

Journée Technique

Durcissement au séisme des constructions existantes

27 novembre 2014 - Aix en Provence

Caractérisation des sol sous sollicitations dynamiques et liquéfaction Applications

JF Serratrice



Document DTer Méditerranée

Résistance cyclique (liquéfaction des sols)
et propriétés dynamiques des sols
Essais in-situ (piézocône)
Applications aux ouvrages en terre

1 Propriétés cycliques des sols testés dans leur état naturel

✓ Résistance cyclique

- Sables
- Sables denses
- Argiles

✓ Propriétés dynamiques

- Dégradation du module de déformation
- Amortissement

Presse triaxiale cyclique

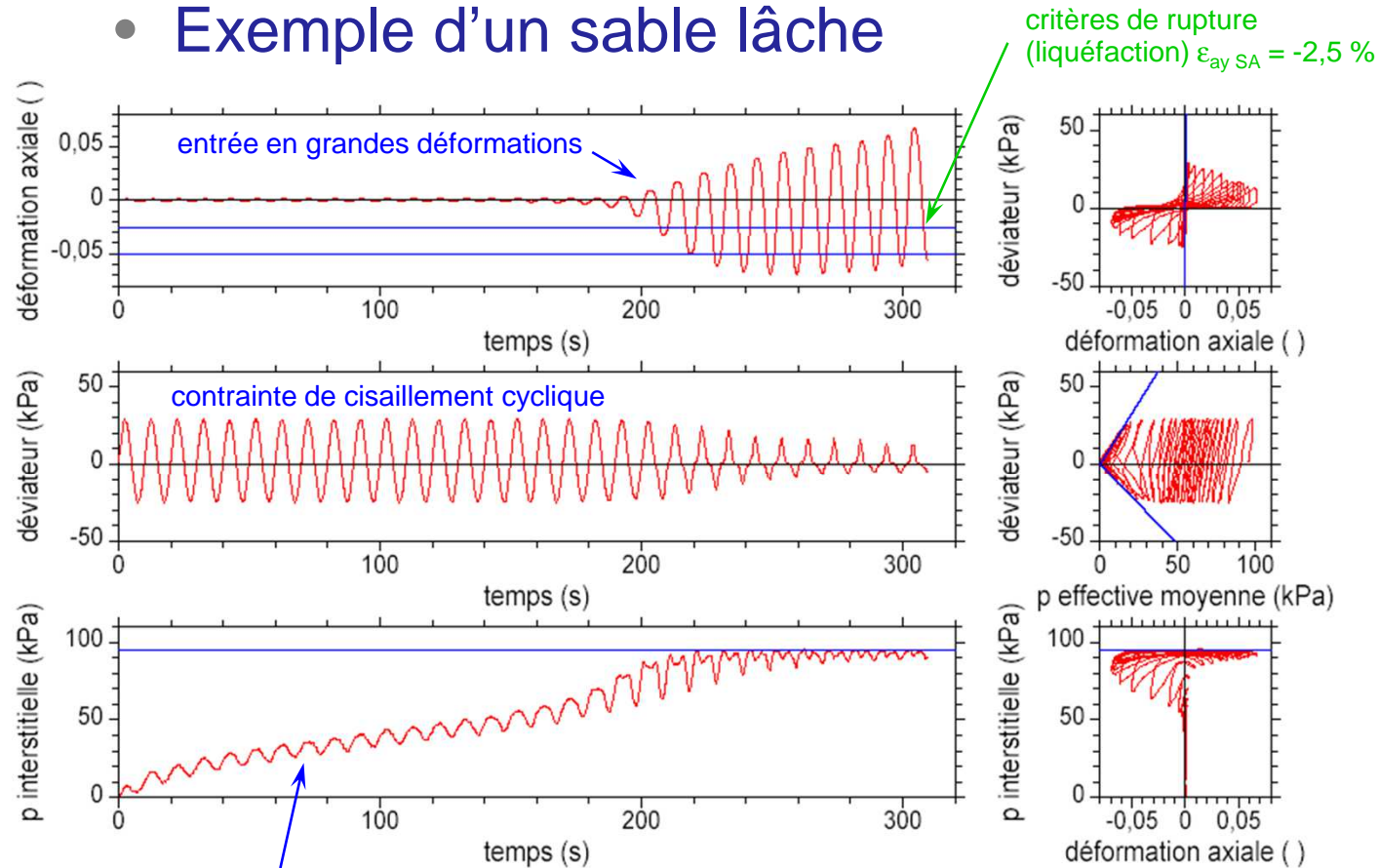


Document CETE Méditerranée

Résistances cycliques des sables

✓ Sols sableux dans leur état naturel

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



accumulation de la pression interstitielle au cours des cycles

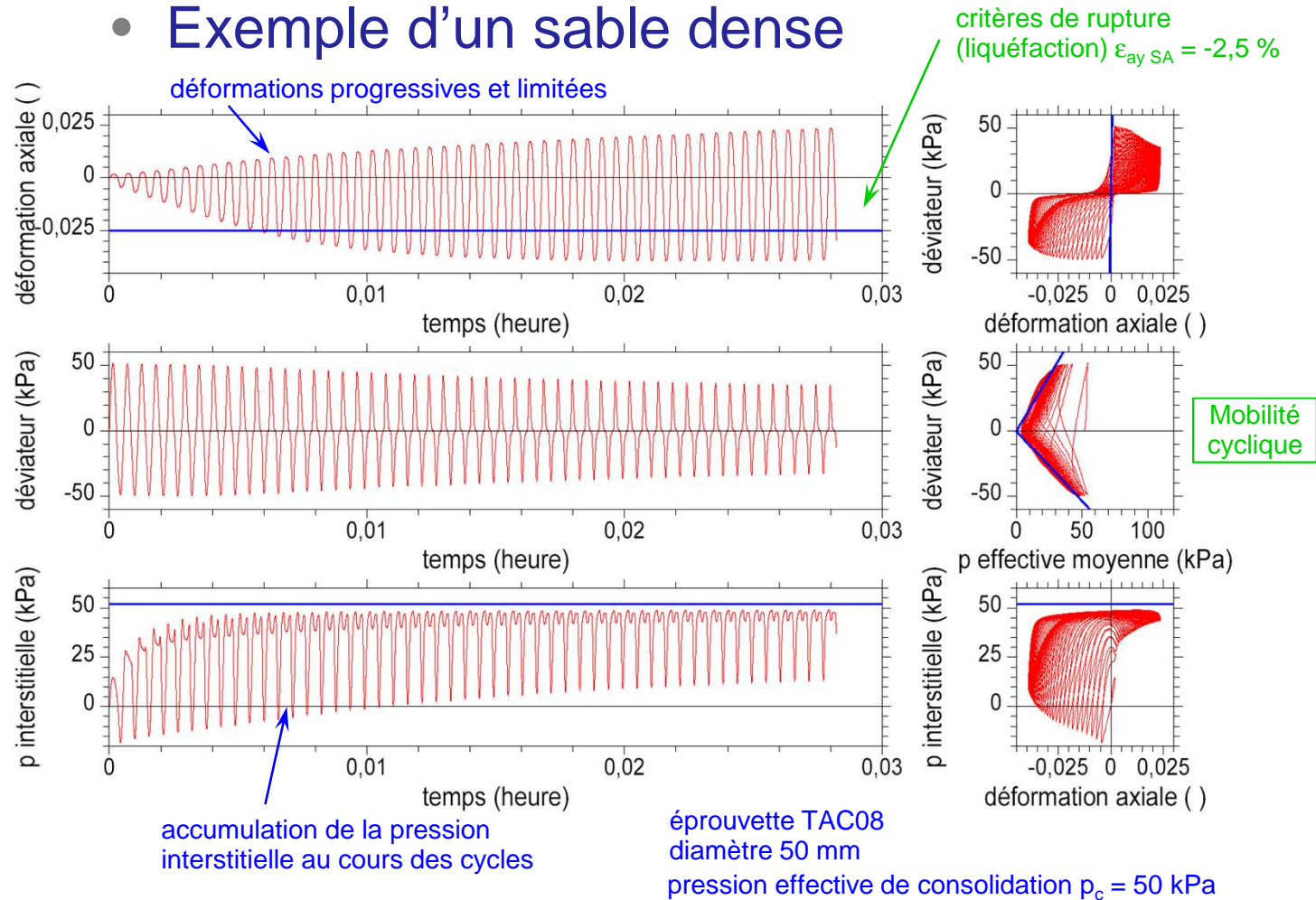
éprouvette FEJ10
diamètre 76 mm
pression effective de consolidation $p_c = 95$ kPa



Résistances cycliques des sables

✓ Sols sableux dans leur état naturel

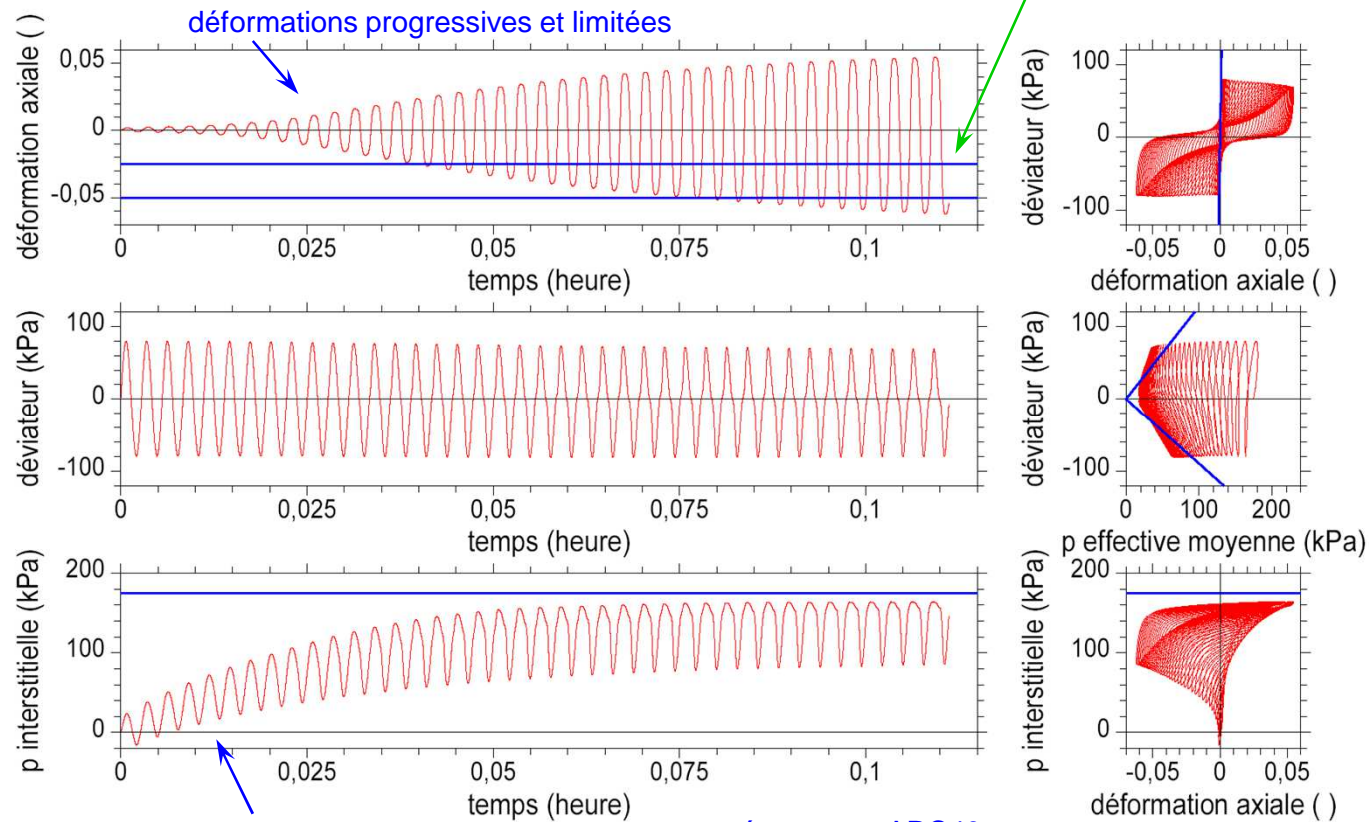
- Essai triaxial cyclique non drainé CU
- Exemple d'un sable dense



Résistances cycliques des argiles

✓ Sols argileux dans leur état naturel

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



accumulation de la pression interstitielle au cours des cycles

éprouvette ARC40
diamètre 50 mm
pression effective de consolidation $p_c = 175$ kPa

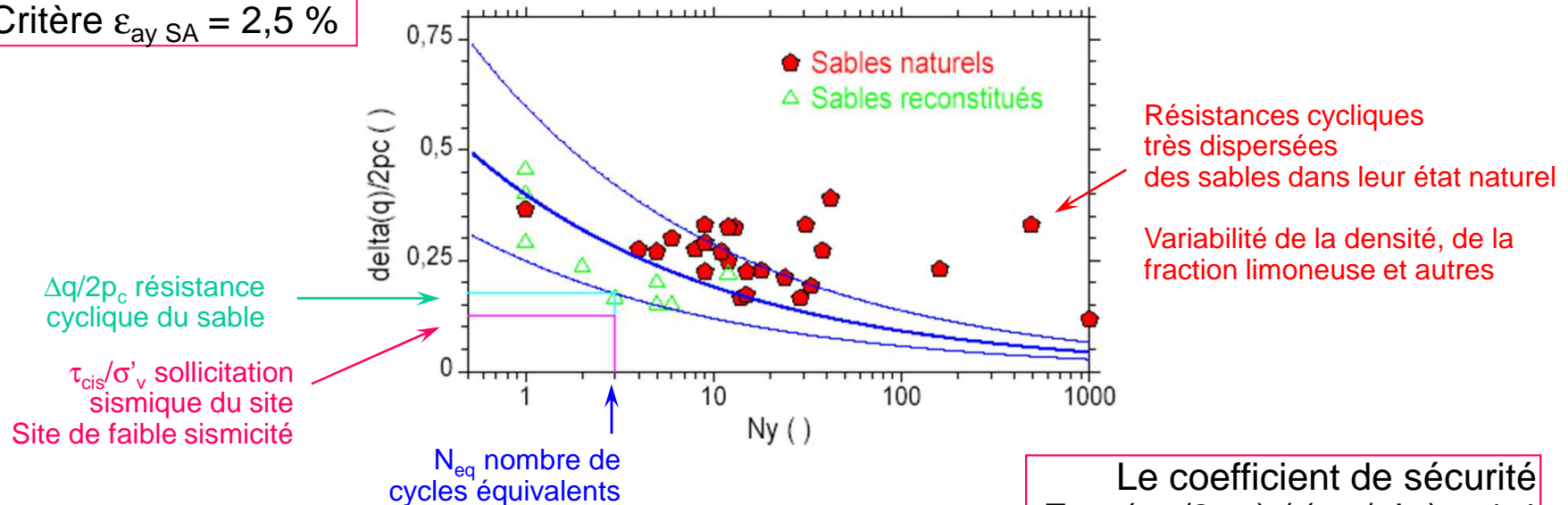


Résistances cycliques des sables

✓ Plusieurs éprouvettes sont testées

- Sollicitées sous différentes amplitudes cycliques
- Les résistances cycliques sont comparées à la sollicitation sismique du site

Critère $\varepsilon_{ay SA} = 2,5 \%$



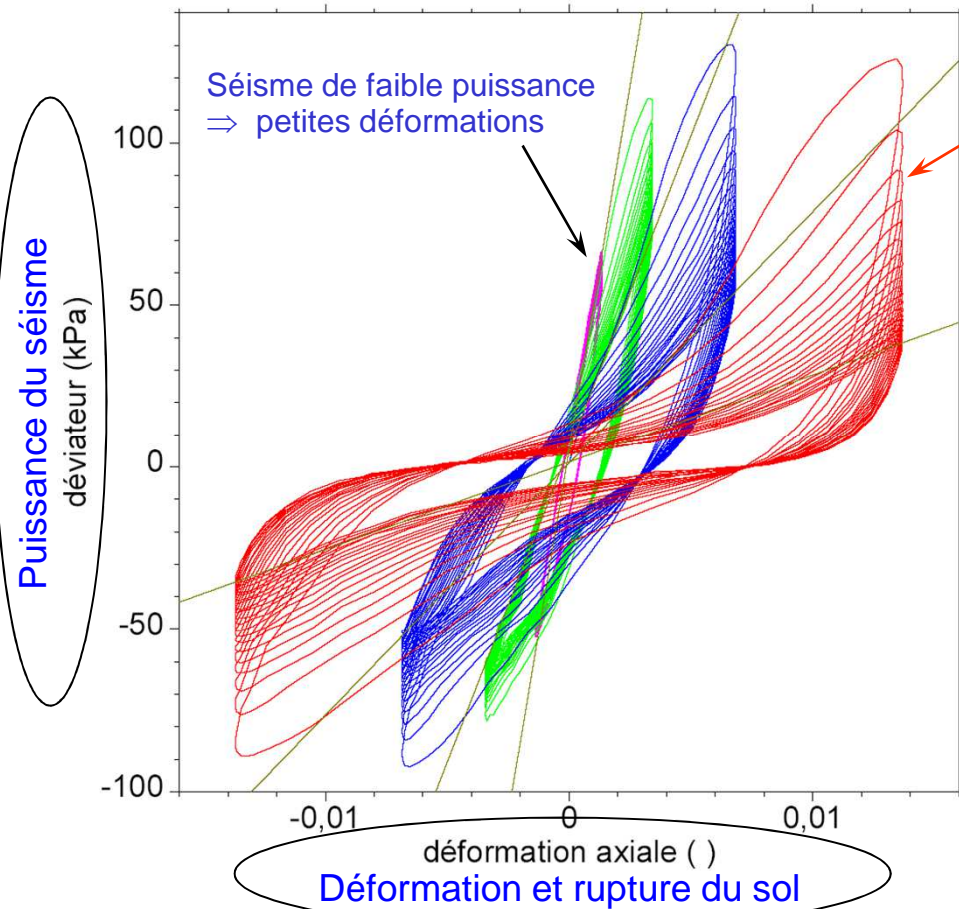
Le coefficient de sécurité $F_s = (\Delta q/2p_c) / (\tau_{cis}/\sigma'_v) = 1,4$

Contrainte de cisaillement cyclique sous laquelle un nombre de cycles N_y permet d'atteindre un seuil de déformation donné $\varepsilon_{ay SA}$

La liquéfaction des sols

- ✓ **Deux conditions sont nécessaires**
 - Pour initier la liquéfaction d'une couche de sol
 - Sous l'effet d'un séisme
- ✓ **(1) Le sol doit être**
 - Sensible, formant un dépôt récent
 - De nature sableuse, lâche, saturé
 - Situé à faible profondeur
- ✓ **(2) Le mouvement sismique doit être**
 - Suffisamment puissant
 - Et prolongé dans le temps
 - Pour provoquer l'accumulation de pressions interstitielles

Propriétés dynamiques des sols



Plusieurs séquences de cycles (7 à 8) sont appliquées successivement a une éprouvette

Les cycles sont pilotés en déplacement

L'amplitude des cycles est augmentée d'une séquence à l'autre

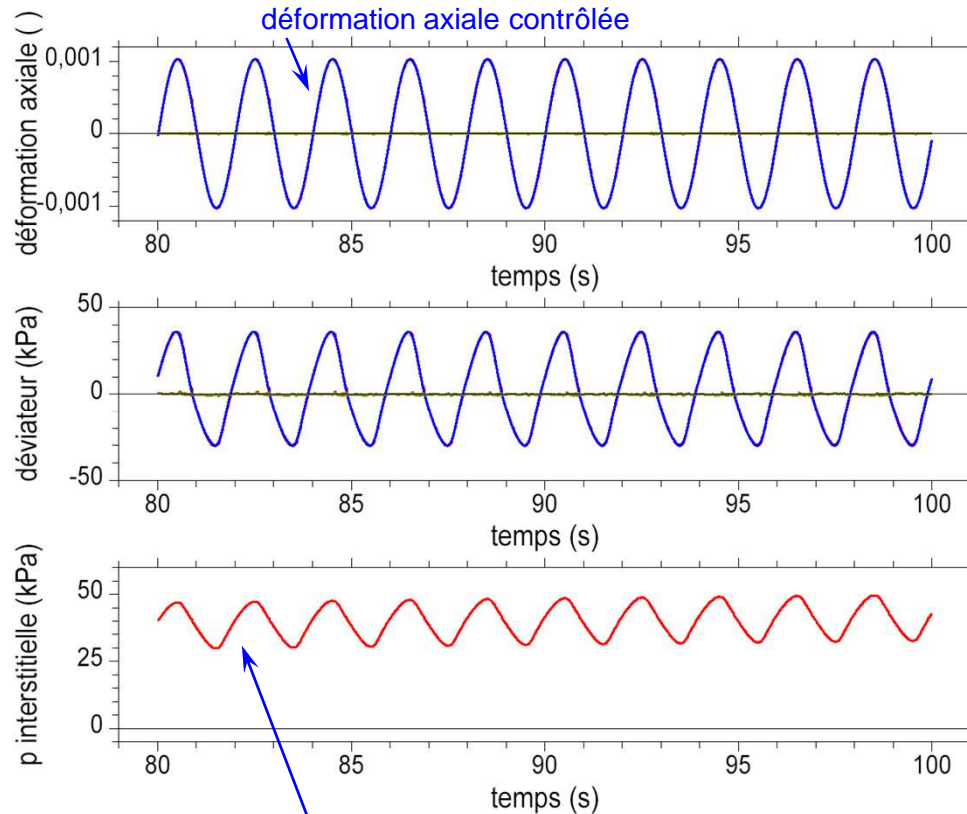
Les modules d'Young E_u représentent la pente des courbes
Les amortissements D représentent les « ventres » des courbes

— Courbes contrainte-déformation cycliques pour des séquences de cycles de différentes amplitudes

Propriétés dynamiques d'une argile

✓ Sols argileux dans leur état naturel

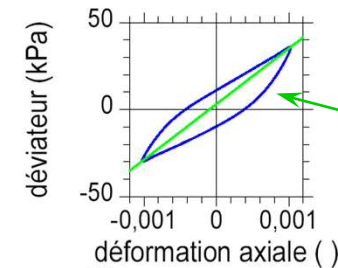
- Essai triaxial cyclique non drainé étagé CU
- Exemple d'une argile molle



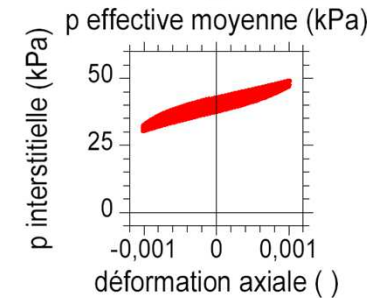
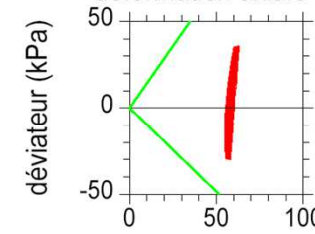
variation limitée de la pression interstitielle au cours des cycles

éprouvette ARC39
diamètre 50 mm
pression effective de consolidation $p_c = 98$ kPa

Séquence de cycles $\Delta \varepsilon_{ay SA} = 0,1 \%$



Module d'Young sécant
 $E_u = 30$ MPa
Amortissement
 $D = 0,14$



Cycles pilotés en déplacement

Propriétés dynamiques d'une argile

✓ Sols argileux dans leur état naturel

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

Séquence de cycles $\Delta\varepsilon_{ay SA} = 0,1 \%$

Module d'Young sécant

$E_u = 30 \text{ MPa}$

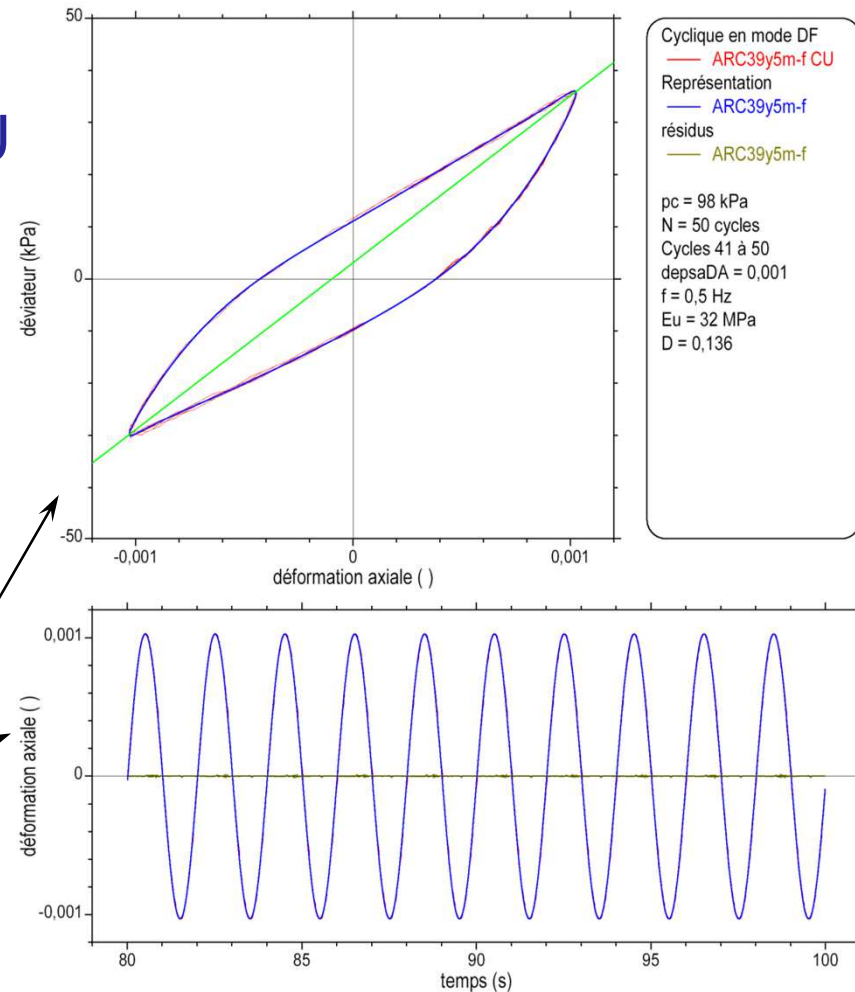
Amortissement

$D = 0,14$

En rouge = courbe expérimentale

En bleu = représentation

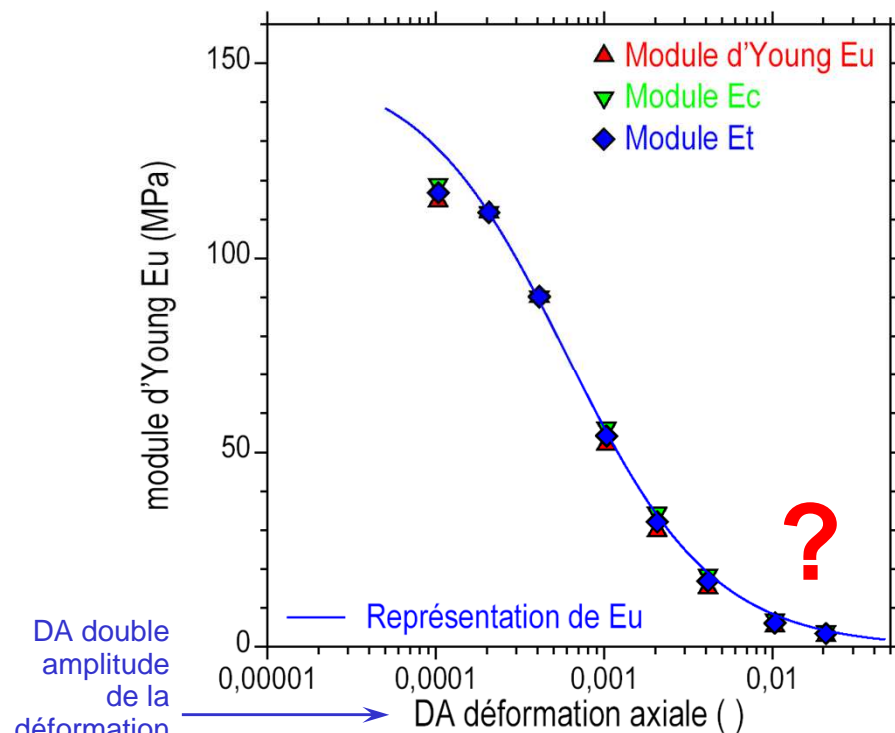
Cycles pilotés en déplacement



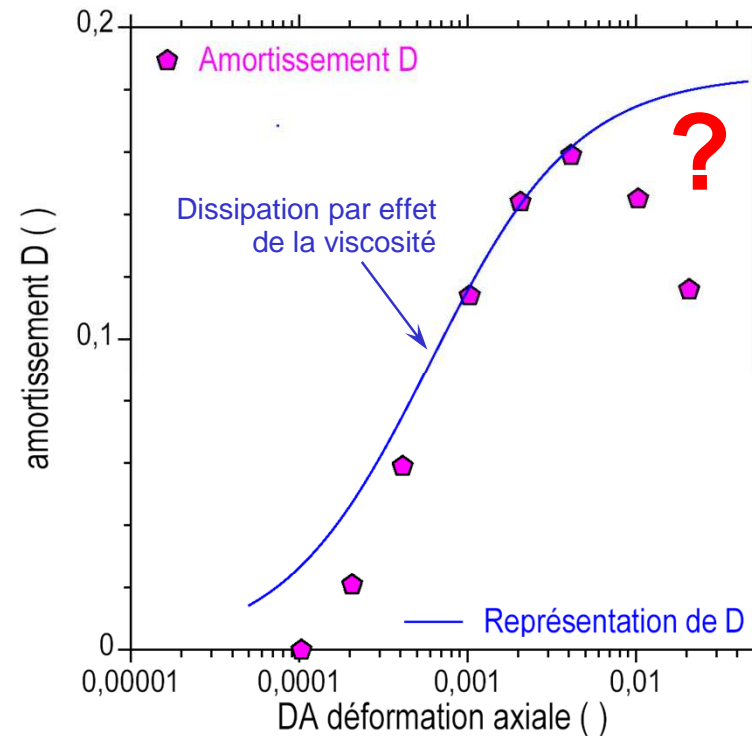
Propriétés dynamiques d'une argile

✓ Sols argileux dans leur état naturel

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



Dégradation du module Eu en fonction du niveau de déformation



Amortissement D en fonction du niveau de déformation

Huit séquences de cycles pilotés en déplacement

2 Essais in-situ Piézocône

✓ Résistance cyclique

- Méthode NCEER

National Center for Earthquake Engineering Research ⁽¹⁾

✓ Développements

- Analogie piézocône - triaxial
- Encadrement des résistances et indice de sensibilité LPI

Liquefaction Potential Index ⁽²⁾

✓ Un exemple

Remblais hydrauliques

0,0 à 3,0 m sable lâche
3,0 à 7,8 m sable très lâche
7,8 à 8,3 m argile molle
8,3 à 20,0 m sables

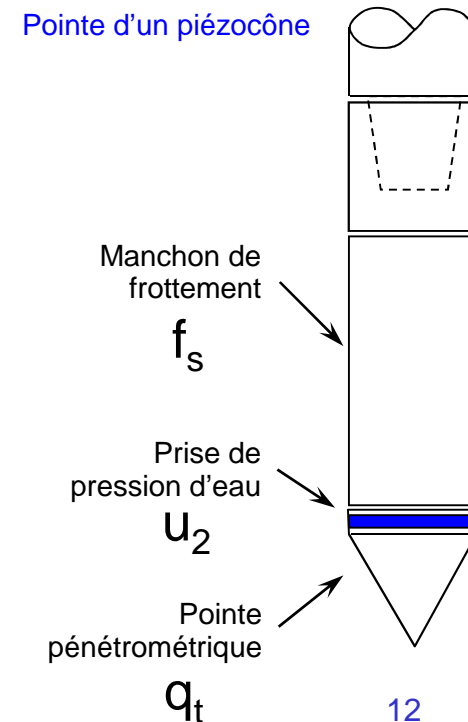
⁽¹⁾ D'après Youd et al. (2001)

⁽²⁾ D'après Iwasaki et al. (1978, 1982)

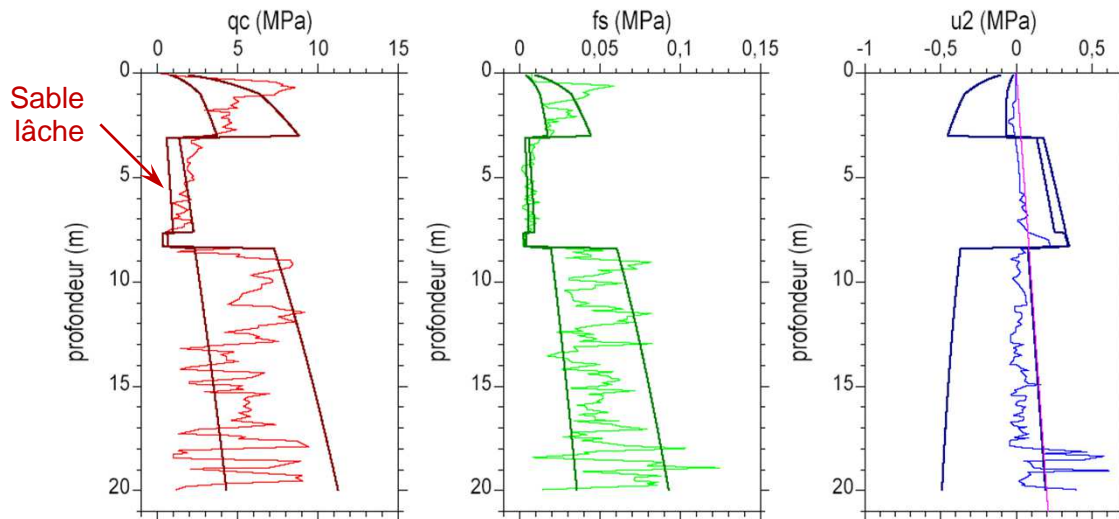
Reconnaitances géotechniques



Document CETE Méditerranée



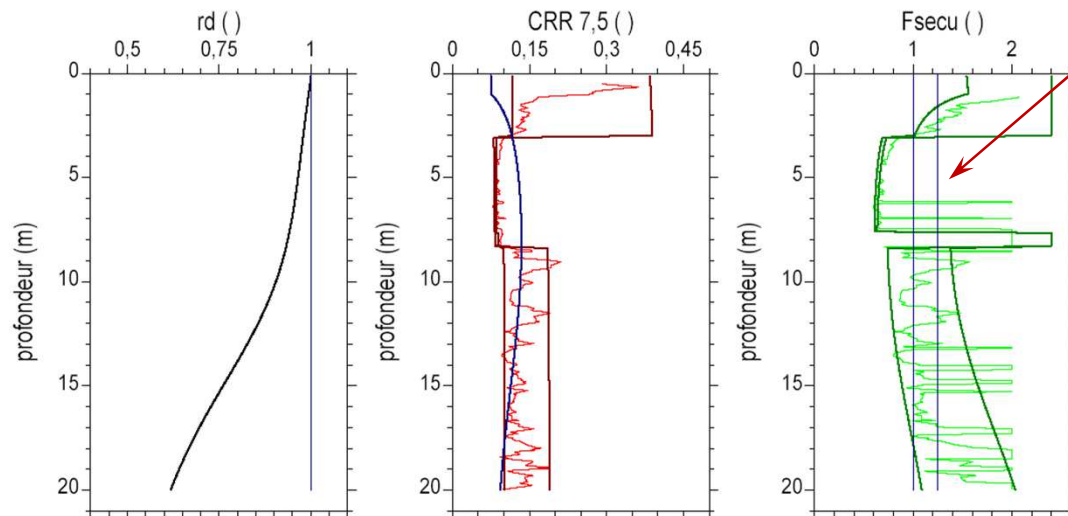
Encadrement des données d'un piézocône



Essai pénétrométrique CPTu (piézocône)

Mesures brutes

- q_t résistance de pointe (MPa)
- f_s frottement latéral unitaire (MPa)
- u_2 pression d'eau (MPa)



Variables calculées

- r_d coefficient de réduction des contraintes ()
- $CSR_{7,5}$ contrainte de cisaillement sismique ()
- $CRR_{7,5}$ résistance cyclique normalisée ()
- F_{secu} coefficient de sécurité ()

$$F_{secu} = CRR_{7,5} / CSR_{7,5}$$

LPI = 18

- Ta01-Nce Résistance de pointe q_t
- Facteur r_d
- Ta01-Nce Frottement latéral unitaire f_s
- Résistance $CRR_{7,5}$
- Ta01-Nce Pression d'eau u_2
- Sollicitation $CSR_{7,5}$
- Coefficient de sécurité F_{secu}

Approximation max

Approximation min

Liquefaction Potential Index

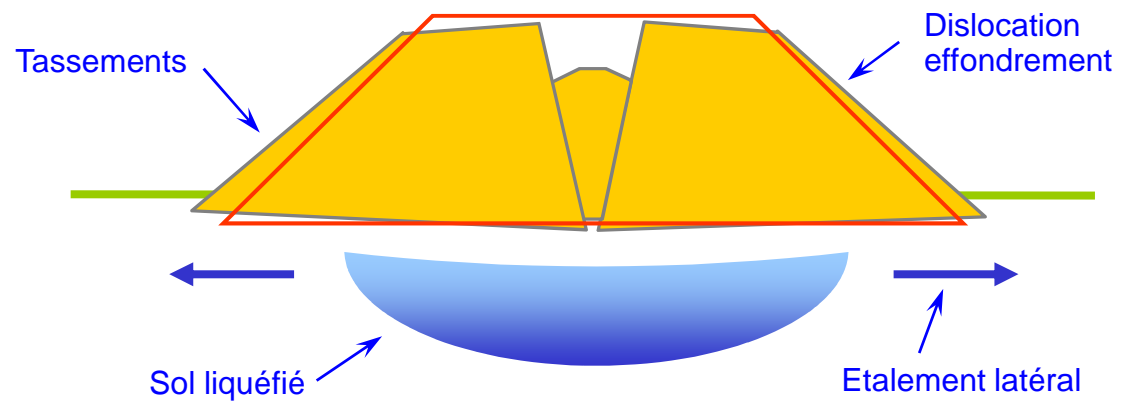
3 Stabilité des remblais et des digues

- ✓ Méthodes pseudo-statiques
 - Méthode des blocs
- ✓ Méthodes cinématiques
 - Calculs en déplacement



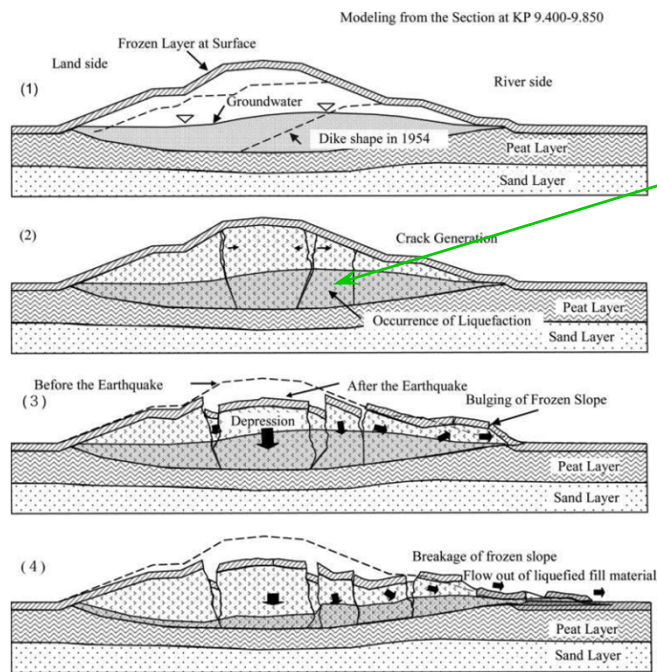
Document US Geological Survey

Rupture de remblais observée après le séisme d'Alaska du 27 mars 1964



Stabilité des digues sous séisme

Stabilité des digues et des ouvrages en terre sous séisme
 ouvrages neufs et ouvrages existants
 Reconnaissance des sites et identification des sols sensibles
 Mise en œuvre de méthodes d'analyse et de conception
 Proposition de techniques de renforcement ou de réparation



Rivière Kushiro, Hokkaido, Japon
 Séisme de Kushiro-oki, 1993
 D'après Sasaki (2009)

Exemple d'application d'une méthode de calcul de stabilité (méthode des blocs)

Liquéfaction des sols



Simulation de l'exemple ci-contre
 D'après Serratrice et Criado (2013)

4 Applications aux ouvrages existants

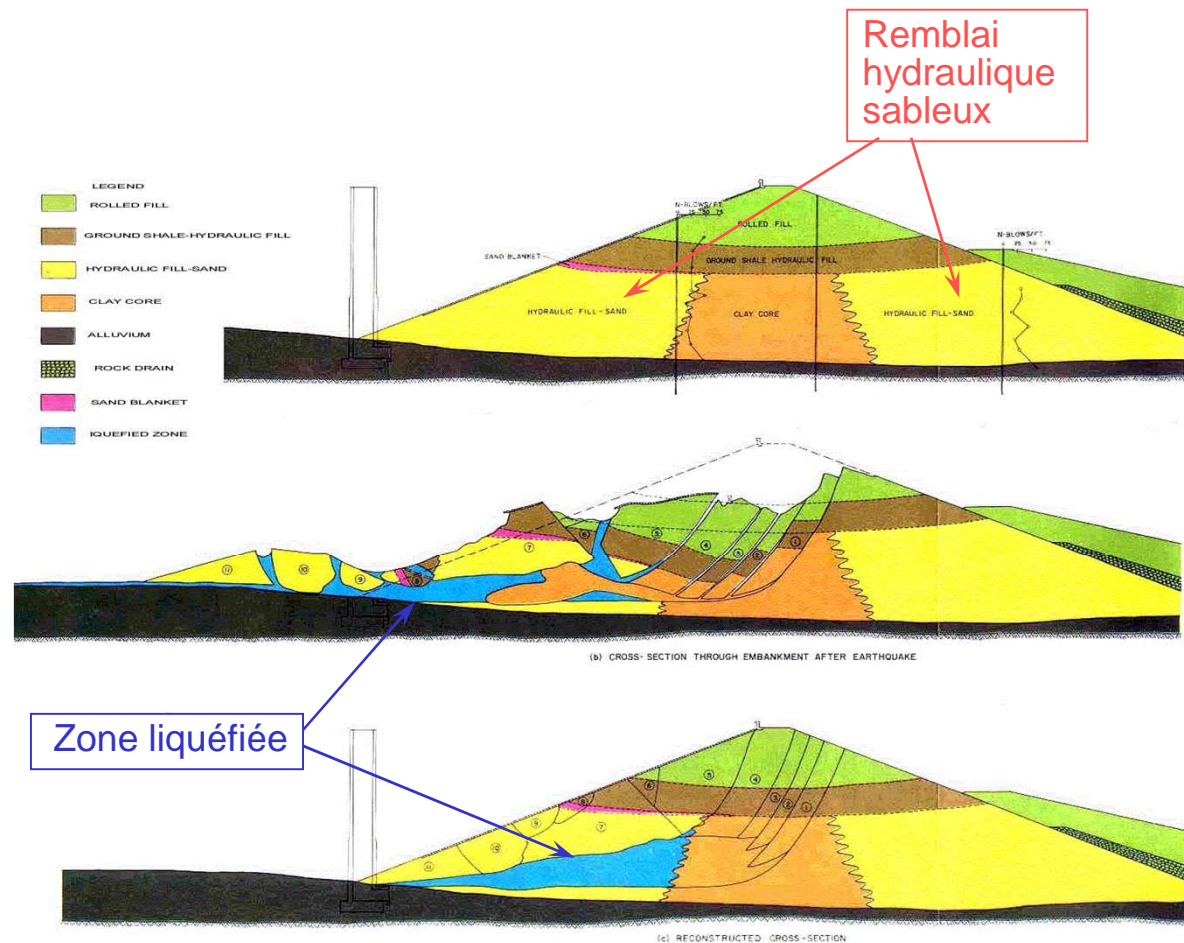
✓ Exemples

- Fondations
- Remblais
- Quais
- Barrages
- Dignes

Lower San Fernando dam

Séisme de San Fernando
du 9 février 1971

D'après Seed et al. (1973)
puis Castro et al. (1992)



Un exemple



Document panoramio.com

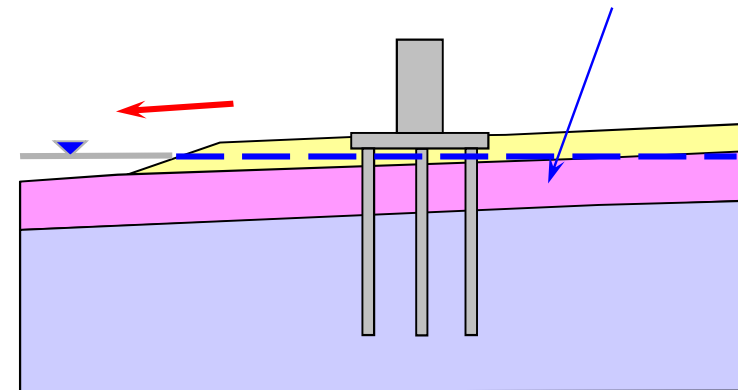
Fondations profondes

Zone de sismicité modérée (3)

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

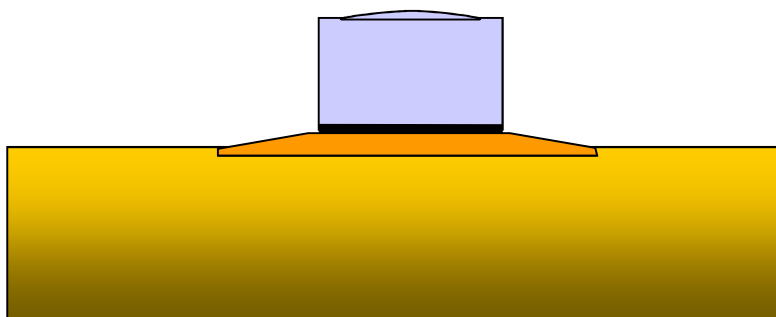
$$a_g = 2,1 \text{ m/s}^2$$

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



Un exemple

Fondations superficielles



Document letelegramme.fr

Un exemple

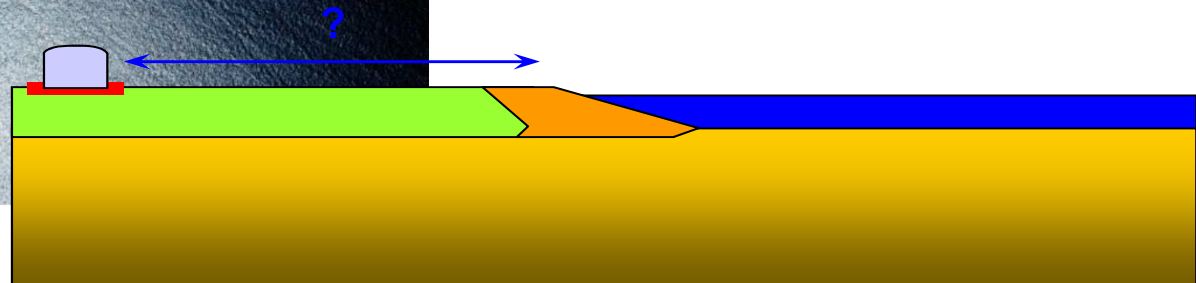


Document IGN

Plate-forme aéroportuaire



Document CETE Méditerranée

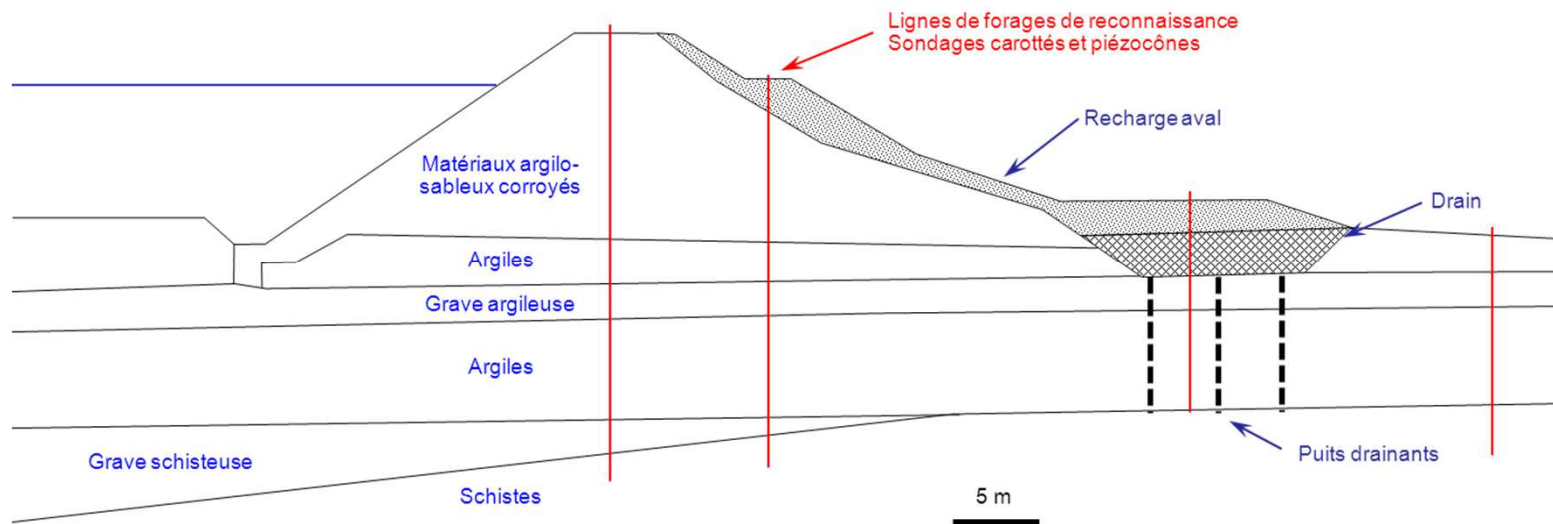


Un exemple

Barrage



Document lacsdespyrenees.com

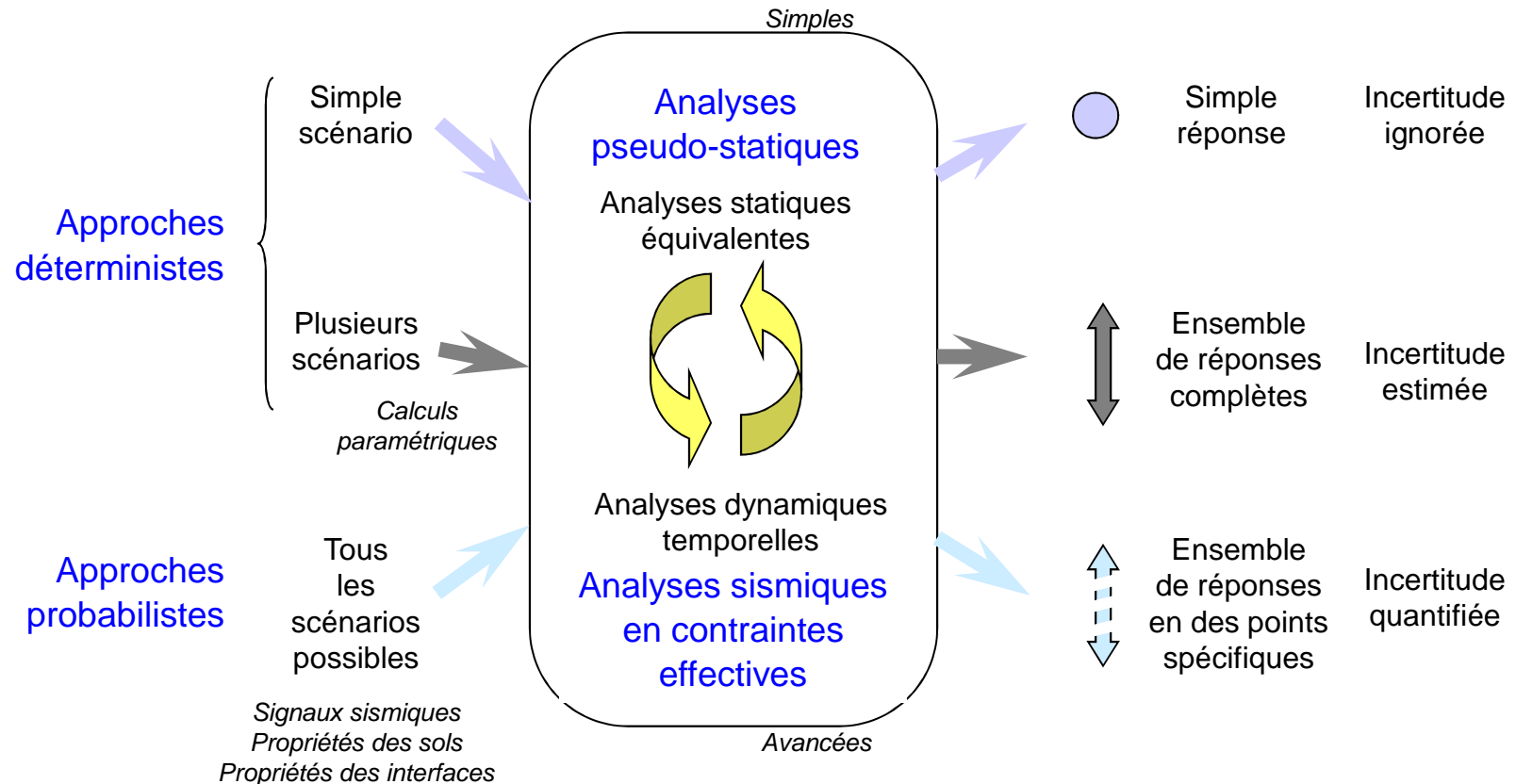


Ouverture sur les pratiques d'études

- ✓ **Méthodes pseudo-statiques**
 - Appliquées aux problèmes d'instabilité (liquéfaction des sols) et de résistance sous séisme (dans les conditions du site)
- ✓ **Ne renseignent pas sur les déplacements**
 - Glissements localisés, tassements, rotations, etc.
- ✓ **D'autres méthodes doivent être envisagées**
 - Cinématiques, dynamiques
- ✓ **Ces études comportent trois étapes**
 - Choix des signaux sismiques (accélérogrammes et spectres)
 - Choix des propriétés dynamiques et d'interaction
 - Modélisation et calculs

Ouverture sur les pratiques d'études

Approches générales des calculs sismiques en géotechnique



Il est recommandé de mettre en œuvre en parallèle différentes méthodes de calcul

Conclusion

Les essais cycliques en laboratoire fournissent
les résistances cycliques des sols
et leurs propriétés dynamiques

Des progrès restent à accomplir sur les argiles

Les essais in-situ sont essentiels

dans les campagnes de reconnaissances

Les méthodes en usages sont efficaces et
appellent des moyens et beaucoup de soins



Centre d'études et d'expertise sur les risques,
l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Direction territoriale Méditerranée

Fin

