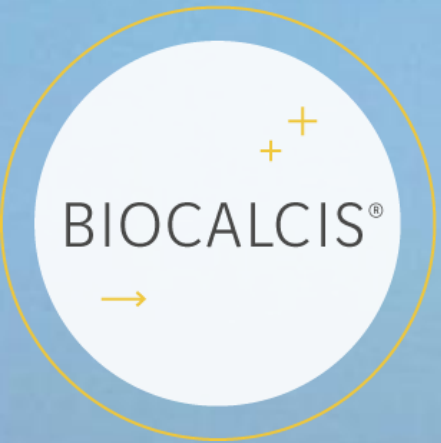


Traitements et améliorations des sols LA TECHNIQUE BIOCALCIS

JST DU 05/04/2023

ANNETTE ESNAULT FILET



Biocalcification des sols

✓ Nouveau procédé de **consolidation des sols**, inspiré d'un phénomène naturel de biocalcification

✓ Création d'un matériau plus résistant in situ, par **cimentation de calcite** (R_c de 0,1 à 0,5 MPa)

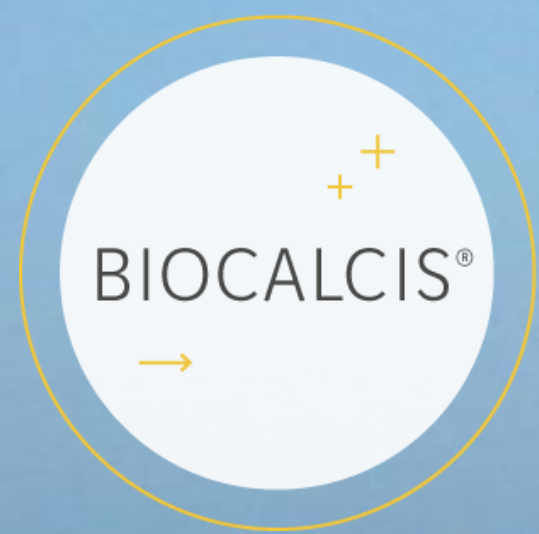
✓ Procédé d'injection adapté aux **sols fins mais aussi à des matériaux granulaires** + grossiers

✓ **Porosité reste « libre »** après traitement : très faible incidence sur la perméabilité

✓ **Pas d'étanchéité**

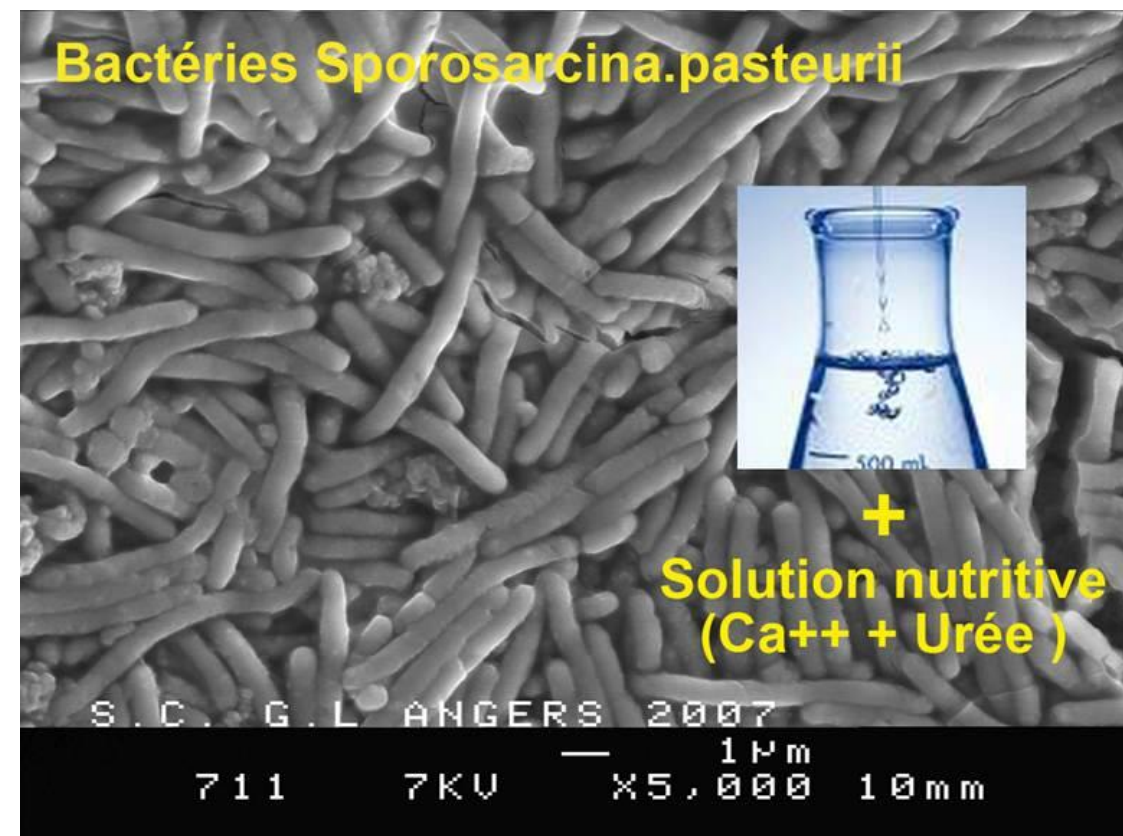
✓ Mise en œuvre sous **très faible pression**



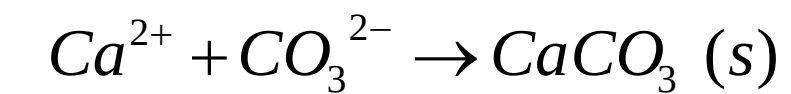
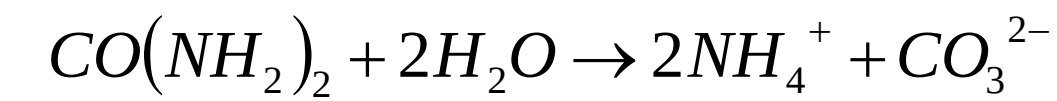
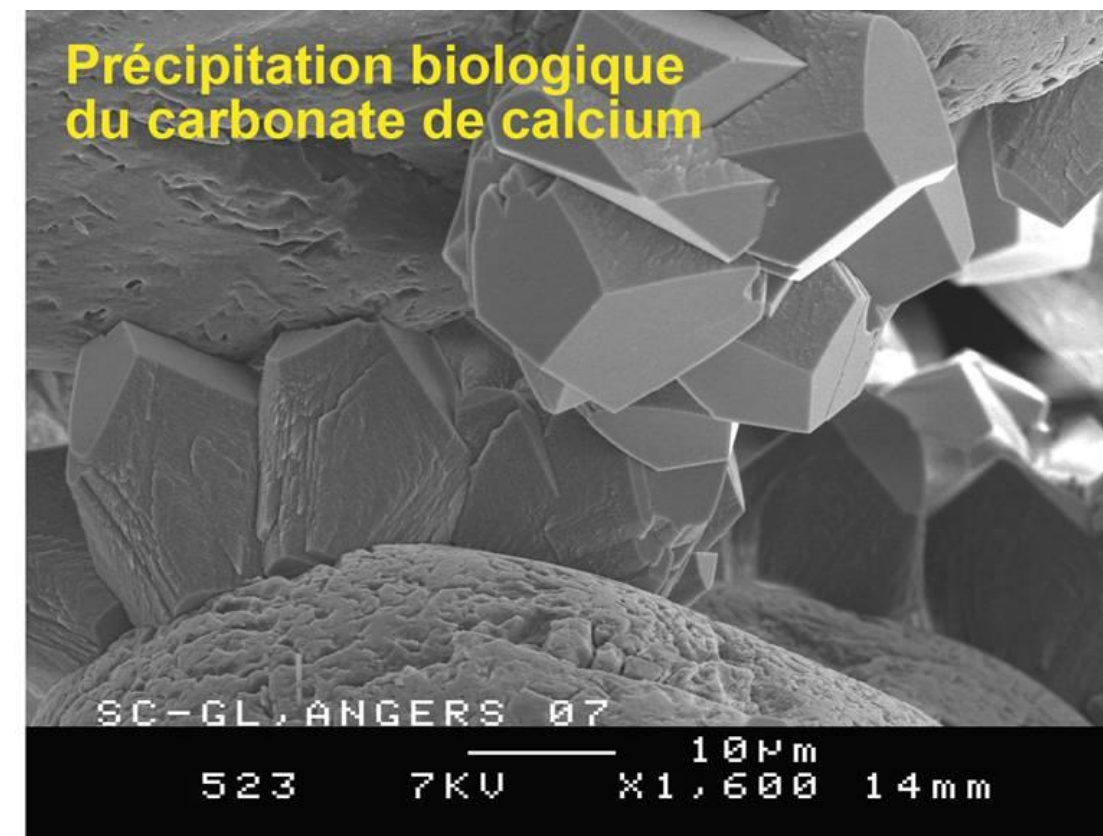


PRINCIPE BIOCALCIS

✓ Procédé de consolidation de sols par injection, basé sur la formation de calcite in situ agissant comme un ciment biologique.

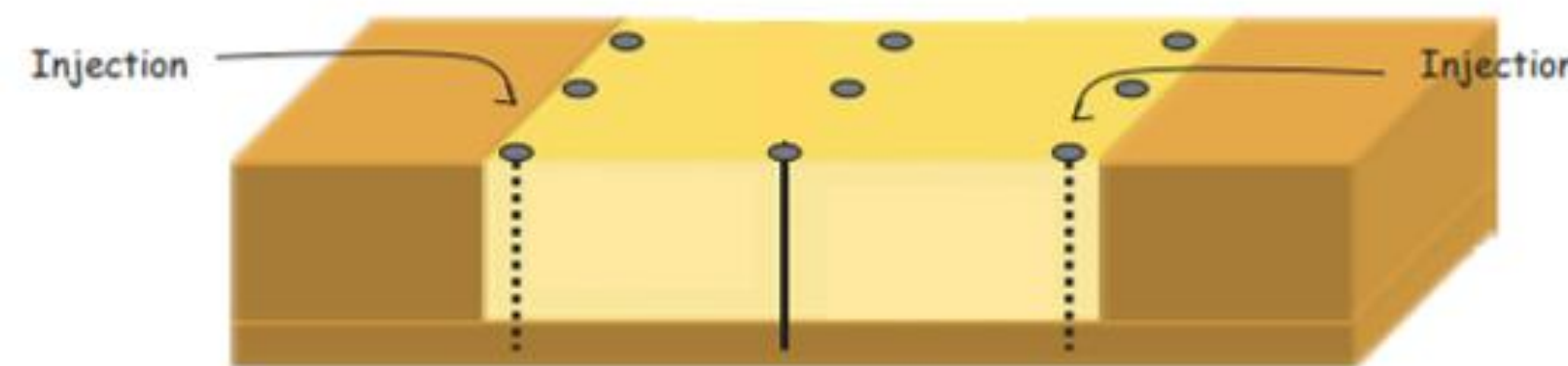


=



✓ Bactéries non pathogènes pour l'Homme et l'environnement

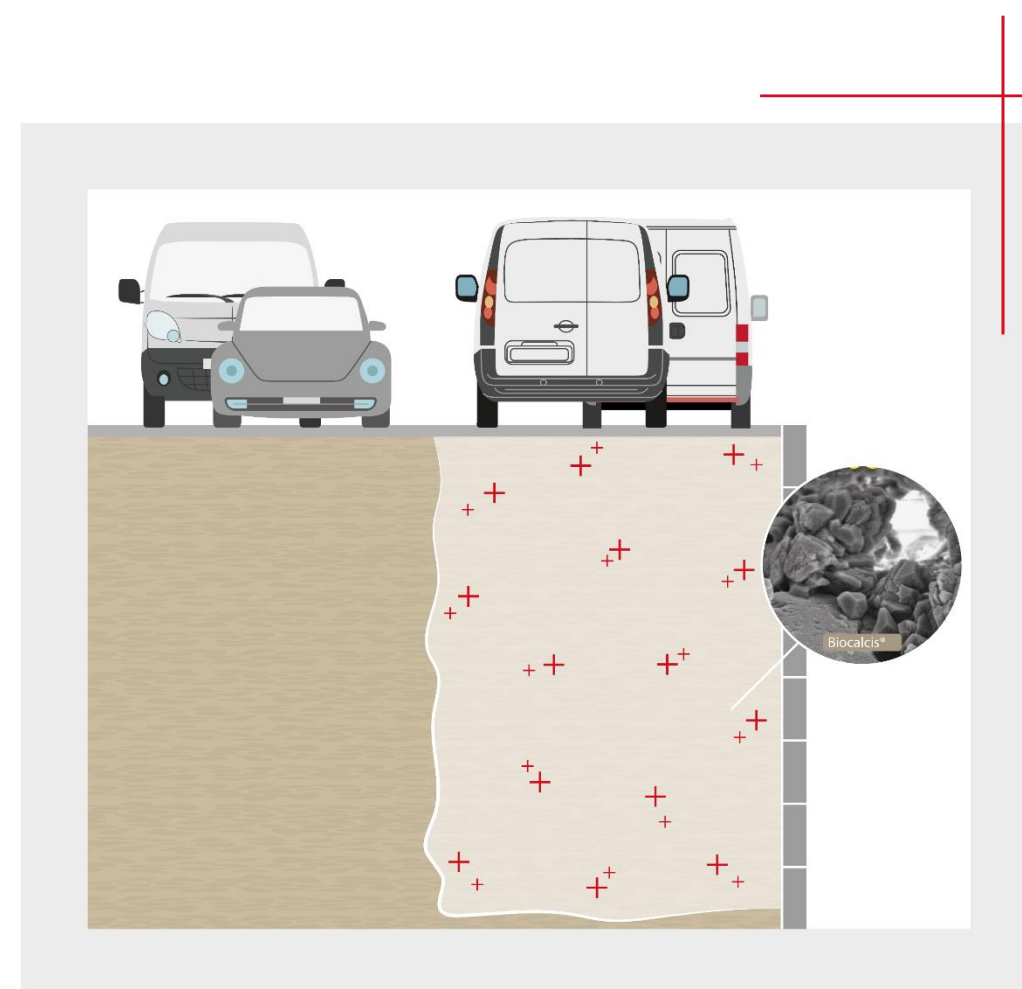
✓ Injection en phases successives:



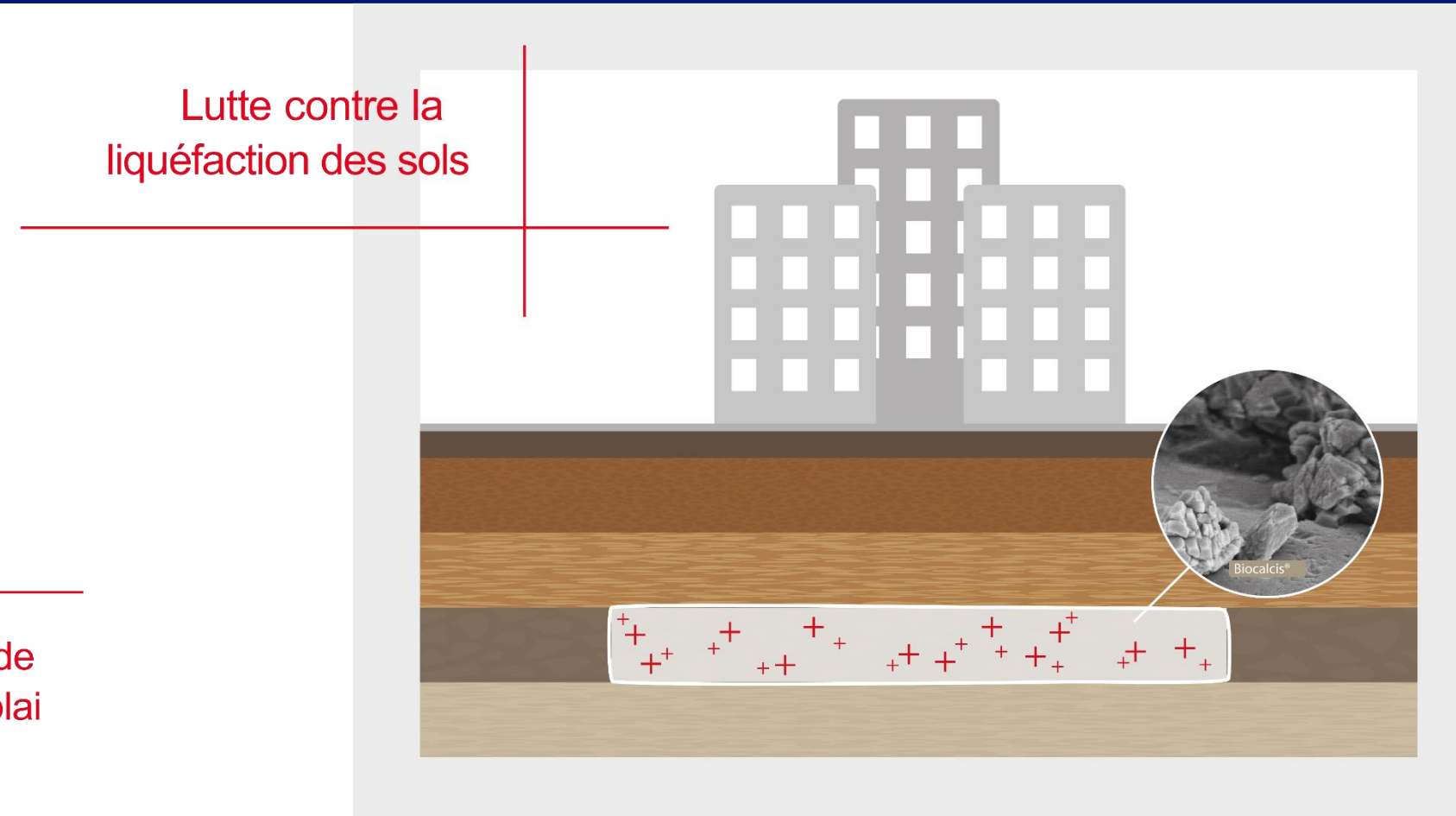
- 1 Injection des bactéries
- 2 Temps de repos de quelques heures pour la fixation des bactéries sur le sol
- 3 Injection de la solution calcifiante (urée/sel de calcium)
- 4 Temps de repos nécessaire à la réaction de biocalcification (quelques heures)



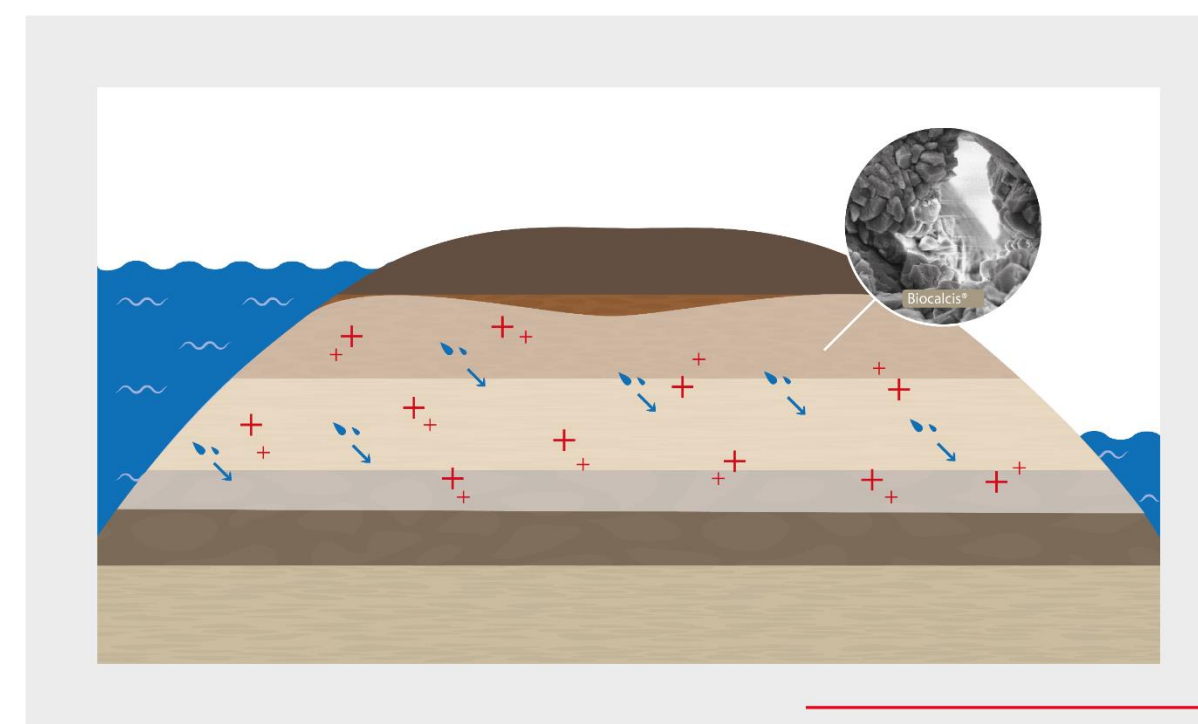
LES DIFFERENTES APPLICATIONS



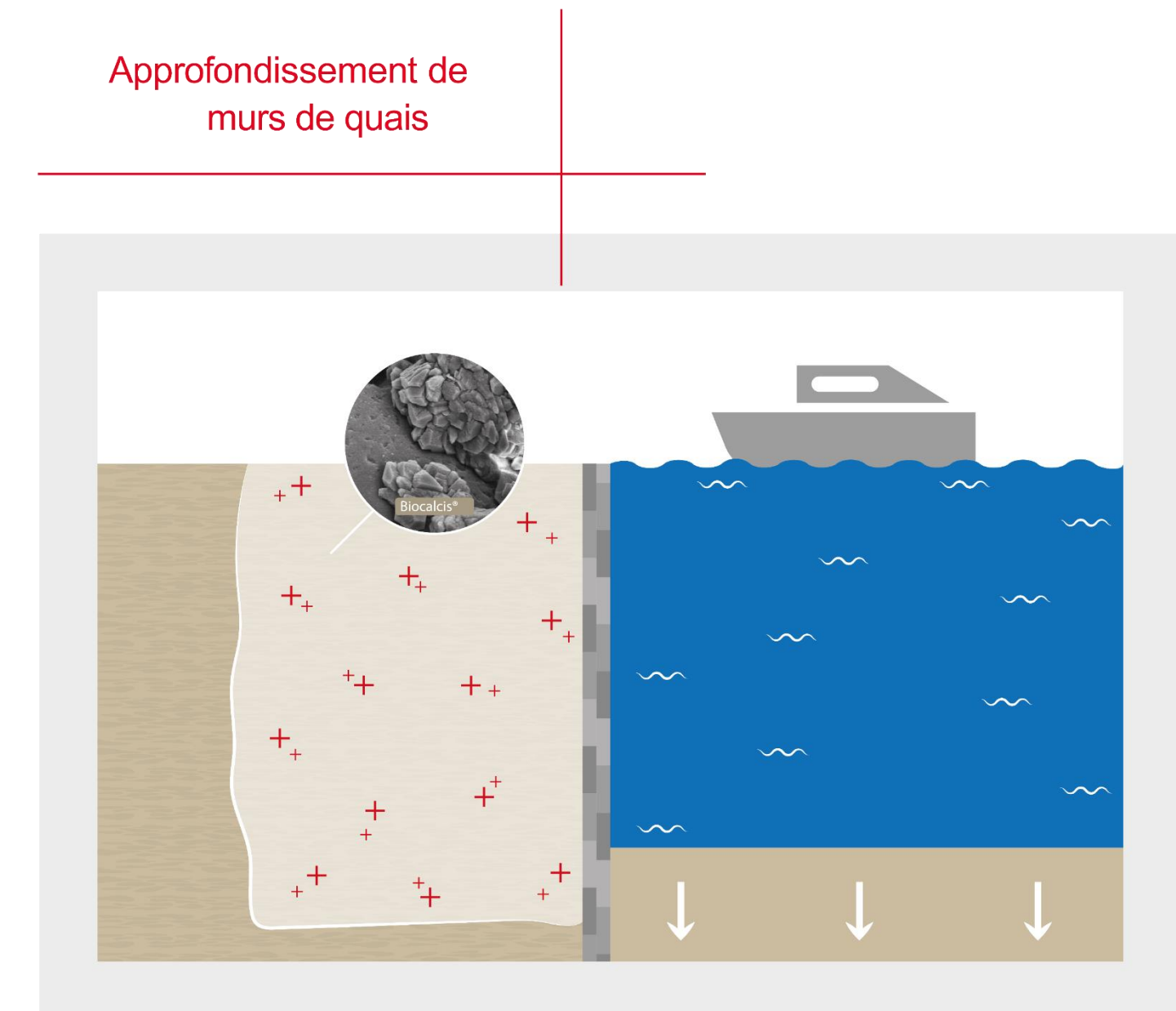
Restauration de
murs en remblai
renforcé



Lutte contre la
liquéfaction des sols



Traitement contre
l'érosion interne de
digues et talus



Approfondissement de
murs de quais



Porosité ouverte

BIOCALCIS®

CaCO_3

Grain de
sable

007

7KV

10µm
X3,000

10mm

BIOCALCIS®

Biocalcification des sols in situ

- Procédé industriel développé par Soletanche Bachy pour la mise en œuvre in situ :

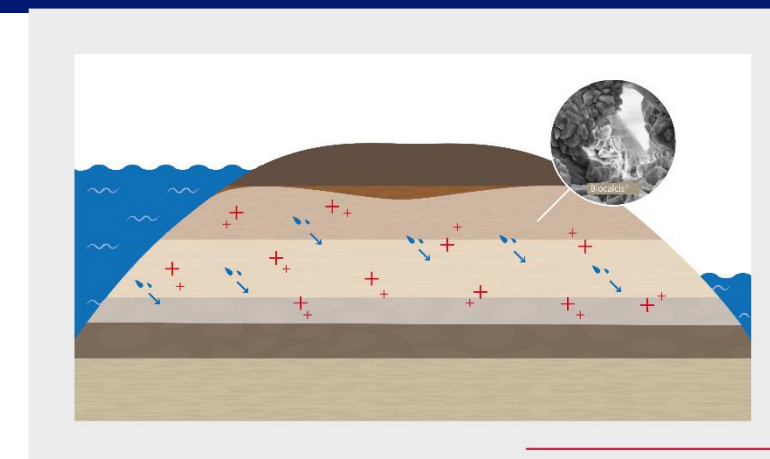
Conception	Préparation des bactéries	Mise en œuvre	Contrôles
BIOCALCIS®			



Projet BOREAL



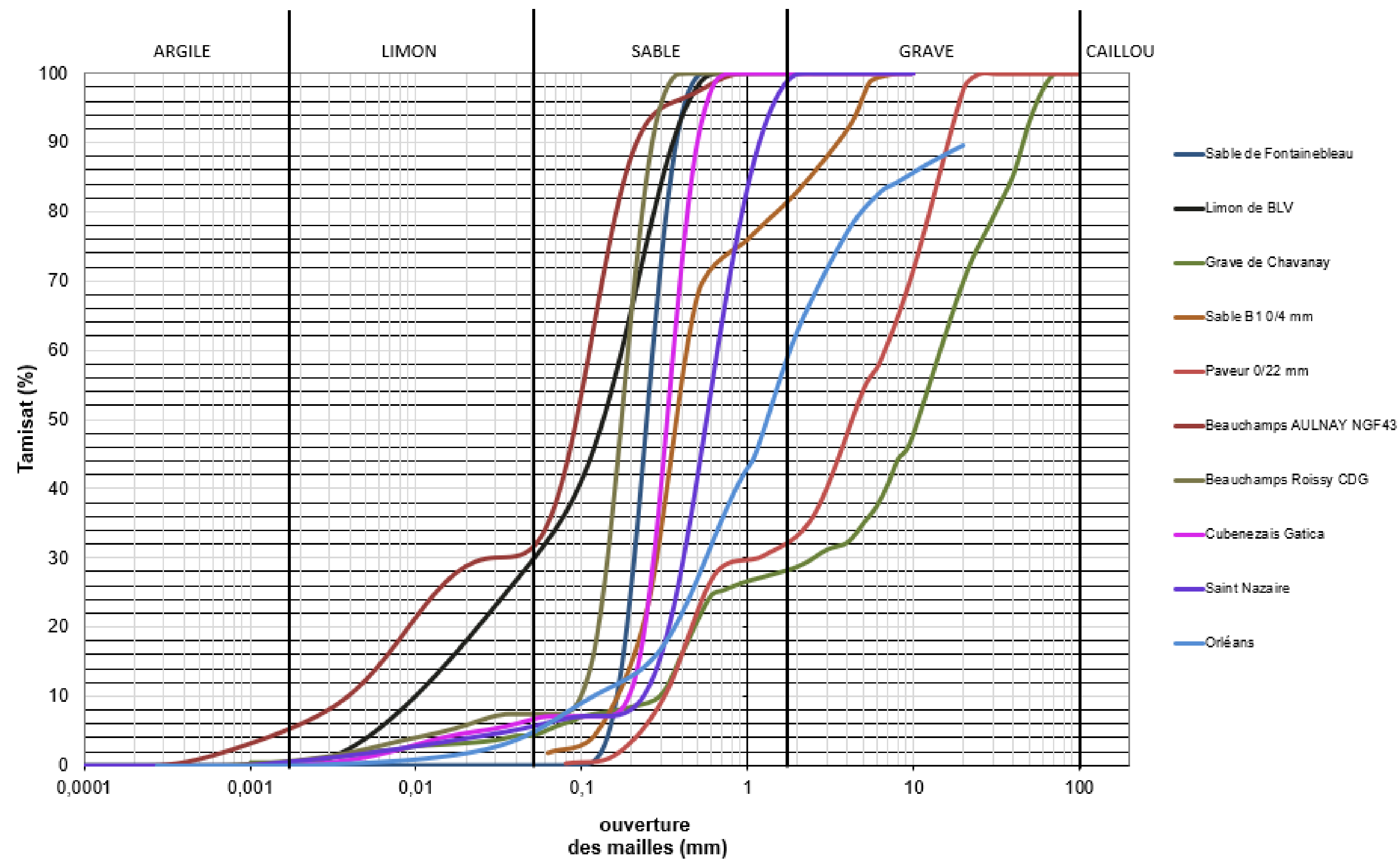
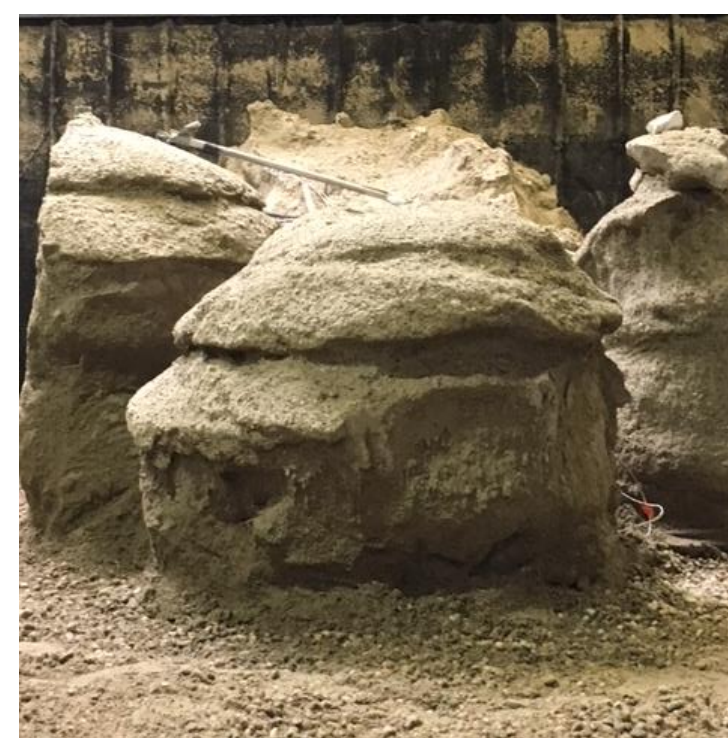
Bio-renforcement des ouvrages hydrauliques en remblais



Traitement contre
l'érosion interne de
digues et talus



Exemples de sols traités



Propriétés d'un sable biocalcifié

Exemples pour des taux de calcite inférieur à 6 %

✓ **Résistance en Compression Simple R_c :**

de 0,1 à 0,5 MPa

✓ **Cohésion c' :**

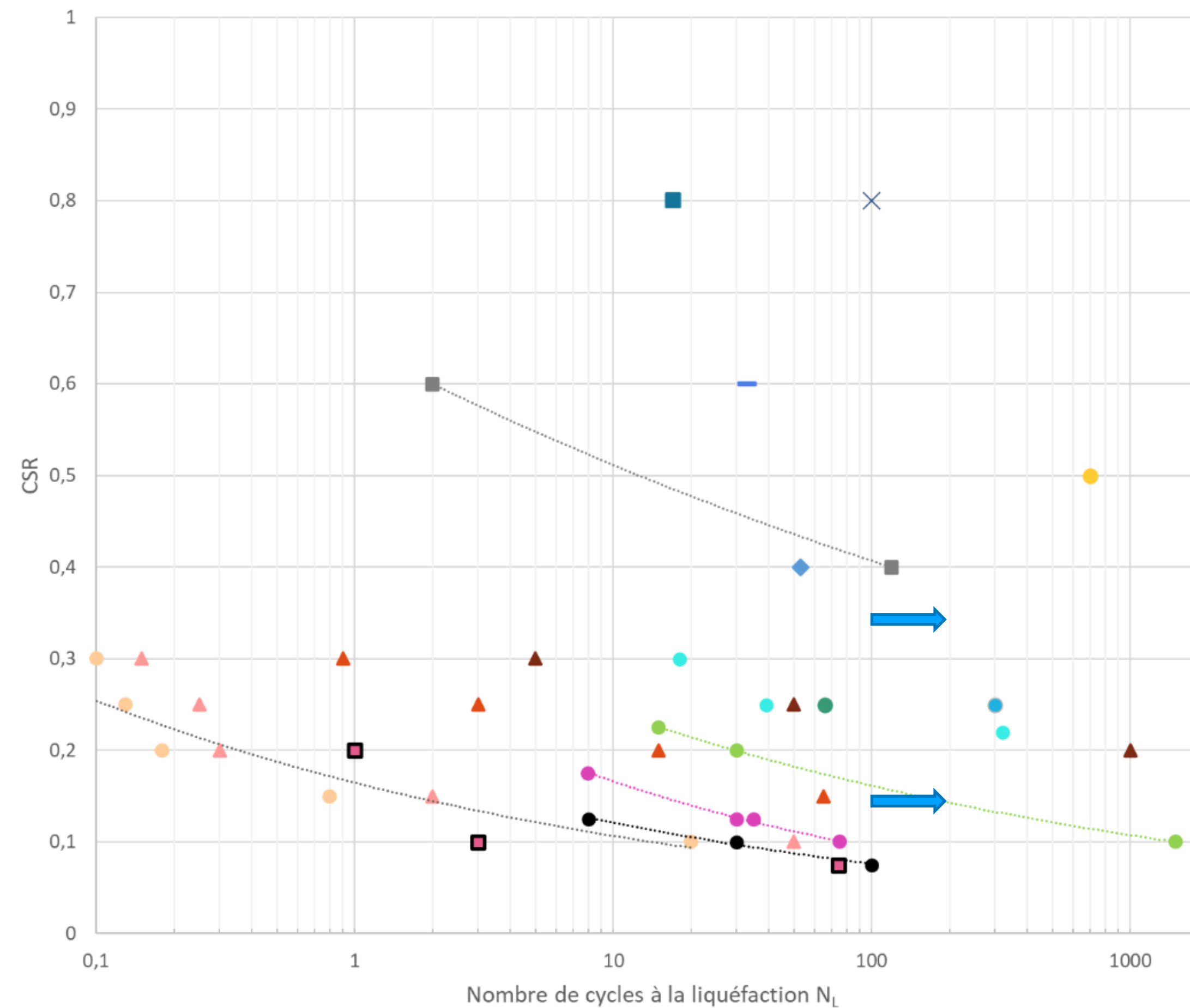
de 10 à 100 kPa

✓ **Perméabilité : réduction non significative de K (inférieure à 40 %) par rapport aux caractéristiques initiales**



Essais tri-axiaux cycliques (synthèse cf Isolate)

Nombre de cycles pour initier la liquéfaction (Déformation axiale de simple amplitude = 2,5%)



Thèse GOBBI 2020

- Hostun Non traité DR = 30%
- Hostun non traité DR= 80%
- Hostun non traité DR = 50%
- Hostun traité DR=30%, %CaCO₃ = 0.6%

Isolate

- ◆ Hostun traité DR=50%, %CaCO₃ = 0.6%
- Hostun traité DR=50%, %CaCO₃ = 1.9%
- × Hostun traité DR=50%, %CaCO₃ = 2.3%
- Hostun traité DR=50%, %CaCO₃ = 1.5%

- Dejong et al. (3% SASS)

- Uncemented - Ottawa F-65 - DR=30%
- △ ΔVs = 10m/s - Ottawa F-65 - DR=30% - %CaCO₃ < 0,1%
- △ ΔVs = 50m/s - Ottawa F-65 - DR=30% - %CaCO₃ < 0,5%
- △ ΔVs = 100 m/s - Ottawa F-65 - DR=30% - %CaCO₃ < 0,9%

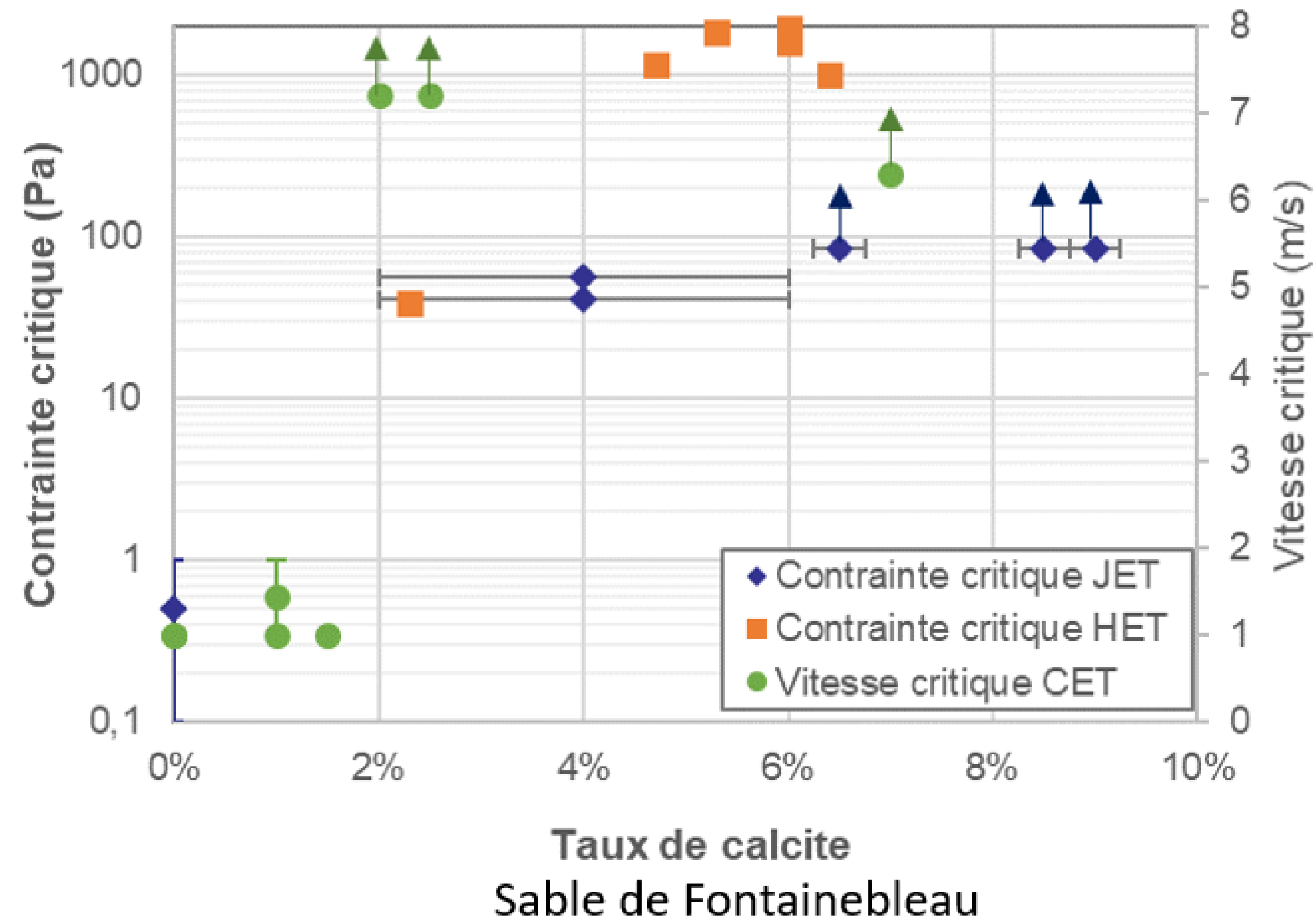
Thèse Tong Yu 2022

- MS6.0 non dense - Thèse tong Yu
- MS6.0, CaCO₃ = 8,62%; Tong Yu
- MS6.0, CaCO₃ = 10,06%; Tong Yu
- MS6.0, CaCO₃ = 11,53%; Tong Yu

■ Fontainebleau DR = 20% - Thèse Dang

→ pas de liquéfaction au bout de 100 cycles dans du sable de Fontainebleau calcifié (BOREAL)

Efficacité vis-à-vis de l'Erosion interne



Synthèse résultats de mesures in situ après traitement Biocalcis

		Sable de Fontainebleau	Sables et Gravieres	Remblais Sableux	Sable de Beauchamps	Remblais sablo-limoneux
Granulométrie D90 -D50 - D10 (mm)		0,4 - 0,25 - 0,15	50 - 10 - 0,3	6 - 1,5 - 0,1	0,2 - 0,090 - 0,038	35 - 15 - 0,01
Classe GTR		D1	D3	D2	B5	C1B3
K initiale (m/s)		$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Résistance de pointe qd Mpa	avant	1 à 2	2 à 8	5 à 34	/	/
	après	4 à > 50 Mpa	10 à 60	8 à 47	/	/
Pression Limite PL	avant	/	/	0,4 à 2,6	/	1 à 3,5
	après	/	/	2,4 à 5	/	1,75 à 5
Vitesse Sismique m/s	avant	Vs 250 à 290	Vs 280 à 475	/	Vp 1800 à 2100	/
	après	Vs 500 à 1500	Vs 500 à 1030	/	Vp 2100 à 2550	/

Le chantier Pont René Thinat – Orléans Renforcement de la culée Nord



Realisation : Pont Rene Thinat – Orleans (2022)



Remblai granulaire associé à des armatures métalliques et un système de parement modulaire



- ✓ 360 clous dont 15 témoins de durabilité
- ✓ 1 600 m perforés

- ✓ **Pathologie des structures âgées > 30 ans** : corrosion des armatures
 - **Clouage des écailles** à l'aide de clous forés à travers le parement sur une partie du mur
 - **Injection Biocalcis®** sur les zones non accessibles au clouage au niveau de l'appui du pont ($4.5\text{m} \times 11.7\text{m} \times 8.23\text{m} = 433\text{m}^3$ de terrain)

Essais Préliminaires de laboratoire Biocalcis



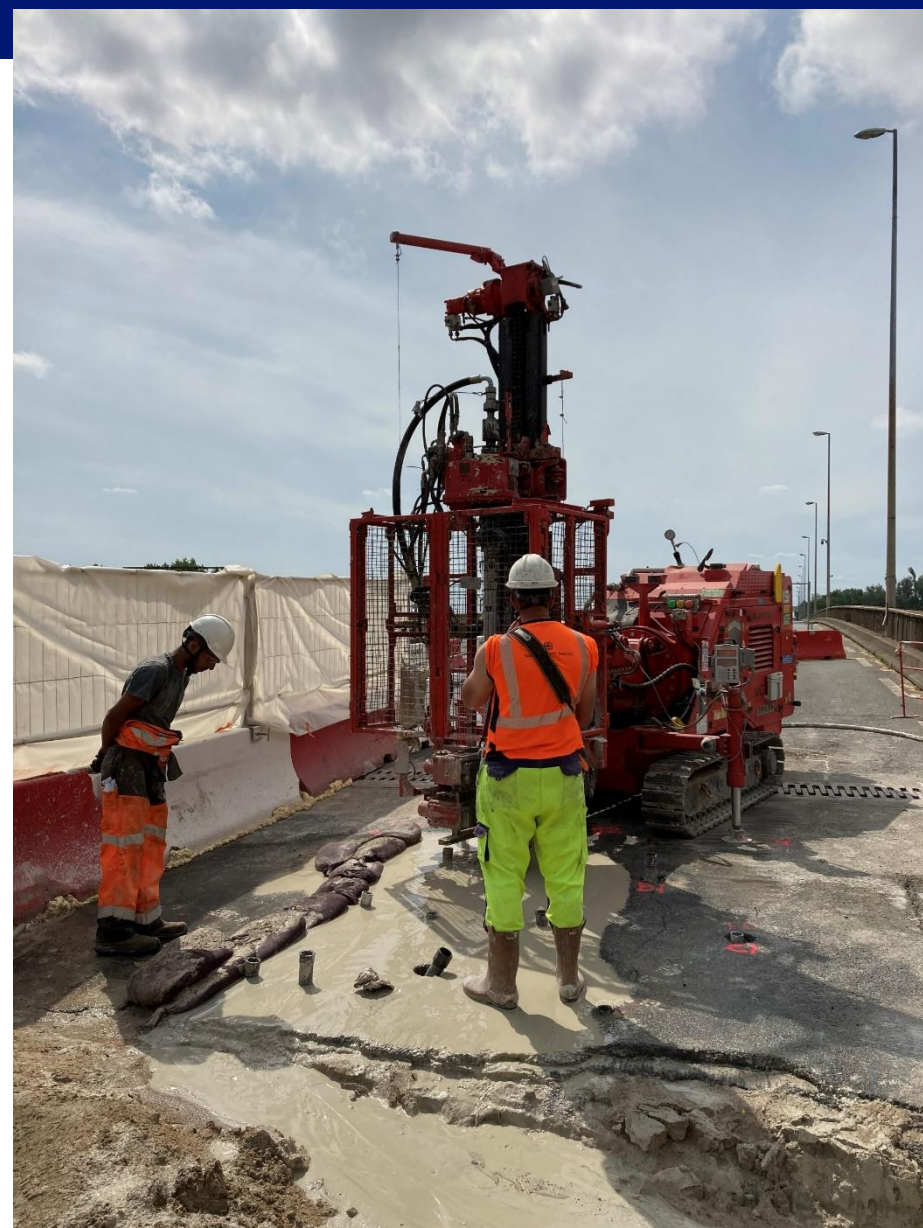
- Granulométries
- Essais d'injection en colonnes
- Mesures Rc
- Dosages CaCO_3
- MEB



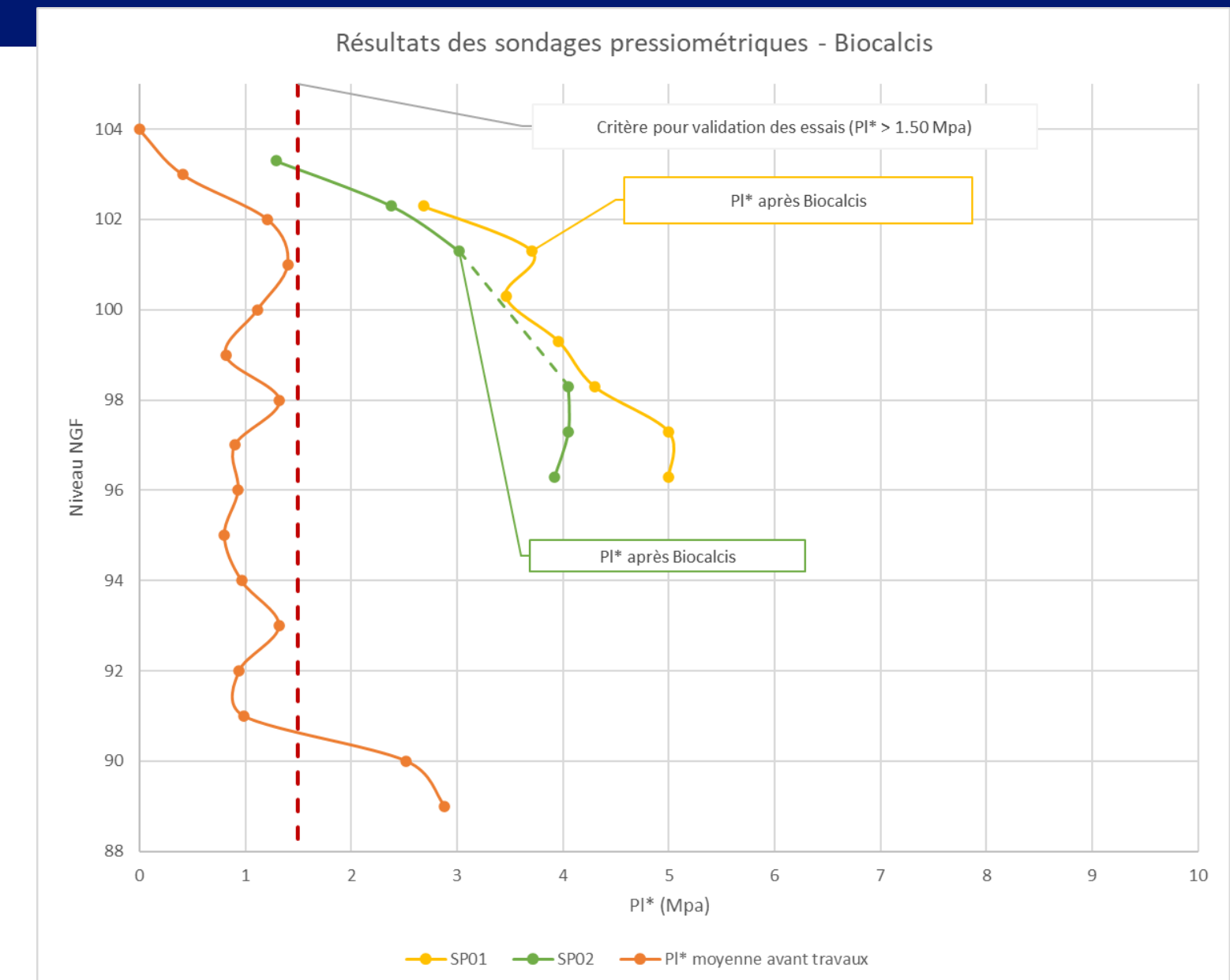
- Confirmation de la faisabilité de la biocalcification
- Détermination des dimensions et du protocole de traitement
(*objectif de cohésion 50 kPa*)



Réalisation : Pont René Thinat – Orléans (2022)



Mise en œuvre par des moyens usuels d'injection (TAM) et contrôles pressiométriques

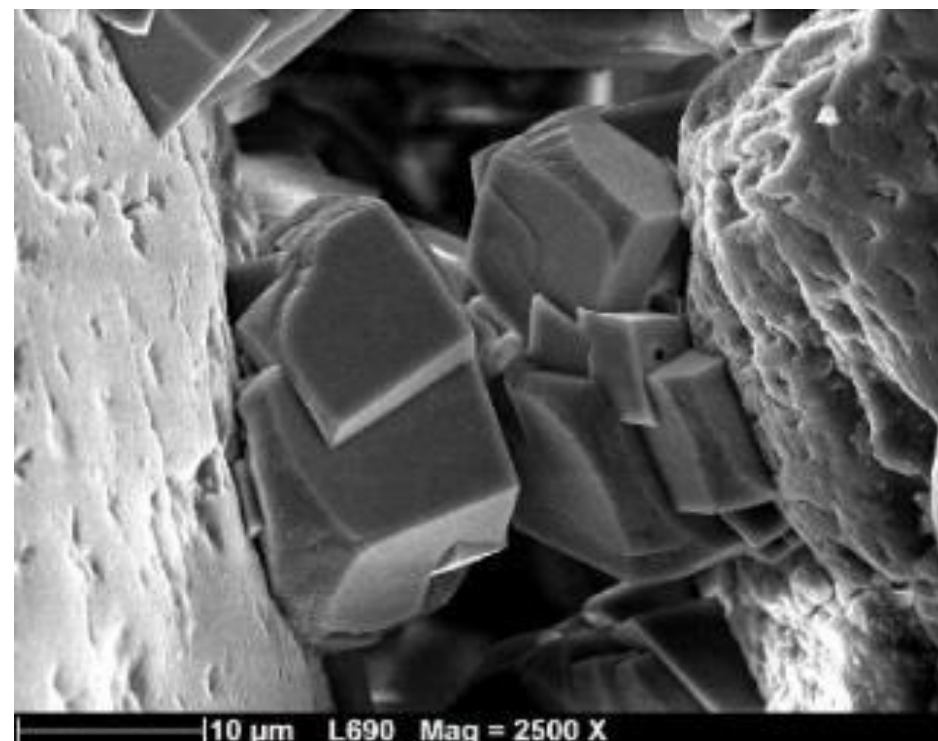


- ✓ Injection Biocalcis®
 - 54 forages
 - 530 mètres perforés
 - 170 m3 injectés

Installation de chantier



En résumé...



✓ Procédé de **biocalcification** développé à l'échelle industrielle, inspiré d'un **phénomène naturel**

✓ Destiné aux travaux de **consolidation des sols sablo-limoneux** mais aussi de matériaux granulaires

✓ Matériau **plus résistant** in situ → **cimentation de calcite**

✓ **Impact carbone réduit**

✓ **Injection sous faible pression**

✓ **Pas de changement de perméabilité, pas d'étanchéité**

✓ Réaction de **calcification très rapide** (24h à 48 h)

✓ **Installations compactes** pour la mise en œuvre

Autres modes de mise en œuvre (traitement de surface)



*Essais d'injection de talus $P \sim 30\text{cm}$
(Stabilisation érosion externe)*



*Essais d'épandage $P \sim 60\text{ cm}$
(application enfouissement de
câbles électriques)*

