



**SOLETANCHE BACHY**

**REUNION CFMS, Paris**

**24/03/2010**

**Liquéfaction des sols sous séismes**

**Le procédé BIOCALCIS**

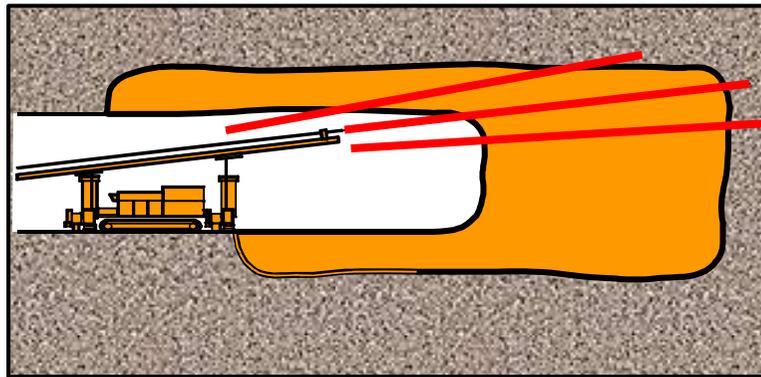
Annette Esnault Filet, Jean-Pierre Gadret

# Principe des injections classiques

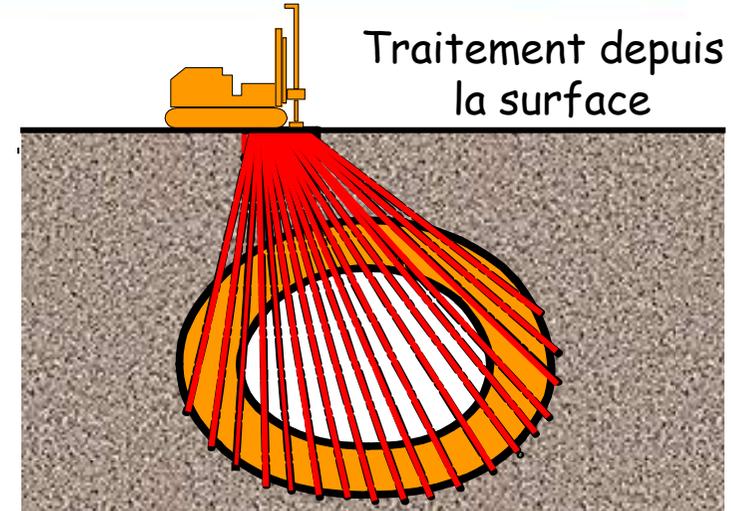
- TECHNIQUE D'AMELIORATION DE SOLS
- Consiste à introduire dans le terrain un matériau sous forme liquide pour en occuper la porosité
  - Réduction de la perméabilité : Etanchement
  - Amélioration de la cohésion : Consolidation
- Les matériaux employés sont sélectionnés en fonction de la nature du terrain et de l'application recherchée
  - Suspension granulaire à base de liants hydrauliques
  - Produits chimiques en solution organique ou minérale

# Exemples de principe de mise en œuvre et applications

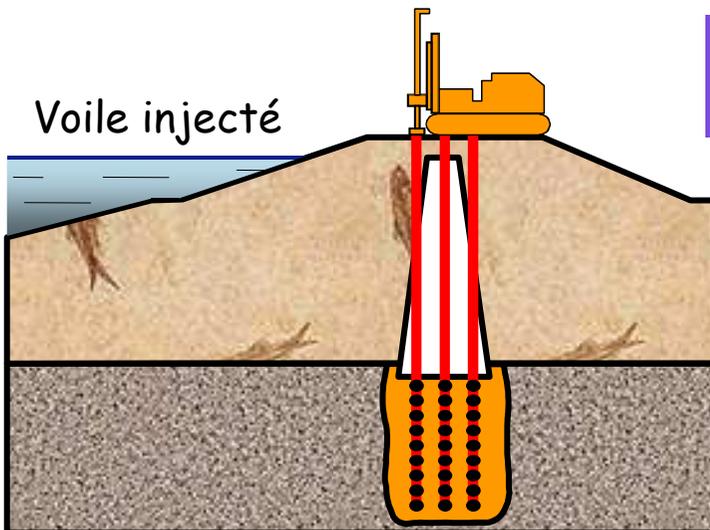
Traitement à l'avancement



Traitement depuis la surface

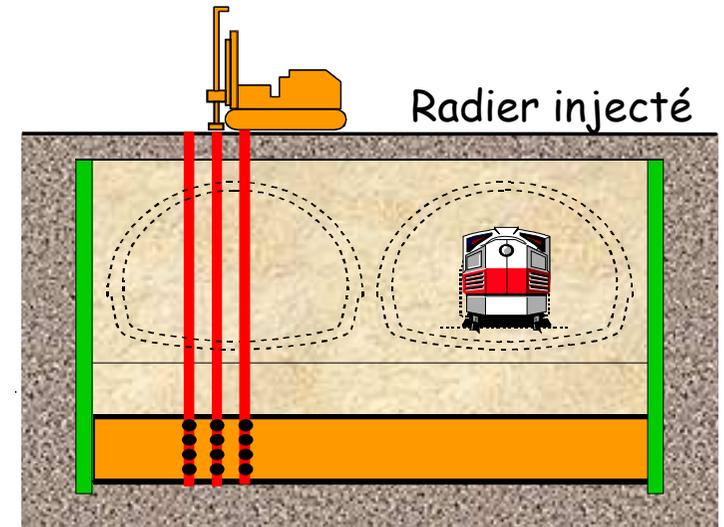


Voile injecté



**INJECTION  
CLASSIQUE**

Radier injecté

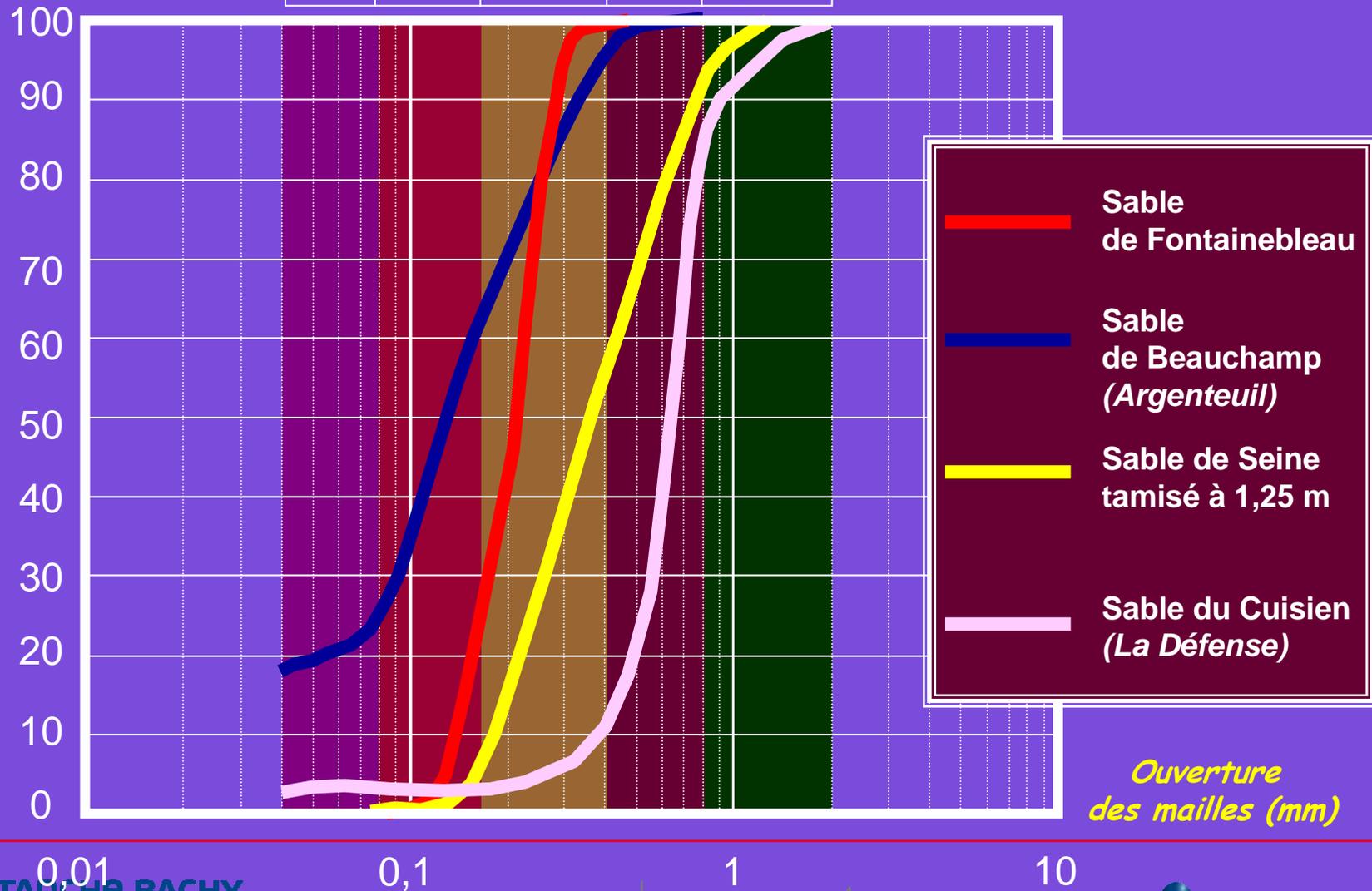


# Granulométrie des sables typiques concernés

## Granulométrie des sables de Paris

Tamisé (%)

Très fin	Fin	Moyen	Gros	Très gros
----------	-----	-------	------	-----------





## Présentation du procédé **BIOCALCIS**

- Pourquoi un nouveau procédé d'injection de sols fins ?
- Ses Applications possibles
- Les origines du procédé : principe de la précipitation de calcite in situ par voie biologique
- Les études réalisées
- Résultats & Perspectives

## Les limites des injections classiques

- La pénétrabilité des coulis : temps de prise , rhéologie
- Nombre de forages importants
- La pérennité des produits « chimiques » et leur acceptabilité environnementale

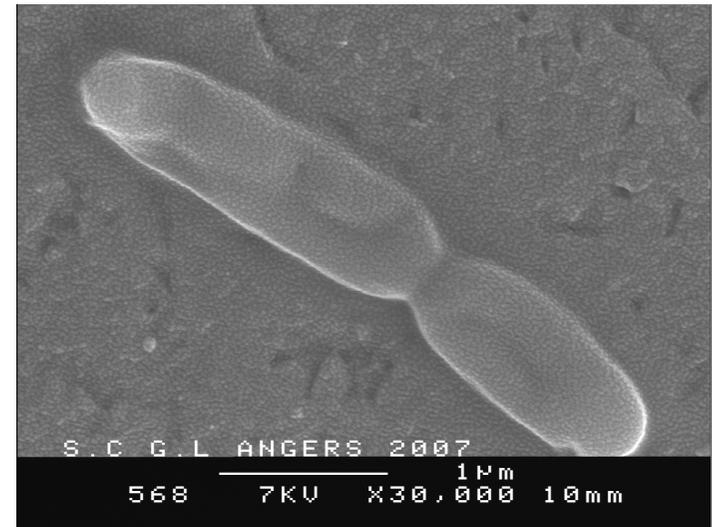


## La réponse par la BIOCALCIFICATION

Le procédé permet de précipiter de la *CALCITE IN SITU* .

La densité du maillage de forages d'injection par rapport à un traitement classique est réduite du fait de :

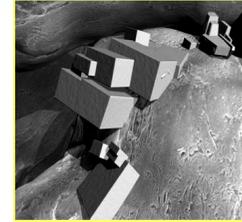
- La **dimension micrométrique** de la bactérie , qui permet d'**injecter dans des sols fins**,
- La **viscosité** de la suspension bactérienne est proche de celle de l'eau ( **2 à 4 cP**),
- La notion de **Temps de prise** n'existe plus : la précipitation s'obtient par réaction des bactéries avec une solution nutritive calcifiante



*Sporosarcina .pasteurii*

## Du carbonate de calcium à la Calcite : *quelques définitions ...*

- La Calcite correspond à une forme cristalline précise du  $\text{CaCO}_3$
- Le Carbonate de Calcium est le constituant principal de nombreuses roches sédimentaires : calcaires, marnes ; c'est un des carbonates les plus abondants.
- Le calcaire = roche qui contient au moins 75% de  $\text{CaCO}_3$
- Formation NATURELLE des carbonates de calcium :
  - après précipitation chimique lors de l'évaporation des solutions riches en bicarbonate de calcium (par exemple, les concrétions naturelles des grottes stalactite et stalagmite).
  - après précipitation par voie bactérienne, selon différentes voies en fonction de la teneur en oxygène, en matière organique ou de la présence de lumière, etc
  - Dans la majorité des cas = combinaison des deux phénomènes Bactériens + chimiques



## La calcite et BIOCALCIS

- L'utilisation de la carbonatogénèse bactérienne est utilisée industriellement pour des applications en rénovation de façades de monuments historiques
- Des travaux récents ont montré que le phénomène pouvait être utilisé pour des applications de traitement de sable par injection
- BIOCALCIS : application industrielle pour la consolidation des sols

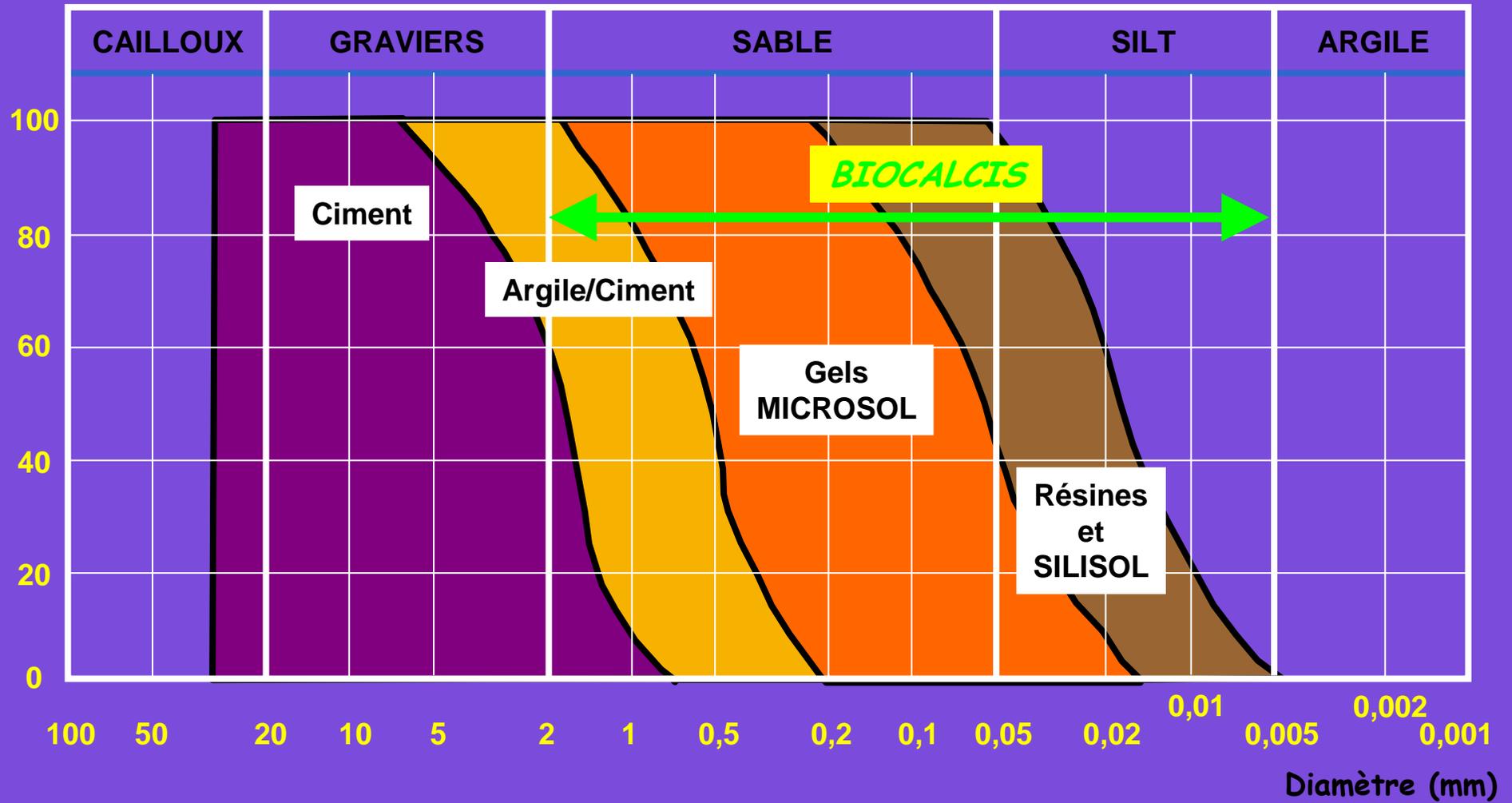
« Quand de simples bactéries rendront les sols plus solides » *Le Monde* 27/05/2007

Stromatolites, Lac Thetis, Australie



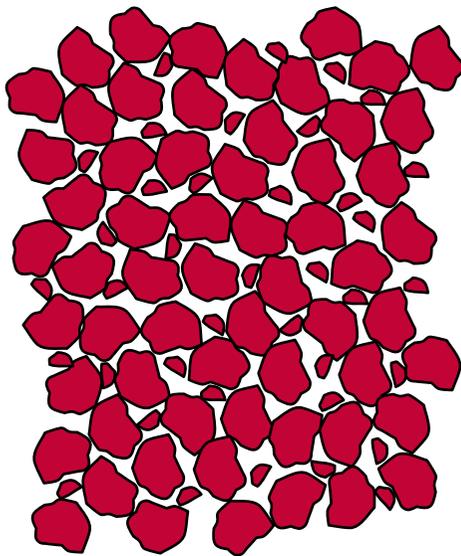
# Domaines d'applications du BIOCALCIS

Passant (%)

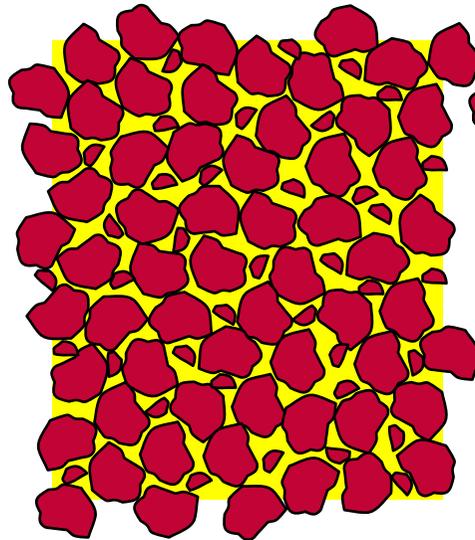


# Principe de répartition des produits d'injection dans le sol

Terrain naturel

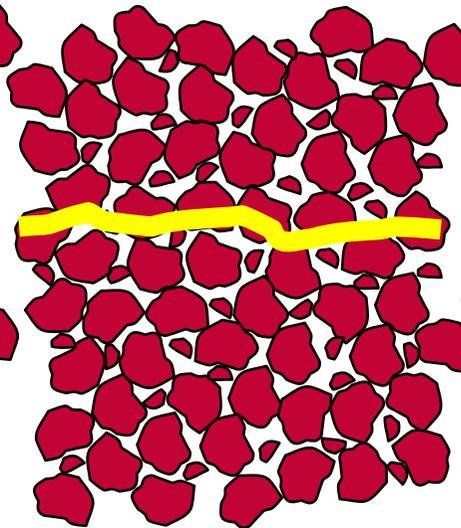


Injection par imprégnation



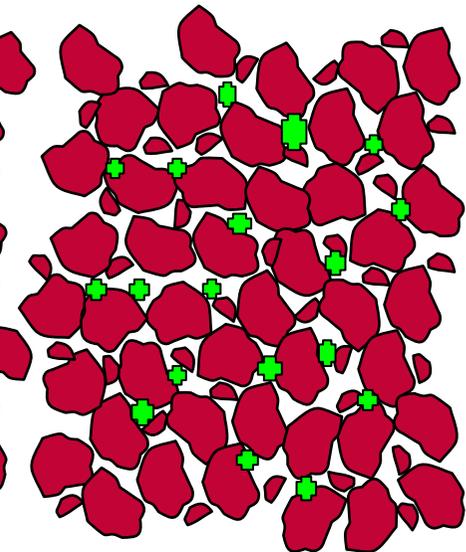
*Coulis fluide  
Pression réduite*

Injection par claquage



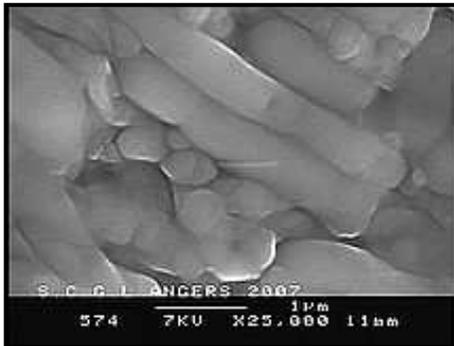
*Coulis visqueux  
Pression élevée*

Injection par perméation



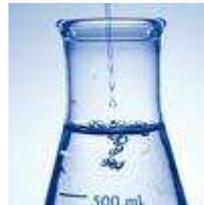
*BIOCALCIS :  
Ponts calcifiés entre les grains*

# Le principe général de réaction du BIOCALCIS



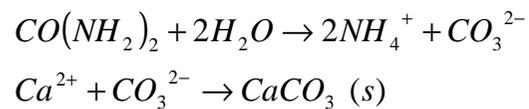
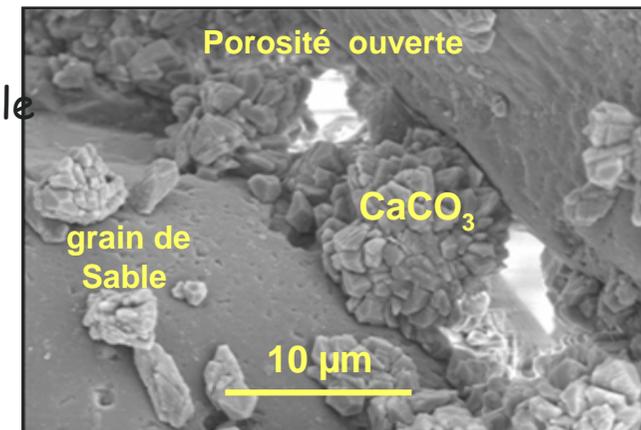
Bactéries  
*Sporosarcina.pasteurii*

+



Solution nutritive (Ca<sup>++</sup> + Urée )

Création de ponts de CaCO<sub>3</sub> entre les grains de sable sans en obstruer la porosité.



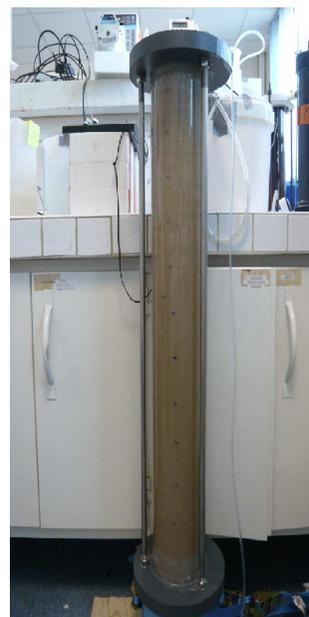
# BIOCALCIS : les essais de laboratoire 2004 2008



2004 / 2005



2006



2007

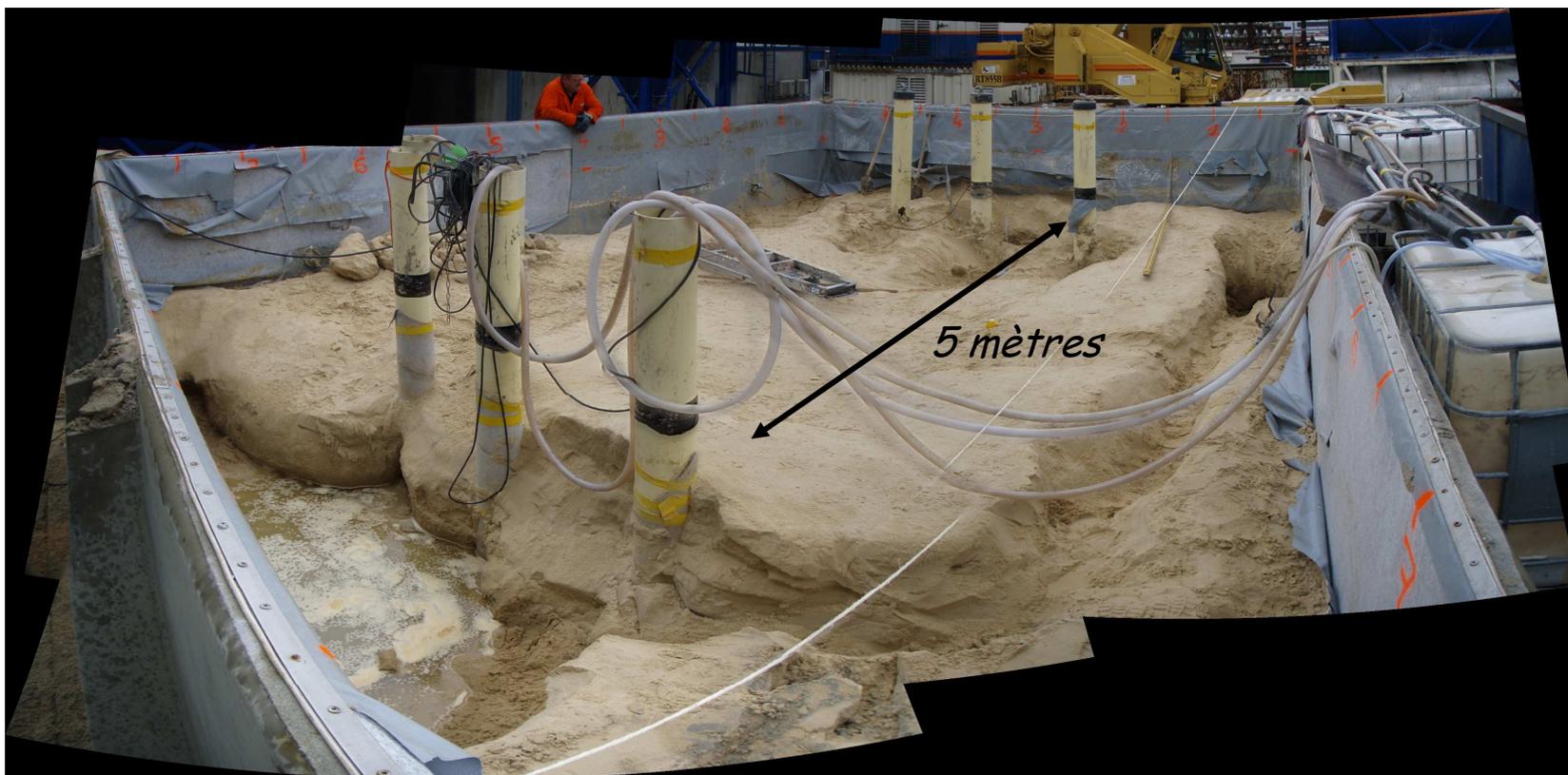


2008

*Optimisation du milieu de culture  
Stabilité de la biomasse - Fixation sur le sable*

*Optimisation du protocole d'injection  
Distance et Homogénéité de la biocalcification*

## 2009 : Validation du concept industriel - *Plot d'essais en conteneur 80 m<sup>3</sup>*



- *Production de 7 m<sup>3</sup> de biomasse sur site en conditions de chantier*
- *Calcification d'un massif de 80 m<sup>3</sup> de sable*

## Résultats du plot d'essais - Avril 2009



*Vue du plot d'essai en cours d'analyses*

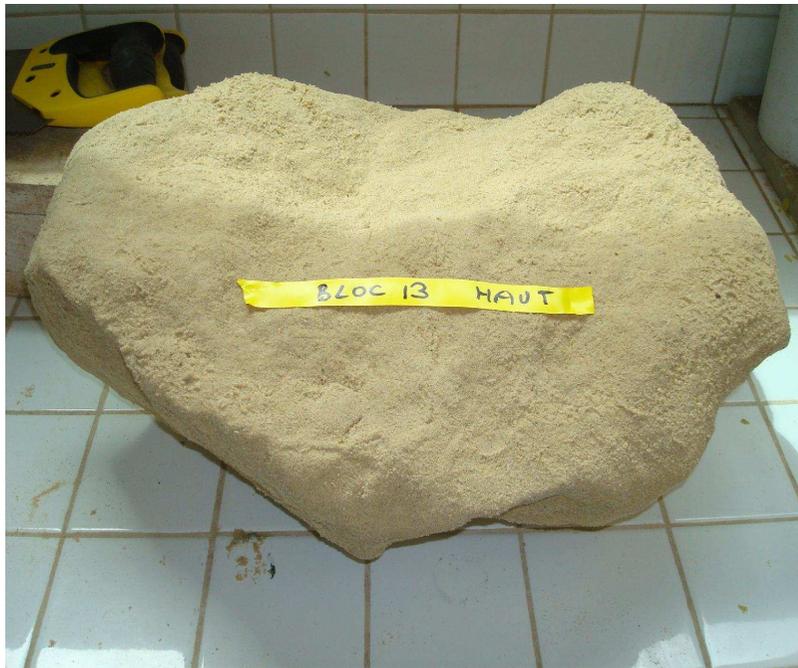
## Résultats du plot d'essais (suite)



*Mesures au pénétromètre PANDA*

## Résultats plot d'essais ( suite )

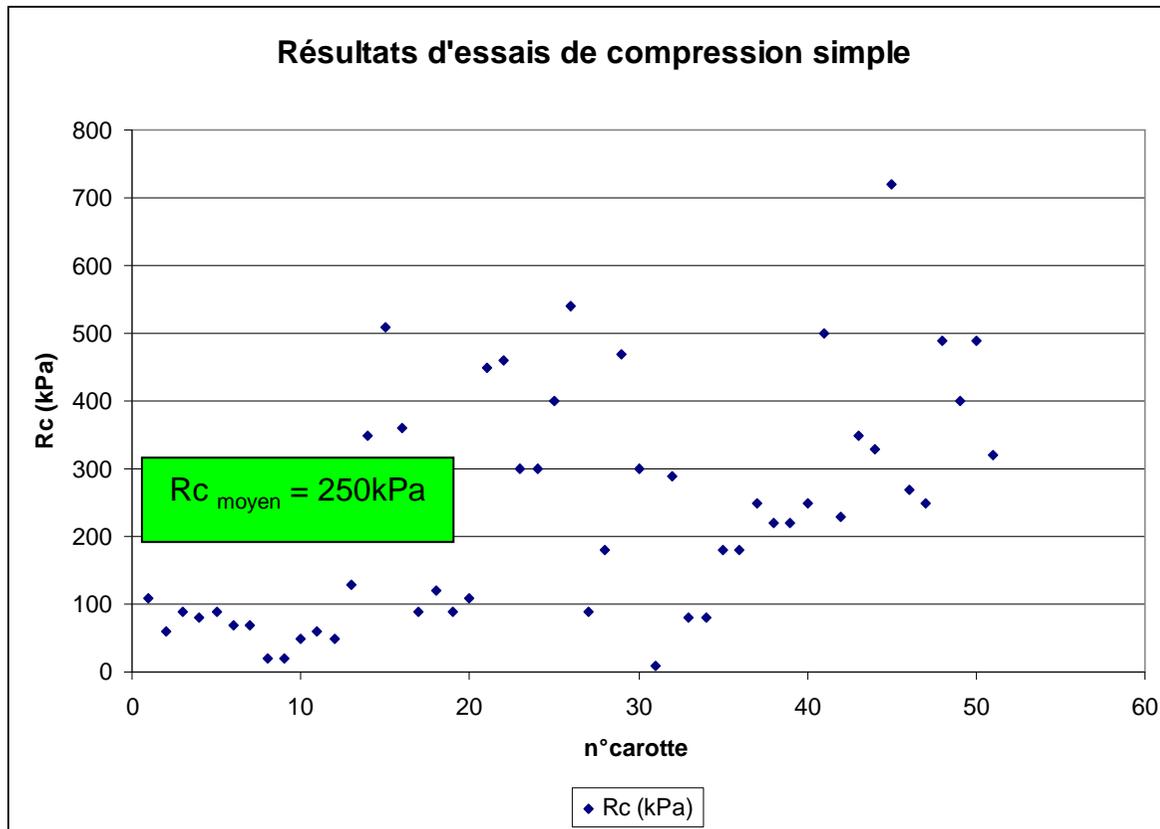
- *Résistance en compression simple*



# Résultats du plot d'essais ( suite )

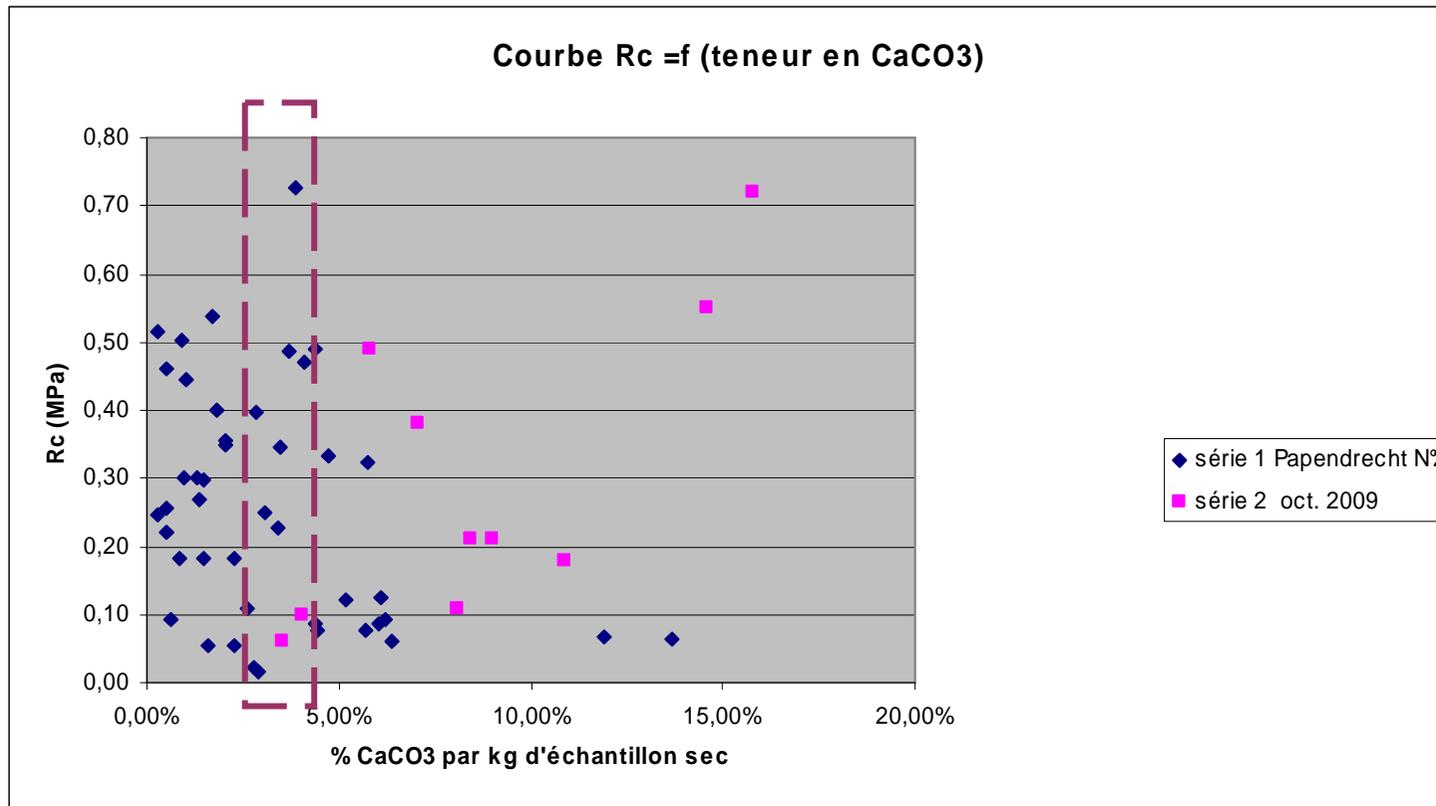
Avant traitement  $C' = 0 \text{ kPa}$  et  $\varphi' = 33^\circ$

Après traitement  $C' = 70 \text{ kPa}$  et  $\varphi' = 33^\circ$



## Résultats plot d'essais ( suite )

- *Résistance à la compression simple / Teneur de CaCO<sub>3</sub>*



## Aspect dimensionnement – Risques de liquéfaction des sols

Une étude a été menée sur une palette de sables présentant les caractéristiques suivantes :

*Sables propres*

*Sables liquéfiables au sens du PS92*

*Teneur en fines inférieure à 5%*

*Angle de frottement initial compris entre  $30^\circ < \varphi' < 40^\circ$*

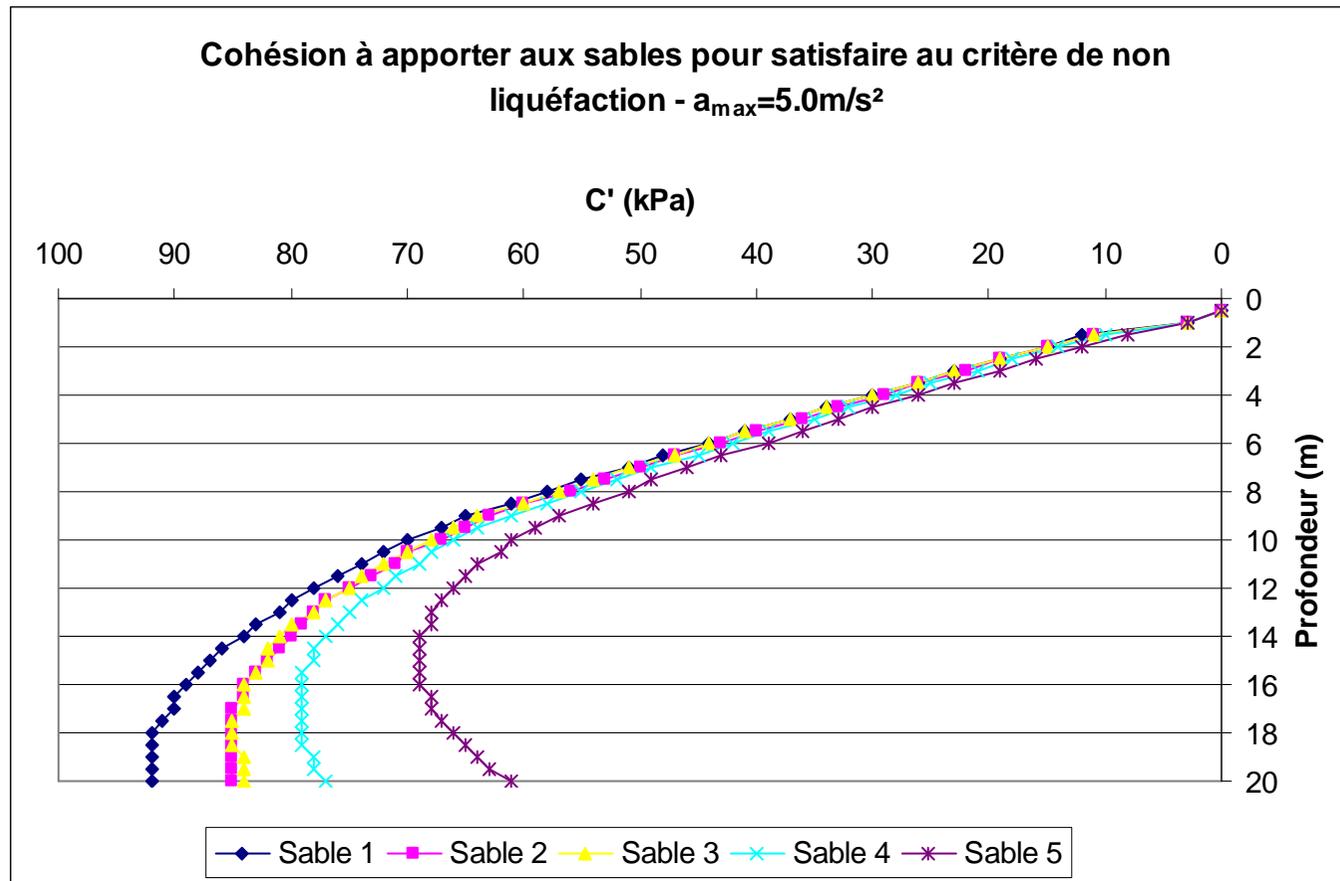
Type	$\phi$ (NAVFAC)	(Schmertman)	e	Dr	$\omega$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )
Sable 1	30 °	32 °	0.8	0.17	0.30	19.3	14.9
Sable 2	32 °	34 °	0.7	0.33	0.26	19.9	15.8
Sable 3	34 °	36 °	0.6	0.5	0.22	20.5	16.8
Sable 4	35 °	39 °	0.5	0.67	0.19	21.2	17.9
Sable 5	38 °	40 °	0.4	0.83	0.15	22.0	19.1

*Environnement sismique dans lequel ces sables ont été étudiés :*

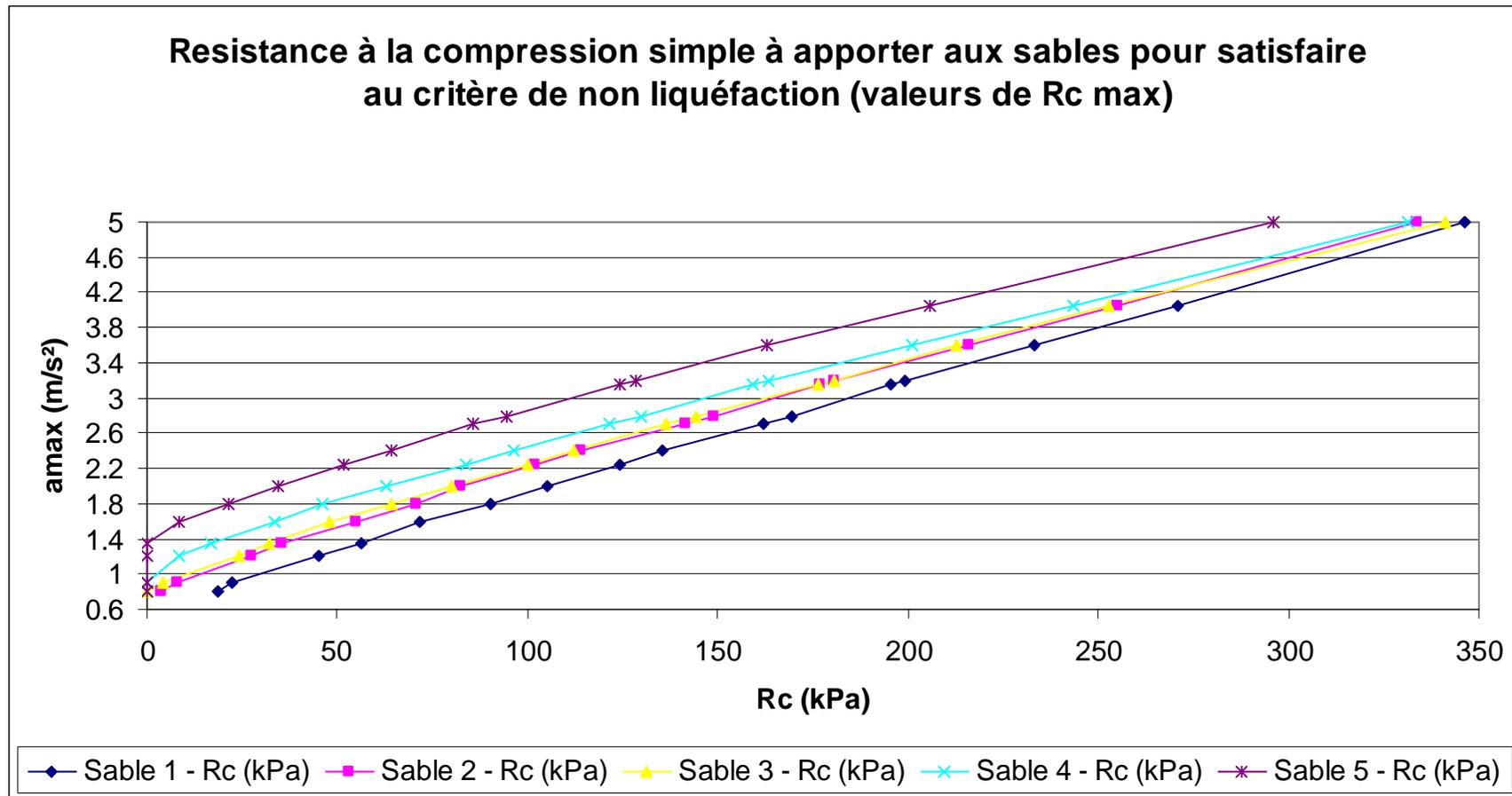
*Accélération maximale au sol comprise entre  $0,8m/s^2 < A_{max} < 4,5m/s^2$*

*Magnitude du séisme : 7,5*

# Aspect dimensionnement de projets ( suite )



# Aspect dimensionnement de projets ( suite )



## Approche de l'évaluation des performances

- *L'évaluation des performances obtenues après traitement est réalisée par une campagne d'essais géotechniques constituée de :*
  - *Pénétrètres statiques*
  - *Prélèvements d'échantillons*
  - *Géophysique*
- *Ces essais sont complétés par des essais de laboratoire consistant en :*
  - *Caractérisation du sable brut par essais de cisaillement*
  - *Mesures de résistance en compression simple sur échantillons prélevés identifiés*
  - *Mesures de cisaillement triaxial du sable traité*
  - *Dosages CaCO<sub>3</sub>,*
  - *Observations MEB*

## Aspects réglementaires

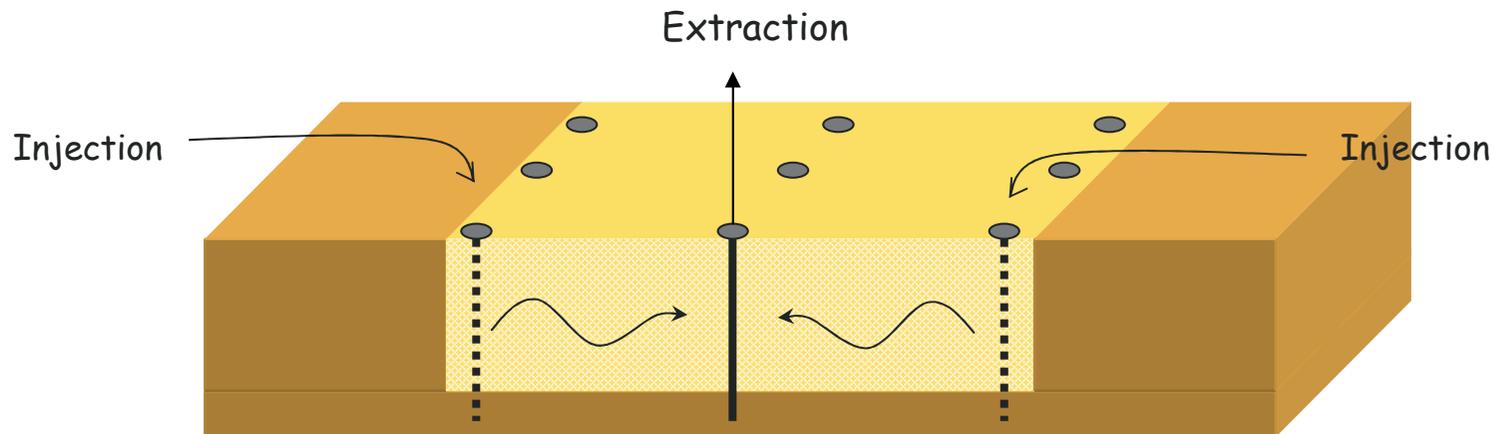
- La bactérie *Sporosarcina pasteurii*
  - *Bactérie non pathogène, extraite de sols et classifiée il y a plus de 100 ans (Miquell 1889).*
  - *10 collections de souches répertoriées en Europe et à l'International (forme lyophilisée)*
  - *Provenance des souches étudiées par SBF : Institut Pasteur en France (CIP 66-21) et Institut DSM en Allemagne (DCN33)*
  - *Souches classées au niveau 1 par l'Institut Pasteur = absence de risques pathologiques vis-à-vis de l'Homme.*
  - *Aucune contrainte d'usage sur site*
- Le procédé génère comme co-produit , **un sel de chlorure d'ammonium** valorisable et recyclable après extraction, ainsi qu' une fraction aqueuse mobilisable in situ de concentration conforme à la réglementation et aux contraintes locales.

## Aspect économique du procédé

- Le principe du traitement consiste , comme décrit précédemment , à augmenter la résistance au cisaillement du sol traité , mais sans modification notable de sa perméabilité , contrairement aux techniques traditionnelles d'injections ou d'inclusions
- Le procédé permet également le traitement de zones inaccessibles par forages verticaux ou sub-verticaux
- Il permet de traiter des sols fins à très fins, non injectables par traitements classiques
- Au stade des études en cours , le coût approximatif du procédé se situe dans une plage de 300 à 500 Euros /m<sup>3</sup> de sol traité , à comparer aux coûts des techniques usuelles :
  - *Colonnes ballastées : 50 à 60 € / m<sup>3</sup>*
  - *Jet grouting : 300 à 450 € / m<sup>3</sup>*
  - *Injection solide : 40 € / m<sup>3</sup>*

## Le protocole d'injection

1. Injection des bactéries
2. Temps de Repos de quelques heures pour la fixation des bactéries sur le sol
3. Injection du milieu calcifiant Urée /  $\text{CaCl}_2$
4. Temps de Repos nécessaire à la réaction de bio-calcification (de 24 à 48h)
5. Extraction des co-produits pour valorisation



## Les applications

- On peut citer comme exemples d'applications possibles :
- Lutte contre la liquéfaction des sols
- Renforcement du sol sous les structures sensibles aux vibrations
- Traitement anti érosion pour les dunes, digues, talus ...
- Stabilité des barrages et des digues
- Renforcement pour des excavations en site urbain
- Problème du break-in / break-out des tunneliers
- Renforcement du sol afin d'augmenter le tirant d'eau de quais existants
- Augmentation de la raideur du sol ( Pb de résonance sur les LGV )
- On notera que tout projet doit nécessairement faire l'objet d'une étude de sol approfondie , accompagnée d'une étude de faisabilité

## Conclusion & Perspectives

- **Approche pré-industrielle :**
    - Intérêt technico-économique du procédé BIOCALCIS validé
  - **Suite du projet :**
    - Optimisation du protocole d'injection et de contrôle en laboratoire (en cours)
    - Validation du protocole d'extraction & du procédé de concentration du  $\text{NH}_4\text{Cl}$
    - Etude d'un cas concret en partenariat avec un donneur d'ordre et mise en œuvre du procédé sur site
- DEMONSTRATION DU PROCEDE SUR UN SITE REEL**

# Quelques images du plot d'essais

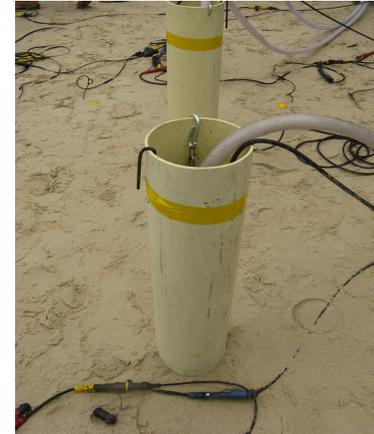
# BIOCALCIS



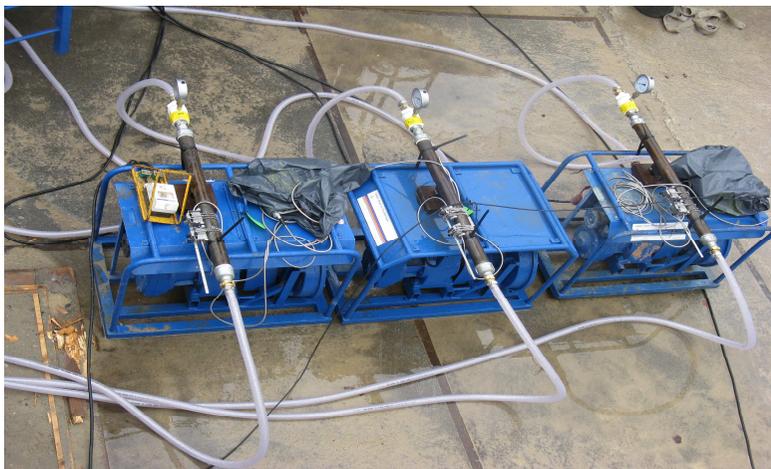
*Centrale de fabrication*



*Puits d'injection*



*Puits d'extraction*



*Pompes d'injection périlstatiques*



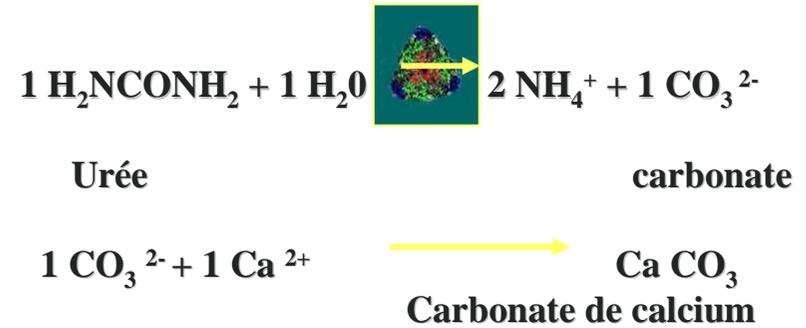
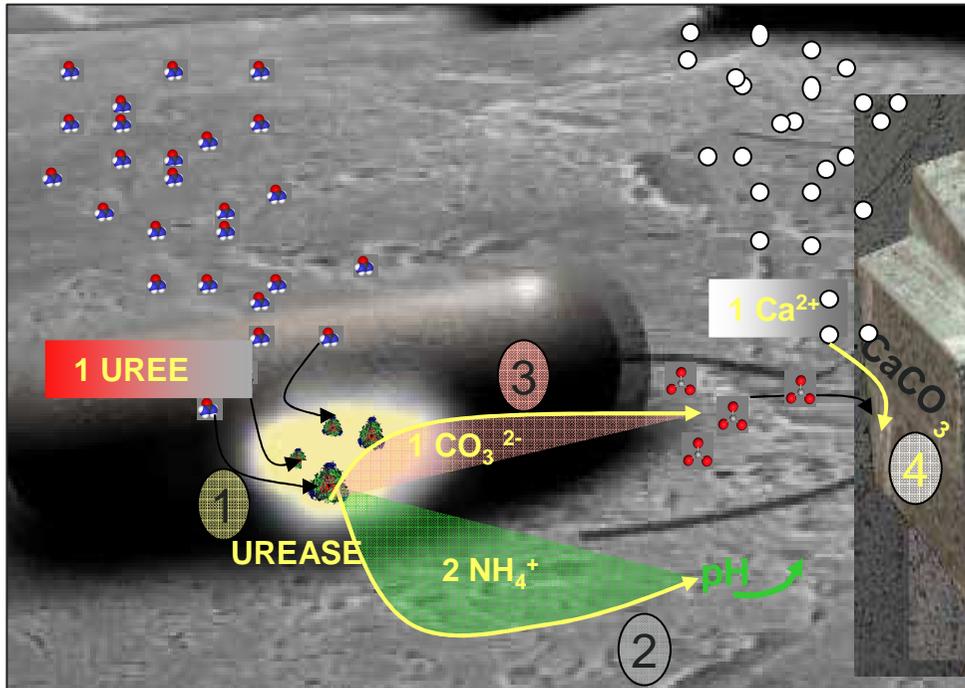
*Laboratoire*



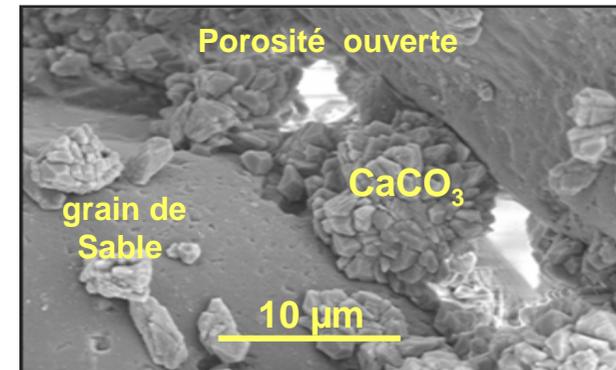
Diapos masquées

# Principe de la bio-calcification

Induction de la précipitation de cristaux de  $\text{CaCO}_3$  par voie enzymatique (uréolytique)



Création de ponts de  $\text{CaCO}_3$  entre les grains de sable sans en obstruer la porosité.



## Aspect dimensionnement de projets ( suite )

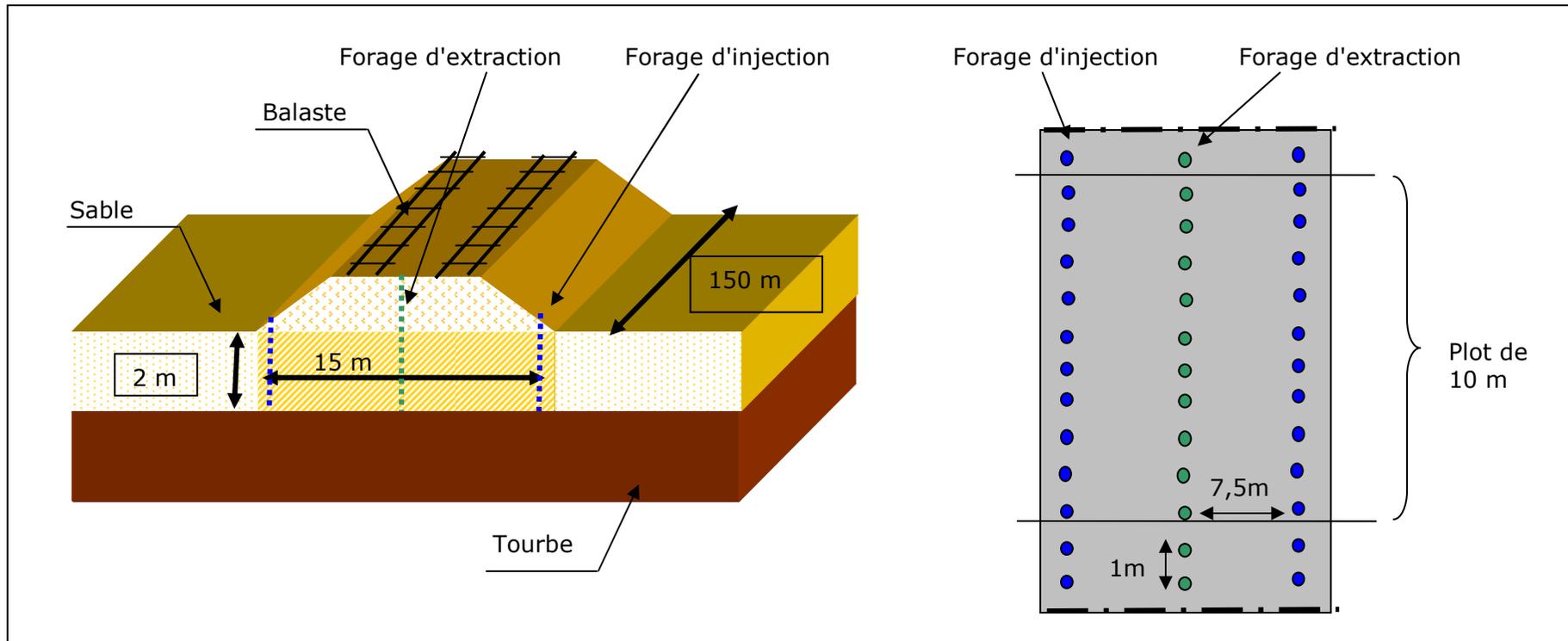
Les résultats de cette étude associés aux études de laboratoire ainsi qu'aux résultats obtenus lors du plot d'essais , montrent que le traitement par procédé BIOCALCIS est tout à fait adapté au traitement des sols liquéfiables.

En effet, la valeur de cohésion apportée par le procédé BIOCALCIS pour satisfaire au critère de non liquéfaction ( 70 kPa ) correspond dans notre cas à la valeur maximale nécessaire .

Notons que l'apport de cohésion est directement proportionnel pour une profondeur donnée  $Z$  :  
Aux caractéristiques de résistance au cisaillement du sable avant traitement ( $f'$ ),  
A l'accélération sismique max au sol de calcul ( $a_{max}$ ).

Il est notable que le « besoin » en résistance au cisaillement pour satisfaire au critère de non liquéfaction augmente avec la profondeur.  
En théorie, l'intensité du traitement pourrait donc être adaptée en fonction de la profondeur (minimum en surface et maximum en pied de couche) .

# Exemple d'application : Remblai ferroviaire - Problème de propagation d'ondes

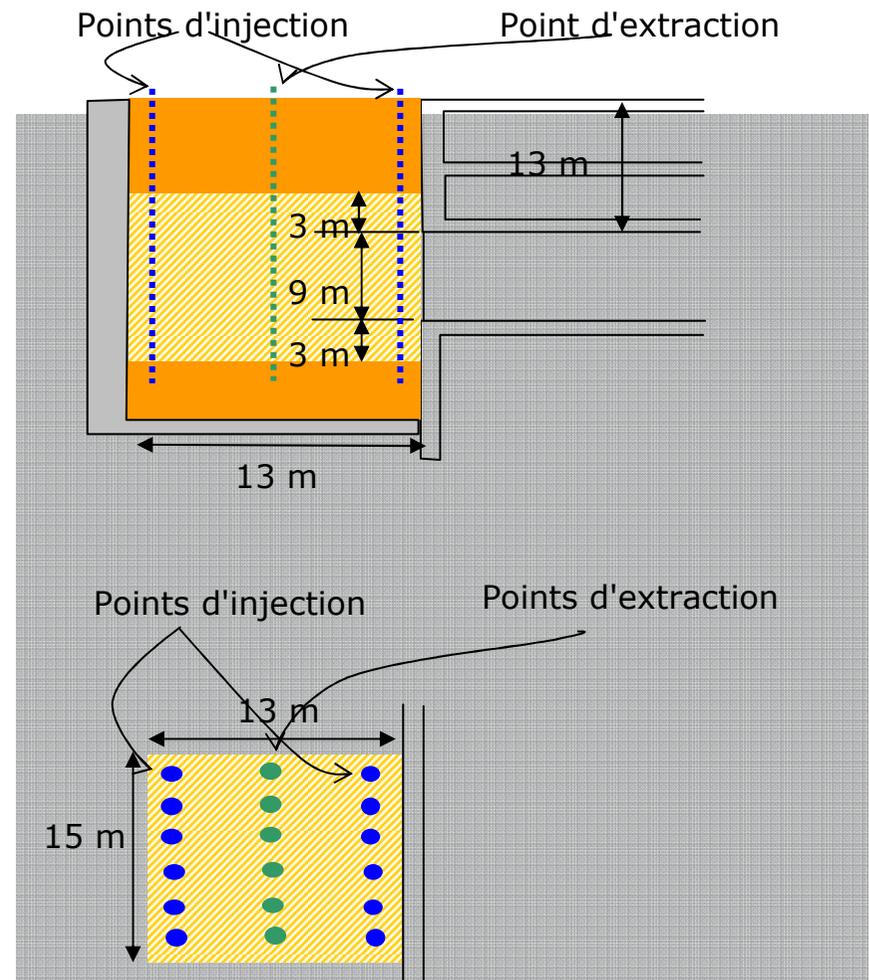


-Volume de sol à traiter: 4500 m<sup>3</sup> - Résistance à atteindre: 1 MPa

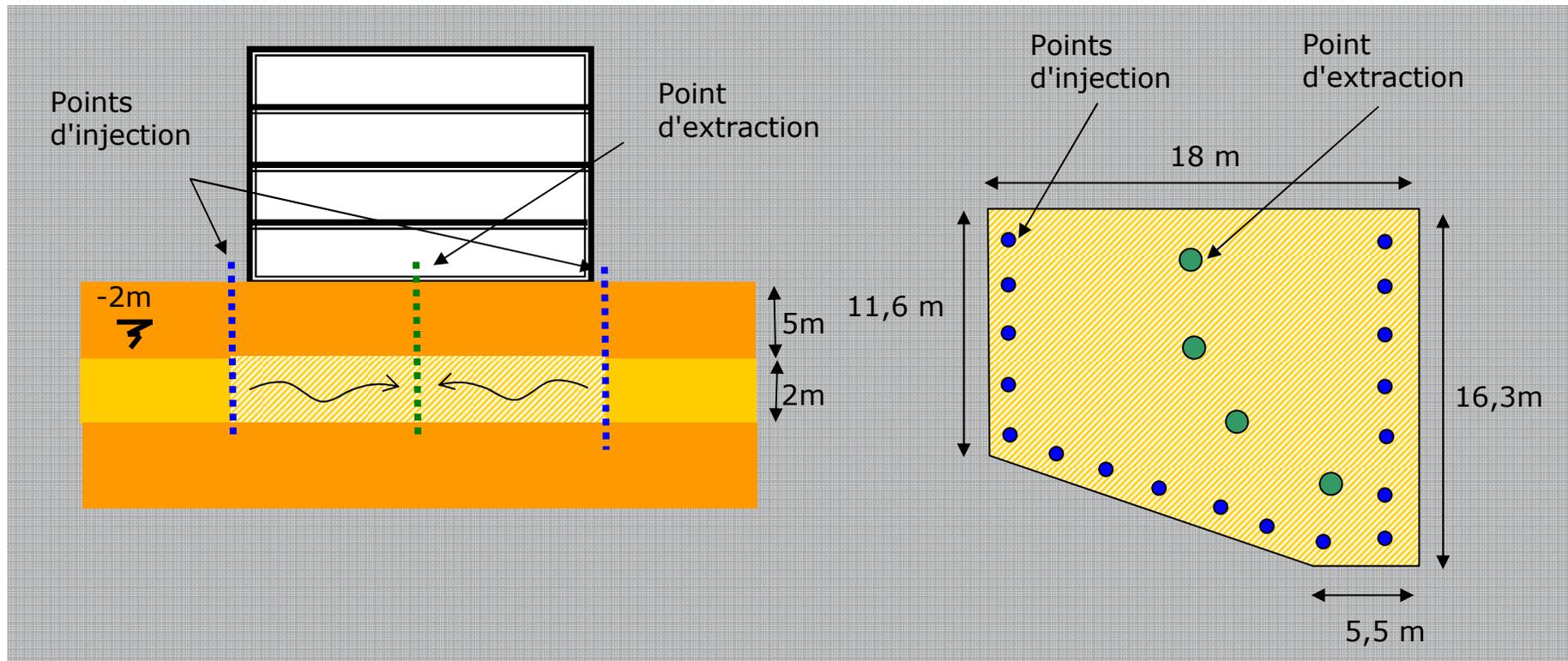
## Exemple d'application : Break - in Break - out

Rappel :

- Volume de sol à traiter: 2600 m<sup>3</sup>
- Résistance à atteindre: 2,5 MPa



## Exemple d'application : Liquéfaction des sols



Rappel:

- Volume de sol à traiter: 530 m<sup>3</sup>
- Résistance à atteindre: 0,1 MPa