



**SOLETANCHE BACHY**

**BOREAL**

**Annette Esnault Filet (Soletanche Bachy)**

**Aurélie Garandet (CNR)**

**Fabrice Emeriault (3SR Grenoble)**

*Journée Technique CFMS/FNTP – Recherche et Entreprises TP – Des exemples dans le domaine des sols – Paris 4 Février 2016*

# BOREAL : **B**io Renforcement des **OuvRagEs** Hydr**Au**Liques en remblais

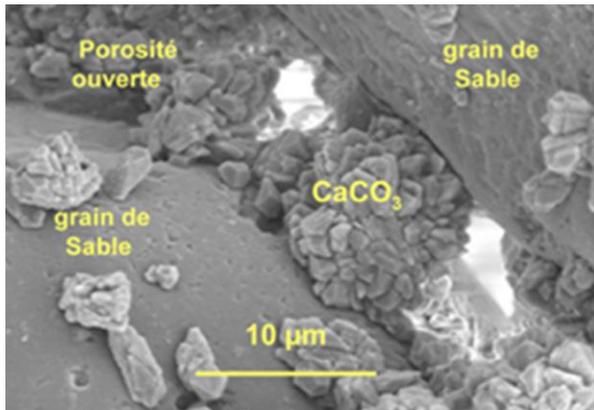


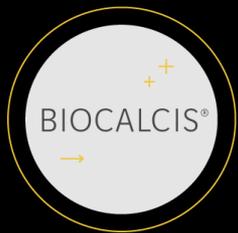
FUI 16 2014-2018  
Budget total ≈ 4,5 M€

# GENESE DU PROJET

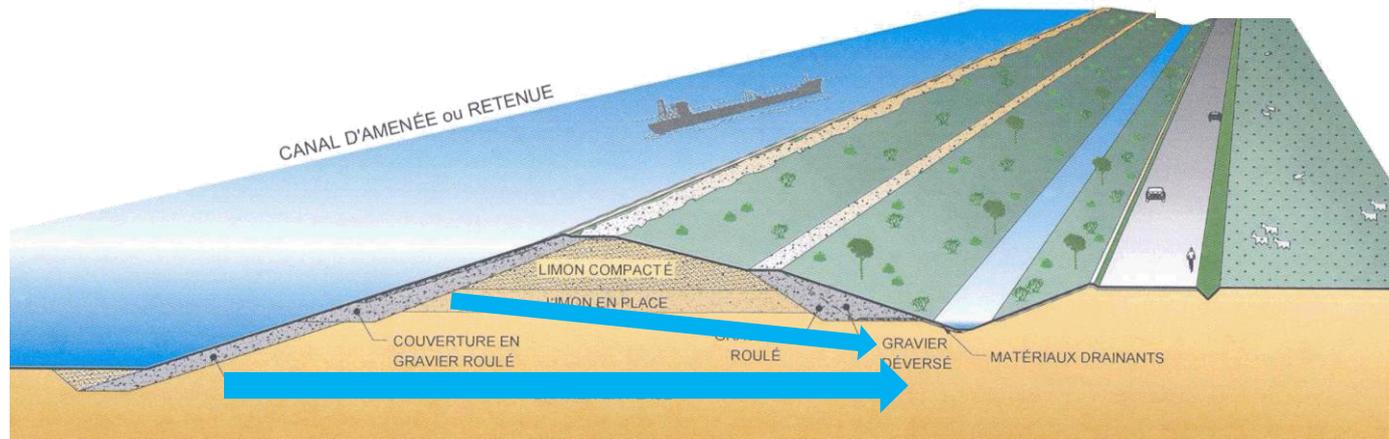
- **EDF & CNR : trouver de nouvelles solutions techniques non intrusives pour traiter des digues : érosion interne - liquéfaction**
- **Soletanche Bachy : Adaptation du Procédé d'injection Biocalcis pour son application sur des digues en charge**
  - ✓ Apporte de la cohésion ⇒ tenue vis-à-vis de l'érosion et de la liquéfaction,
  - ✓ Perméabilité du sol non affectée ⇒ écoulements naturels maintenus,
  - ✓ Forte pénétrabilité des solutions ⇒ nombre de points d'injection réduit.

# PROCEDE BIOCALCIS





# Verrous à lever pour le renforcement des digues en charge



- Procédé: nécessité d'une mise en œuvre **dynamique**, en raison de la présence d'eau en mouvement (de 1 cm/h à 10 cm/h dans noyau, jusqu'à 10 m/h dans fondation).
- Performances : caractérisation physique & mécanique - durabilité

# CONSORTIUM BOREAL ET STRUCTURE DU PROJET

Verrous  
technologiques



Microbiologie



Transfert



Microstructure

Contrôles



Impact  
environnemental



Contrôle

Production



Mise en œuvre du procédé

Démons-  
trateurs



Application corps de digue

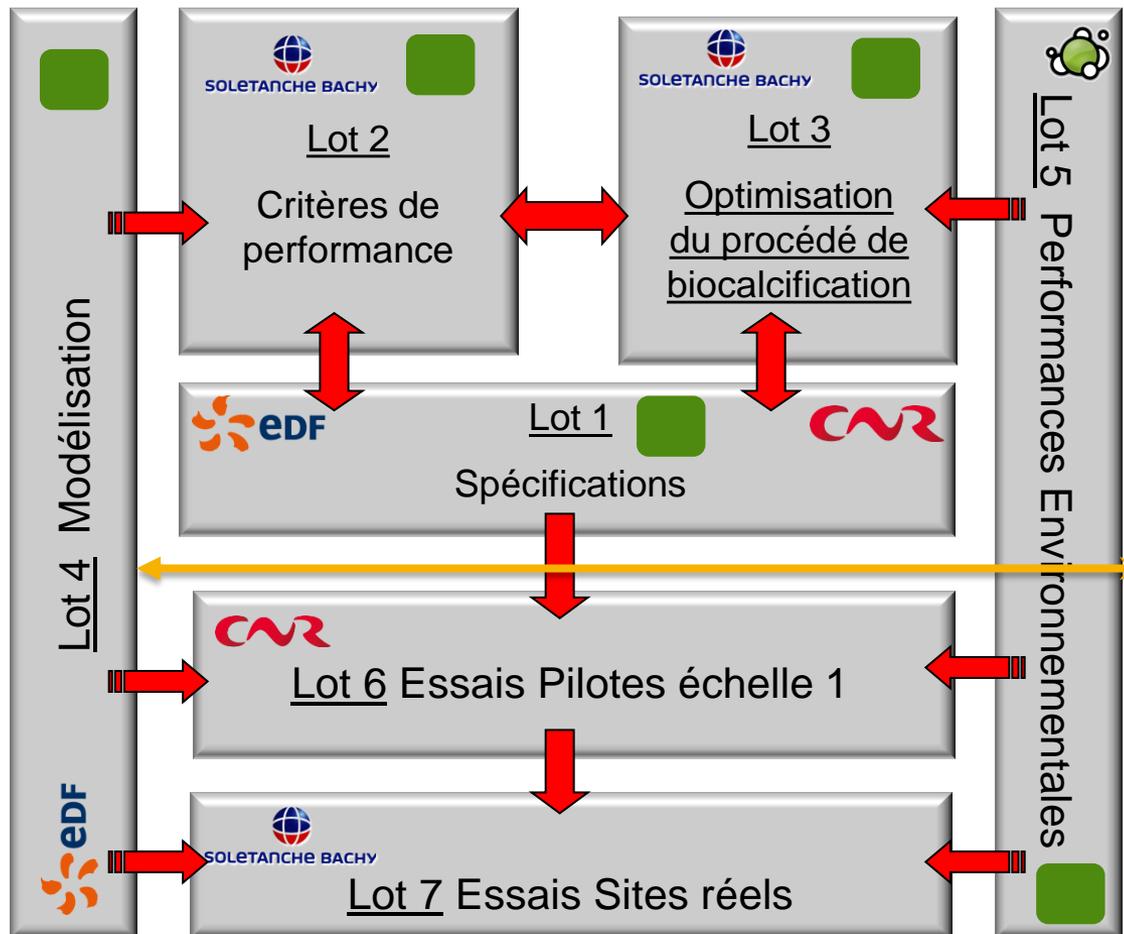


Application fondation

- 1. Expression des besoins à partir de cas réels potentiels d'application.**
- 2. Adaptation du matériau pour répondre aux critères de l'application Dignes.**
- 3. Approche expérimentale graduée:**
  - ✓ *laboratoire petite échelle,*
  - ✓ *laboratoire échelle 1,*
  - ✓ *essais sur sites réels.*
- 4. Simulation numérique de l'ouvrage traité soumis à des sollicitations sismiques.**

# L'ORGANISATION DU PROJET

Tâches en cours



JALON 1  
M24

- Les principaux ouvrages concernés par le projet BORÉAL, sont les digues en **charge permanente**. Ces digues constituent des canaux qui ont pour rôle *l'irrigation, la navigation ou l'amenée d'eau à une usine hydro-électrique*.
- Participation de 2 maitres d'ouvrages expérimentés dans la maintenance de ce type d'ouvrages, CNR et EDF possèdent environ 1000 km de digues de canaux à eux 2. Ce sont des ouvrages âgés de 35 à 85 ans.



Digue de retenue de l'aménagement de Belley - CNR



Digue de canal sur la Durance - EDF

## Deux pathologies à traiter

### Erosion interne

- Processus d'arrachement et de transport de grains du matériau constitutif de l'ouvrage par un écoulement de percolation à travers l'ouvrage
- Responsable de la moitié des ruptures sur ouvrages en terre dans le monde



Erosion interne (de conduit) le long d'un ouvrage traversant  
Source: FEMA: Federal Emergency Management Agency, USA)

### Liquéfaction

- Sous contrainte sismique: diminution de la rigidité du sol et de sa résistance en relation avec l'accumulation de la pression interstitielle et la réduction consécutive des contraintes effectives.

### Damage status

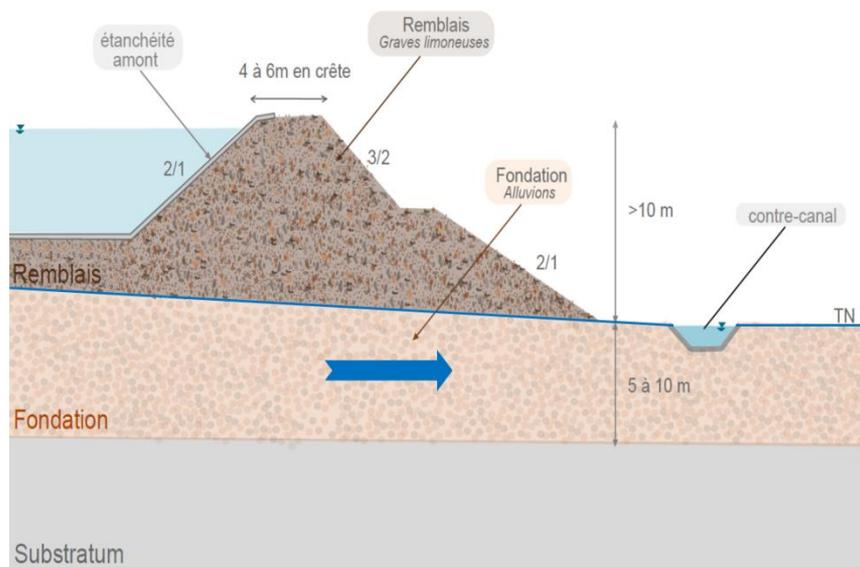


Rupture d'une digue par liquéfaction - Séisme de Tohoku - Japon 2011

# Définition des ouvrages modèles

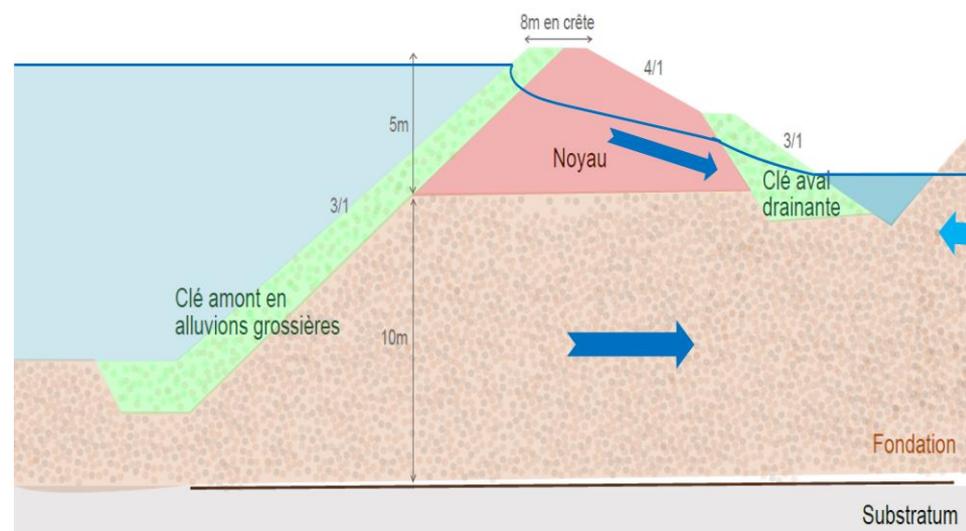
- Objectif: ouvrir au maximum le champ d'application du traitement des digues par bio-calcification

Définitions de deux coupe-types issues des parcs EDF et CNR



Fondation: graves alluvionnaires (graves sablo-limoneuses)

Remblais de digue: graves limoneuses.



Fondation: graves alluvionnaires (graves sablo-limoneuses)

Remblais de digue: limon sableux/ limon silteux/sables limoneux

V d'écoulement (de Darcy)=  $10^{-5}$  à  $10^{-2}$  m/s

# Performances recherchées par le projet BOREAL

Le procédé BOREAL sera évalué sur les mêmes bases que les techniques de confortement « classiques » des pathologies d'érosion interne et de liquéfaction existantes : paroi étanche au coulis; étanchement/renforcement par soil-mixing; injections de coulis, etc.

Il sera évalué selon 5 critères :

- Performances vis à vis de la problématique d'érosion interne ou liquéfaction
- Performance au vieillissement
- Impact environnemental
- Facilité de mise en œuvre de la technique
- Coût



Création d'un écran étanche au coulis de bentonite-ciment



Création d'un renforcement de sol/étanchement par soil mixing (triple taryère)

- **Performances techniques attendues sur les matériaux traités**
  - Augmentation de cohésion suffisante pour éliminer le risque d'initiation de l'érosion interne et de liquéfaction (*augmentation de l'ordre de 10 Kpa*) => Lot 2/lot3
  - Augmentation de cohésion homogène sur le matériau et les interfaces et cohérence avec les valeurs de résistances présentes aux frontières => Lot 2/lot3
  - Maintenir les écoulements (*perméabilité identique ou perméabilité diminuée d'un facteur 10*) => Lot 2/lot3
  - Augmentation de la vitesse critique d'érosion d'un facteur 10 (*évaluée sur le banc d'essai du LTHE*) => Lot 2
  - Augmentation de l'indice d'érosion de 1 (*évalué au HET et JET*) => Lot 2

# Validation de la biocalcification à l'échelle 1- LOT 6



- Principe du modèle physique à échelle 1- Laboratoire CNR

=> Réalisation prévue au dernier trimestre 2016

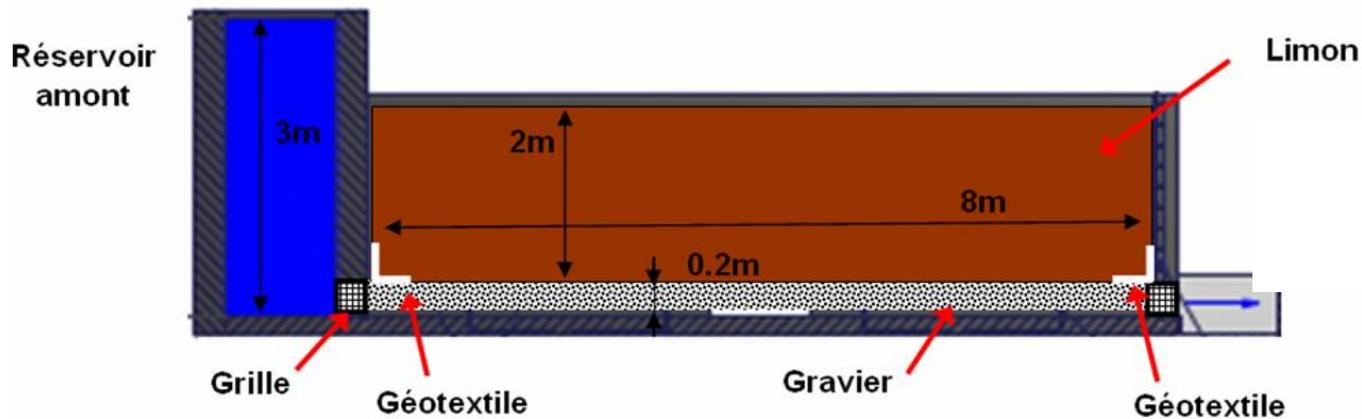
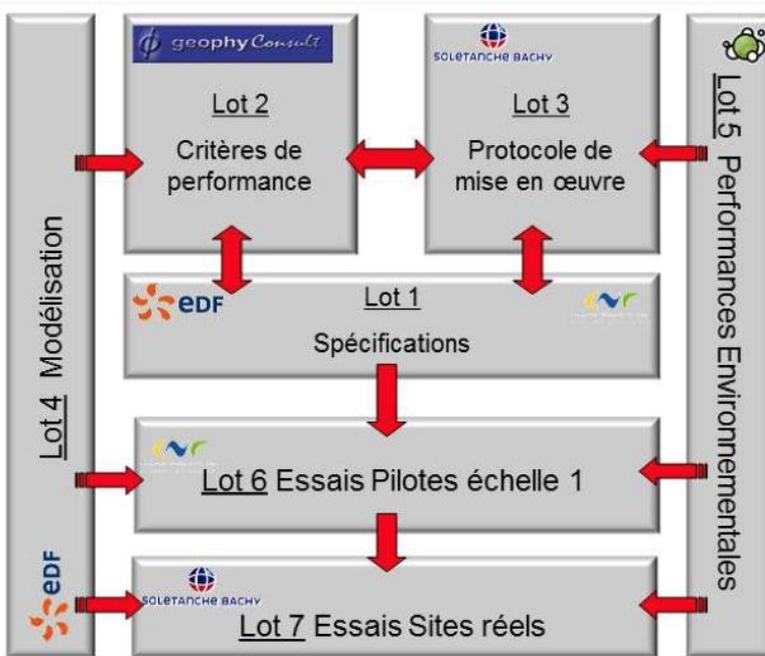


Photo du modèle échelle 1 d'une digue pour le projet Erinoh en 2011-2013 (**E**rosion **I**nterne des **O**uvrages **H**ydrauliques)



# Contribution du laboratoire 3SR au projet FUI BOREAL



- **Lot 2:**

- 2.1 : Durabilité dans le temps
- 2.2 : Efficacité du traitement vis à vis de l'érosion interne

- **Lot 3:**

- 3.1 : Propriétés microstructurales et comportement mécanique (*essais mécanique + tomographie*)

Travail mené en forte interaction avec le LTHE Grenoble

Support de la thèse de Abdelali DADDA (co-direction F. EMERIAULT – C. GEINDREAU)

# Objectifs et méthodologie

Compréhension des effets de la calcification sur les propriétés physiques et mécaniques du sol

Identification de la relation entre taux de calcite (apparente ou effective), conditions d'injection et propriétés physiques

## A l'échelle décimétrique

- **Réalisation d'essais triaxiaux de « référence »**
- **Détermination des propriétés physiques et mécaniques (résistance, perméabilité, ...)**
- **Et mise en relation avec la teneur en calcite moyenne de l'échantillon biocalcifié**

## A l'échelle microscopique

- **Réalisation d'images par tomographie RX**
- **Traitement des images, reconstruction du volume 3D**
- **Détermination numérique des propriétés microstructurales et physiques**

**Validation par comparaison avec essais de « référence »**

# Dispositif expérimental / Triaxial

Bonbonne de désaération

Vase de Mariotte

Cellule triaxiale

Contrôleurs Pression-volume

Système d'acquisition

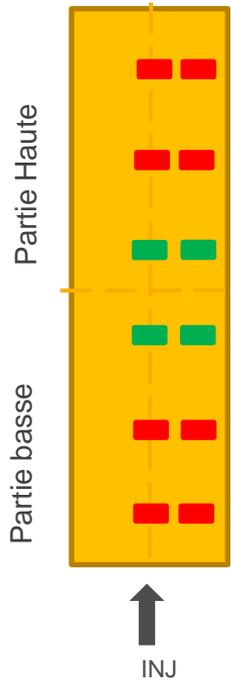
Bouteille de CO<sub>2</sub>



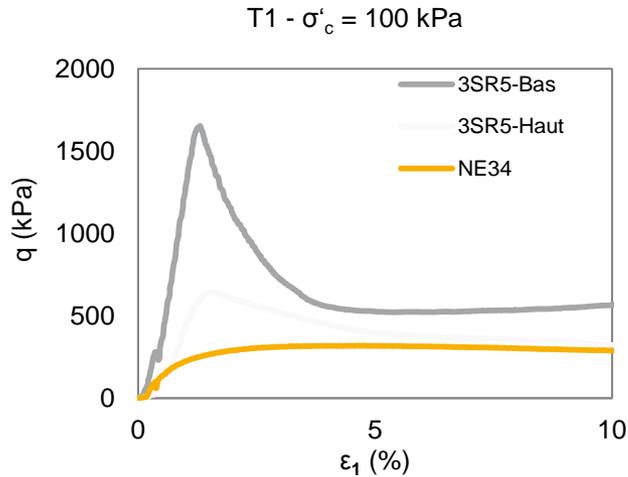
Dispositif expérimental - laboratoire 3SR (Bishop & Wesley cell)

# Méthodologie / A l'échelle décimétrique

Colonne 3SR5  
(NE34 biocalcifié)



Essai triaxial / Perméabilité



Avant calcification

$$\Phi_{\text{int}} = 37 \%$$

$$K = 6,1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Après calcification

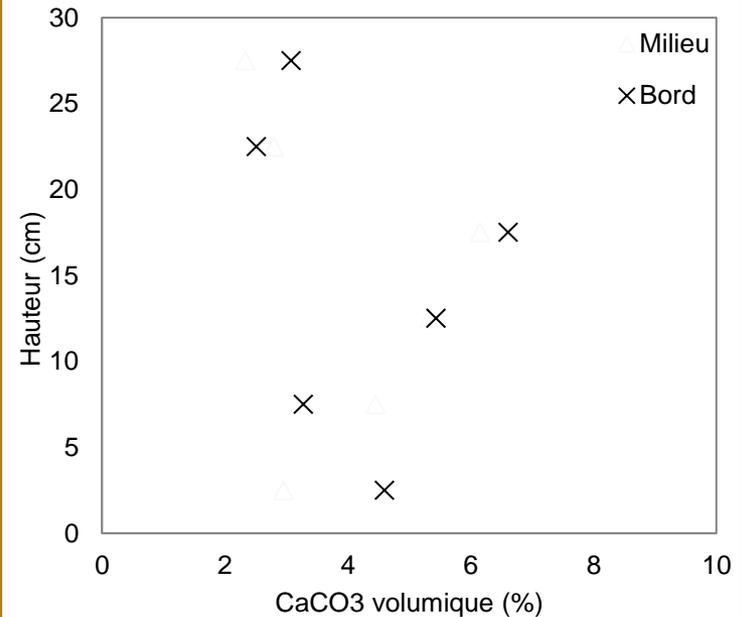
$$\Phi_{\text{fin}} \text{ estimé} = 30,27 \%$$

$$K_{\text{bas}} = 3,1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$K_{\text{haut}} = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Mesure de CaCO3

Profil de calcite-3SR5



■ Mesure de CaCO3 (Calcimètre de Bernard)

■ Mesure de CaCO3 + Tomographie RX

Tomographie RX : Analyse d'images + calculs des propriétés

# Dispositif expérimental / Nanotomographe

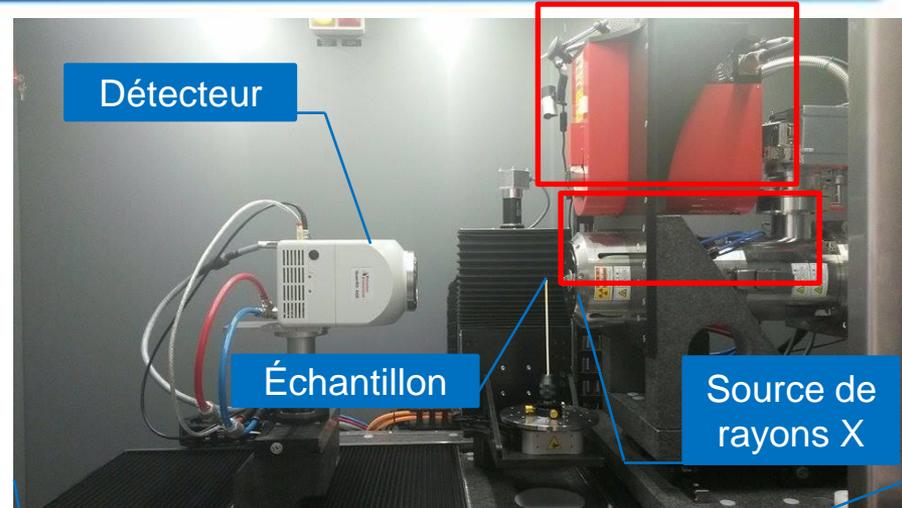
Système d'acquisition



Détecteur

Échantillon

Source de rayons X



Vue générale de la salle du tomographe

0,3 micron- 5 microns

5 microns- 120 microns

Détecteur : 2024x2024

# Méthodologie / A l'échelle micro

Colonne 3SR5

Observation (rayon-x)

Prélèvement

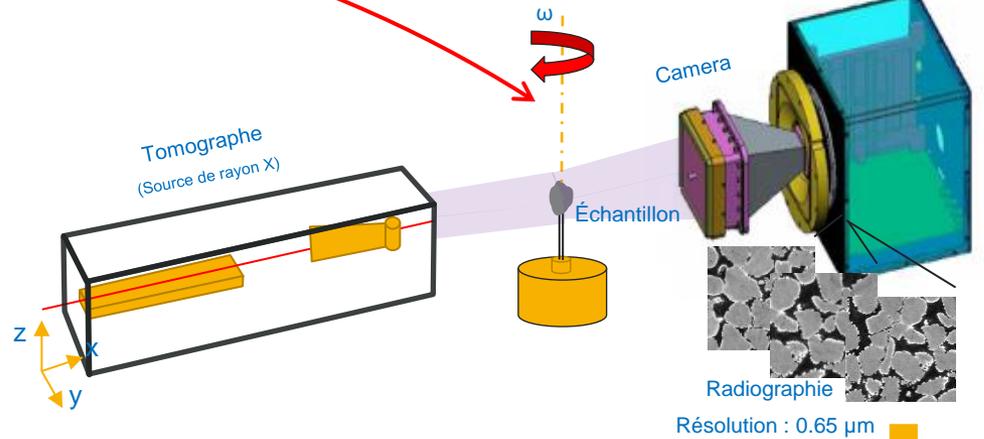
Échantillon  
3SR5-BHB

Haut

Bas

Bord

Calculs (Avant et après  
calcification)



Traitement (Fiji, Matlab)

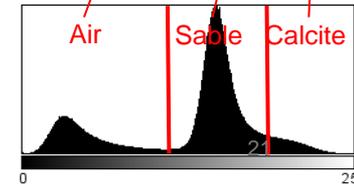
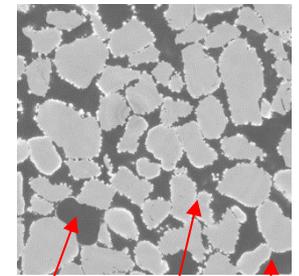
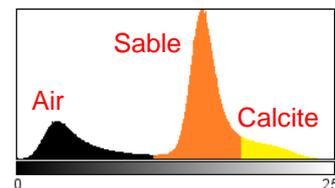
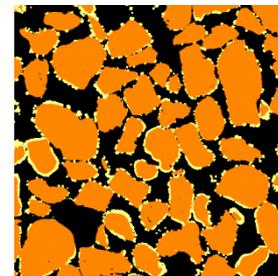
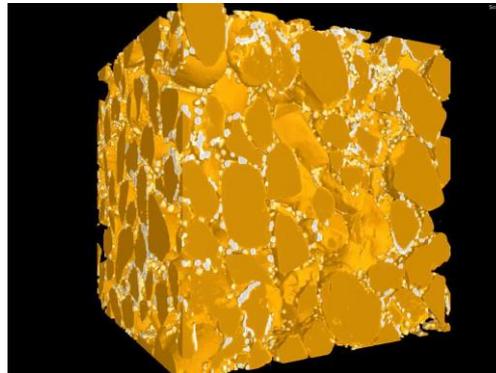
(3) Construction d'un volume  
3D

(2) Seuillage et assemblage  
des phases

(1) Détection et séparation  
des phases

Propriétés

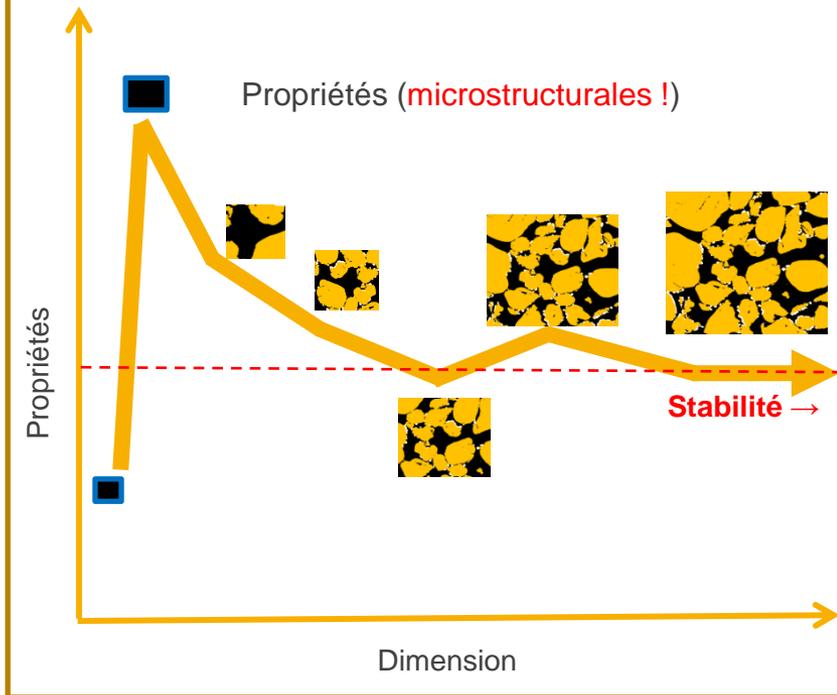
- Microstructurales
  - Porosité
  - Calcite
  - Calcite de contact (Active)
  - Surface spécifique
- Physiques
  - Perméabilité
  - Diffusivité



# Méthodologie / Analyse numérique des images

Calculs (GeoDict, Matlab)

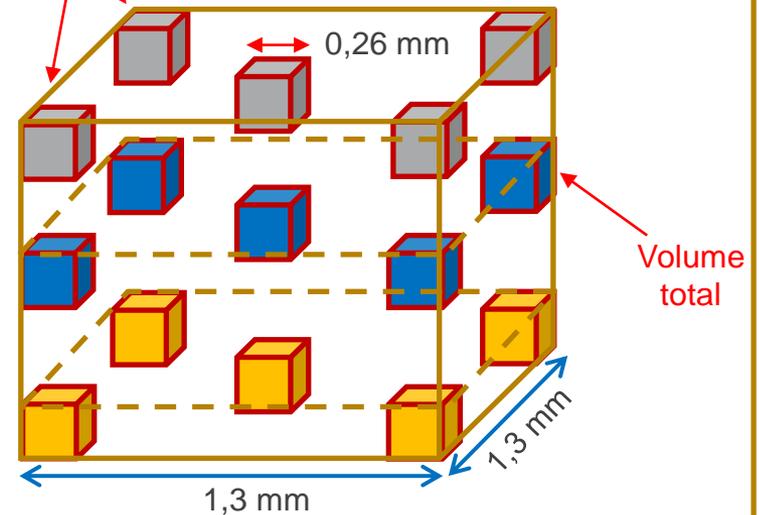
## Volume élémentaire représentatif (VER)



## Approche statistique

Calculs sur les sous volumes

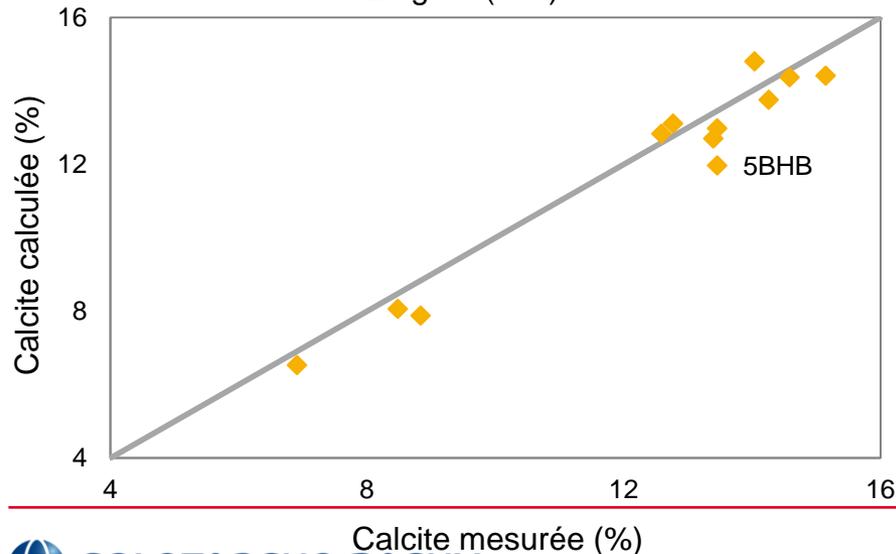
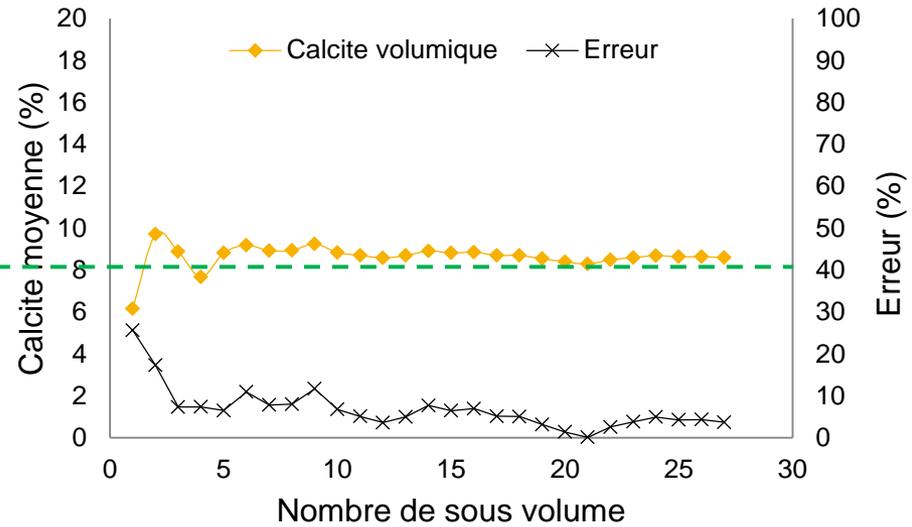
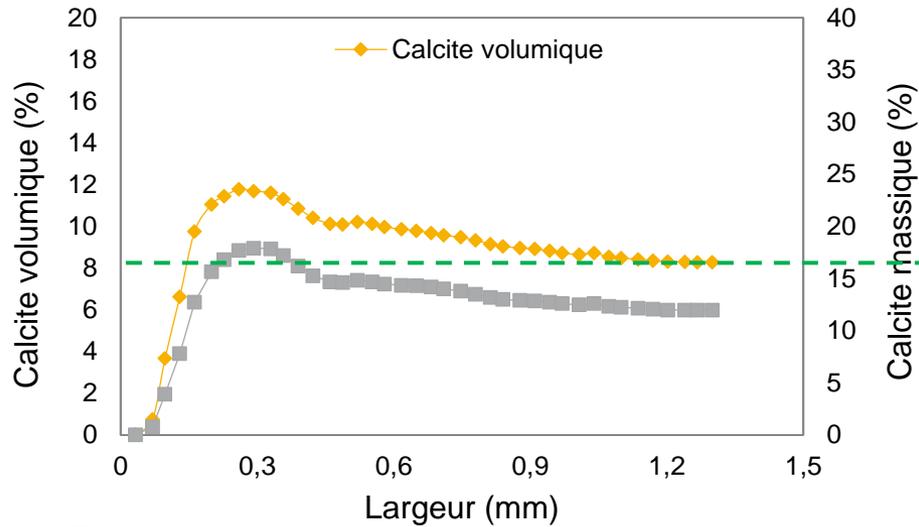
Moyenne statistique de propriétés apparentes



Les résultats numériques doivent être comparés avec les résultats expérimentaux

# Résultats / Propriétés microstructurales

## Quantité de calcite



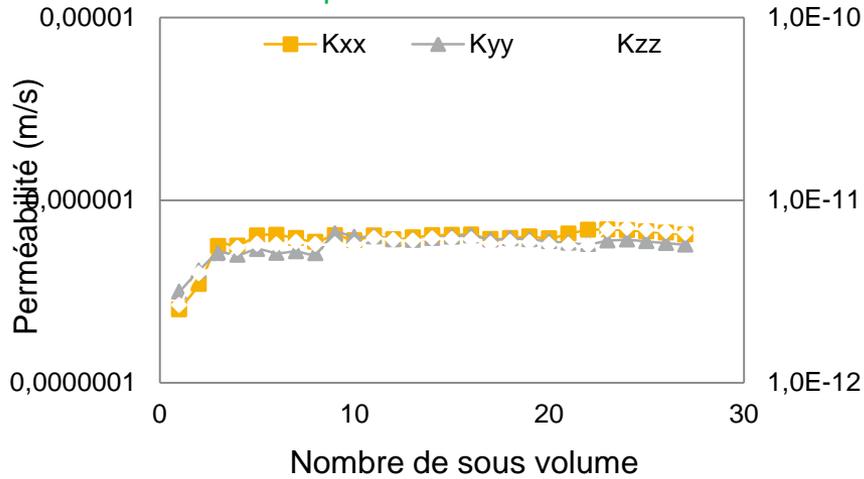
Une erreur < 5% entre méthodes de calcul sur toutes les propriétés microstructurales.

Un écart très limité entre propriétés microstructurales calculées et mesurées

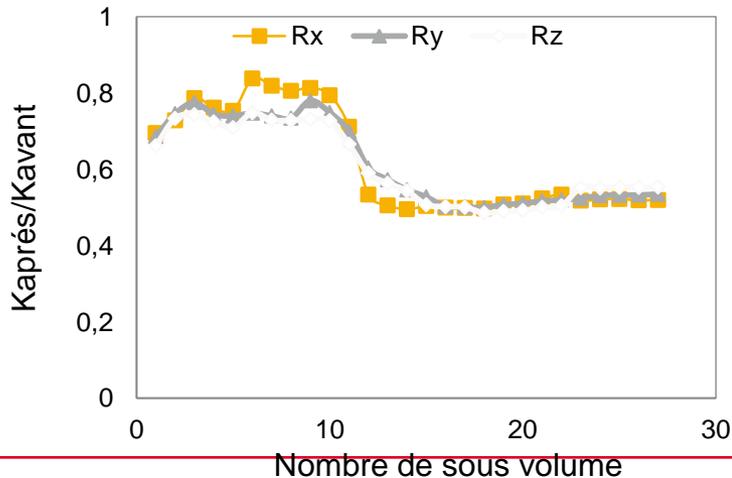
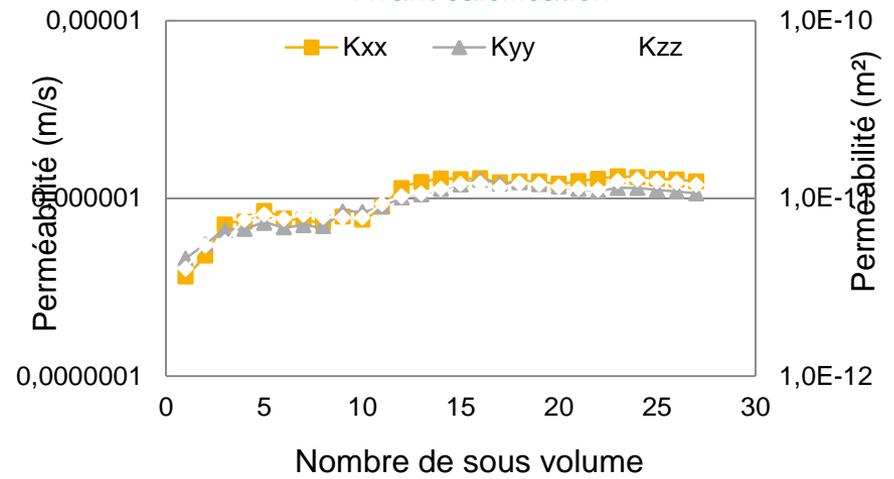
# Résultats / Propriétés physiques

## Perméabilité

Après calcification



Avant calcification



Réduction de perméabilité de  
50% après un niveau de  
calcification de 12%

# Résultats / Propriétés mécaniques

Calcite de contact (« active »)

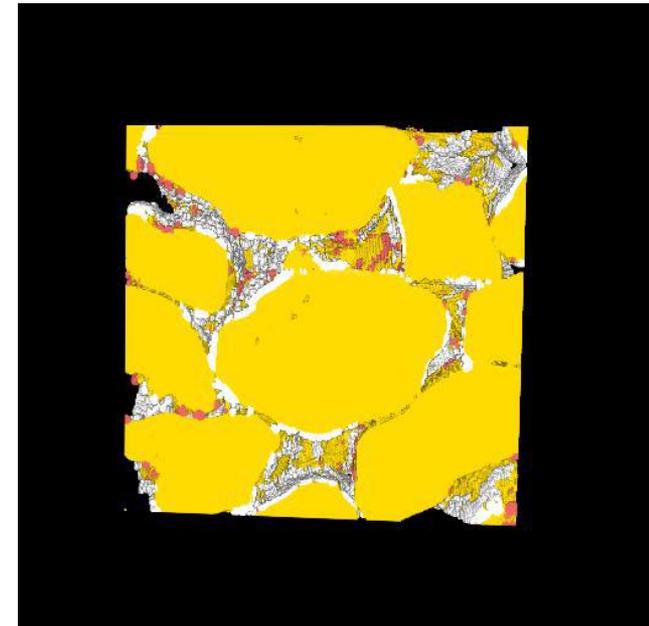
2D

3D

Calcite « active »

Calcite « passive »

Gradient



Résistance mécanique  
(Cohésion)

Calcul de gradient en  
niveau de gris  
(Matlab)



# Conclusions et perspectives

Des outils d'imagerie par tomographie RX et d'analyse numérique appliqués avec succès au matériau bio-calcifié

Des propriétés microstructurales et physiques comparables avec celles issues d'essais à l'échelle décimétrique

Une méthodologie qui peut être appliquée:

- sur des matériaux biocalcifiés avec des conditions d'injection proches de la réalité,
- dans des cas de dégradation accélérée (chimie, mécanique, ...).

