



# Quand les bactéries redéfinissent la géotechnique...

Benoît Courcelles, Professeur  
Fatima Zahra Haouzi, Étudiante au doctorat



POLYTECHNIQUE  
MONTRÉAL

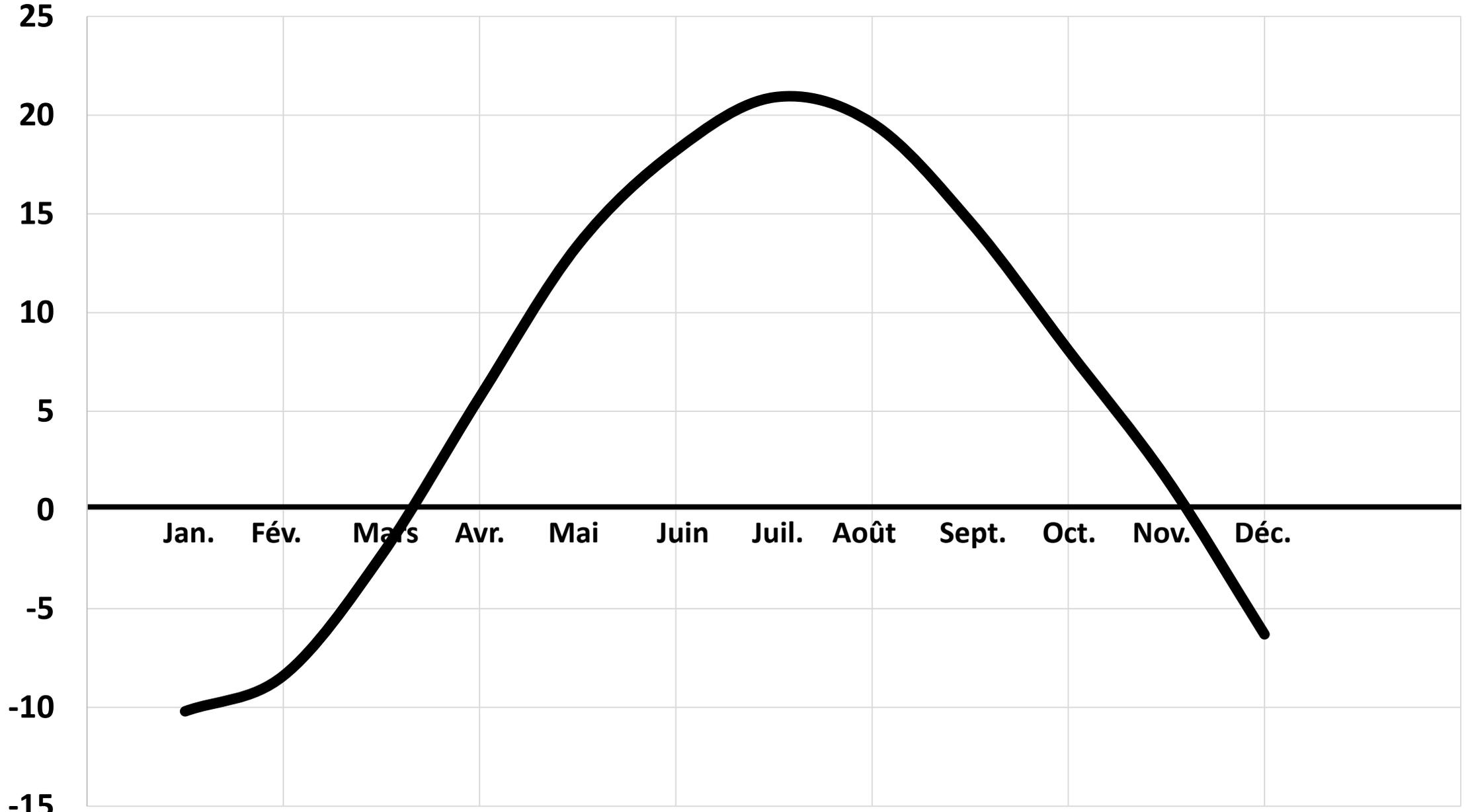
LE GÉNIE  
EN PREMIÈRE CLASSE



**Le patrimoine urbain :  
un enjeu de gestion  
durable des actifs**



°C



**Température moyenne à Montréal**



**Stromatolites, Shark Bay, Australie**  
<http://yroeperry.com/the-colonies>

# Ordre du jour

1. Biocalcification
2. Applications potentielles
3. Problématiques routières
4. Traitement des routes
5. Biocalcification et érosion interne

# Mise en contexte

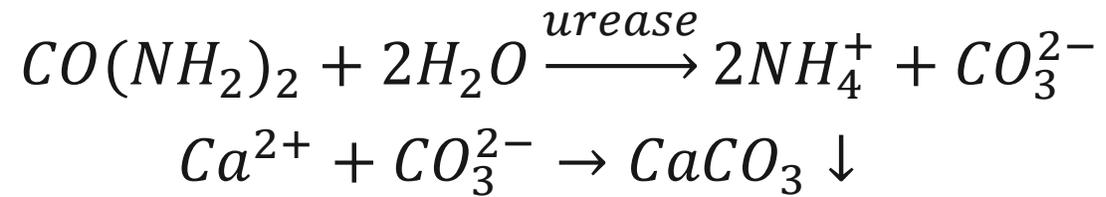


Dans la nature, **les roches sédimentaires** sont **consolidées naturellement** par un processus de **diagenèse**.

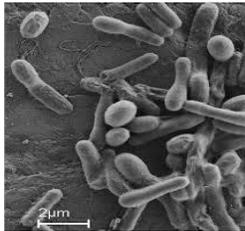
# Mise en contexte

- Émergence de la *biocalcification* au début **des années 2000**;
- Technique basée sur **le contrôle de l'activité bactérienne**;
- **Travaux de recherche pluridisciplinaires: microbiologie, géochimie et géotechnique**;
- **Objectif: Développer une technologie** de traitement de sol basée sur les processus de **consolidation naturelle**, qui soit **effective dans un temps raisonnable et respectueuse pour l'environnement**.

# Principe de base

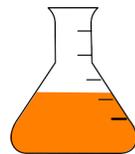


Micro-organismes  
*S. Pasteurii*



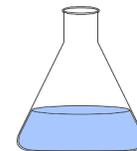
+

Nutriments + urée



+

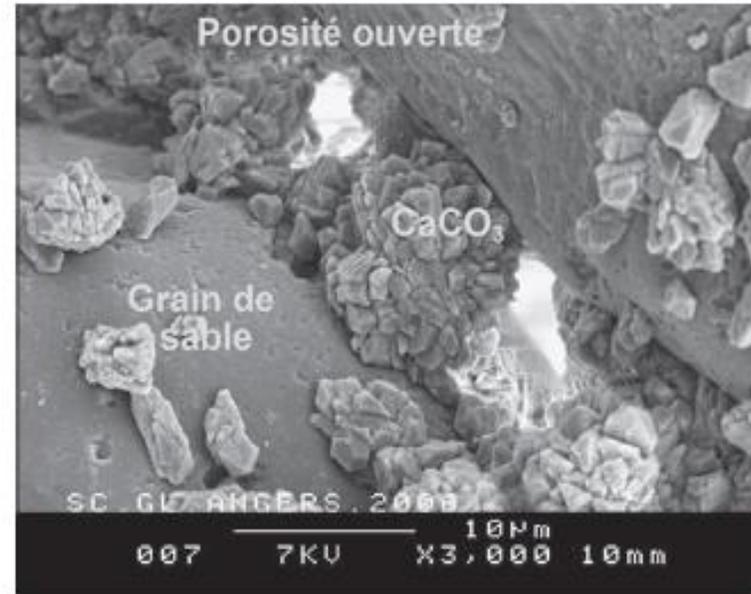
Ions de  $\text{Ca}^{2+}$



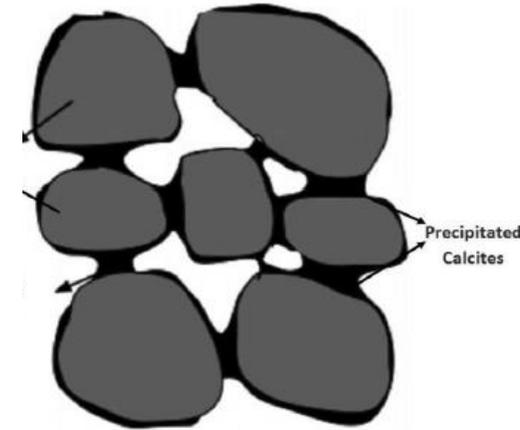
=

$\text{CaCO}_3 \downarrow$

# Principe de base

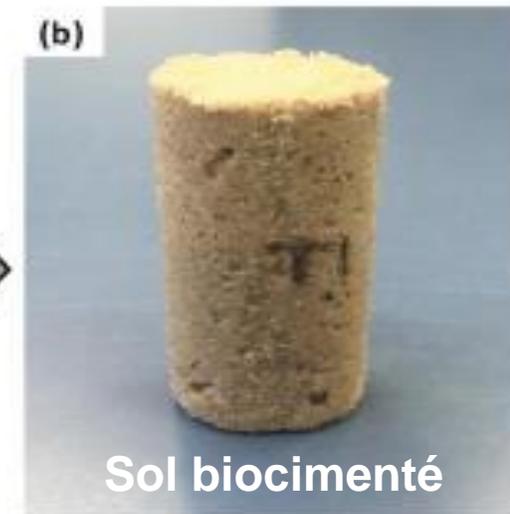
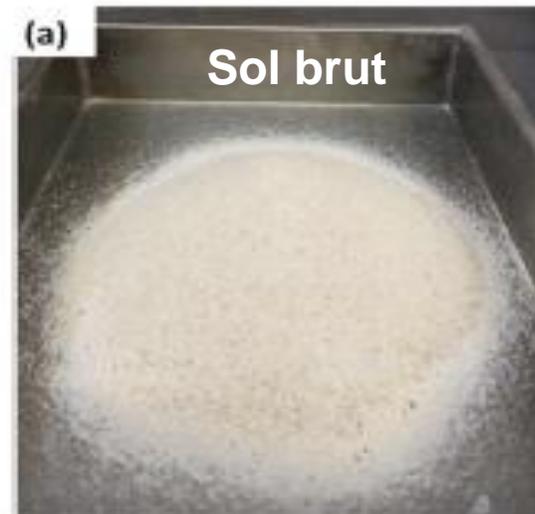


Source: Esnault-Filet et al. (2016)



Source: Cheng et al. (2013)

Les cristaux de calcite créent des ponts liant les particules de sable entre elles.



Source: Mujah et al. (2017)

# Facteurs d'influence

## □ Facteurs géotechniques

- **Granulométrie;**
- **Eau interstitielle:** pH, types et concentration d'ions et présence de carbone organique dissous;
- **Saturation du sol :** meilleurs résultats à de faibles saturations.

## □ Facteurs biologiques

- **pH** du fluide injecté;
- **Température;**
- **Nombre de bactéries** présentes et injectées;
- **Activité métabolique** des cellules;
- **Volume total des nutriments** biodisponibles.

# Modes d'injection

## Sols saturés

- Injection continue
- Injection discontinue

## Sols non saturés

- Injection par percolation de surface
- Pré-malaxage sol/solution bactérienne



Restauration d'un mur de soutènement en utilisant des puits d'injection horizontaux, projet Biocalcis®

# Avantages et limites

- ❑ Avantages
  - ❑ Coûts vs bénéfices (non toxique)
  - ❑ Durabilité (matériaux naturels)
  - ❑ Traitement de larges volumes
  - ❑ Amélioration des propriétés géotechniques
- ❑ Limites
  - ❑ Coproduits: ions ammonium
  - ❑ Non-compatibilité avec sols argileux



# Ordre du jour

1. Biocalcification
2. Applications potentielles
3. Problématiques routières
4. Traitement des routes
5. Biocalcification et érosion interne

# Application potentielles

- Prévention de la **liquéfaction**
- **Amélioration de la résistance au cisaillement**
- Contrôle de **l'érosion interne** ou de contact
- Contrôle des poussières



Source: Dejong et al.(2013)  
Esnault-Filet et al. (2016)

# Essais à différentes échelles

1 m<sup>3</sup>



Van Paassen (2009)

100 m<sup>3</sup>



Van Paassen (2009)

1 000 m<sup>3</sup>



Soletanche-Bachy – Biocalcis®

# Application potentielles

- Sécurisation des digues et barrages
- Stabilisation des pentes
- Renforcement de voiries



# Ordre du jour

1. Biocalcification
2. Applications potentielles
3. Problématiques routières
4. Traitement des routes
5. Biocalcification et érosion interne

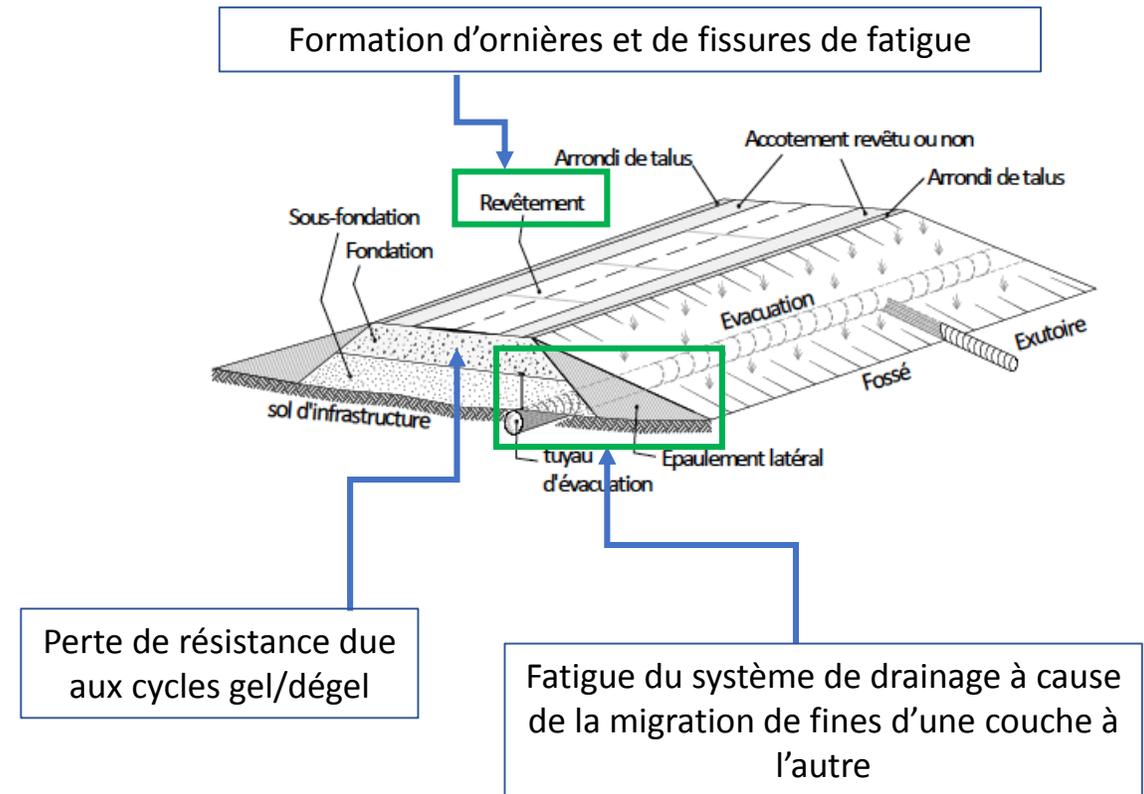
# Les routes du Québec

- Routes provinciales
  - Autoroutes
  - Routes nationales
  - Routes régionales
- Routes locales
- Routes d'accès aux ressources (forestières/minières) et aux localités isolées



# Problématique

- Résistance au gel/dégel
- Érosion interne dans les fondations
- Indice de portance

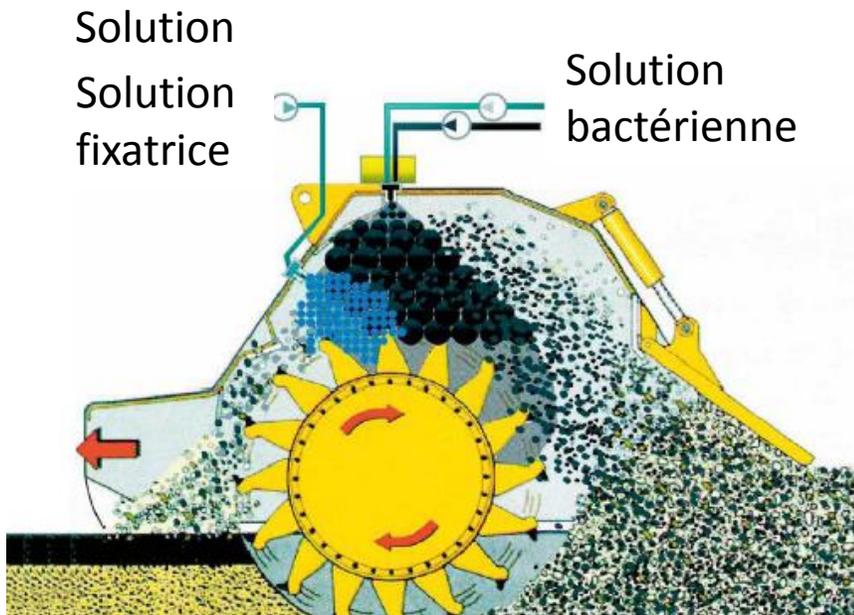


# Ordre du jour

1. Biocalcification
2. Applications potentielles
3. Problématiques routières
4. Traitement des routes
5. Biocalcification et érosion interne

# Traitement des routes

- Par prémalaxage sol/bactéries



Pulvérisation de  
solution  
calcifiante



Mise à niveau/  
compactage



Couche de  
roulement



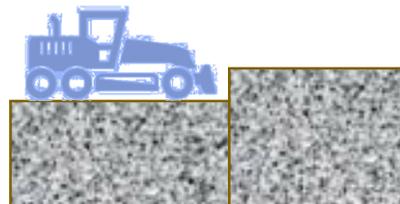
# Traitement des routes

- Par pulvérisation des différentes solutions

Pulvérisation de solutions



Mise à niveau/  
compactage



Couche de roulement



# Ordre du jour

1. Biocalcification
2. Applications potentielles
3. Problématiques routières
4. Traitement des routes
5. Biocalcification et érosion interne

# Érosion interne

- **Granulométrie** des matériaux de fondations et sous-fondations routières dans **les normes MTQ très étendue** et **susceptibles à l'érosion interne** (Lafleur et Savard, 2004);
- **Endommagement progressif** de la chaussée suite à **une submersion prolongée** par l'eau (Chapuis et al., 1991);
- **Vulnérabilité** des infrastructures routières de **l'Est du Québec** à la submersion et l'érosion : **19% des segments de routes sont vulnérables aux aléas côtiers** (Bernatchez et al. 2008)



Route 299, Gaspésie, Québec, 13 Décembre 2013

# Méthodologie

## Préparation du sol

- Fuseau granulométrique MG112

## Bio-traitement

- Percolation de surface
- Variation des concentrations de solution de cimentation et de la saturation initiale des échantillons

## Saturation

- Application d'une succion et circulation d'eau désaérée selon la norme D2434 ASTM (2006)

## Essai d'érosion

- Essai de perméabilité à charge constante montée par paliers



# Quelques résultats

☐ Texture du sol

☐ Masse lessivée à l'extérieur de l'échantillon



Sol non traité

Sol traité



Sol non traité

Sol traité

# Quelques résultats

Échantillon	Saturation Sr	Gradient critique $i_{cr}$	Masse lessivée $M_p$ (g/m <sup>2</sup> )	CaCO <sub>3</sub> (%)
Non-traité	-	0.7	22 330	-
3014	30%	5	2 838	4.7%
6014	60%	8	1 151	8.2%
8014	80%	10	618	9.0%

Échantillon 6075



# Quelques résultats

- ❑ **Technique prometteuse** quant à la réhabilitation d'infrastructures civiles :
  - Facile à mettre en place,
  - Respectueuse de l'environnement.
  
- ❑ **Travaux en cours ou à venir**
  - **Modéliser numériquement la précipitation** de calcite dans un milieu poreux non saturé,
  - Développer des **modèles numériques d'érosion** de sols biocalcifiés,
  - Élaborer des **lois de comportement** applicables aux sols biocalcifiés,
  - Réaliser des **essais d'érosion** routière à plus **grande échelle**.

*Fonds de recherche  
Nature et  
technologies*

Québec 



# Remerciements





# Références

- Bernatchez, P., Fraser, C., Friesinger, S., Jolivet, Y., Dugas, S., Drejza, S. et Morissette, A., 2008. Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Consortium OURANOS et au FACC, 256 pages.
- Chapuis, R. P. (1992). similarity of internal stability-criteria for granular soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(4), 711-713.
- Cheng, L., & Cord-Ruwisch, R. (2012). In situ soil cementation with ureolytic bacteria by surface percolation. *Ecological Engineering*, 42 64-72.
- Dejong, J. T., Soga, K., Kavazanjian, E., Burns, S., Van Paassen, L. A., Al Qabany, A., . . . Weaver, T. (2013). Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges. *Geotechnique*, 63(4), 287-301.
- Esnault-Filet, A., Gutjahr, I., Mosser, J. F., Sapin, L., & Ibrahim, K. (2016). A novel grouting process for the reinforcement of low permeability soils with the use of biocimentation by biocalcis. Communication présentée à 19th Southeast Asian geotechnical Conference & 2nd AGSSEA Conference, Kuala Lumpur.
- Filet, A. E., Gadret, J.-P., Loygue, M., & Borel, S. (2012). Biocalcis and its applications for the consolidation of sands. Communication présentée à Geotechnical Special Publication, New Orleans, LA, United states (p. 1767-1780). doi: 10.1061/9780784412350.0152
- Lafleur, J., & Savard, Y. (2004). Internal Stability of Road Agregates Submitted to Water Flow. Communication présentée à 57th canadian geotechnical conference, Quebec.
- Mujah, D., Shahin, M. A., & Cheng, L. (2016). State-of-the-art review of bio-cementation by microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization. *Geomicrobiology Journal* - 14.
- Van Paassen, L. A., Ghose, R., van der Linden, T. J. M., van der Star, W. R. L., & van Loosdrecht, M. C. M. (2010). Quantifying Biomediated Ground Improvement by Ureolysis: Large-Scale Biogrout Experiment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(12), 1721-1728.
- Van Paassen, L. A., Harkes, M. P., Van Zwieten, G. A., Van Der Zon, W. H., Van Der Star, W. R. L., & Van Loosdrecht, M. C. M. (2009). Scale up of BioGrout: A biological ground reinforcement method. Paper presented at the Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt.