

BOREAL : le renforcement des ouvrages hydrauliques en remblais par biocalcification : bientôt une réalité



SOLETANCHE BACHY



Auteur(s) (et logo(s))



⇒ Tiré de la communication B23 par **Annette Esnault-Filet (SB) et al**, au colloque CFBR « Maintenance et Réhabilitation des barrages » (Nov. 2018) - https://barrages-cfbr.eu/doi_cfbr_colloque2018_b23.html

⇒

OBJECTIFS DU PROJET BOREAL

- Démontrer les faisabilités techniques, environnementales et économiques du bio-renforcement des ouvrages hydrauliques en charge (digues fluviales, canaux hydroélectriques et canaux d'irrigation).
- Mettre sur pied une filière économique nationale capable de capter le marché à venir du renforcement des digues vis-à-vis de l'aléa sismique

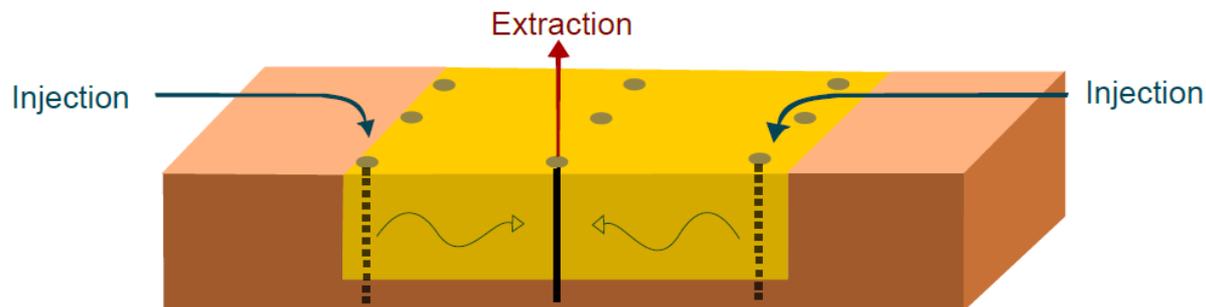
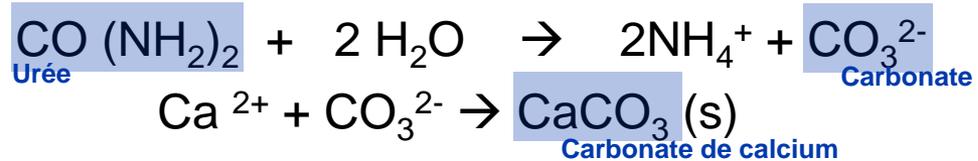
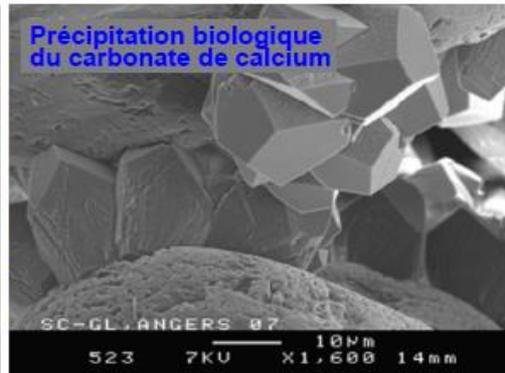


STRUCTURE DU PROJET

- **Bio Renforcement des OuvRagEs HydrAuLiques en remblais**
 - 8 partenaires aux compétences complémentaires dont 3 groupes, 2 PME, et 3 laboratoires
 - 8 lots techniques
 - labellisé par le Pôle de Compétitivité AXELERA (Rhône-Alpes), et co-labellisé par le Pôle RISQUES (PACA) et le cluster INDURA (Rhône-Alpes),
- Font Unique Interministériel (FUI) pour 1/3 environ du coût total du projet



PROCEDE BIOCALCIS

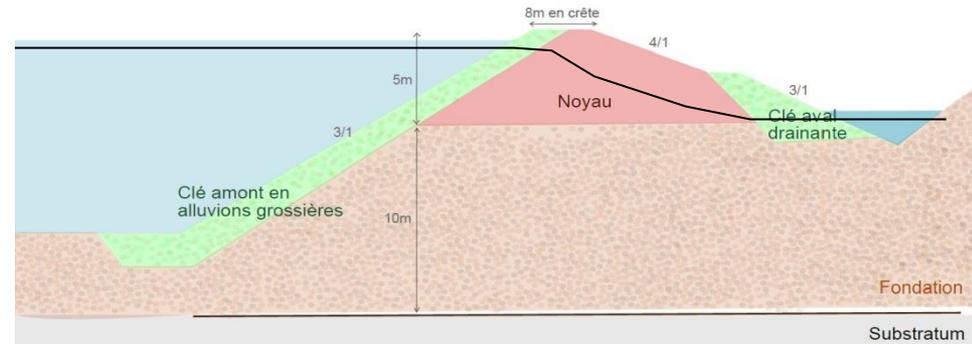


1. Injection des bactéries
2. Temps de repos de quelques heures pour la fixation des bactéries sur le sol
3. Injection du milieu calcifiant Urée/ CaCl.
4. Temps de repos nécessaire à la réaction de bio-calcification (de 24 à 48 h)

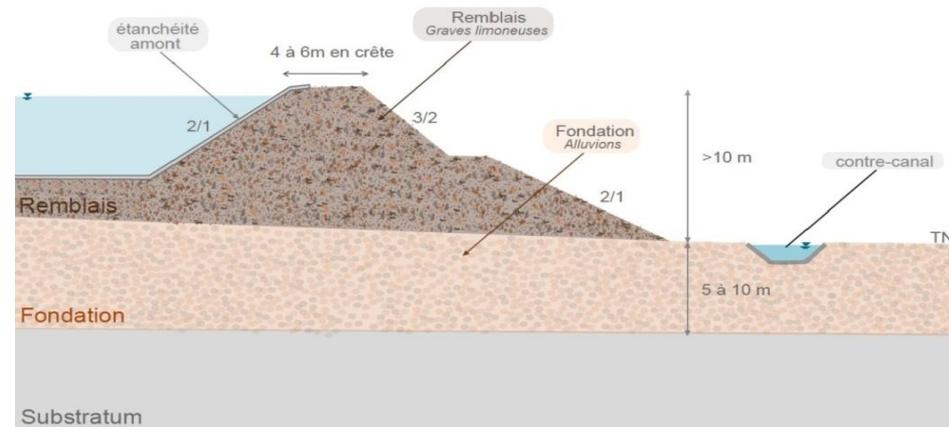
LOCALISATION DU TRAITEMENT

- **Deux coupe-types définies: une pour CNR, une pour EDF**

Objectif: ouvrir au maximum le champ d'application du traitement des digues par bio-calcification



Coupe-type des digues CNR.



Coupe-type des digues EDF.

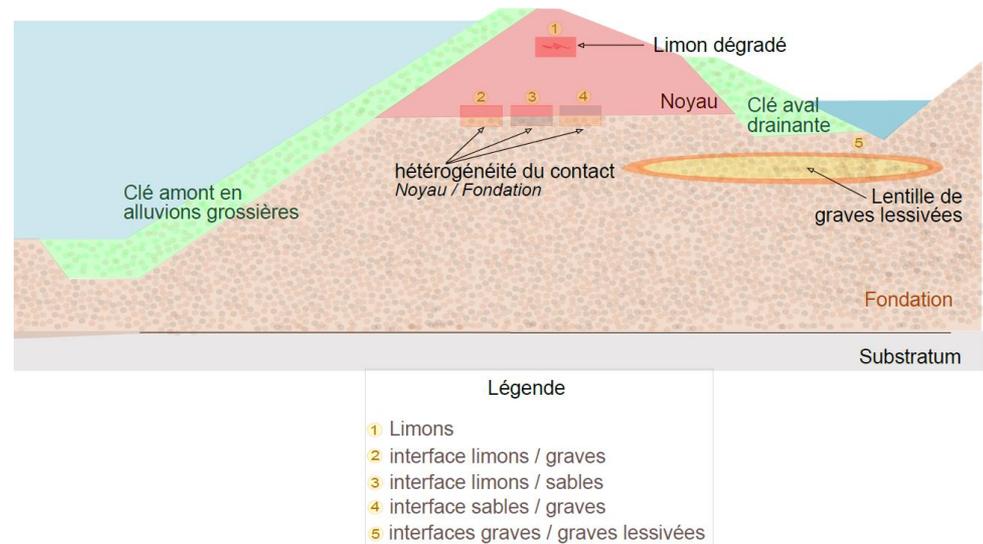
LOCALISATION DU TRAITEMENT

- **Deux coupe-types définies: une pour CNR, une pour EDF**

Objectif: ouvrir au maximum le champ d'application du traitement des digues par bio-calcification

- **Deux pathologies à traiter**

- Erosion
- Liquéfaction



Localisation des zones à traiter

VERROUS TECHNOLOGIQUES

- La présence d'**écoulements hydrauliques** importants
- Un deuxième verrou concerne la nécessité de **garantir la sûreté des ouvrages** traités : **performance géomécanique + durabilité**
- Le troisième verrou est le manque d'**acceptabilité écologique** et environnementale
- L'objectif final est donc de pouvoir garantir l'innocuité du traitement d'un point de vue **biologique et chimique**

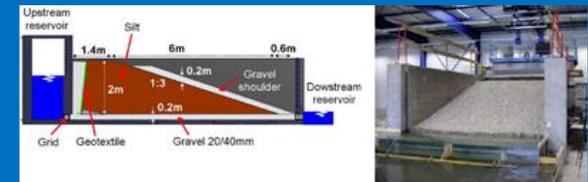
APPROCHE GRADUEE

- Expression des besoins industriels à partir de cas réels potentiels d'application.
- Adaptation du matériau pour répondre aux critères de l'application Digues
- Approche expérimentale graduée:
 - laboratoire petite échelle,
 - laboratoire échelle1,
 - essais sur sites réels
- Simulation numérique sous sollicitations sismiques de l'ouvrage traité

Echelle de laboratoire

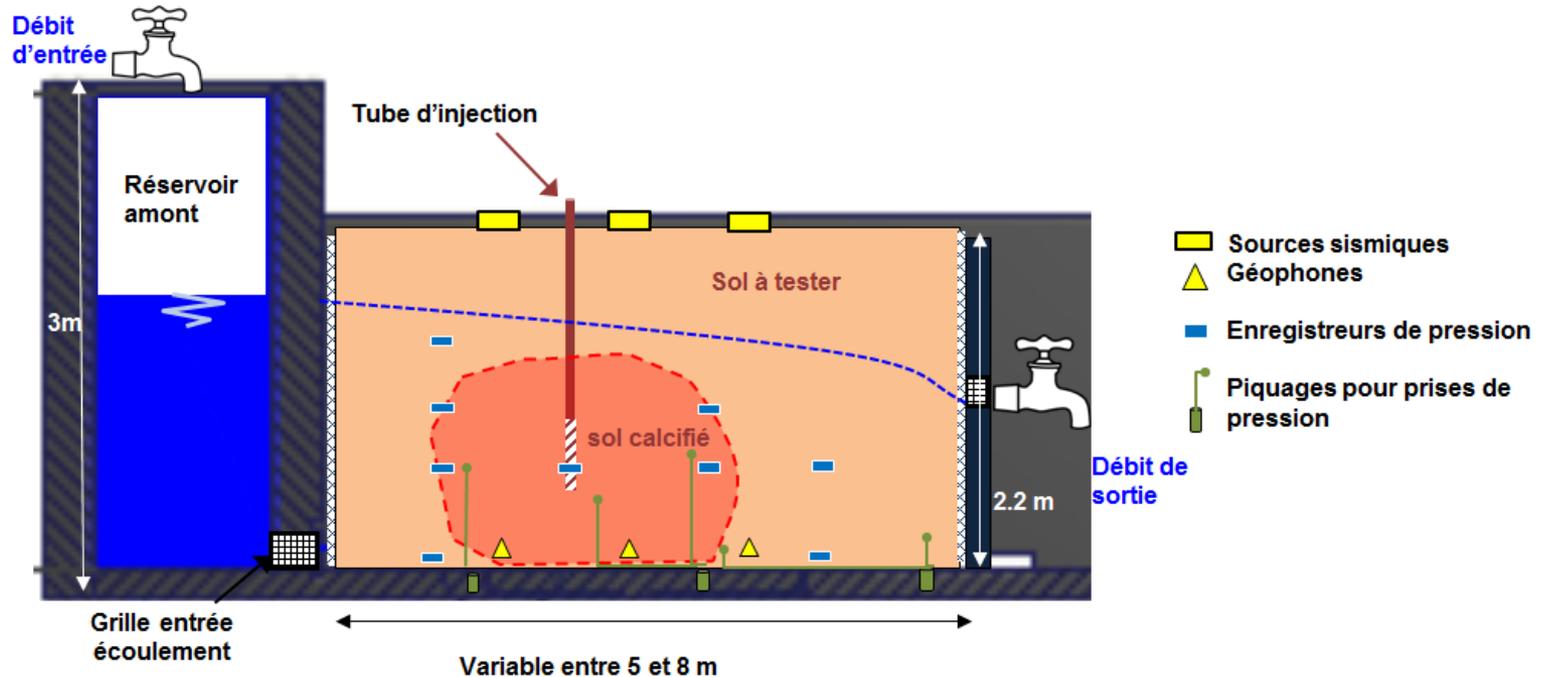


Echelle physique



Sites réels

Essais en modèle physique



■ Dimensions:

- Longueur : 5 à 8 m
- Hauteur : 2,2 m
- Largeur : 4 m

■ Tubes d'injection :

- 2 ou 3 selon les essais
- Tubes crépinés ou tubes à manchettes

■ Mise en place du sol :

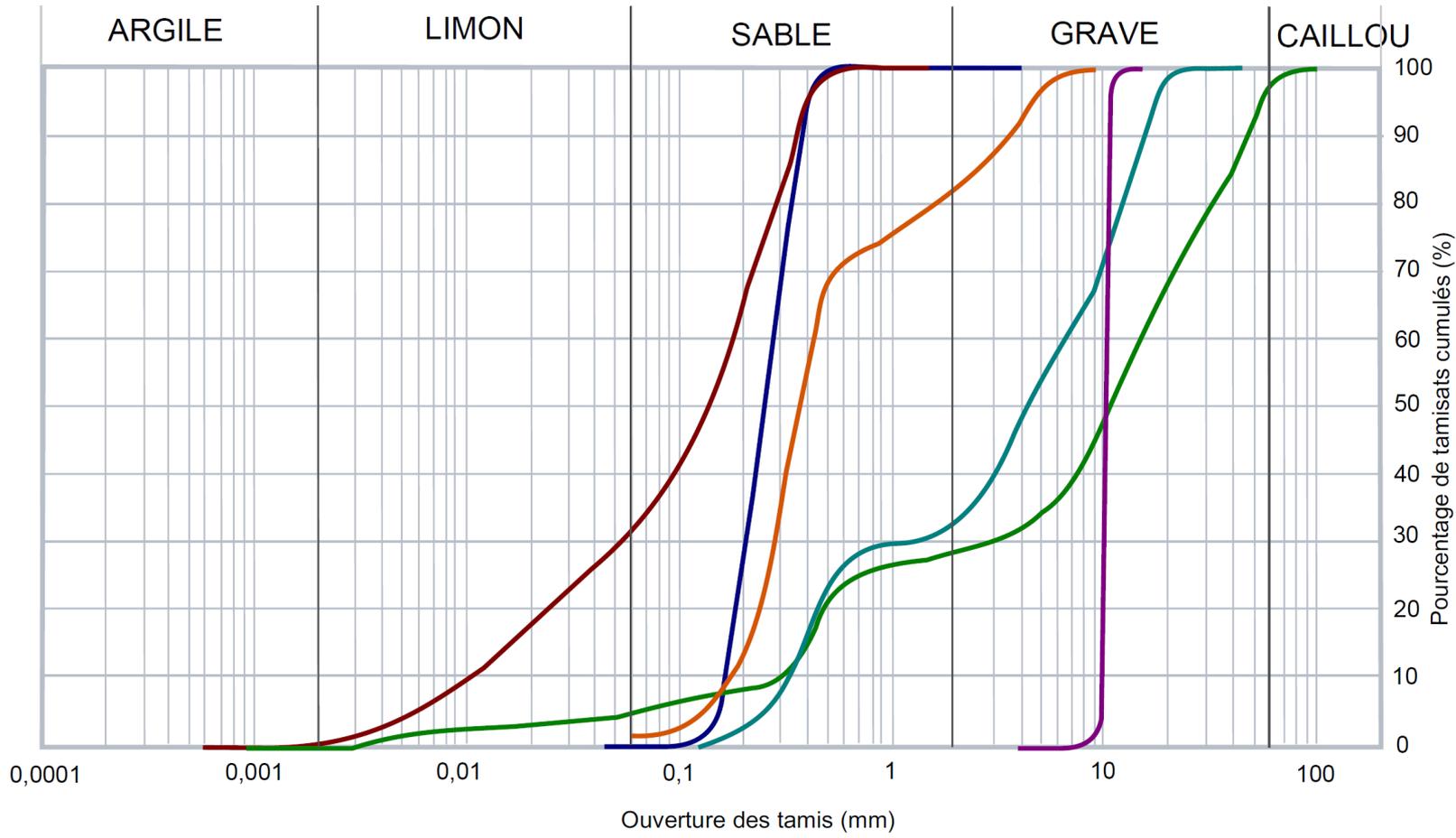
Par couches successives + compactage. Typologie A ou B (Choix du sol en fonction des problématiques EDF/CNR)

■ Ecoulement:

Vitesse de Darcy varie selon les essais de $2 \cdot 10^{-3}$ m/s à $4 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Matériaux & configurations

Type	Matériaux	Gradient (m/m)	V. Darcy (m/s)
A 1	Sable de Fontainebleau	0,14	$4 \cdot 10^{-5}$
A 3	Grave de Chavanay	0,03 à 0,09	$3 \cdot 10^{-4}$
A 3 bis	Grave de Chavanay	0,04 à 0,18	$4 \text{ à } 8 \cdot 10^{-4}$
B 1	Sable 0/4 mm Graves 12/20 mm	0,005	$2 \cdot 10^{-3}$
B 2	Limons BLV Paveur	0,12	$1,6 \cdot 10^{-4}$



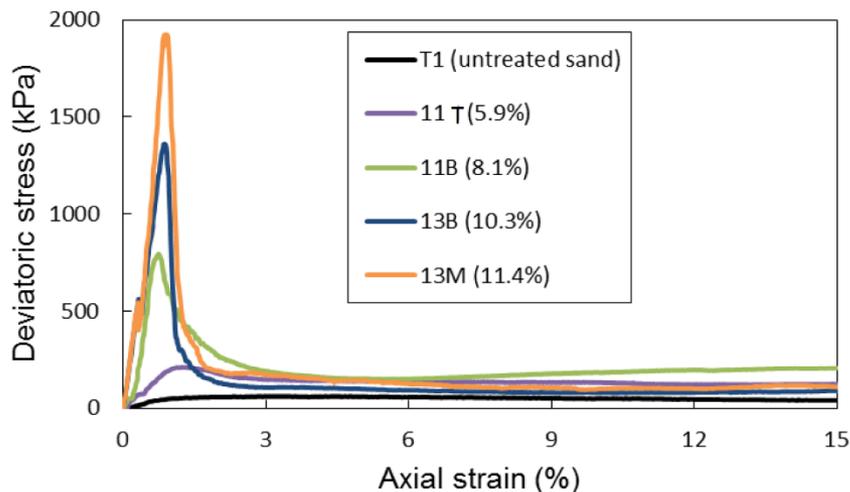
**ESSAIS EN
MODELES
PHYSIQUES
CNR**

RESUME DES RESULTATS

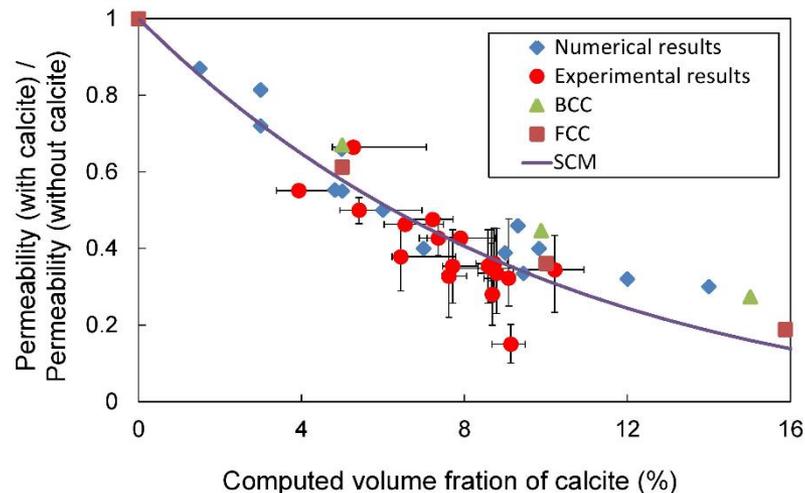
	A1	A3	A3bis	B1	B2
Gradient hydraulique	0,14 m/m	0,03 à 0,09 m/m	0,04 à 0,18 m/m	0,005 m/m	0,12 m/m
V Darcy	4 10 ⁻⁵ m/s	3 10 ⁻⁴ m/s	4 to 8 10 ⁻⁴ m/s	2 10 ⁻³ m/s	1,6.10 ⁻⁴ m/s
qd avant traitement	1 à 2 MPa (Panda)	2 à 8 MPa (Panda)	1 à 5 MPa (Grizzly)	3 à 5 MPa (Grizzly)	0,5 à 1 MPa (Grizzly)
qd après traitement	3 à >50 MPa (Panda)	10 à 60 MPa (Panda)	8 à 20 MPa (Grizzly)	6 à 15 MPa (Grizzly)	4 to 30 MPa (Grizzly)
Vs avant traitement	250 à 290 m/s	360 à 475 m/s	280 à 590 m/s	250 à 320 m/s	180 à 315 m/s
Vs après traitement	80% > 500 m/s; 25 % > 750 m/s; 1370 m/s dans les zones les plus calcifiées	500 à 700 m/s ↑Vs > 50% pour 50% du volume	300 à 1000 m/s ↑Vs > 50% pour 50% du volume	250 à 1300 m/s ↑Vs > 30% pour 50% du volume	200 à 700 m/s ↑Vs > 30% pour 50% du volume

PROPRIETES D'UN SABLE BIOCALCIFIE

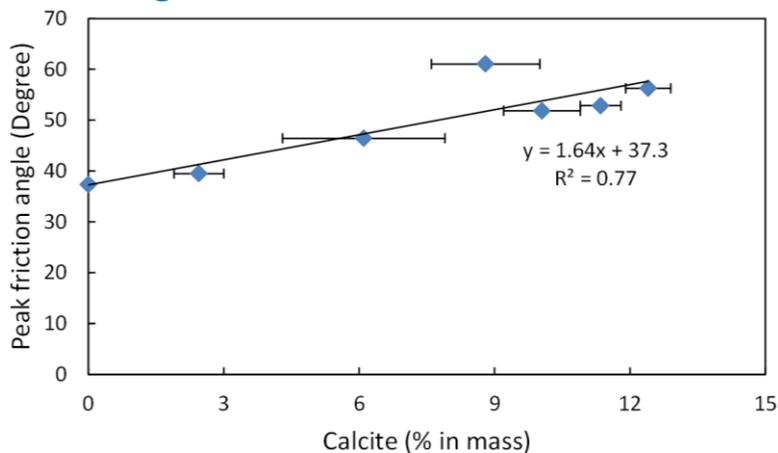
Résistance mécanique



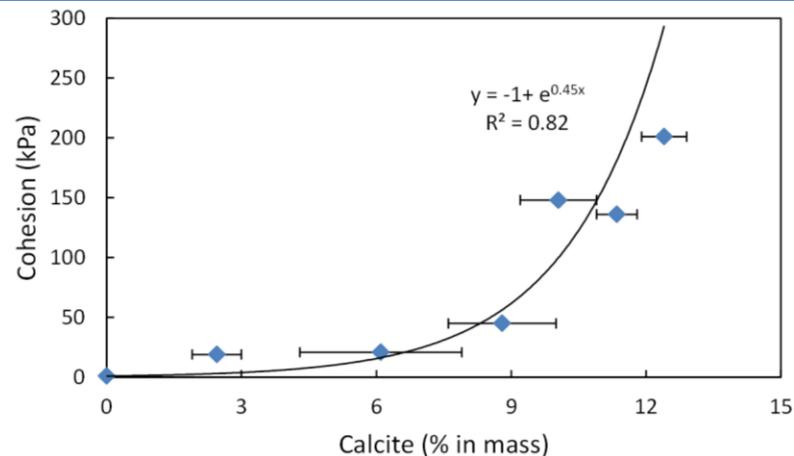
Perméabilité



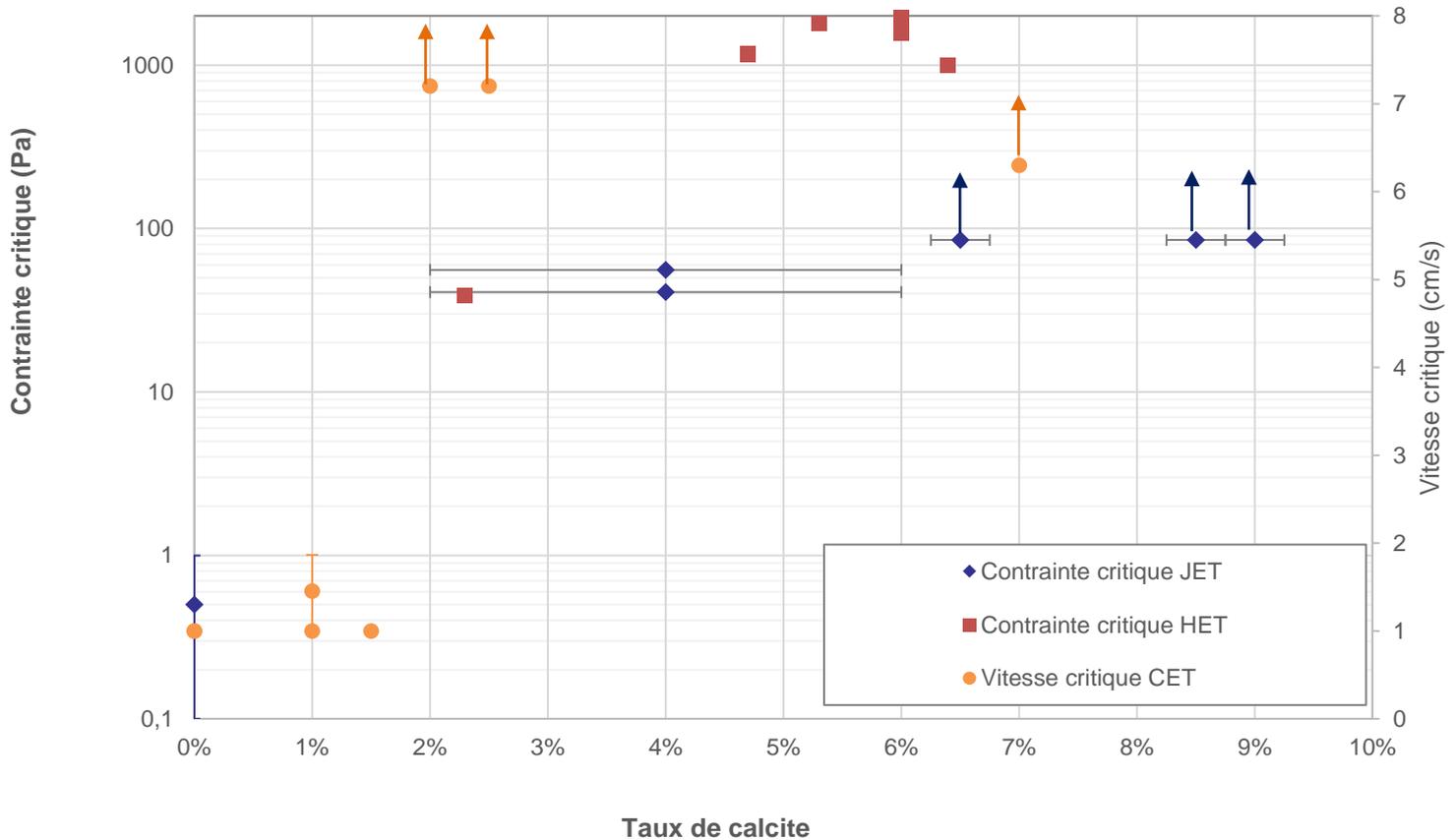
Angle de frottement résiduel



Cohésion



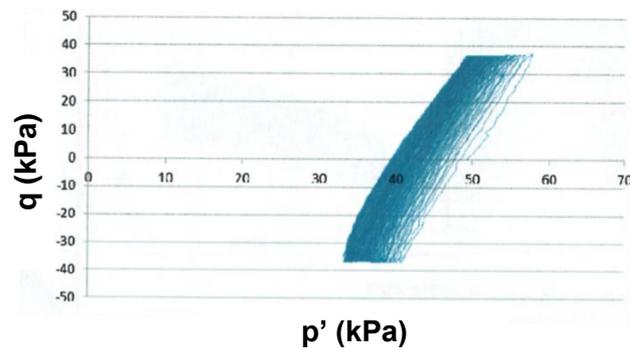
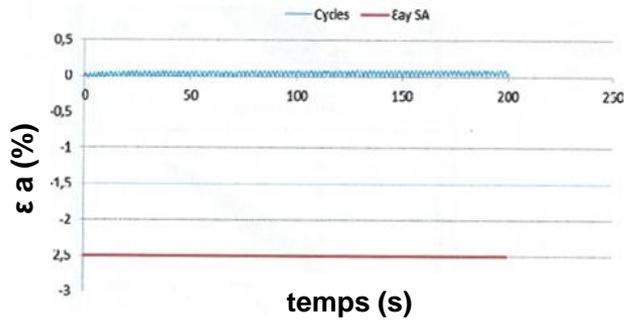
PROPRIETES D'UN SABLE BIOCALCIFIE



PROPRIETES D'UN SABLE BIOCALCIFIE SOUS SOLLICITATION CYCLIQUE

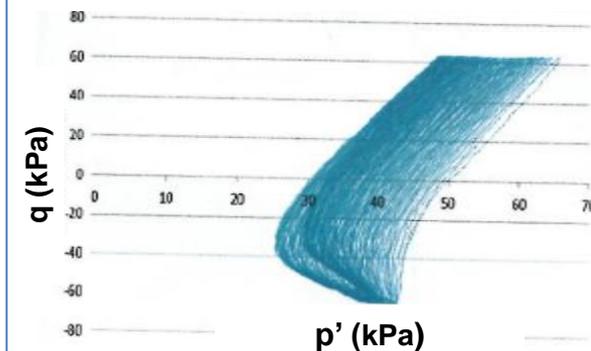
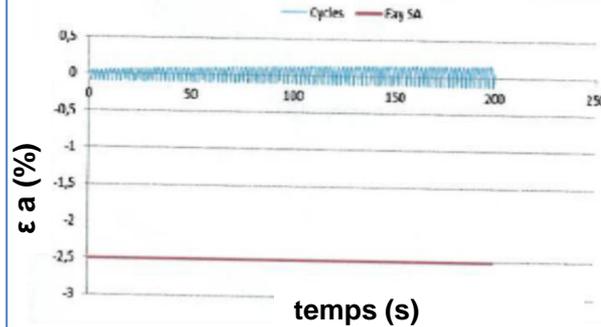
■ Essais triaxiaux cycliques: Pas de liquéfaction

$\sigma_c = 50 \text{ kPa}$ - **CSR=0,35**



Ru max = 24%

$\sigma_c = 50 \text{ kPa}$ - **CSR=0,60**



Ru max = 45%

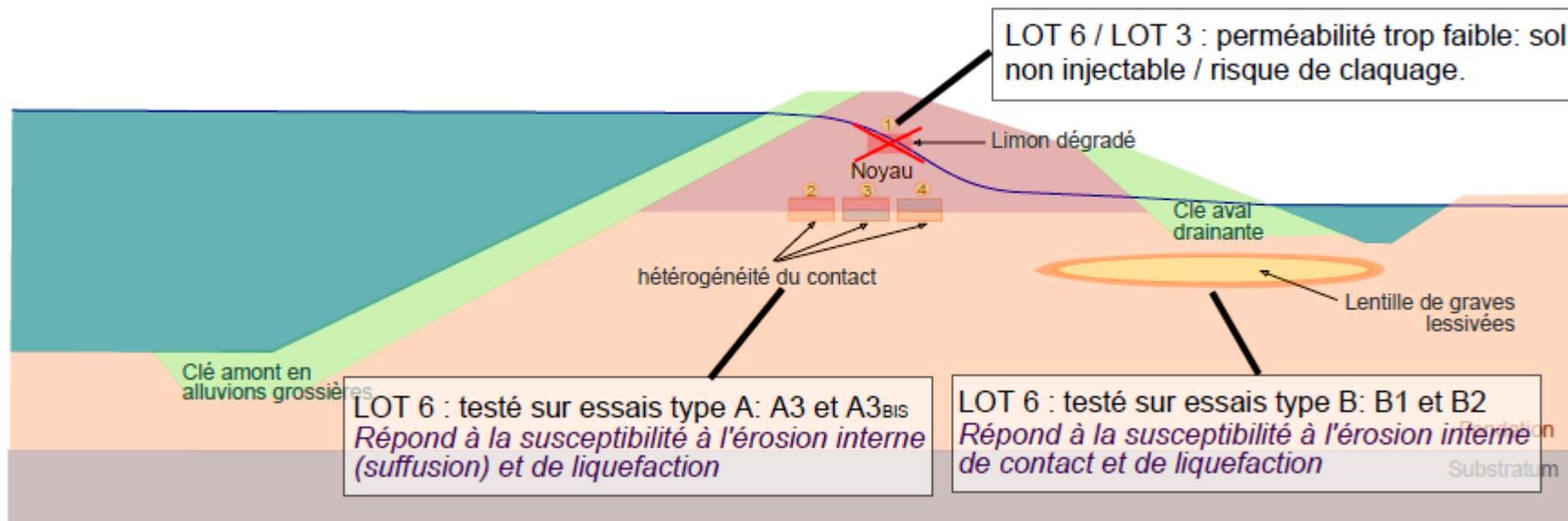
Avant essai



Après essai



CONCLUSION ET VALIDATION INDUSTRIELLE

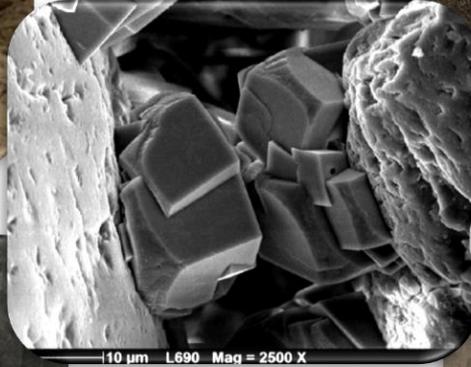
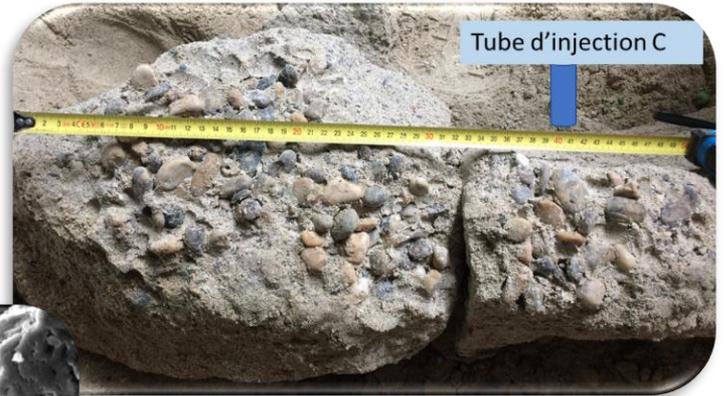


Les modalités de traitement sur la pathologie liquéfaction d'une part et d'érosion interne d'autre part sont à établir

CONCLUSION ET VALIDATION INDUSTRIELLE

APPLICATIONS SUR SITES EDF ET CNR (2019 – 2020)

- Sélection sites EDF et CNR en cours
- Détermination des protocoles d'injection
- Choix des méthodes de contrôles
- Contrôle de l'impact environnemental sur le milieu extérieur



Barrage du Chambon (Photothèque)

MERCI