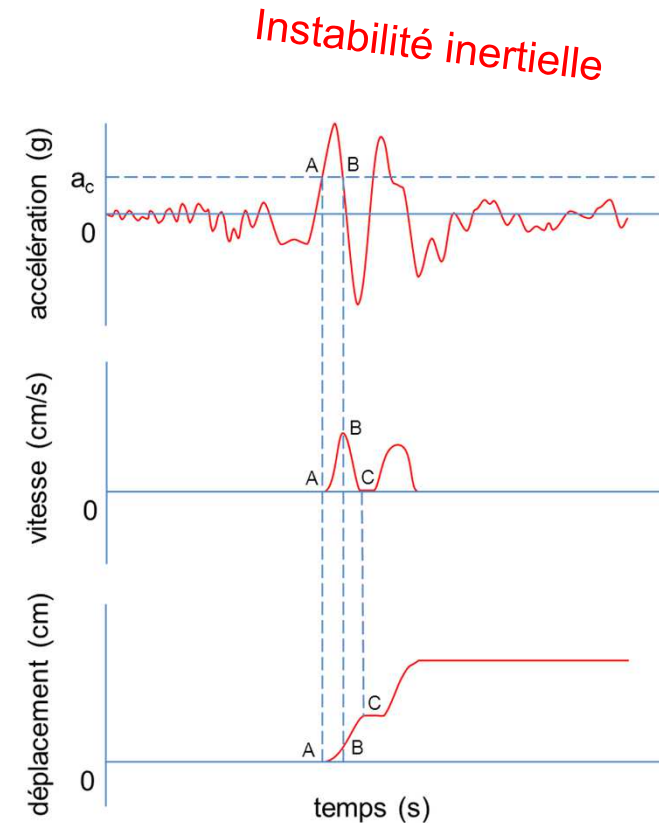


D'après Shewbridge et al. (2009)



Intégration directe

▶ Rapport de résistance
 K_y accélération critique
de la pente
 K_{max} accélération caractéristique du séisme

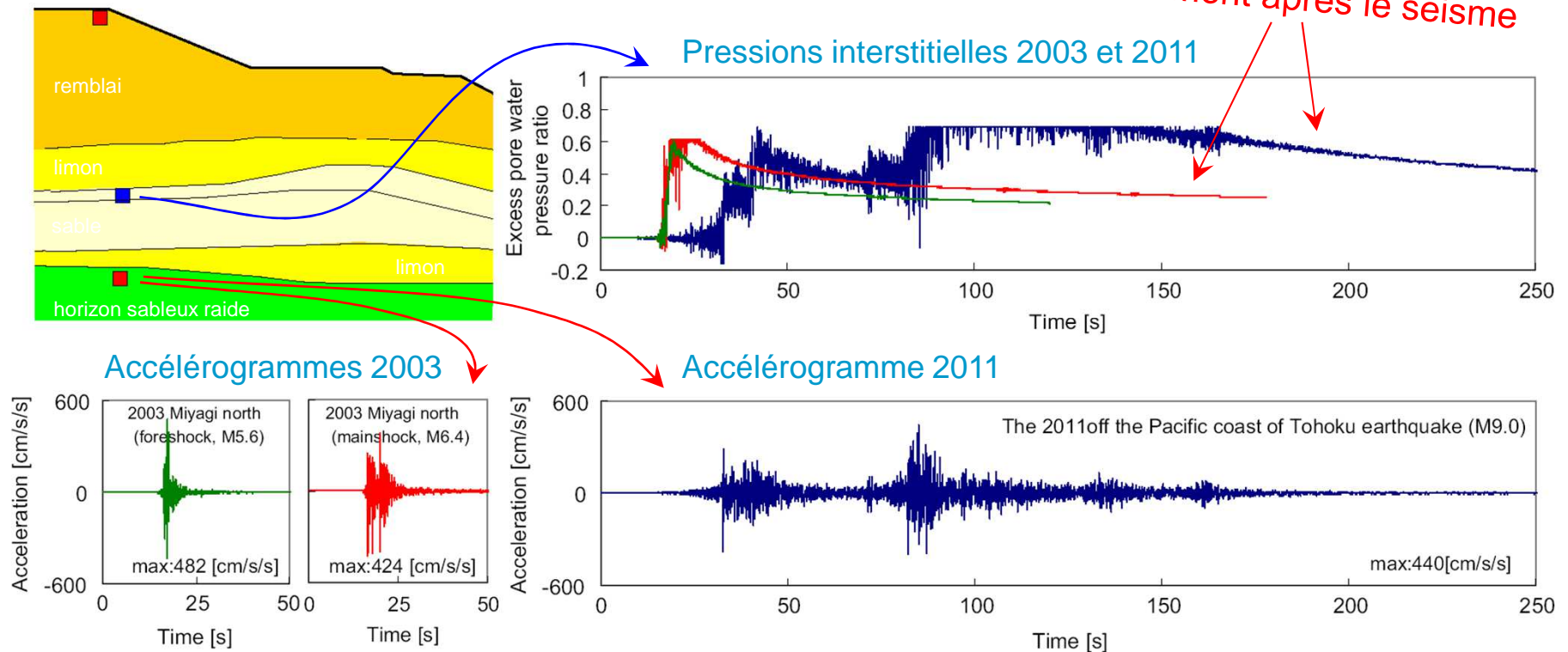


Initiation de la rupture

✓ Instabilité (liquéfaction des sols de fondation)

- accumulation des pressions interstitielles
- déclenchement et dislocation de la digue

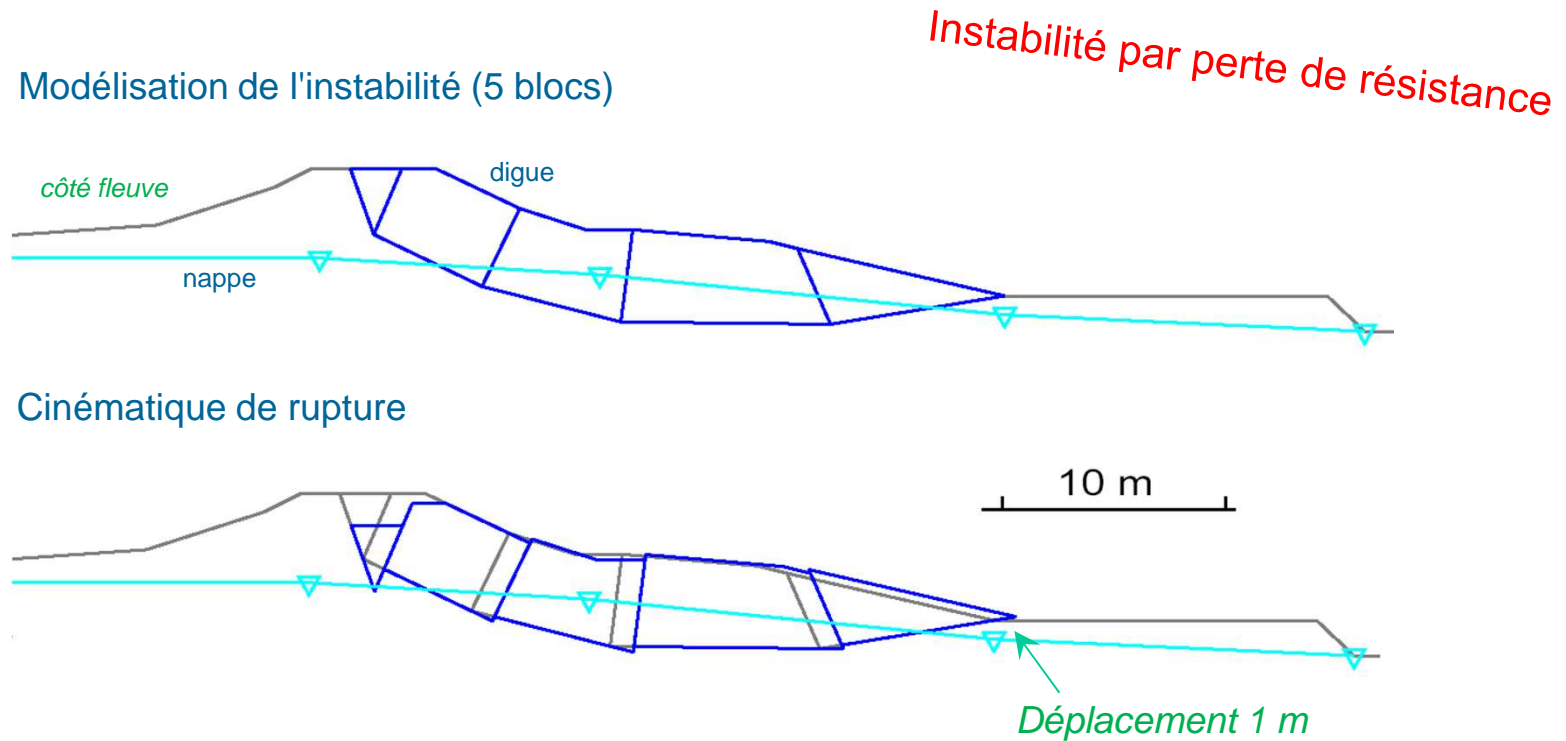
La dissipation des pressions interstitielles s'effectue lentement après le séisme



Cinématique post-séisme

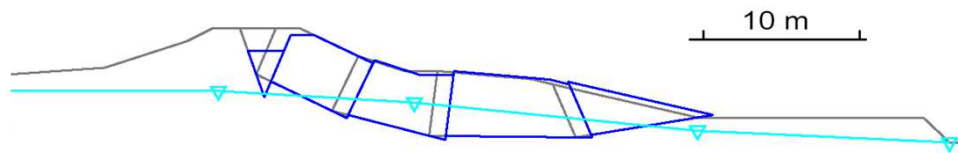
✓ Illustration pour le volume instable (exemple)

- surface de rupture et discrétisation en blocs
- cinématique

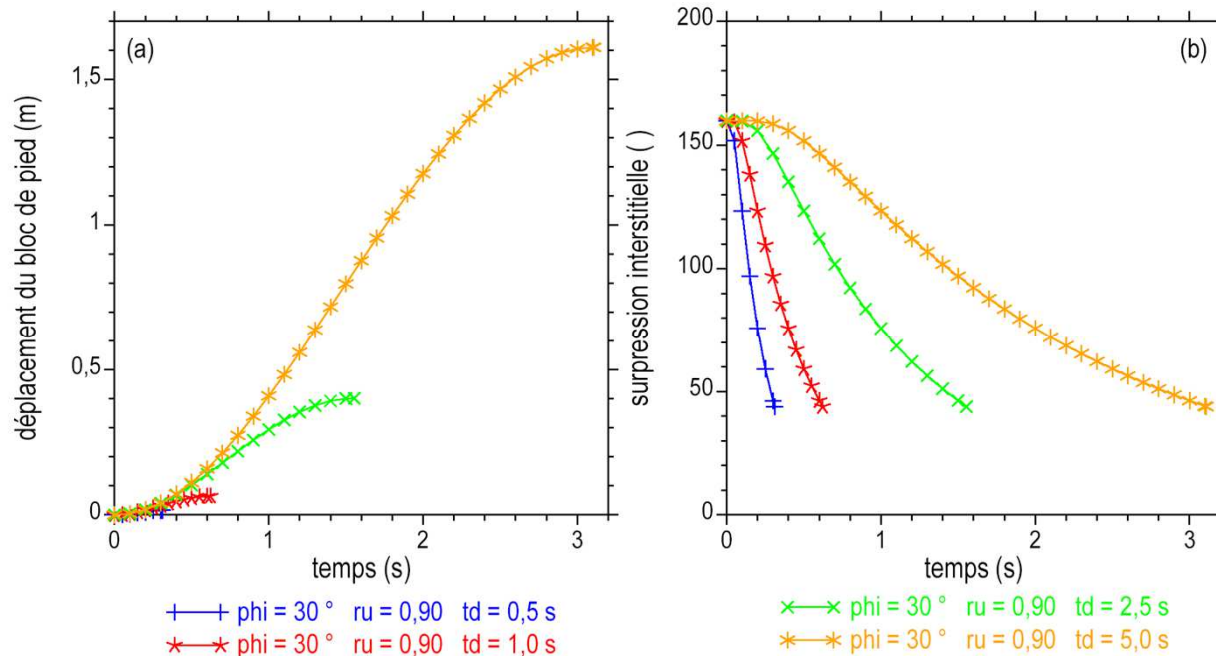


Effet du temps de dissipation des pressions interstitielles

- très forte influence sur le déplacement final
- très forte influence sur la cinématique



Déplacements du pied et
taux de dissipation des
pressions interstitielles en
pied en fonction du temps



t_d paramètre
 $t_d = 0,5 \quad 1 \quad 2,5 \quad 5$ s
 $r_u = 0,90$
 $\phi = 30^\circ$

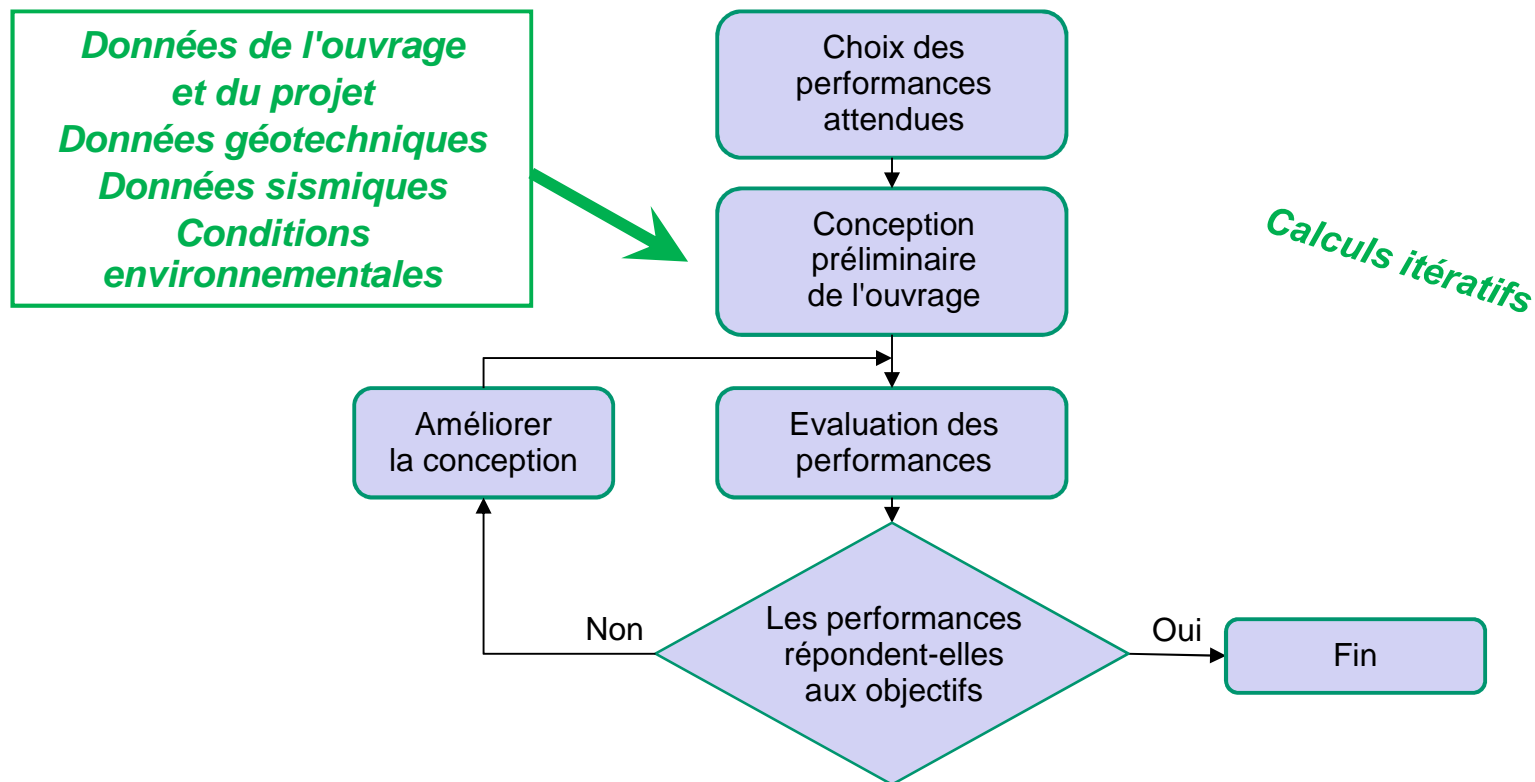
Analyse du comportement des digues sous l'effet des séismes

✓ **Evaluation** **des performances**

- Approche performantielle
- Vulnérabilité des remblais d'accès
- Approche simplifiée pour les digues
- Analyse de risque

Méthodes d'évaluation de la stabilité

Approche performantielle



D'après FEMA (2006)

Principe de la conception parasismique performantielle des ouvrages
D'après la Federal Emergency Management Agency

Une approche simplifiée pour les digues

Méthode d'évaluation de la vulnérabilité sous séisme
de digues réservoirs Etat de Californie, USA

Classification de la vulnérabilité des digues en Californie

| amplitude des déplacements | dommages significatifs | revanche restante | capacité de protection |
|-------------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------------|
| inférieure à 0,3 m | non | supérieure à 0,3 m | probablement non compromise |
| de 0,3 à 1 m | possible | supérieure à 0,3 m | possiblement compromise |
| de 1 à 3 m | probable | aucune | probablement compromise |
| illimitée | oui | aucune | compromise |

D'après Shewbridge et al. (2009)

Perspectives

✓ **Validation et intégration**

- Améliorer et valider les méthodes élémentaires
(caractérisation des sols, calcul de stabilité)
- Intégrer les méthodes empiriques
de calcul en déplacement
- Analyse en performance (déplacement / seuils)
- Implication dans les analyses de risque (scénarios)