

Les parois étanches dans les barrages: Aperçu et développements

Gustavo PEREIRA, Soletanche Bachy

Symposium 2025

30 janvier 2025 – Aix les Bains

Rapport sur l'état de l'art des coupures étanches (article original présenté lors du XVIII ECSMGE2024) :

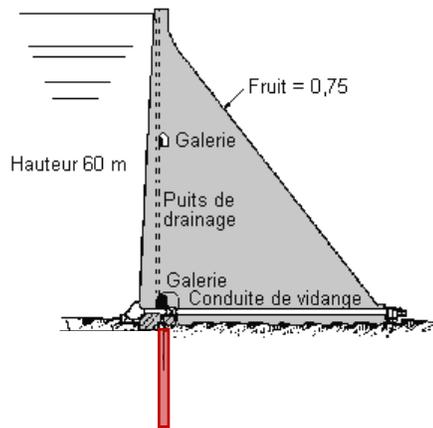
- Sujet d'actualité, avec les enjeux mondiaux associés à la construction et réparation de barrages
- Des développements et des Rex intéressants qui sont postérieurs aux bulletins CIGB sur le sujet (e.g. #150 Murs Parafouilles)

Chapitres :

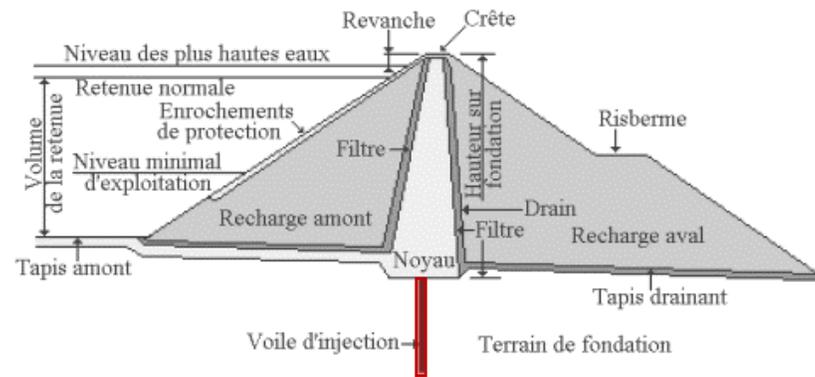
1. Introduction
2. Méthodes constructives
3. Matériaux
4. Suivi et contrôle
5. Ouvrages neufs vs réparations
6. Développements futurs
7. Conclusions

Coupures étanches et rideaux d'injections :

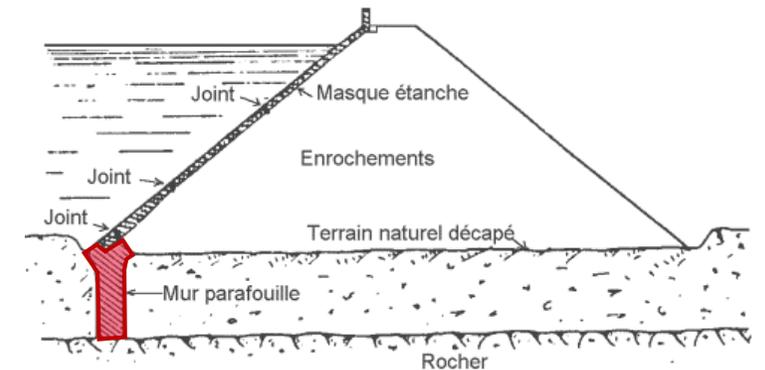
- Minimiser les infiltrations par les fondations du barrage (le barrage devant être aussi étanche que possible)
- Limiter les pressions de soulèvement en aval



Poids



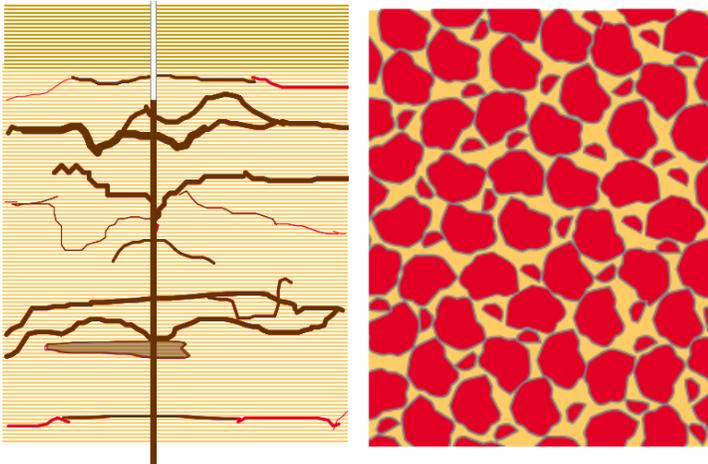
Remblai zoné



A masque

(adapté de CFBR, 2024)

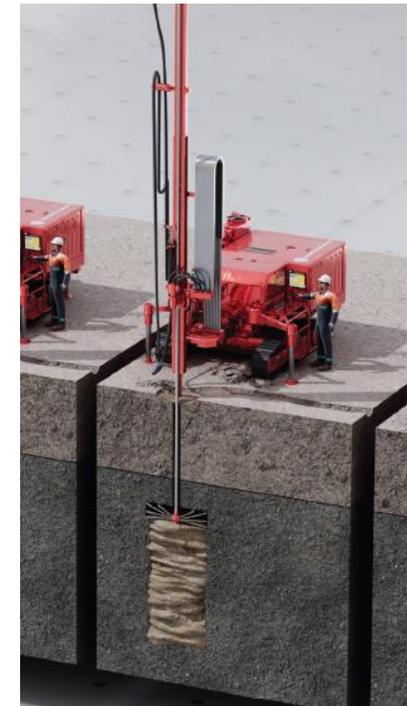
Coupures étanches :



(Rideaux d'injections)



Coupures étanches positives



Coupures étanches semi-positives

2. Méthodes constructives : - parois

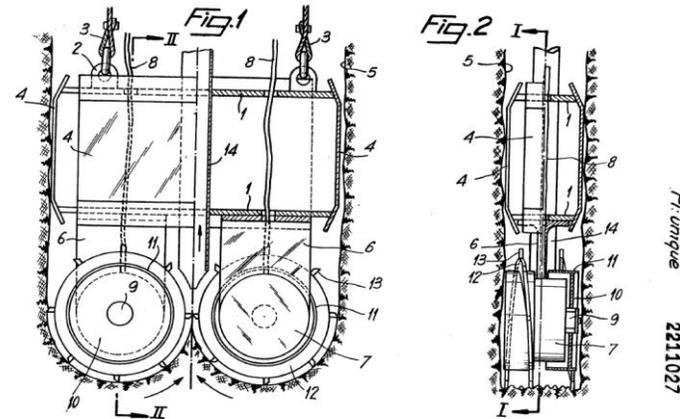
Diaphragmes :

- Parois sol-bentonite
- Parois en ciment-bentonite ; parois moulées

Progrès en parois moulées :

- Hydrofraise (dans les années 1970) permettant l'excavation de roches de résistance modérée
- Têtes de forage à molettes pour roche dure (UCS > 100MPa)

Brevet Hydrofraise, 1972



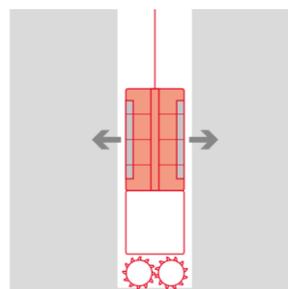
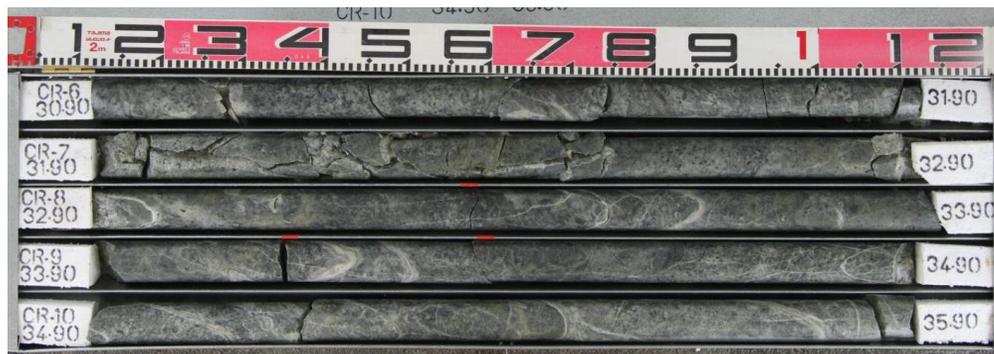
Gare de Lyon, 1974

2. Méthodes constructives : - parois

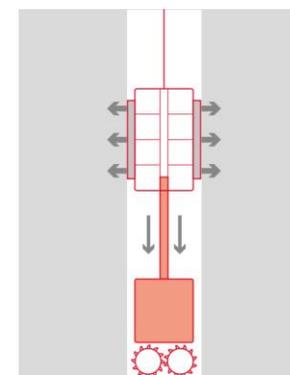
Progrès en parois moulées :

- Hydrofraise à Grippers (brevetée par Soletanche Bachy), mobilisant jusqu'à 2000 kN de réaction verticale

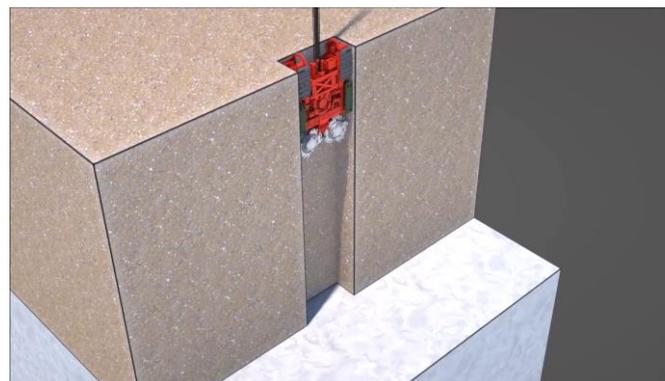
Exemple : NSC105 de Singapour, avec production en parois moulées dans UCS jusqu'à 300 MPa (projet en cours)



The anchor module equipped with Grippers generates thrust from the sidewalls of the panel



The drilling module slides relative to the anchor module

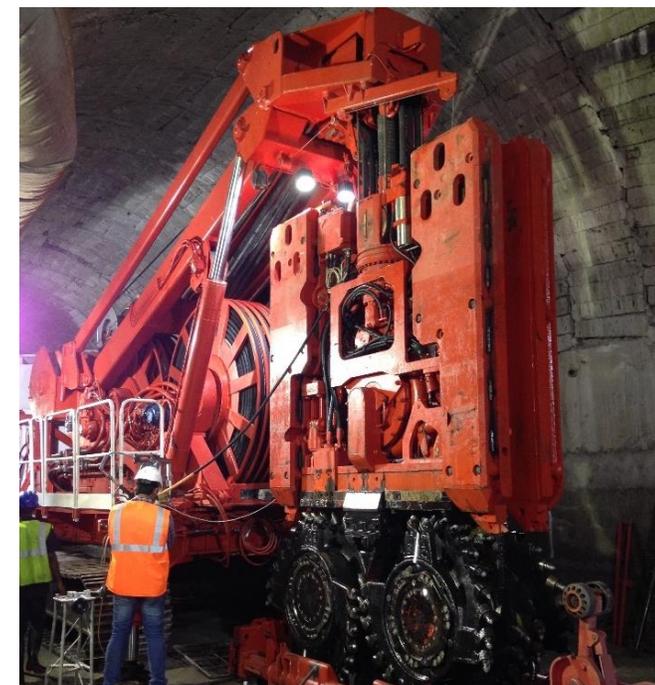
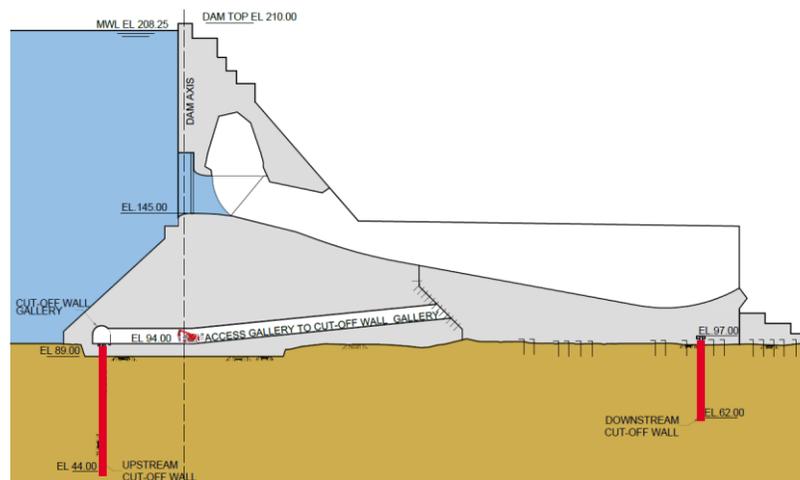


Progrès en parois moulées :

- Hydrofraises compactes pour une utilisation dans des espaces confinés

Exemple : Coupure du barrage de Subansiri, excavée à partir de galeries avec HF compacte (*Mallet et al., 2019 ; Mallet et al. 2024*)

- Powerpacks électriques pour réduire le bruit et éviter les émissions de gaz d'échappement
- Powerpacks amovibles pour un encombrement encore réduit et une flexibilité accrue



Pieux :

- Intrinsèquement, plus grand nombre de joints (par rapport aux diaphragmes)
- Large gamme d'outils pour des applications spéciale

Exemple : Barrage de Boone, coupure de remédiation dans un sol karstique (*Barredo et al., 2021*)

Forage pilote avec perforation dirigée, pieu RCD (HMH Wirth 818) équipé d'un guide « stinger » (<0.25% de déviation à 55m de profondeur dans le calcaire karstique avec « pinnacles »)



Les parois étanches dans les barrages:
Aperçu et développements



Symposium 2025, Aix-les-Bains - 30 janvier 2025



2. Méthodes constructives : - pieux

Pieux :

- Large gamme d'outils pour des applications spéciales

Exemple : Barrage d'Arapuni, coupure de réhabilitation à travers le béton et le rocher (*Wharmby et al., 2007*).

Système sur mesure de Trevi, tricône RCD guidé par le forage adjacent. Pieux de 400 mm à 350 mm d'entraxe jusqu'à 90 m de profondeur



2. Méthodes constructives : - Soil mixing

Soil mixing :

- Cutter Soil Mixing : dérivé de la technologie Hydrofraise
- Trenchmix : Coupure continue, très efficace dans les projets linéaires peu profonds (par exemple, digues et digues)



CSM (ici système Bauer)

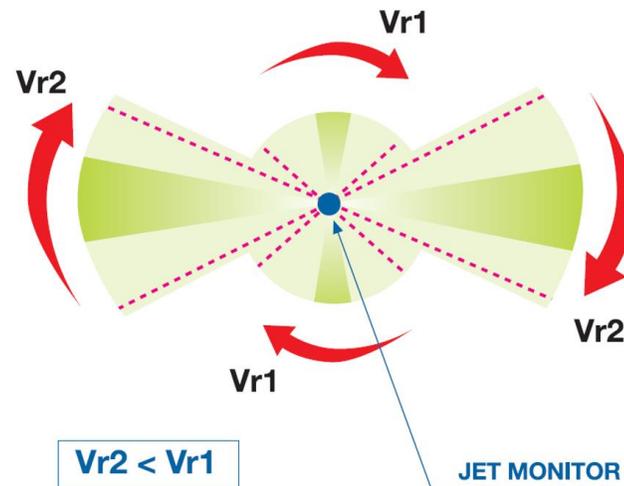


Trenchmix

2. Méthodes constructives : - Jet grouting

Progrès en Jet grouting :

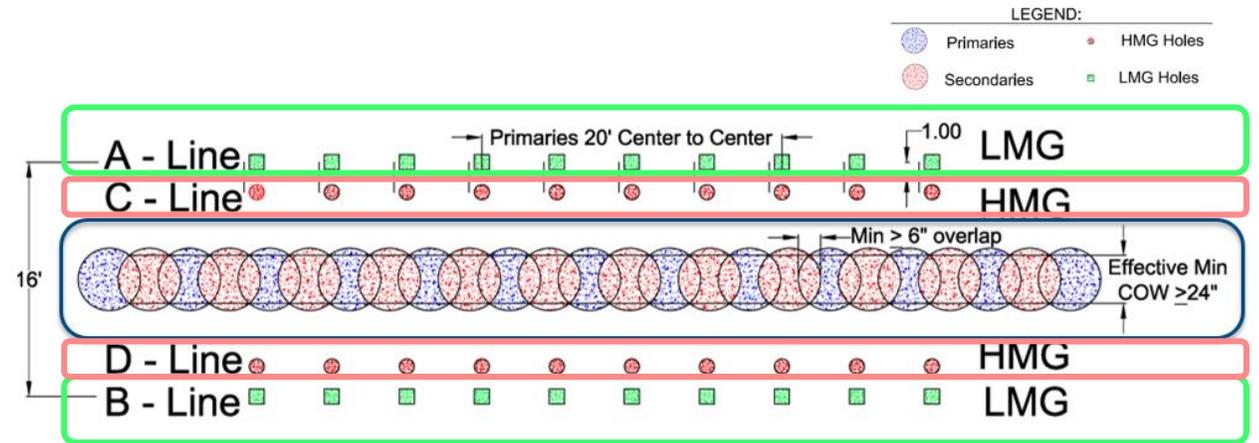
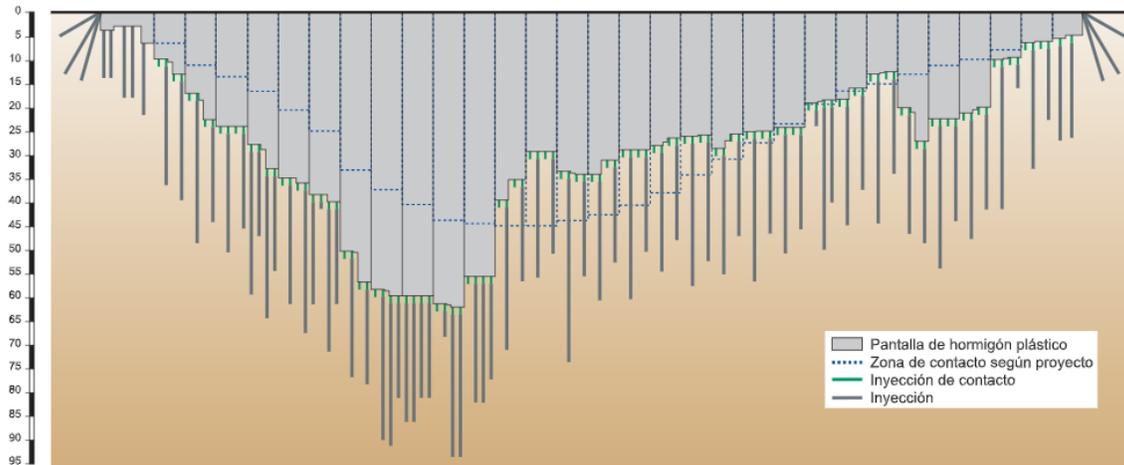
- E-JET par Trevi : panneaux quasi-rectangulaires grâce à un contrôle précis de la vitesse et du positionnement du moniteur de jet (*Leoni et Pianezze, 2017*)



- Focus sur développement durable : réutilisation des spoils

Injections complémentaires :

- Injections sous le pied de la coupure étanche (généralement injections au rocher)
- Injections préalables à l'installation de la coupure étanche (pour éviter perte de fluide de forage ; pour améliorer terrains instables)



- Coupures étanches positives :
Échelle de résistance et de raideur croissante

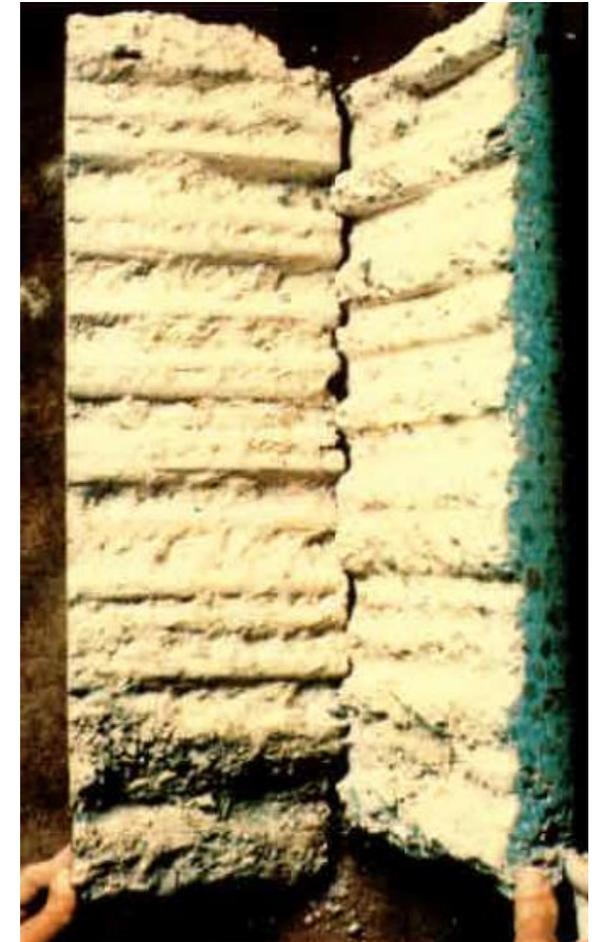
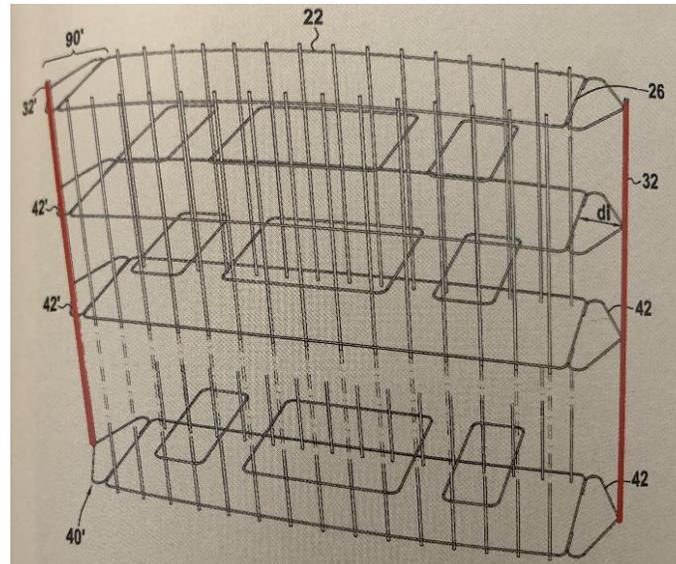
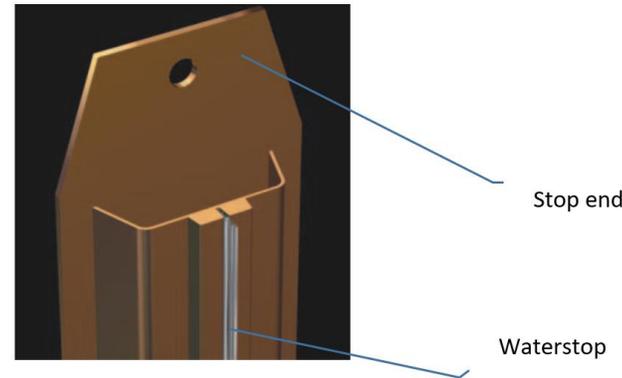


- Coupures étanches semi-positives :
Impact du terrain in situ sur les propriétés de la coupure



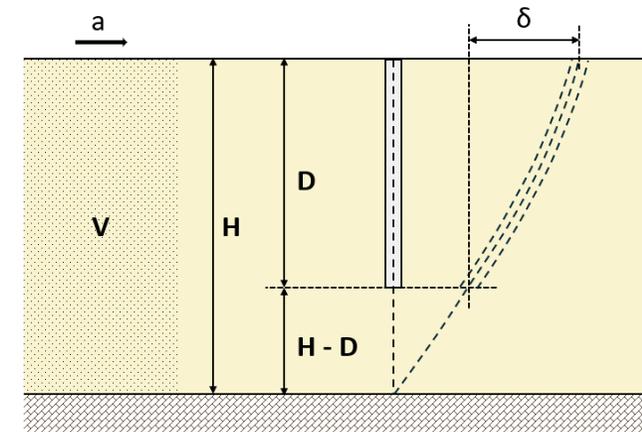
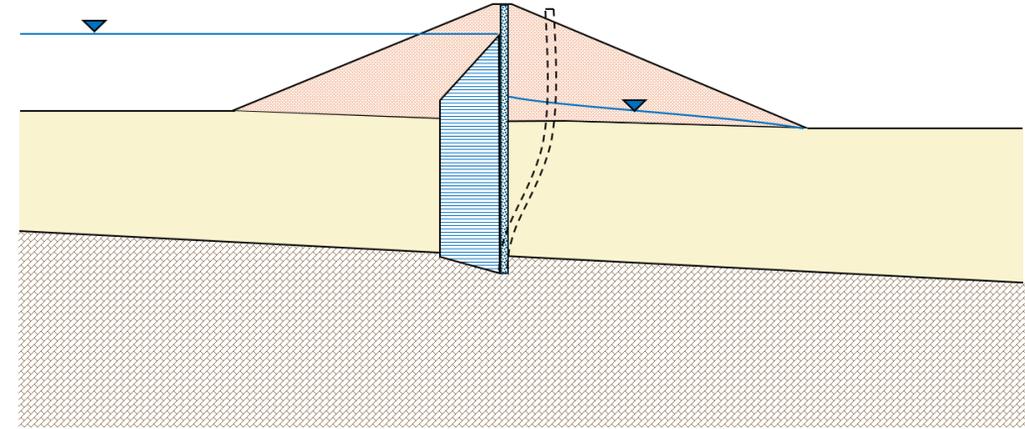
- La perméabilité du matériau de la coupure est très faible (10^{-10} à 10^{-11} m/s typique)
- La présence de discontinuités impacte la perméabilité globale - joints entre éléments discrets :
 - Joints CWS
 - Joints remordus
 - Joints remordus avec élément hydrogonflant (nouveau développement)

Perméabilité équivalente de 10^{-8} à 10^{-9} m/s raisonnable pour des coupures positives



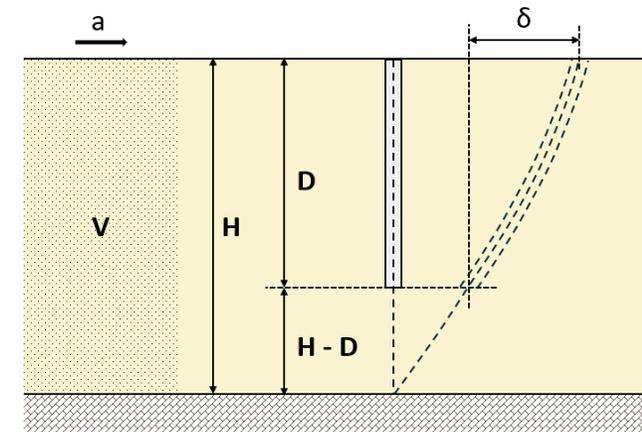
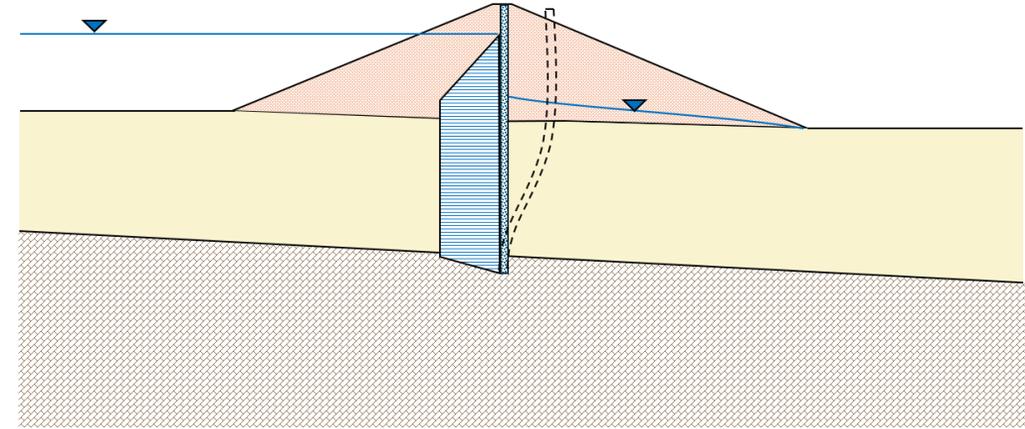
3. Matériaux : - déformabilité et résistance

- Pour tous les matériaux de coupure :
 - Déformabilité : doit être similaire à celle du sol adjacent
 - Résistance : coupure suffisamment résistante pour résister aux actions induites
 - Ductilité : zones pouvant accumuler de la déformation plastique
- Pour les matériaux de coupe à faible résistance (ciment-bentonite, béton plastique...) :
 - La déformabilité, la résistance et la ductilité doivent être évaluées sous des chargements et confinement réalistes
 - Des développements intéressants sur les méthodes de conception pratiques sont en cours en Allemagne (*Beckhaus et al. 2023*)



3. Matériaux : - déformabilité et résistance

- Pour les matériaux des coupures semi-positives :
 - La déformabilité, la résistance et la ductilité doivent être évaluées sous des chargements et confinement réalistes
 - Variabilité accrue par rapport aux matériaux industriels
- Pour le béton conventionnel :
 - Déformabilité moins élevée, mais ductilité plus faible aussi - peut nécessiter un renforcement acier
 - Coût, en particulier avec renforcement



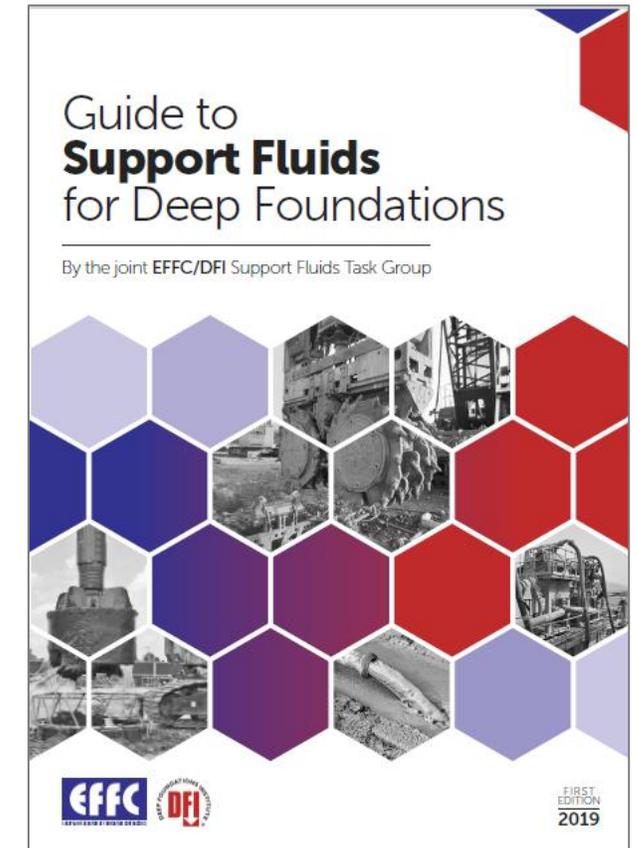
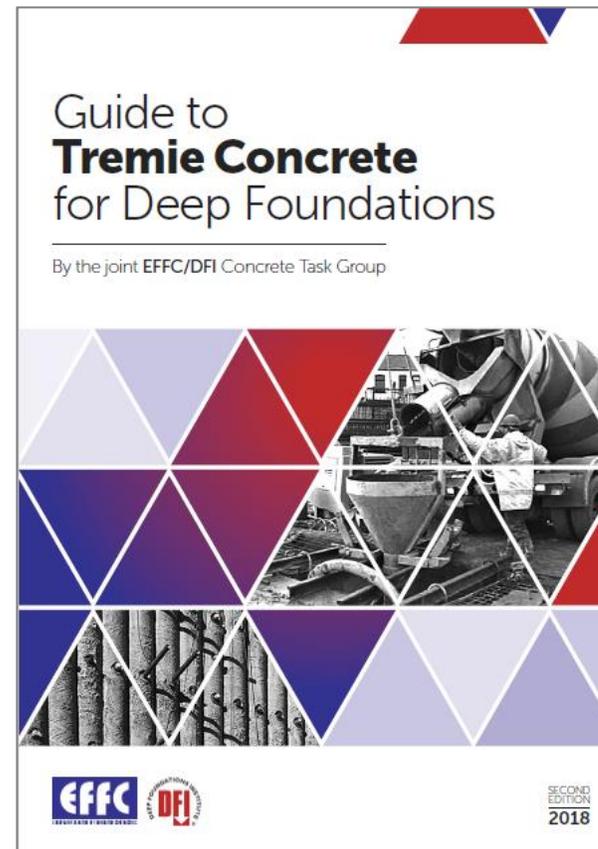
3. Matériaux : - déformabilité et résistance

Pour les coupures positives :

- Guide EFFC/DFI sur le béton trémie
- Guide EFFC/DFI sur les fluides de support

Largement applicable aux coupures étanches

- une ressource précieuse !



Émissions de carbone :

- Dans les projets d'infrastructure : la plupart des émissions de CO2 sont dues aux matériaux, et non à l'installation (émissions « scope 3 », en amont)
- Pour les coupures étanches (comme souvent en géotechnique) : émissions de CO2 principalement dues au ciment
- Les liants alternatifs (laitier de four, cendres volantes, liants spécialisés) peuvent permettre de réduire considérablement les émissions de carbone

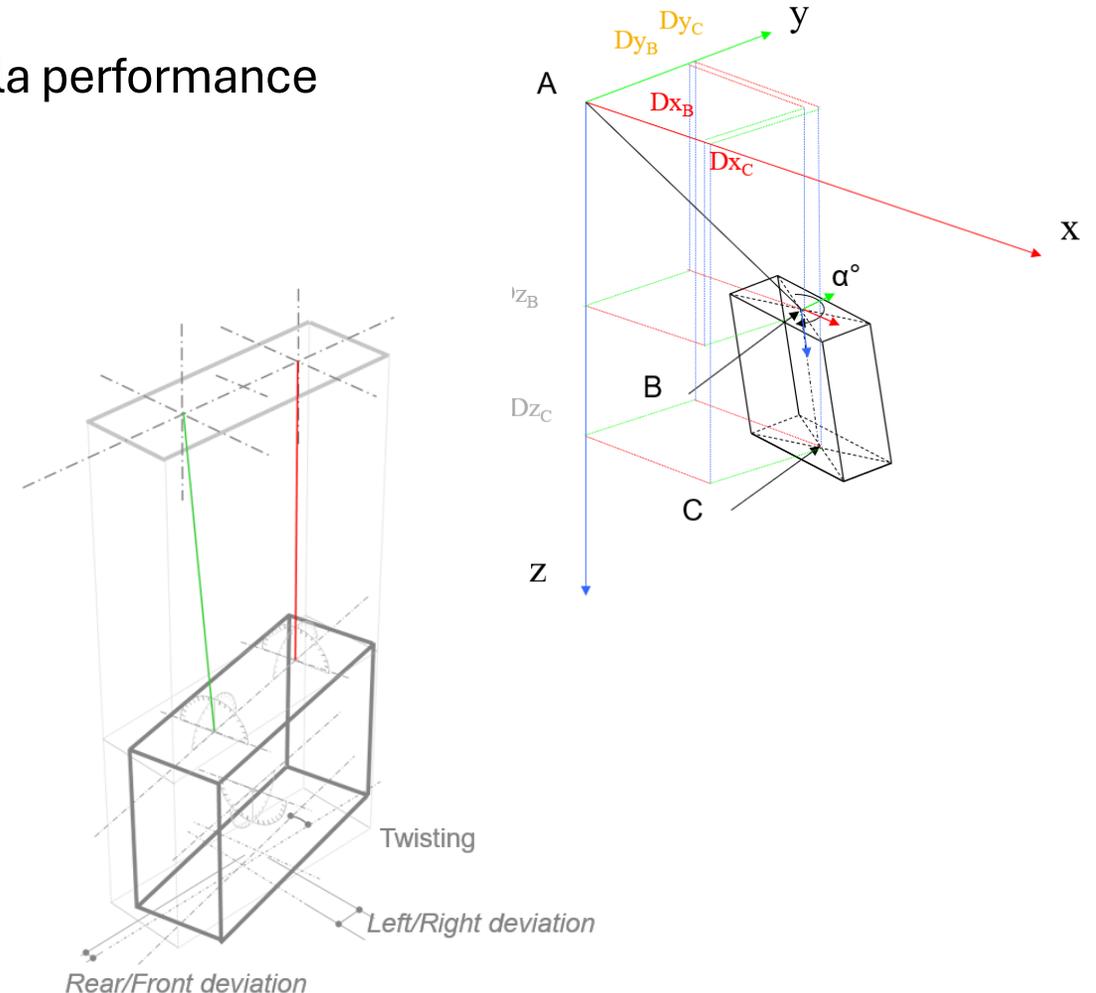
Target compressive resistance (in MPa)	0,5	1	2	5	10
CEM I	280	337	394	490	547
CEM II	279	328	427	476	541
CEM III/A	127	141	151	218	268
CEM III/B  Low Carbon	111	121	129	182	222
CEM III/C  Very Low Carbon	74	81	92	121	152
Slagsol 95/5  Ultra Low Carbon	60	64	73	93	106

Valeurs indicatives de l'empreinte carbone du béton plastique (kg CO2 eq/m3) pour différents types de liant (données EXEGY)

- La continuité de la coupure est essentielle pour assurer la performance
 - Superposition d'éléments discrets

- Différence entre :
 - Suivi, pendant installation
 - Contrôle, post-installation

- Élément de coupure :
 - 6 degrés de liberté pour le positionnement
 - Géométrie de l'élément de coupure



4. Suivi et contrôle : - suivi pendant l'installation

Suivi :

- Capacité de redressement des écarts d'exécution :

- Hydrofraise
- Bennes hydrauliques (capacité limitée)
- Forage directionnel

- Aucune correction significative pour :

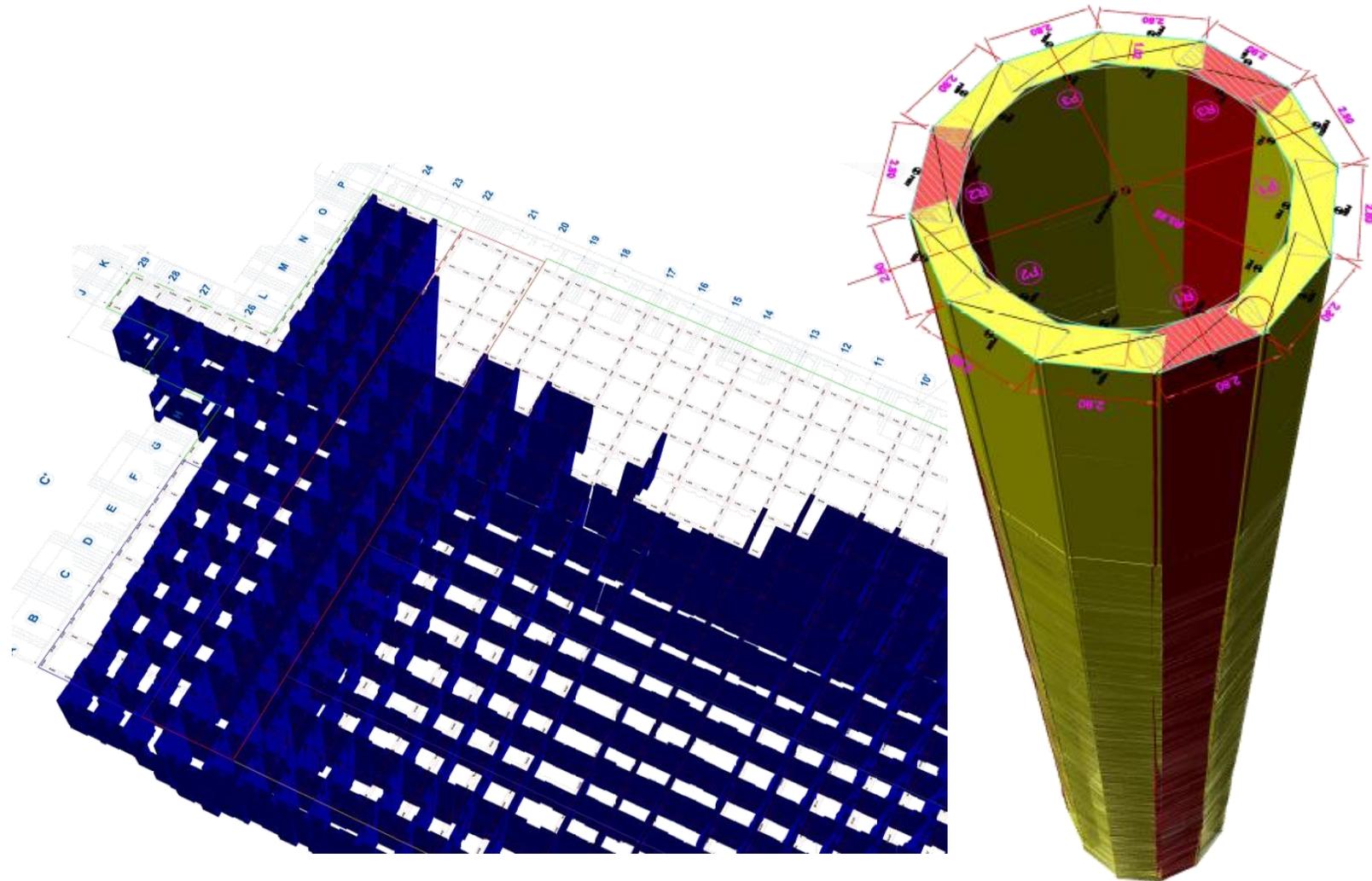
- Pieux
- CSM et jet grouting
- Trenchmix



4. Suivi et contrôle : - contrôle post-installation

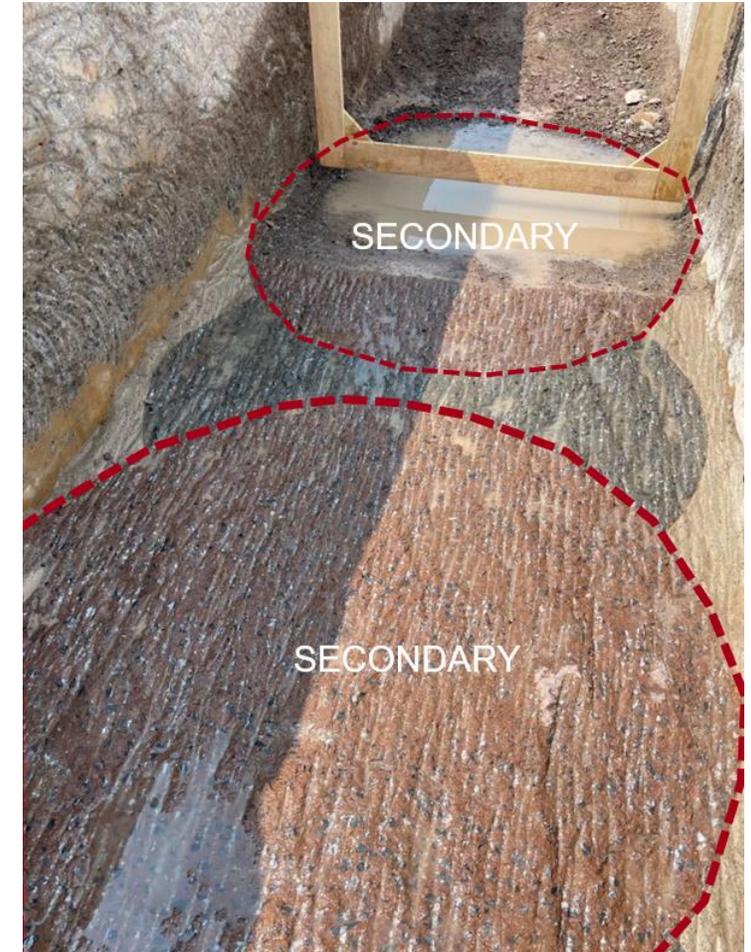
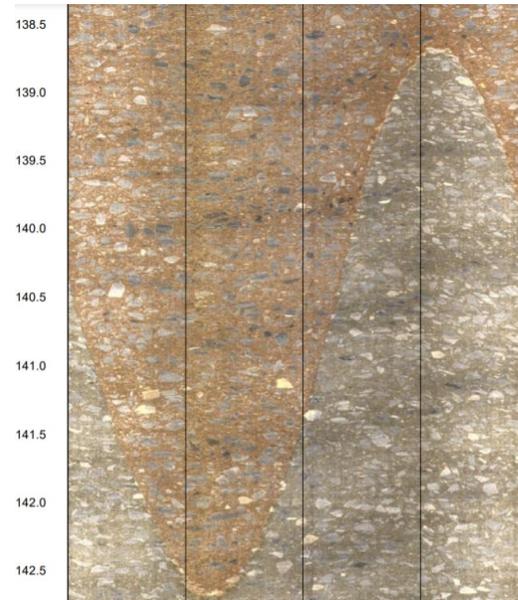
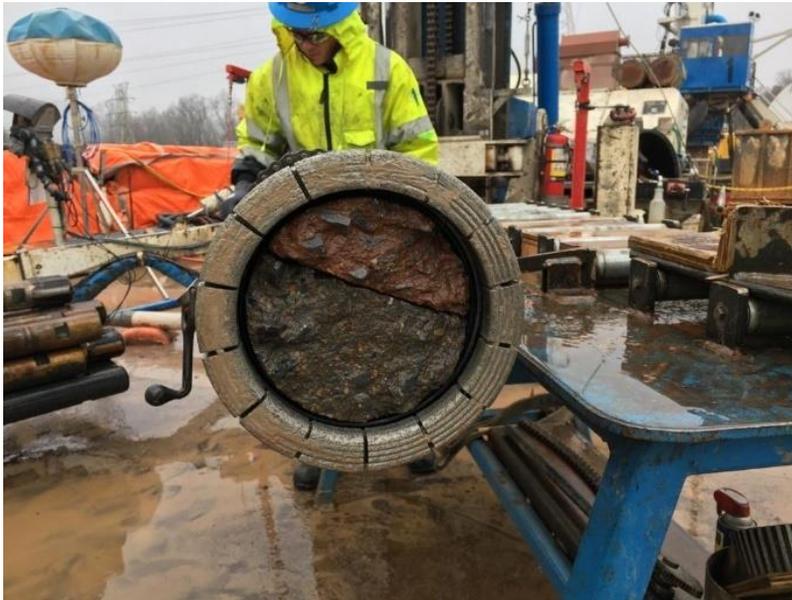
Contrôle :

- Géophysique - pour les coupures positives (en 2 étapes)
 - Ultrasonic echo-detection (Koden de Koden Electronics)
 - Sonar caliper (SONICaliper de Fugro Loadtest)
- Géophysique - pour le jet grouting :
 - Variabilité de la résistivité électrique (CylJet de Sixense)
- Intégration avec BIM



4. Suivi et contrôle : - contrôle post-installation

- Carottage :
 - Inspection de carottes
 - Inspection de forage via CCTV ou Televiever
 - Essai de perméabilité en forage

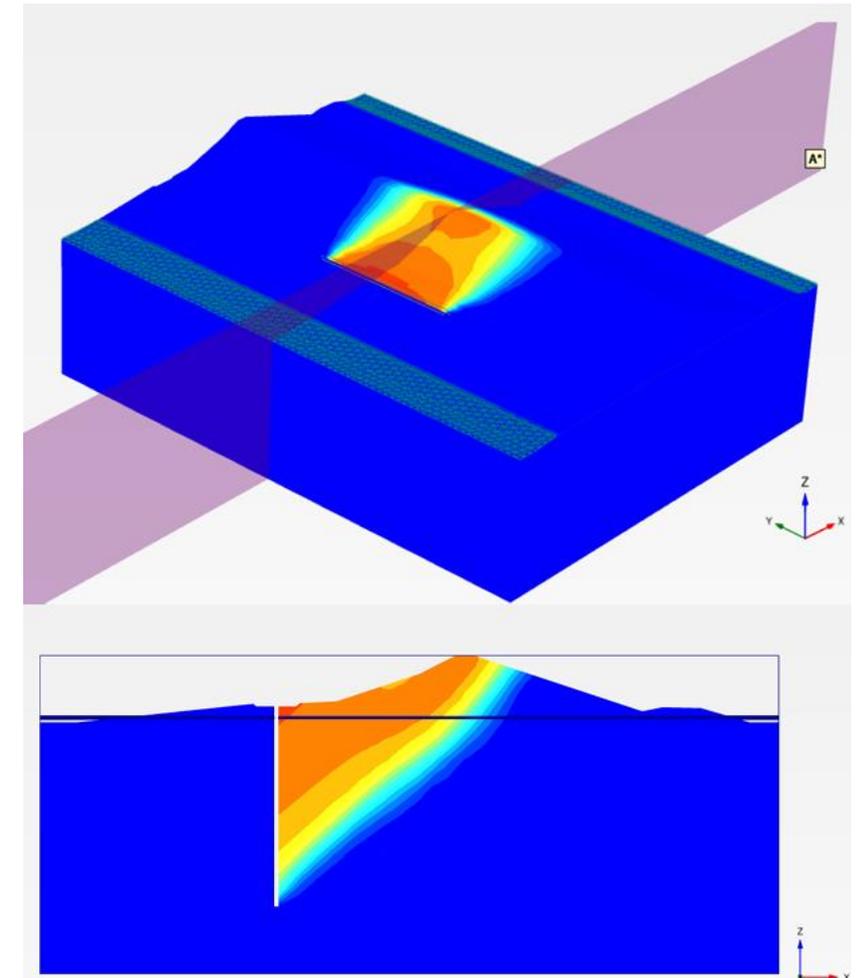


- Les ouvrages neufs présentent en général moins de contraintes
- Travaux de réparation :
 - Planification et logistique
 - Exploitation ininterrompue, réservoirs pleins
 - Critères de performance : charges, déplacement, vibrations

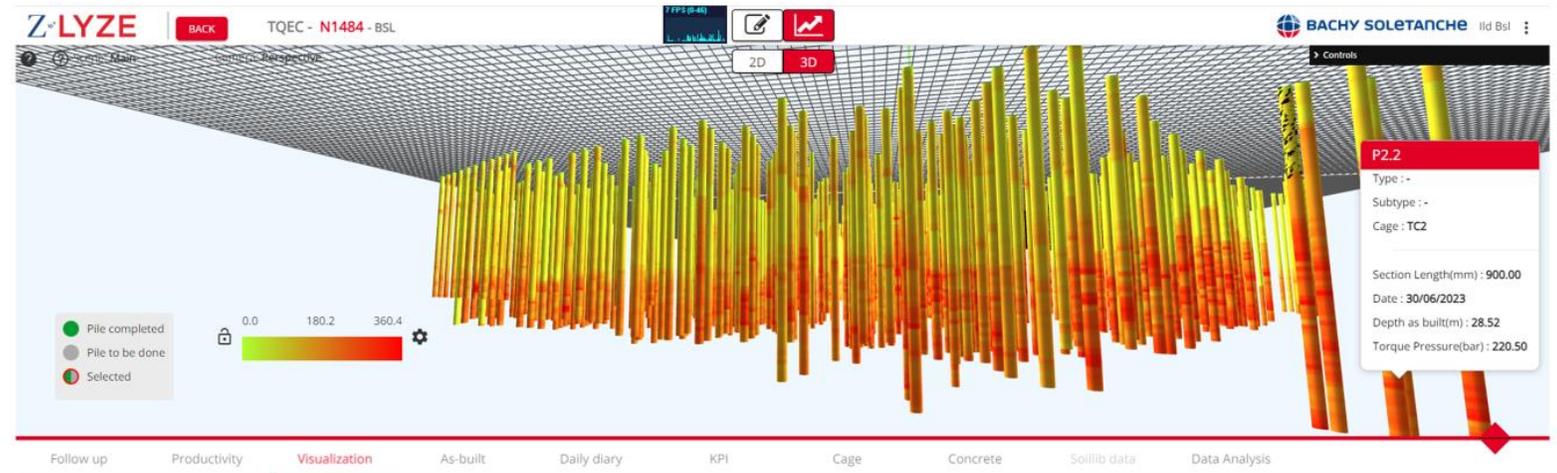
Exemple : excavation d'une coupure de réparation en ciment-bentonite, en amont d'un barrage en remblai



Les parois étanches dans les barrages:
Aperçu et développements



- Transfert de données en temps réel des engins de forage vers/depus le cloud est courant depuis plusieurs années maintenant
- Avancées dans la collecte et le traitement des données :
 - Outils de visualisation et d'analyse
 - Production (reporting, suivi)
 - Contrôle qualité (interface BIM)
 - ... De nouvelles solutions techniques ?



- Au niveau mondial, les travaux de construction et de réparation des barrages devraient se développer dans les années à venir
- Amélioration continue des techniques d'exécution de coupures étanches depuis de nombreuses décennies
- Les efforts visibles en matière de développement durable et de minimisation de l'empreinte carbone sont à poursuivre
- Des solutions existent pour tous les types de coupures: des développements relativement simples en installations nouvelles, aux projets de réparation complexes
- Importance des développements axés sur la data à l'avenir

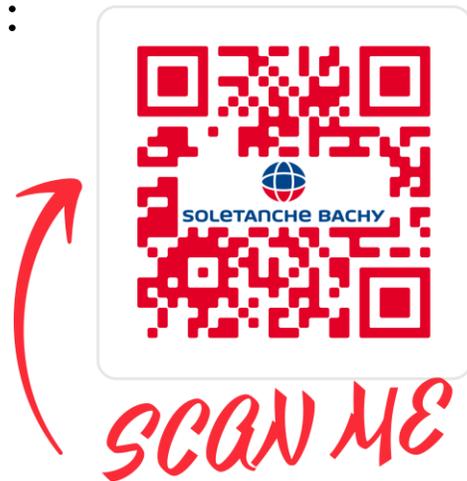
Reference:

Pereira, G. (2024). Cutoffs in dams: overview and recent developments. In: *Proceedings of the XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Lisbon, Portugal, pp. 187-196

- Article disponible en libre accès dans le repository de la SIMSG via le lien :

https://www.issmge.org/uploads/publications/51/126/1075_SAR_cutoffs_in_dams_overview_and_recent_developments.pdf

- Ou avec :



Merci !

gustavo.pereira@soletanche-bachy.com