Dynamique, séismes, traitement des sols en zone sismique, reconnaissance des sols, diminution du risque de liquéfaction.

CFMS/AFPS

Paris 05 mai 2004

Identifications des sites pour des projets d'ouvrages en terre

JF Serratrice
CETE Méditerranée

Identification de sites pour des projets d'ouvrages en terre

Sommaire

- Exemples de mécanismes de ruine pour des ouvrages en terre
- La liquéfaction
- Reconnaissance des sites
- Application aux ouvrages en terre
  - renforcements des sols
  - éléments de conception
- Conclusions

Exemples de mécanismes de ruine

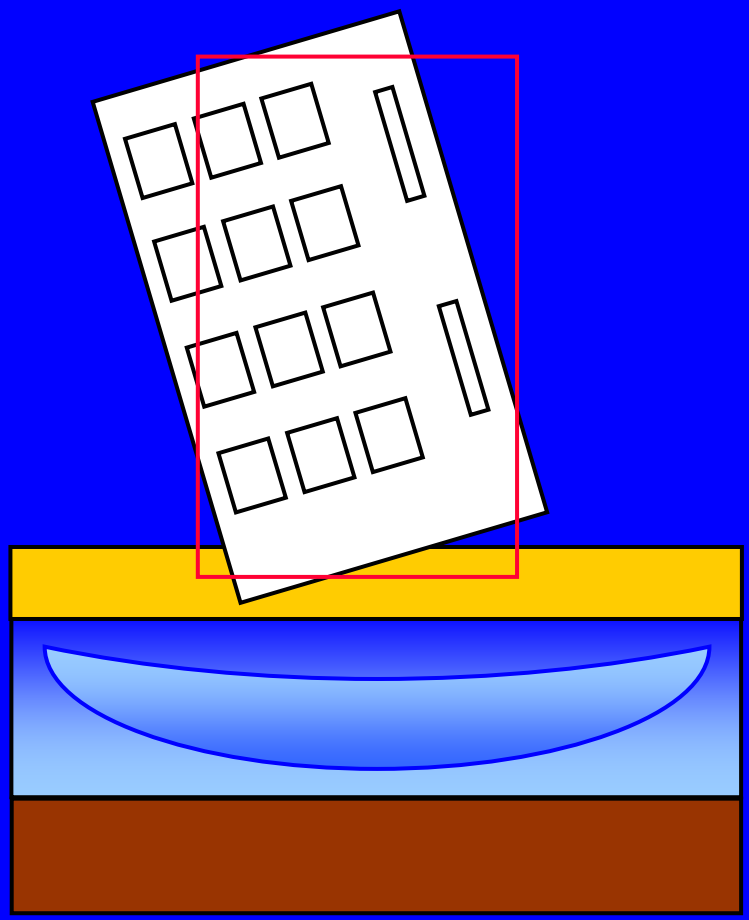
Massifs Ouvrages en terre Ouvrages

• Bâtiments	*Ruptures de fondations*
• Massifs	*Épandage latéral*
• Pentes	*Glissements de terrain*
• Ouvrages en terre	*Remblais, digues, barrages*
• Ouvrages enterrés	*Canalisations, buses, pipes*
• Soutènements	*Quais, murs, parois*
• Ouvrages d'art	*Culées, fondations, fondations profondes*

Exemples de rupture de fondations

Izmit, 1999

Rupture de fondation

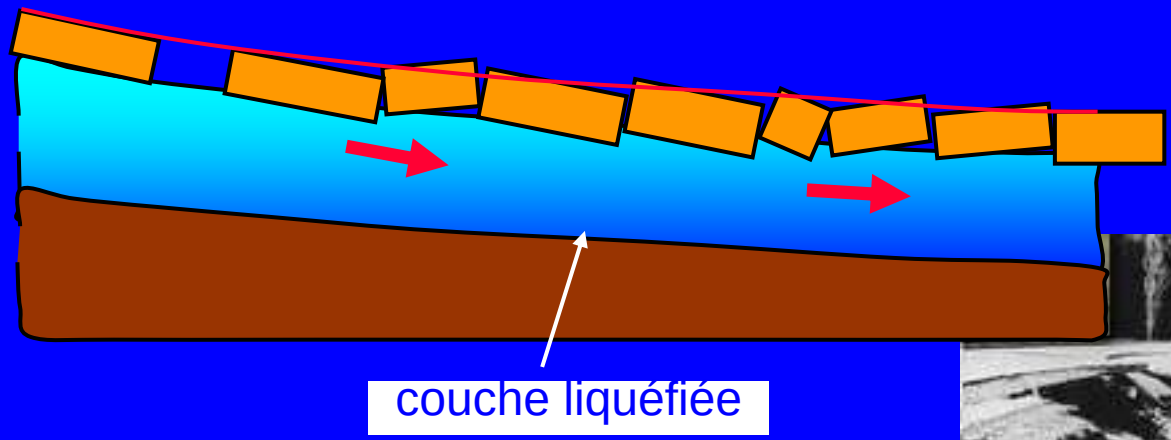


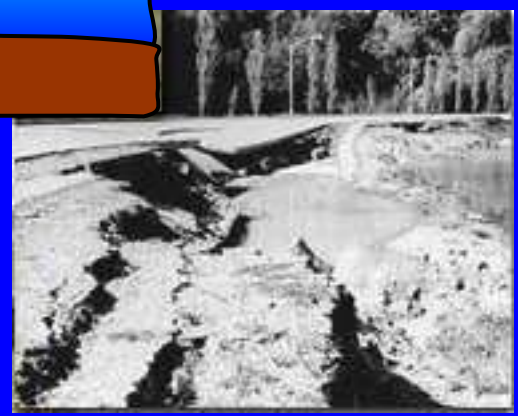
Quand un sol se liquéfie, sa résistance au cisaillement diminue et peut s'annuler, ce qui se traduit par une chute drastique de sa capacité portante et la mise à mal des structures qu'il supporte (*tassements,basculements*).

Épandage latéral

La liquéfaction se produit dans des sols sableux saturés (vallées alluviales, deltas, rives de fleuves et de lacs, bords de mer).

Épandage latéral : *la liquéfaction en profondeur provoque l'entraînement et la rupture des couches superficielles.*





Faibles pentes, sinon oscillations.

Épandage latéral

Guatemala, 1976

Alaska, 1964

Ces ruptures ont été initiées par la liquéfaction de lentilles de sables au sein des massifs.

Épandage latéral

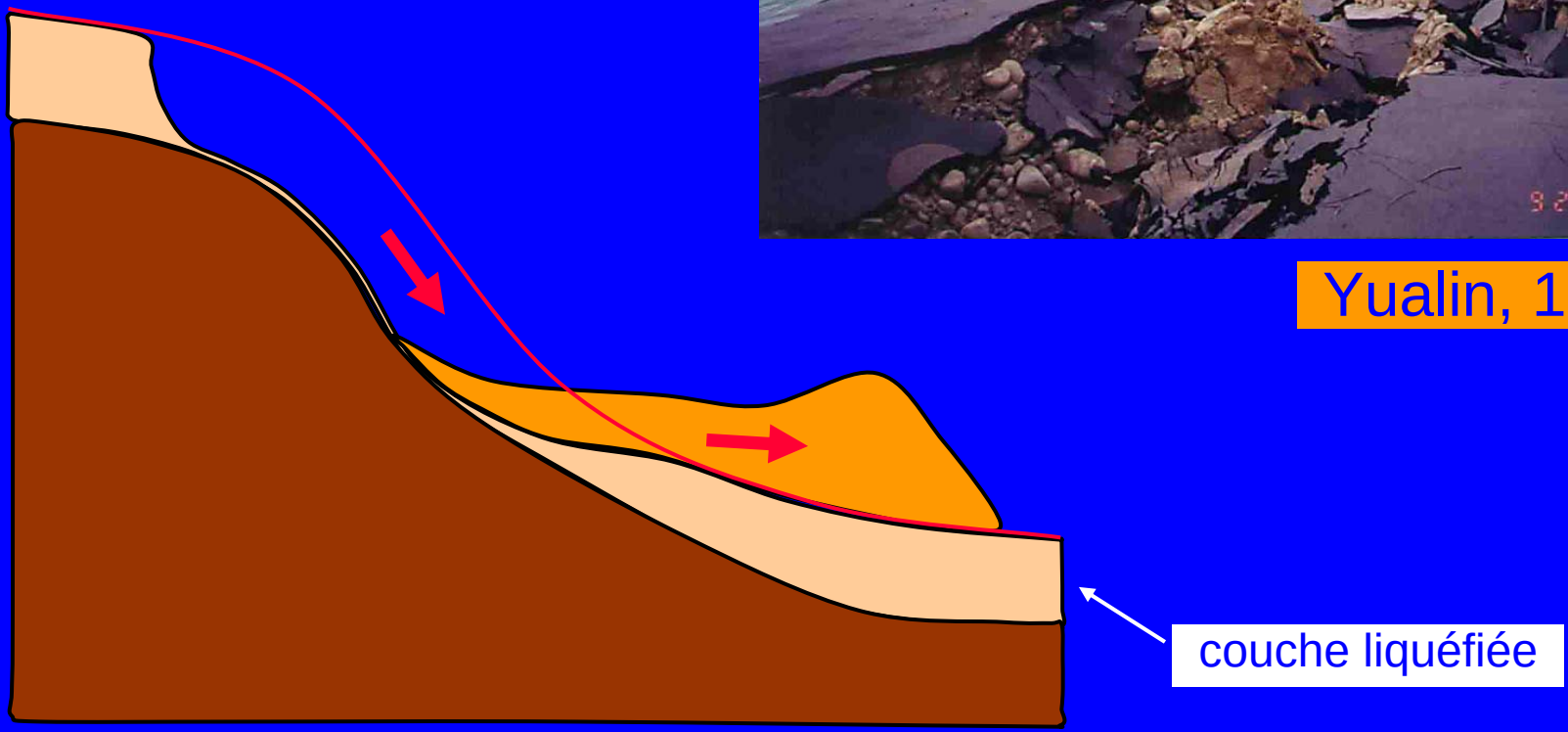
Ruptures de berges.

Olympia, 2001

Glissement de terrain

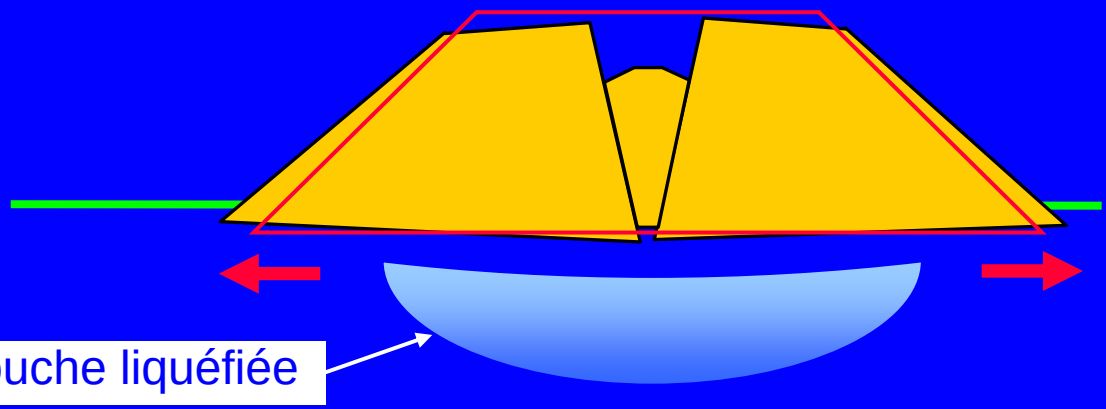
Génération de pressions interstitielles
Perte de résistance et effet gravitaire.

Yualin, 1999



Ouvrages en terre Remblais

L'étalement latéral de la couche liquéfiée sous le remblai entraîne la dislocation du corps de remblai et des déplacements latéraux opposés.



Alaska, 1964

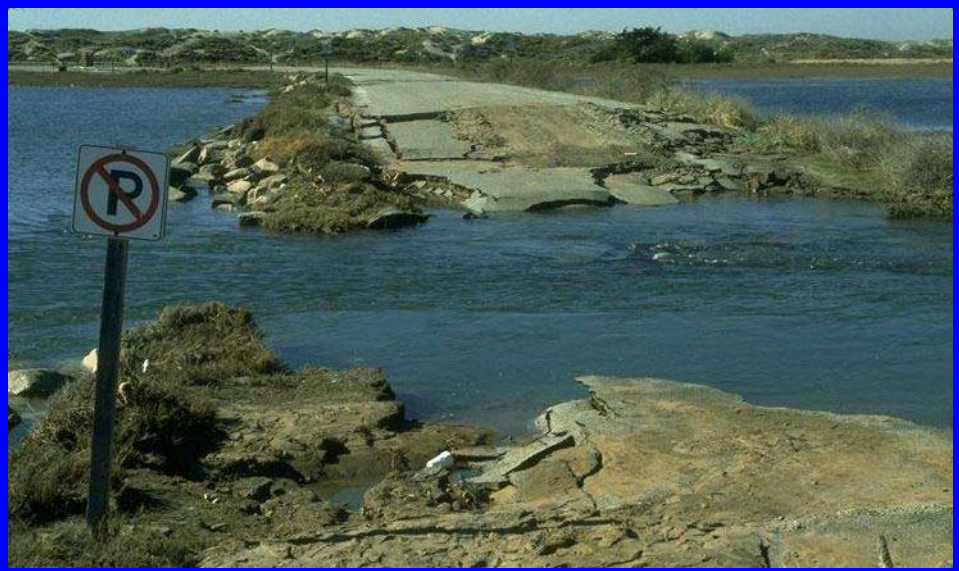
Ouvrages en terre
Remblais

Taichung, 1999

Costa Rica, 1991

Tokachi-Oki, 2003

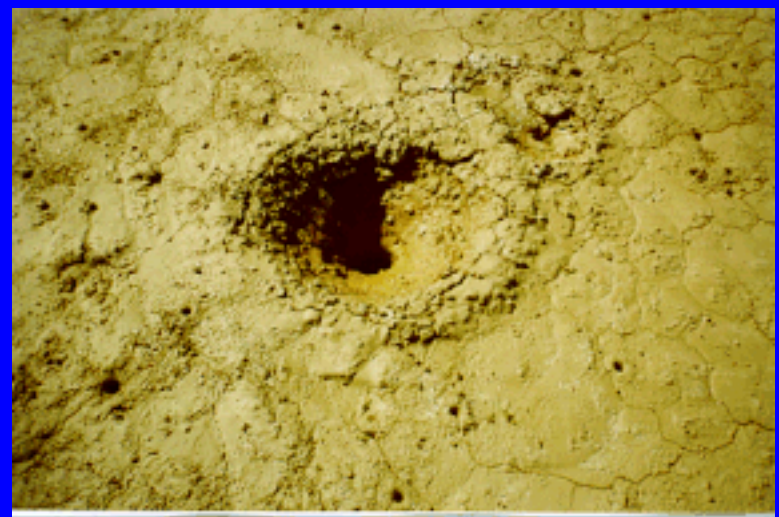
Volcan de sable



Ouvrages en terre
Remblais

Ouvrages en terre
Remblais

Bhuj, 2001



Spitak, 1988

Effondrement du parement amont d'un barrage

San Fernando, 1971

Ouvrages en terre
Digues

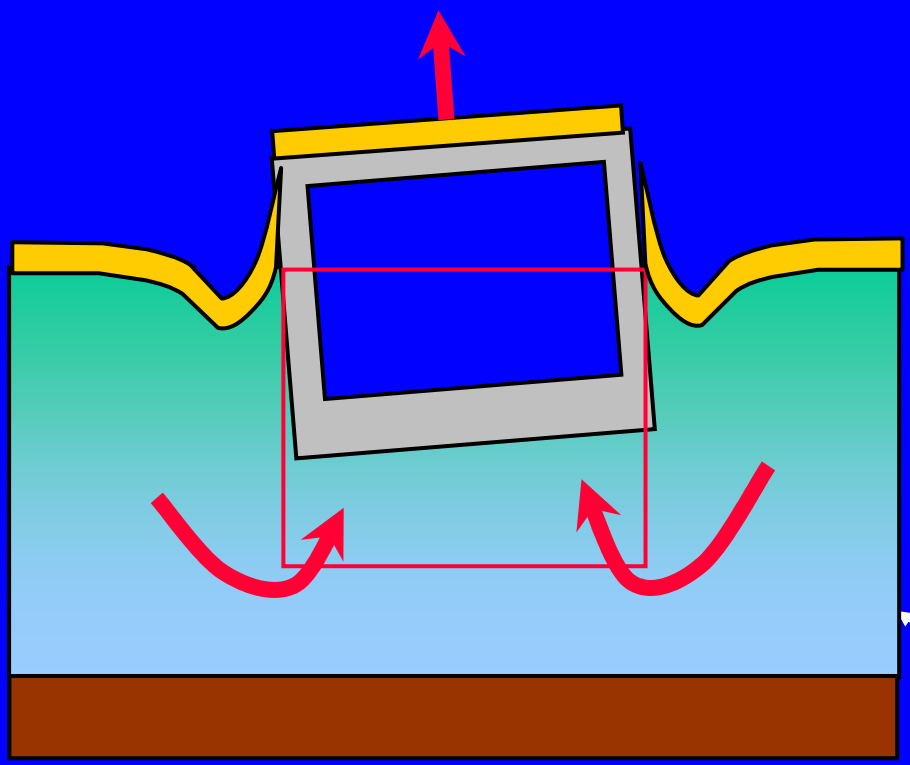
Bhuj, 2001

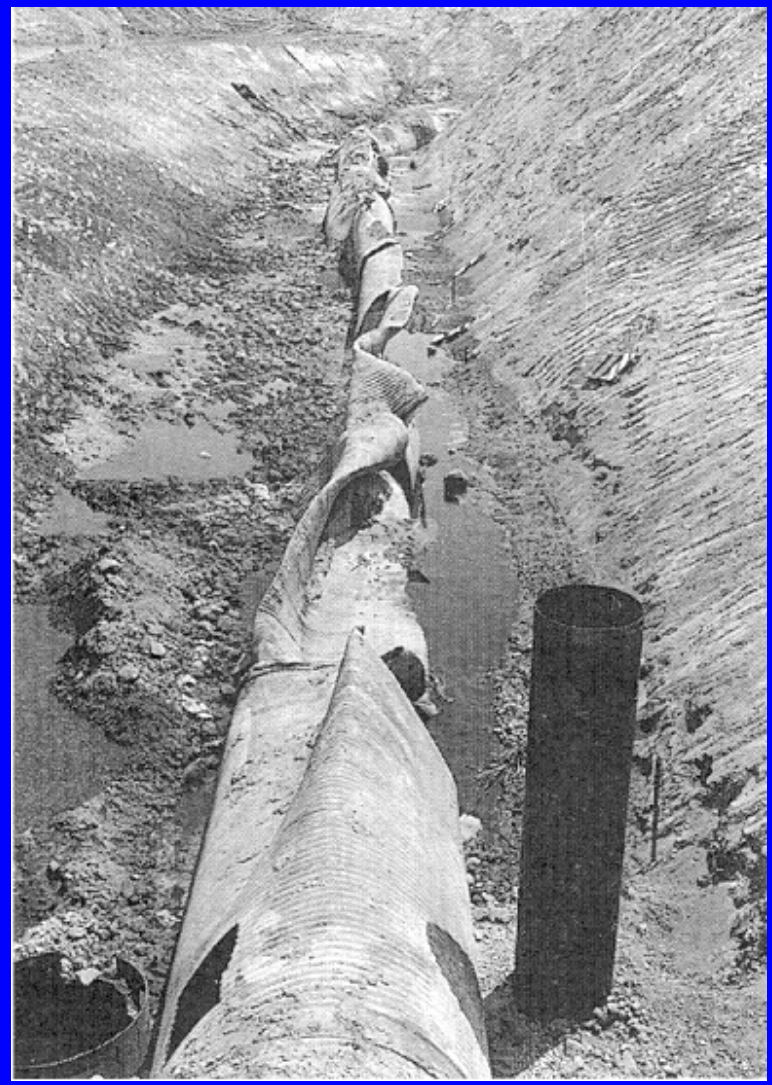
Ouvrages en terre Remblais

Southern Peru, 2001

Ouvrages enterrés

La liquéfaction produit le soulèvement des ouvrages enterrés ou leur rupture.

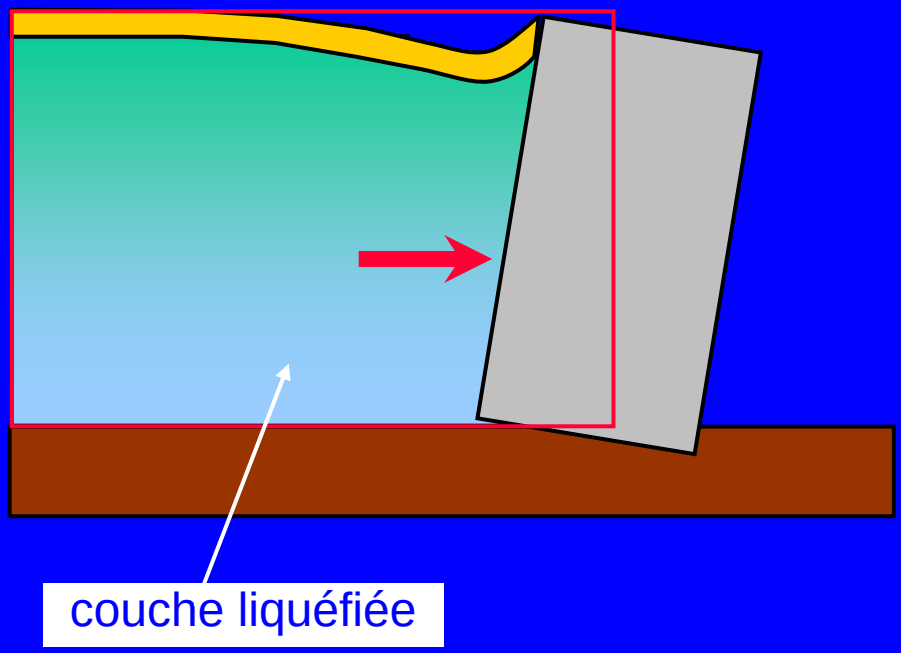




Northridge, 1994

Déplacement latéral de quais

La liquéfaction se produit dans des sols remblayés saturés (remblais hydrauliques) et provoque de fortes poussées sur les ouvrages de soutènement.

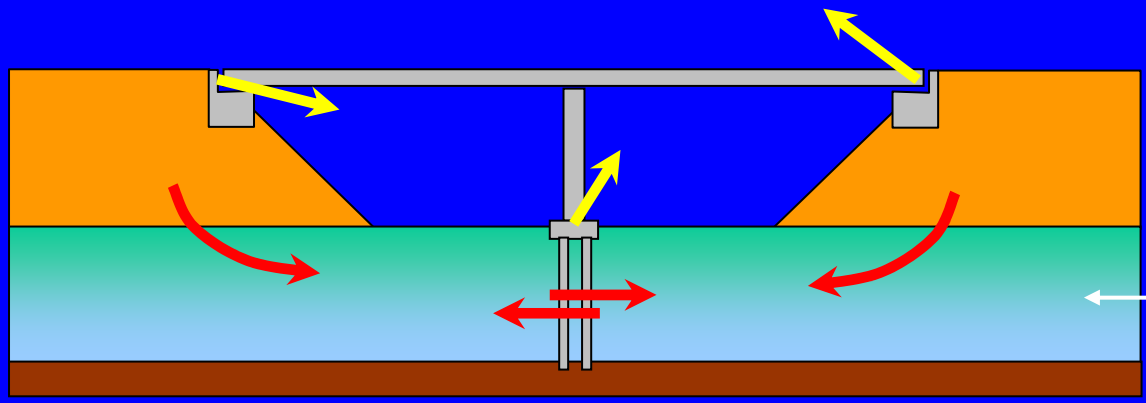


Kobe, 1995

Déplacement latéral de quais

Kobe, 1995

Actions sur les ouvrages d'art



efforts

déplacements

couche liquéfiée

????

Destruction d'ouvrages

Izmit, 1999

Costa Rica, 1991

Niigata, 1964

Destruction d'un ouvrage

La liquéfaction provoque de grands déplacements dans le massif de sol et produit des interactions fortes sur les fondations.

Expression de la liquéfaction

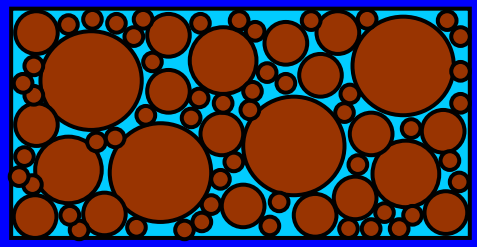
Taichung, 1999

La liquéfaction affecte le massif de sol et se traduit par de profonds désordres en surface.

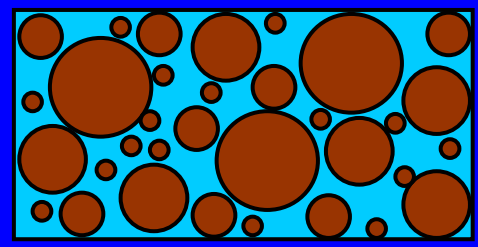
La liquéfaction des sols

Un sol sableux saturé peut se trouver dans différentes états de compacité :

état dense



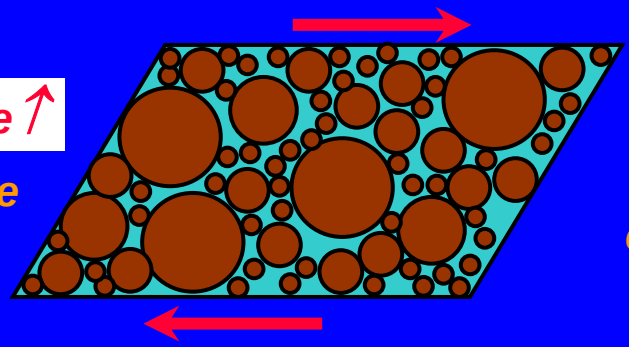
état lâche



Un cisaillement produit des effets différents :

Volume ↑

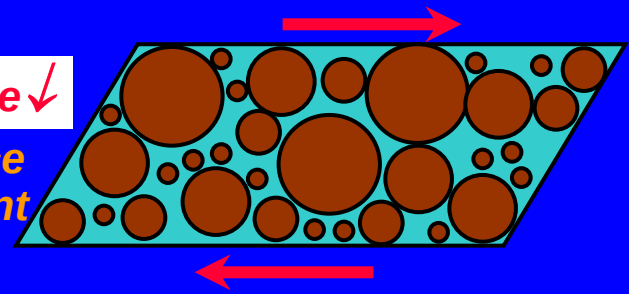
dilatance



Pression interstitielle ↓

Volume ↓

contractance
effondrement



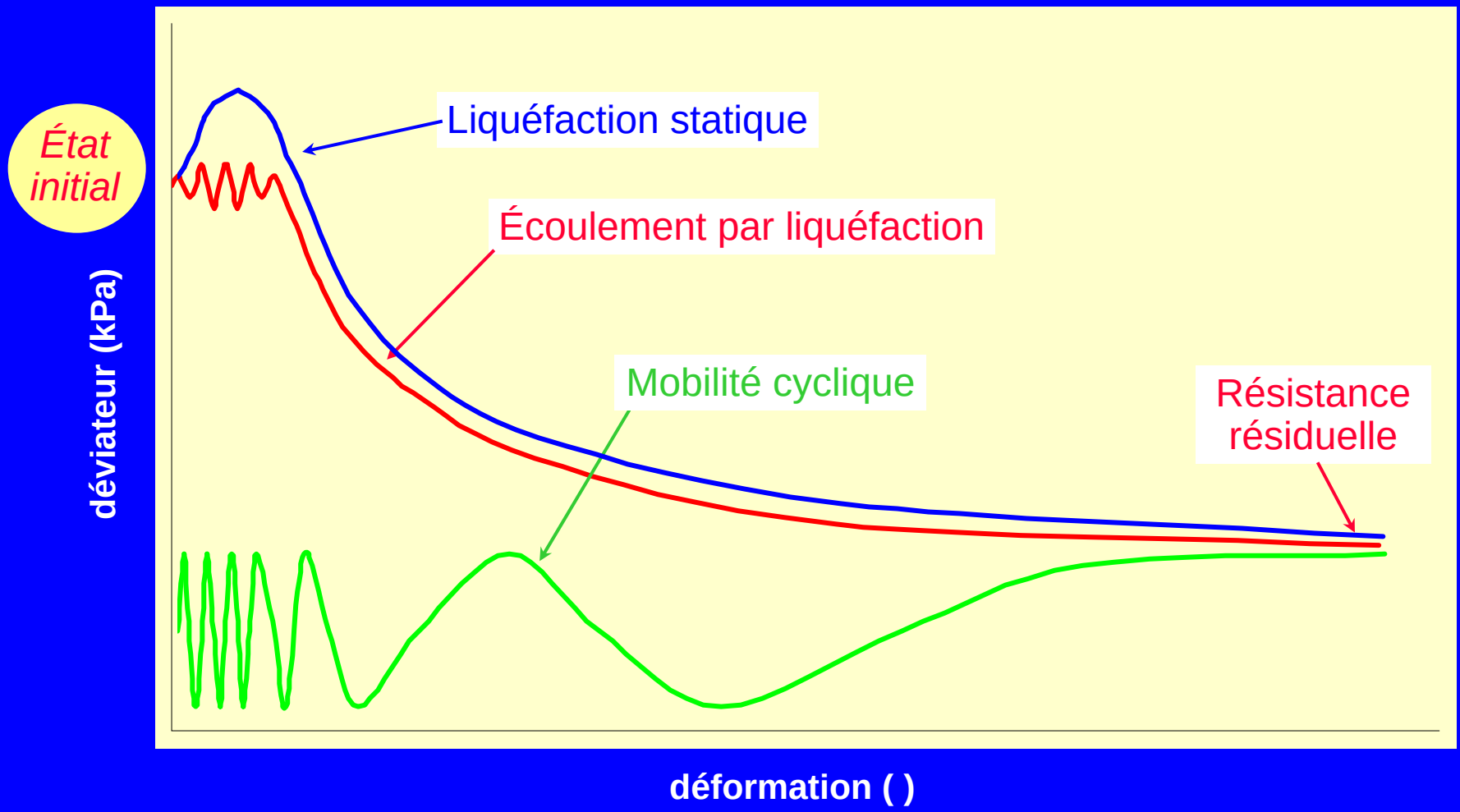
Pression interstitielle ↑

Si la pression interstitielle augmente jusqu'à compenser les chargements extérieurs, les contraintes inter granulaires s'annulent et le milieu devient liquide.

D'où la perte de résistance au cisaillement

et l'apparition de la liquéfaction.

La liquéfaction des sols

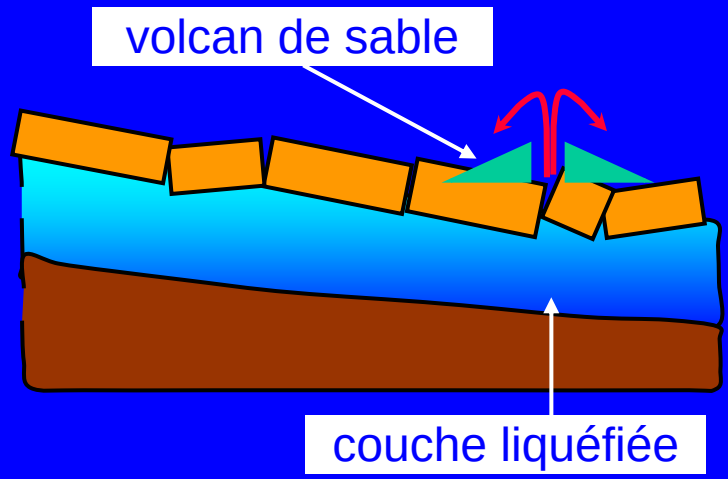


Si les charges statiques sont plus grandes que la résistance résiduelle, il y a écoulement (initiation cyclique ou statique). Sinon, il y a mobilité cyclique.

La liquéfaction des sols

Le terme de liquéfaction est utilisé en pratique pour décrire différents phénomènes, dont les effets sont similaires, ce qui les rend difficiles à distinguer. Les mécanismes qu'ils produisent sont classés en deux catégories principales :

- écoulement par liquéfaction,
- mobilité cyclique.



Expression de la liquéfaction

Expression de la liquéfaction

Taichung, 1991

Déplacement relatif du sol et de l'ouvrage.

Comment évaluer la susceptibilité d'un site à la liquéfaction ?

- Critères historiques :

  Observations tirées des séismes récents.

  Un sol liquéfié par le passé peut se liquéfier à nouveau.

- Critères géologiques :

  Nature du sol.

  Formation du sol (dépôt marin, alluvial, éolien, etc.).

- Critères géotechniques :

  Type de sol (sables, silt, argile, etc.), granulométrie,
  état initial, densité, saturation, résistance, etc.

$\Rightarrow$ Reconnaissances géotechniques

suivant l'importance de l'ouvrage et l'avancement du projet

Reconnaissance des sites

Deux familles de méthodologies complémentaires :

Prélèvements et essais de laboratoire.

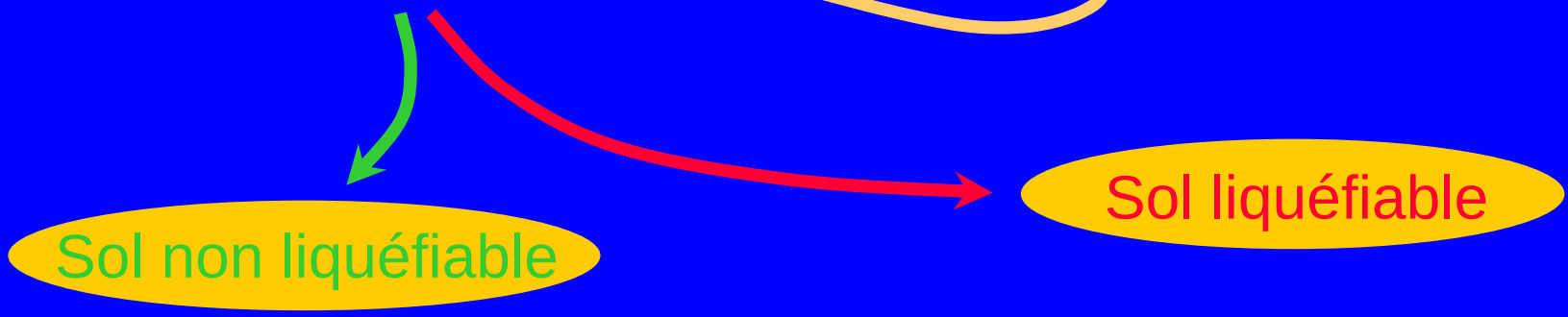
Essais en place :

SPT CPT Piézocône Pressiomètre

Deux niveaux d'investigation :

Identifications
- Sols exempts du risque de liquéfaction
- Sols suspects

Essais mécaniques



Évaluation du potentiel de liquéfaction

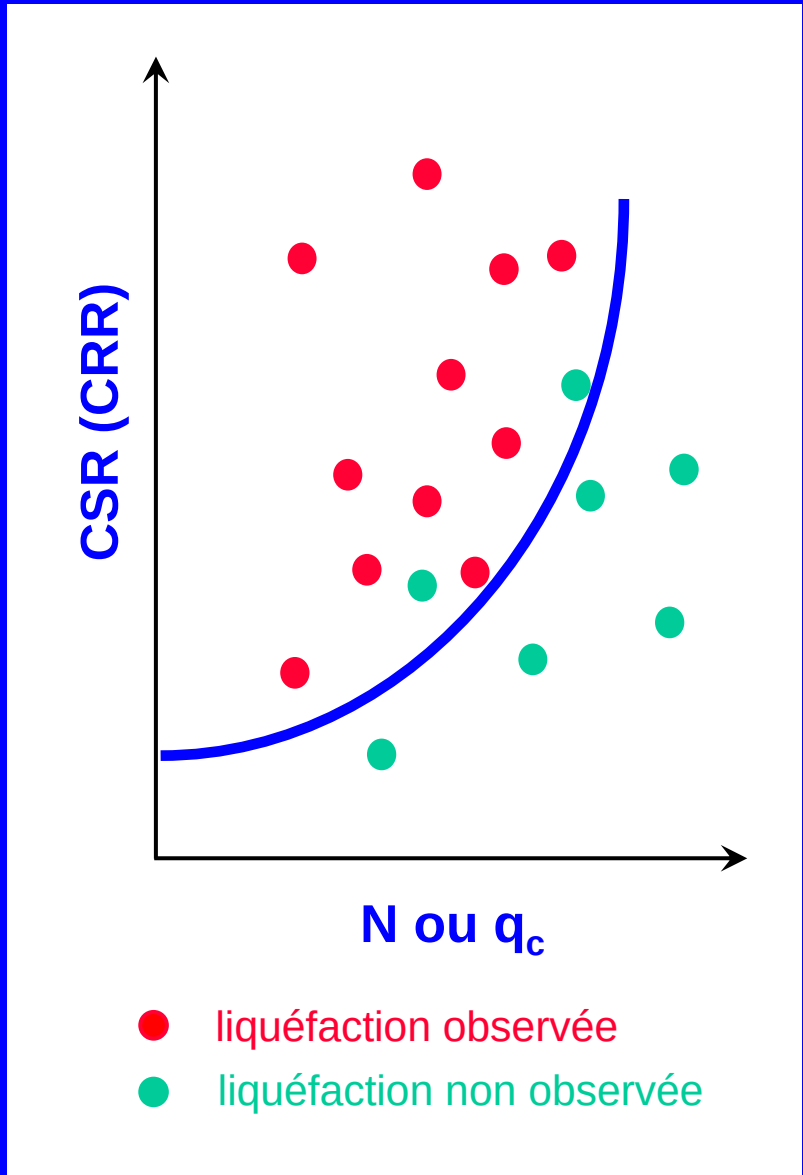
Des classifications ont été établies d'après l'analyse des séismes passés, quand il a été possible d'évaluer à la fois la sollicitation sismique et les caractéristiques des sols liquéfiés.

Ces caractéristiques comptent :

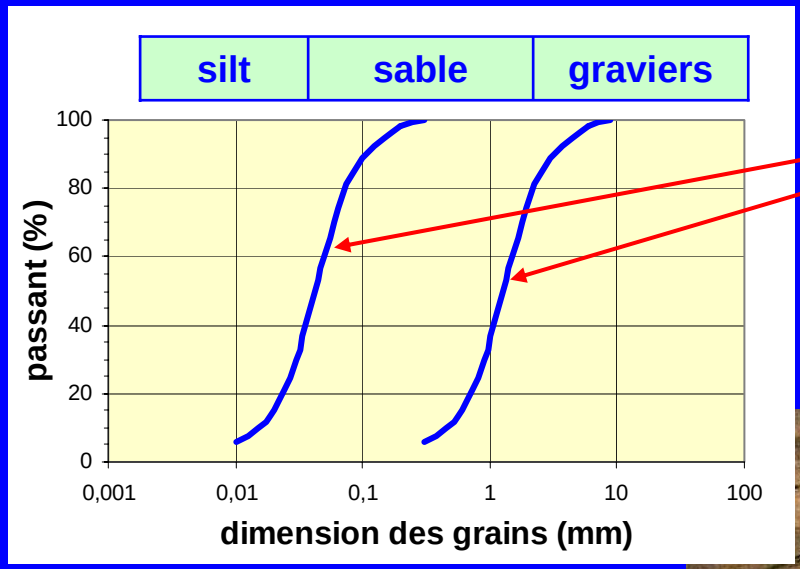
- des propriétés physique des sols (granulométrie, densité, etc.),
- des résistances mécaniques.

Le potentiel de liquéfaction est évalué en comparant la sollicitation sismique et la résistance à la liquéfaction du sol.

Les propriétés physiques des sols permettent de repérer les sols suspects du risque de liquéfaction ou ceux qui en sont exempts.



Fuseau granulométrique des sols liquéfiables



Limites inférieures et supérieures pour la liquéfaction

Loma Prieta, 1989

Identification des sols liquéfiables

Essais de labo :	sols sableux	teneur en eau, densité, saturation analyses granulométriques densités min et max
	sols argileux	teneur en eau, densité, saturation limites de consistance

Sols considérés a priori comme suspects de liquéfaction :

a) les sables et les silts présentant les caractéristiques suivantes :

sol saturé
granulométrie uniforme telle que $C_u = d_{60}/d_{10} < 15$
diamètre à 50 % tel que $50 < d_{50} < 1500$ µm
état de contrainte à l'état final du projet $\sigma'_v < 200$ kPa (zone Ia Ib)

b) les sols argileux présentant les caractéristiques suivantes :

sol saturé
diamètre à 15 % tel que $d_{15} > 5$ µm
limite de liquidité $w_L < 35$
teneur en eau $w > 0{,}9\ w_L$

Sols considérés comme exempts du risque de liquéfaction :

sols sableux diamètre à 10 % tel que $d_{10} > 2$ mm
sols argileux diamètre à 70 % tel que $d_{70} < 74$ µm
et indice de plasticité $I_p < 10$

Norme NF P 06-013

Données sismiques à utiliser pour la conduite des essais

Norme NF P 06-013

classe de sol	type de sol	
	rocher	roche saine
a	bonne résistance	sols granulaires compacts argiles raides
b	résistance moyenne	sols moyennement compacts
c	résistance faible	sols granulaires lâches argiles molles vases

zone de sismicité	classe d'ouvrage			
	A	B	C	D
0				
Ia		1,0	1,5	2,0
Ib		1,5	2,0	2,5
II		2,5	3,0	3,5
III		3,5	4,0	4,5

Site

type de sol
profondeur

classification du site
S_o, S_1, S_2, S_3

a_N

site	a_{max} (m/s²)
S_1	a_N
S_2	0,9 a_N
S_3	0,8 a_N

zone de sismicité	n
Ia Ib	5
II	10
III	20

a_{max} et n

$\tau_a(z)$

accélération maximale de surface
nombre de cycles équivalents
contrainte de cisaillement cyclique engendrée par le séisme

DYNTTS
Unité triaxiale
cyclique asservie
GDS
GDS
Labo Sols Roches Rhéologie
CETE Méditerranée
Dynamic Triaxial Testing System

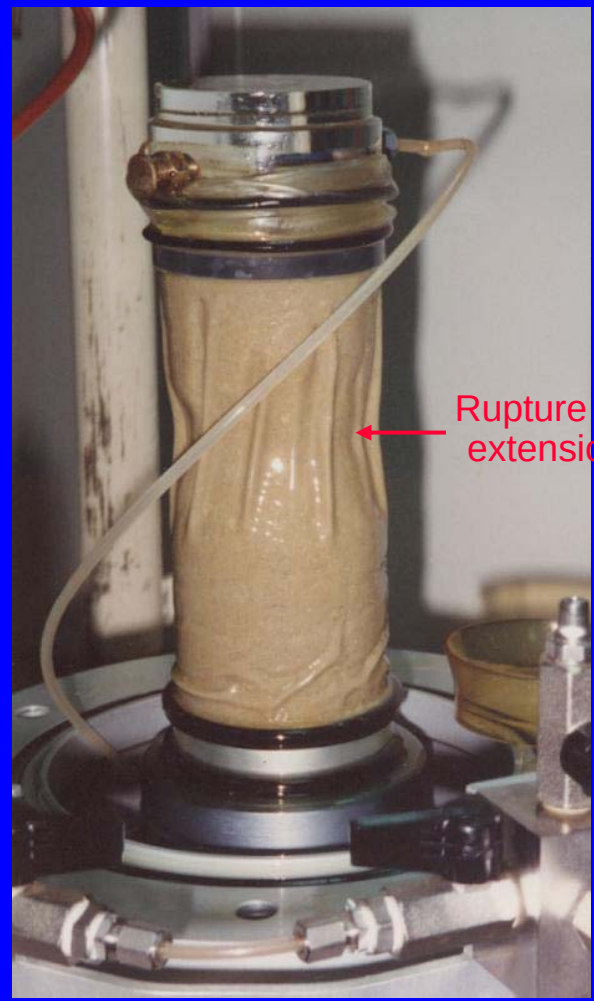
Essais triaxiaux cycliques

Sols testés dans leur état naturel

Sinon, préparation par pluviation

Avant essai

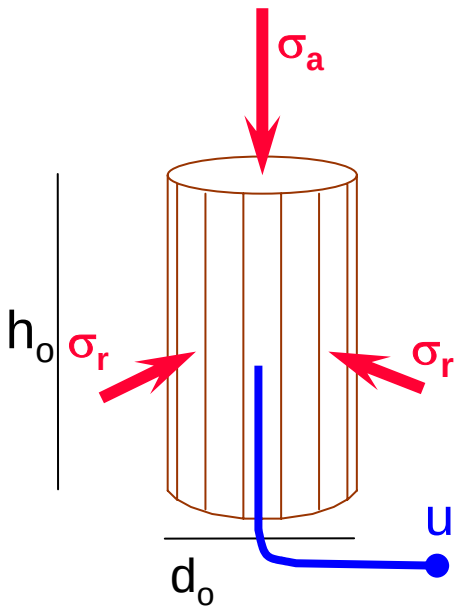
En fin d'essai



Éprouvettes de 76 mm de diamètre

Essai de liquéfaction

essai triaxial au laboratoire



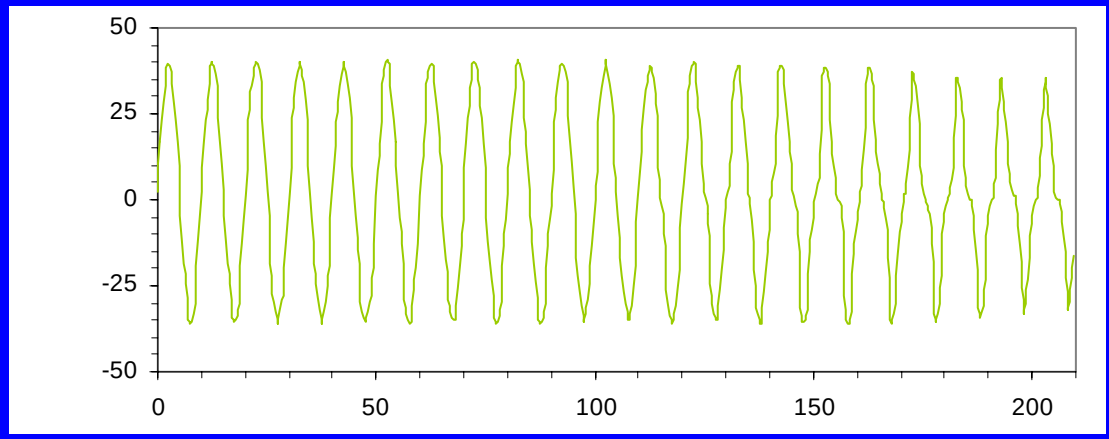
$p = (\sigma_a + 2\,\sigma_r) / 3$

$q = \sigma_a - \sigma_r$

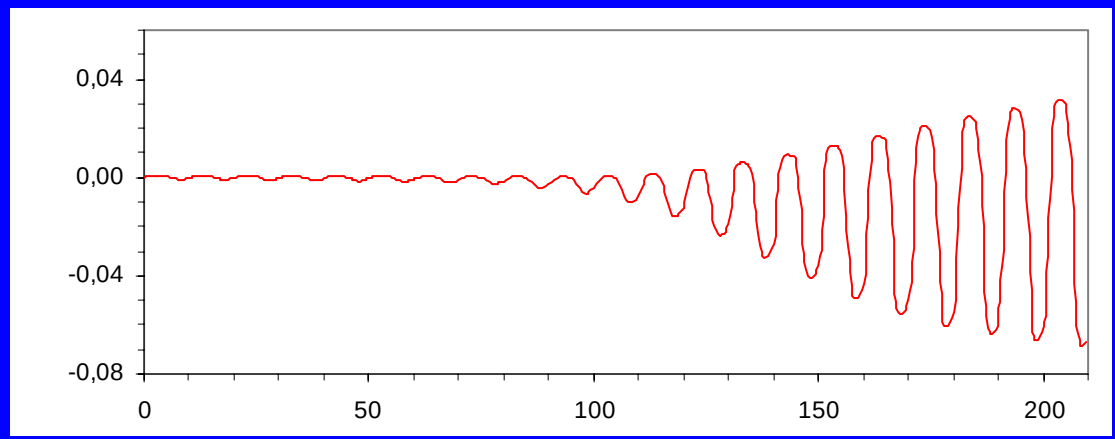
$\varepsilon_a = \Delta h / h_o$

u pression interstitielle

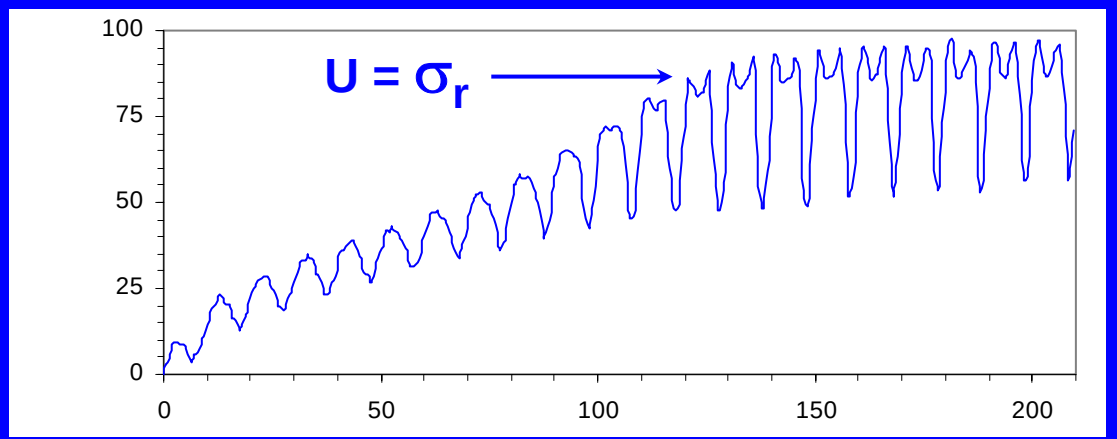
déviateur (kPa)



déformation axiale ( )



p interstitielle (kPa)

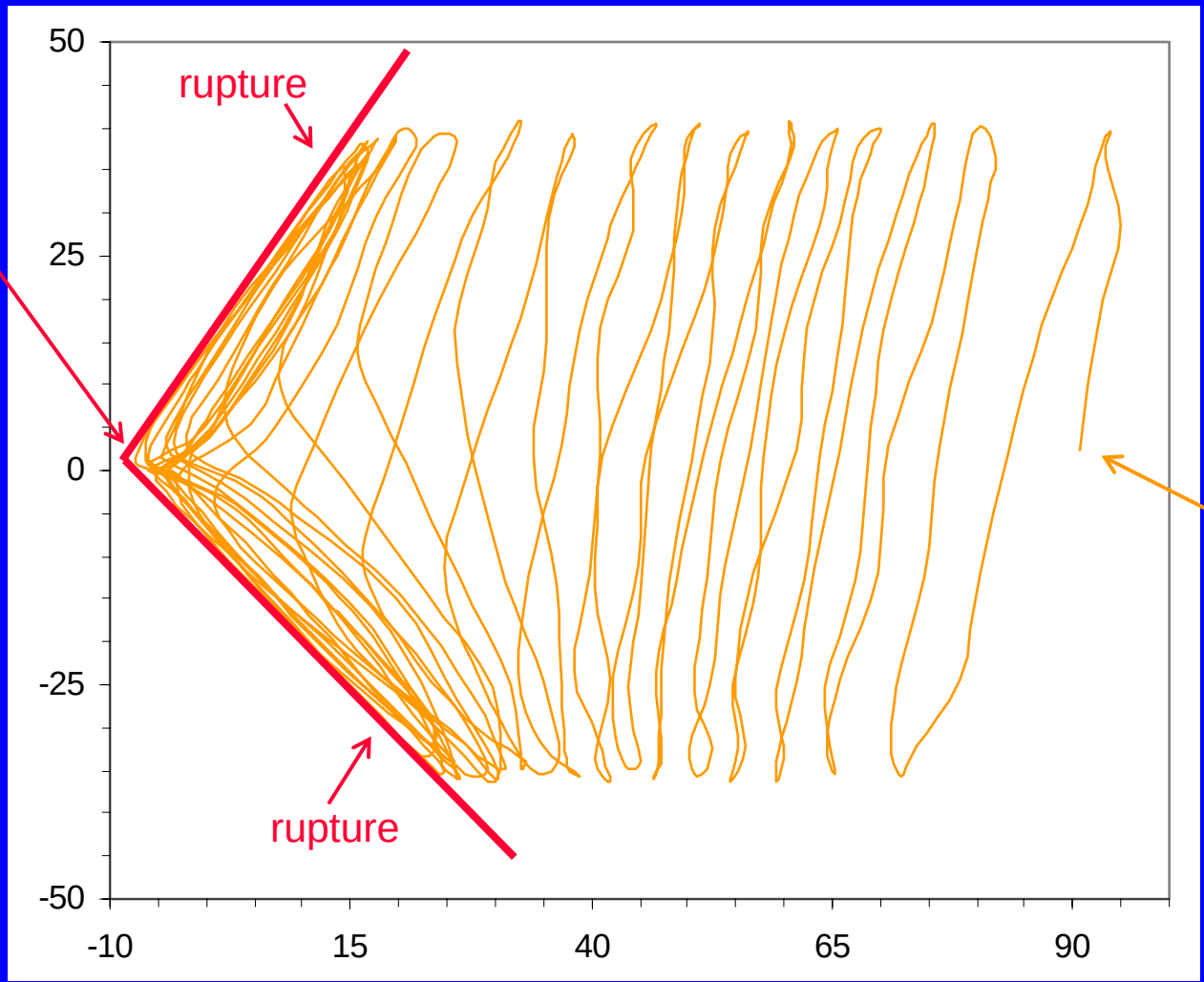


temps (s)

Fréjus

Essai triaxial de liquéfaction

Chemin des contraintes effectives



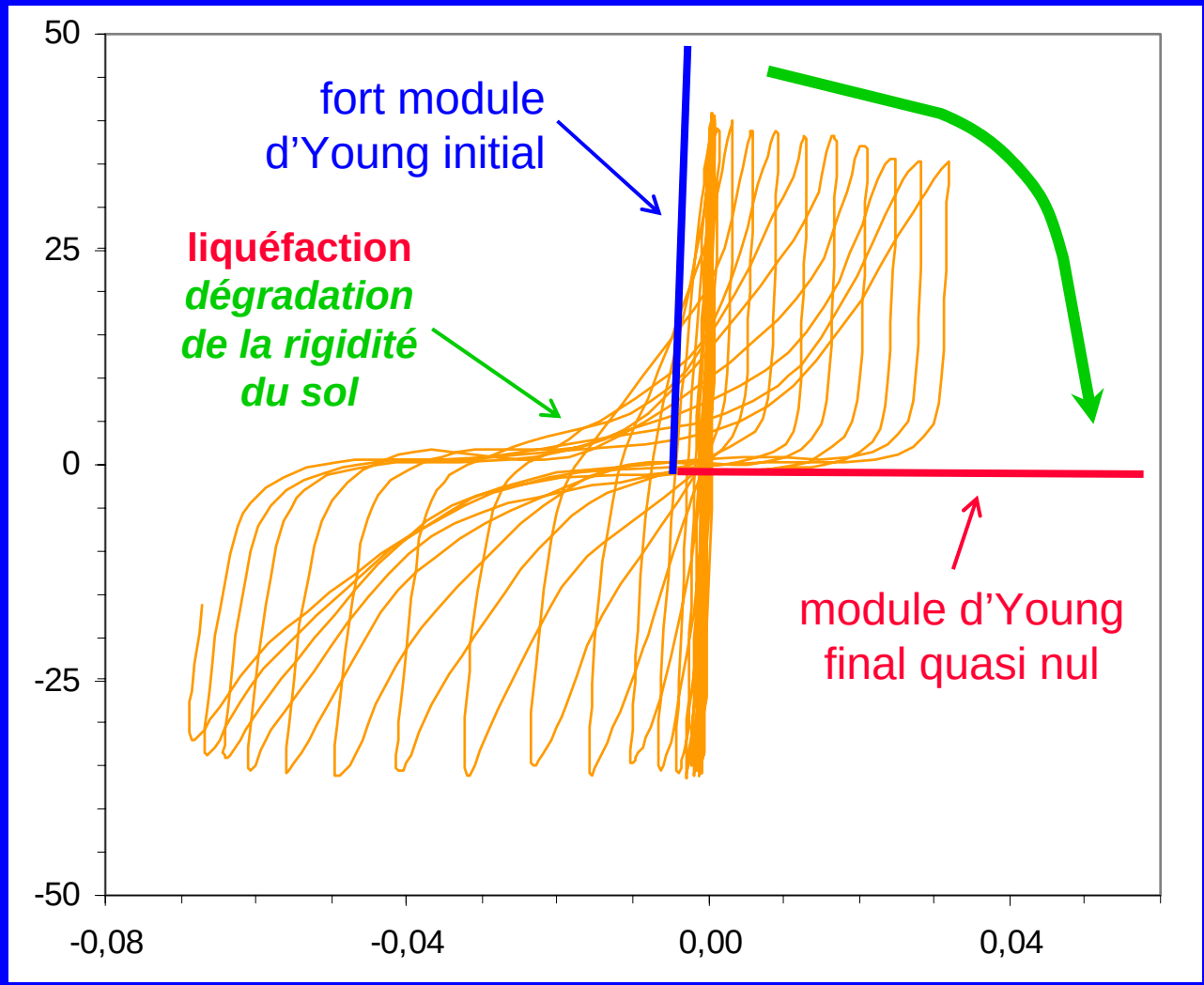
liquéfaction

point de départ stable

Fréjus

Essai triaxial de liquéfaction

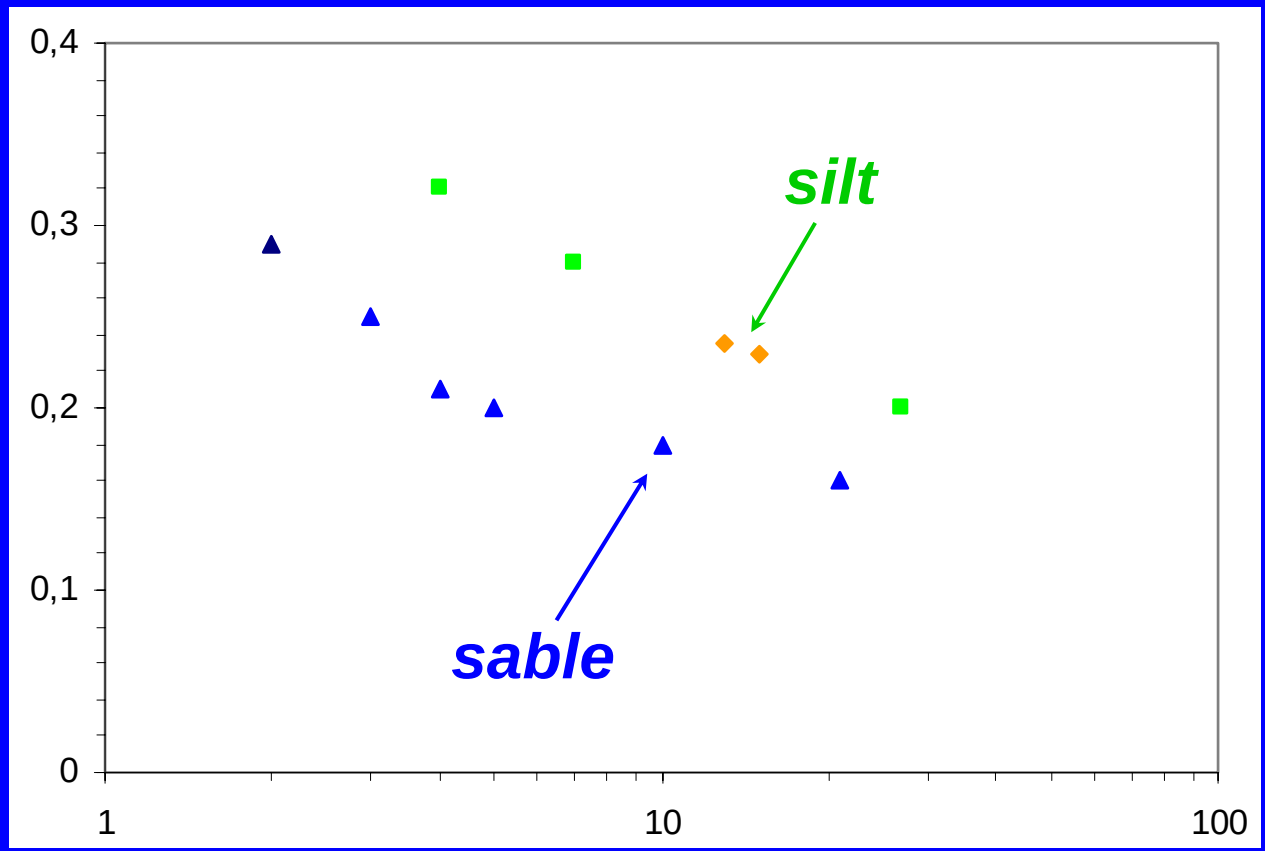
Courbe contrainte déformation



Fréjus

Essai triaxial de liquéfaction

Résistance à la liquéfaction en fonction du nombre de cycles

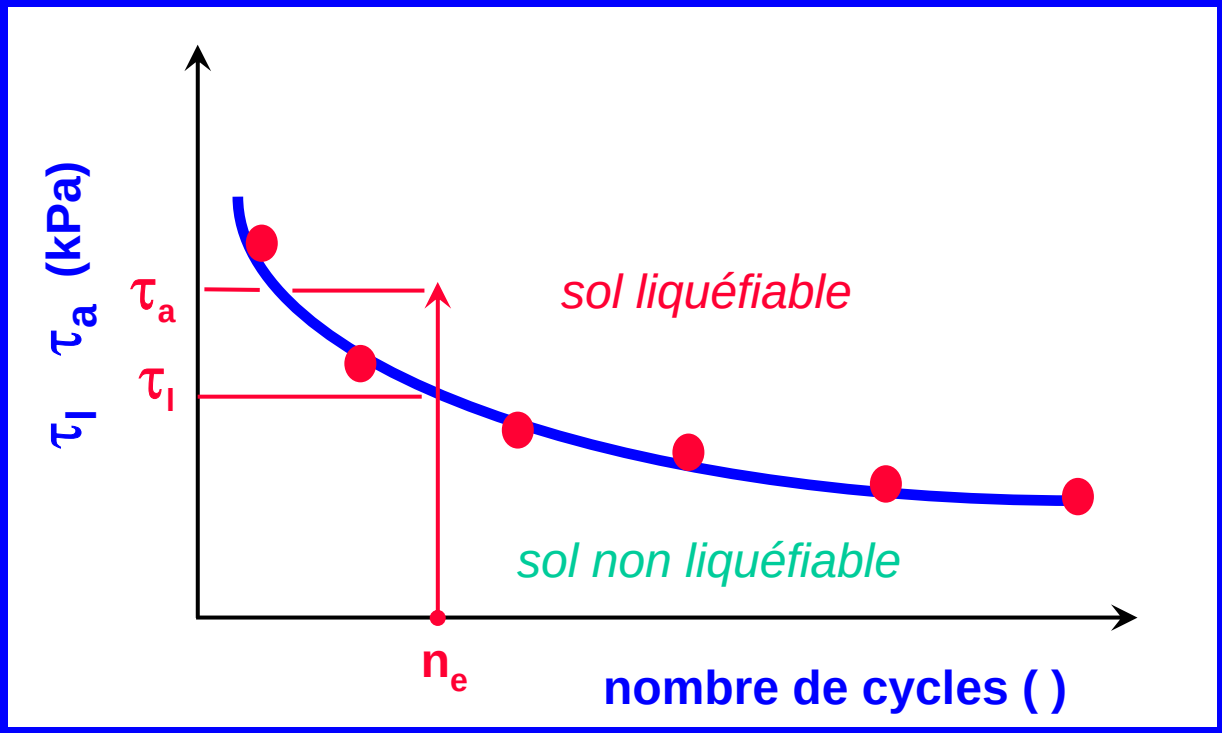


Fréjus

contrainte de cisaillement de liquéfaction (résistance cyclique)

$\tau_l(n)$

Détermination du risque de liquéfaction

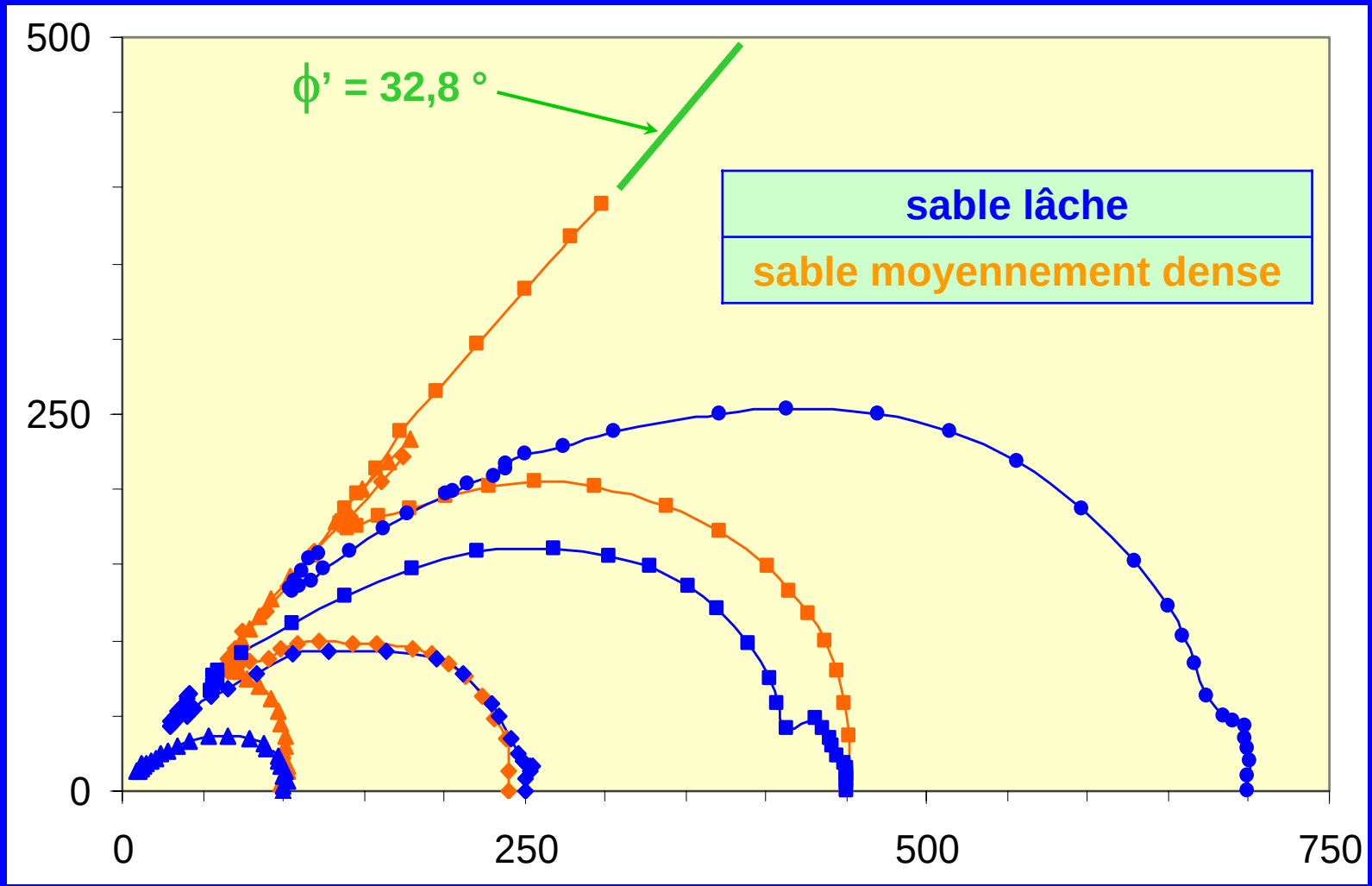


coefficient de sécurité à la liquéfaction

$$F_s = \tau_l / \tau_a$$

$2 < F_s$	$\tau_a < 0{,}5\ \tau_l$	pas de liquéfaction
$1{,}33 \text{ à } 1{,}5 < F_s < 2$	$0{,}5\ \tau_l < \tau_a < 0{,}67 \text{ à } 0{,}75\ \tau_l$	liquéfaction peu probable
$1 < F_s < 1{,}33 \text{ à } 1{,}5$	$0{,}67 \text{ à } 0{,}75\ \tau_l < \tau_a < \tau_l$	liquéfaction probable
$F_s < 1$	$\tau_l < \tau_a$	liquéfaction quasi certaine

Essais de cisaillement CU+u



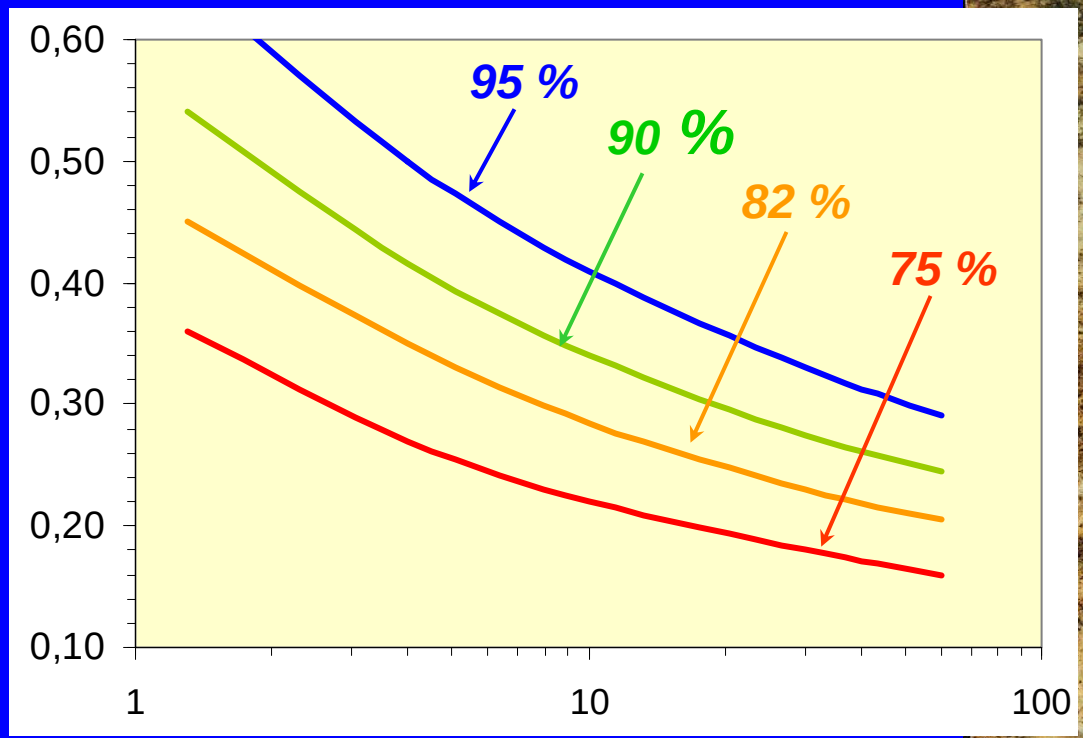
Sable d'Uzès

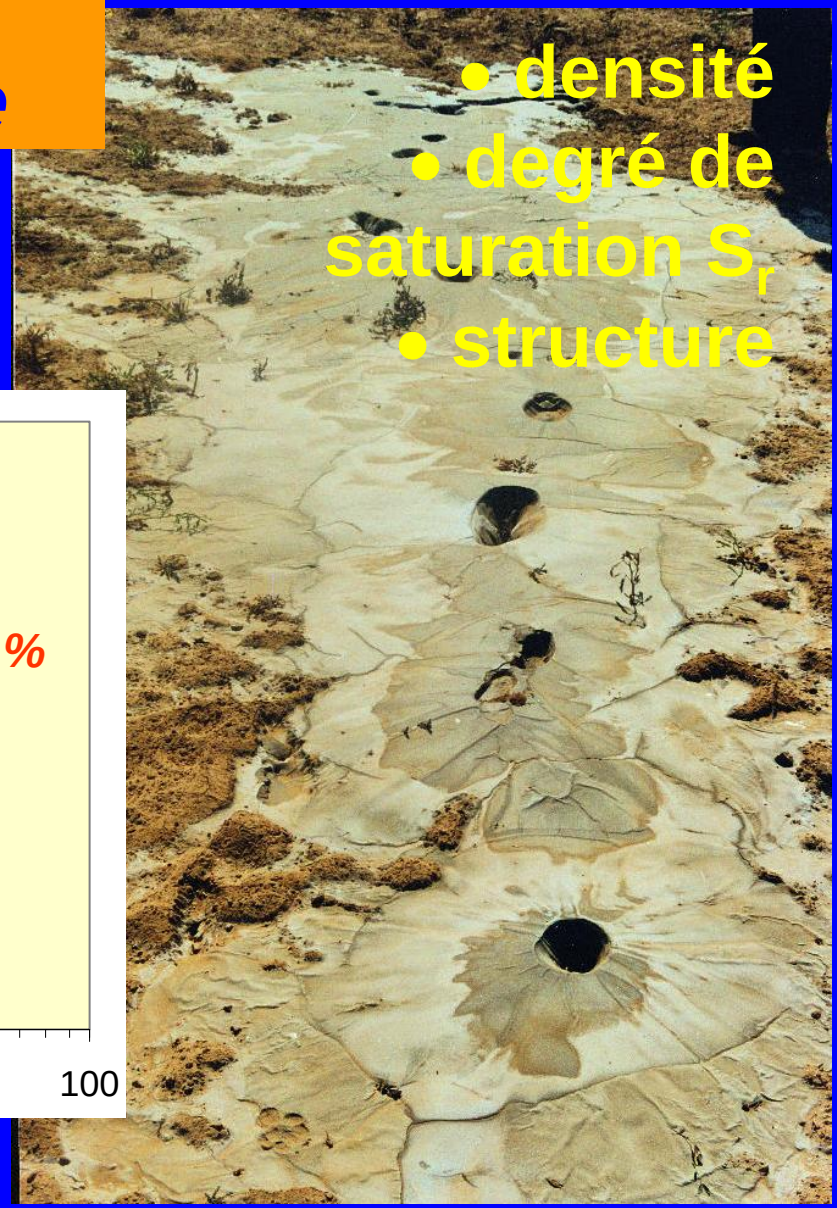
Liquéfaction statique

Paramètres affectant la résistance au cisaillement cyclique

indice de densité (densité relative)

$I_D = (e_{max} – e) / (e_{max} – e_{min})$

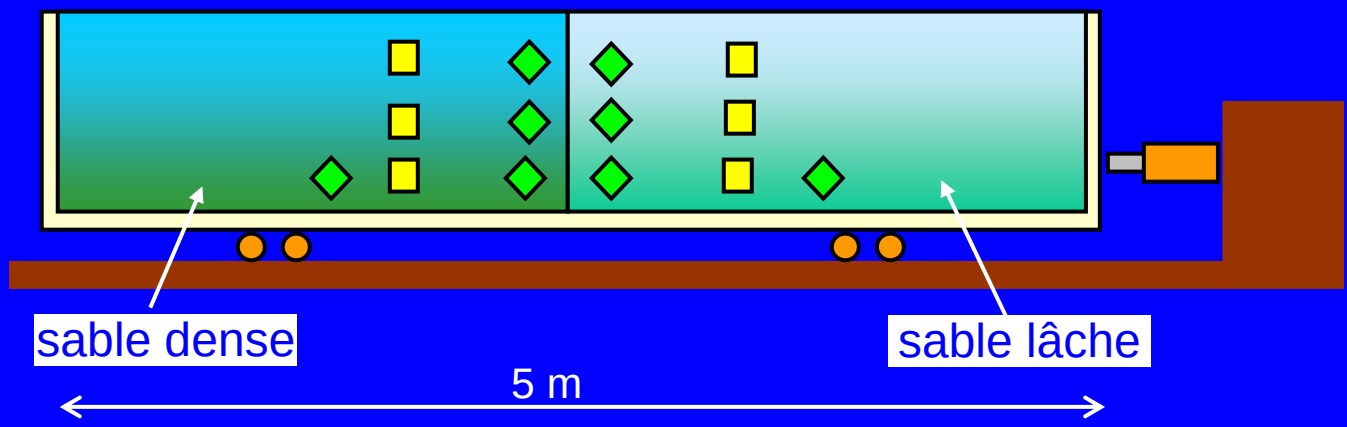


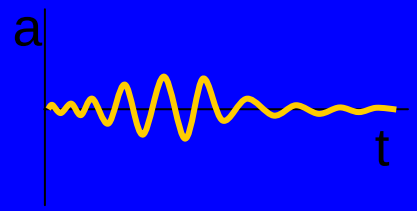


- densité
- degré de saturation S_r
- structure

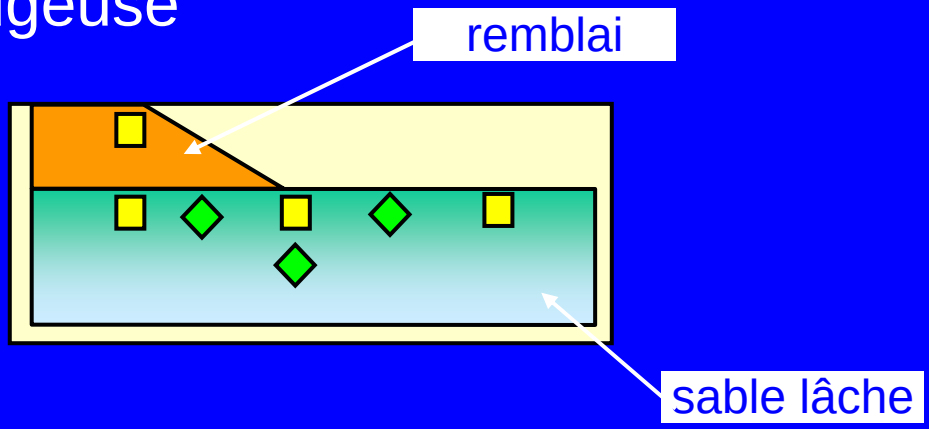
Autres moyens d'essais

table vibrante





centrifugeuse



accéléromètres

capteurs de pression interstitielle

Autres classifications des sites

Exemple de classification par combinaison :

- du type de sol,
- et de l'accélération.

		accélération		
		faible *0 à 0,2 m/s²*	**moyenne** *0,2 à 0,4 m/s²*	**forte** *supérieure à 0,4 m/s²*
sol	**lâche**	2	3	4
	moyennement dense	1	2	3
	dense	1	1	2
	très dense	1	1	1

classe	risque
1	pas de liquéfaction
2	liquéfaction peu probable
3	liquéfaction probable
4	liquéfaction quasi certaine

Comment réduire le risque de liquéfaction ?

- les bâtiments
- les ouvrages en terre
- les ouvrages d’art

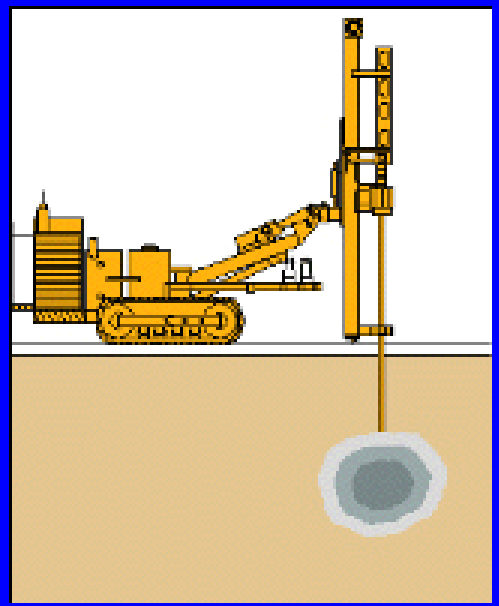
- Construire ailleurs
- Renforcer les massifs de sol
- Structures résistantes

Renforcement des sols Méthodes

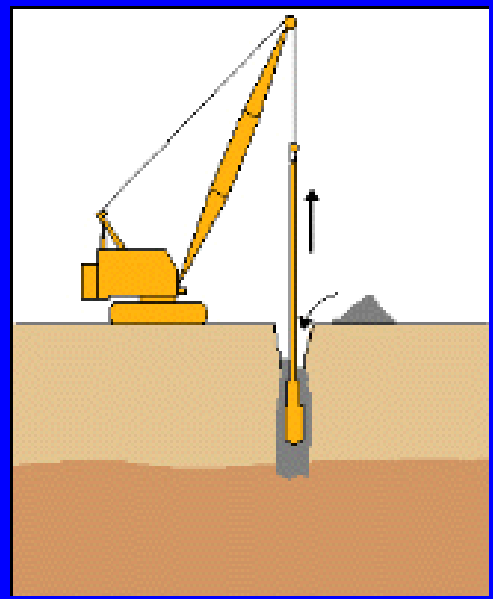
- densifier le sol,
- augmenter sa résistance,
- le confiner,
- le drainer.

Compactage dynamique

Injections
Jet grouting
Colonnes ballastées



Pieux
Drainages
Vibro-flottation



Renforcement des sols

Les performances des méthodes adoptées pour lutter contre les effets de la liquéfaction dépendent :

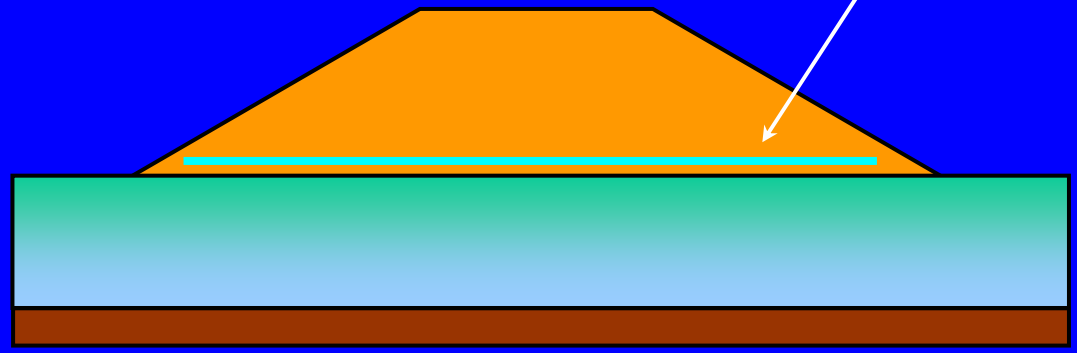
- du type de renforcement et de son adéquation avec le site et le projet,
- des dimensions des zones renforcées,
- de leur position.

Plusieurs types de renforcements peuvent être envisagés sur un même site.

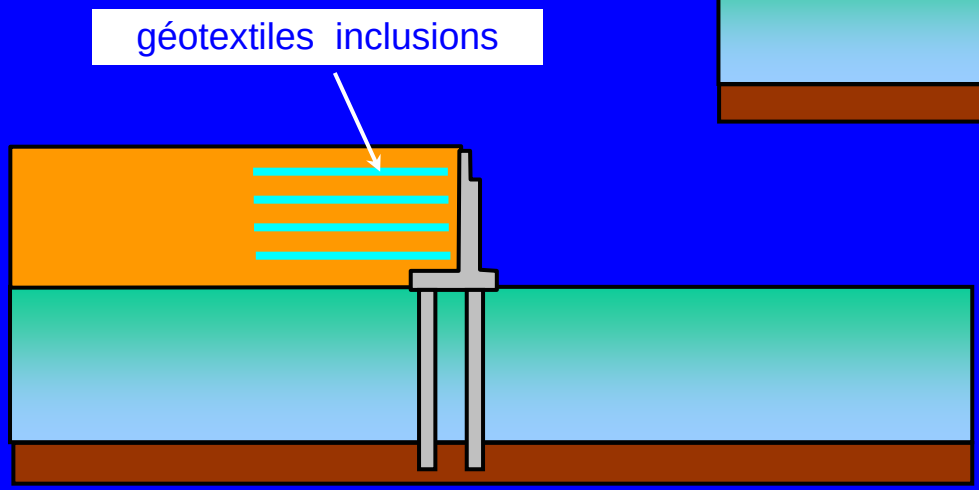
Il faut considérer l'ouvrage et les zones renforcées du massif comme un seul ensemble.

Renforcement des remblais
Quelques solutions

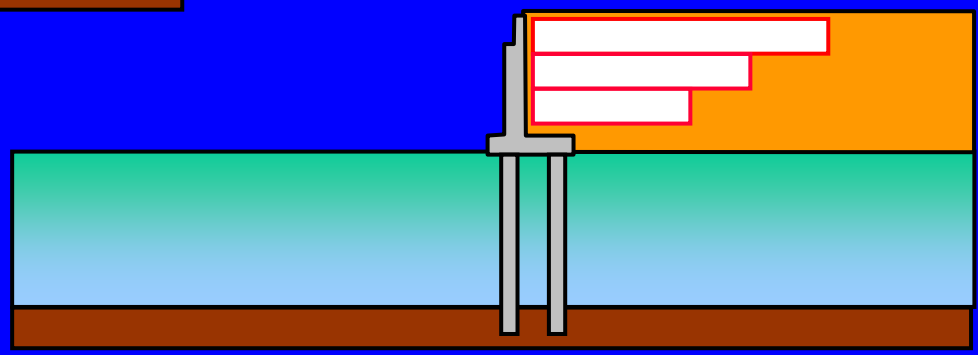
géotextiles inclusions



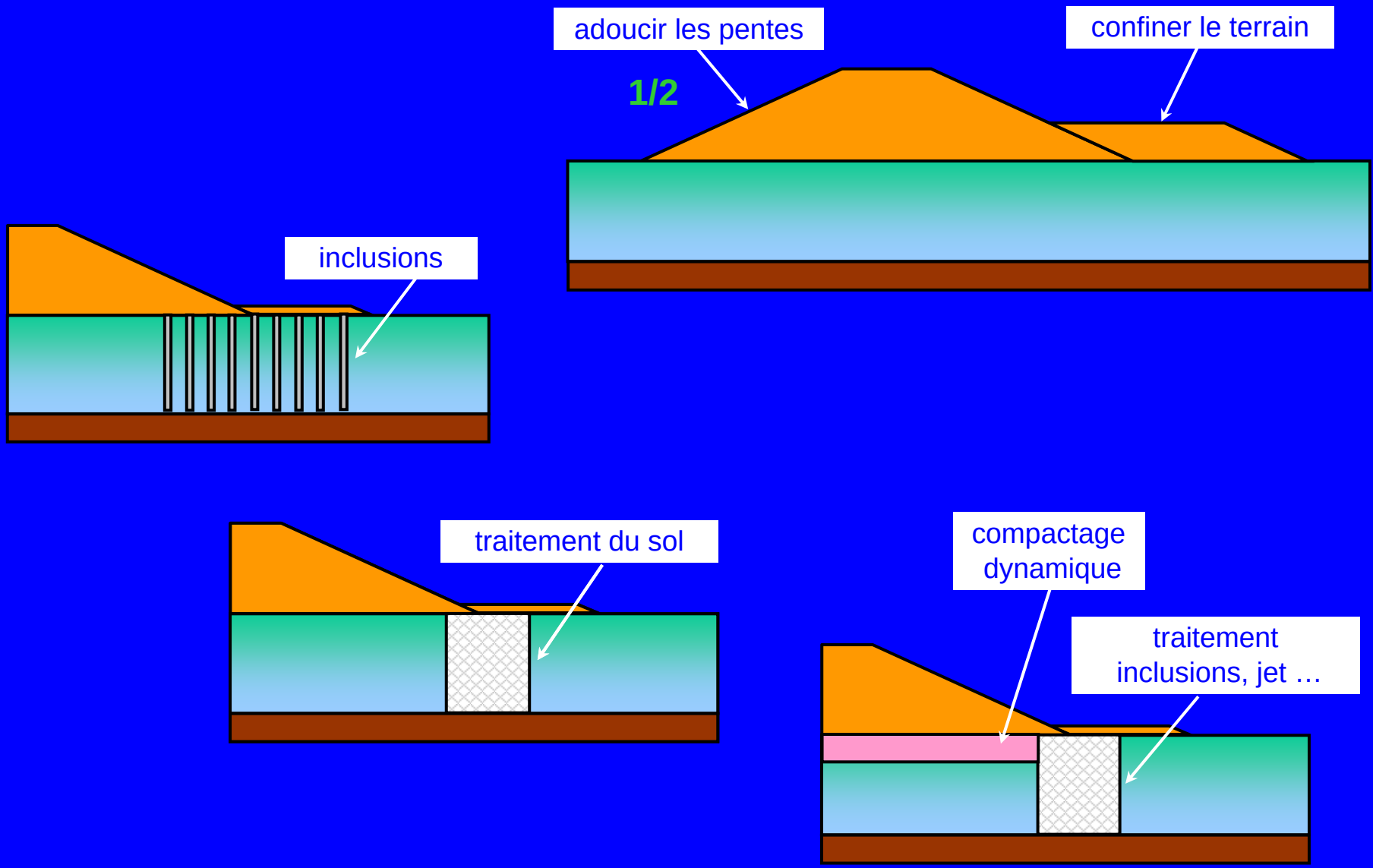
géotextiles inclusions



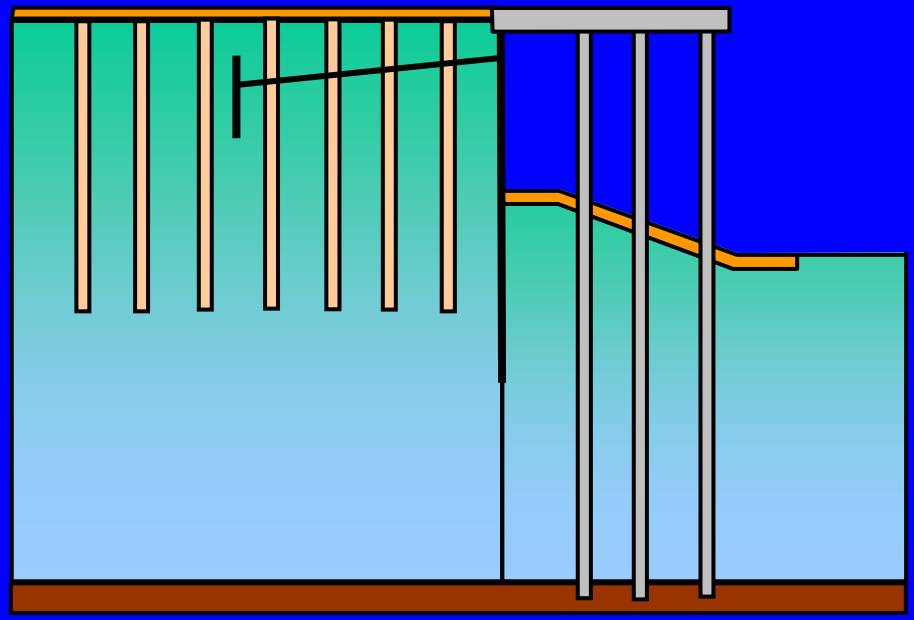
Remblai léger



Renforcement des sols Quelques solutions

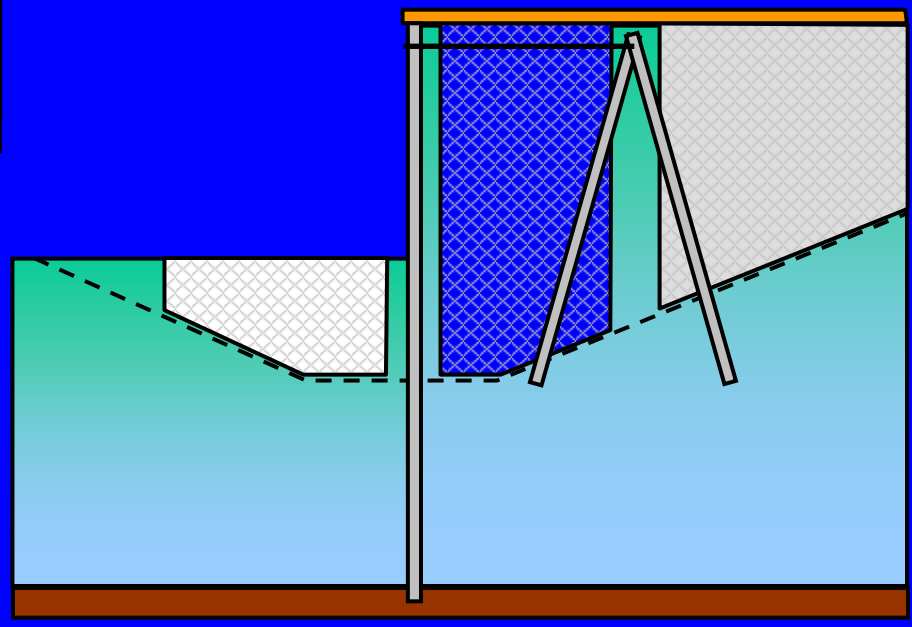


Ouvrages en terre
Quais



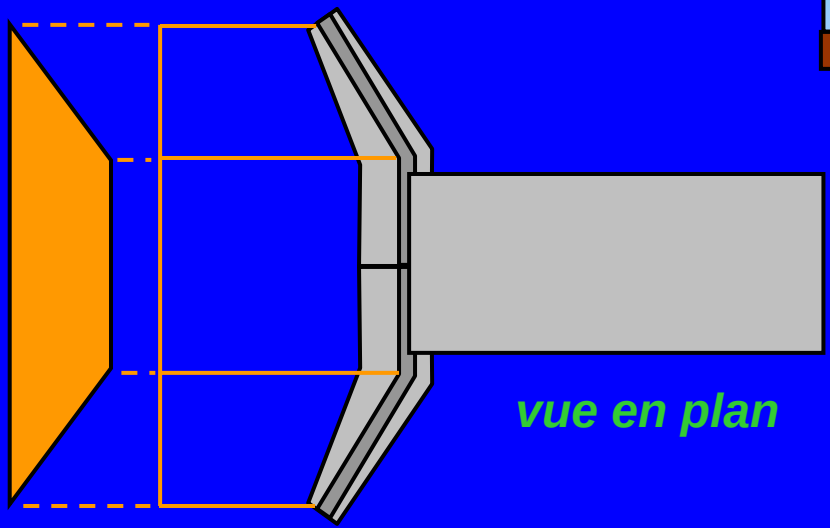
sols traités
plate-forme portées

sols traités

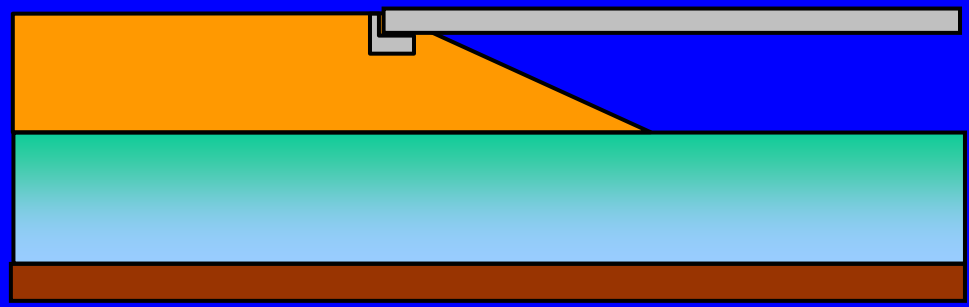


Ouvrage en terre – Ouvrage d'art

mur droit
ailes latérales

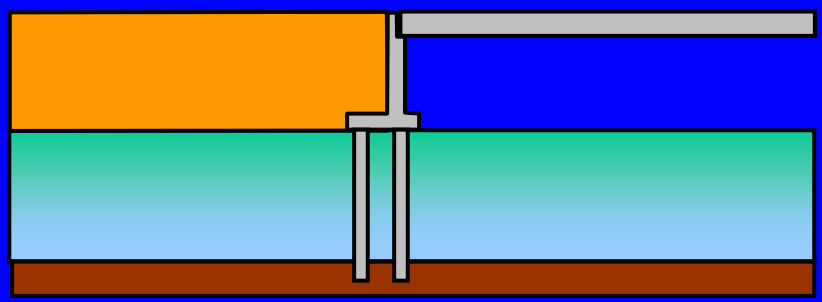


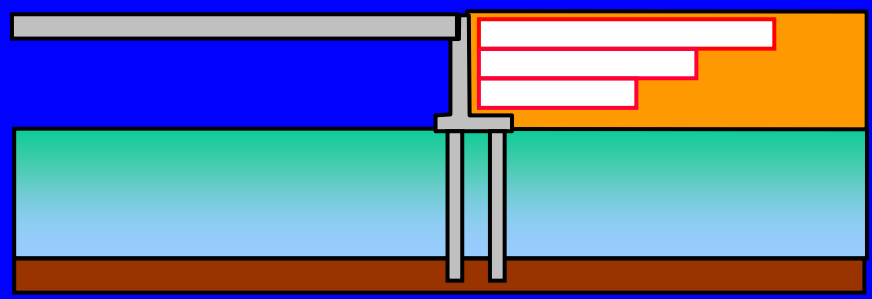
vue en plan



culée perchée
pente adoucie

Remblai léger

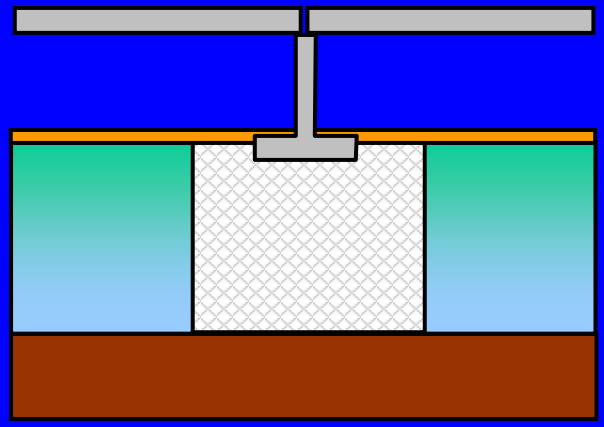




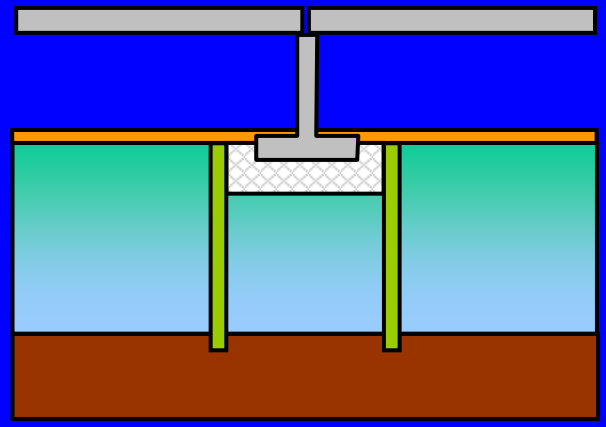
profil en long

Fondations profondes

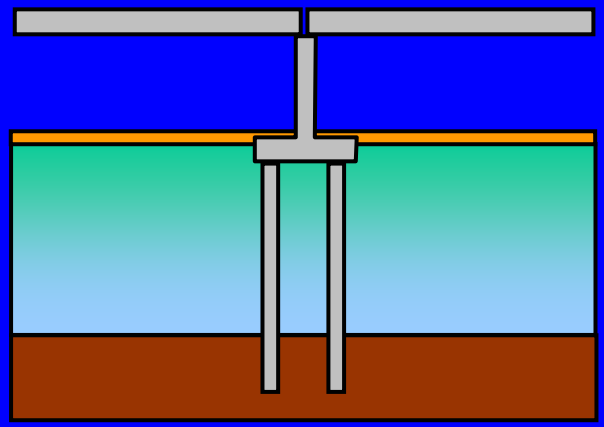
traitement du sol



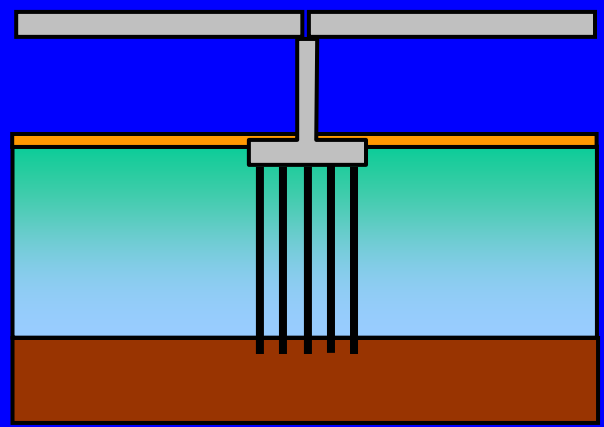
parois traitées



pieux renforcés



massif de pieux



Identification des mécanismes

En termes de risques sismiques, la liquéfaction du sol est un aléa local qui entre dans la catégorie des phénomènes induits (avec les mouvements de terrain).

La liquéfaction du sol produit des mécanismes de rupture :

- étalement latéral, écoulement,
- oscillations horizontales et verticales,
- perte de capacité portante et tassements.

Il s'agit de mouvements forts.

Les sollicitations s'expriment en déplacement, et parfois, en accélérations.

Niveaux de performance de l'ouvrage vis à vis du risque de liquéfaction

Classes de protection de l'ouvrage :

dégâts	*réutilisation de l'ouvrage*
mineurs	**immédiate**
réparables	**après réparation**
non réparables	**après reconstruction**

Les performances de l'ouvrage dépendent des déplacements et des forces qui lui sont appliqués pendant et après le séisme et donc des mouvements imposés à ses fondations. Ces sollicitations s'expriment :

- par des critères en déplacement,
- par des critères de stabilité.

Effets et sollicitations

Les principaux effets et sollicitations sur l'ouvrage et les sols renforcés se classent en :

- migration de la pression interstitielle,
- amplification du mouvement,
- forces d'inertie et déphasages,
- poussées latérales :

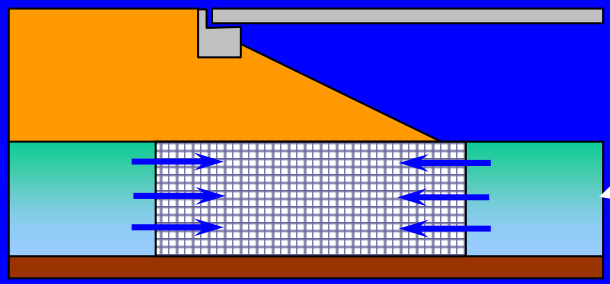
  oscillations,
  épandage latéral.

Mais il convient de tenir compte aussi :

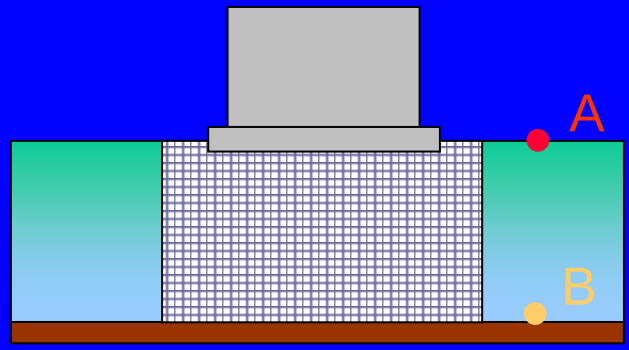
- des avoisinants (présence de constructions voisines, milieux urbains),
- du confinement du sol et ses frontières drainantes,
- du comportement post liquéfaction.

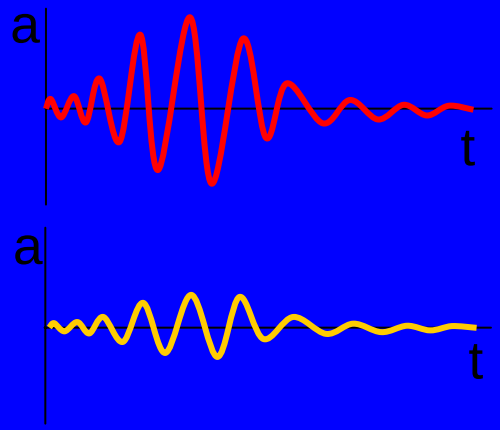
Effets et sollicitations

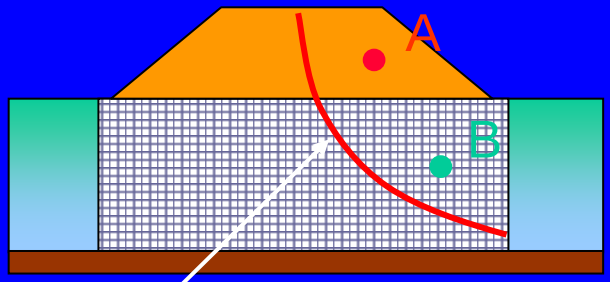
migration de la pression interstitielle

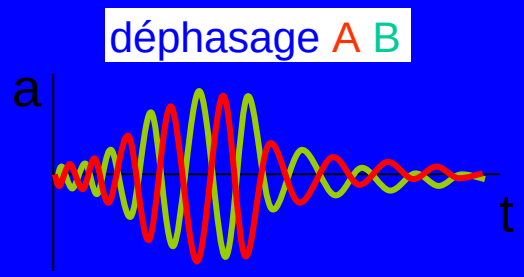


amplification du mouvement



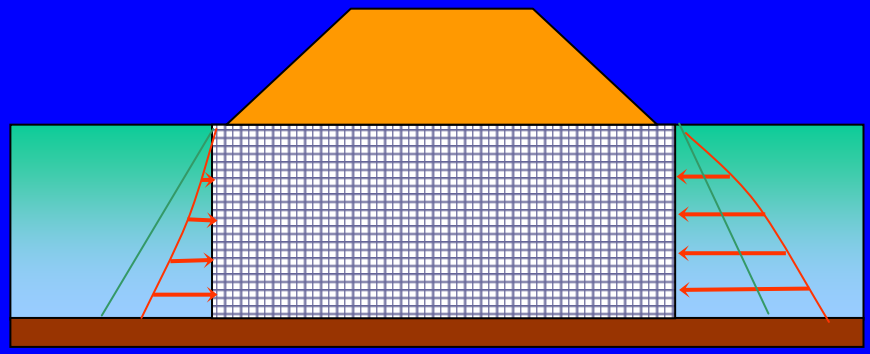






forces d'inertie et déphasages

Effets et sollicitations

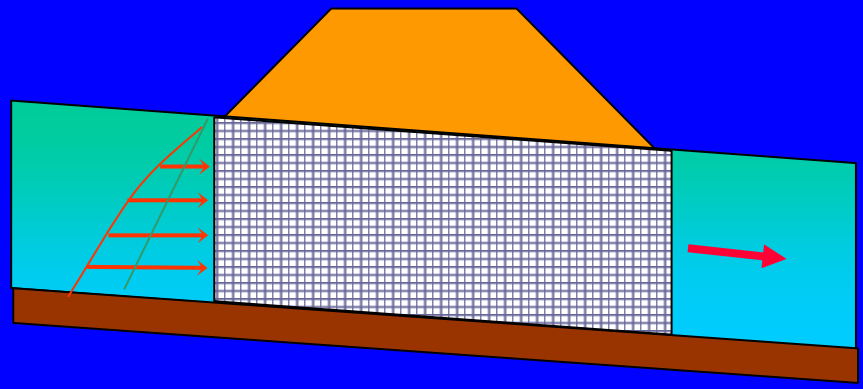


oscillations

pressions statiques

pressions dynamiques

épandage latéral



Outils d'analyse et méthodes de calcul

Analyses pseudo statique (équilibre limite)

Bloc rigide, surface de rupture prédéfinie,
coefficient d'accélération horizontale :
→ coefficient de sécurité > 1

Stabilité des pentes (méthode de Sarma), remblais, murs (méthode de Mononobe Okabe modifiée).

Analyses en pseudo déplacement (Newmark)

Bloc rigide, surface de rupture prédéfinie,
Accélérogramme a(t), accélération critique $a_{critique}$*,*
sommation des déplacements pour $a(t) > a_{critique}$ *:*
→ déplacement calculé < déplacement admissible

Digues, barrages.

Outils d'analyse et méthodes de calcul

Analyses non couplées

Calcul de la déformation du massif de sol
(réponse sismique, calculs 1D, 2D).
Application du profil déformé à la structure
(avec dégradation des propriétés mécaniques).

Méthodes numériques.

Analyses couplées

Le massif de sol, ses renforcements et la structure forment un seul modèle.

Comportement du sol en contraintes effectives sous sollicitations dynamiques, génération et migration de la pression interstitielle, dégradation de la raideur et de la résistance du sol, etc.

Méthodes numériques.

Analyses post séisme

Dissipation de la pression interstitielle.

Autres questions

- Projets à proximité d'ouvrages existants
  ou en sites urbains
- Ouvrages anciens
- Contrôle de l'efficience des renforcements
  en cours de construction et après réalisation (essais in situ)
- Compatibilité des solutions techniques
  sous chargements statiques
  sous chargements dynamiques
  sous l'effet de la liquéfaction
- Réhabilitation des ouvrages et des sites après séisme

Conclusions

Cet exposé s'adresse aux ouvrages en terre soumis à des effets de la liquéfaction des sols :

Remblais, digues, murs, fondations d'ouvrages d'art

Toutes les techniques pour prévoir les effets de la liquéfaction ne sont pas simples et ne donnent pas des solutions exactes.

Elles font appel à de nombreux facteurs d'ajustement et à des compromis techniques.

Leur réussite dépend du bon jugement des concepteurs et de la qualité de la construction.