

GUIDE AFPS/CFMS

« Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques »

# DESCRIPTIFS DES PROCÉDES D'AMÉLIORATION ET RENFORCEMENT DE SOL

Jean-Marc DEBATS



Association régie par la loi  
du 1.07.1901



# Classification générale des procédés d'amélioration et renforcement

## 1. Amélioration dans la masse:

- Préchargement et drainage
- Vibrocompactage
- Compactage dynamique
- Injection solide

## 2. Amélioration et renforcement des sols par inclusions souples

- Colonnes ballastées
- Substitution dynamique

## 3. Renforcement de sol par inclusions rigides

## 4. Autres techniques

- Deep soil mixing
- Jet grouting

# Domaine d'application des différentes techniques d'amélioration

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				

# Préchargement et drainage

## 1. Préchargement : peu efficace contre la liquéfaction

## 2. Drainage

- Colonnes de gravier ou sable non compacté
- Drains préfabriqués cylindriques mis en place par mandrin battu ou vibré
  - Exemple : « EQ-Drain » (75 à 150mm de diamètre)



D'après : Kyle Rollins and Joshua K.S. Anderson - Brigham Young University, Civil & Environmental Engineering Dept, Provo, Utah, USA

# Drainage : inconvénients

- La perméabilité du sol est difficile à estimer avec une précision meilleure que un ou deux ordres de grandeur
  - ... ce qui a des conséquences énormes sur le choix de la maille de drainage
  - ... le problème étant accru du fait de la variabilité naturelle des terrains liquéfiables (teneurs en fines variables notamment)
- En outre il ne faut pas négliger le risque de colmatage des drains dans le temps ou au moment de la mise en œuvre (cas des colonnes ballastées notamment)
  - ... il est alors difficile de garantir que la quantité d'eau nécessaire puisse être évacuée au cours des quelques secondes ou dizaines de secondes critiques d'un tremblement de terre.

# Vibrocompactage - Généralités

## Principe

Compactage du sol in-situ sous l'effet des vibrations

Domaine de profondeur : 3 m à 65 m

Maille de traitement : 2,0 m à 5,5 m

Densité relative atteinte :  $D_r = 60\%$  à  $80\%$

## Contrôle qualité

Pendant le compactage : Enregistrements profondeur / intensité, Consommation de sable et/ou gravier par point de traitement, Temps de traitement par point.

Après : pénétromètres statiques ou SPT, mesure des tassements.

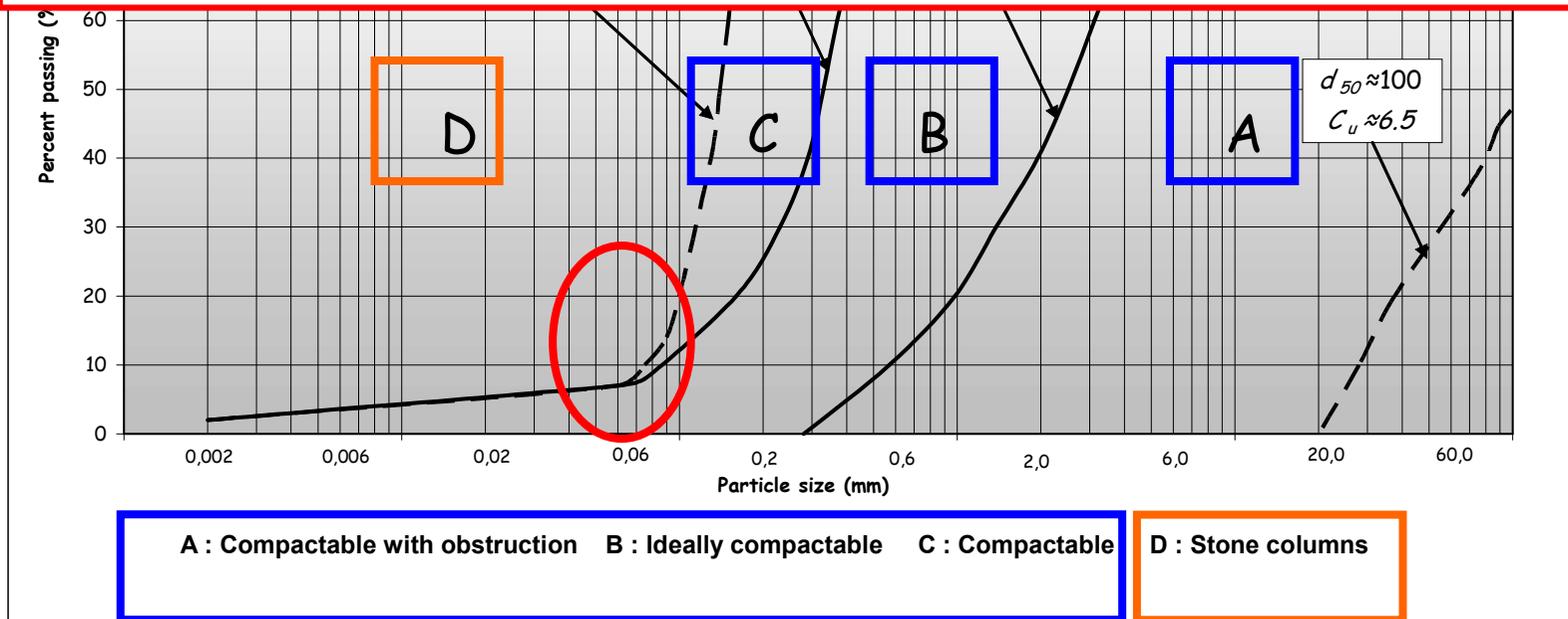
## Projet

Estimer la densité relative et/ou la résistance CPT ou SPT à atteindre pour limiter le risque de liquéfaction.

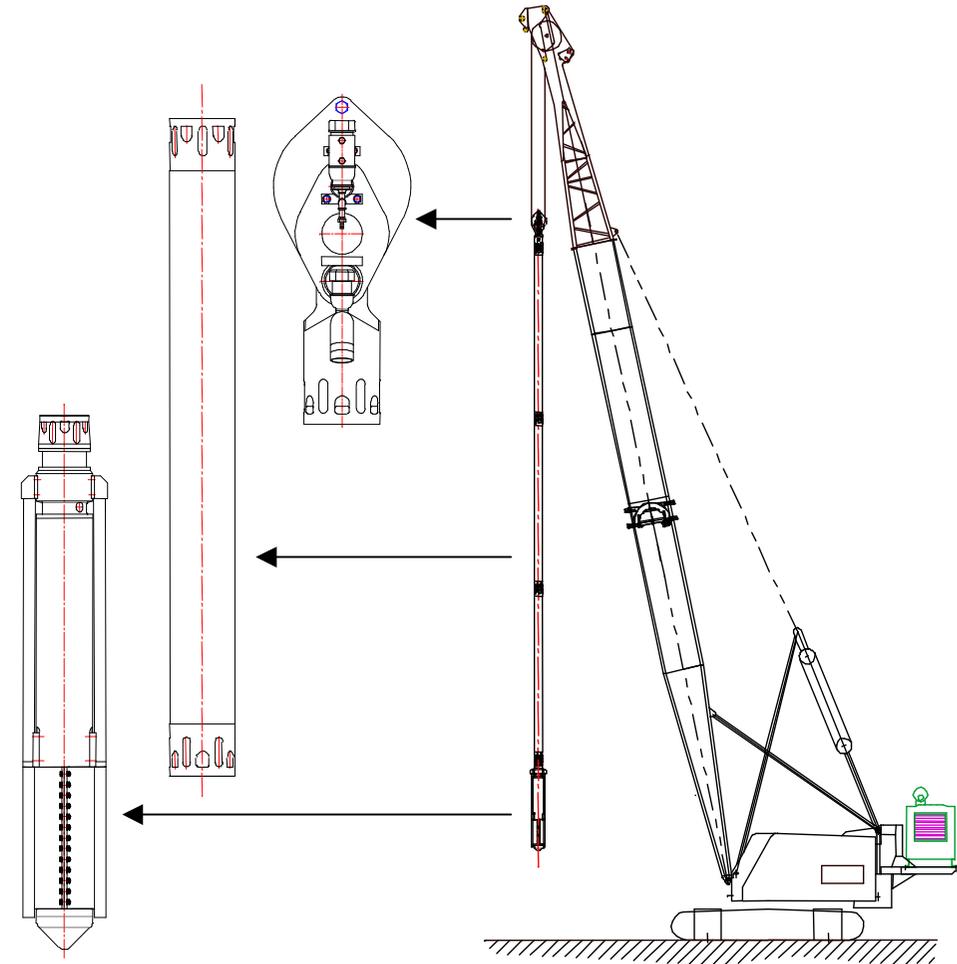
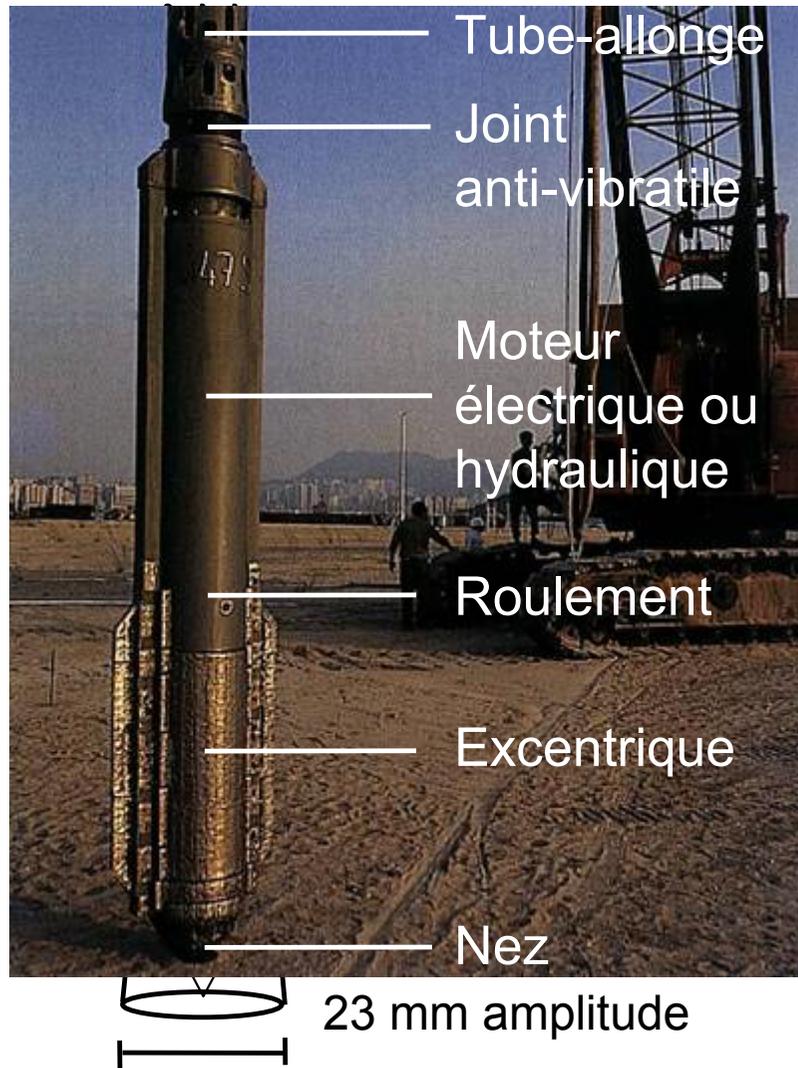
# Vibrocompactage : domaines d'application

## Très important :

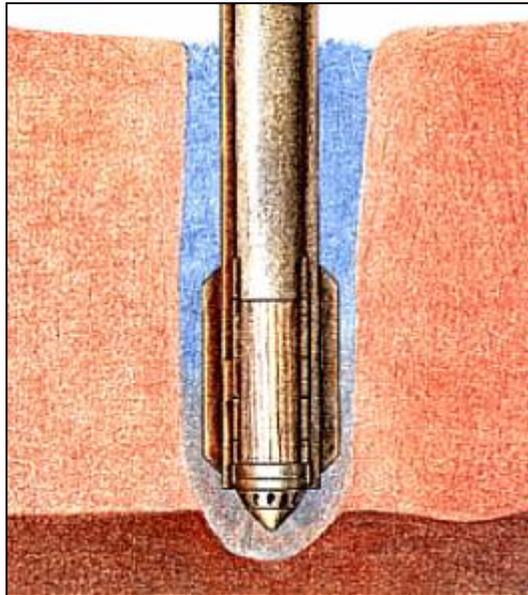
- C** et la partie gauche de **B** sont potentiellement liquéfiables
- la partie droite de **D** aussi !
  - le traitement des terrains avec plus de 10% de fines est plus difficile



# Vibrocompactage : vibreur et porteur

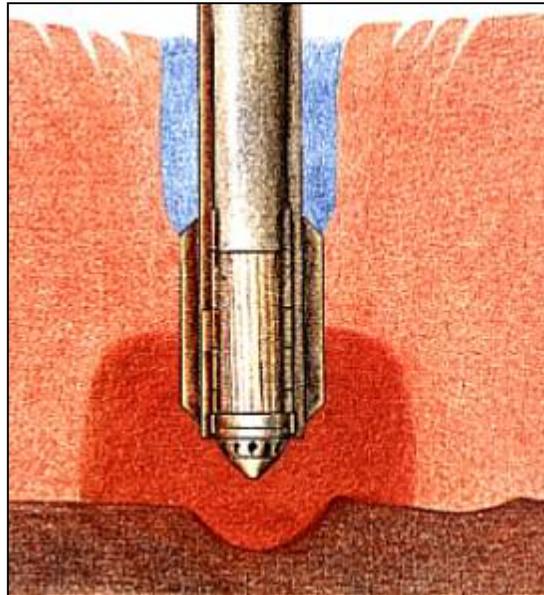


# Vibrocompactage - Mise en œuvre



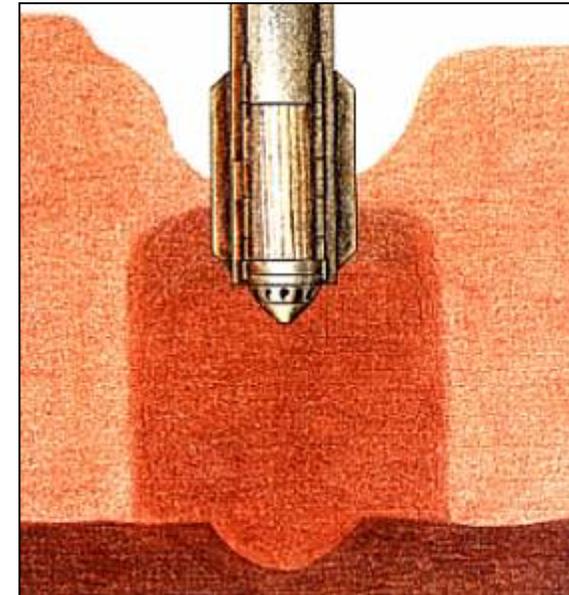
## Pénétration

Le vibreur pénètre dans le sol jusqu'à la profondeur souhaitée sous l'effet des vibrations et du lançage à l'eau ou à l'air



## Compactage

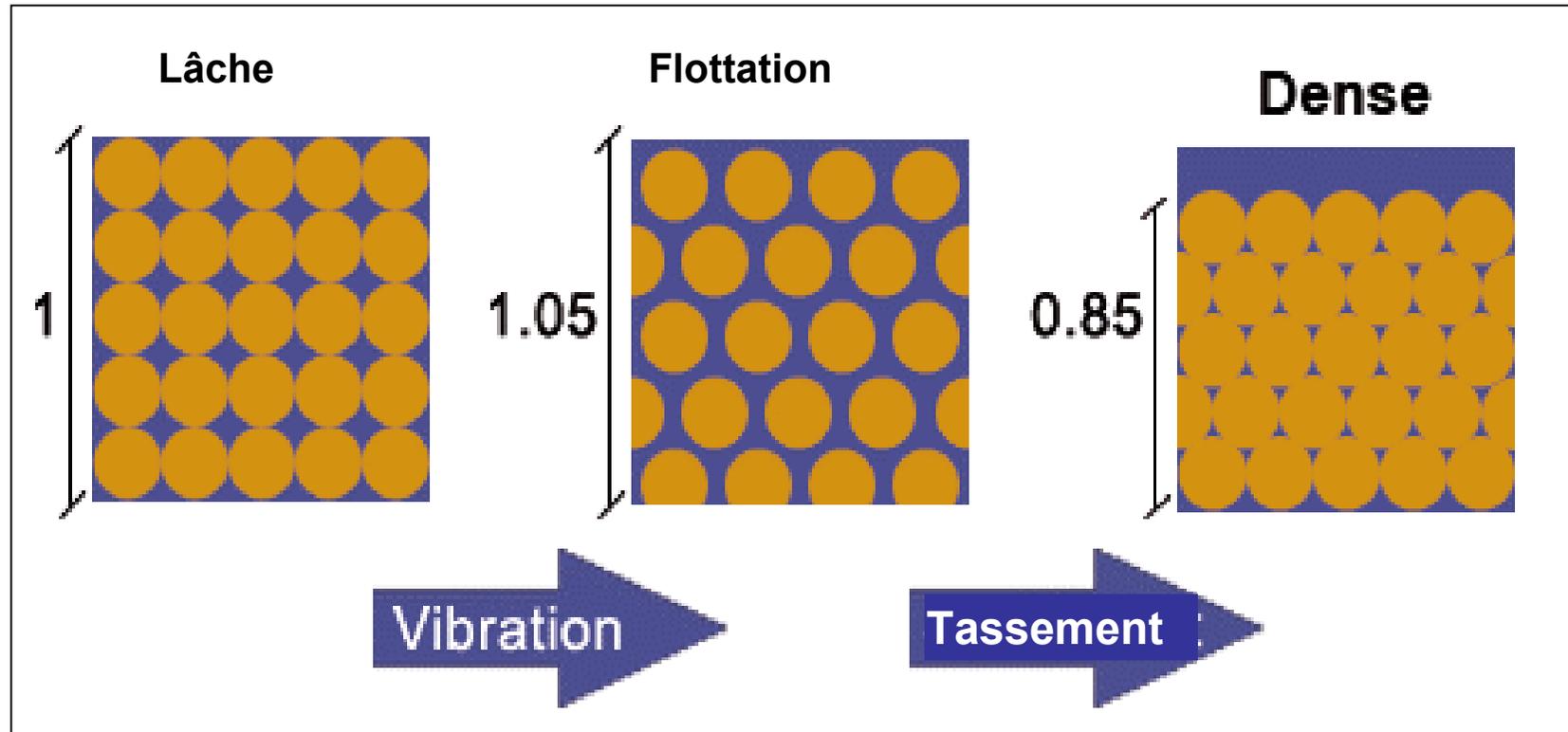
L'aiguille vibrante est remontée par passes de 50cm à 1m. Le sable ou le gravier en place descend vers la pointe du vibreur



## Remblaiement

Le compactage s'effectue avec remblaiement depuis la surface, ou simplement en laissant s'abaisser le niveau du sol en place

# Vibrocompactage – Mode d'action



# Tassements causés par le vibrocompactage



**Tassement  
5% à 10%**

# Planches d'essais – Contrôle qualité

## Objectifs

**Vérifier la densification des sables**

**Définir et maintenir les paramètres d'exécution**

## Approches

**Planche d'essais avant production**

**Enregistrement des paramètres d'exécution**

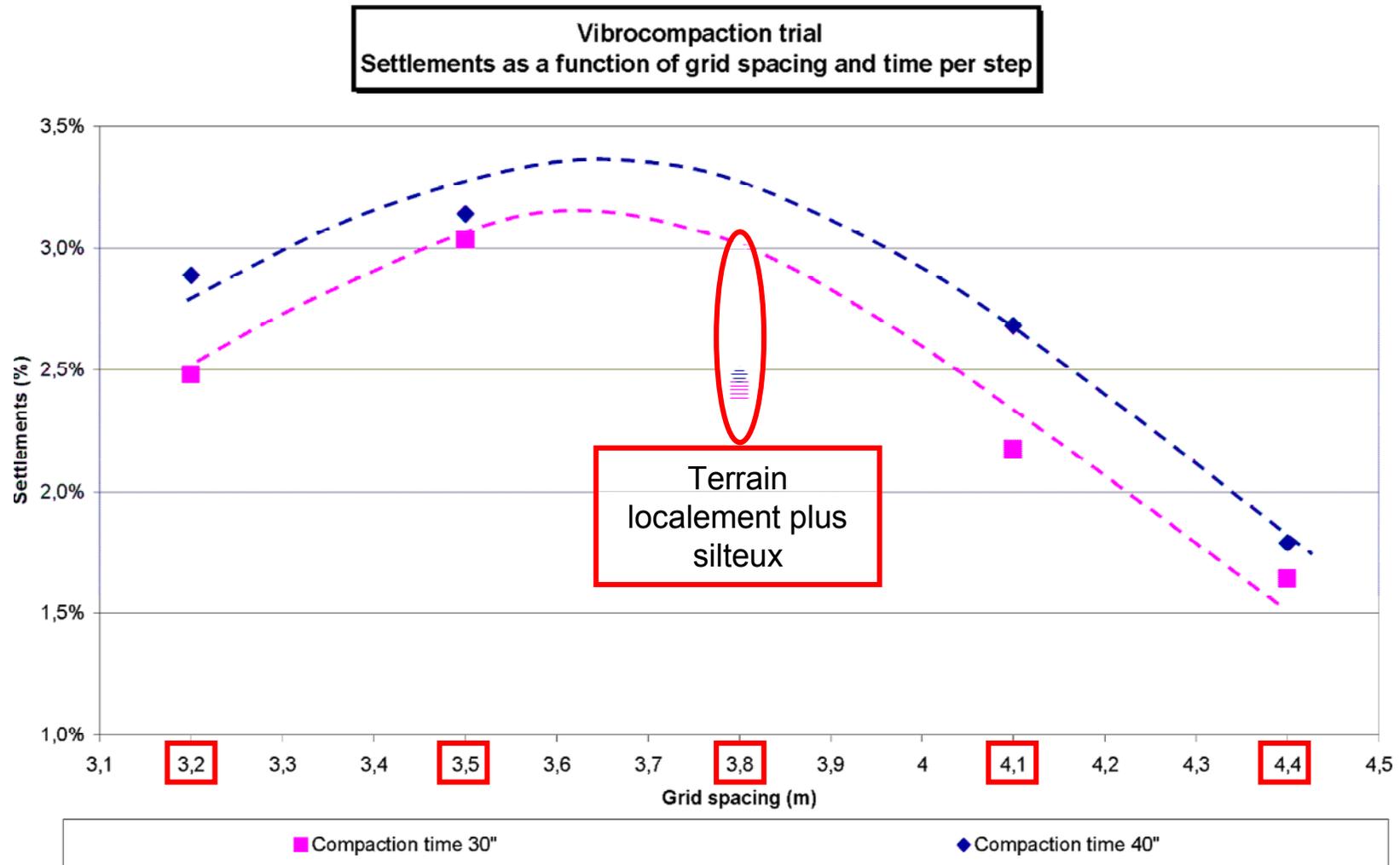
**Essais in-situ SPT, CPT, PMT**



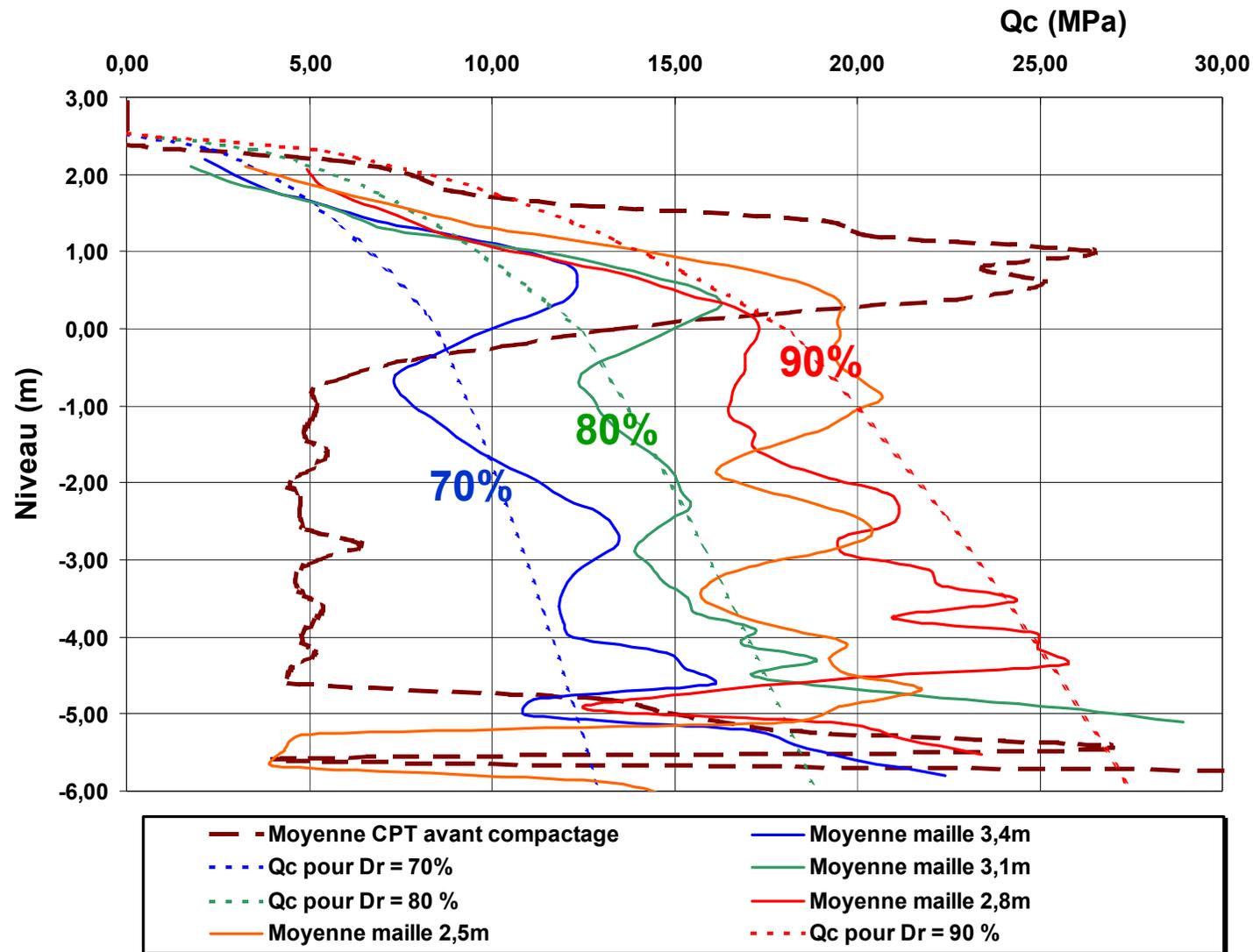
# Planche d'essais avant production



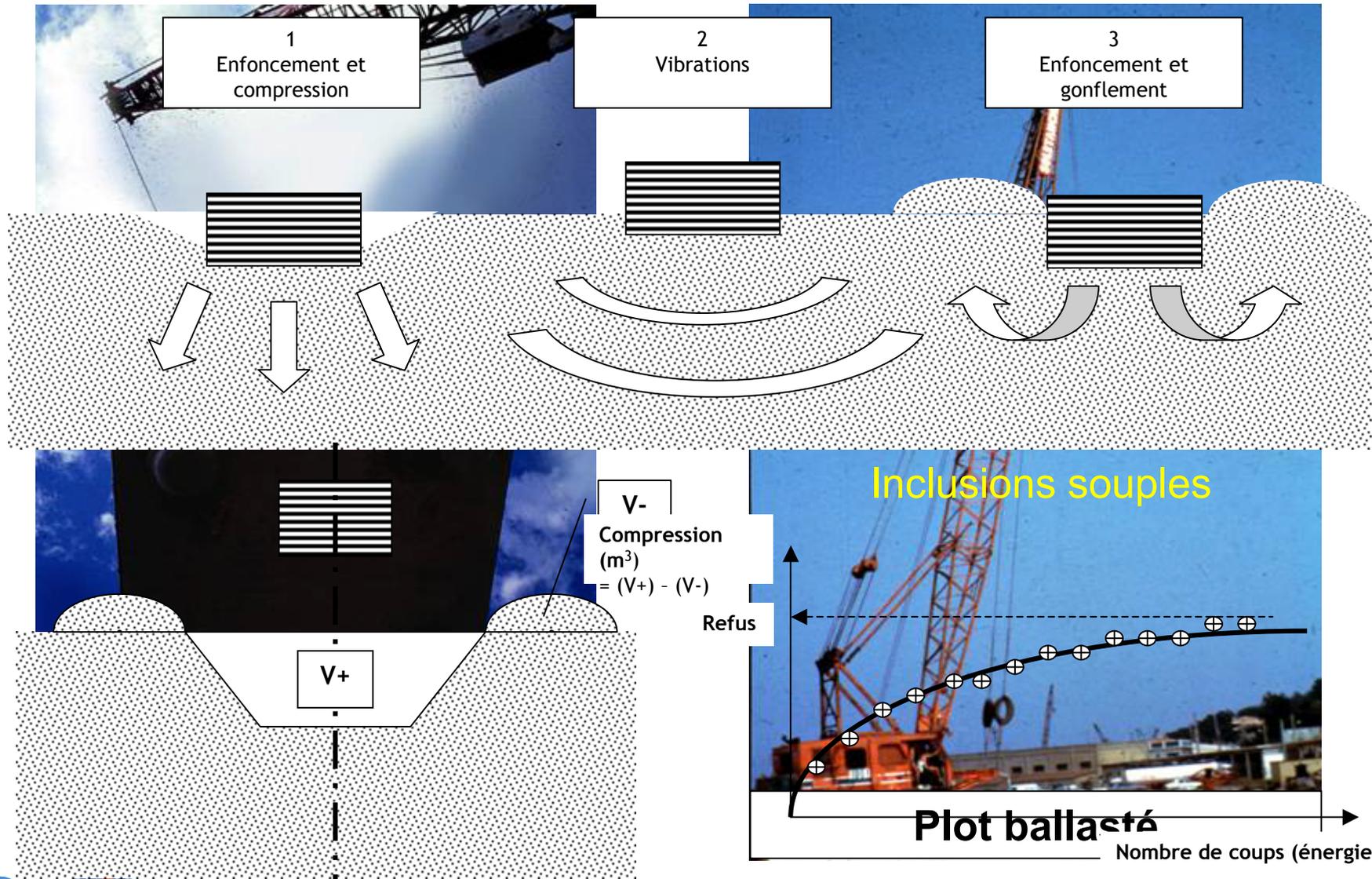
# Tassements dans une planche d'essais



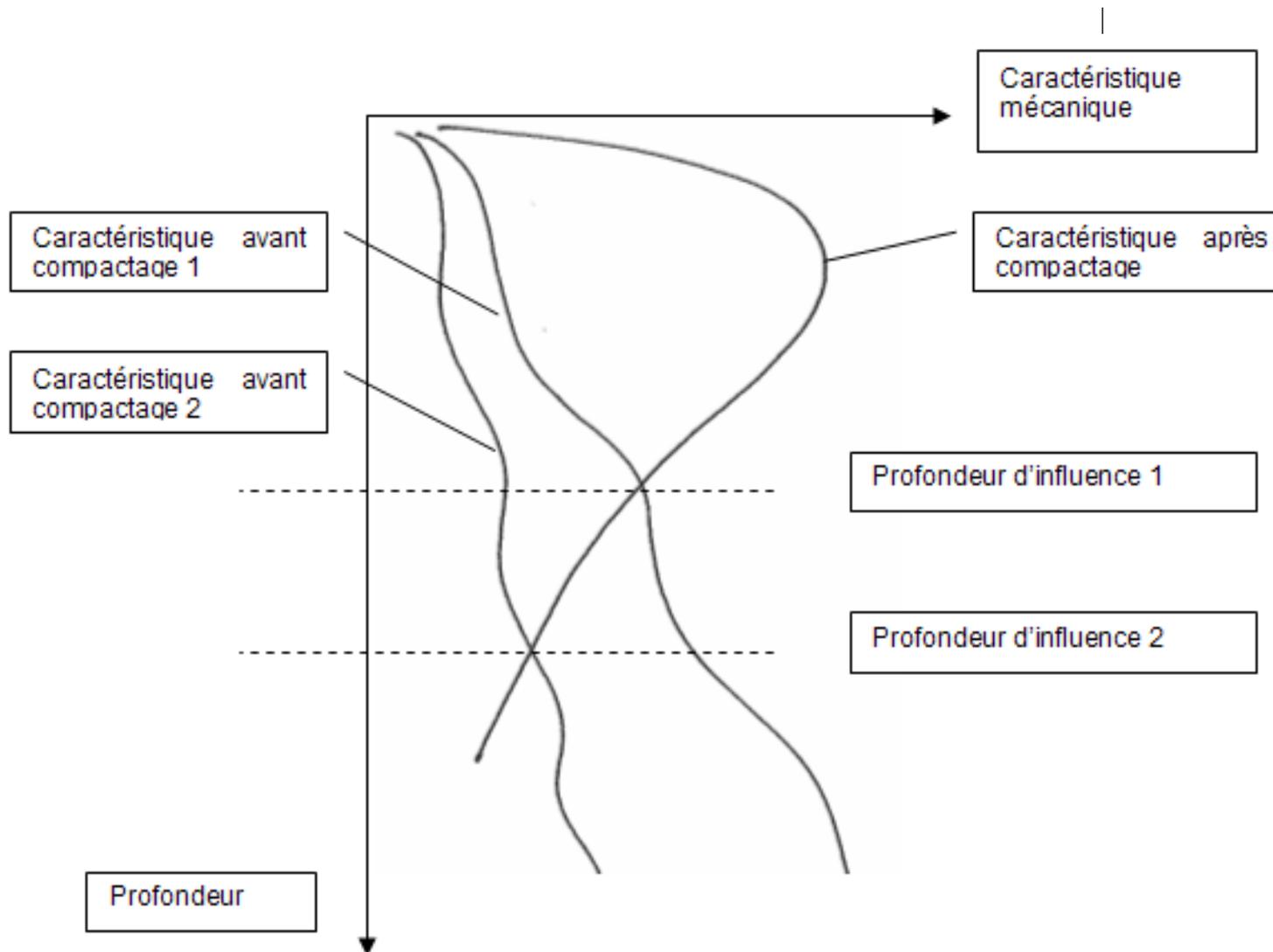
# Exemple de résultats dans une planche d'essais



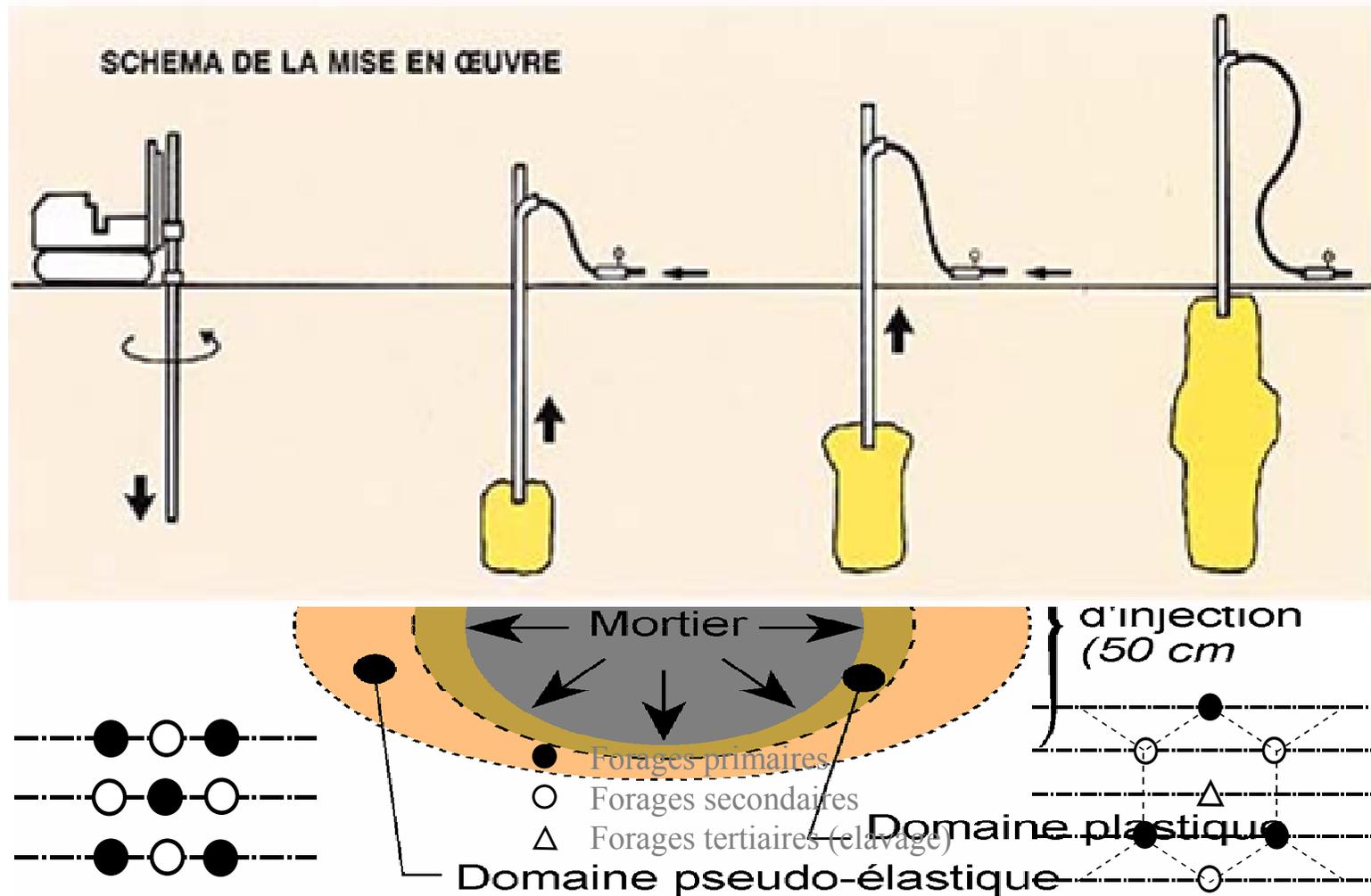
# Compactage dynamique



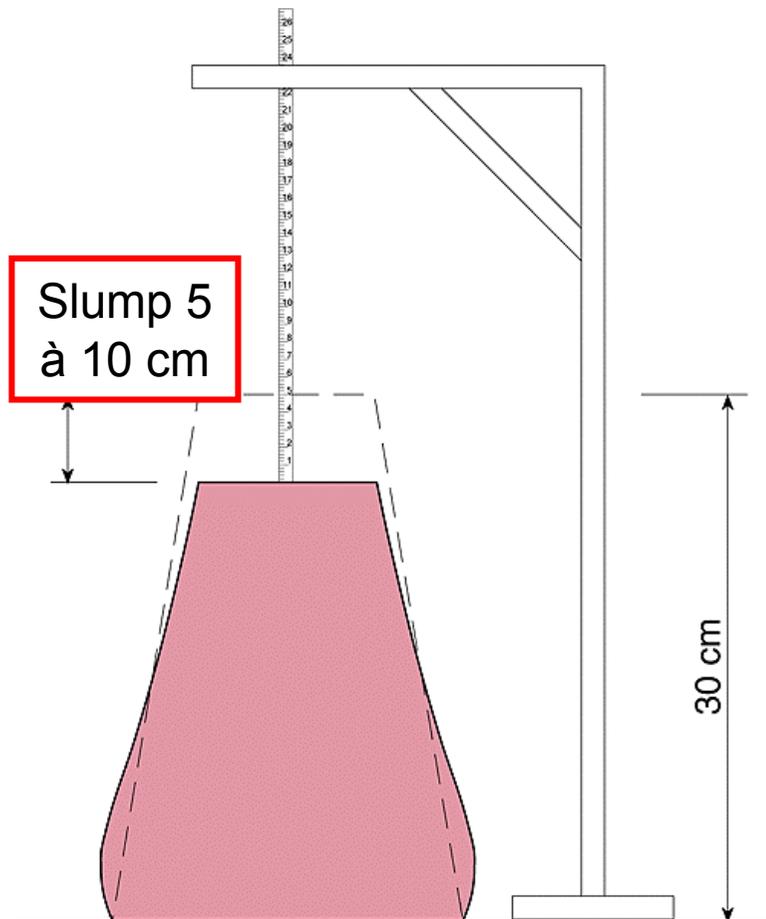
# Compactage dynamique : phasage, profondeur d'influence



# Injection solide (« compaction grouting »)



# Injection solide : essai d'affaissement du mortier



# Colonnes ballastées - Généralités

## Principe

Mise en place de colonnes de ballast compacté dans un sol cohérent.

Les colonnes renforcent et drainent le sol. Améliorer le sol encaissant est aussi un but. But principal pour la diminution du risque de liquéfaction.

Domaine de profondeur : 3 m à 30 m

Maille de traitement : 1,0 m à 3,0 m

Diamètre de colonne : 0,6 m à 1,5 m

## Contrôle qualité

Pendant le traitement : enregistrements profondeur / intensité et consommation de ballast par niveau.

Après : essais de chargement, essais in-situ dans et entre colonnes.

## Diminution du risque de liquéfaction

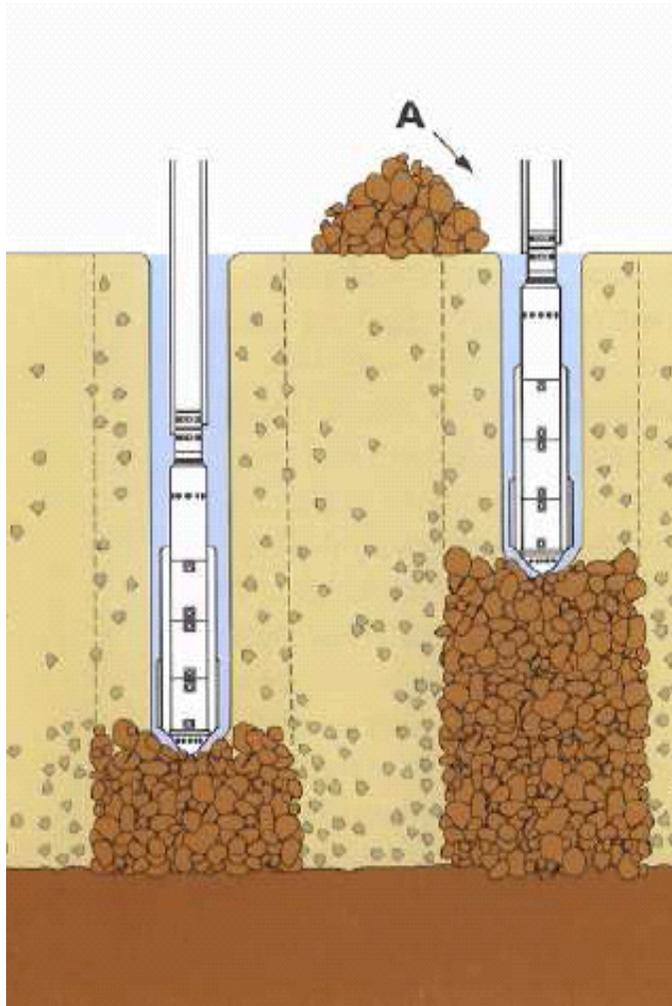
Amélioration du sol encaissant

Diminution de la sollicitation de cisaillement dans le sol

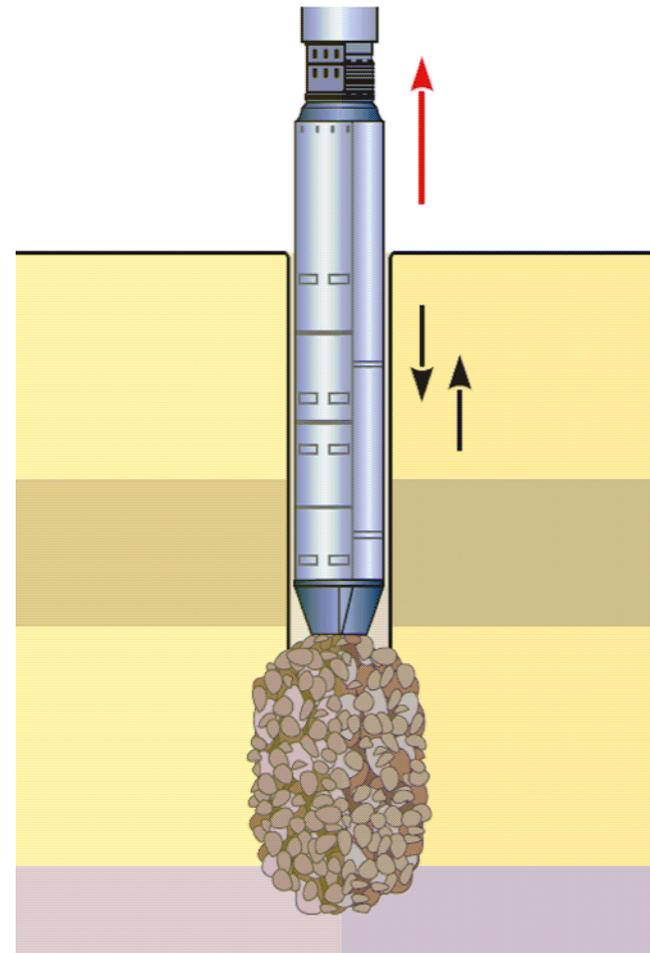
Effet bénéfique du drainage

# Colonnes ballastées : voie humide, voie sèche

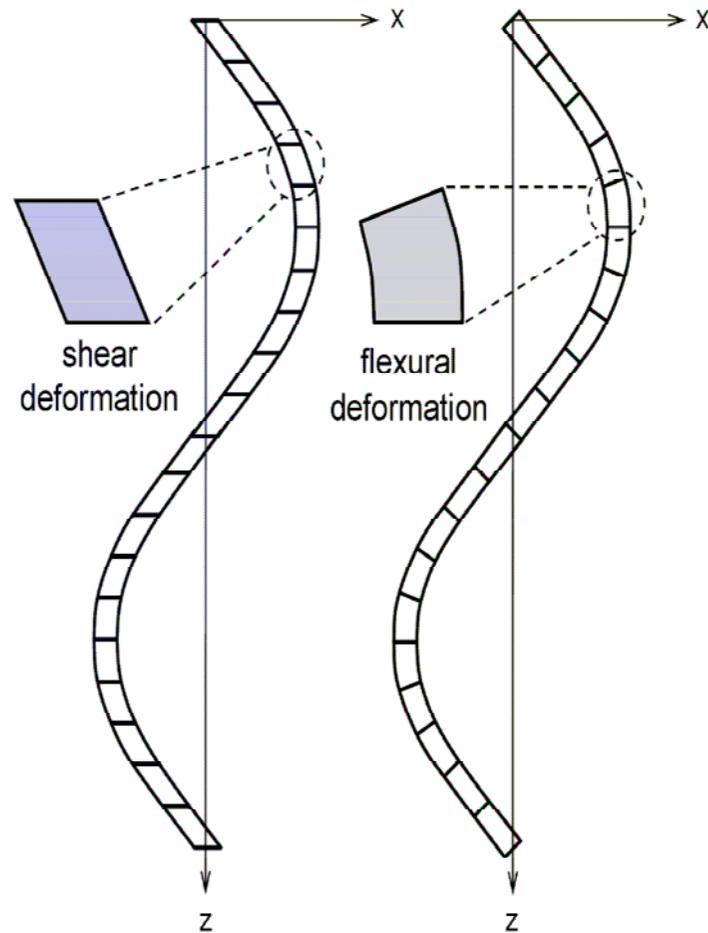
Voie humide



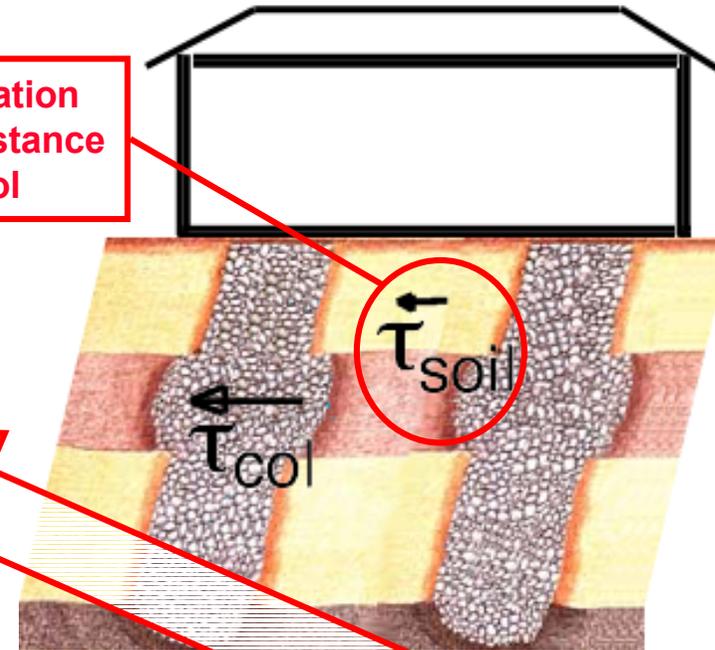
Voie sèche



# Réduction du risque de liquéfaction par inclusions souples



Amélioration  
de la résistance  
du sol

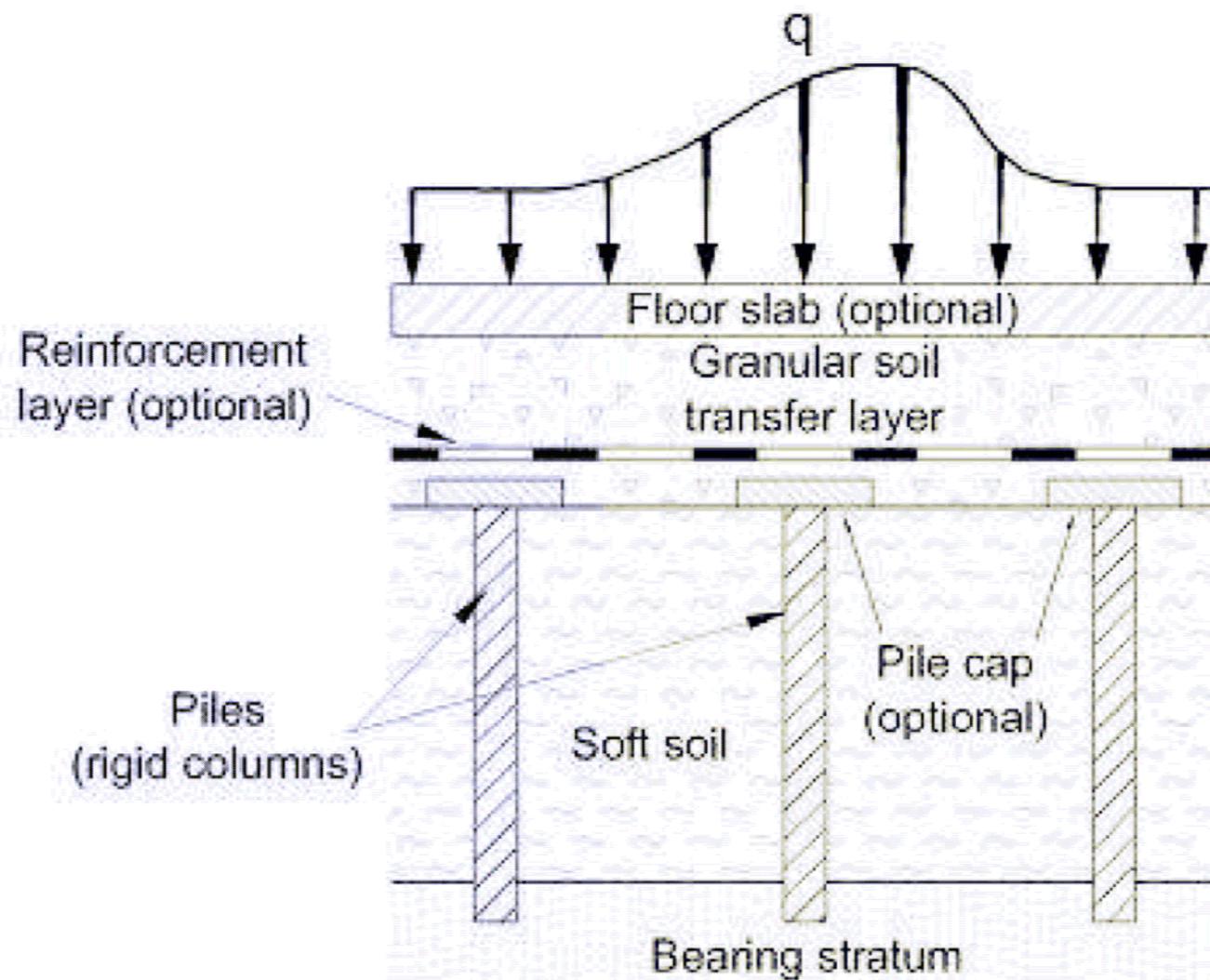


La contrainte de cisaillement  $\tau$  induite par le tremblement de terre est répartie entre sol et colonne en proportion des modules relatifs.

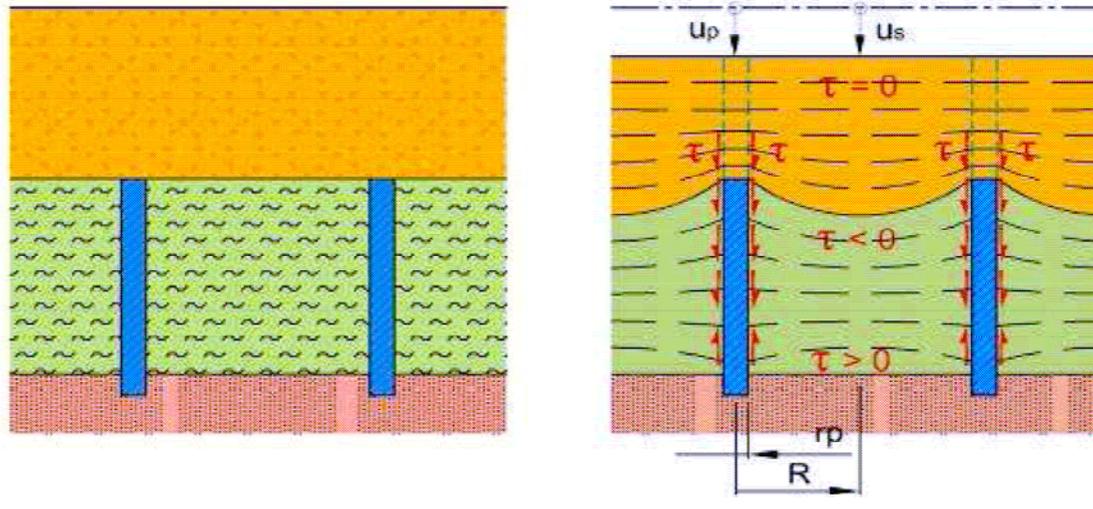


D'après : Olgun & Martin - Seismic Behavior of columnar reinforced ground - Beijing 2008

# Inclusions rigides : éléments constitutifs



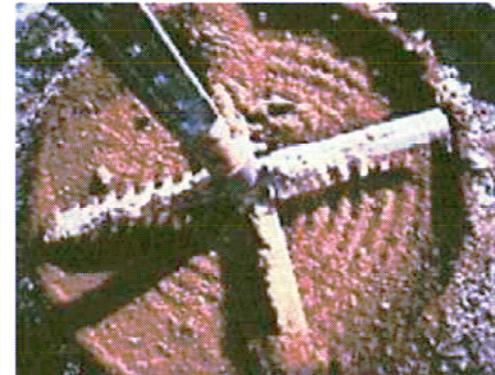
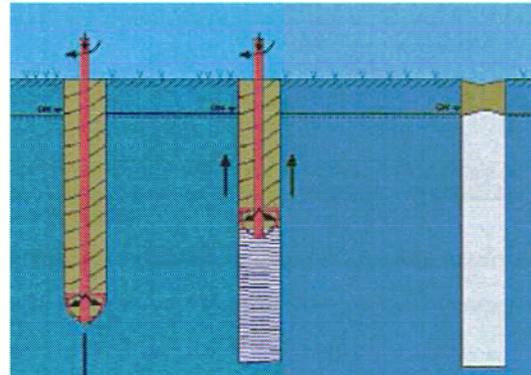
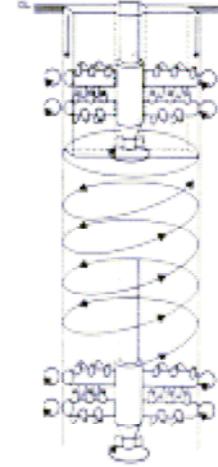
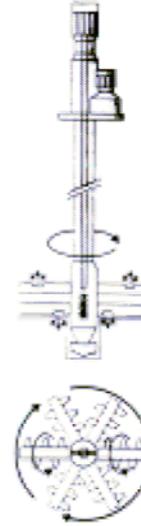
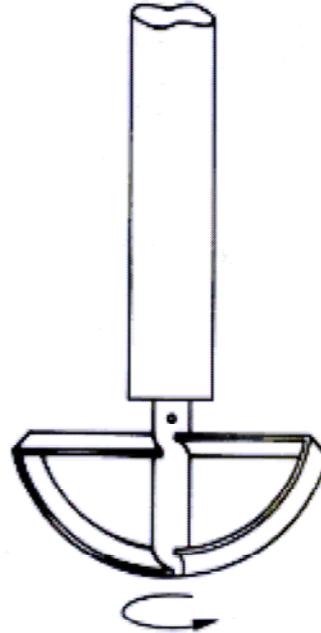
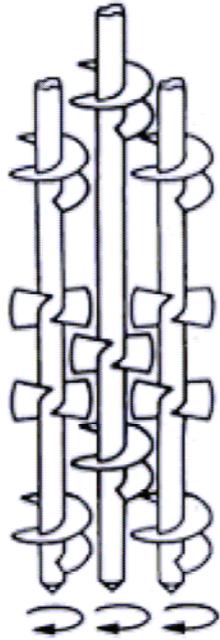
# Inclusions rigides : fonctionnement



Sous un remblai

Sous un dallage

# Deep soil mixing

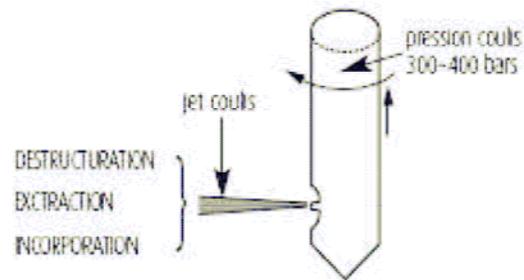


# Deep soil mixing

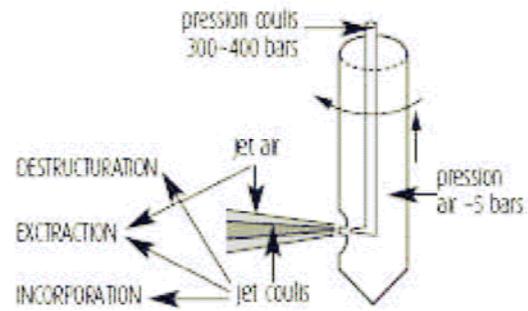


Fraises

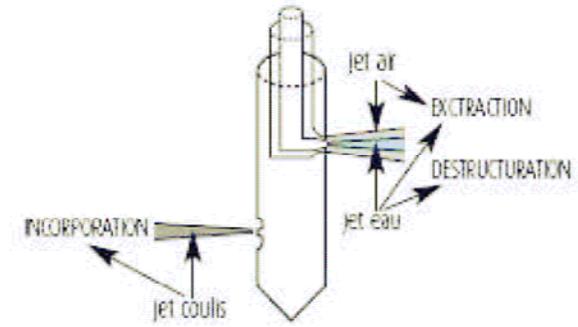
# Jet Grouting



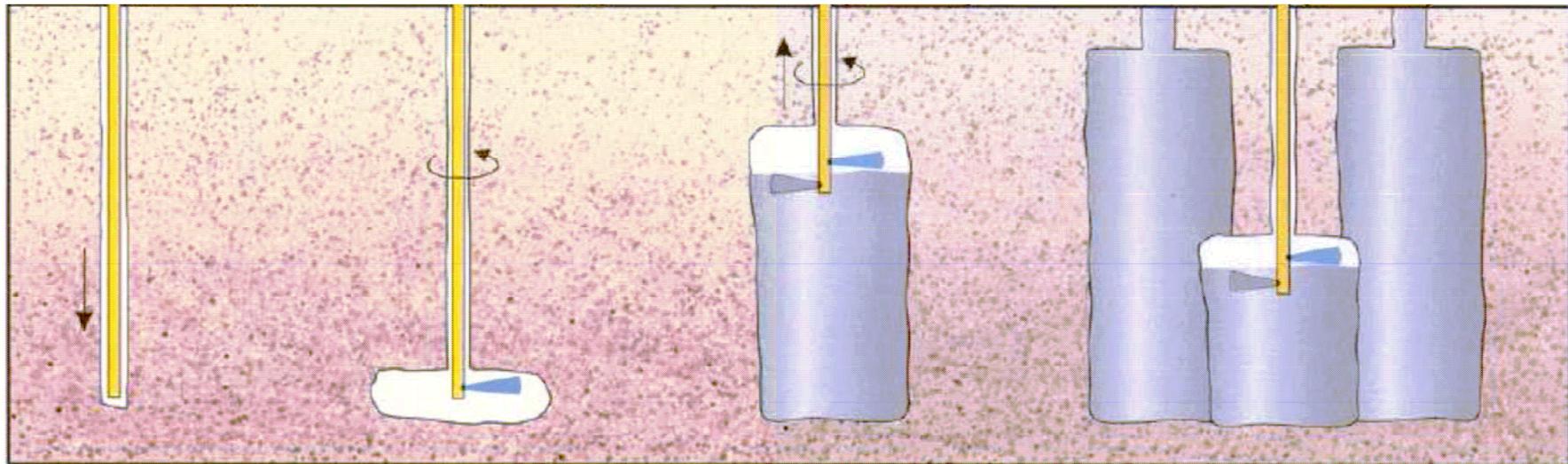
Le Jet Simple



Le Jet Double



Le Jet Triple



# CONCLUSIONS

- 1. Des méthodes variées**
- 2. Adaptées chacune à des terrains ou problèmes différents**
- 3. Coûts au mètre cube de terrain traité très variables**
  - Allant de moins de 1 euro (drains, vibrocompactage, compactage dynamique)
  - ... à 15 ou 20 euros (injection solide)

**MERCI POUR VOTRE ATTENTION**