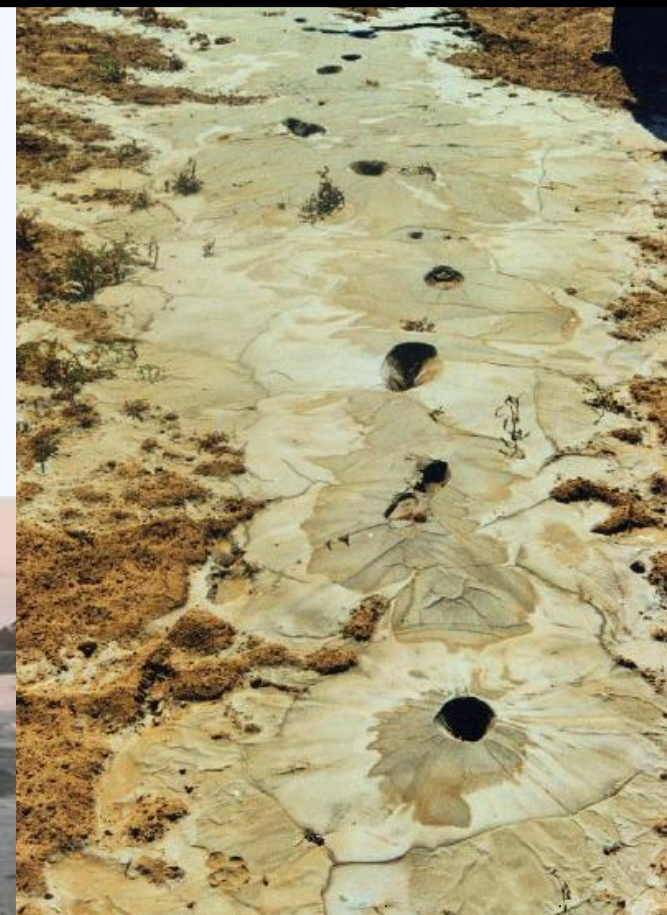


## Chapitre Cinq

# Liquéfaction des sols

- ❑ *Introduction*
- ❑ *Facteurs gouvernant la liquéfaction des sols*
- ❑ *Méthode d'analyse de la liquéfaction des sols*
- ❑ *Evaluation du risque de liquéfaction des sols*
- ❑ *Traitement des sols liquéfiables*
- ❑ *Exercices*



## *INTRODUCTION*

### □ Introduction

- **Définition de la liquéfaction des sols**

C'est la perte de résistance au cisaillement du sol saturé sous chargement cyclique  
 ⇒ Résistance à la liquéfaction

- **Concept fondamental de la liquéfaction des sols**

$$\tau = \sigma' \tan(\varphi') \quad | \quad \sigma' = \sigma - u \quad (\text{Principe de Terzaghi})$$

Lorsque  $\tau = 0$ , on dit qu'il y a liquéfaction.

Ce concept a été introduit par Casagrande (1930) :  $\Rightarrow \sigma' = 0 \Rightarrow \sigma = u$

- **Conditions de la liquéfaction des sols**

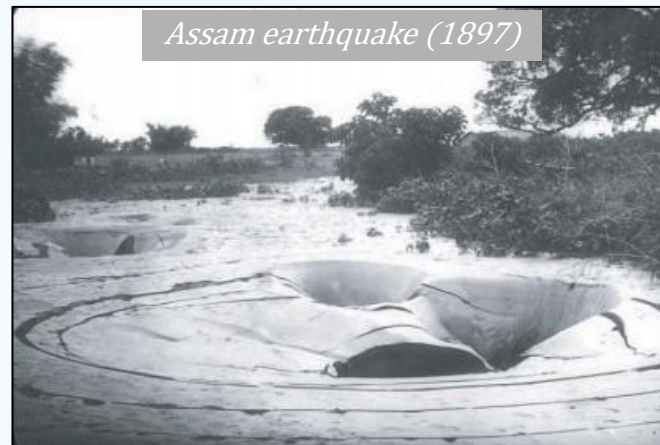
Pour qu'il y ait liquéfaction, il faut avoir simultanément les trois situations possibles suivantes :

- *Sol fin (Sables, Sols sableux, Lœss\*, Sols lœssiques)*
- *Présence d'eau (Sable saturé, ex. nappe)*
- *Chargement cyclique (Séisme, ...)*

\* Dépôt sédimentaire éolien, formé de limon fin, calcaire et jaunâtre accumulé principalement lors des périodes glaciaires (Aperçu IA).

### □ Introduction

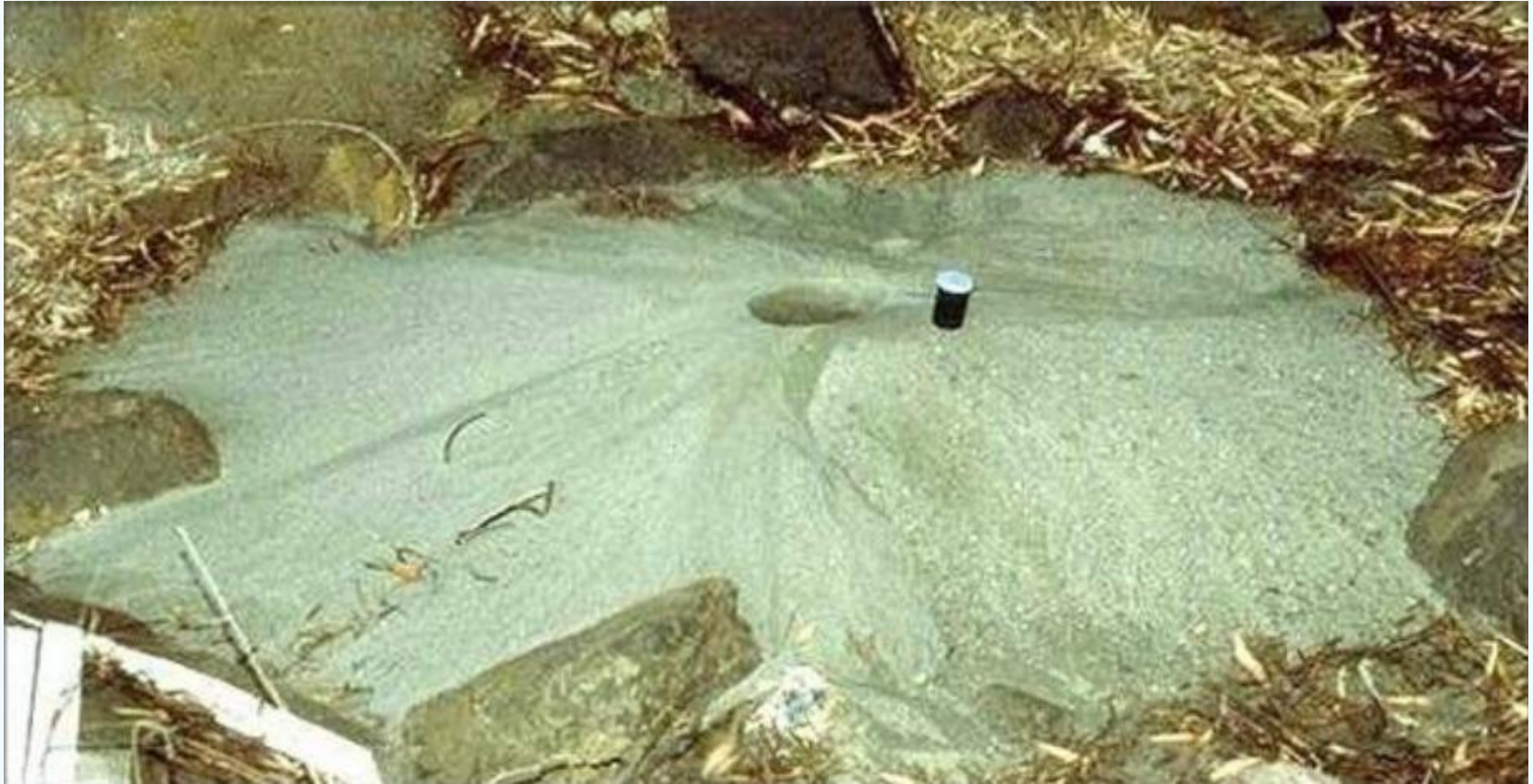
- **Quelques illustrations : Formation de cratères**



**1<sup>ères</sup> images traitant de la liquéfaction des sols (University of California, Berkeley, USA)**

### □ Introduction

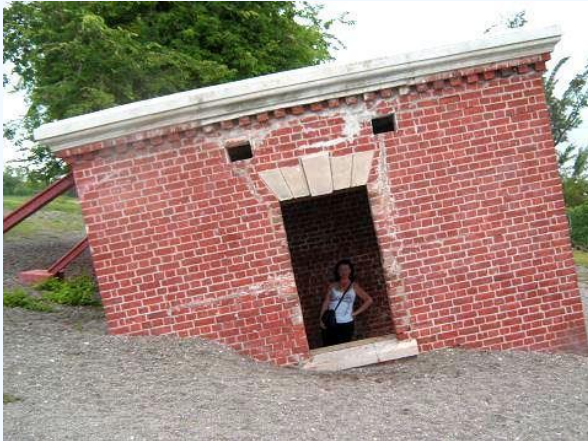
- **Quelques illustrations : Formation de cratères**



***Cratère dû à la liquéfaction des sols à Loma Prieta, Californie, USA  
(Loma Prieta Earthquake, California, USA, 17/10/1989, Mw=7.1)***

### □ Introduction

- **Quelques illustrations :** *Enfouissement et basculement des ouvrages*



***Effet de la liquéfaction des sols sur la stabilité de la maison Giddy, Port Royal, Jamaïque  
(Kingston Earthquake, Port Royal, Jamaica, 14/01/1907, Mw=6.5)***

### Introduction

- Quelques illustrations : Enfouissement et basculement des ouvrages**



| Séisme de 1964 à Niigata    |                                                             |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Date                        | 16 juin 1964 à 13 h 1 (UTC+9)<br>16 juin 1964 à 4 h 1 (UTC) |
| Magnitude                   | 7.5                                                         |
| Épicentre                   | 38° 22' nord, 139° 13' est                                  |
| Profondeur                  | 57 km                                                       |
| Hauteur maximale du tsunami | plus de 4 m                                                 |
| Régions affectées           | Préfecture de Niigata (Japon)                               |
| Victimes                    | 36 morts ou disparus<br>385 blessés                         |

Géolocalisation sur la carte : Japon

modifier

***Effet de la liquéfaction des sols sur la stabilité des immeubles partiellement enfouis et basculés à Niigata, Japon (Niigata Earthquake, Japan, 16/06/1964, Mw=7.5)***

### □ Introduction

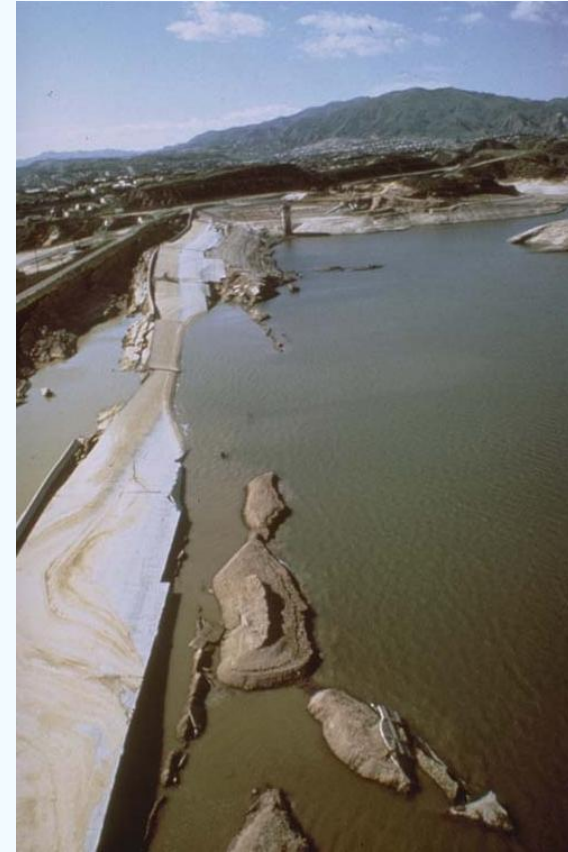
- **Quelques illustrations : Rupture des fondations d'ouvrages d'art**



***Effet de la liquéfaction des sols sur la stabilité du pont Showa sur la rivière Shinano  
au Japon (Niigata Earthquake, Japan, 16/06/1964, Mw=7.5)***

### □ Introduction

- **Quelques illustrations : Rupture des ouvrages en terre**



***Effet de la liquéfaction des sols sur la stabilité du réservoir inférieur du barrage San Fernando, Los Angeles, Californie (San Fernando Earthquake, California, USA, 09/02/1971, Mw =6.5)***

### □ Introduction

- **Quelques illustrations : Rupture des corps de chaussées**



***Effet de la liquéfaction des sols sur les chaussées de Christchurch en Nouvelle Zélande  
(Christchurch Earthquake, New Zealand, 22/02/2011, Mw =6.6)***

### □ Introduction

- **Quelques illustrations : Rupture des corps de chaussées**



***Effet de la liquéfaction des sols sur les chaussées de Christchurch en Nouvelle Zélande  
(Christchurch Earthquake, New Zealand, 22/02/2011, Mw =6.6)***

***FACTEURS GOUVERNANT LA LIQUÉFACTION DES SOLS***

### ❑ Facteurs gouvernant la liquéfaction des sols

L'expérience (essais in-situ et en laboratoire) montre que la liquéfaction des sols est gouvernée par les facteurs suivants :

- **Intensité du séisme et sa durée**

- Le potentiel de liquéfaction croît avec l'intensité du séisme et sa durée.
- La liquéfaction se produit pour des séismes d'accélération sismique maximale  $a_{max} \geq 0.1g$  et  $M_L \geq 5$ .

- **Présence de nappe phréatique**

- La liquéfaction se produit sous le niveau de la nappe phréatique.
- Les sols non saturés ne sont pas liquéfiables.

- **Conditions de drainage**

Si la pression interstitielle se dissipe facilement et rapidement, il n'y aura pas de liquéfaction.

- **Contrainte de confinement**

La liquéfaction diminue avec la contrainte de confinement.

### ❑ Facteurs gouvernant la liquéfaction des sols

- **Type de sol**

- Les sols cohérents ( $w_L \geq 35$  et  $w \geq 0.9w_L$ ) ne sont pas liquéfiables.
- Les sols pulvérulents sont potentiellement liquéfiables.

- **Formes des particules**

Les grains arrondis tendent à se densifier plus que les grains anguleux. Les grains arrondis sont donc moins susceptibles à la liquéfaction que les grains anguleux.

- **Granulométrie**

Les sols non plastiques uniformes tendent à former des arrangements instables et plus susceptibles de se liquéfier (ex. sable homogène).

- **Densité relative initiale**

Les sables peu denses sont susceptibles de se liquéfier.

- **Histoire de formation du sol**

La résistance à la liquéfaction augmente avec le rapport de surconsolidation du sol. Plus celui-ci est élevé, moins le sol est liquéfiable.

- **Age et cimentation**

***MÉTHODE D'ANALYSE DE LA LIQUÉFACTION DES SOLS***

### ❑ Méthode d'analyse de la liquéfaction des sols

- **Essai triaxial cyclique**

Presse triaxiale cyclique – Vue d'ensemble



Cellule triaxiale



Eprouvette de sol

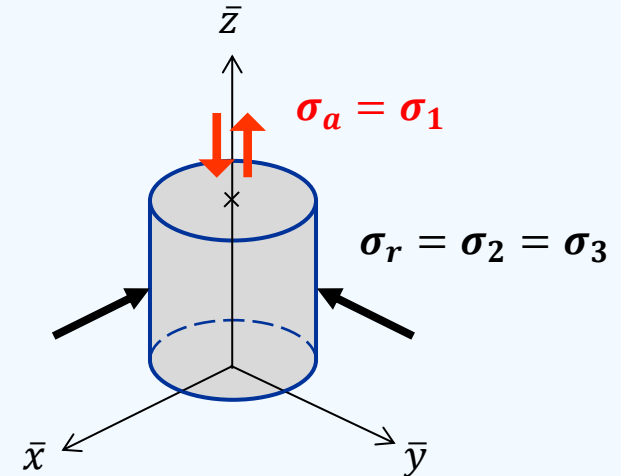
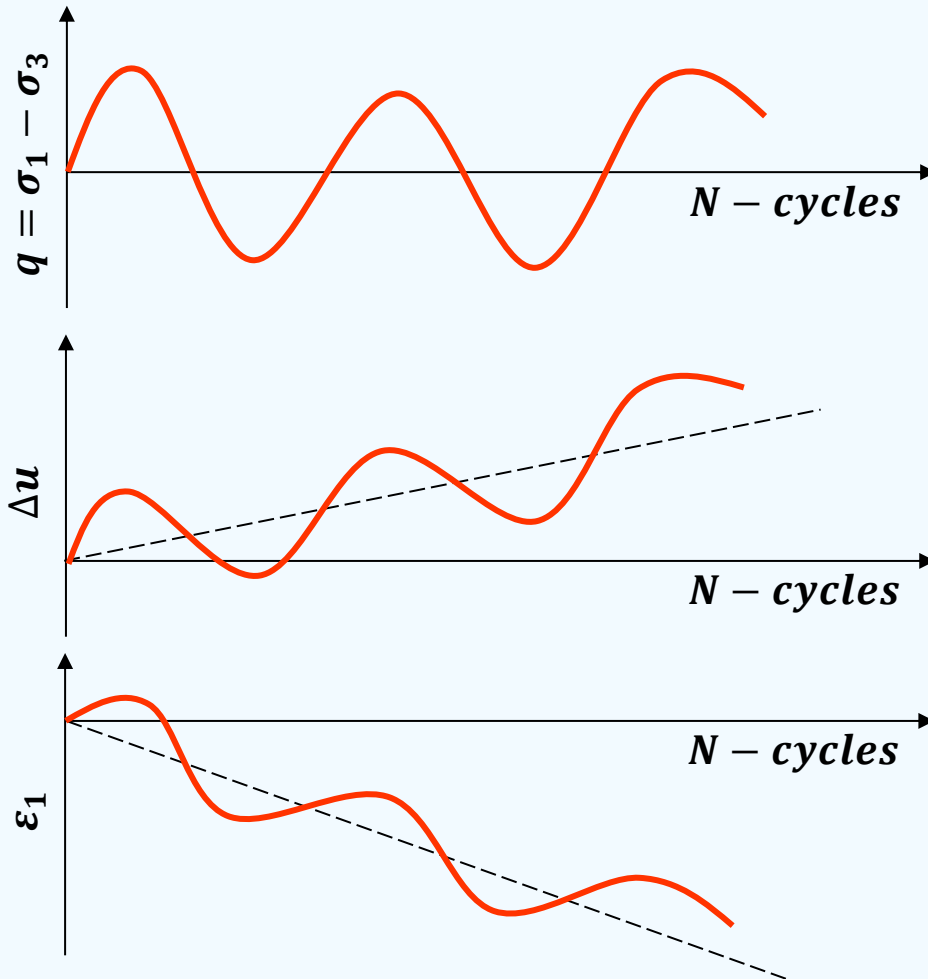


*CETE Méditerranée, France*

## Appareil triaxial cyclique

### ❑ Méthode d'analyse de la liquéfaction des sols

#### • **Essai triaxial cyclique**



*La pression interstitielle croît avec le nombre de cycles jusqu'à atteindre une valeur égale à la contrainte de confinement :*

$$u = \sigma_3$$



**C'est la liquéfaction**

### ❑ Méthode d'analyse de la liquéfaction des sols

#### • Essai triaxial cyclique

Journées Techniques  
Gestion des risques hydrologiques  
et des ouvrages fluviaux  
18 et 19 novembre 2014 - Aix en Provence

Calcul de la stabilité  
des ouvrages sous séisme

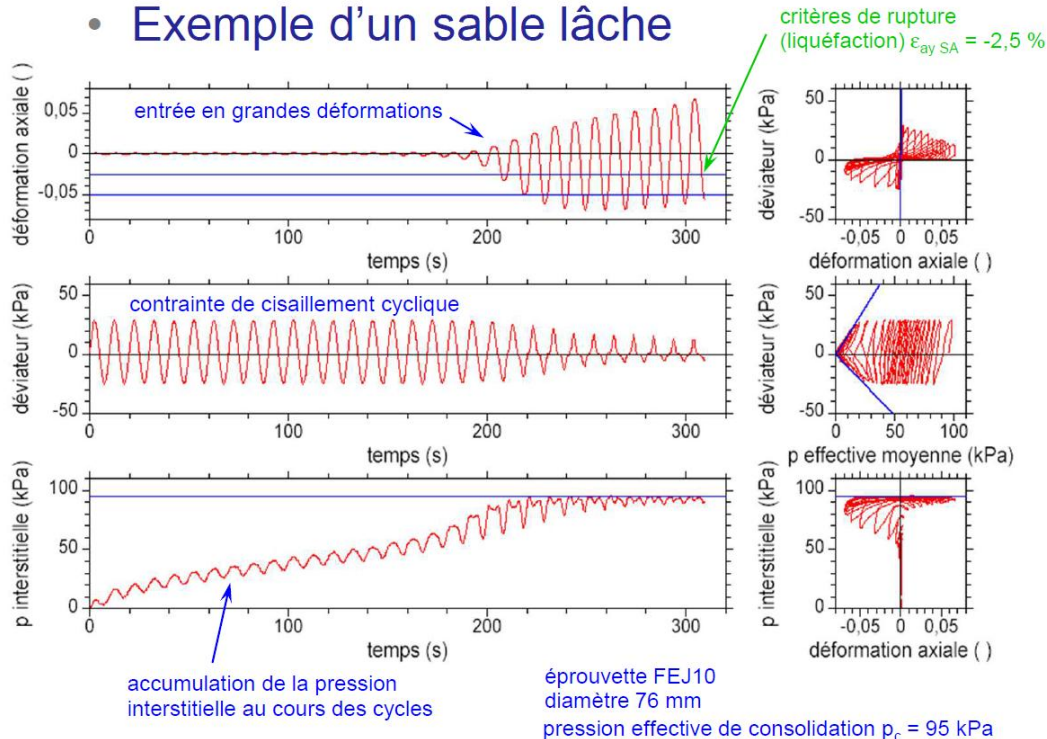
- Calculs de stabilité par blocs
- Essais cycliques en laboratoire

JF Serratrice

## Résistances cycliques des sables

### ✓ Sols sableux dans leur état naturel

- Essai triaxial cyclique non drainé CU
- Exemple d'un sable lâche



12

### ❑ Méthode d'analyse de la liquéfaction des sols

#### • Essai triaxial cyclique

Journées Techniques  
Gestion des risques hydrologiques  
et des ouvrages fluviaux  
18 et 19 novembre 2014 - Aix en Provence

Calcul de la stabilité  
des ouvrages sous séisme

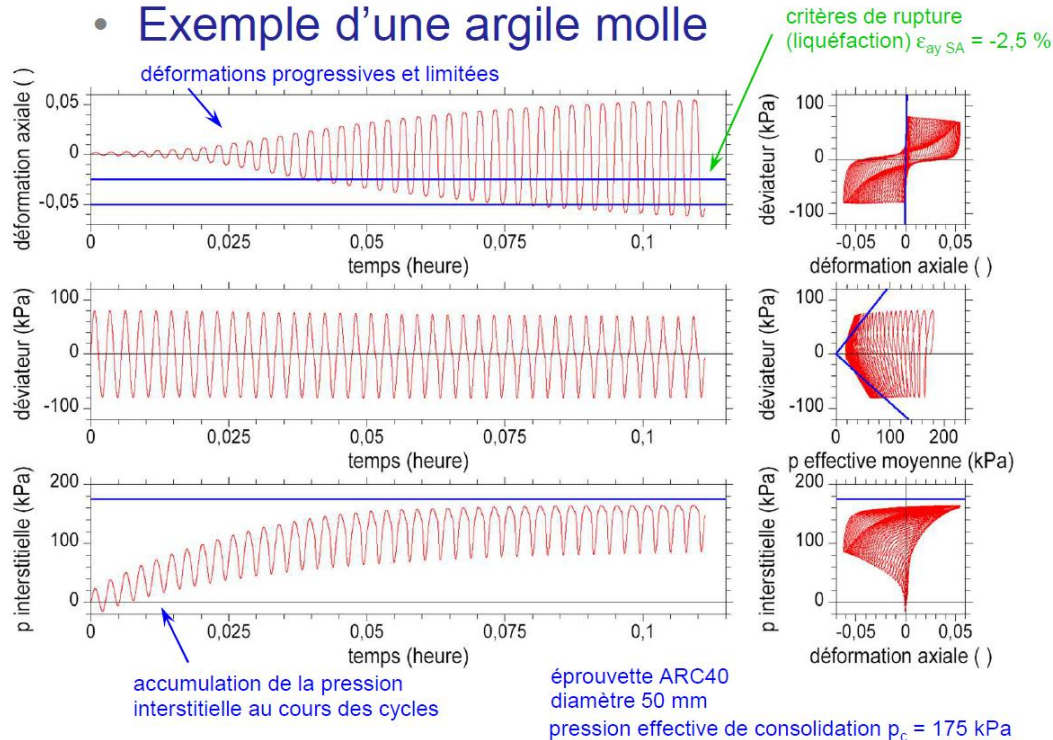
- Calculs de stabilité par blocs
- Essais cycliques en laboratoire

JF Serratrice

## Résistances cycliques des argiles

### ✓ Sols argileux dans leur état naturel

- Essai triaxial cyclique non drainé CU
- Exemple d'une argile molle



13

## *ÉVALUATION DU RISQUE DE LIQUÉFACTION DES SOLS*

### □ Evaluation du risque de liquéfaction des sols

- **Contrainte de cisaillement équivalente**

Les données sismiques en un point du profil de sol permettent de déterminer la variation de la contrainte de cisaillement en fonction du temps. Elles permettent aussi de définir une contrainte de cisaillement équivalente donnée par la relation suivante :

$$\tau_{eq} = R \cdot \max_t(|\tau(t)|)$$

avec  $R = 2/3$  (Coefficient de minoration).

La formule adoptée en pratique est de la forme :

$$\tau_{eq} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\gamma \cdot h}{g} \cdot a_{max} \cdot r_d$$

où :  $\gamma$  - Poids spécifique total du sol

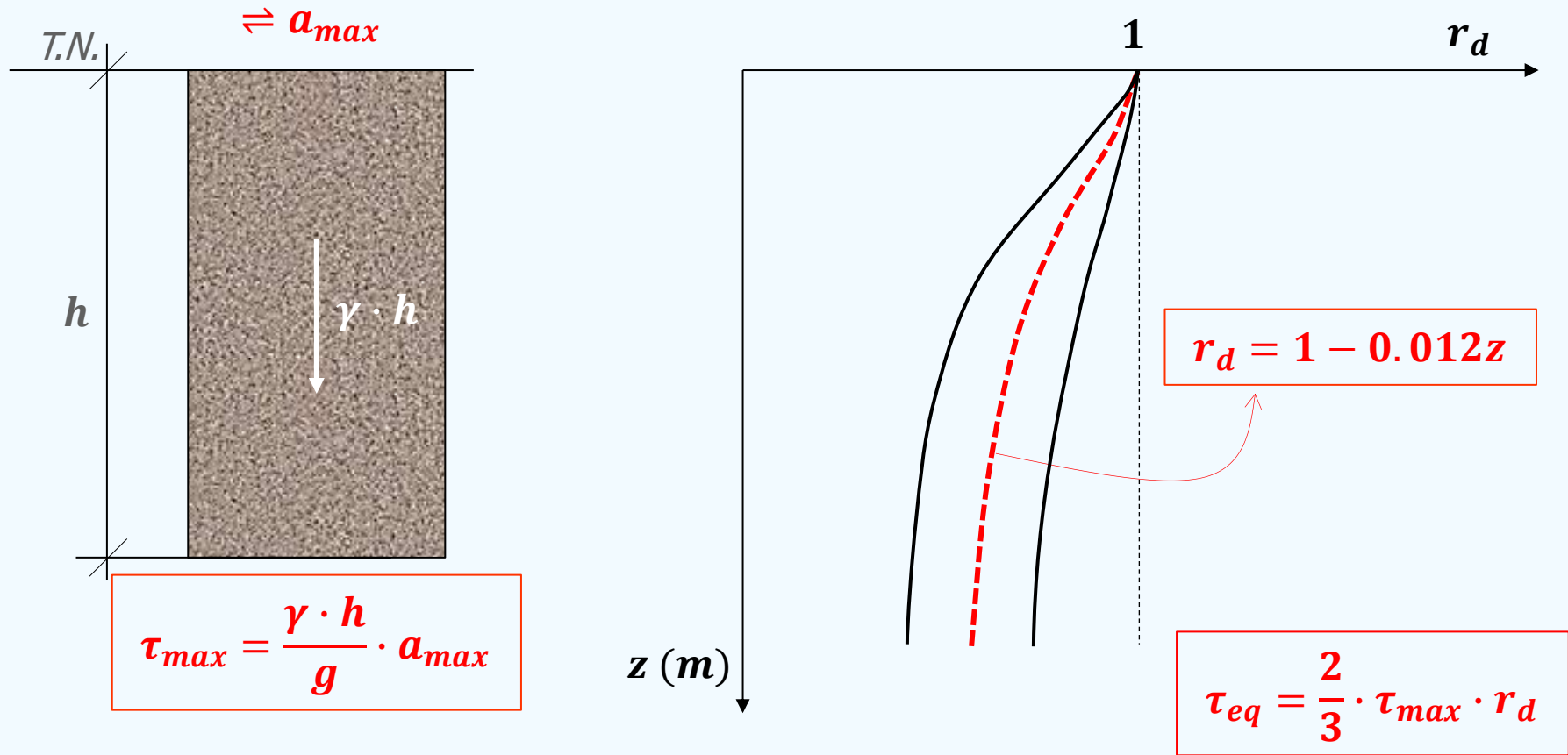
$h$  - Epaisseur équivalente de la couche de sol

$a_{max}$  - Accélération sismique maximale ( $\times g$ ) |  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$r_d = 1 - 0.012h$  - Facteur de réduction de la profondeur (Kayen et al., 1992)

### □ Evaluation du risque de liquéfaction des sols

- **Contrainte de cisaillement équivalente**



### □ Evaluation du risque de liquéfaction des sols

#### • **Résistance au cisaillement cyclique**

##### ❖ **Essais de laboratoire : (Essai triaxial cyclique)**

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$\tau_l = C_r \cdot \left( \frac{q}{2\sigma'_3} \right)_N \cdot \sigma'_{vo}$$

où :  $q = \sigma_1 - \sigma_3$  - Déviateur de contraintes

$\left( \frac{q}{2\sigma'_3} \right)_N$  - Résistance relative correspondant à  $N$  cycles

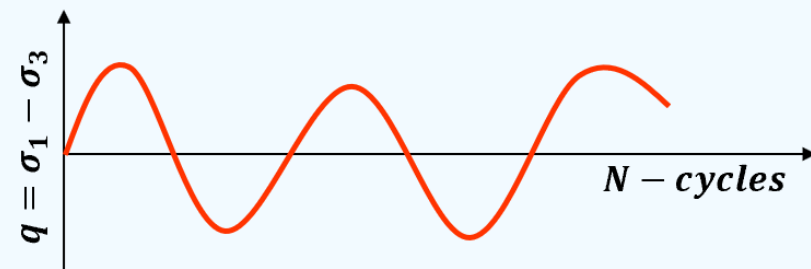
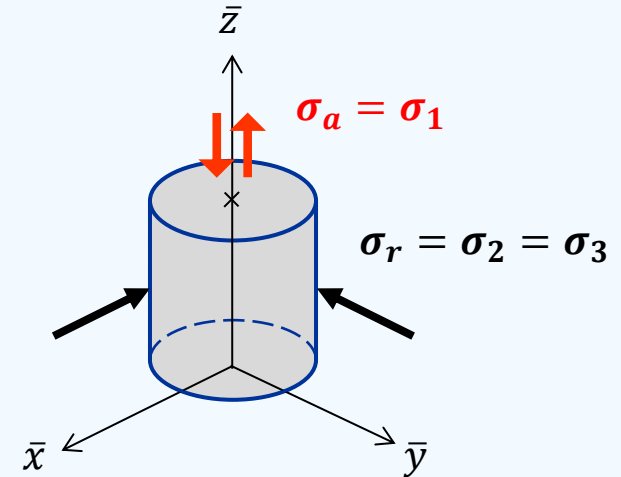
$\sigma'_{vo}$  - Pression effective des terres en place

$C_r$  - Facteur de correction fonction de la densité relative  $D_r$  du sol

| $D_r$ (%) | 0 - 50 | 60   | 80   |
|-----------|--------|------|------|
| $C_r$     | 0.57   | 0.60 | 0.68 |

Autre formule :  $\tau_l = C_r \cdot \frac{D_r}{50} \cdot \left( \frac{q}{2\sigma'_3} \right)_{N=50}$

où :  $D_r$  - Densité relative du sol.



### ❑ Evaluation du risque de liquéfaction des sols

- **Résistance au cisaillement cyclique**

- ❖ **Essais in-situ :**

- Essai SPT
- Essai au piézocône
- Essai au pénétromètre CPTu
- etc.

⇒ Corrélations entre les données des essais et la résistance au cisaillement cyclique  $\tau_l$



Standard penetration test (SPT)

### □ Evaluation du risque de liquéfaction des sols

- **Coefficient de sécurité à la liquéfaction**

Il est défini par la relation suivante :

$$F_L = \frac{\tau_l}{\tau_{eq}}$$

La sécurité vis-à-vis de la liquéfaction est requise pour :  **$1.3 \leq F_L \leq 1.5$**



**Nota:** Lorsque  $F_L \approx 1$ , le sol se trouve dans un état critique, c'est-à-dire à la limite de la liquéfaction.

## *TRAITEMENT DES SOLS LIQUÉFIABLES*

### ❑ Traitement des sols liquéfiables

Selon le procédé retenu, le risque de liquéfaction d'un sol potentiellement liquéfiable peut être réduit par l'une ou l'autre des actions suivantes ou leur combinaison :

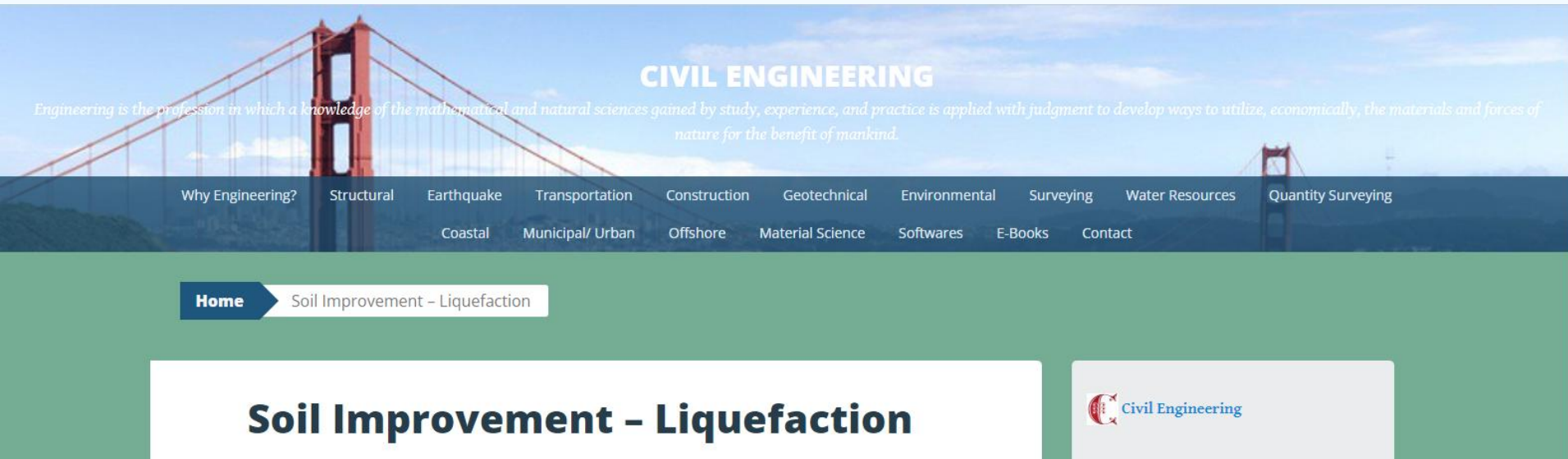
- ✓ Augmentation de la compacité du sol (densification du matériau).
- ✓ Drainage adéquat (drains de sables ou de graviers, drains tubulaires spécifiques) assurant une dissipation suffisamment rapide des surpressions interstitielles.
- ✓ Diminution des sollicitations dans le sol par inclusions souples ou rigides qui se traduira par une réduction du cisaillement et de la distorsion dans celui-ci.
- ✓ Confinement vertical (remblai) ou latéral (parois cellulaires : mailles synthétiques).
- ✓ Amélioration des paramètres de résistance et de déformabilité du sol.
- ✓ Dispositions constructives (largeur suffisante du débord).

Les procédés de traitement couramment utilisés sont :

- ✓ Le compactage dynamique et la vibroflotation pour assurer une densification du sol.
- ✓ Les colonnes ballastées.
- ✓ Les inclusions souples ou rigides (pieux et barrettes en béton ou en bois).
- ✓ Les coulis d'injection obtenus par un mélange de sable, de ciment et d'eau mis sous pression.

### □ Traitement des sols liquéfiables

#### Amélioration des sols contre la liquéfaction



***Vibroflotation***

***Dynamic Compaction***

***Stone Column***

***Compaction Piles***

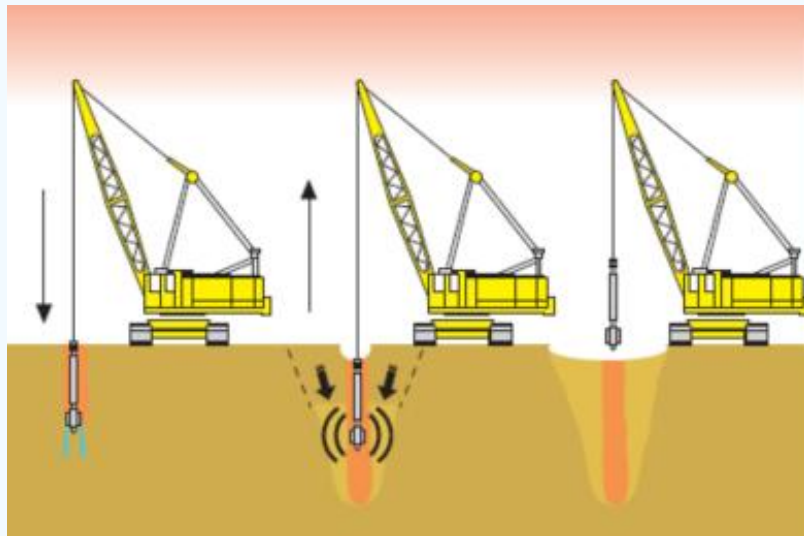
***Compaction Grouting***

***Drainage Techniques***

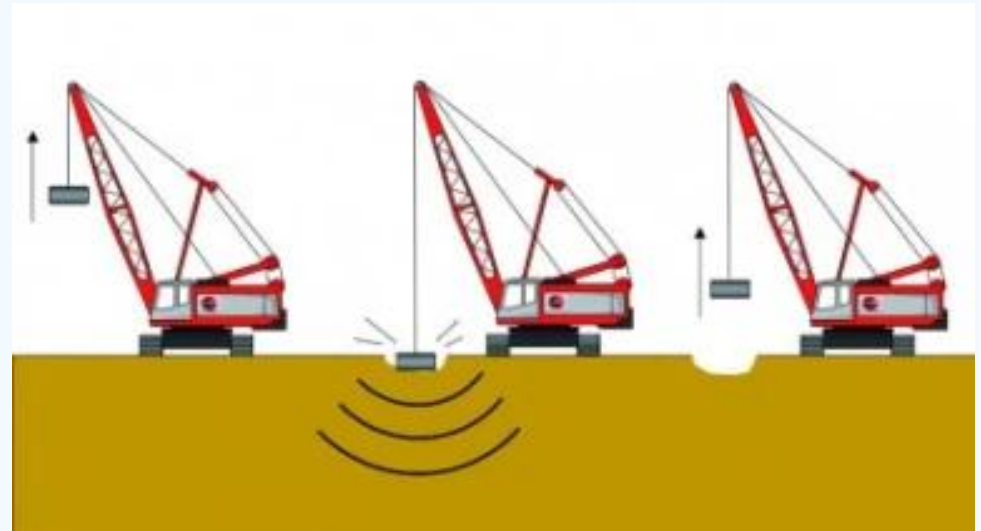
### □ Traitement des sols liquéfiables

#### Amélioration des sols contre la liquéfaction

##### Vibroflotation



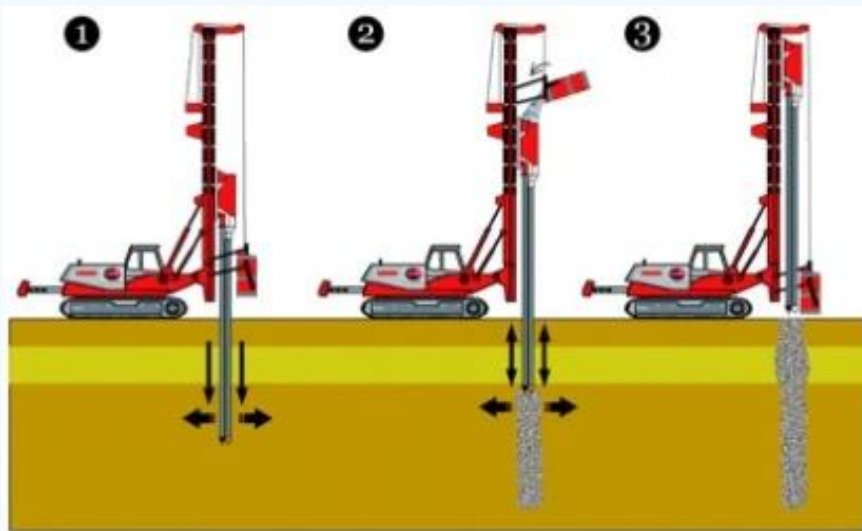
##### Dynamic Compaction



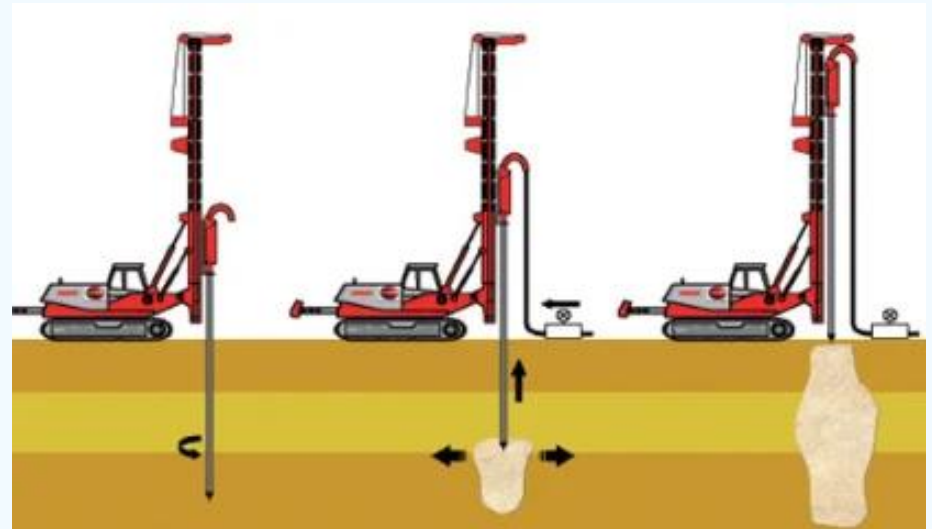
### ❑ Traitement des sols liquéfiabiles

#### Amélioration des sols contre la liquéfaction

##### Stone Column

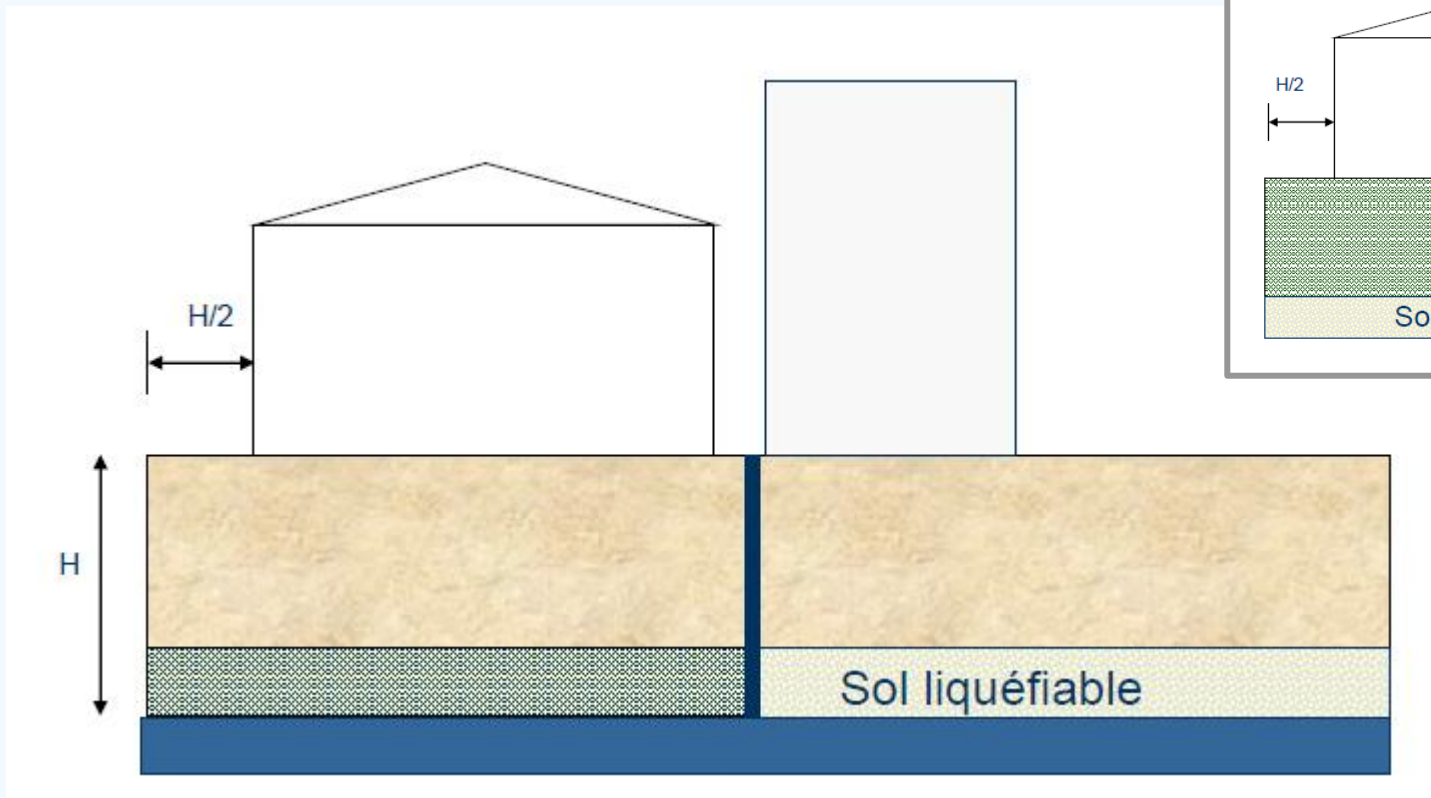


##### Compaction Grouting



### □ Traitement des sols liquéfiables

#### Dispositions constructives



***Merci de votre attention***

***Fin du Chapitre Cinq***

**EXERCICES**

**Ex. 1** Calculer le coefficient de sécurité à la liquéfaction sous un séisme d'accélération maximale  $a_{max} = 0.3g$  d'un massif de sable homogène d'épaisseur  $h = 5\text{ m}$ , de poids volumique saturé  $\gamma_{sat} = 21\text{ kN/m}^3$  et de résistance au cisaillement cyclique  $\tau_l = 20\text{ kPa}$ . Commenter le résultat trouvé.

-----

**Ex. 2** Soit un massif de sable homogène d'épaisseur  $h = 10\text{ m}$ , de poids volumique saturé  $\gamma_{sat} = 21\text{ kN/m}^3$  et de résistance au cisaillement cyclique  $\tau_l = 20\text{ kPa}$ . Calculer l'accélération sismique maximale  $a_{max}$  à partir de laquelle ce massif de sable commence à se liquéfier. Si l'on considère l'exercice Ex. 1, quel commentaire pourrait-on alors faire vis-à-vis de la résistance à la liquéfaction du massif de sable.

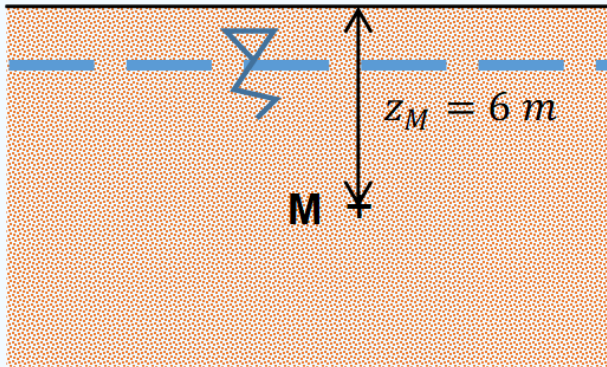
-----

**Ex. 3** Soit une couche de sable de poids volumique saturé  $\gamma_{sat} = 20\text{ kN/m}^3$  et d'épaisseur  $h = 10\text{ m}$  soumise à une accélération sismique maximale  $a_{max} = 0.4g$ .

- Déterminer la résistance au cisaillement cyclique critique du sable.
  - Des mesures au SPT montrent que la résistance au cisaillement cyclique maximale est de l'ordre de  $\tau_l = 30\text{ kPa}$ . Quel serait donc le coefficient de sécurité à la liquéfaction sous un séisme d'accélération maximale  $a_{max} = 0.4g$ . Commenter le résultat trouvé.
  - Quelle serait alors l'accélération sismique maximale limite à ne pas dépasser pour qu'il n'y ait pas apparition de liquéfaction selon les mesures au SPT.
-

### EXERCICES

Ex. 4 (Interro. du 17/05/2022). Considérons le profil de sol sableux roulé suivant :



#### Sable roulé

- Poids volumique saturé  $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$
- Angle de frottement interne effectif  $\varphi' = 30^\circ$
- Indice des vides en place  $e_o = 0.8$
- Densité relative  $D_r = 40\%$
- Accélération de la pesanteur  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Calculer au point M la résistance au cisaillement cyclique critique permettant à ce massif sableux saturé de ne pas se liquéfier sous une accélération sismique maximale  $a_{max} = 0.4g$ .

---