



Modélisation physique en géotechnique

Modélisation physique de l'initiation et la progression de l'érosion de contact au sein des digues de canaux typiques des aménagements du Rhin et du Rhône

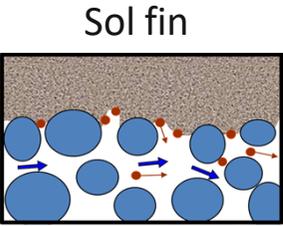
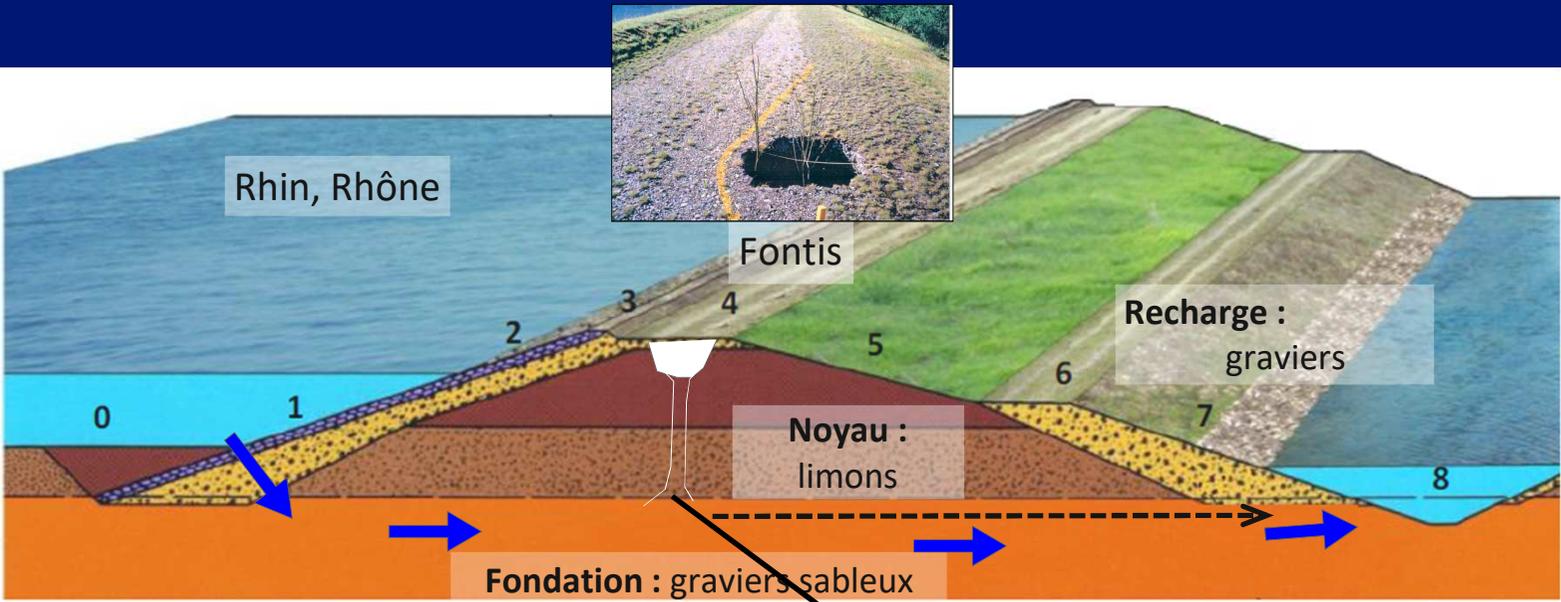
¹ 

³  ² 

⁴ 

RÉMI BEGUIN¹, L. DUCHESNE², C. PICAULT², J.-J. FRY³, J.-R. COURIVAUD³,
P. PHILIPPE⁴, LE 06/10/2022

Problématique : l'érosion de contact au sein des digues fluviales



Contexte du projet : érosion de contact au sein des digues fluviales

Les digues concernées :

- 400 km de digues latérales concernées le long du Rhône et >150km de digues le long du Rhin
- Ouvrages classés « barrages » faisant l'objet d'Études De Dangers devant justifier du risque de rupture par érosion interne
- Des incidents liés à l'érosion de contact identifiés, actifs parfois depuis plusieurs dizaines d'année, **mais pas de rupture à ce jour**

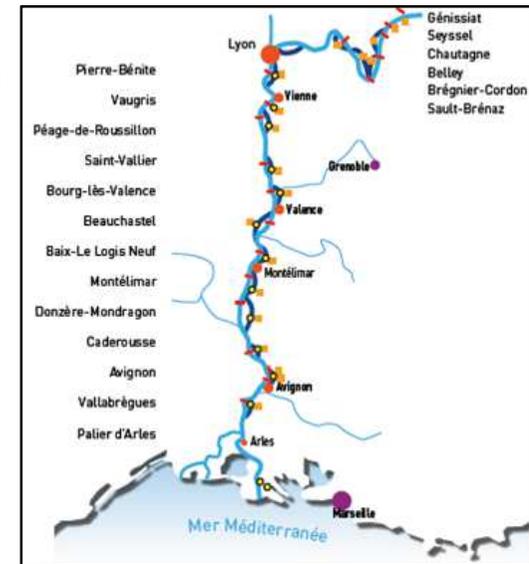
Les questions posées :

- Quelles sont les conditions favorables à l'initiation et la progression de l'érosion de contact ?
- **Peut-elle mener à une rupture brutale de l'ouvrage ?**
- Faut-il systématiquement conforter ?

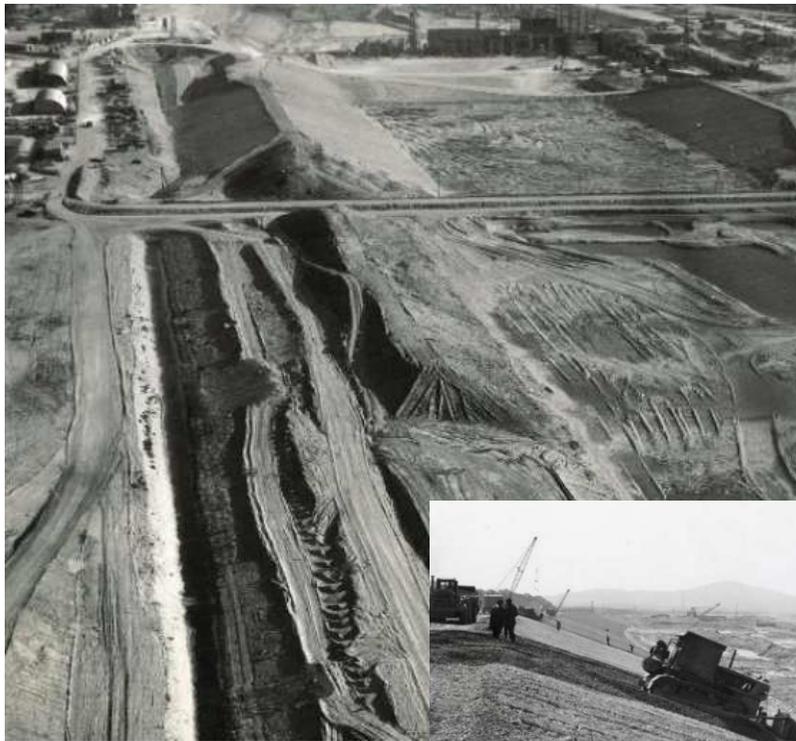
Le cadre :

- Recherche initiée dans le Projet National
- Financée conjointement par EDF et CNR

ERINOH



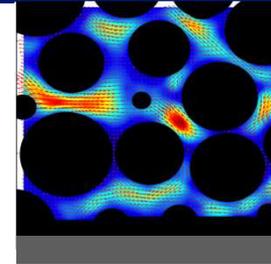
Illustrations



Une étude multi-échelle

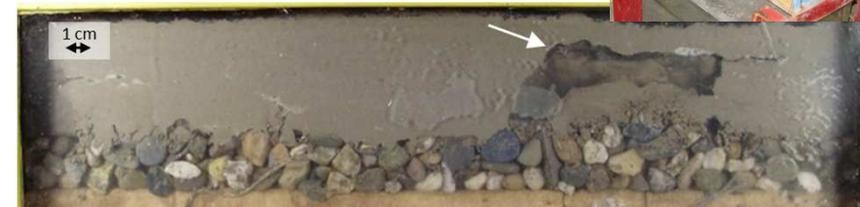
Échelle du grain :

- Mesures PIV des champs des vitesses d'écoulement interstitiel à l'interface



Échelle de l'échantillon :

- Identification des processus
- Confirmation des conditions géométriques permettant l'érosion (critères de filtre)
- Identification des conditions hydrauliques initiant l'érosion



Modèle physique à échelle 1 :

- Influence de l'échelle spatiale sur les conditions d'initiation
- Progression du mécanisme dans l'ouvrage

➤ Une brèche est-elle possible ?



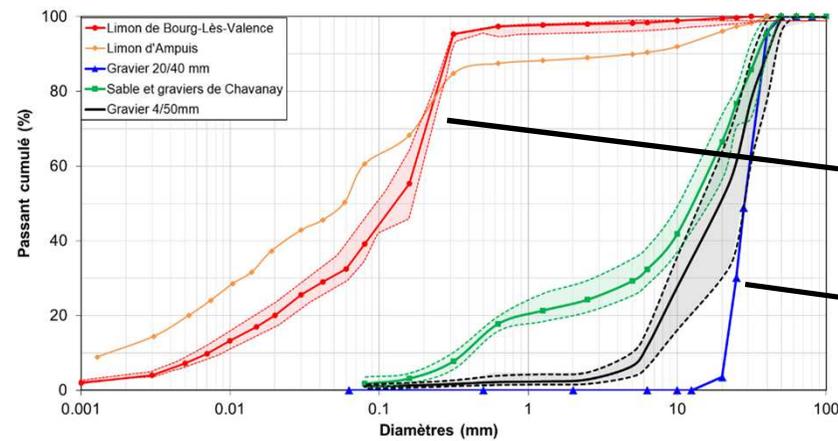
Le dispositif expérimental

Modèle physique :

- Structure de 8x4x2,2 m en BA, où est construite la digue expérimentale
 - Fondation : 20cm de graviers propres
 - Noyau : limon sableux compacté par couche
- ➔ **Conditions propices à l'initiation**

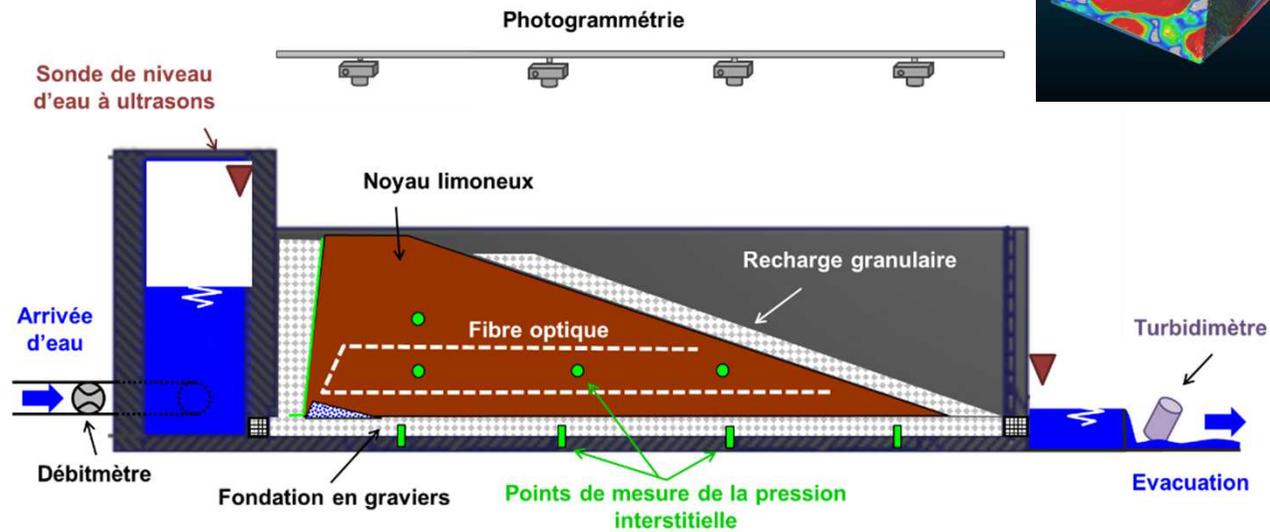
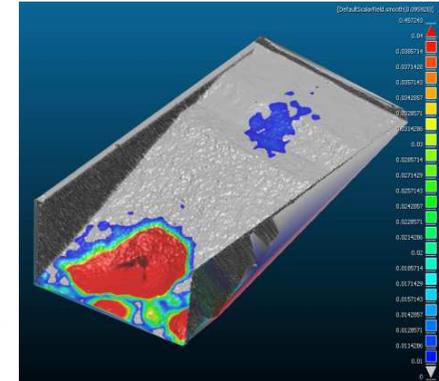
Protocole d'essai :

- Augmentation de la charge amont par paliers de 24h, jusqu'à la rupture
- Démontage



Instrumentation

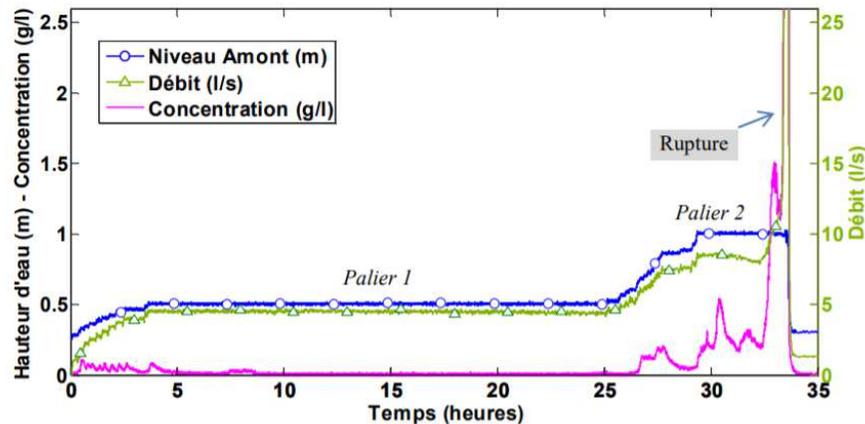
- Niveaux et débit d'entrée/sortie, pressions interstitielles
- Turbidité de l'effluent et sol sédimenté
- Topographie
- Fibre optique pour la mesure de température et déformation
- Tomographie électrique
- Démontage : pénétromètre, granulométries, densités...



Observations et résultats

Observations :

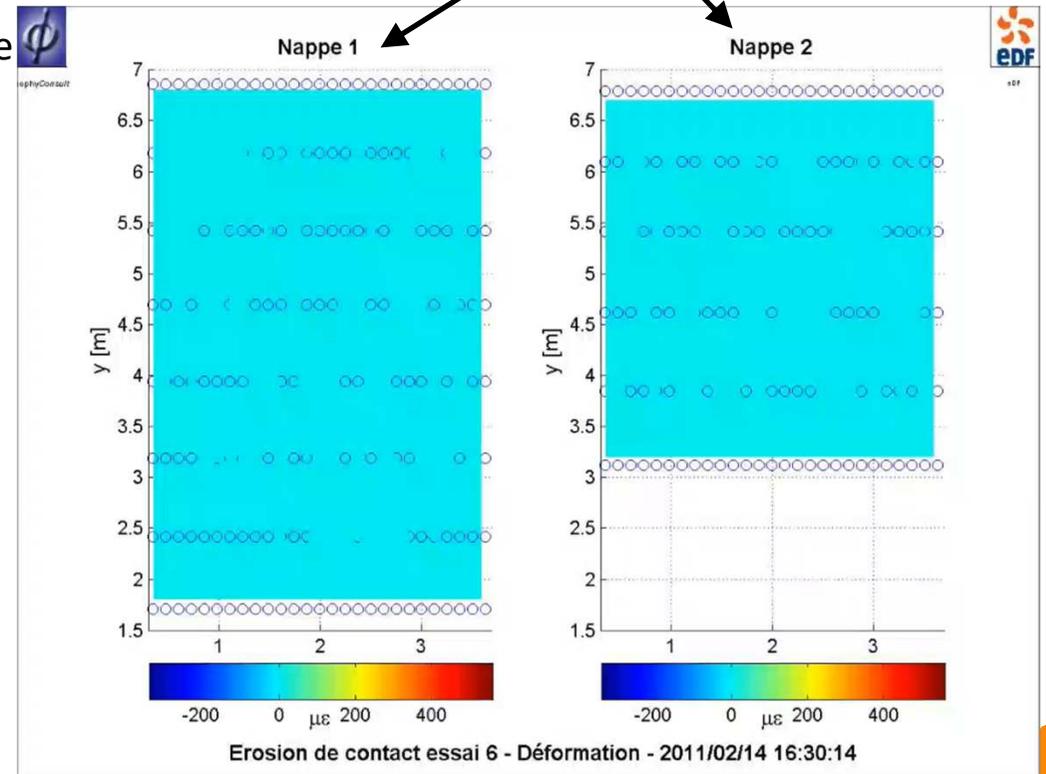
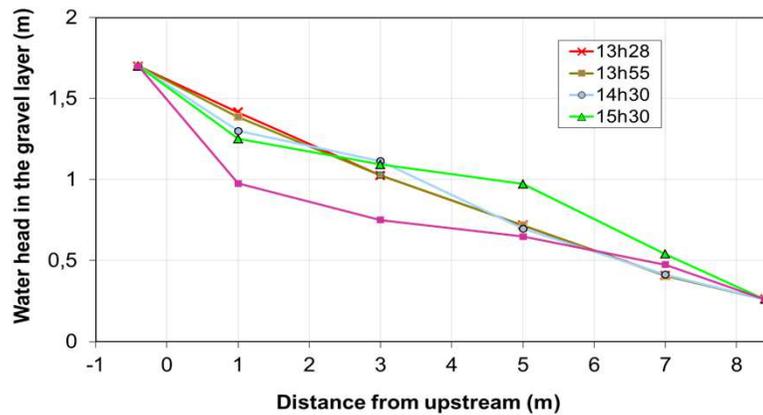
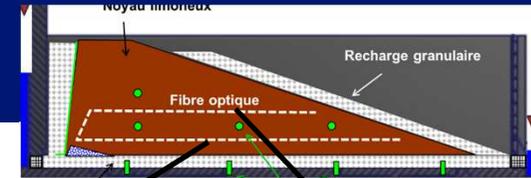
- Faible érosion (~lessivage) aux premiers paliers
- Formation d'un conduit après dépassement du seuil
 - ➡ **Seuil cohérent avec l'échelle de l'échantillon (~2 à 5 cm/s)**
- Tassements, fontis, zones décomprimées
 - ➡ **Cohérents avec le site... mais aussi des conduits !**



Suivi du développement du conduit

Suivi de la progression de l'érosion :

- Turbidité de l'effluent
- Évolution des pressions interstitielles dans la zone de conduit
- Suivi des déformations par fibre optique



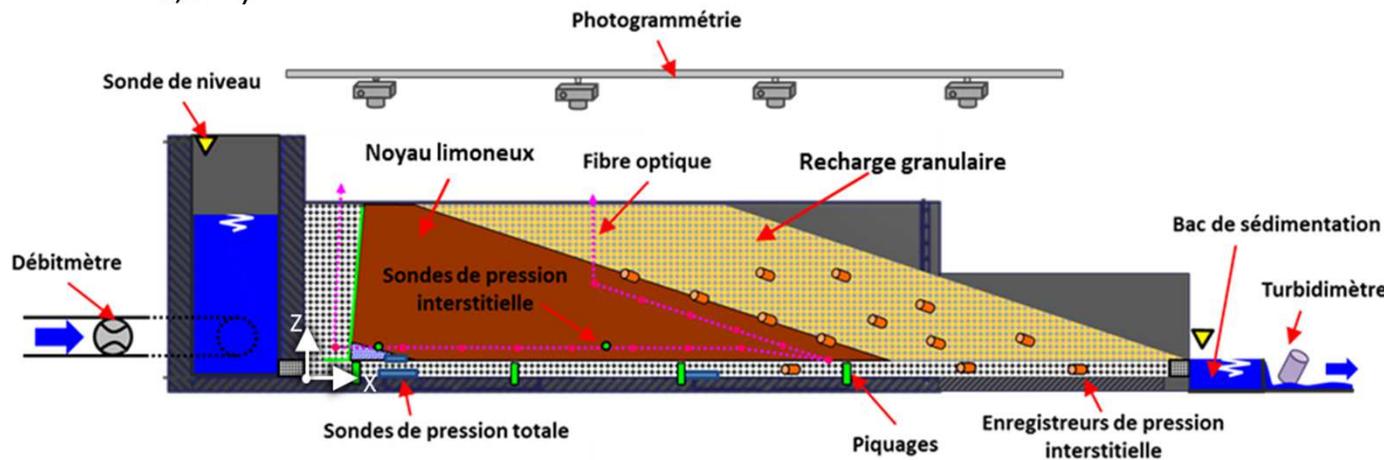
Deuxième phase des essais : rôle de la recharge granulaire

Question posée :

➡ Est-ce que la recharge granulaire peut stopper le processus ? peut-elle expliquer que in-situ on a pas constaté de rupture même si des initiations sont avérées ?

Modification du dispositif

➡ Ajout d'une recharge en sols graveleux de 1,5 m d'épaisseur (au lieu de 0,2 à 0,5m)

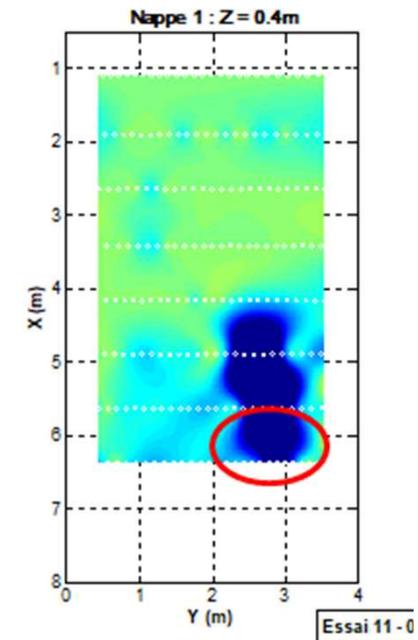
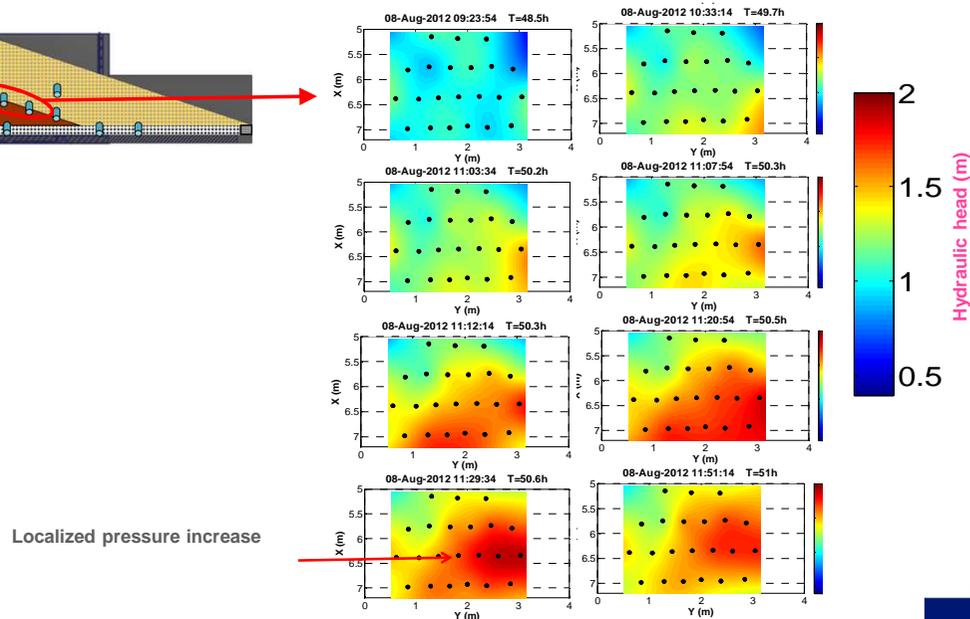
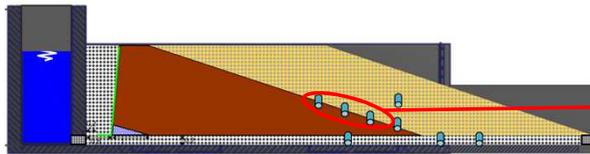


➡ Des dégradations, mais pas de rupture !

Deuxième phase des essais : rôle de la recharge granulaire

Des mesures attestant la formation d'un conduit

- Déformations localisées mesurées par fibre optique
- Augmentation localisée de pression sous la recharge



➔ La recharge peut stopper le processus

Troisième phase des essais : conditions de stabilité de la recharge granulaire

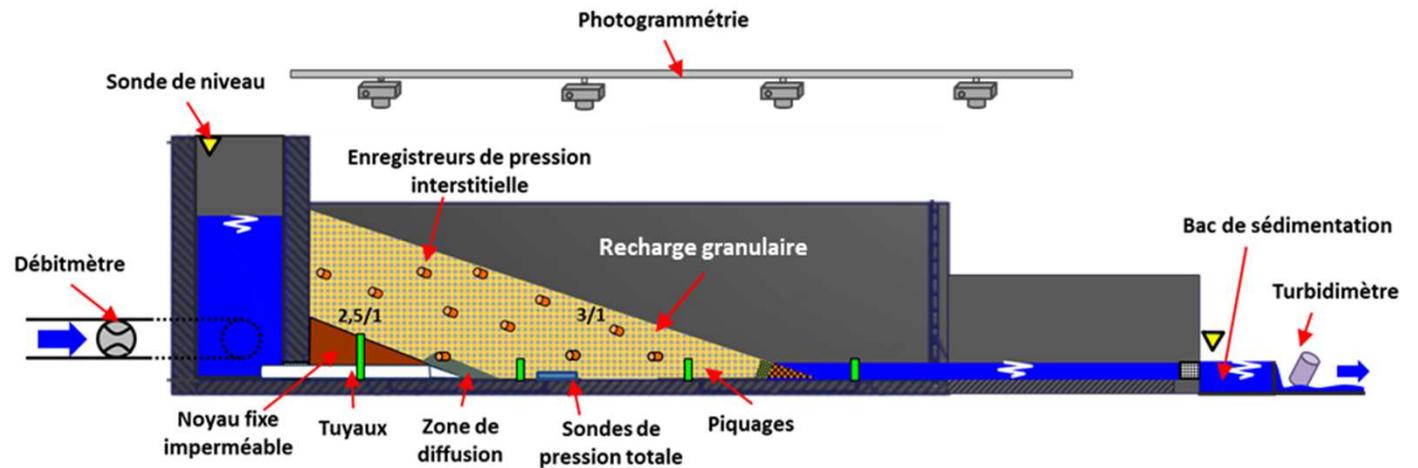
Question posée :

➤ Quelles sont les conditions de stabilité de la recharge en cas de développement d'un conduit dans le noyau ?

Modification du dispositif

➤ Noyau en limon remplacé par un noyau non érodable traversé par des tuyaux

➤ Mise en pression par les 5 tuyaux (écoulement pseudo « 2D ») ou seulement par le tuyau central (écoulement « 3D »)



Troisième phase des essais : conditions de stabilité de la recharge granulaire

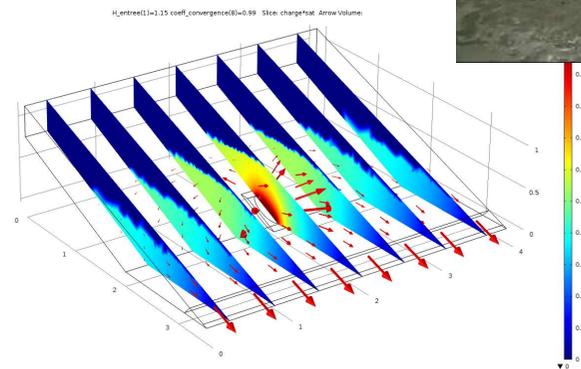
Paramètres testés :

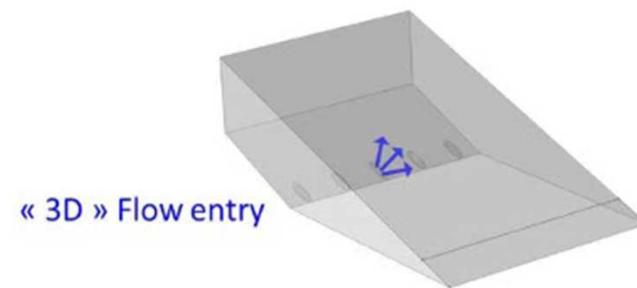
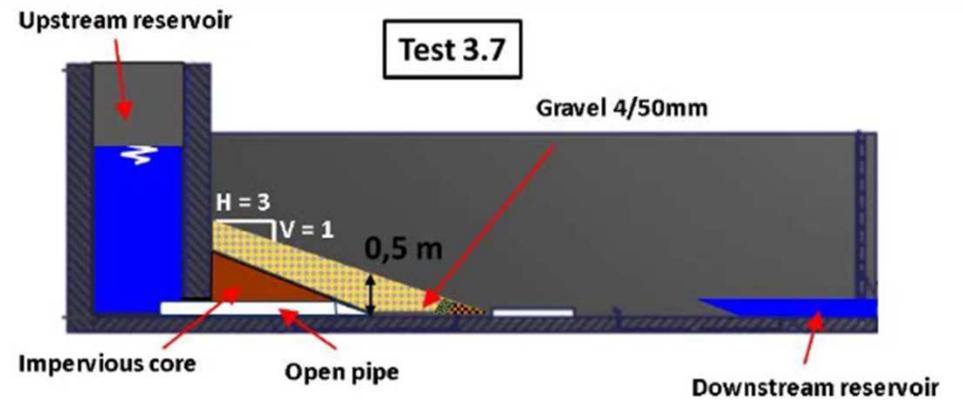
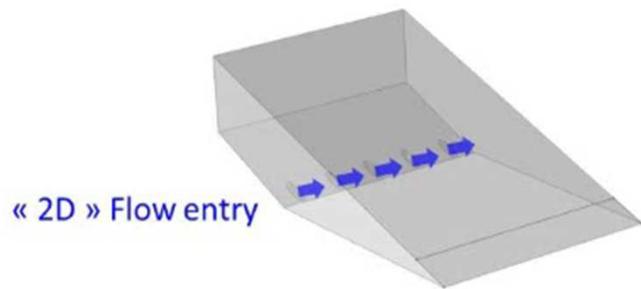
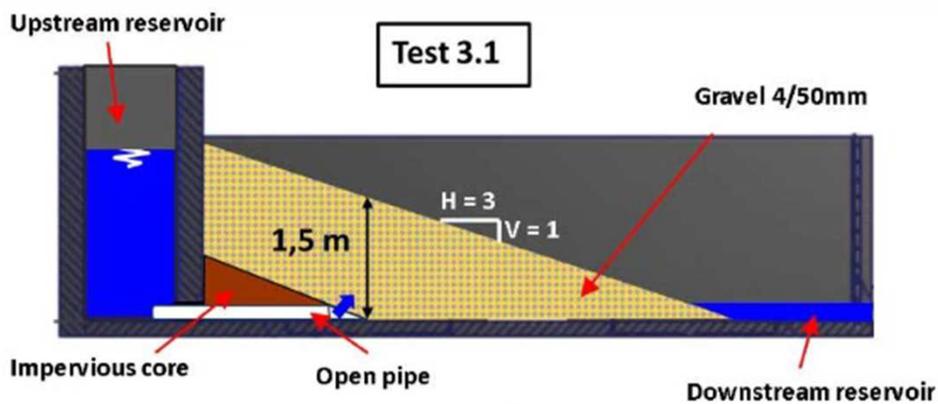
- Epaisseur, pente du talus
- Sol : gravier propre ou sableux
- Écoulement 2D ou 3D

Observation de ruptures par :

- Glissement global circulaire
- Suffusion
- Débourrage localisé
- Ravinement
- Glissements de pied successifs

Modélisations numériques pour aider à l'analyse :





Analyse des résultats

➤ Synthèse des phénomènes observés :

	Gravier 4/50 mm $k \sim 10^{-1}$ m/s	Sable et graviers de Chavanay $k \sim 10^{-3}$ à 10^{-2} m/s
Mise en charge linéaire, écoulement 2D	Pente faible (fruit $\geq 3H/1V$) : ravinement Pente forte (fruit $\leq 2H/1V$) : glissements de pieds successifs	Suffusion, claquage, glissement, fissuration, résurgence et ravinement
Mise en charge ponctuelle, écoulement 3D	Ep.* <45 cm : débouillage avec fluidisation Ep.* >45 cm : pas de rupture à la charge max. du dispositif	Suffusion, et à la fin débouillage avec fluidisation précédé parfois par un glissement localisé

➔ **Le mécanisme de rupture dimensionnant dépend des conditions**

Critère de stabilité en cas de mise en charge ponctuelle (écoulement « 3D »)

Etude analytique :

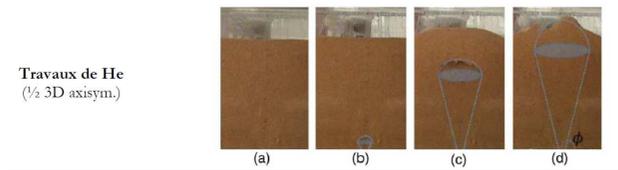
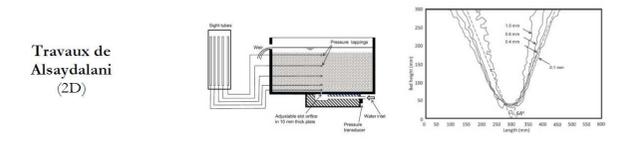
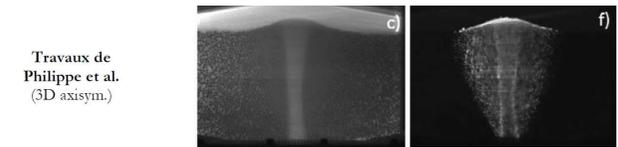
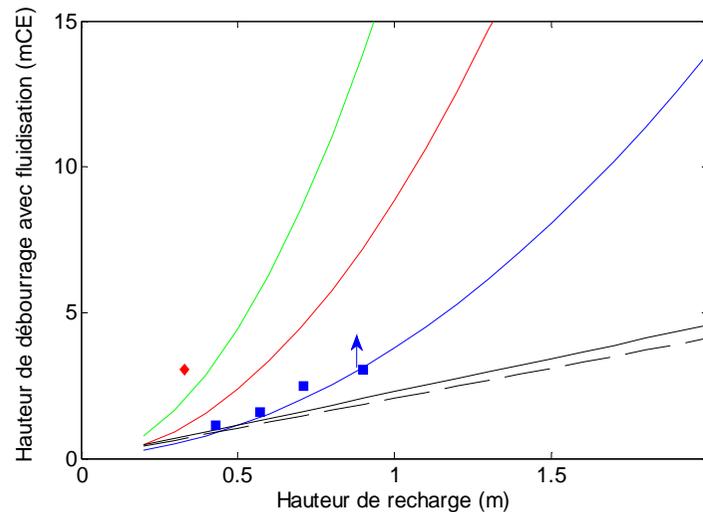
- Conditions de stabilité d'un massif granulaire soumis à une mise en charge hydraulique ponctuelle à sa base
- Collecte des données similaires de la littérature
- Établissement d'un critère simplifié utilisable en ingénierie

Débit critique
(m³/s)

$$Q_c = \frac{2}{3} \pi H^2 k i_c$$

Perte de charge critique
(mCE)

$$\Delta H_c = \frac{1}{3} H^2 i_c \left(\frac{1}{0,26 d_{in}} - \frac{1}{H + 0,26 d_{in}} \right)$$



Conclusions

Apports de la modélisation physique

- Étude des effets **d'échelle spatiale**
- **Découverte** des enchainements de mécanismes à l'échelle de l'ouvrage
- Instrumentation exhaustive, avec capteurs centimétriques, **reproductibles in-situ** : pénétromètres, fibre optique, pressions interstitielles
- Appropriation, **diffusion** et vulgarisation des résultats : nombreuses visites, aide à démontrer une possibilité qui va à l'encontre des habitudes de la profession (conduit)

Applications pratiques

- Confirmation des **seuils d'initiation** à l'échelle de l'ouvrage, utilisés actuellement en ingénierie (CIGB, 2016)
- Démonstration de la possibilité d'une **rupture rapide**, dans les conditions très favorables à l'érosion testées
- **Rôle de la recharge** et conditions permettant sa stabilité : critères utilisés dans les EDD

Perspectives

- Réutilisation du dispositif : biocalcification, surverse...



Remerciements



Laboratoire d'essais d'érosion de geophyConsult



Installation de système de surveillance par fibre optique dans des ouvrages hydrauliques

Merci pour votre attention !

remi.beguin@geophyconsult.com