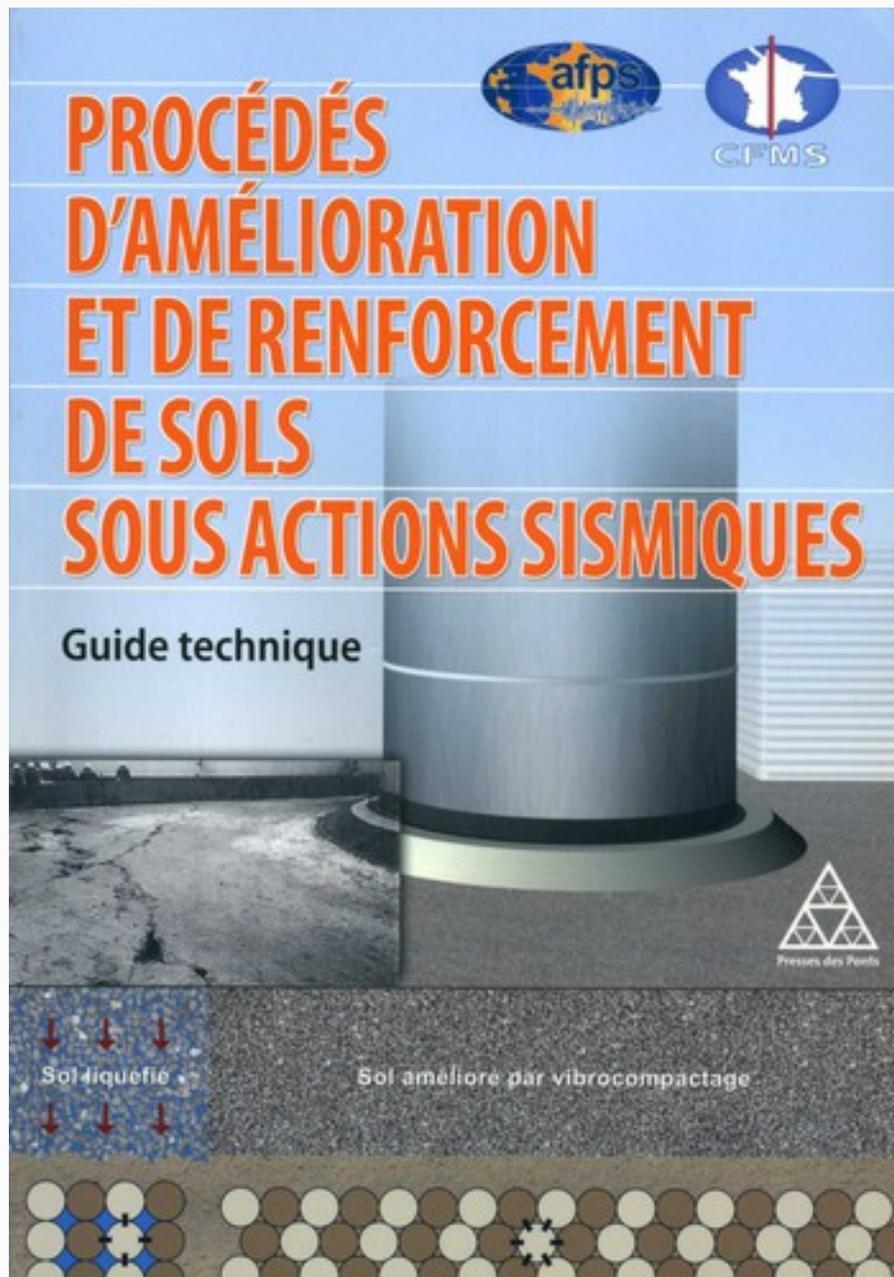


Serge Lambert



Groupe de travail de l'AFPS  
En partenariat avec le SOFFONS  
et le CFMS

Animateurs :  
Patrick Berthelot (Veritas)  
Serge Lambert ( Keller)

24 participants de tous horizons

Plus de 50 réunions sur 3 ans

Un ouvrage aux Presses de l'ENPC

# Les objectifs du Guide technique

---

- ◆ Décrire les principales méthodes d'amélioration de sols
- ◆ Traiter du dimensionnement et des dispositions constructives des procédés d'améliorations et de renforcement des sols sous sollicitations sismiques
- ◆ Aborder les caractéristiques des sols nécessaires au dimensionnement en zone sismique ( *et notamment dans la gamme de déformation  $10^{-6}$  à  $10^{-4}$* )

Les procédés de renforcement et d'amélioration doivent donner de nouvelles caractéristiques afin de pouvoir justifier des fondations en accord avec les règlements ( notamment l'EC 8-5)

# Plan du Guide technique

---

- I. Objet du Guide
- II. Retours d'expérience
- III. Techniques d'amélioration et de renforcement de sol
- IV. Reconnaissance et comportement dynamique des sols
- V. Fondations sur sols renforcés sous sollicitations sismiques

## Annexes

- A. Références
- B. Essais de sols
- C. Techniques d'amélioration
- D. Capacité portante fondation superficielles
- E. Compression non centrée
- F. Liquéfaction
- G. Répartition efforts tranchants
- H. Efforts inertiels et cinématiques
- I. Exemple du Pont de Rion-Antirion
- J. Méthode numérique pseudo-statique

# Descriptifs des procédés d'amélioration et de renforcement

---

- ◆ Amélioration dans la masse
  - ▶ Préchargement et drainage
  - ▶ Vibrocompactage
  - ▶ Compactage dynamique
  - ▶ Injection solide
- ◆ Amélioration et renforcement par inclusions souples
  - ▶ Colonnes ballastées
  - ▶ Substitution dynamique
- ◆ Renforcement par inclusions rigides
- ◆ Autres techniques
  - ▶ Deep soil mixing
  - ▶ Jet Grouting

# Domaine d'applications

Méthode	Types de sol					
	Matériaux évolutifs TOURBE	Argiles très molles	Argiles - limons compressibles	Remblais fins	Sables / graviers	Cailloux Remblais à blocs
Amélioration de sols dans la masse	PRECHARGEMENT + DRAINAGE					
				VIBROCOMPACTAGE		
				COMPACTAGE DYNAMIQUE		
				INJECTION SOLIDE		
Renforcement des sols par inclusions souples		COLONNES BALLASTEES				
		PLOTS BALLASTEES PILONNES (épaisseur < 5 m)				
Renforcement des sols par inclusions et éléments rigides		.. DE TYPE PIEUX A REFOULEMENT / SANS REFOULEMENT et JET GROUTING				
		... DE TYPE COLONNE DEEP SOIL MIXING				

# Vibrocompactage

Compactage in situ par vibration, 3 à 65 m de prof., maille 2 à 5.5 m.  
DrR ( ID) de 60 à 80%

Contrôle:  
Enregistrement  
Consommation

CPT avant et après

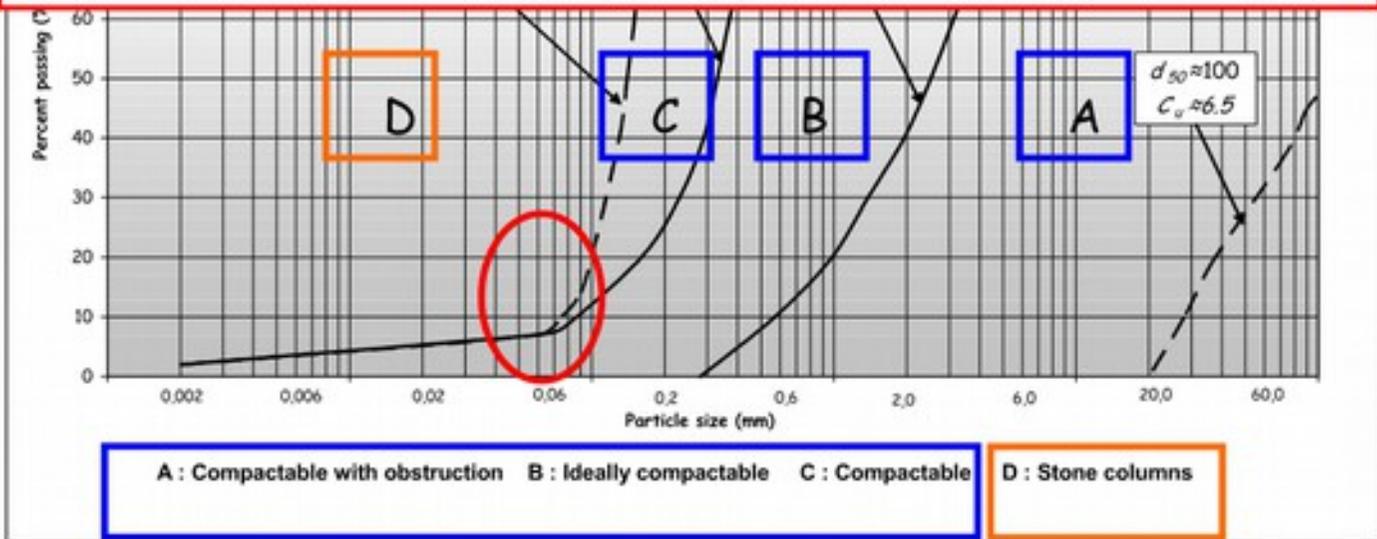
Planche d'essai

**Très important :**

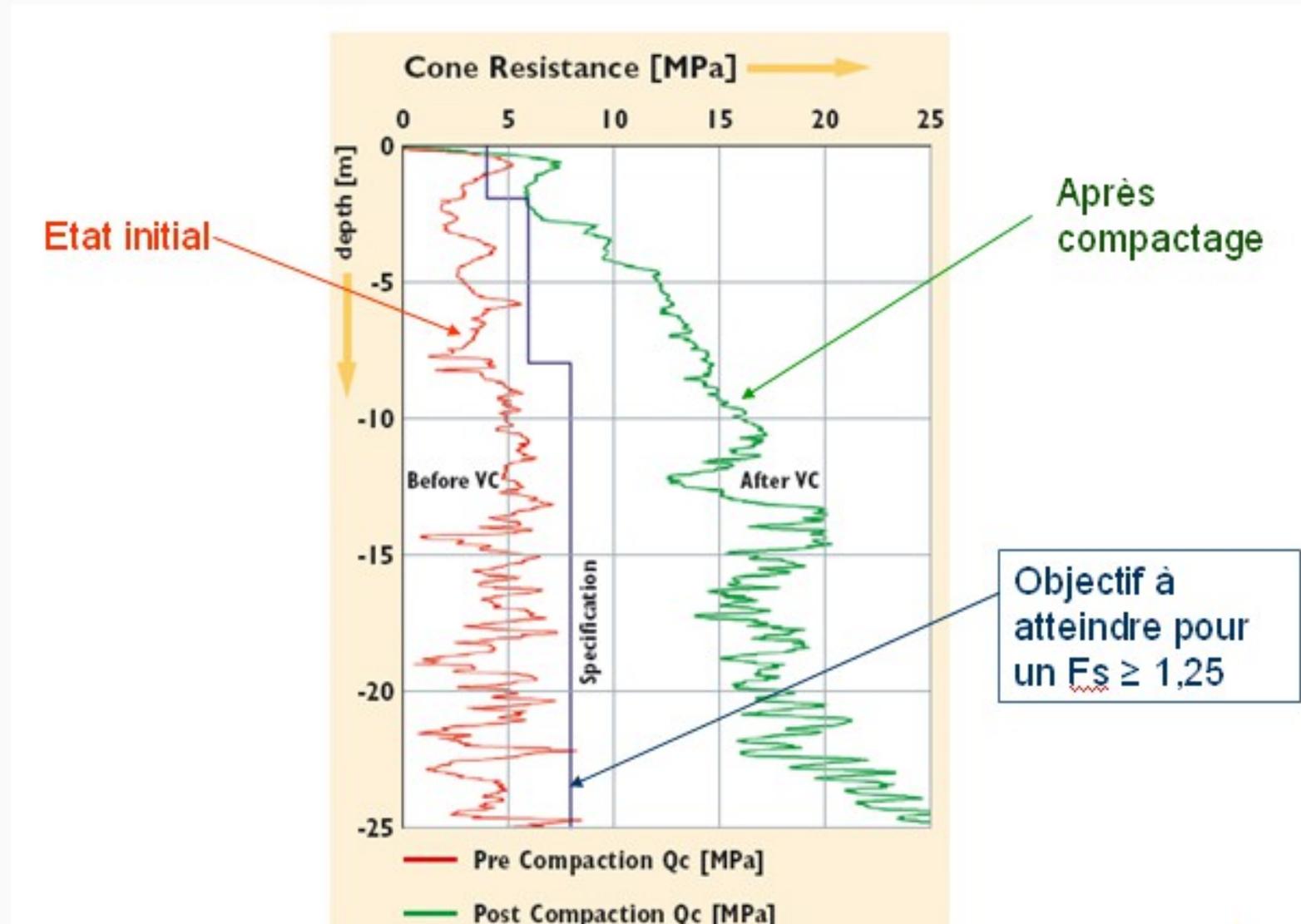
**C** et la partie gauche de **B** sont potentiellement liquéfiables

la partie droite de **D** aussi !

le traitement des terrains avec plus de 10% de fines est plus difficile



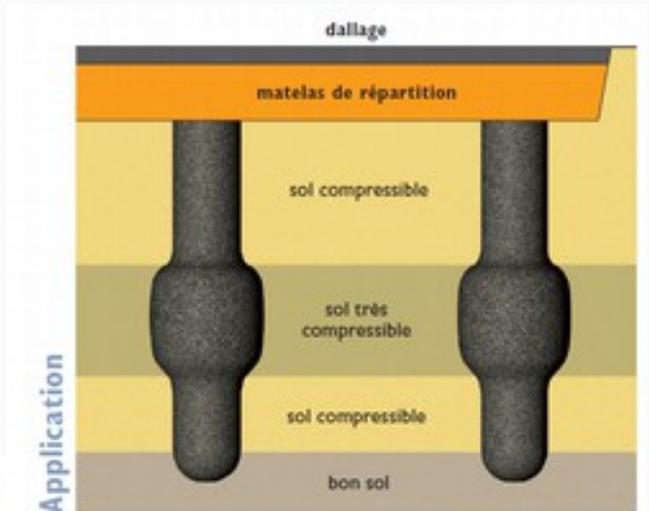
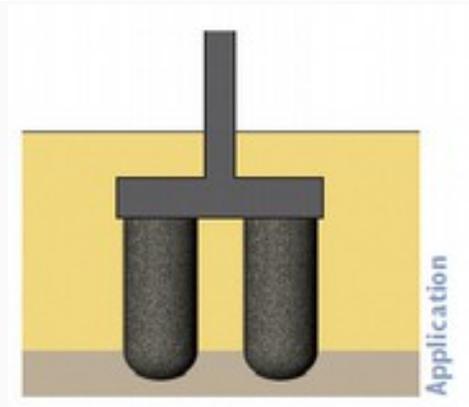
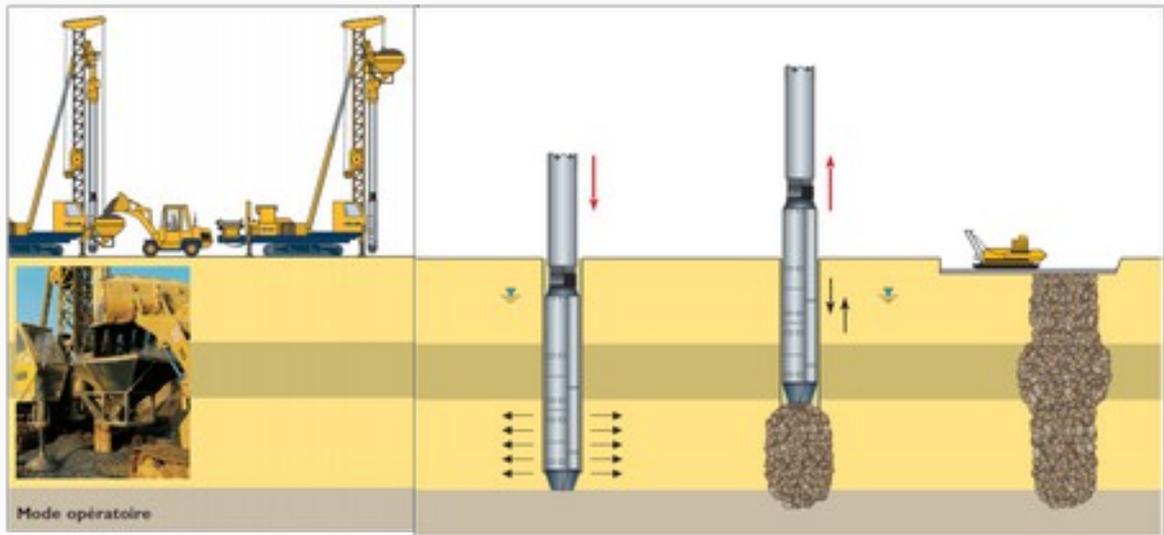
# Vibrocompactage



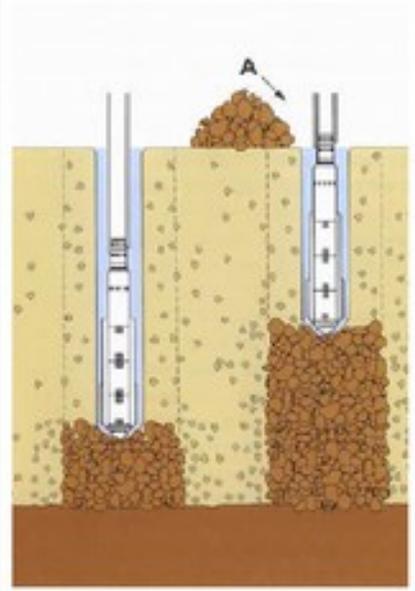




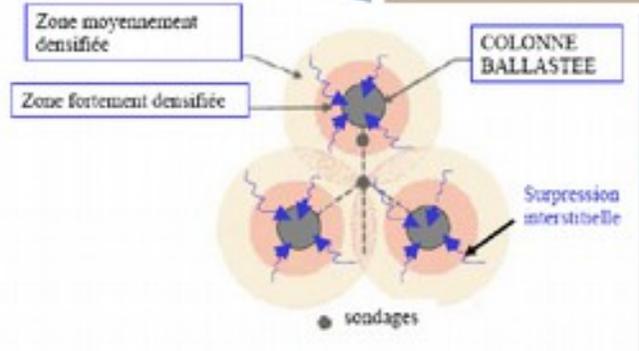
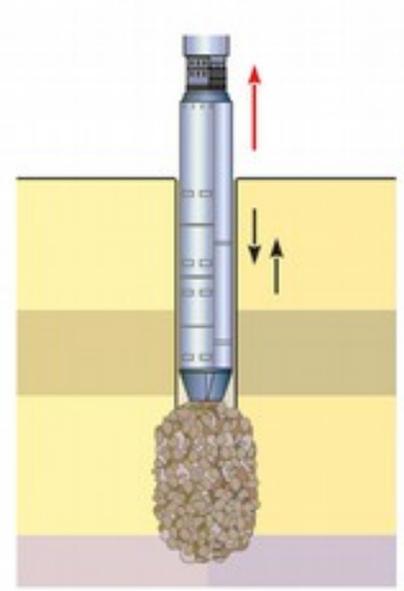
# Colonnes ballastées



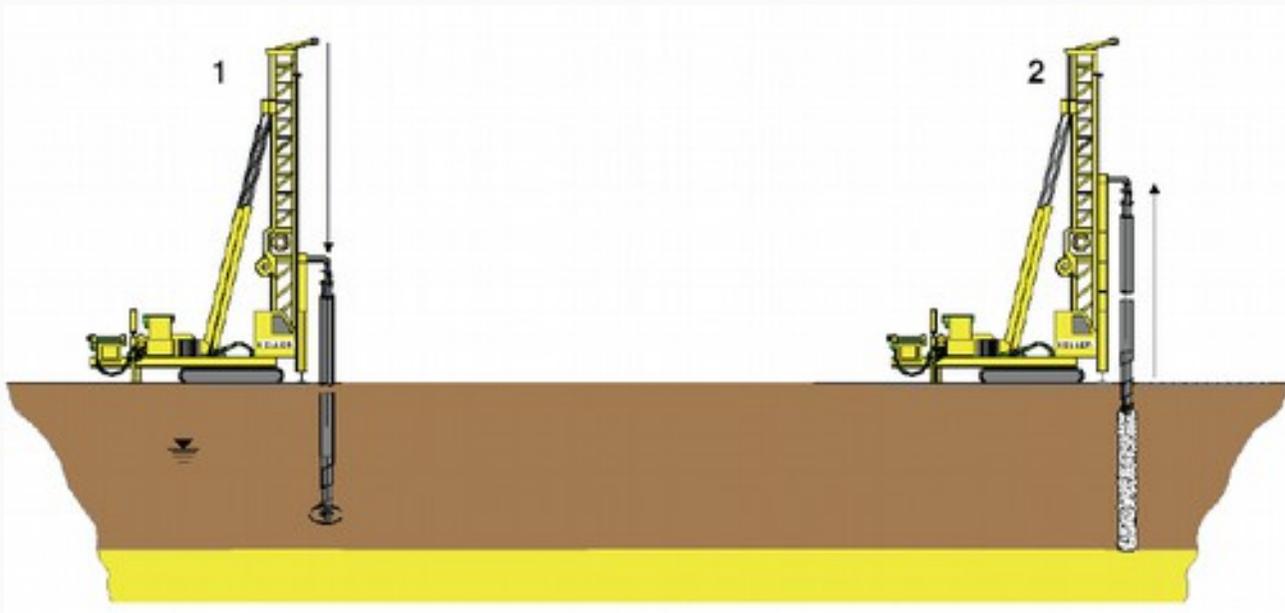
Voie humide



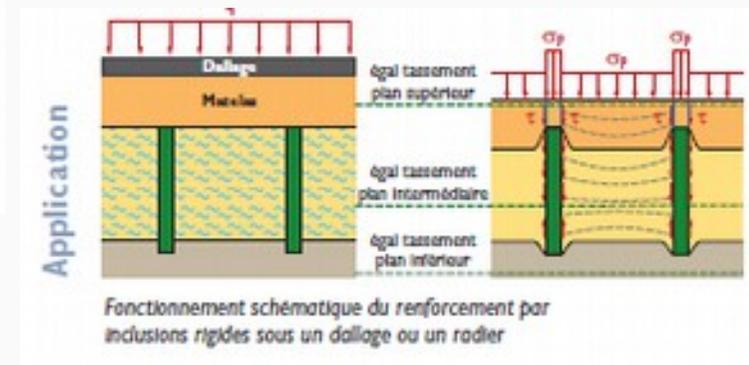
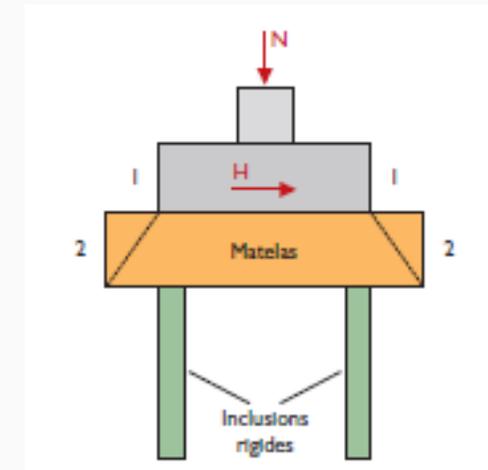
Voie sèche



# Inclusions rigides



## Recommandations ASIRI



- ◆ Des méthodes variées
  - ▶ A utiliser selon les terrains et les projets
  - ▶ Coûts variables

# Retour d'expériences ( Chap II)

---

- ◆ Les applications orientées vers la réduction des risques de liquéfaction
- ◆ Vérifier la performance sur des sites ayant subi des séismes
- ◆ Valider les performances et connaître les limites d'utilisation
- ◆ A partir des bases de données essentiellement Japon et USA
- ◆ Exemples documentés de Mitchell et al. ( 1995), Hausler et Sittar ( 2001)

Par exemple.....

# Retour d'expériences ( Chap II)

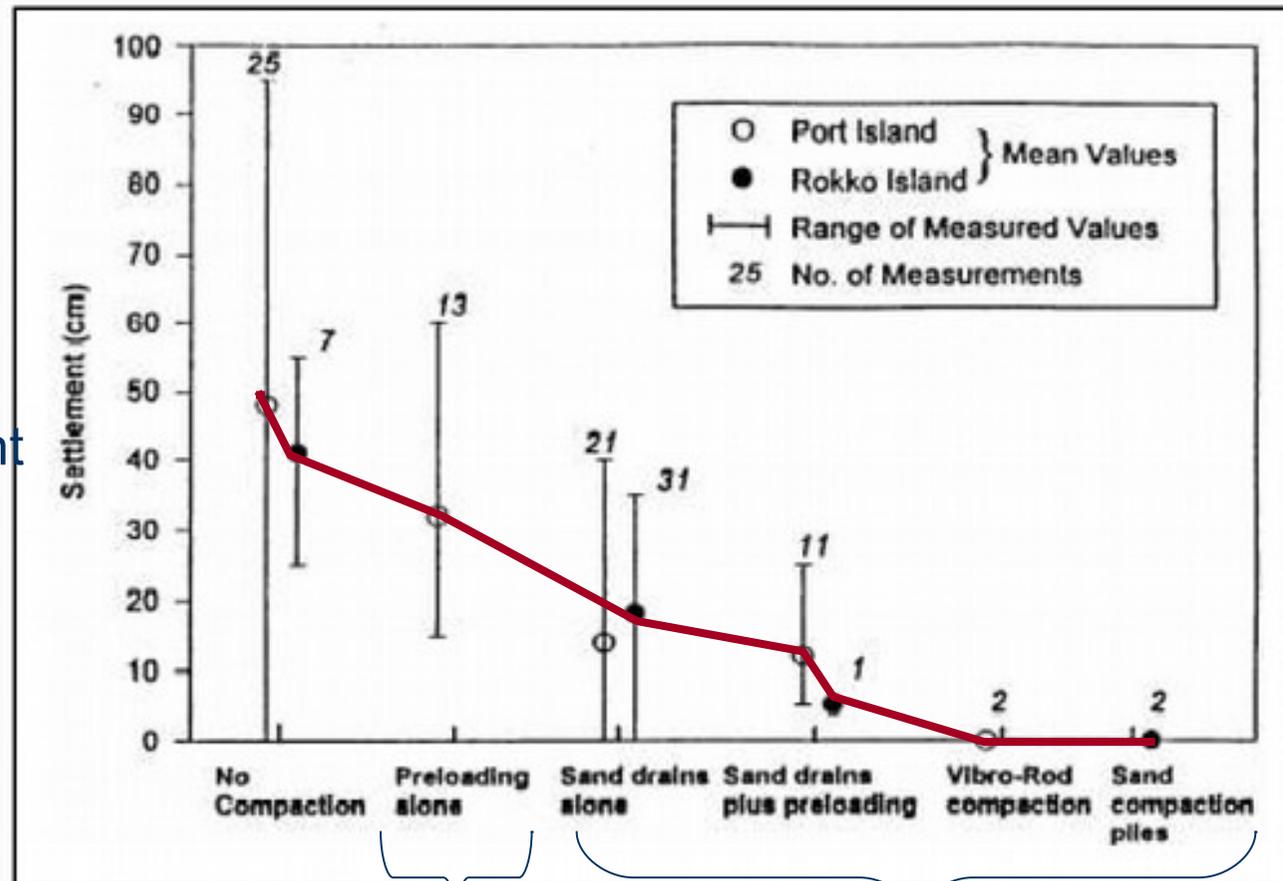
Nom	Projet	Fondation	Méthode d'amélioration	Description du sol et propriétés avant amélioration	Propriétés après amélioration	Enregistrement le plus proche	Performance de la zone améliorée	Performance des zones voisines
ASARCO Tacoma Fonderie Ruston, WA	Enceinte de confinement remblai	Aucune (structure en terre)	Compactage dynamique profond limité à 1 emprise	4m de sables et graviers sur 1-3m silt argileux marin reposant sur dépôts glacières, $N_{1,60cs} = 9-12$ bpf sur les 5 mètres, GWT 3m bgs.	Les 2 premiers mètres très denses, peu d'effets sur la couche silteuse, augmentation de $N_{1,60cs}$ sur les 5 mètres	6 km SE 0.06g NS PGA 46.2 cm/s EW AI	Pas de tassements du sol ni de signe de liquéfaction	Pertes de scories et d'encrochements dans la zone de marée basse de la baie à 1km du site
Ash Grove Cimenterie Dôme de Stockage Seattle, WA	Fondation Dôme de stockage	Anneau superficiel	Colonnes ballastées de 7m 3m au delà du périmètre	2-3m sable silteux sur 1m silt sableux mou sur 12m de sable fin, lâche à dense $N_{1,60cs} = 8-17$ bpf, GWT 2-3 bgs	Pas de données numériques disponibles mais densification du sable était effective	4 km NE 0.135g EW PGA 21,6 cm/s EW AI	Pas de tassements du sol ni de signe de liquéfaction Légères fissures dans le dôme	Signes de liquéfaction sur des zones abandonnées à 3 km du site.
AT&T Tech. Sans fil Tour Summer, WA	Base de la tour de transmission	Radier Superficiel	Colonnes ballastées de 10m, 5m au delà du périmètre	60cm silt argileux sur 8m de sable alluvial lâche à moy. dense sur un 15m de graves sableuses moy. denses. $N_{1,60cs} = 1-10$ bpf, GWT 3.7m bgs	$N_{1,60cs} = 4-28$ bpf, augmentation moyenne de 5 bpf	15 km NE 0.21g NS PGA 50.7 cm/s EW AI	Pas de tassements du sol ni de signe de liquéfaction	Pas de tassements du sol ni de signe de liquéfaction
1ère Avenue Pont Seattle, WA	Mur en terre armée	Terre armée	Drains graviers (colonnes ballastées) de 12.2m	3m silt argileux sur 1.5m de sable fin silteux sur 5.8m de sable fin pur à silteux lâche à moy. dense, $N_{1,60cs} = 2-17$ bpf	Pas de données disponibles	7 km NE 0.135g EW PGA 21,6 cm/s EW AI	Pas de tassements du sol ni de signe de liquéfaction	Pas de tassements du sol ni de signe de liquéfaction
Home depot Seattle, WA	Centre commercial	Semelles superficielles	Colonnes ballastées de 8m, limitées au périmètre	1.5m de sable moy. dense sur 6-7m de sable fin lâche à moy. dense sur du sable dense, $N_{1,60cs} = 5-15$ bpf, cône pénétro $q_c = 30-50$ tsf GWT 1.5m bgs	$N_{1,60cs} = 23-28$ bpf, cône pénétro $q_c = 80-100$ tsf entre les colonnes	3.5 km NE 0.06g NS PGA 46.2 cm/s EW AI	Pas de tassements du sol ni de signe de liquéfaction ou de dommages structurels	Fissures dans le sol à l'angle de la zone améliorée, signe de liquéfaction à 1 km du site, dommages structurels aux maçonneries en brique

## Chapitre 2 : Retours d'expériences en zone sismique

### Réduction des déformées

(Yasuda et al. 1996)

- pré-chargement seul
- drains de sable seuls
- drains de sable + pré-chargement
- vibrocompactage.

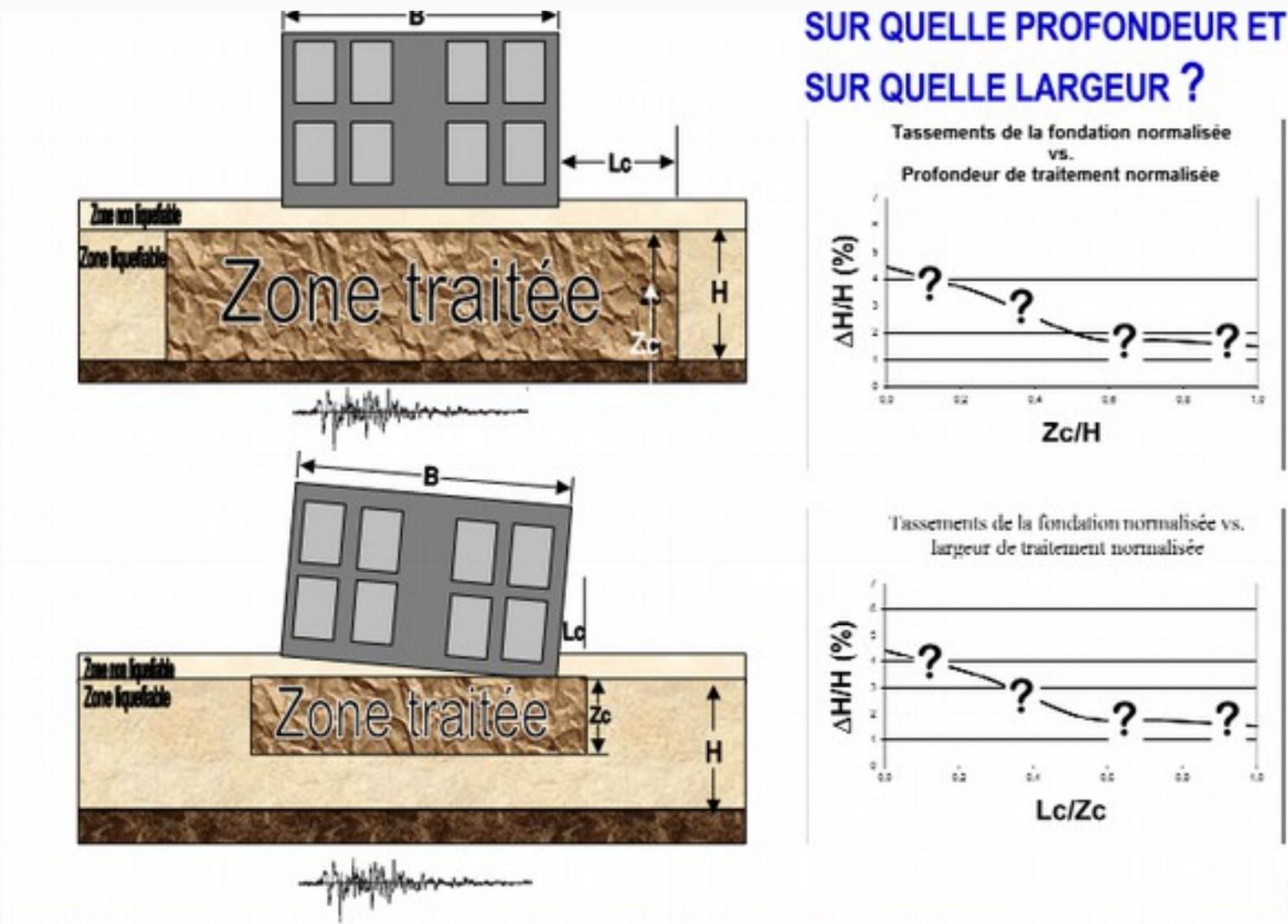


Aucune vibration

Techniques vibratoires de plus en plus puissantes

Le meilleur moyen de diminuer le potentiel de liquéfaction est de densifier le sol en place

# Retour d'expériences ( Chap II)

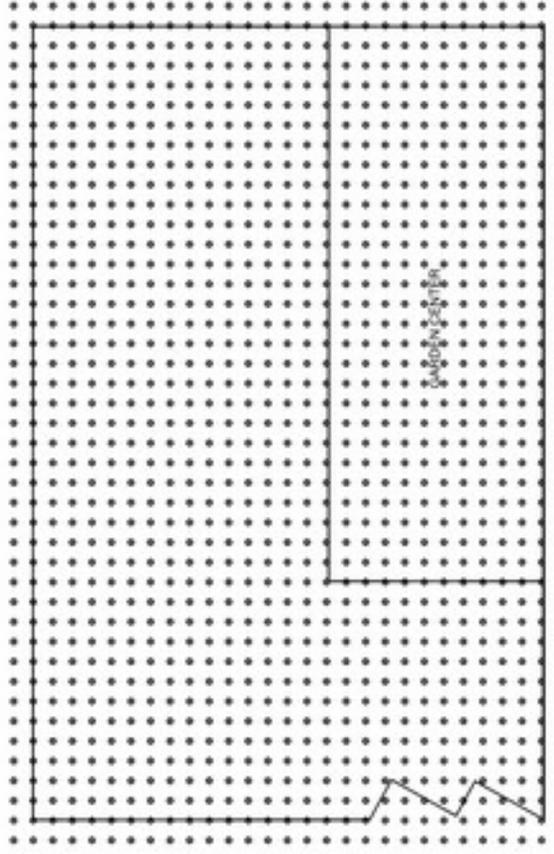


L'extension latérale doit englober la zone qui influence la stabilité de la structure  
 De 66 à 100 % la profondeur de la zone traitée



# Retour d'expériences ( Chap II)

## SITE HOME DEPOT A SEATTLE



Colonnes ballastées

**En dehors de la zone traitée: une fissure de 10 à 15 mm d'ouverture et de 19 m de long est apparue côté Avenue de Utah en limite de la zone traitée**



# Retour d'expériences ( Chap II)

## Kobé vibrocompactage réservoir

436 Remedial measures against soil liquefaction

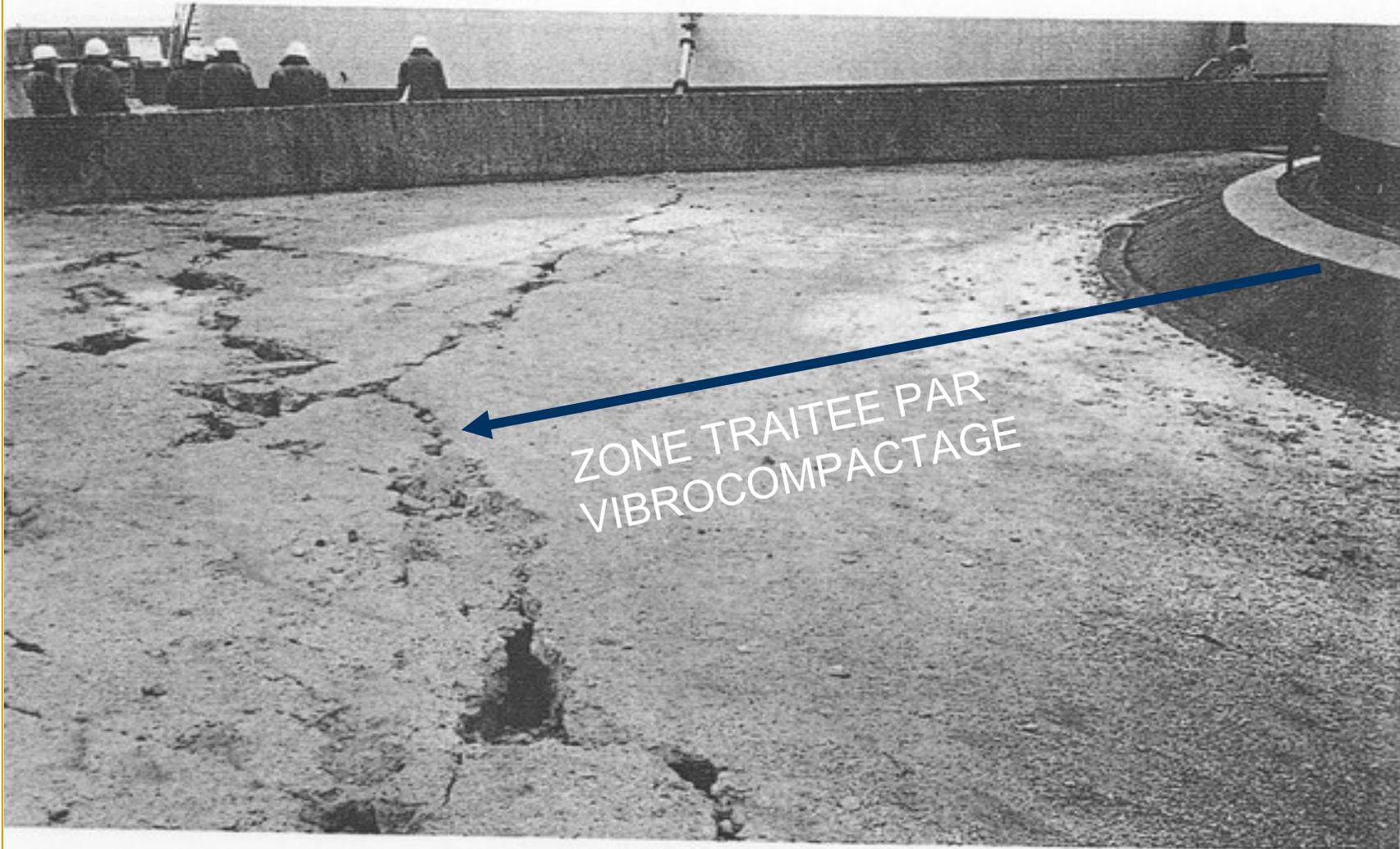


Photo A1.20 Fissures near tank foundation treated by vibro-flotation method at Suma-ku, Kobe (Tokyo Soil Research Co.).

- ◆ Les sites ayant été traités pour l'amélioration des sols présentent moins de déformation
- ◆ 10% des cas recensés n'ont pas eu un comportement satisfaisant (causes : extension latérale ou profondeur insuffisantes)
- ◆ Manque d'informations quantitatives
- ◆ Les retours d'expériences devrait être accompagné de modélisation pour valider les méthodes de calcul et de dimensionnement

- ◆ Consistance des reconnaissances
  - ▶ Détermination du profil de sol
  - ▶ La mesure des paramètres ( in situ et en laboratoire)
- ◆ Comportement dynamique des sols
  - ▶ Module de cisaillement et amplitude de la déformation
  - ▶ Définition de l'amortissement
  - ▶ Corrélations ...(?)
  - ▶ Mesure des caractéristiques après amélioration
- ◆ Liquéfaction
  - ▶ Critère global de liquéfaction
  - ▶ Mécanisme de liquéfaction
  - ▶ Evaluation du potentiel de liquéfaction

# Les classes de sols ( EC8-5)

Classe de sol	Description du profil stratigraphique	Paramètres			qc MPa	PI MPa
		$V_{s,30}$ (m/s)	$N_{SPT}$	$C_u$ (kPa)		
<b>A</b>	Rocher ou autre formation géologique de ce type comportant une couche superficielle d'au plus 5m de matériau moins résistant	> 800	–	–		
<b>B</b>	Dépôts raides de sable, de gravier ou d'argile sur-consolidées, d'au moins plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, caractérisés par une augmentation progressive des propriétés mécaniques avec la profondeur	360 - 800	> 50	> 250	>3.5 argile >20 sable	>1.5MPa argile > 2.5 sable
<b>C</b>	Dépôts profonds de sable de densité moyenne, de gravier ou d'argile moyennement raide ayant des épaisseurs de quelques dizaines à quelques centaines de mètres	180 - 360	15 - 50	70 - 250	De 1 à 3.5 argile De 6 à 20 sable	De 0.4 à 1.5 argile De 0.8 à 2.5 Sable
<b>D</b>	Dépôts de sol sans cohésion de densité faible à moyenne (avec ou sans couches cohérentes molles) ou comprenant une majorité de sols cohérents mous à fermes	< 180	< 15	< 70	<1MPa argile < 6MPa sable	< 0.4 MPa argile < 0.8 sable
<b>E</b>	Profil de sol comprenant une couche superficielle d'alluvions avec des valeurs de $v_s$ de classe C ou D et une épaisseur comprise entre 5m environ et 20m, reposant sur un matériau plus raide avec $v_s > 800$ m/s					
<b>S<sub>1</sub></b>	Dépôts composés, ou contenant, une couche d'au moins 10m d'épaisseur d'argiles molles/vases avec un indice de plasticité élevé (PI>40) et une teneur en eau importante.	< 100	–	10 - 20	< 03 Argile	Non mesurable
<b>S<sub>2</sub></b>	Dépôts de sols liquéfiables d'argiles sensibles ou tout autre profil					

# Les essais à partir de la surface

---

**Essais de propagation d'ondes de surface**

**Non intrusifs**

**Mesure de la vitesse de propagation des ondes**

**Utilisation de techniques d'inversion**

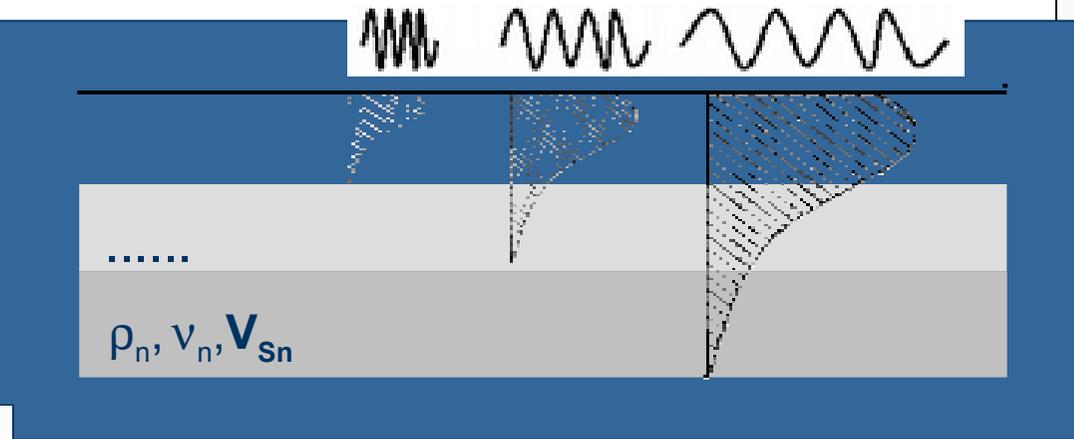
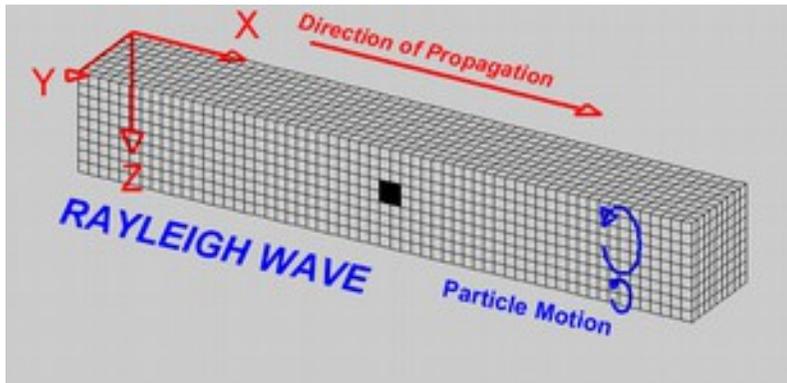
**Interprétation essentiellement en élasticité isotrope,  
milieu homogène (ou homogénéisé)**

**Ne permettent pas de mesurer l'amortissement  
matériel**

**Détermination des profils  $V_{s30}$**

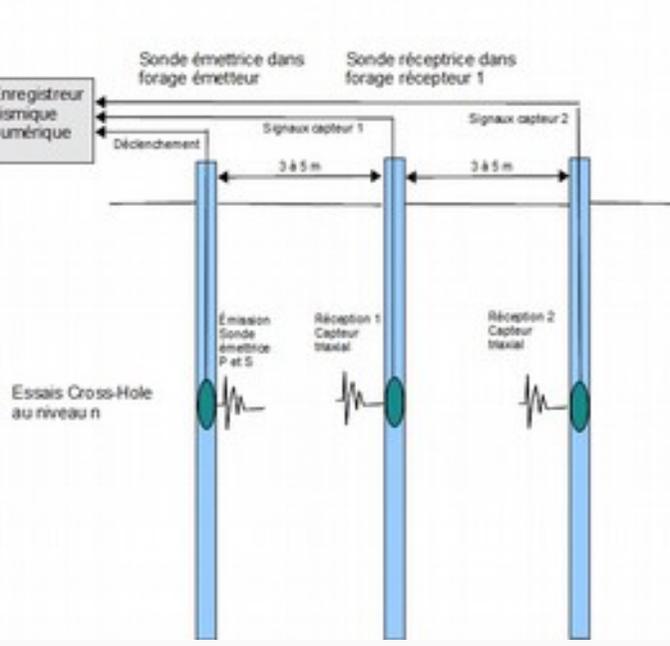
# Les essais à partir de la surface

- ◆ Les essais de propagation d'ondes de Rayleigh
- ◆ Les mesures de bruit de fond

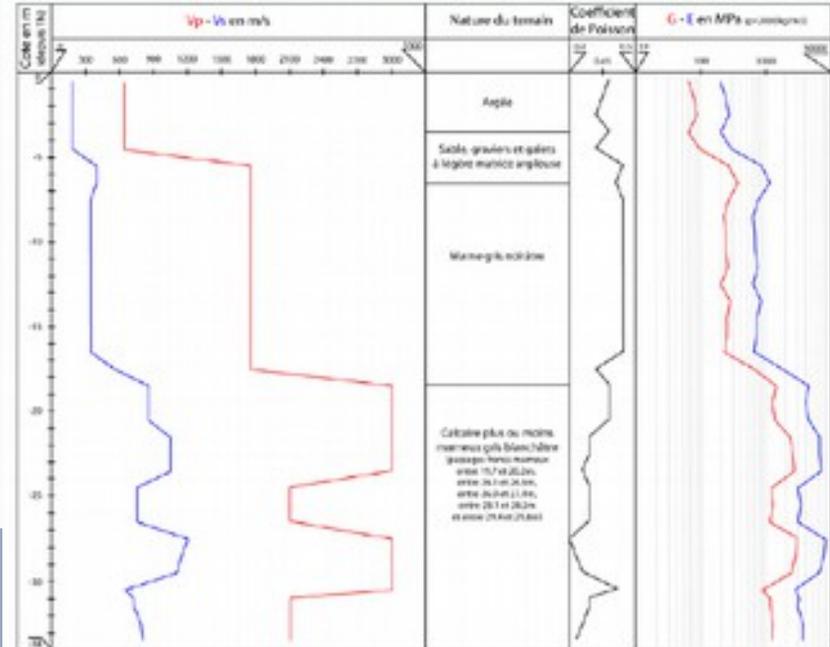


# Les essais intrusifs

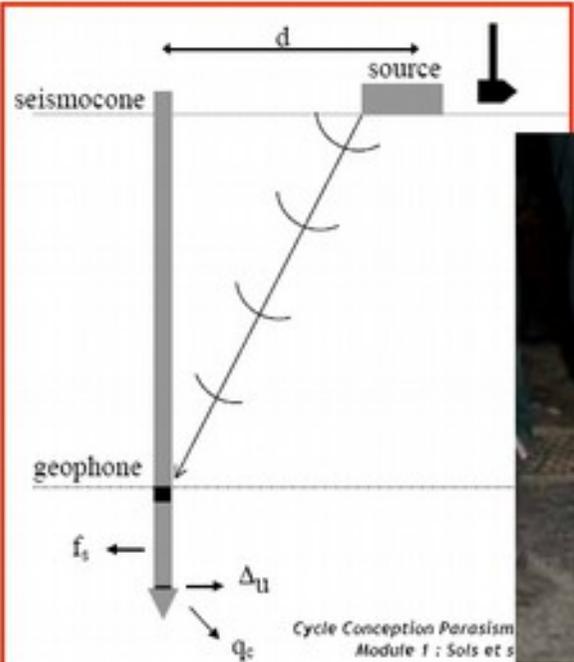
## PRINCIPE DE L'ESSAI CROSS-HOLE



- Scellement des tubes/bon contact au terrain
- Mesure inclinométrique de distance
- Mesure de  $V_p$  et  $V_s$



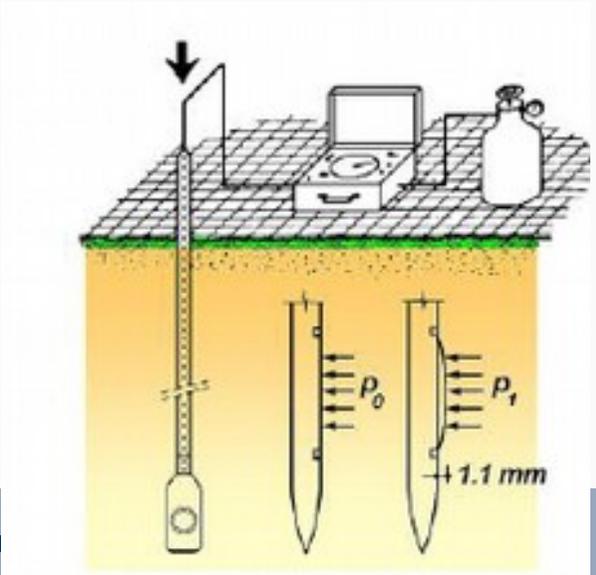
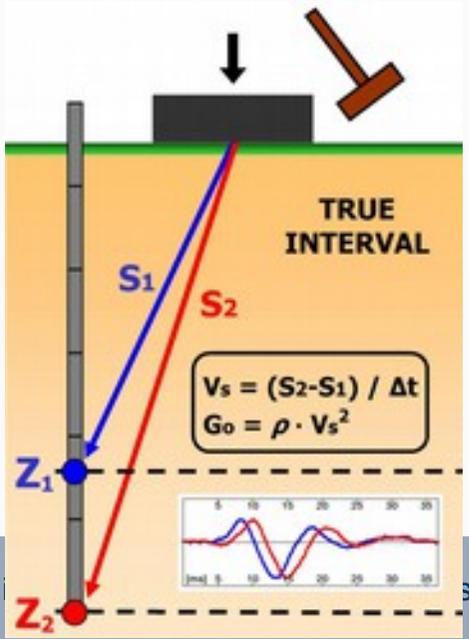
# Le CPT Sismique/le SDMT



(After Foray and Flavigny, 2004)



Cycle Conception Parasism  
Module 1 : Sols et s



# Les essais de laboratoire

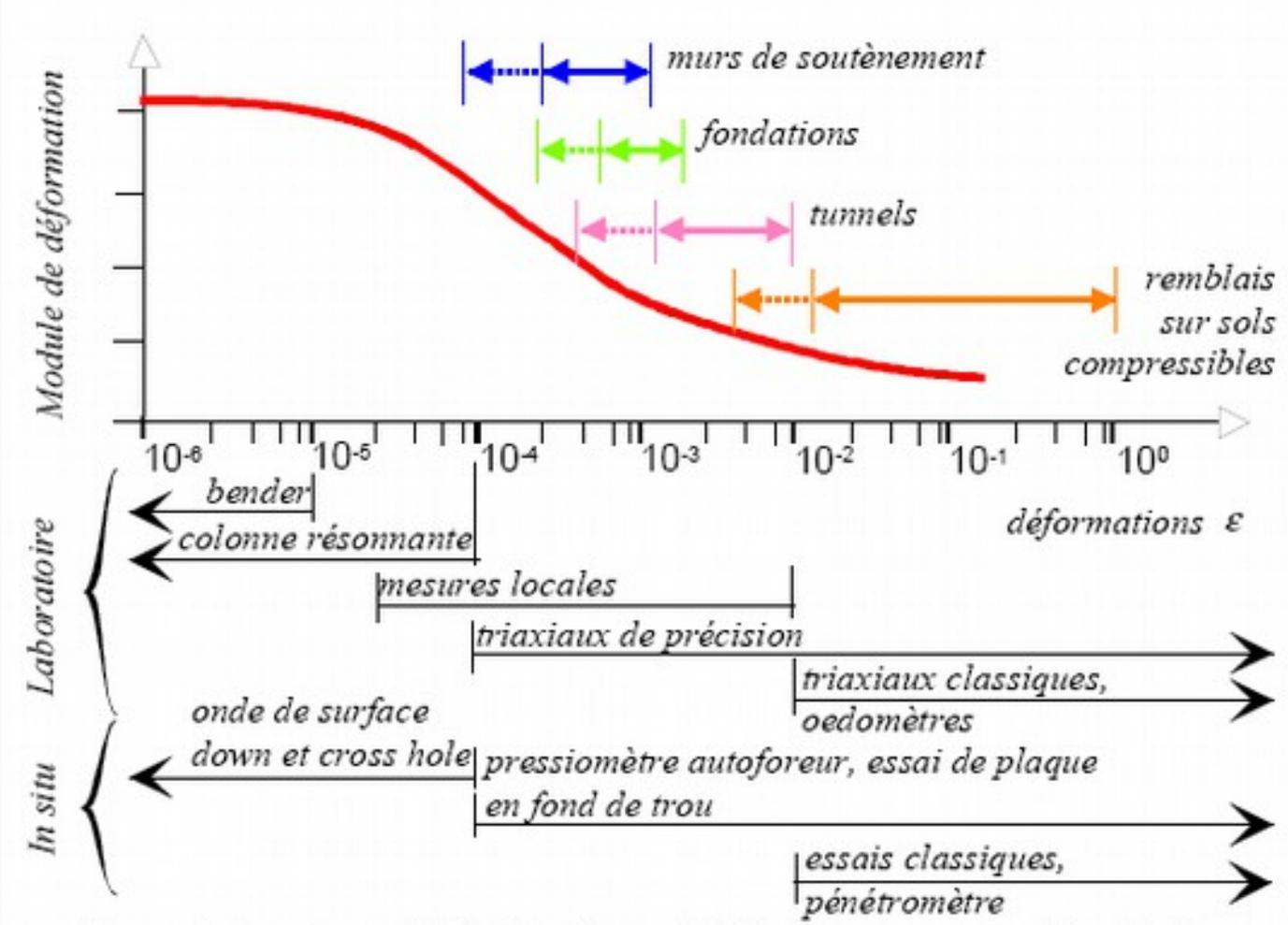


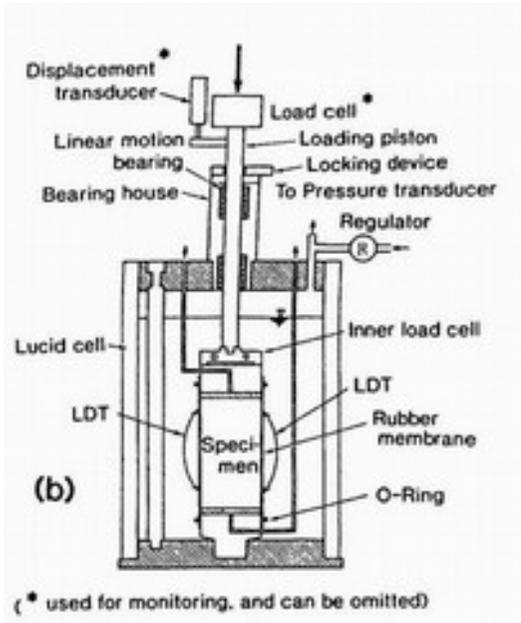
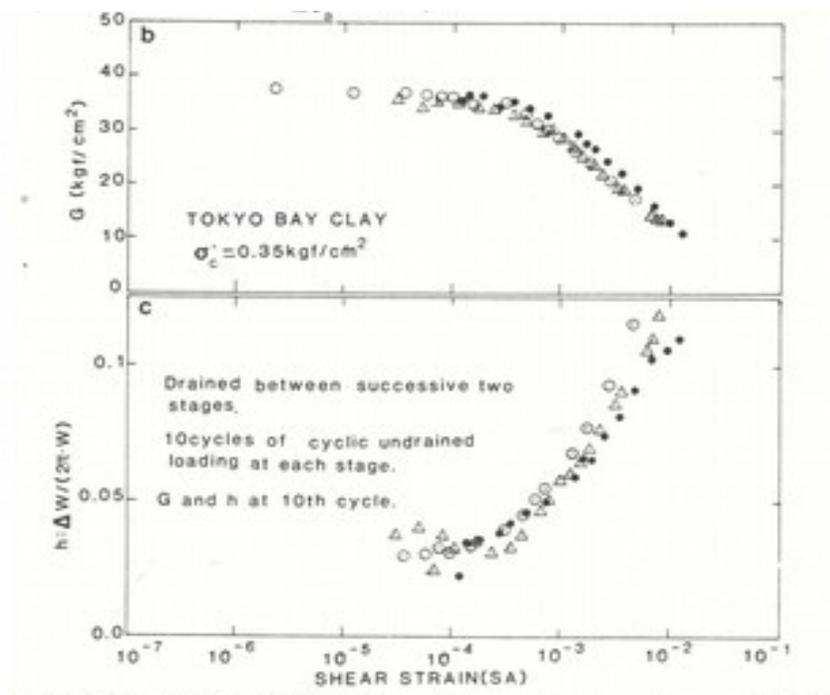
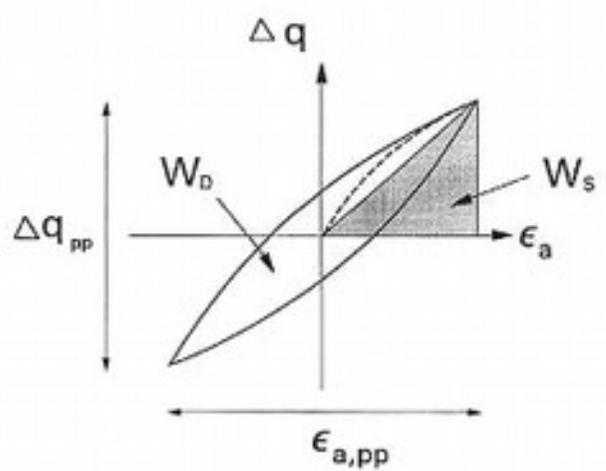
Figure 1. Domaines d'utilisation des matériels d'essais pour la détermination des modules de déformation

Des déformations de  $10^{-6}$  à  $10^{-3}$  ou  $10^{-2}$

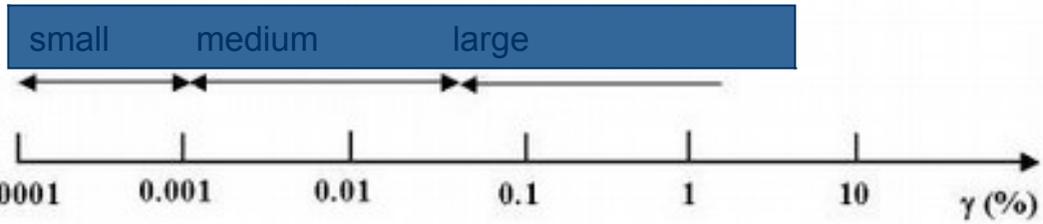
Mesures par un mode chargement *statique* ou *dynamique*

# Le triaxial cyclique

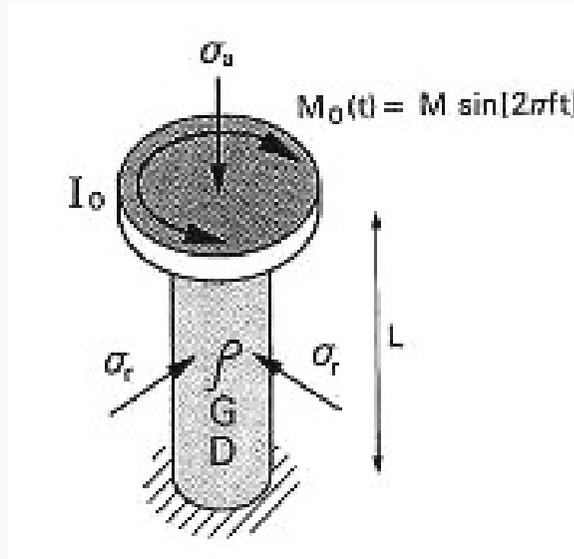
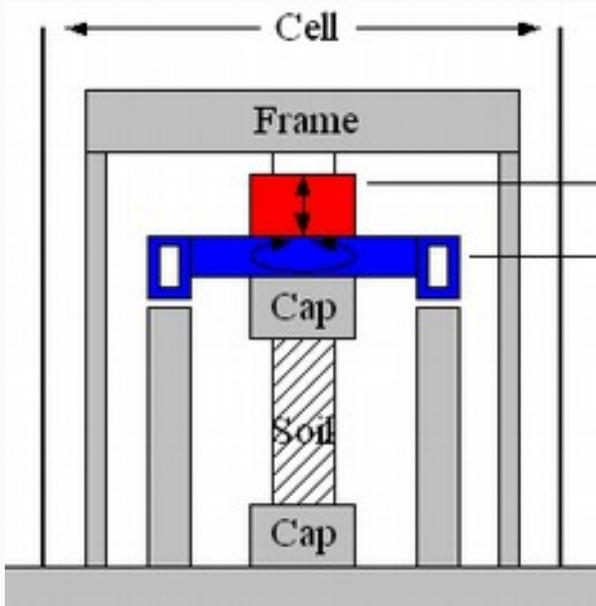
- ◆ Mesure de la liquéfaction
- ◆ Mesure des courbes  $G(\gamma)$  et  $D(\gamma)$



**Gamme de déformation:**



# La colonne de résonance



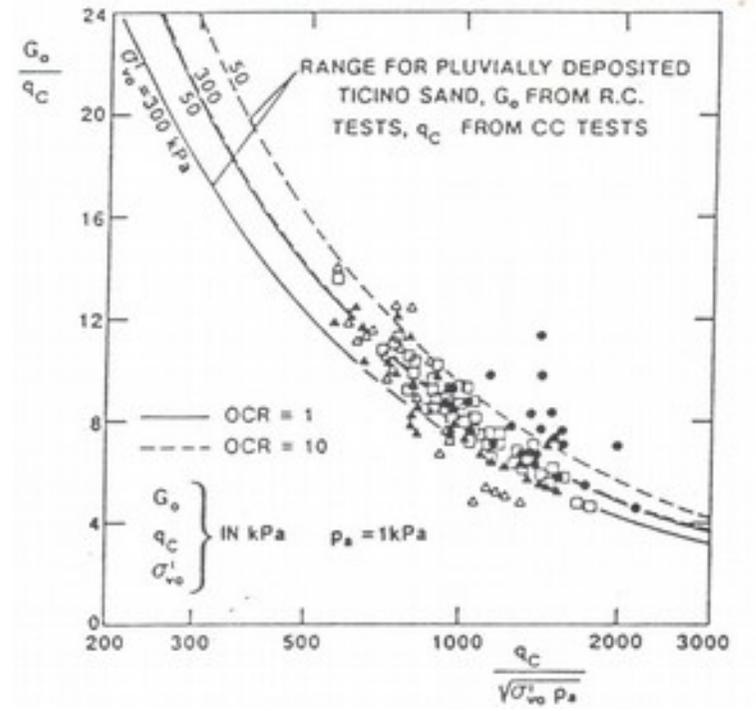
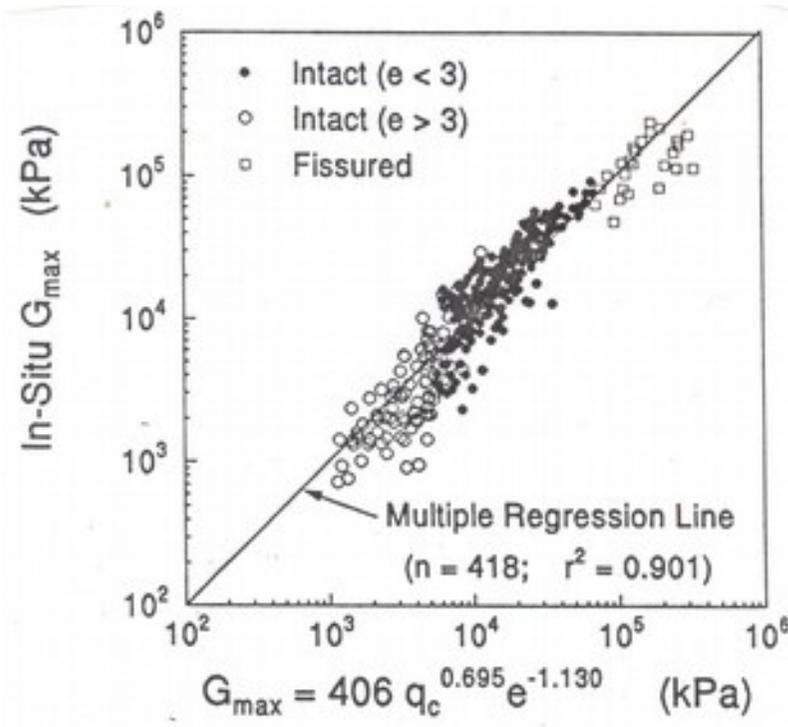
- ◆ Principe : vibration longitudinale ou en torsion d'un échantillon reconsolidé dans une cellule triaxiale

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = V_s \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$$

$$G = \rho V_s^2$$

# Les corrélations

- ◆ Utilisation délicate : ne remplace pas un essai par un autre !
- ◆ Interprétation et synthèse d'un site



$$G_{max} = 406(q_c)^{0.695} e^{-1.13}$$

$$G_{max} = 1634(q_c)^{0.259} (\sigma'_v)^{0.375}$$

# Analyse du risque de liquéfaction

## ◆ Evaluation du potentiel de liquéfaction à partir des CPT et CPTU

### Eurocode 8 Partie 5 § 4.1.4

- CPT (très recommandé § 4.2.1); SPT ; courbes granulométriques
- On néglige le risque de liquéfaction lorsque :
  - ✓  $a_g \cdot S < 0,15 \cdot g$  et lorsque en même temps 1 au moins des conditions est remplie
    - Sables + argile  $> 20\%$  et  $IP > 10$
    - Sables + silts  $> 35\%$  et  $N_1(60) > 20$  [soit  $qc1N > 30$  ]  
*soit  $qc > 3$  MPa (avec  $qc$  à 10 m de profondeur)*
    - Sables propres avec  $N_1(60) > 30$  [soit  $qc1N > 150$  ]  
*soit  $qc > 15$  MPa (avec  $qc$  à 10 m de profondeur)*
- Si risque de liquéfaction ne peut être négligé, utiliser les diagrammes empiriques de liquéfaction EC8-5 Annexe B normative : SPT ; CPT ; Vs

# Justification des traitements anti liquéfaction

---

- ▶ Principes de justifications des traitements anti liquéfaction
  - ▶ Augmenter la compacité
  - ▶ Drainage
  - ▶ Diminution des sollicitations
  - ▶ Confinement
- ▶ Justification des traitements
  - ▶ Inclusions souples
  - ▶ Inclusions rigides
  - ▶ Confinement
- ▶ Dispositions constructives
- ▶ Contrôle

# Justification des traitements anti liquéfaction

OBJECTIF:

$$F_s = CRR/CSR \geq 1,25$$

ou  $r_u = u/\sigma_v \leq 0,6$

Selon le procédé retenu, le potentiel de liquéfaction peut être réduit :

**Action 1: en augmentant la compacité du sol** : augmentation de CRR

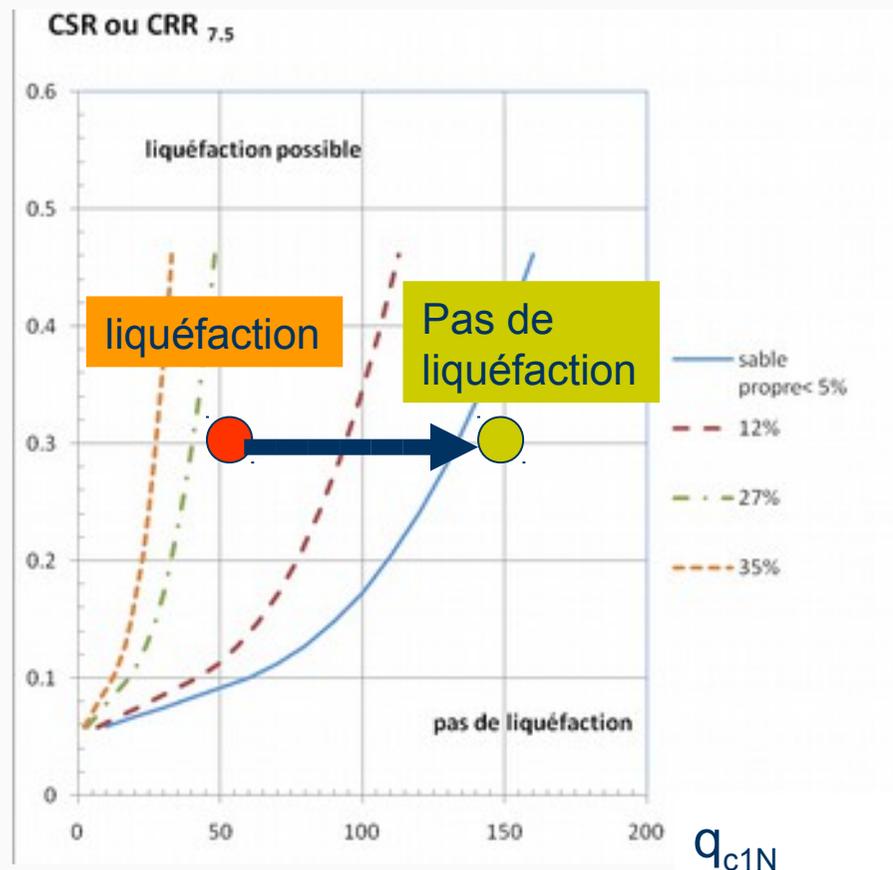
**Action 2: en drainant**

**Action 3 : en diminuant les sollicitations dans le sol** ce qui se traduira par une réduction du cisaillement et de la distorsion dans le sol

**Action 4: en confinant le sol liquéfiable**

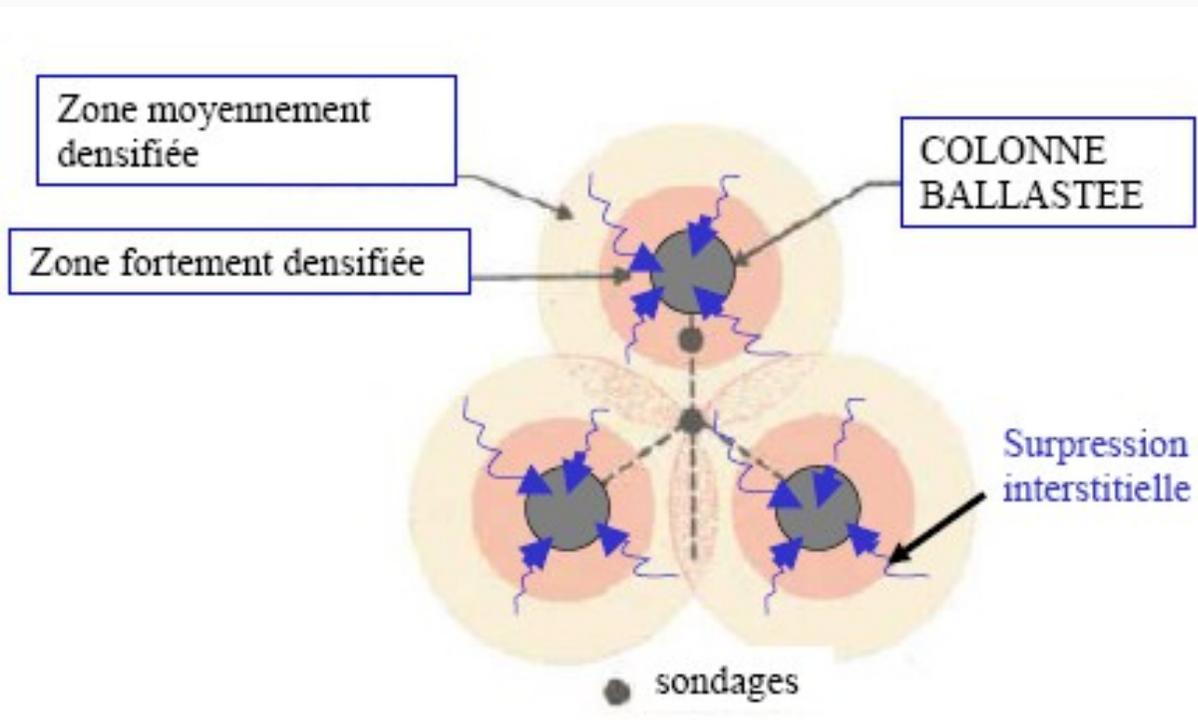
# Amélioration de sol dans la masse

L'augmentation de la compacité, en diminuant le volume des vides du sol et donc son caractère contractant, permet d'augmenter sa résistance au cisaillement



# Inclusions souples granulaire (colonnes ou plots ballastés)

Elles jouent sur une combinaison des actions:



- 1) amélioration de la compacité par les modes de mise en œuvre (vibration, incorporation avec refoulement),
- 2) Caractère drainant des colonnes (Madhav MR, et Arlekar JN 2000, Seed et Booker 1977) qui peut contrôler les augmentations transitoires de pression interstitielle dans les conditions sismiques considérées

Diminution des sollicitations dans le sol : pas d'effet notable pour des taux de substitution faibles.

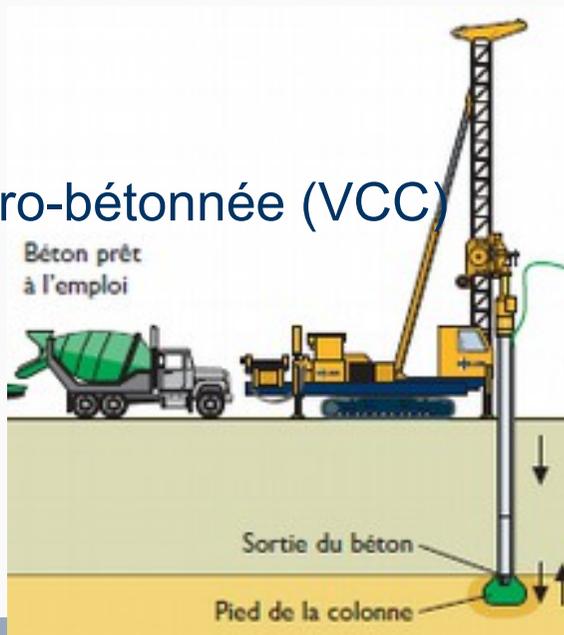
# Inclusions rigides

Pour les inclusions rigides, pas de possibilité de drainer et pas de diminution notable des sollicitations sismiques sur le sol pour des faibles taux de substitution

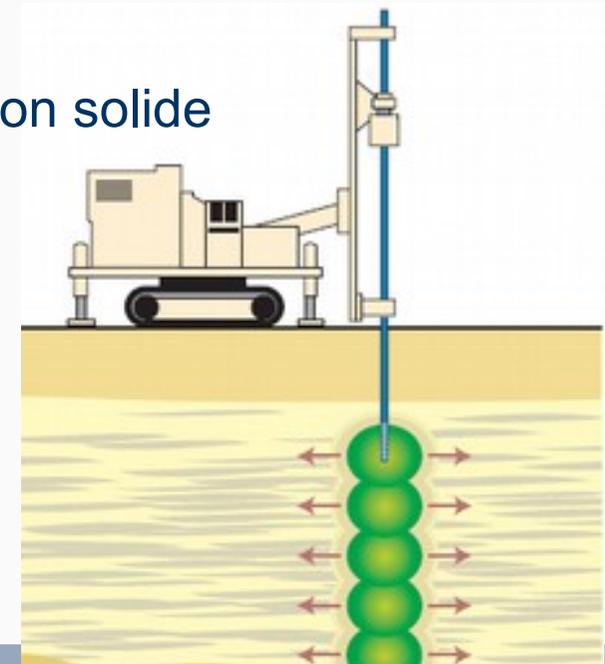
donc la seule possibilité :

Augmentation de la compacité des sols par refoulement ou vibration,

Colonne vibro-bétonnée (VCC)



Injection solide



# Liquéfaction

	Augmentation du CRR	Diminution des sollicitations	Drainage
- Vibrocompactage - Compactage dyn. - Injection solide	<b>X</b>		
Confinement		<b>X</b>	
Inclusions souples (en gravier)	<b>X</b>	<b>x</b>	<b>X</b>
Inclusions rigides petit diamètre	Effet négligeable	Effet négligeable	
Inclusions rigides (Procédés particuliers)	<b>X</b>  - Par vibration (vibreur de profondeur) - Par refoulement (injection solide)	<b>X</b>  En général, pour des taux de substitution élevés : - Jet-Grouting - DSM	

# Vérification des modes de rupture

## Dimensionnement des fondations

- ◆ Vis-à-vis de liquéfaction
- ◆ Vis-à-vis d'une perte de portance
- ◆ Vis-à-vis du glissement

- Rupture par glissement

$$V_{ed} < F_{rd} + E_{pd}$$

$$F_{rd} = N_{ed} / (\tan \phi / \gamma_m)$$

- Rupture par perte de capacité portante

$$\frac{(1 - 0.21\bar{F})^2 (2.57\bar{V})^2}{(\bar{N})^{0.7} [(1 - 0.21\bar{F}^{1.22}) - \bar{N}]^{1.29}} + \frac{(1 - 0.44\bar{F})(\gamma\bar{M})^2}{(\bar{N})^{2.14} [(1 - 0.21\bar{F}^{1.22}) - \bar{N}]^{1.81}} - 1 \leq 0$$

# Rôle des inclusions rigides

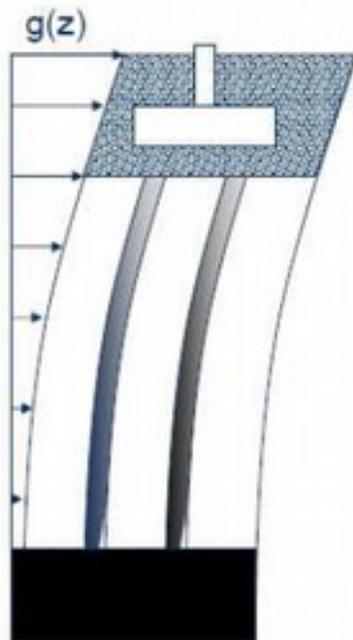
---

- ◆ Il y a toujours un matelas entre les inclusions et la structure portée, surtout pour les semelles
- ◆ Domaine n°1 : les inclusions rigides sont nécessaires à la justification de la portance
- ◆ Domaine n°2 : les inclusions rigides ont pour fonction principales la réduction des tassements : dans ce cas, le séisme peut entraîner une perte de fonctionnalité des inclusions se traduisant pas des tassements pendant et après le séisme: *Il n'est pas nécessaire d'armer les inclusions*

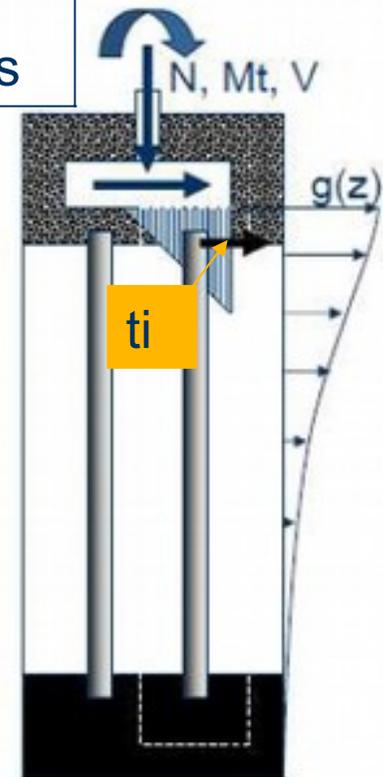
Inclusions rigides:

Comme pour les pieux, prise en compte:

- des forces d'inerties: torseur ( $N_{ed}$ ,  $V_{ed}$ ,  $M_{ed}$ ),
- des forces cinématiques (dans certains cas)
- par contre interaction sol-structure: idem semelles superficielles



Effet cinématique



Effet inertiel

Dans le cadre d'une recherche d'un gain de portance, les inclusions rigides doivent rester dans le domaine élastique c'est-à-dire que toutes les sections doivent rester comprimées.

# Domaine n°1

- ◆ Garantir la résistance des inclusions pendant le séisme : elles doivent rester dans le domaine élastique
- ◆ Vérifier le comportement vis-à-vis des efforts inertiels et cinématiques ( et de leur cumul §5.3)

	I et II	III	IV
A		I	I
B		I	I
C		I	I
D		C+I	C+I
E		C+I	C+I
S1		C+I	C+I
S2		C+I	C+I

	I	II	III	IV
A		I	I	I
B		I	I	I
C		I	I	I
D		I	C+I	C+I
E		I	C+I	C+I
S1		I	C+I	C+I
S2		I	C+I	C+I

# Intégrité des inclusions

- ◆ Vérifier que les contraintes induites sont acceptables ( T, N, M<sub>f</sub>)
- ◆ Utiliser les recommandations ASIRI. Coefficient partie sur le béton  $\gamma_c = 1.30$
- ◆ En compression

$$\min(7 \text{ MPa} ; f_{cd} ; 0,9 f_c / 1,30)$$

$$f_{cd} = \alpha f_c / (k_1 * k_2 / k_3)$$

$$\alpha = 0.8 \text{ si non armé, } 1 \text{ sinon}$$

# Conclusions

---

- ◆ Un ouvrage de référence
- ◆ Un guide technique
- ◆ Des techniques de plus en plus employées

---

Les différents exposés effectués lors de la séance AFPS/CFMS du 14 novembre 2013 sont disponibles sur le site du CFMS:

[WWW.Geotechnique.org](http://WWW.Geotechnique.org)

Ou

<http://www.cfms-sols.org/documentation/exposes-du-cfms>

Le guide technique sur l'amélioration des sols en zone sismique est disponible auprès des presses de l'ENPC

A diamond-shaped collage of various construction workers in safety gear, including hard hats and high-visibility vests, engaged in different tasks.

**Merci pour votre attention !**

[www.keller-france.com](http://www.keller-france.com)

