

**Journées techniques**  
organisées avec l'appui du Sétra  
et sous l'égide de la CoTITA

---

# **PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE**

**Mardi 27 mars 2012**  
**Lundi 2 et mardi 3 avril 2012**

CETE Méditerranée, Aix-en-Provence



Ressources, territoires, habitats et logement  
Énergies et climat Développement durable  
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

**Présent  
pour  
l'avenir**

# Journées Techniques organisées avec l'appui du Sétra et sous l'égide de la CoTITA

## PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE



# Effets induits par les séismes (1/2) : La liquéfaction des sols

JF Serratrice  
CETE Méditerranée

# Une pré-définition ...

## La liquéfaction des sols saturés effondrables

La liquéfaction d'un sol saturé et lâche constitue la situation ultime de son comportement mécanique où, en présence de contraintes de cisaillement et suite à l'accumulation de pressions interstitielles, le sol s'effondre et perd toute sa résistance.

Le chargement peut être statique ou dynamique.

Tous les sols ne sont pas liquéfiables.

Les conditions de la liquéfaction font intervenir à la fois :

- la nature du sol, à dominante sableuse et effondrable,
- l'état du sol, saturé et de faible densité (sol lâche),
- une faible résistance en présence de pressions interstitielles,
- la puissance et la durée de la sollicitation sismique par rapport à la résistance du sol.

# ... parmi d'autres

## Un aspect du comportement dynamique des sols

En matière de comportement mécanique, la liquéfaction des sols se décline en termes de sensibilité et de résistance cyclique.

Dans le domaine sismique, la liquéfaction ne constitue qu'un aspect du comportement dynamique des sols, car de nombreux problèmes appellent à connaître aussi les propriétés :

- de déformabilité des sols,
- et d'amortissement,

c'est à dire :

- comment le sol se déforme,
- et comment il dissipe de l'énergie,

pendant le mouvement sismique ?

# Un peu d'histoire



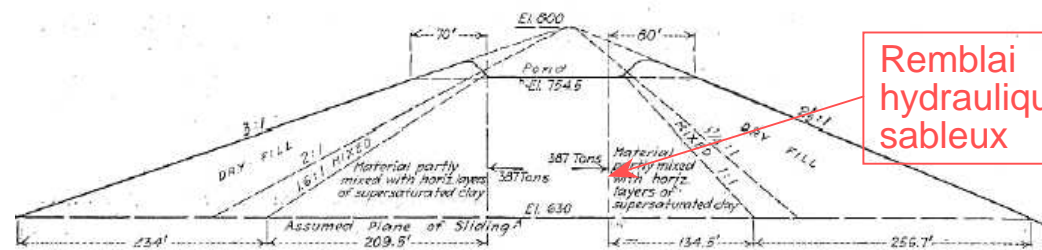
Day before slide, March 22, 1918



Day of slide, March 23, 1918.



Day after slide, March 24, 1918.



Remblai hydraulique sableux

## Barrage de Calaveras (Californie)

Remblai hydraulique non compacté

# Des illustrations ...

## Fondations superficielles

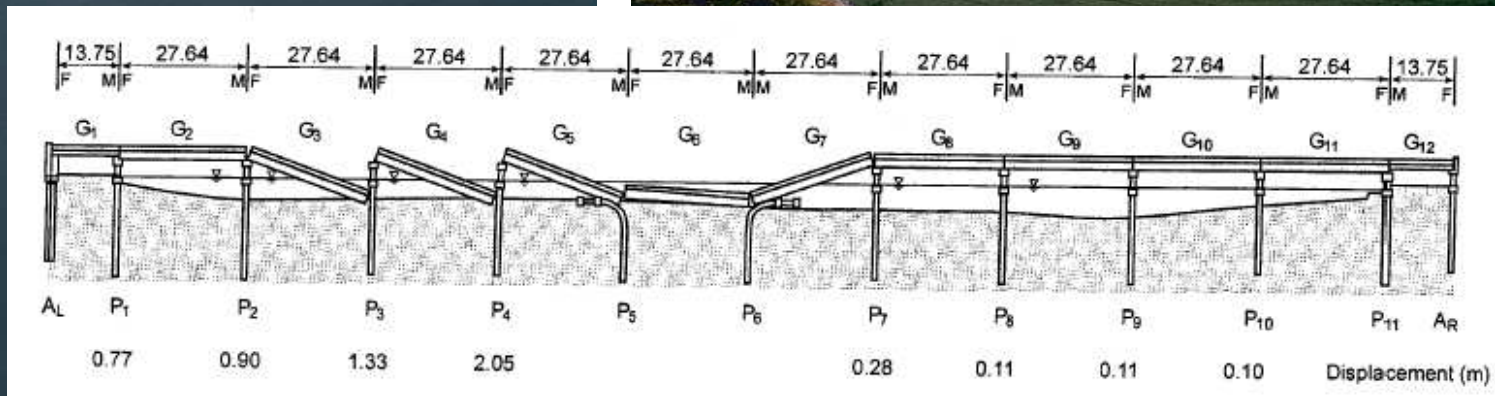
Séisme de Niigata 1964  
Quartier Kawagishi-Cho



RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

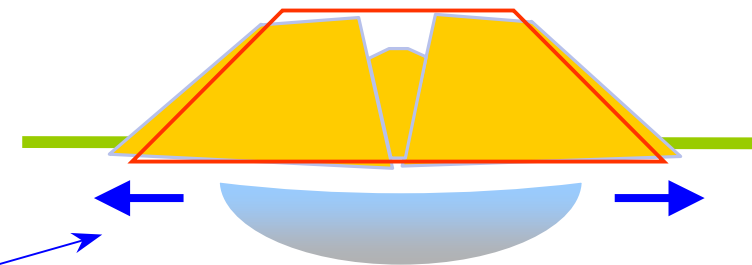
# Fondations profondes

Séisme de Niigata 1964  
Pont Showa  
sur la rivière Shinano



## Remblais routiers

Séisme d'Alaska 1964



Liquéfaction du sol de fondation

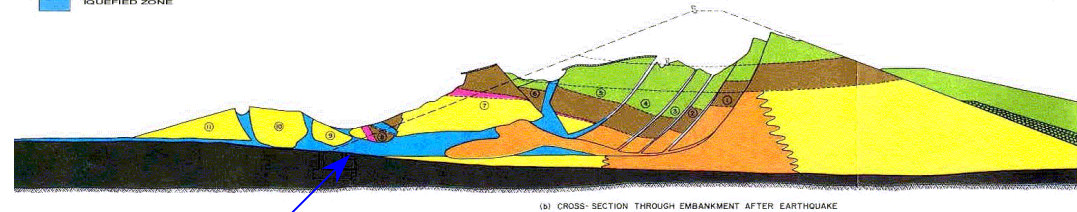
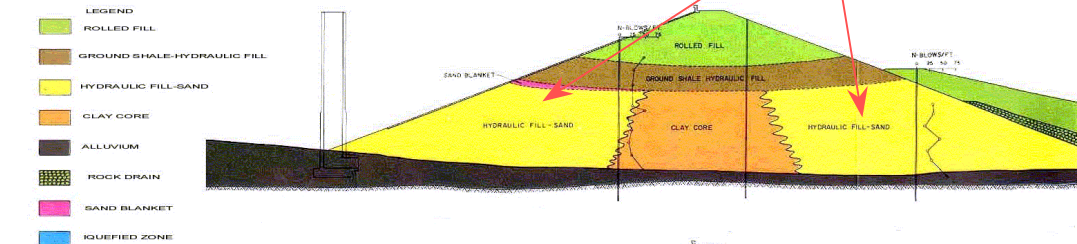




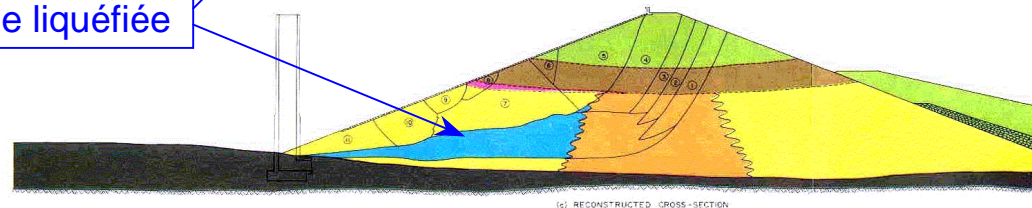
# Barrage de San Fernando Californie

Séisme de San Fernando 1971

Remblai  
hydraulique  
sableux



Zone liquéfiée



# Digues



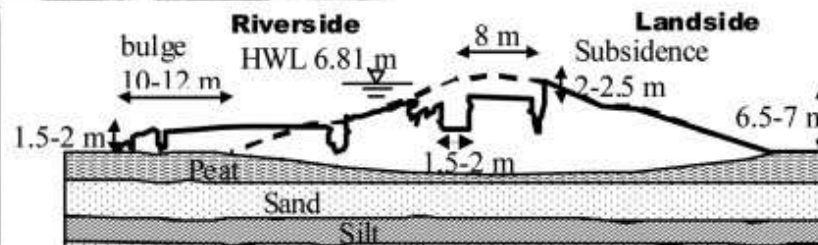
Tokachi-Oki, Japon, 2003



Bhuj, Inde, 2001

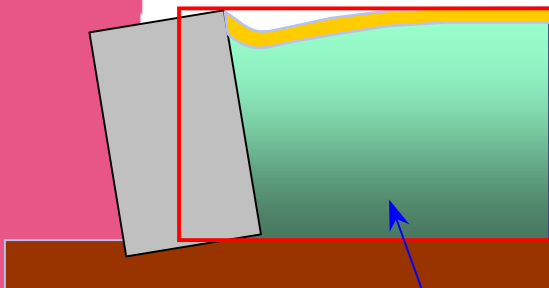


Kushiro, Japon, 1993



## Séisme de Hyogoken-Nambu (Kobe) 1995

Murs  
de quai



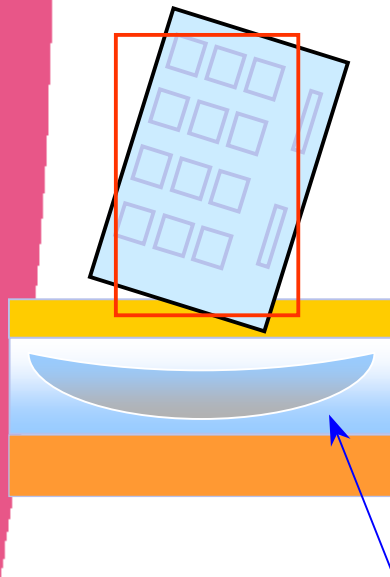
Liquéfaction  
du terre-plein



## Séisme de Cocaeli (Adapazari) 1999



Fondations  
superficielles

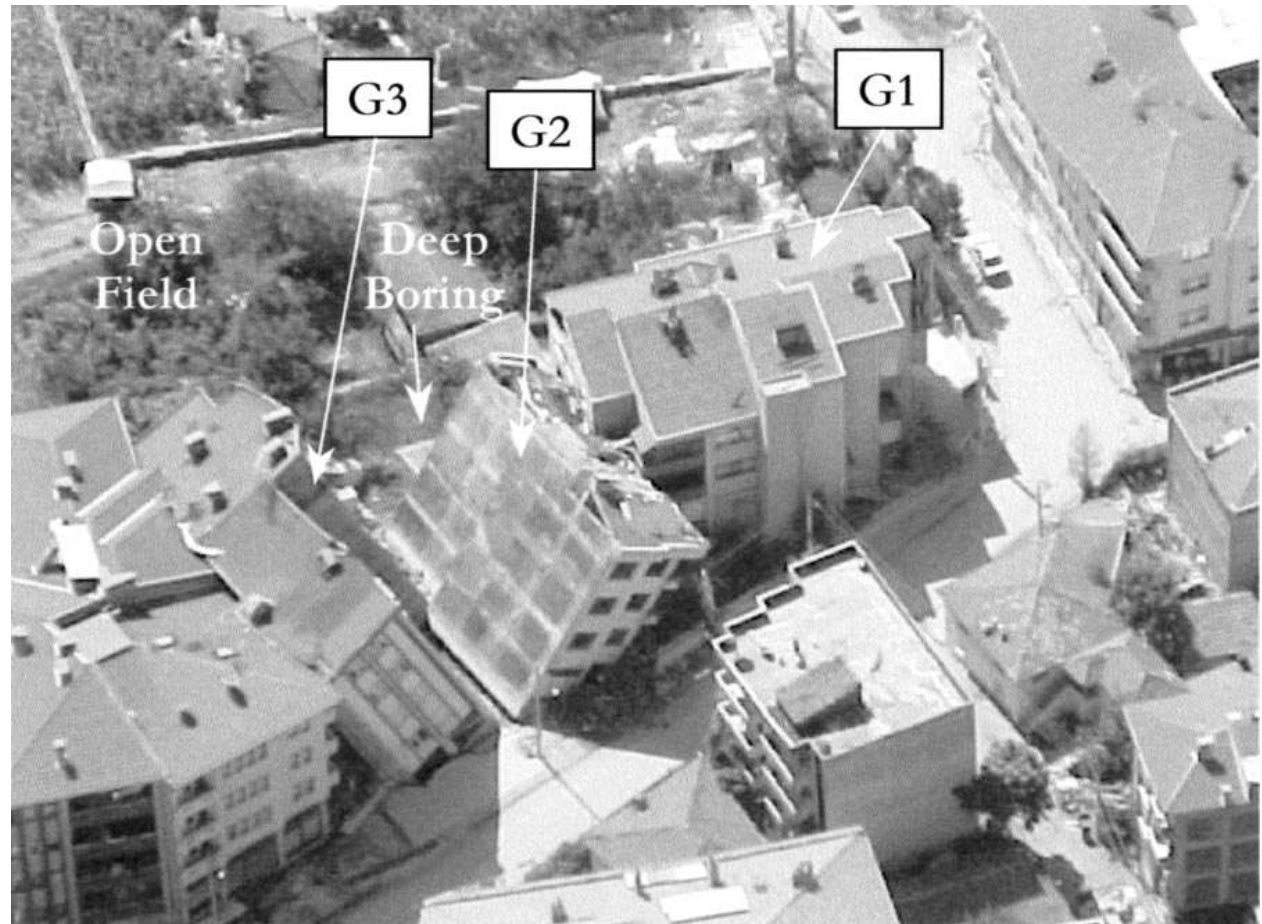
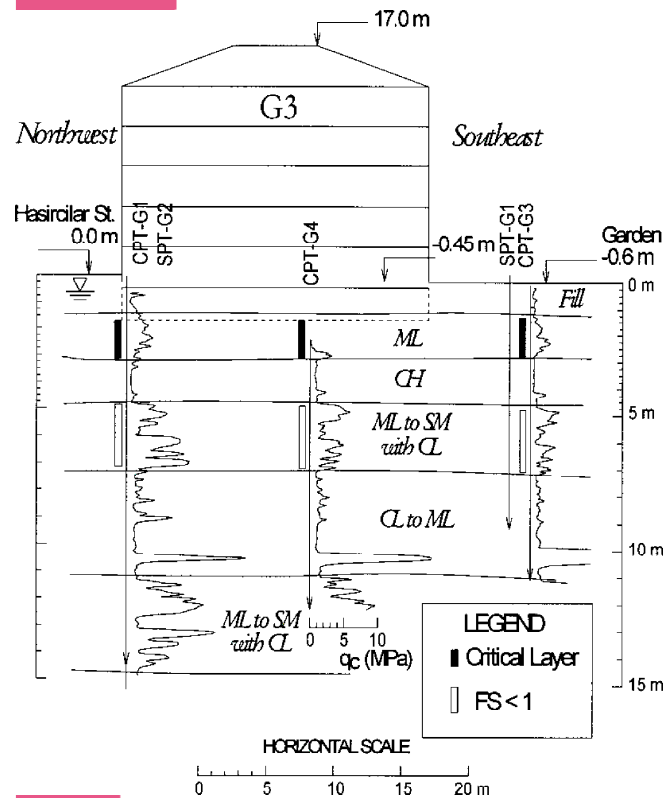


Liquéfaction du sol  
de fondation



# Des illustrations ...

Fondations superficielles



Séisme de Cœli (Adapazari) 1999



# Liquefaction and Tsunami

Evidence of Liquefaction can be seen before the tsunami struck



Natori, Miyagi Prefecture From Kyodo News Helicopter



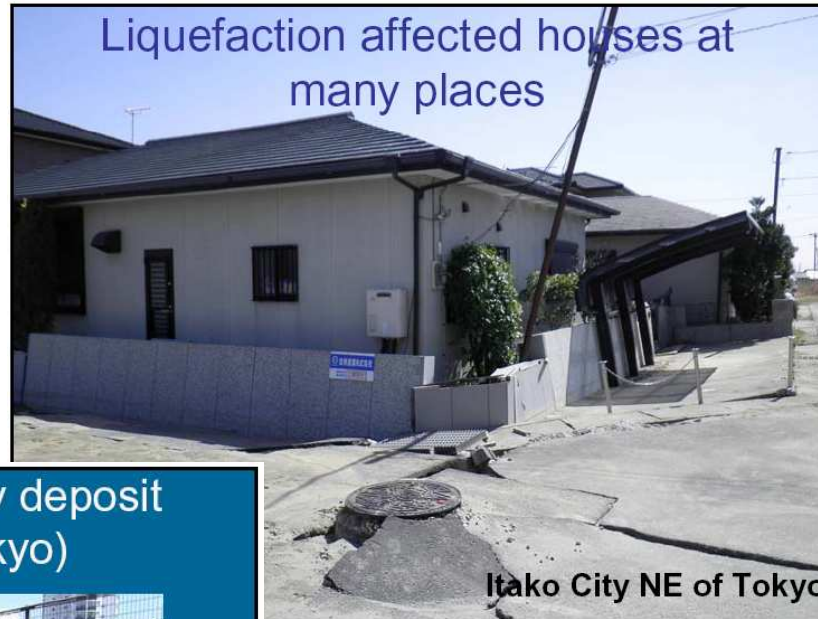
(4/19 Same place)

14ARC 2011/5/24 98 98

D'après Kazama (2011)

Séisme de Tohoku Japon 2011

## Séisme de Tohoku Japon 2011



## Fondations

Liquefaction in young sandy deposit  
(Urayasu City near Tokyo)



Differential subsidence around pile-supported building and disconnection of lifeline (Urayasu City)



## Liquefaction damage around Tokyo Bay

Crack due to earthquake and settlement  
→ liquefaction of base ground and embankment material was the major cause of damage



104



Séisme de Tohoku  
Japon 2011

D'après Towhata (2011)



## ... à la définition

### Des propriétés dynamiques des sols

#### Caractéristiques de **résistance** :

- résistance au cisaillement non drainée  $c_u$  pour les sols cohérents,
- sinon, résistance au cisaillement **cyclique** non drainé  $\tau_{cy,u}$ ,

*Dans les problèmes  
d'interactions sols-structures*

#### Caractéristiques **dynamiques** :

- module de cisaillement  $G_0$  et dégradation du module  $G(\gamma)$ ,
- coefficient d'amortissement  $D(\gamma)$ .

### De la liquéfaction des sols

La liquéfaction d'un sol saturé sans cohésion pendant le mouvement sismique désigne :

- la diminution de la rigidité du sol,
- et/ou la diminution de sa résistance au cisaillement,

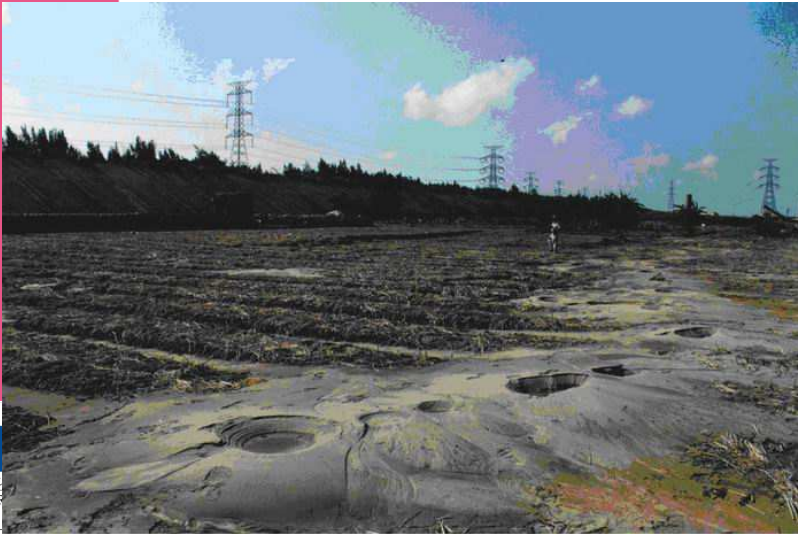
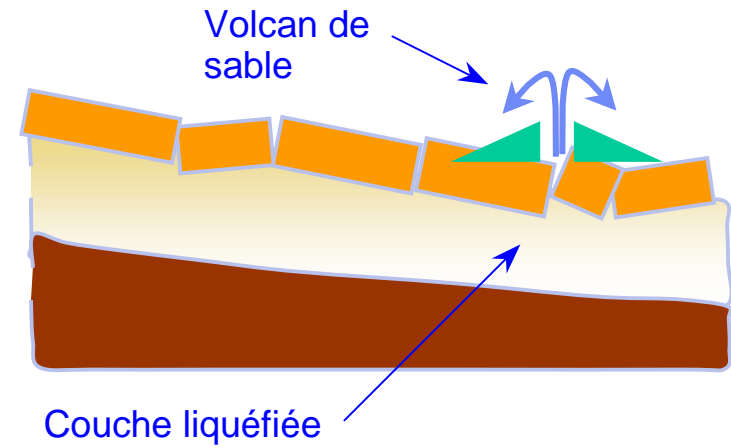
dues à l'augmentation de la pression de l'eau interstitielle et susceptibles de produire :

- des déformations permanentes significatives (tassements, glissements),
- voire un quasi-annulation des contraintes effectives (étalements).

*Mécanisme de rupture extrême  
qui advient dans les sols  
peu consistants saturés et  
pendant les mouvements forts*

*Définitions de l'Eurocode 8 NF EN 1998-5 § 3.1 § 3.2 § 4.1.4*

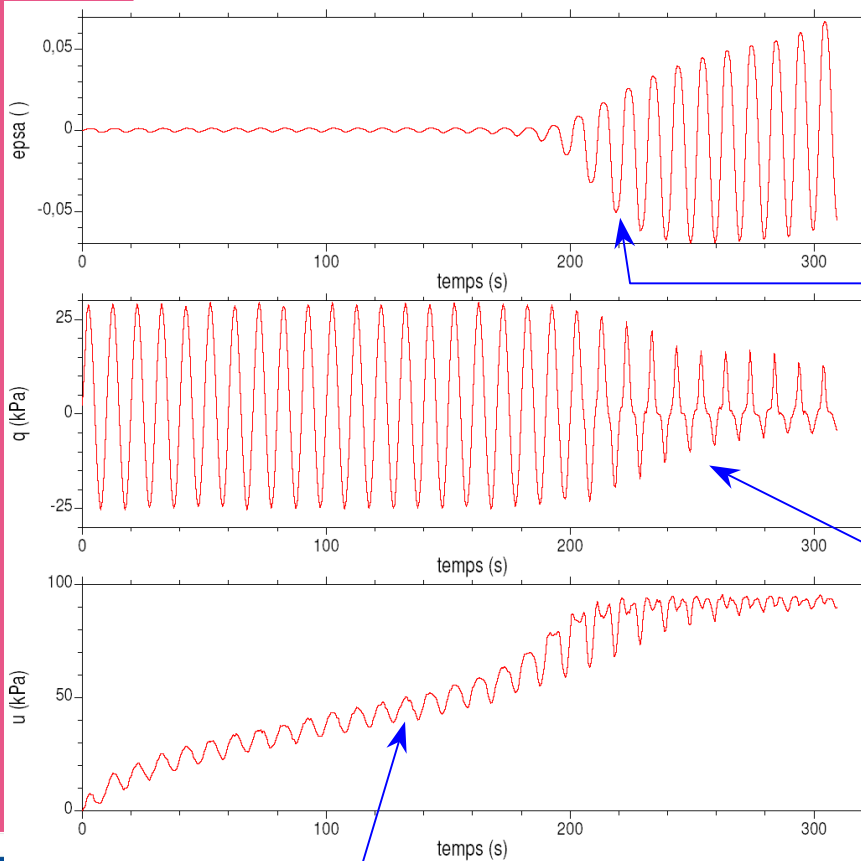
# ... et au constat



# Essais de laboratoire

## Essais cycliques

Courbes d'un essai triaxial cyclique



Presse  
triaxiale  
cyclique



Entrée en  
grandes  
déformations

Contrainte de  
cisaillement  
cyclique

Accumulation de la pression  
interstitielle au cours des cycles

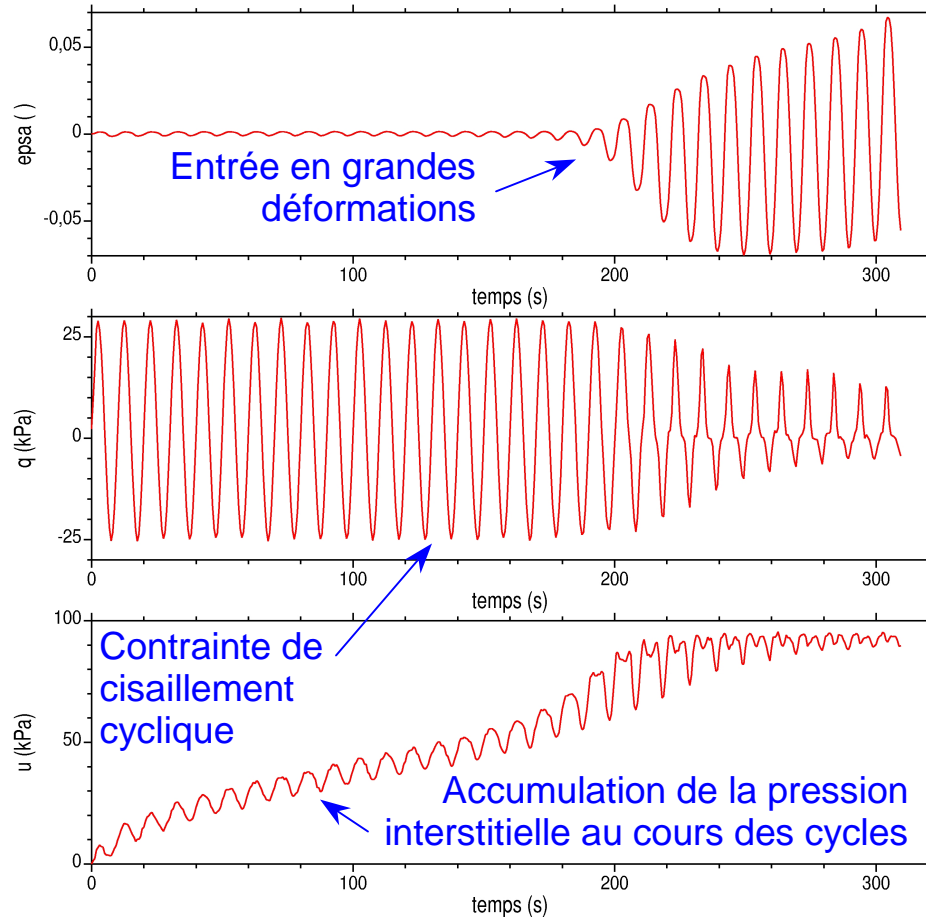
Éprouvettes  
d'essais



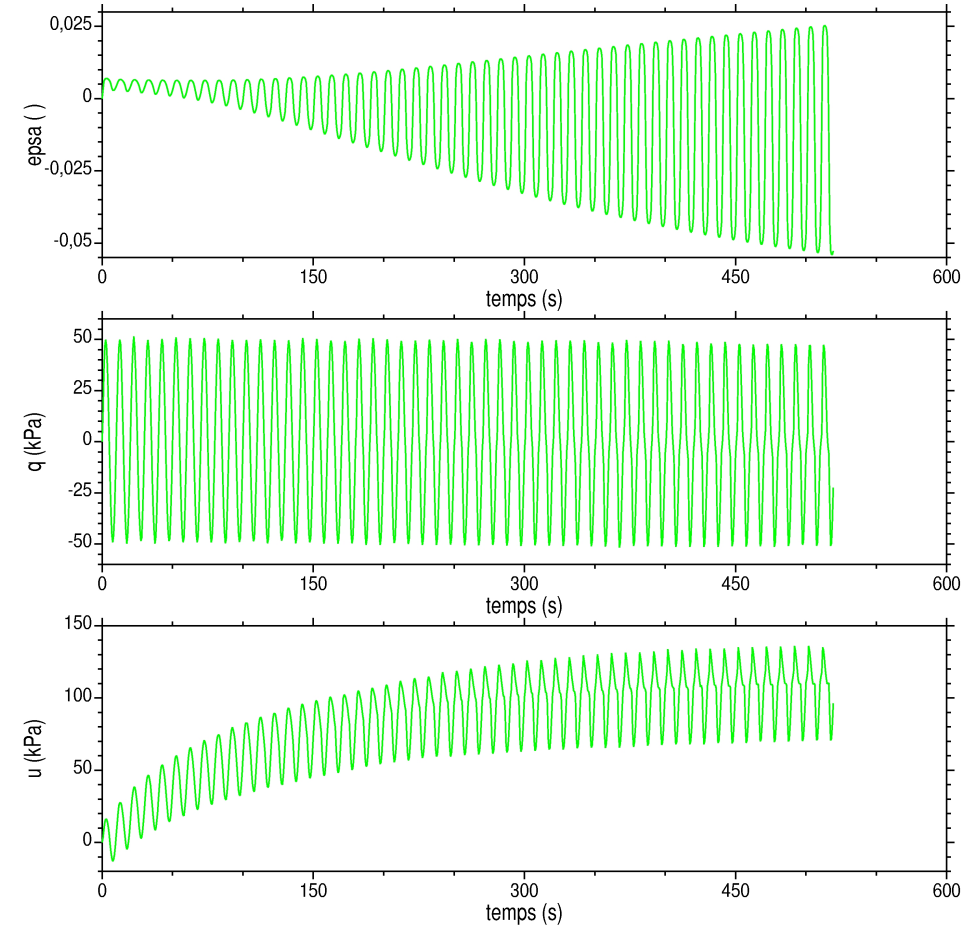
# Essais de laboratoire

## Essais cycliques

### Sable lâche



### Argile molle

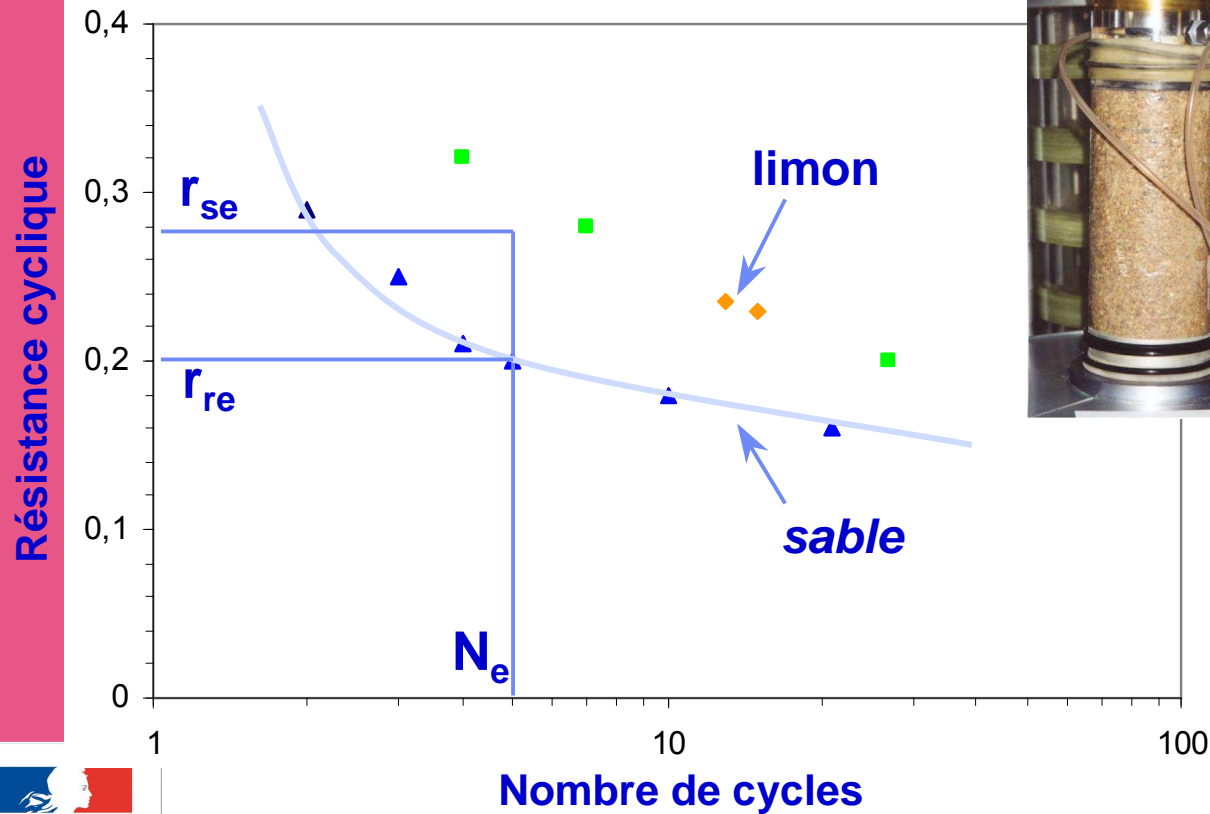


Courbes d'essais triaxiaux cycliques

# Essais de laboratoire

## Essais cycliques

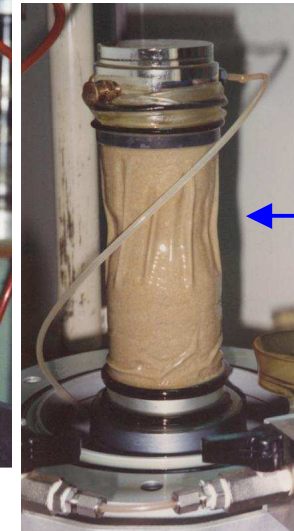
Résistance cyclique en fonction du nombre de cycles



Avant essai



Après essai



Rupture en extension

Facteur de sécurité  $F_s$

$$F_s = r_{re} / r_{se}$$

$F_s < 1$  liquéfaction quasi certaine  
 $F_s < 1,33$  liquéfaction probable

$N_e$  nombre de cycles équivalents

# Sondages au piézocône

Essais  
in-situ

Pointe d'un piézocône



Reconnaitances en mer  
Aéroport de Nice – Côte d'Azur

## Pénétrromètre CPTu

Reconnaitances à terre  
Viaduc de Caronte



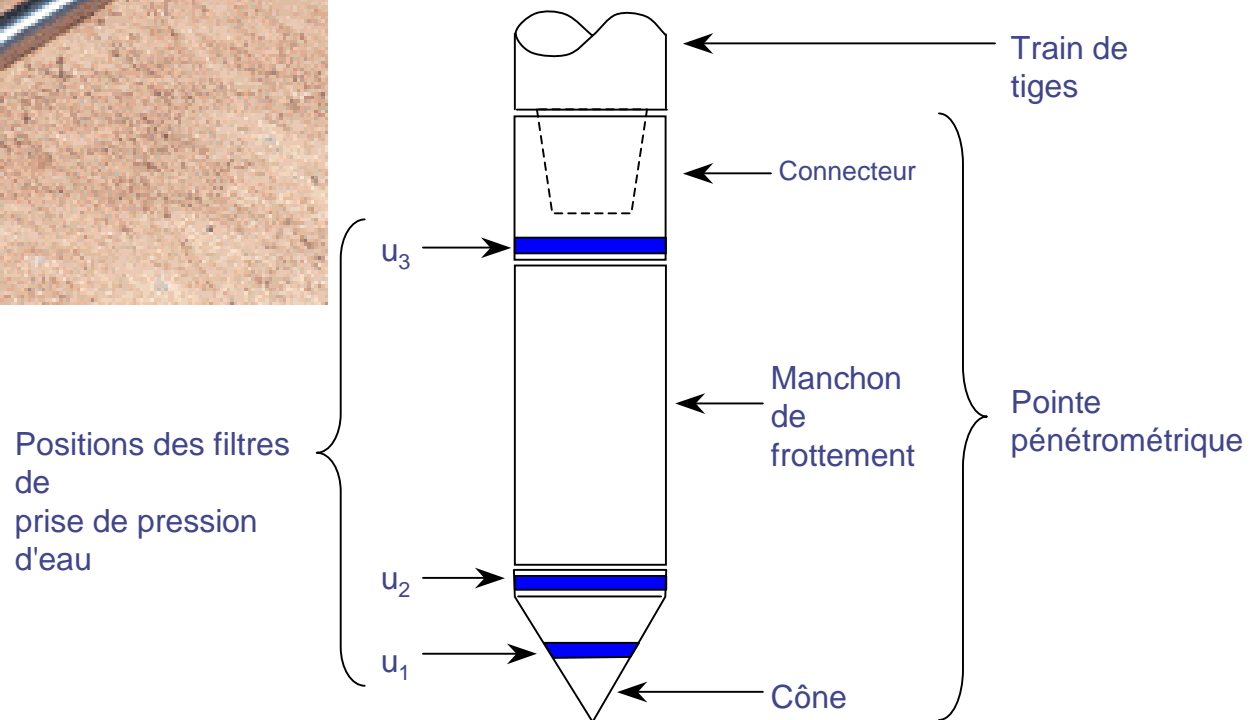
# Sondages au piézocône

Essais  
in-situ



Pointe d'un piézocône

## Pénétromètre CPTu

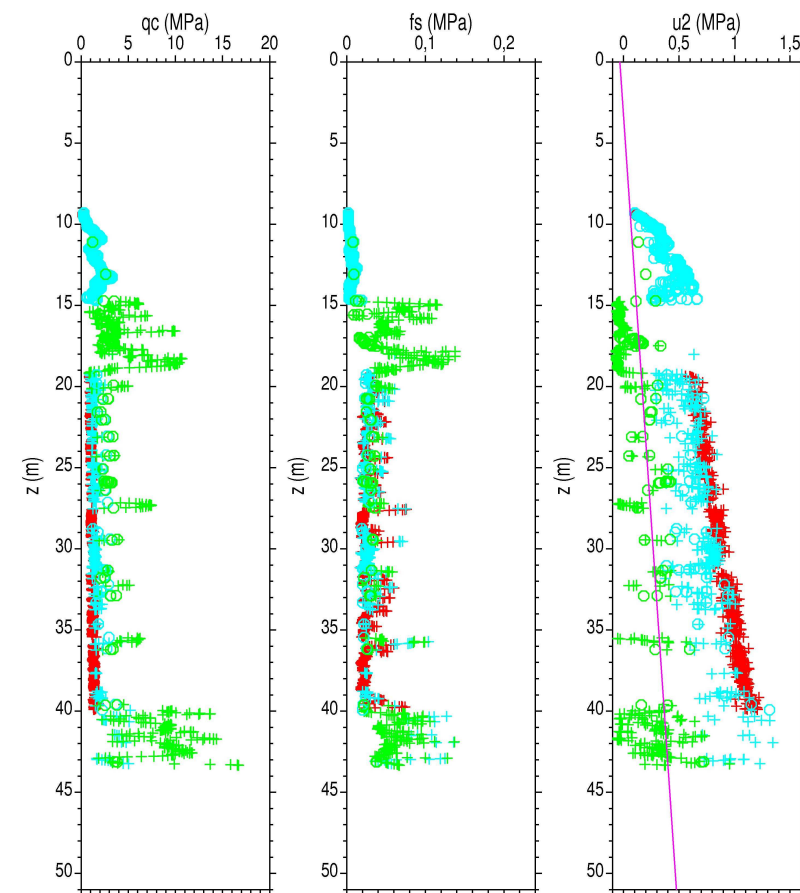
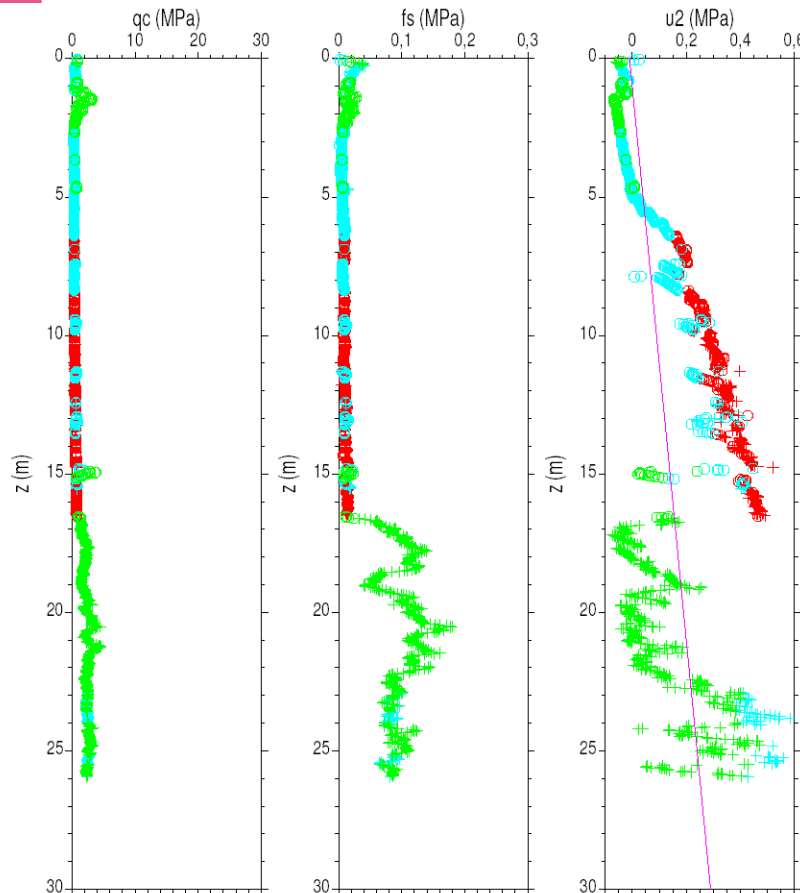


# Sondages au piézocône

Essais  
in-situ

Site en Turquie

Site en France



+ limons argileux  
+ limons sableux  
+ sables limoneux

○ sols sensibles  
○ sols sensibles  
○ sols sensibles

+ limons argileux  
+ limons sableux  
+ sables limoneux

○ sols sensibles  
○ sols sensibles  
○ sols sensibles

Sables

Limons

Argiles



# Applications opérationnelles

## Les sites et les constructions

La liquéfaction concerne surtout des sites en milieu côtier et des sols sableux qui constituent des dépôts récents.

Elle concerne aussi tous les types de constructions :

- fondations
  - habitations,
  - ouvrages d'art,
  - soutènements,
  - barrages,
  - remblais,
  - digues,
  - quais,
  
- ouvrages en terre
  
  
- etc.

# Applications opérationnelles



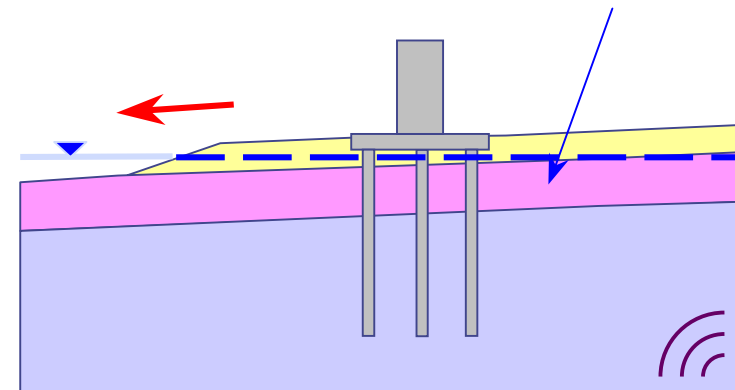
## A55 Viaduc de Caronte

Zone de sismicité modérée (3)

$$a_{gr} = 1,1 \text{ m/s}^2$$

$$a_g = 2,1 \text{ m/s}^2$$

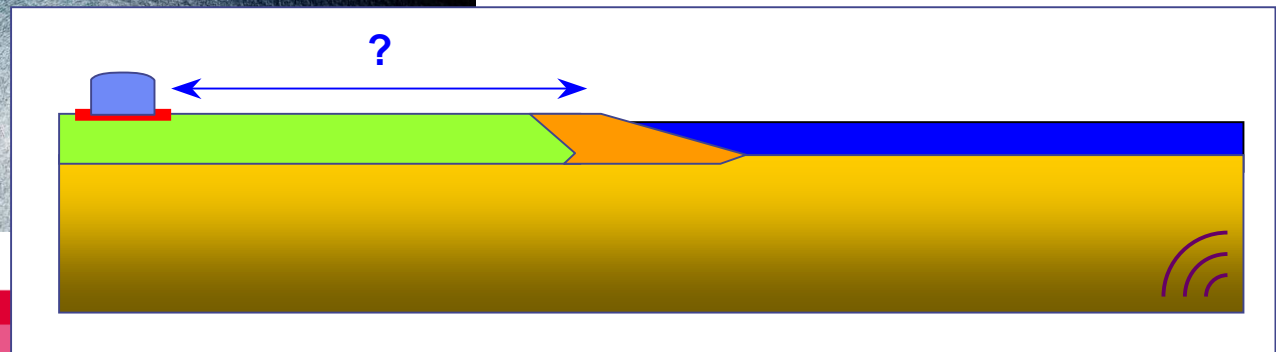
Liquéfaction de la couche  
Déstabilisation de la berge  
Efforts parasites sur la fondation



# Applications opérationnelles

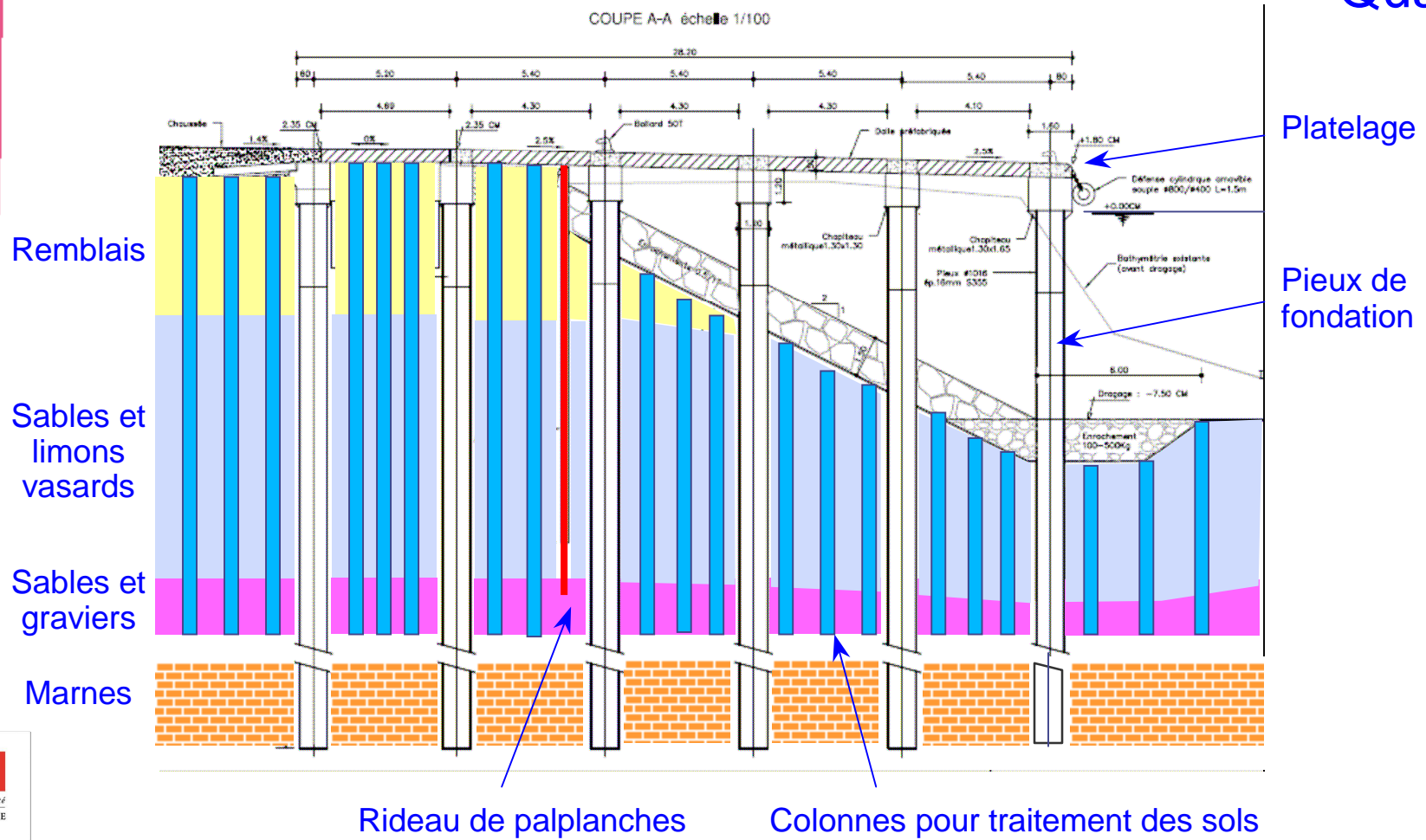


Zone Sud – Est  
de l'aéroport de  
Nice – Côte d'Azur



# Applications opérationnelles

## Quai

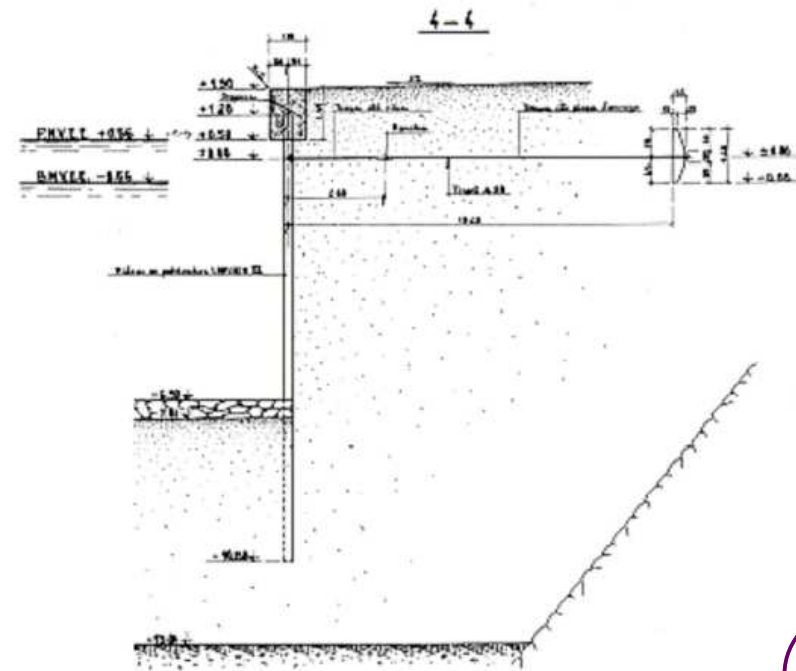


# Applications opérationnelles

## Quai des Avisos (Martinique)



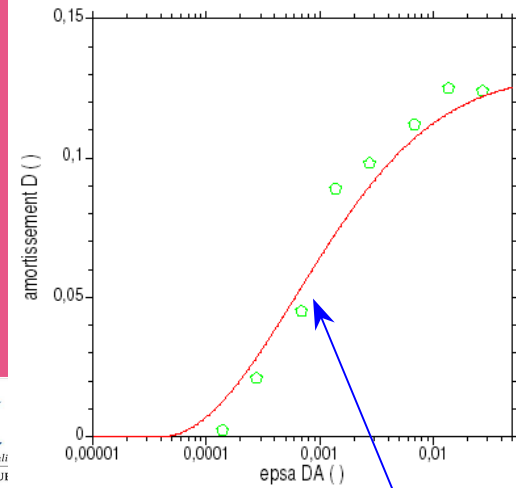
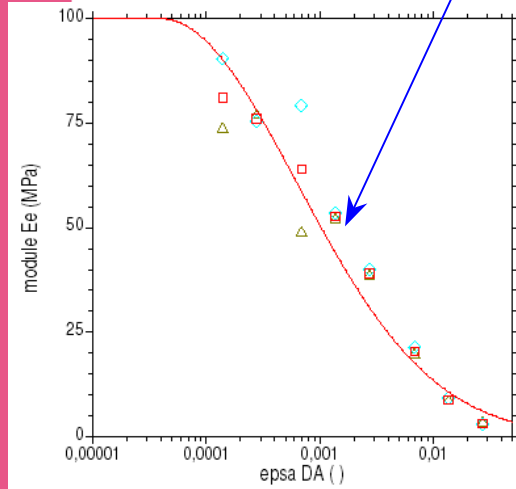
Zone de  
sismicité  
forte (5)  
 $a_{gr} = 3,0 \text{ m/s}^2$   
 $a_g = 4,2 \text{ m/s}^2$



# Applications opérationnelles

Dégradation du module d'Young

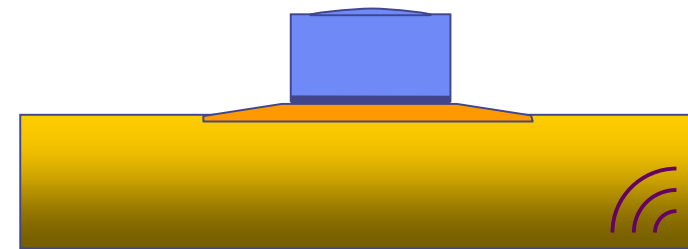
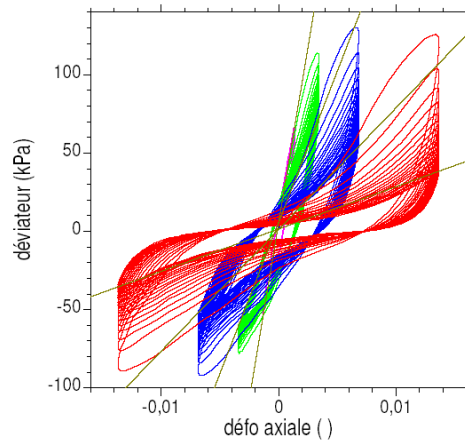
Sites industriels



Interaction sol-structure

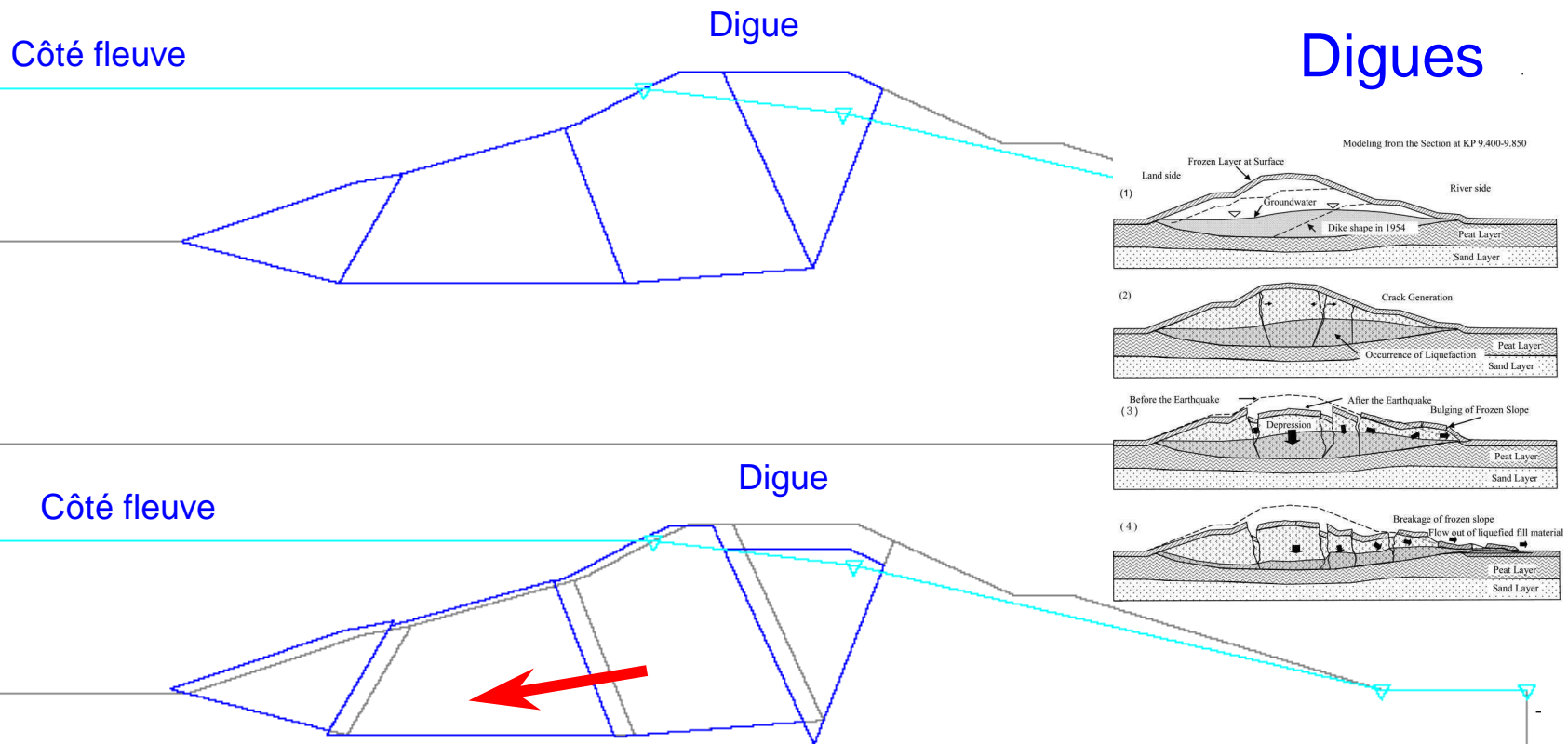


Terminal méthanier



Accroissement de l'amortissement

# Des méthodes de calcul ...



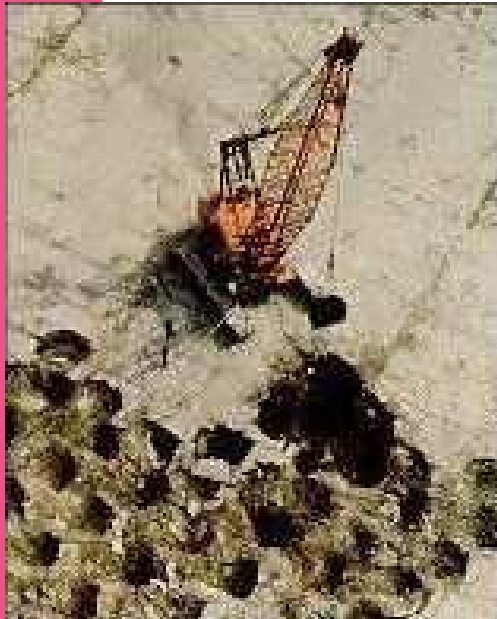
## Digues

*Mécanisme de rupture sous l'action de l'accélération sismique*

Profil de calcul d'une digue de la rivière Kushiro au Japon (Hokkaido, 1993).  
En bas, cinématique de rupture pour un déplacement de 1 m du bloc aval.

# Renforcements des sols ...

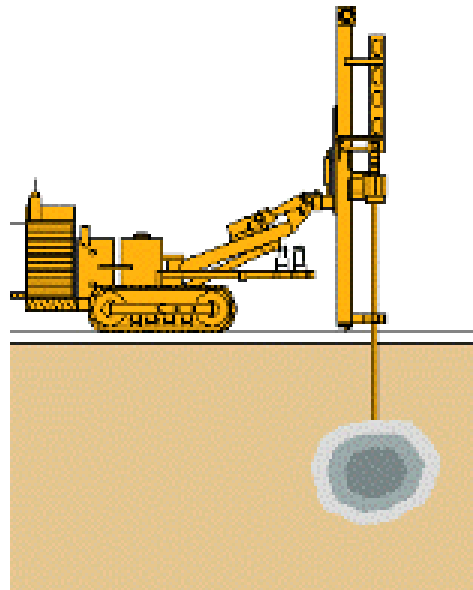
Compactage



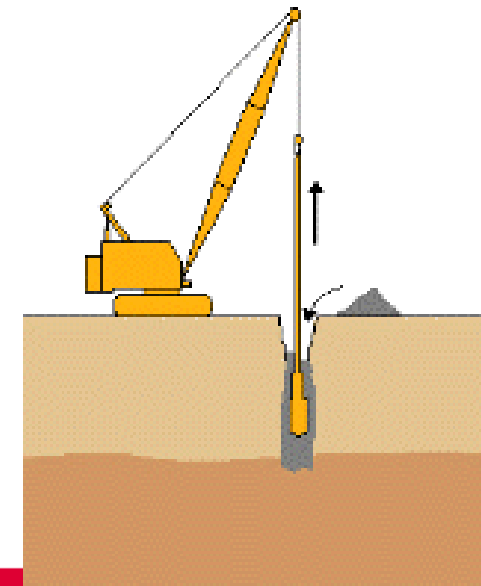
Compactage dynamique  
Injection  
Jet grouting  
Colonne ballastées  
Vibro-flotation  
Drainages  
Etc.

- densifier le sol
- augmenter sa résistance
- le confiner
- le drainer

Traitement

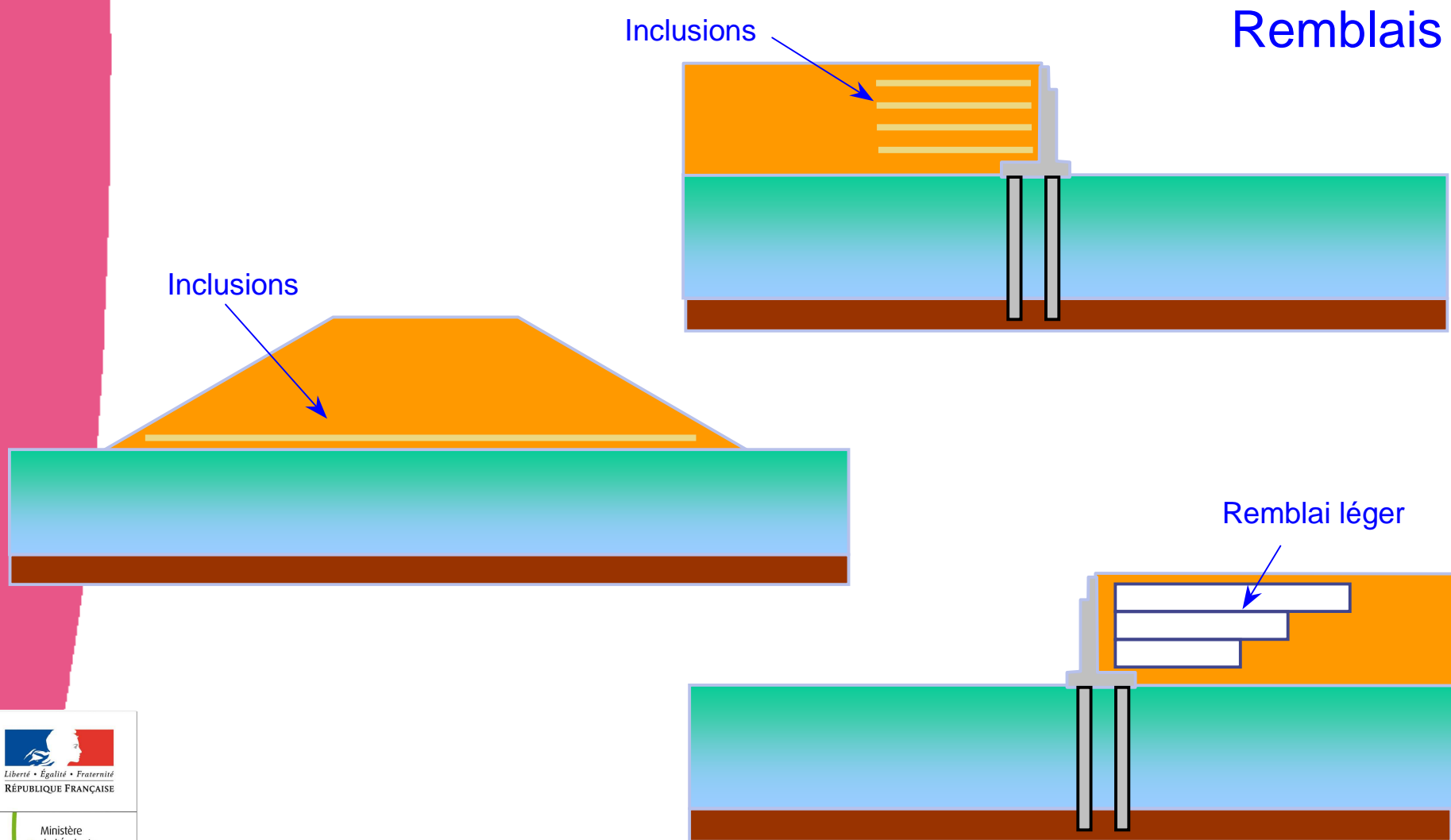


Renforcement

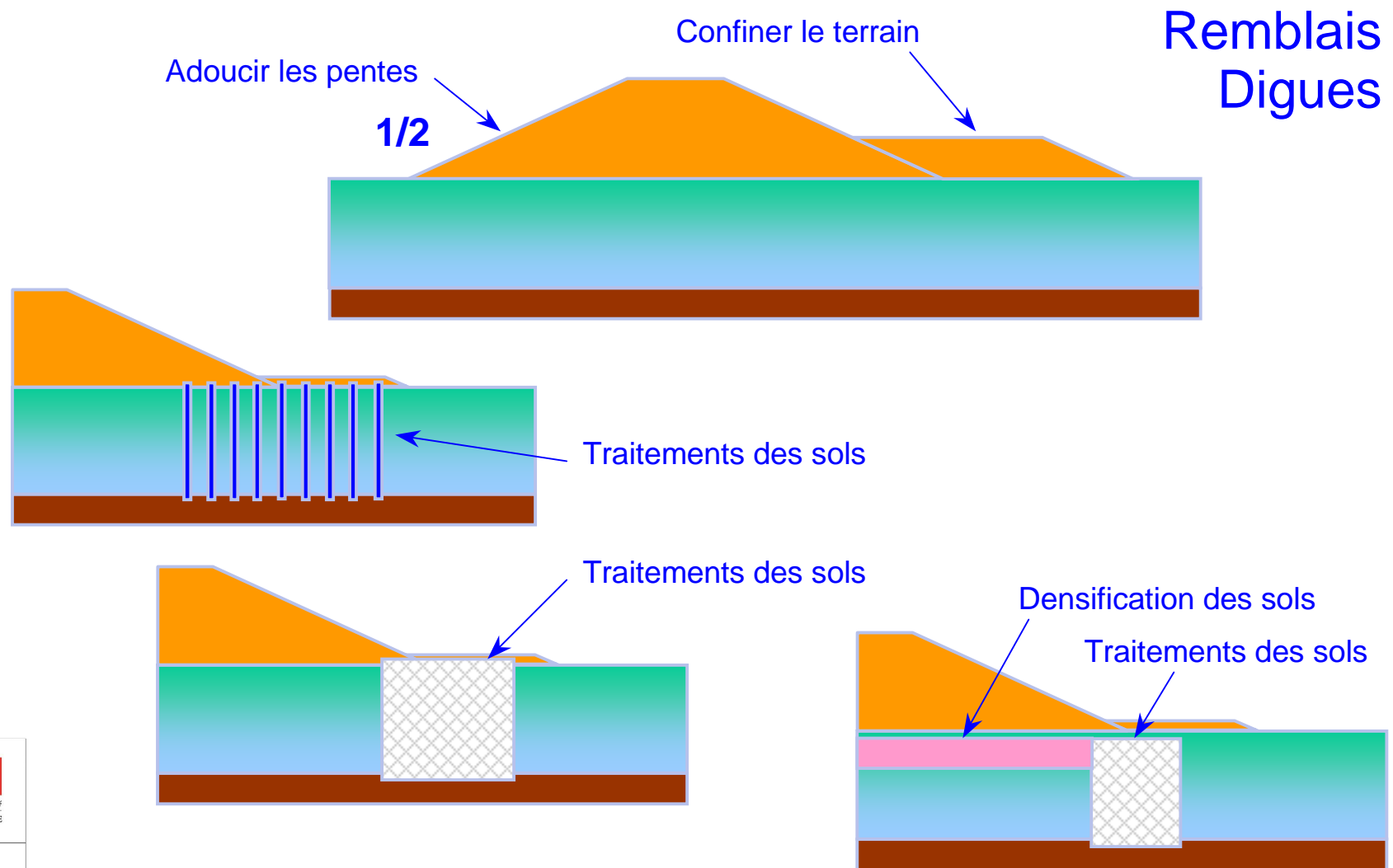




# Renforcements des sols ...

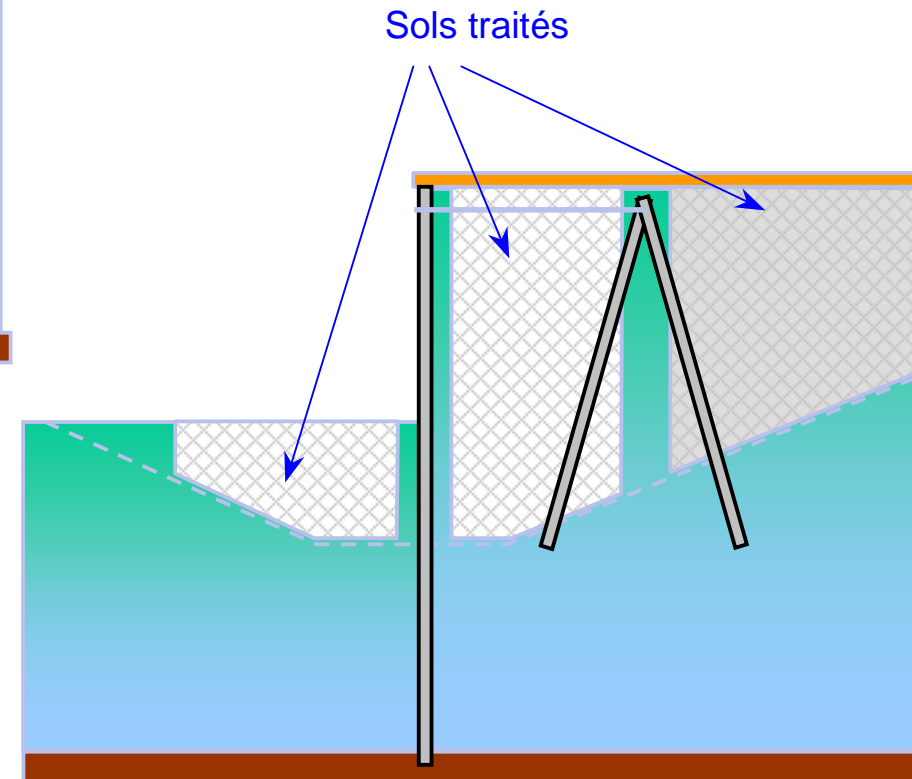
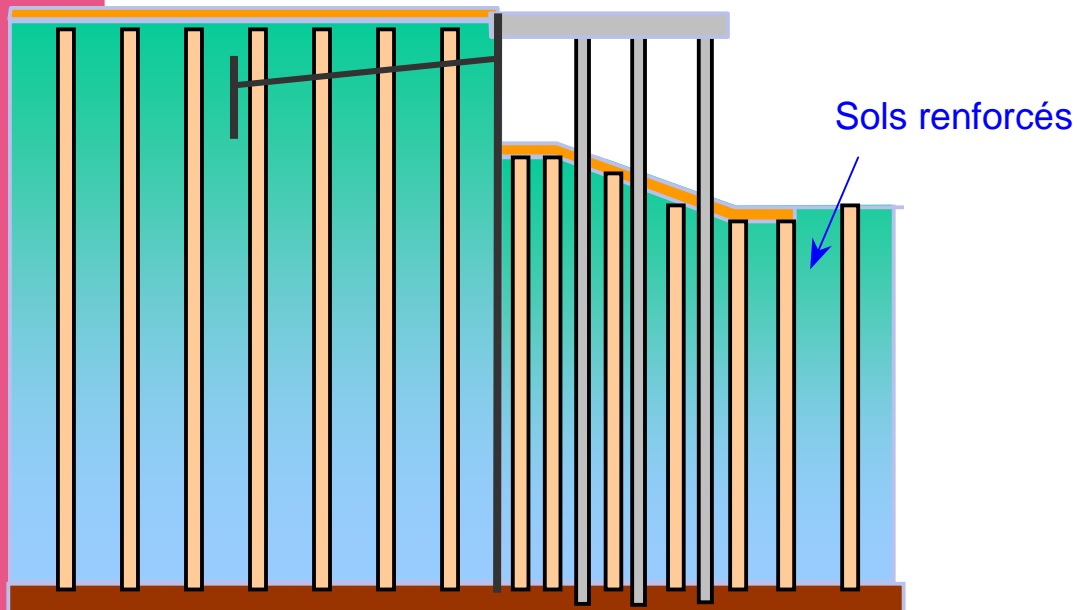


# Renforcements des sols ...



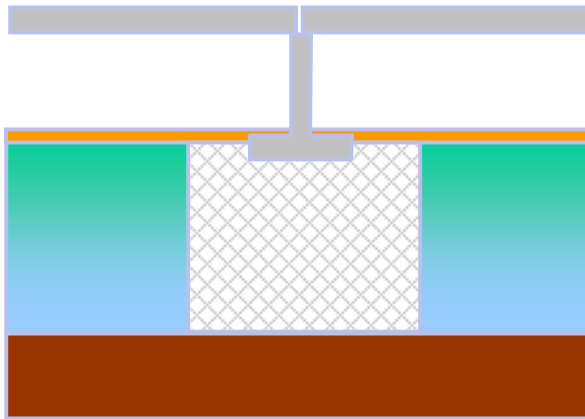
# Renforcements des sols ...

Quais



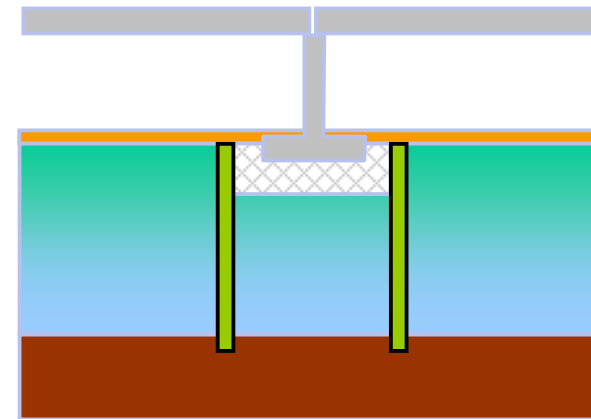
# Renforcements des sols ...

Traitement du sol

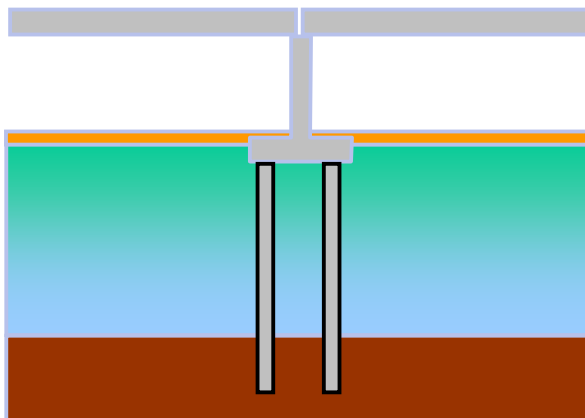


Fondations

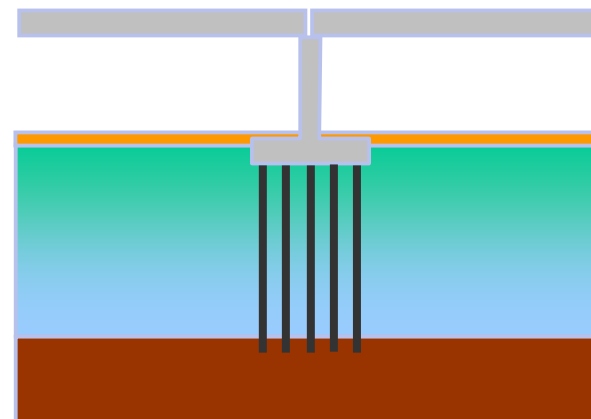
Parois traités



Pieux renforcés



Massif de pieux



# Conclusion

La liquéfaction est un mécanisme de rupture extrême qui advient dans des sols peu consistants saturés et pendant des mouvements sismiques forts.

Nécessité de croiser les données provenant de différents types d'essais (laboratoire, CPTu,  $V_s$  et autres).

Dans l'avenir, il conviendra d'améliorer la caractérisation des sols intermédiaires « sables-argiles ».

Adapter la conception de l'ouvrage et bannir certaines techniques de construction

Recourir à des méthodes de traitement et/ou de renforcement des sols.