

La fermeture de Cigéo : les grands enjeux scientifiques et technologiques

Jean Talandier & Rémi de La Vaissière
Andra – Direction Scientifique et Technique
19 mars 2026

Cigéo - Centre industriel de stockage géologique de déchets radioactifs

500 Mètres de profondeur

15 km² de zone de stockage

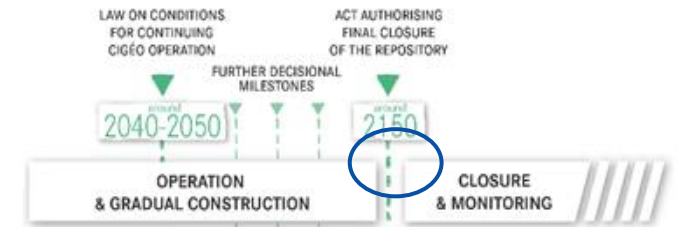
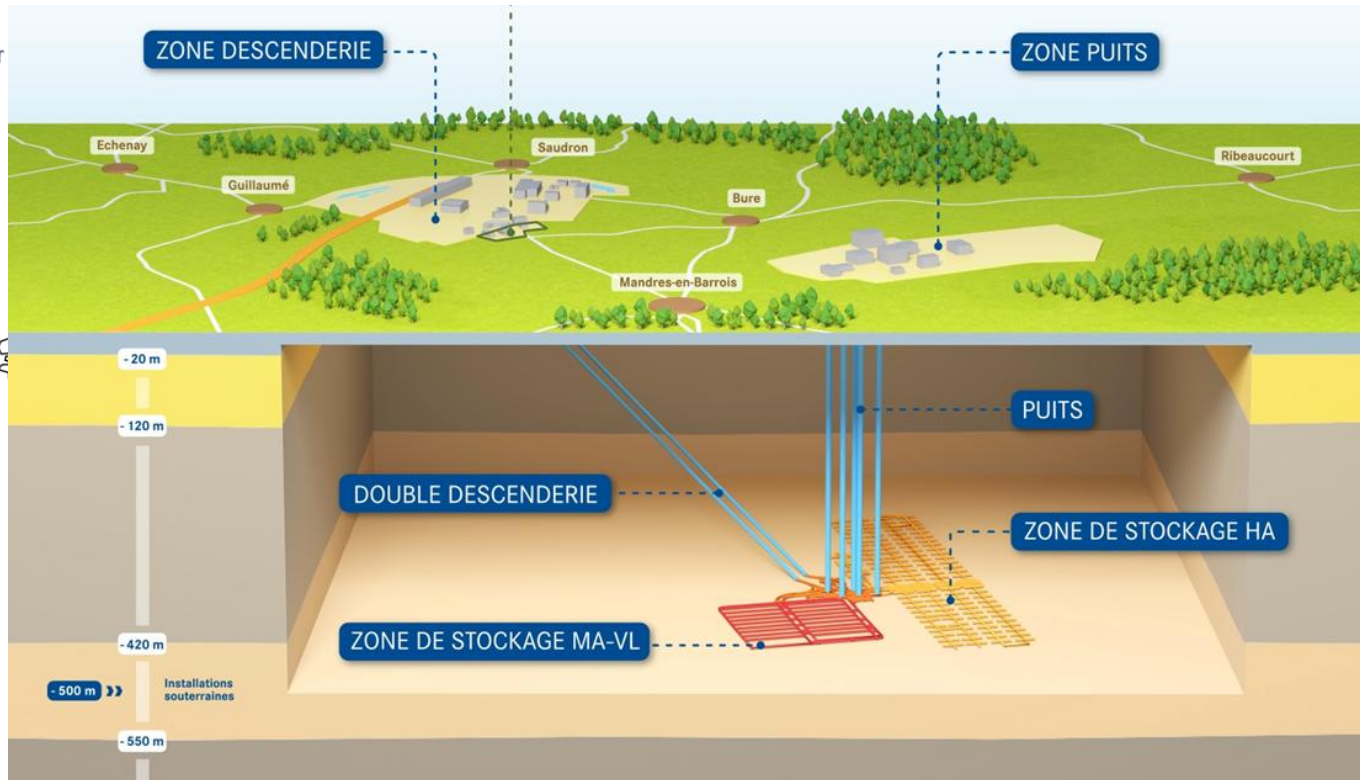
250 km de galeries et alvéoles

85 000 m³ de déchets

120 Ans d'exploitation

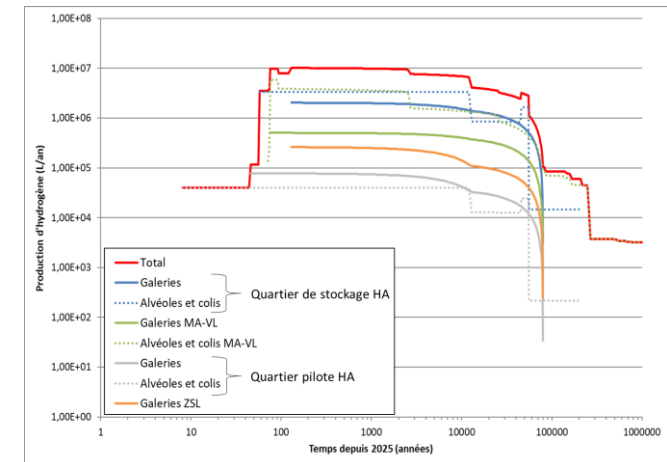
25 Mds d'euros

450 000 t métal



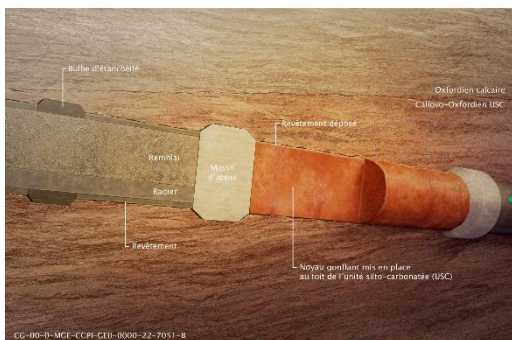
Production importante de H₂

Durée de production ~ 100 000 ans

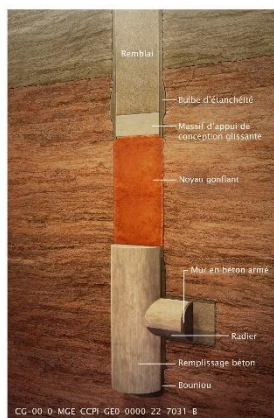


La stratégie de fermeture de Cigéo

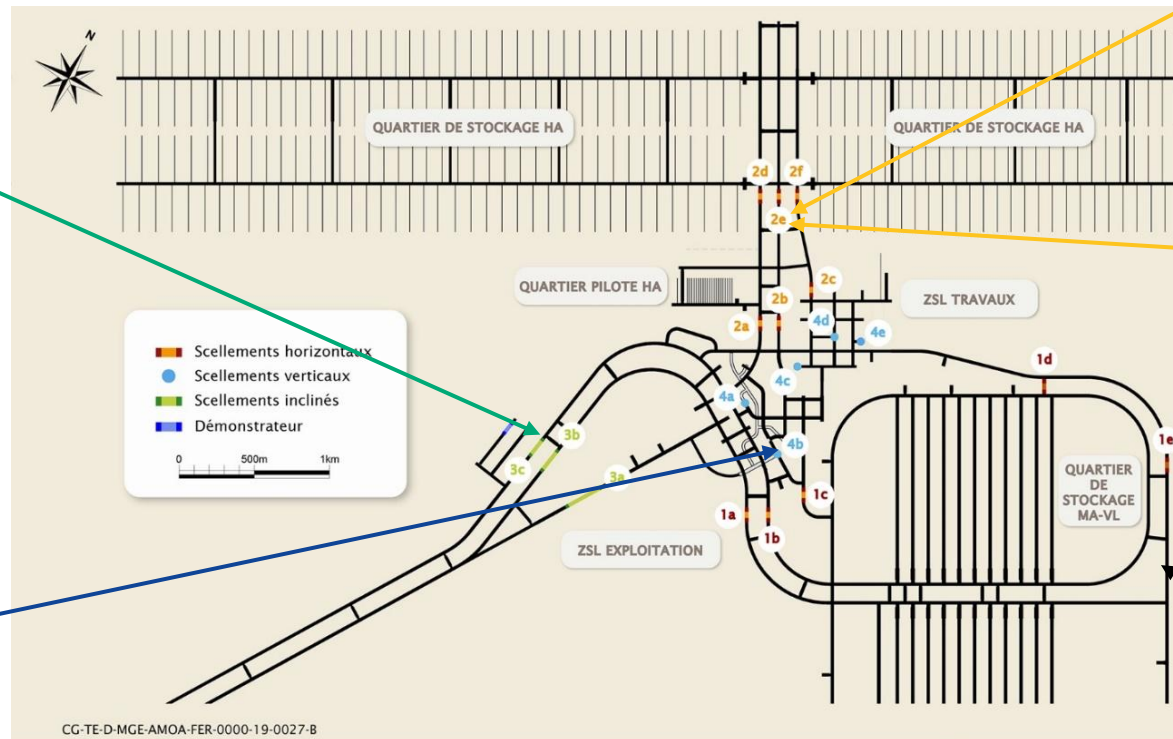
- **Limiter le transfert de radionucléides par les tunnels et voies d'accès vers la biosphère**
 - Positionner des scellements pour limiter les écoulements le long des ouvrages
- **Préserver l'épaisseur d'argilite saine au dessus des ouvrages**
 - Remblayer les tunnels pour assurer la stabilité des excavations (plusieurs dizaines de km)



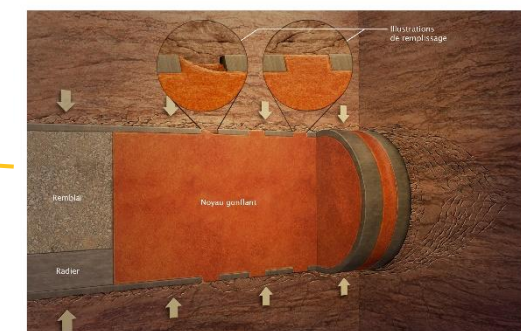
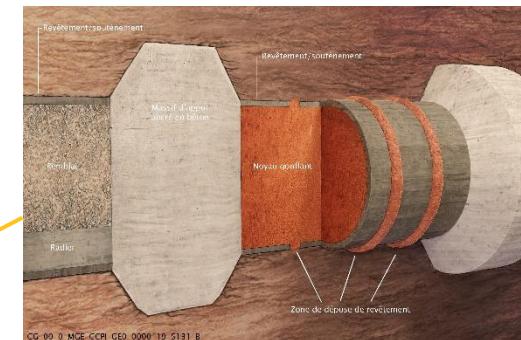
Descenderies (3)



Puits (5)



Galeries (11)



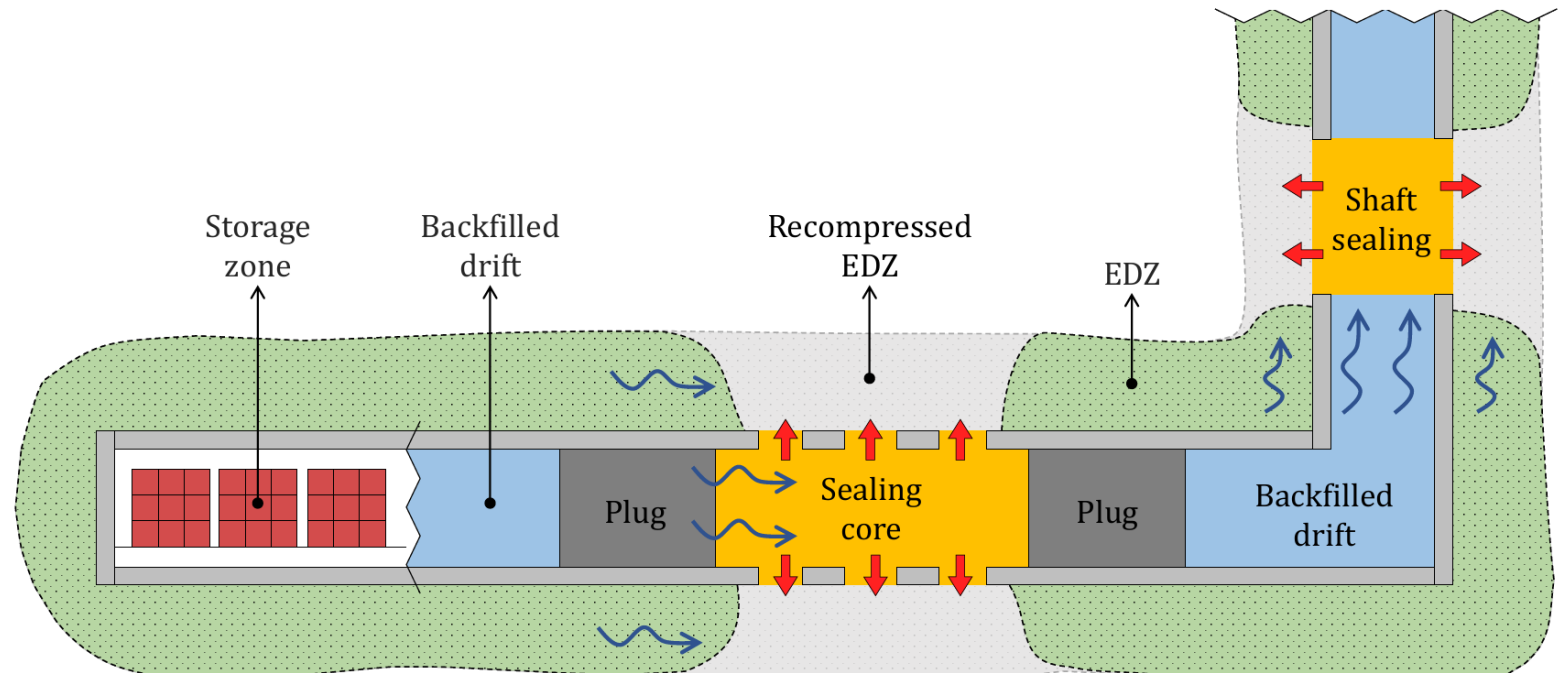
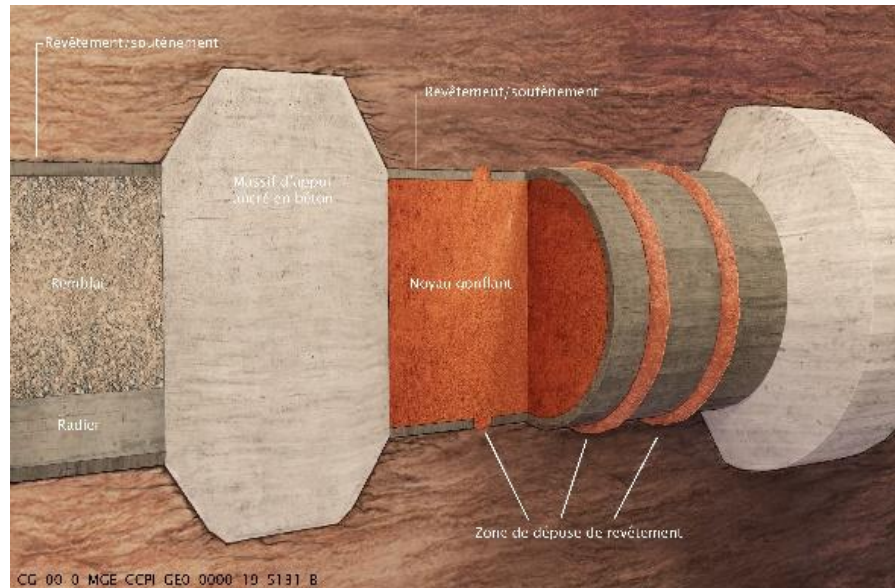
2 solutions techniques



Remblais

Le principal composant du scellement → noyau à base de bentonite

- La bentonite compactée offre de très faible perméabilité à l'eau et des propriétés de gonflement



Cependant, les bentonites pures sont très peu perméables au gaz

- Induit des pressions de gaz dans le stockage
- Pression de gaz > pression de fracturation de la couche d'argile



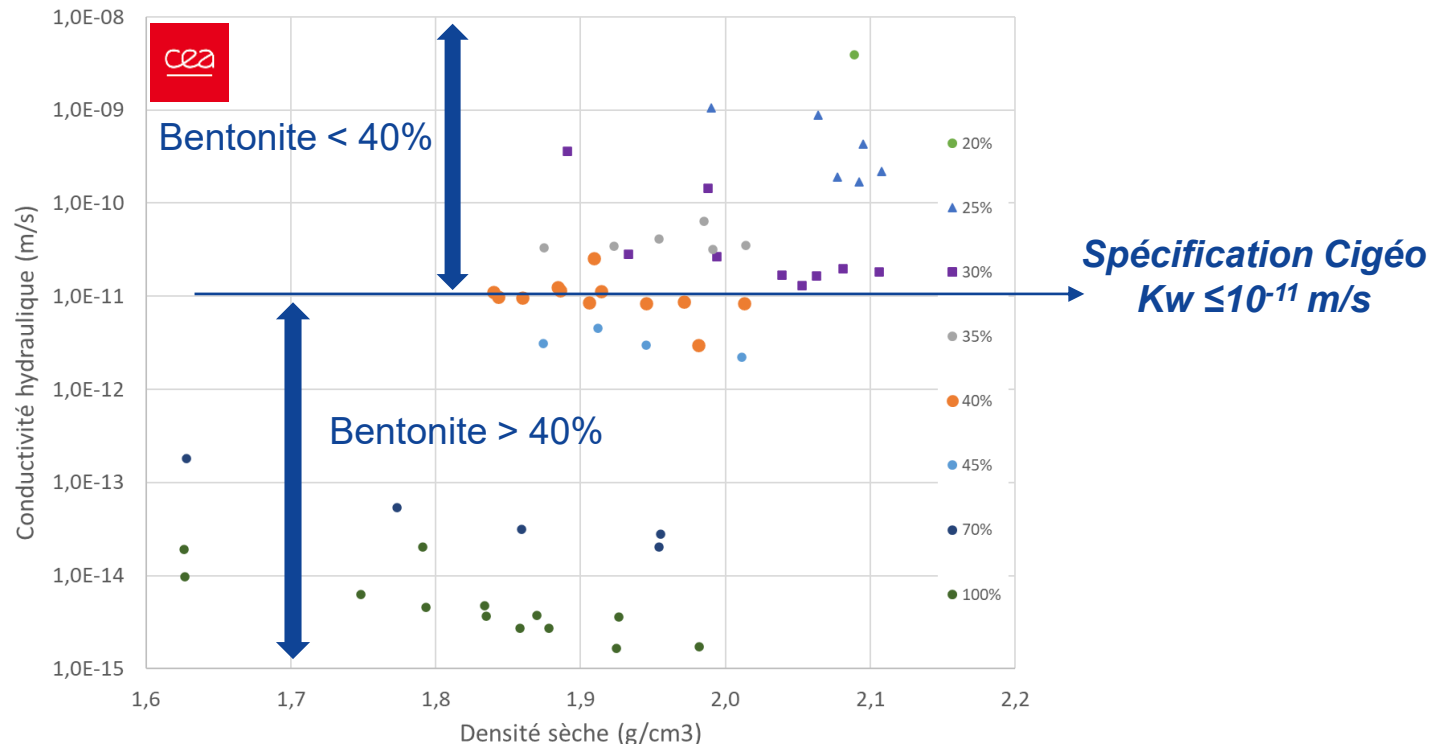
Utilisation de mélanges bentonite-sable

Propriétés recherchées pour le noyau

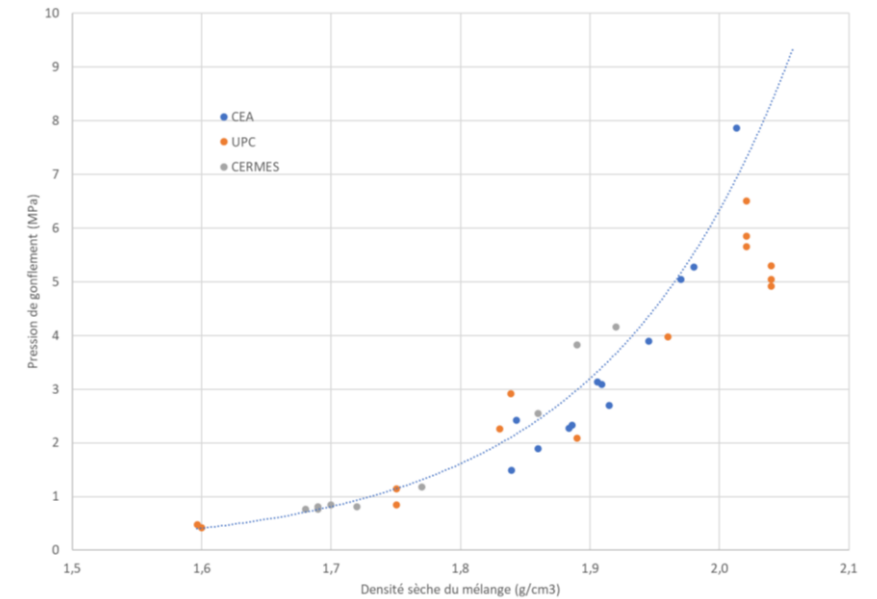
- Perméabilité à l'eau faible ($K_w \leq 10^{-11}$ m/s)
- Faible pression d'entrée de gaz < 2 MPa
- Propriétés de gonflement

Choix de la teneur en sable dans le mélange bentonite/sable

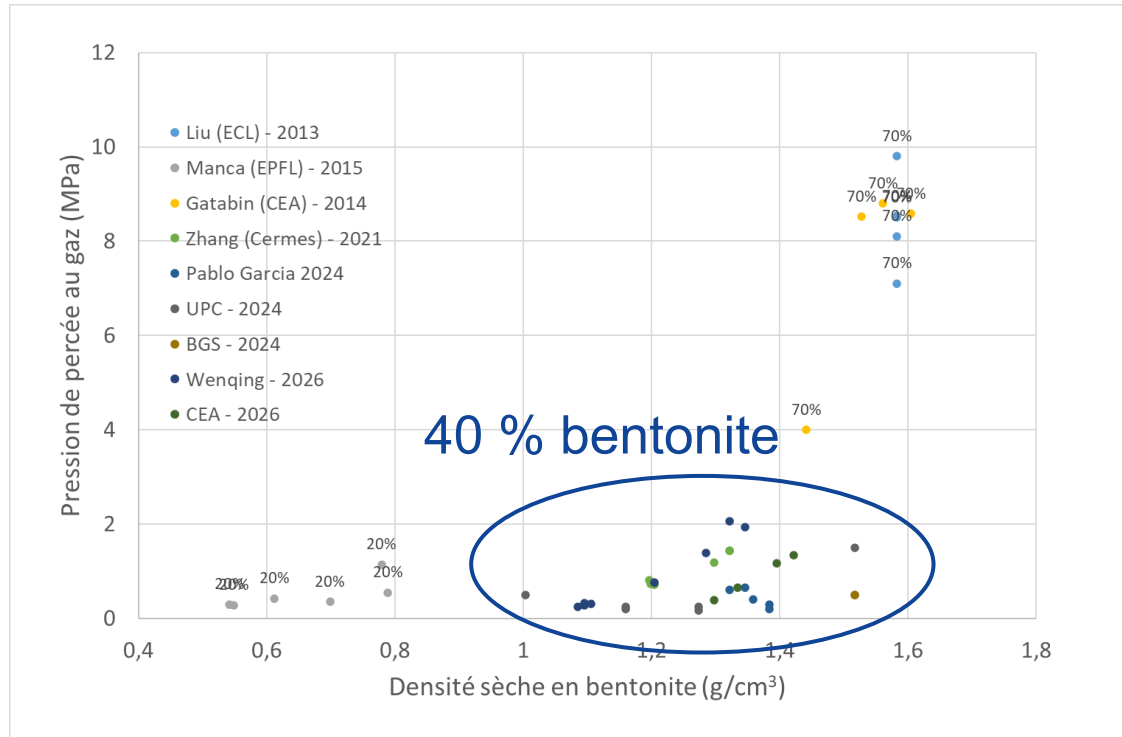
Focus sur les mélanges 40% Bentonite/60% sable



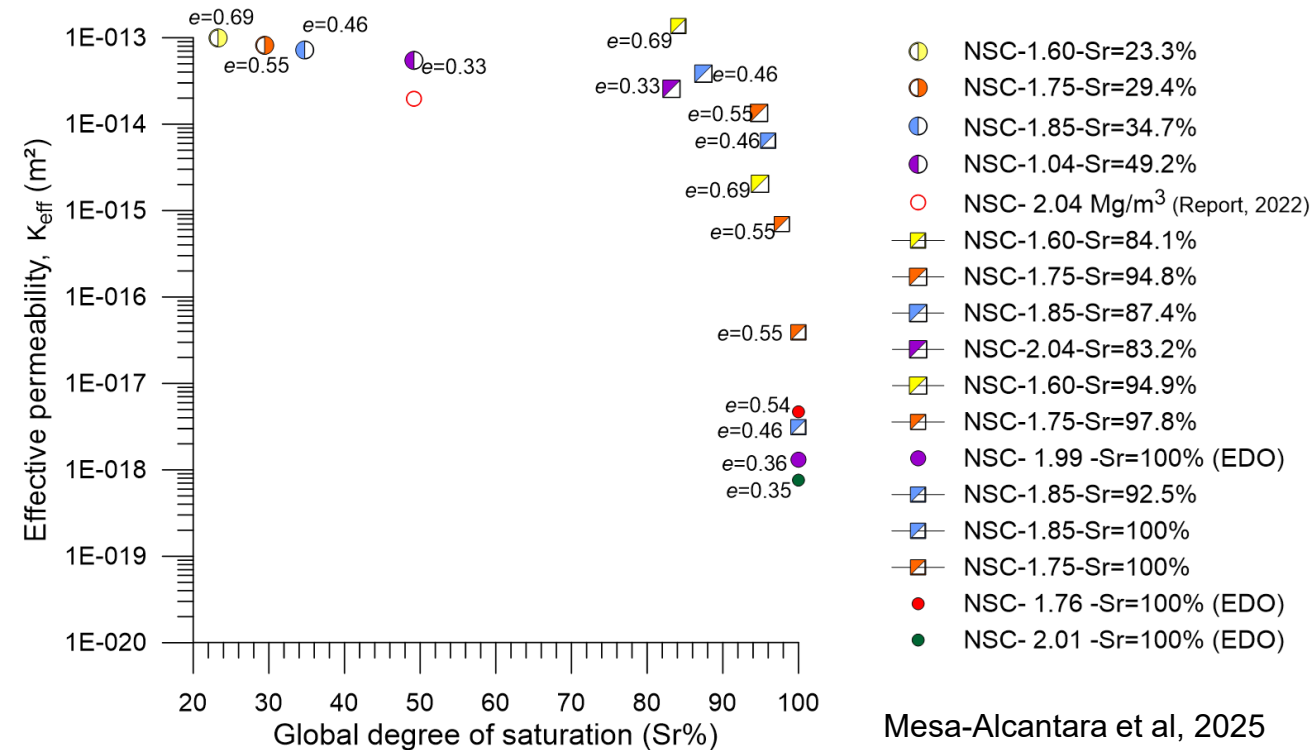
Pression de gonflement Mélange 40% bentonite/60% sable



Pression de percée au gaz



Perméabilité relative au gaz fonction de la saturation



40% Bentonite/60% sable → Bon compromis entre les propriétés à l'eau, au gaz et de gonflement

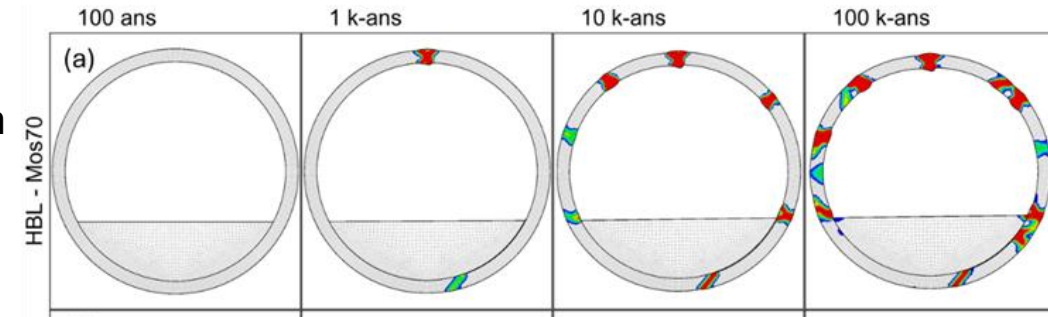
Matériaux - Réutilisation des argilites du Callovo-Oxfordien excavées



- Réduire l'impact environnemental
- Diminuer les Coûts (matériaux/préparation)
- Faible impact chimique avec la couche géologique

Propriétés hydromécaniques recherchées

- Déformations limitées après la rupture des soutènements en béton
- Perméable au gaz



→ Utilisation d'additifs pour adapter les propriétés

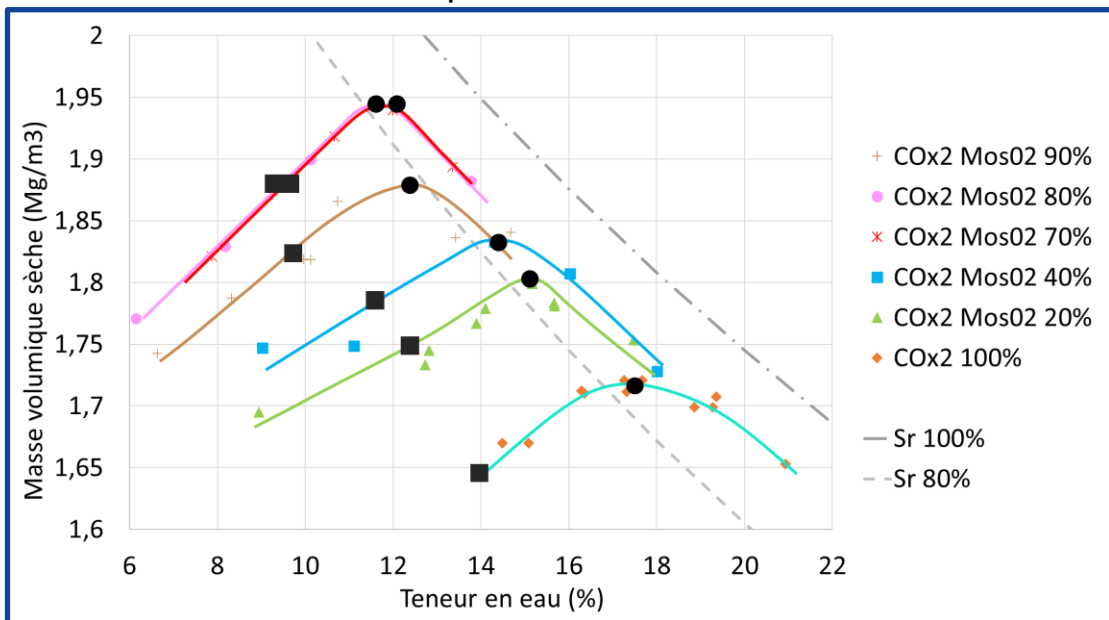
- Le sable permet d'augmenter la perméabilité au gaz et la rigidité du matériau
 - Inerte chimiquement et stable
 - Facilité de contrôle des spécifications

→ Proportions à ajouter ?
→ Granulométrie à utiliser ?
→ Minéralogie à privilégier

Les remblais de Cigéo

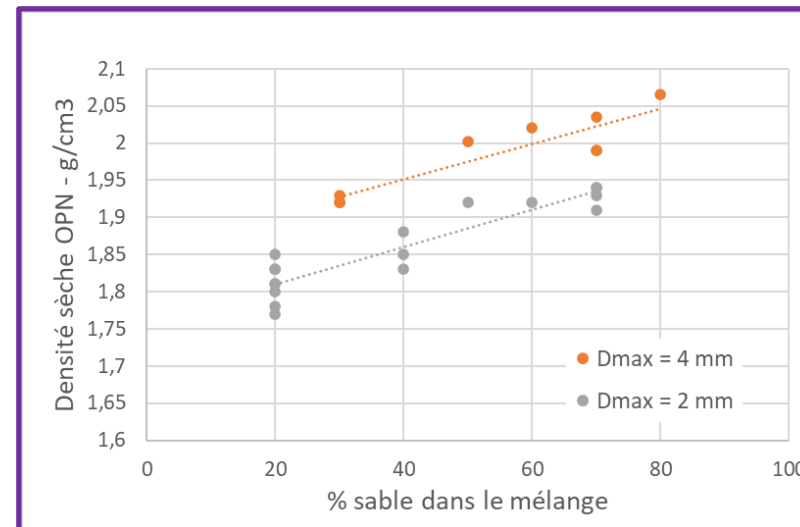
- Courbes de compactage en fonction de la teneur en sable
- Influence de la granulométrie sur le compactage et les propriétés HM
- Propriétés aux gaz des mélanges argilite/sable

Courbes Proctor pour des teneurs en sable de 0 à 90%

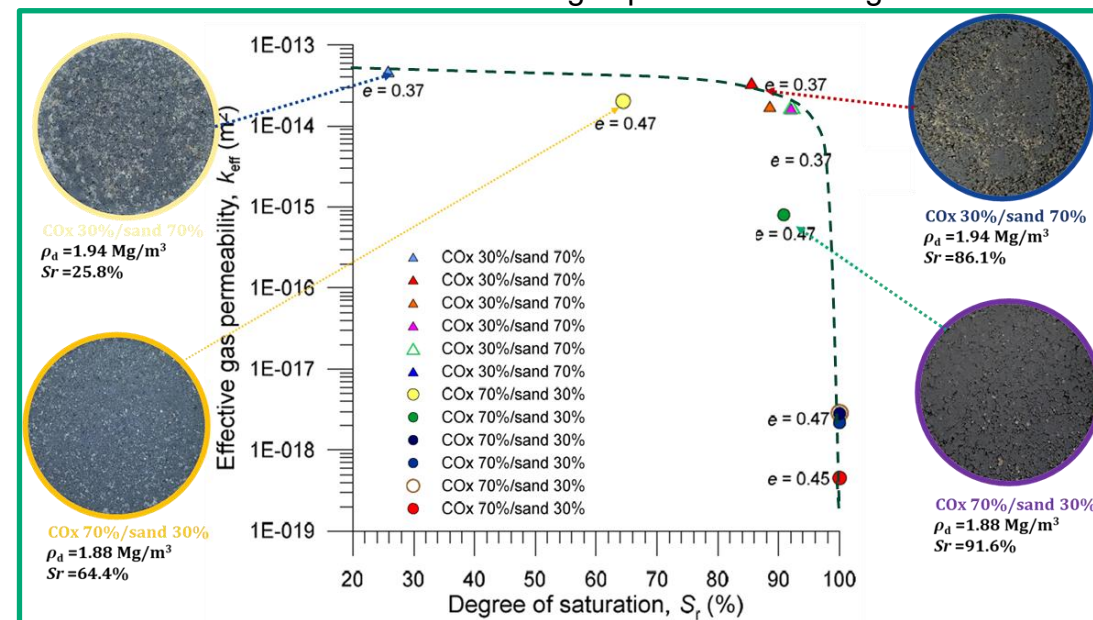


● État initial « OPN » ■ État initial « côté sec »

Anais Leroy et al, 2024



Perméabilité relative au gaz pour deux mélanges

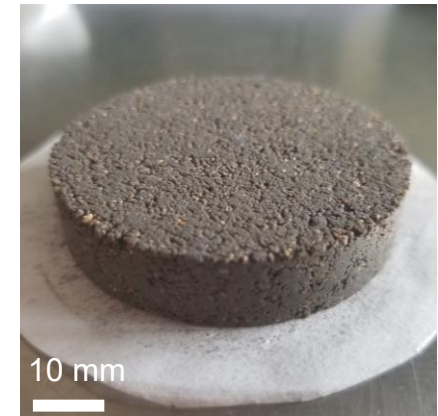
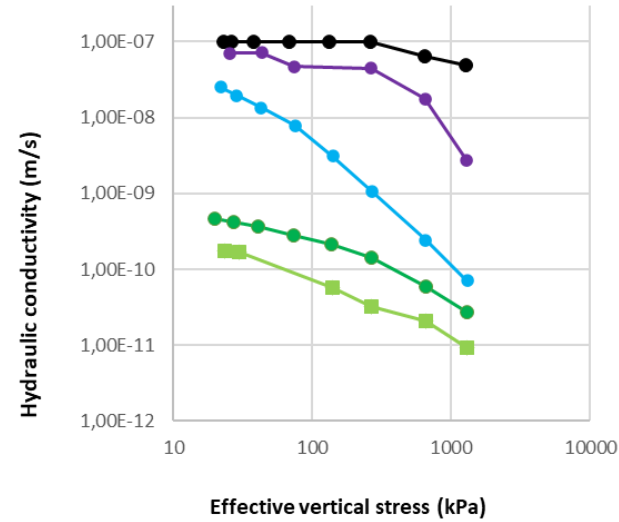
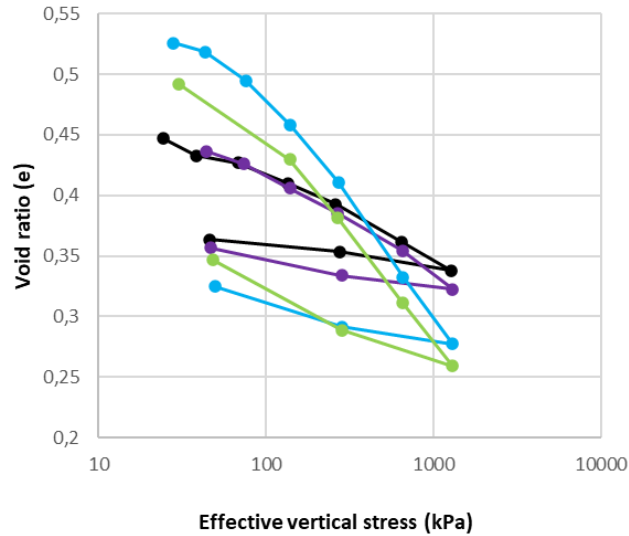


Mesa-Alcantara et al, 2025

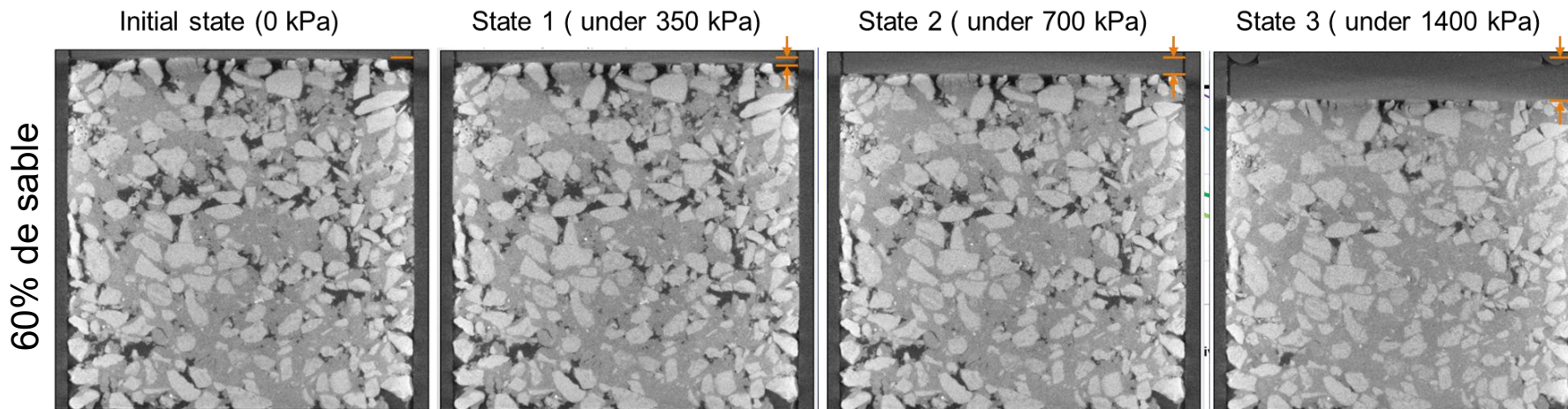
Compressibilité et conductivité hydraulique

Tests pour plusieurs mélanges

100% Sable
60% Sable (côté sec)
40% Sable (côté sec)
0% Sable (OPN)



COx 2 Mos 0-2 70%
Après compaction

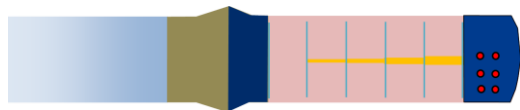


Anais Leroy et al, 2024

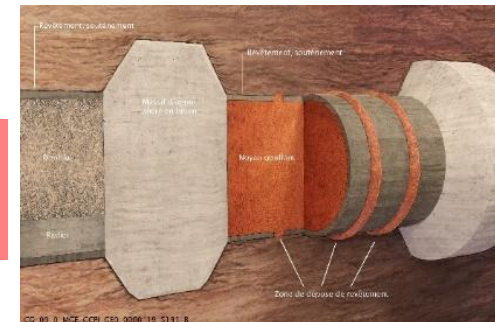
Un programme de démonstration ambitieux

Démontrer la capacité à réaliser les ouvrages et vérifier leurs performances

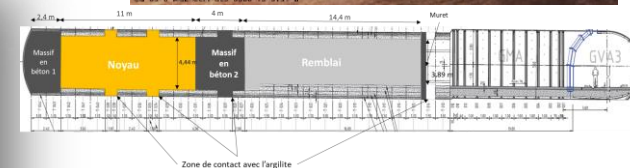
NSC
2013



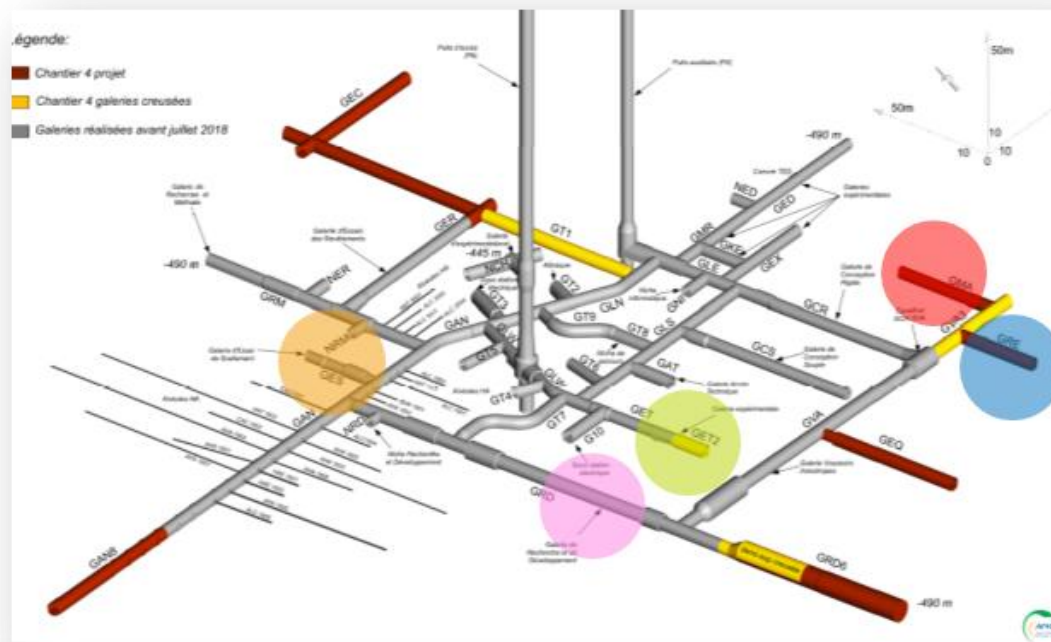
SMA
2026/2027



Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne



DDV
2023/2024



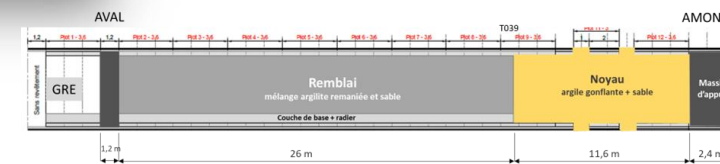
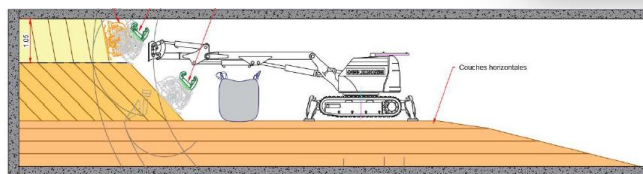
REG (surface)
2024/2025



SSM
2026

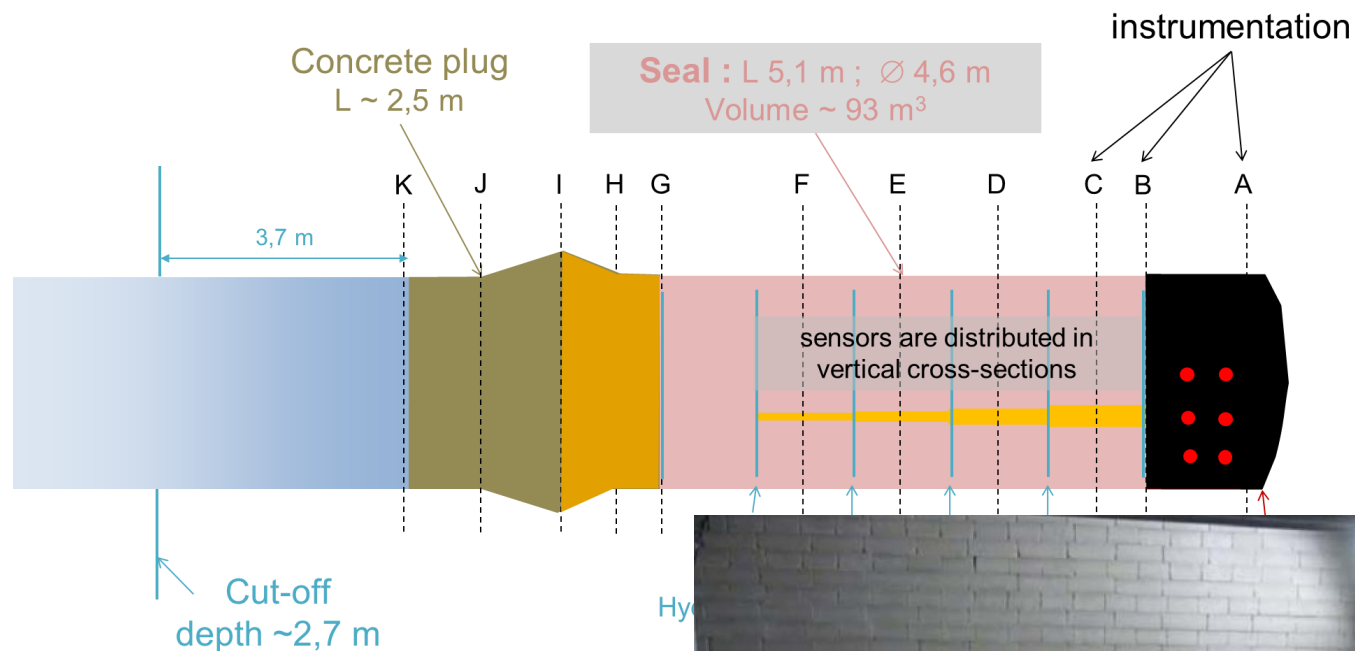
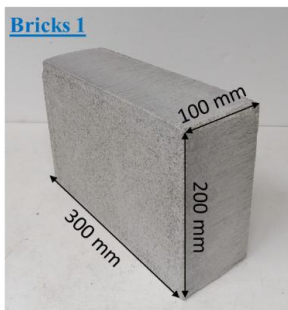


REG
2025/2026



Objectifs : Evaluer les performances hydrauliques d'un scellement (échelle ½ par rapport à Cigéo)

- Composition du noyau
 - 40 % bentonite (WH2) and 60 % sand (TH1000)
 - Briques précompactées
 - Taille: 300 x 200 x 100 mm, masse : ~ 13 kg
- Installation 2012/2013
 - Masse totale : 187,240 t
 - Briques ~ 94%, Pellets ~ 4%, Poudre ~ 2%
 - Volume total ~ 93 m³
 - Densité ~ 2,01 t/m³
 - Volume de vide ~ 5 %
 - Densité sèche moyenne ~ 1,41 t/m³



Hydratation artificielle depuis janvier 2014
6 membranes d'hydratation (verticales)

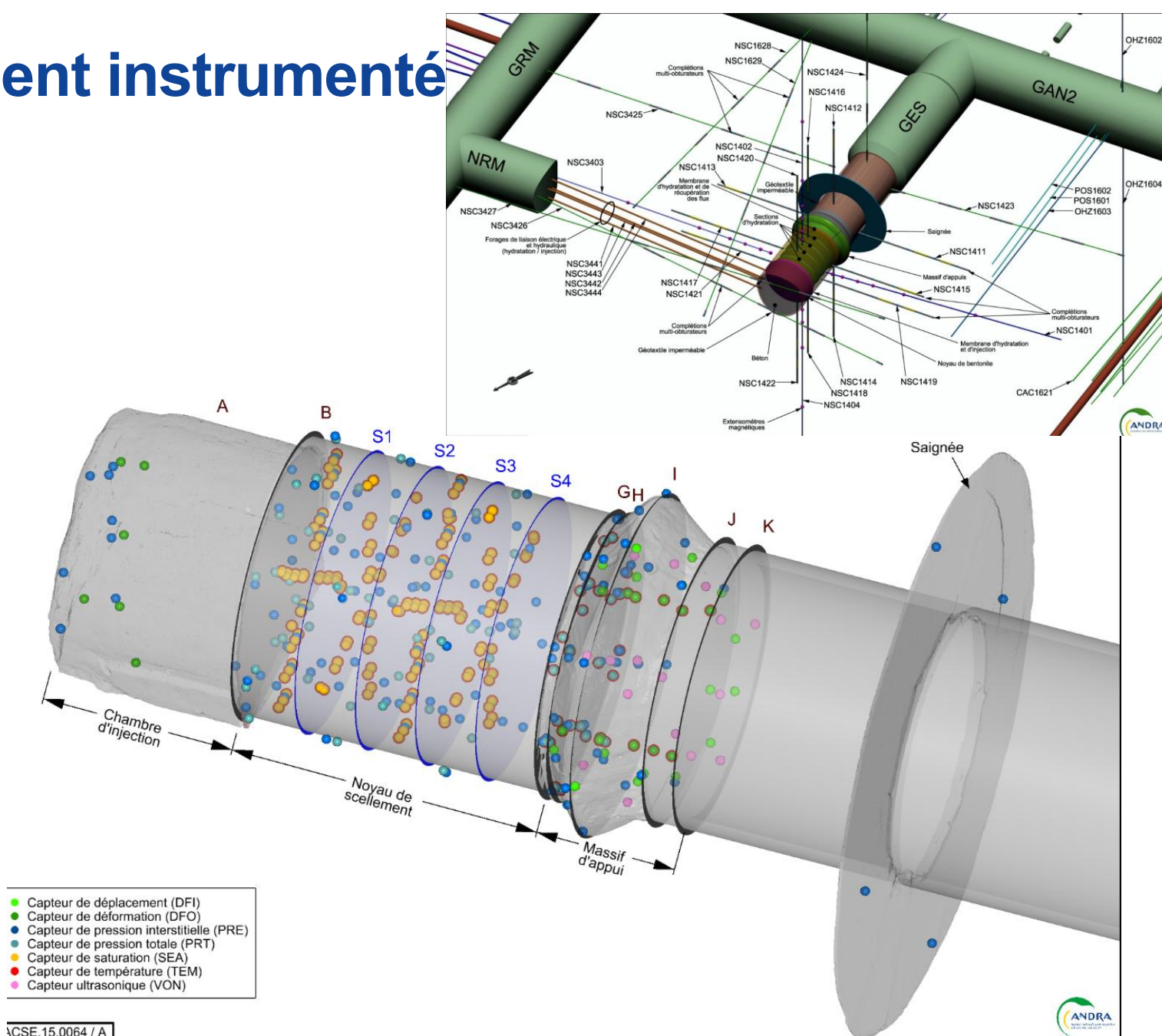
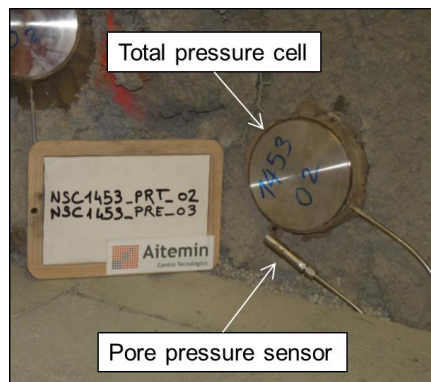
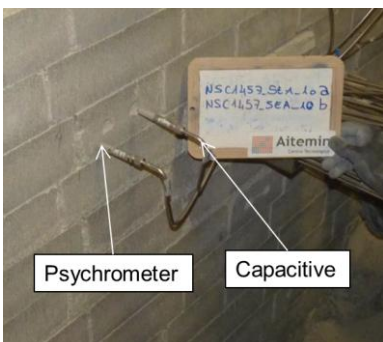


Un essai fortement instrumenté

Instrumentation du noyau

- Pression interstitielle : 99
- Pression totale : 76
- mesures d'humidité relative : 144
capacitif (64), psychromètre (64), FDR (16)

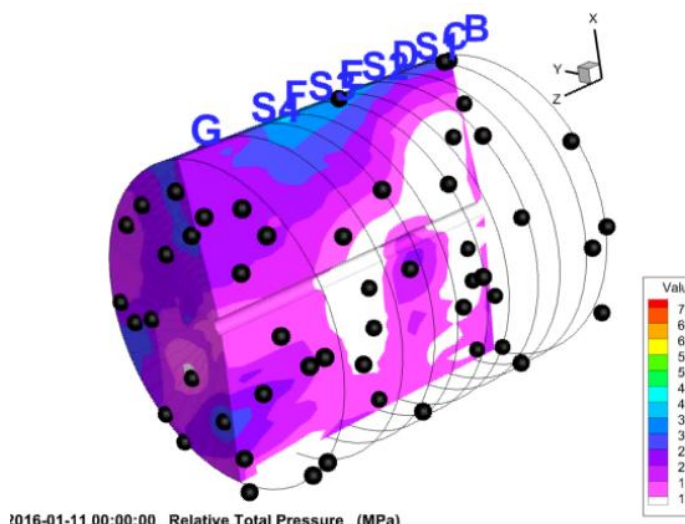
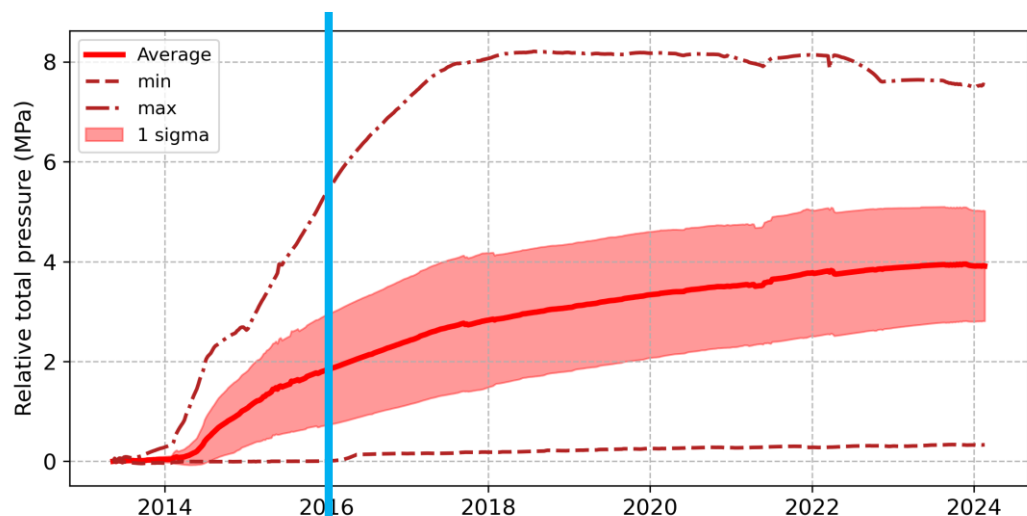
Nombre total de points de mesure : **866**
(incluant forages périphériques et massifs d'appui)



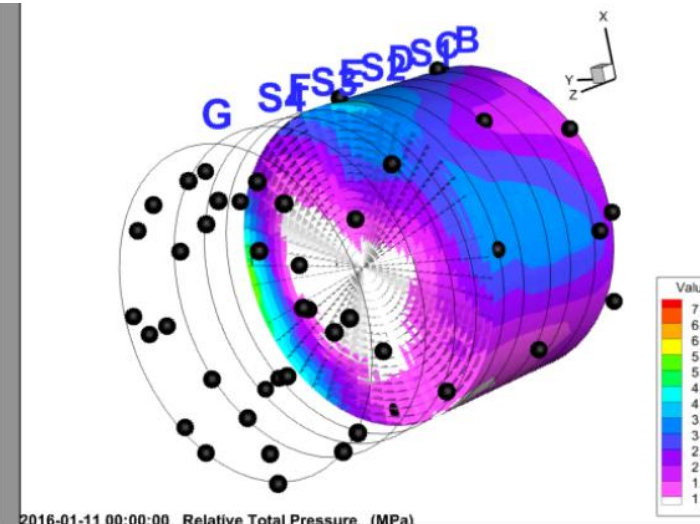
Évolution des pression totales

2016

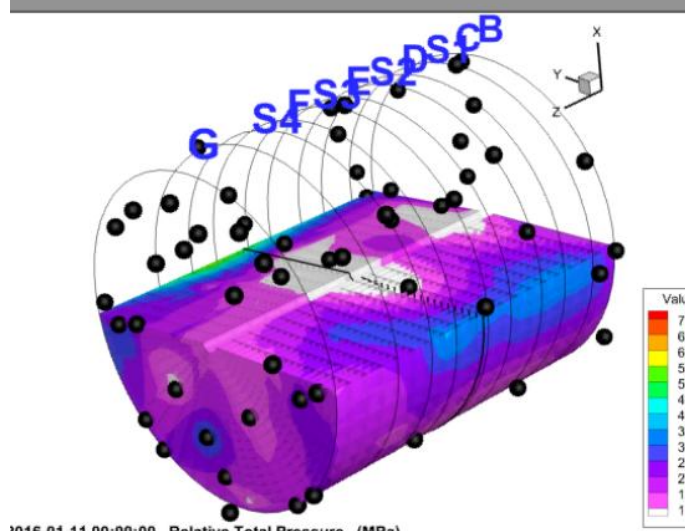
- La variation des valeurs de pression de gonflement dépend de la densité locale et du niveau d'hydratation
- Les pressions les plus élevées sont systématiquement enregistrées aux interfaces roche-argile
 - Combinaison de la convergence rocheuse et de l'hydratation locale



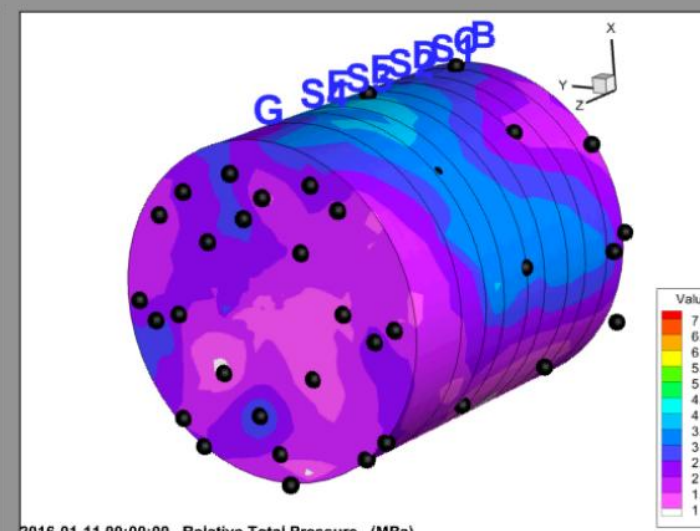
2016-01-11 00:00:00 Relative Total Pressure (MPa)



2016-01-11 00:00:00 Relative Total Pressure (MPa)



2016-01-11 00:00:00 Relative Total Pressure (MPa)

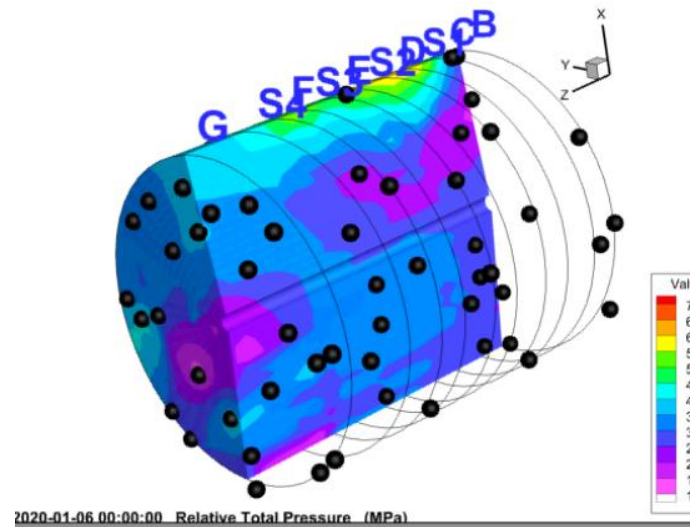
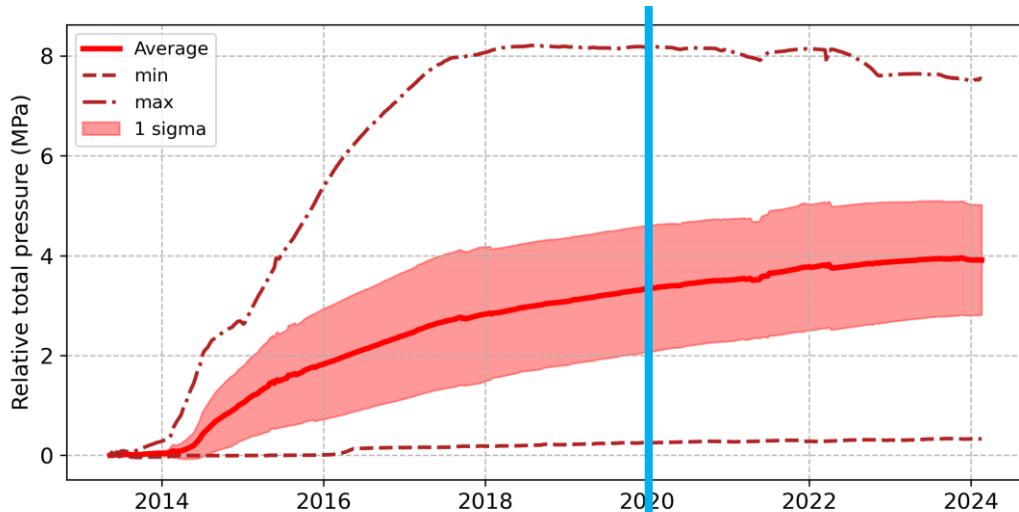


2016-01-11 00:00:00 Relative Total Pressure (MPa)

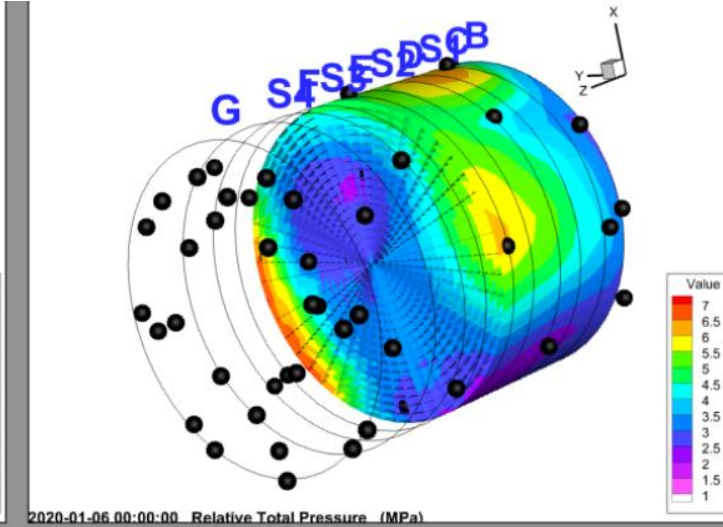
Évolution des contraintes en 3D

2020

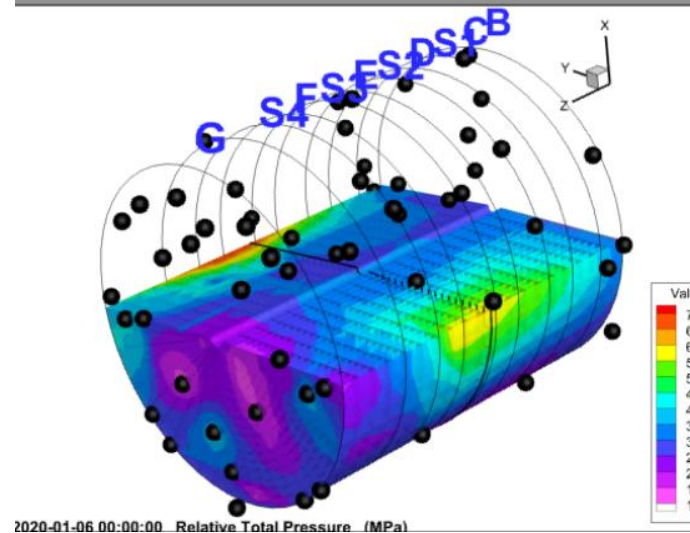
- La variation des valeurs de pression de gonflement dépend de la densité locale et du niveau d'hydratation
- Les pressions les plus élevées sont systématiquement enregistrées aux interfaces roche-argile
 - Combinaison de la convergence rocheuse et de l'hydratation locale



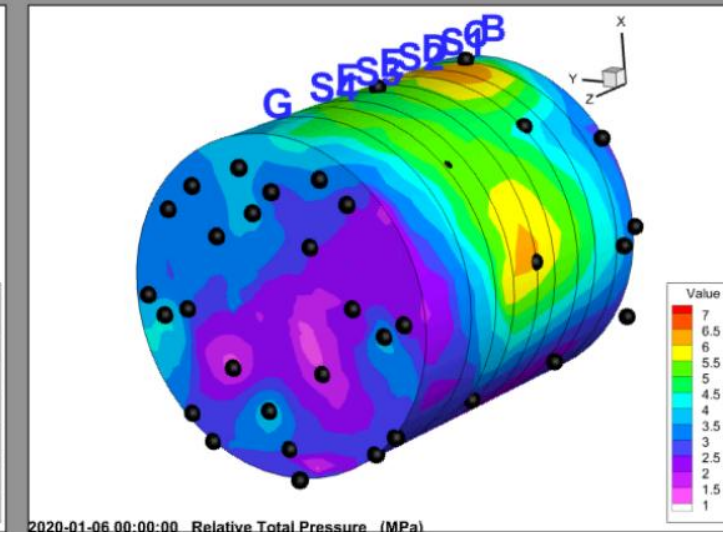
2020-01-06 00:00:00 Relative Total Pressure (MPa)



2020-01-06 00:00:00 Relative Total Pressure (MPa)



2020-01-06 00:00:00 Relative Total Pressure (MPa)

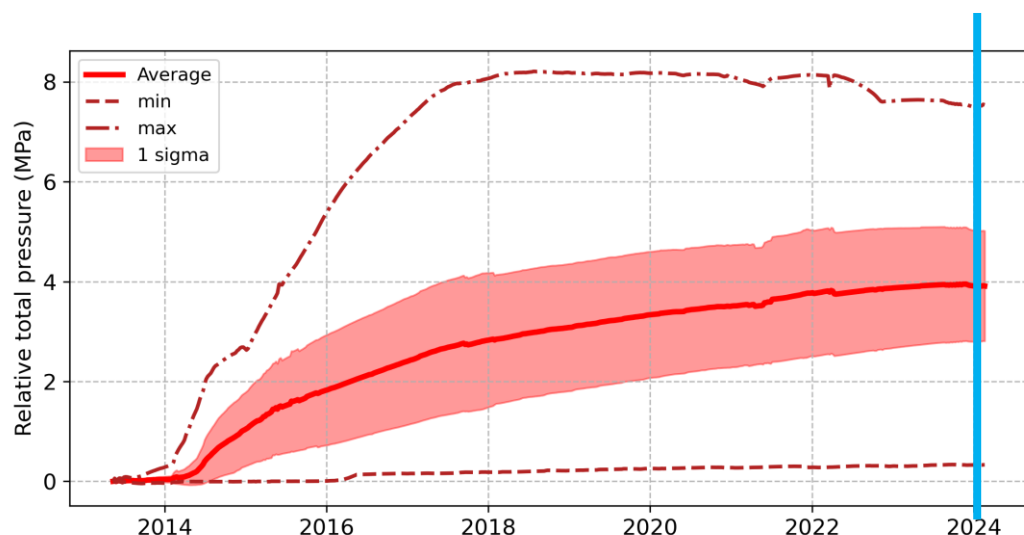


2020-01-06 00:00:00 Relative Total Pressure (MPa)

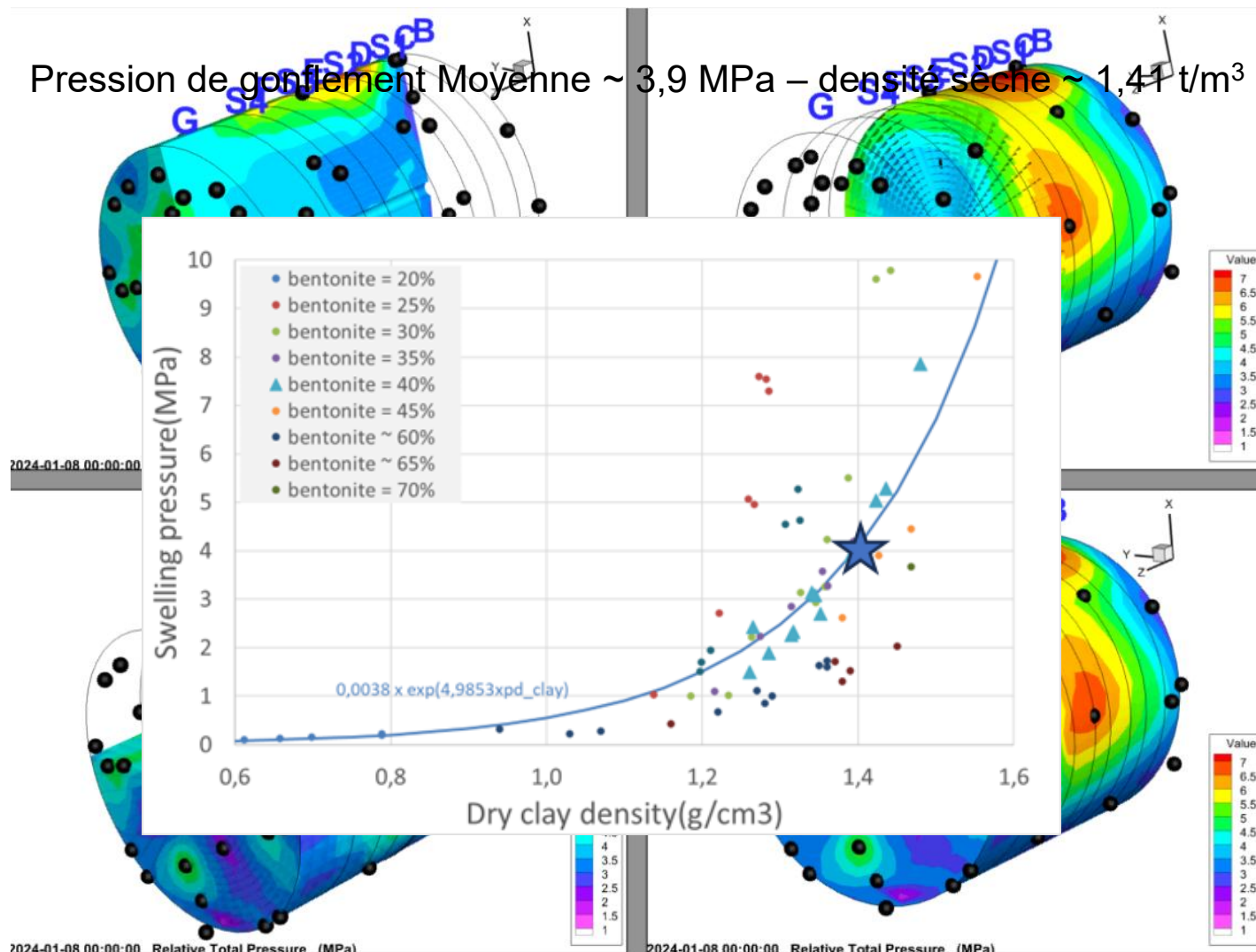
Évolution des contraintes en 3D

2024

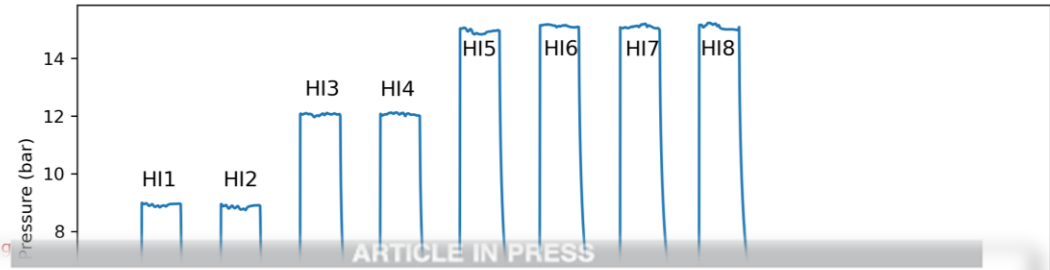
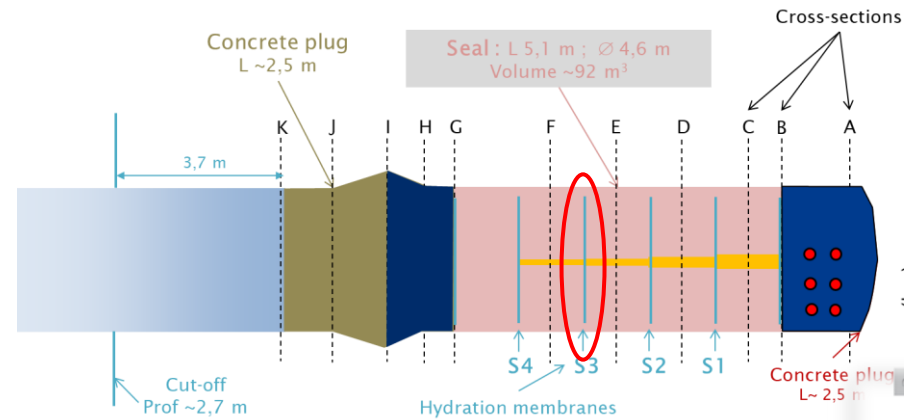
- La variation des valeurs de pression de gonflement dépend de la densité locale et du niveau d'hydratation
- Les pressions les plus élevées sont systématiquement enregistrées aux interfaces roche-argile
 - Combinaison de la convergence rocheuse et de l'hydratation locale



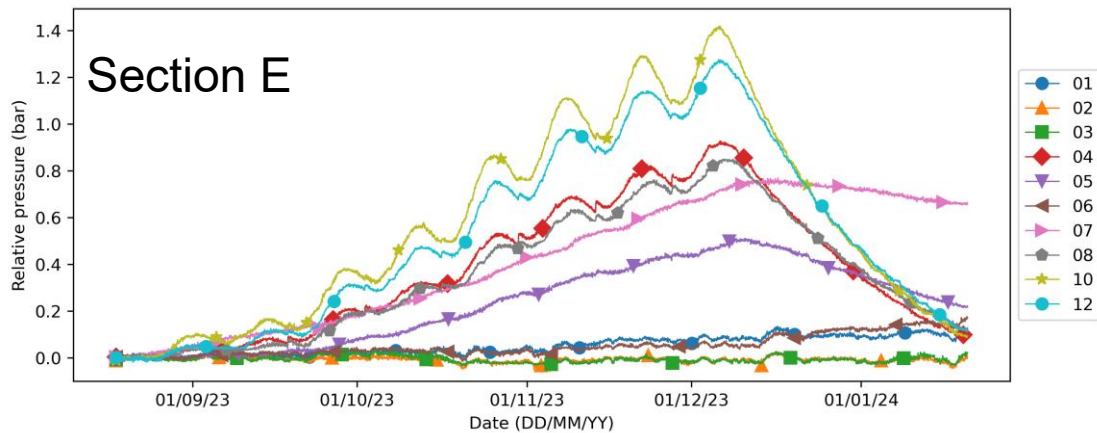
Pression de gonflement Moyenne ~ 3,9 MPa – densité sèche ~ 1,41 t/m³



NSC – tests hydrauliques



Injection membrane S3 et interferences sections E and F
Analyse des tests → $k = 2-8 \times 10^{-19} \text{ m}^2$
Les perméabilités NSC sont conformes aux spécifications de perméabilité à l'eau du matériau de scellement



Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering xxx (xxxx) xxx

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering

journal homepage: www.jrmge.cn

Full Length Article

More than ten years of hydration of an in situ large-scale sealing experiment (NSC), Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory, France

Rémi de La Vaissière^{*}, Jean Talandier

Andra, Scientific and Technological Division, Bure/Châtenay-Malabry, France

ARTICLE INFO

Article history:
Received 13 September 2024
Received in revised form 6 March 2025
Accepted 9 March 2025
Available online xxx

KEYWORDS
Engineering barrier system
Bentonite/sand mixture
Artificial hydration
Sensor performance
Hydraulic performance

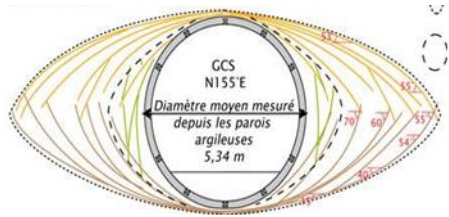
ABSTRACT

This article presents findings from an extensive experimental program conducted by the French Agency for the Management of Radioactive Waste (ANDRA) at its Underground Research Laboratory. The focus of the study is the NSC (Noyau de SCelllement) experiment, designed to assess the performance of a sealing core composed of a mixture of 40% bentonite and 60% sand. The objective is to evaluate in situ hydraulic permeability, swelling behavior, and gas performance of the seal, which are essential components for the safe disposal of Intermediate-Level (IL) and High-Level Radioactive Waste (HLW) in deep geological repositories. The experimental setup, construction details of the NSC experiment, and the timeline of the project, from excavation, construction of the seal, and artificial hydration to hydraulic permeability tests, are comprehensively described. Andra has acquired valuable expertise in constructing an engineered barrier system, encompassing concrete plugs, and efficiently assembling a 5-m-long seal. Over the past decade, a controlled water injection process has been employed to hydrate the seal. The operational efficiency of sensors has been evaluated, with pore pressure sensors exhibiting moderate performance. In contrast, others, including total pressure, capacitive humidity, psychrometric humidity, and saturation sensors, demonstrate excellent performance up to their operational limits. The high-quality data obtained from this experiment will facilitate the modeling of the resaturation and hydraulic-gas performance of the seal.

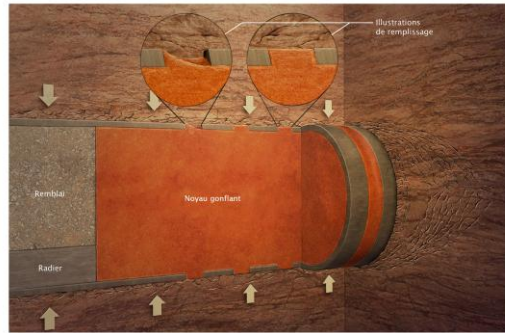
© 2025 Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

La modélisation des ouvrages ou la prédiction à long terme du comportement HMC

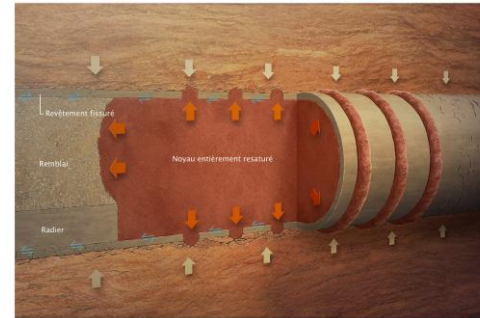
➔ Une évolution sur la durée de vie du stockage



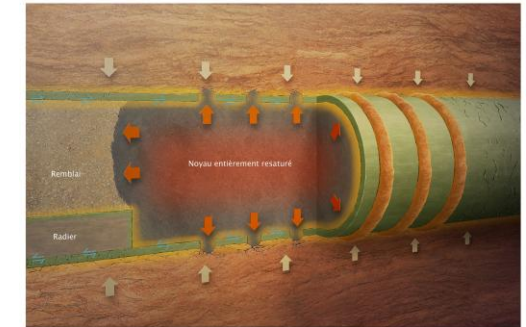
Excavation et phase d'exploitation



Fermeture du stockage



Saturation et gonflement du noyau
Production de gaz



Evolution chimique

150y

1e6 y

Un des seuls composants ouvrages qui doit remplir ses fonctions sur la toute la durée de vie du stockage

- Montrer la robustesse des modèles
- Disposer de modèles couvrant l'ensemble des situations

- Une caractérisation multi-échelles des matériaux de remblai et de scellement
- Détermination des paramètres pour les modélisations HMC-gaz
- Apporter les éléments de compréhension sur les processus physiques

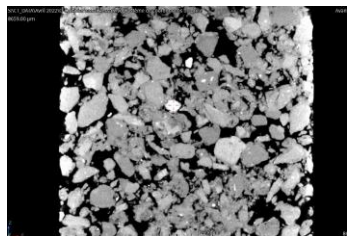
Stratégie expérimentale

Microstructure (nm → μm)

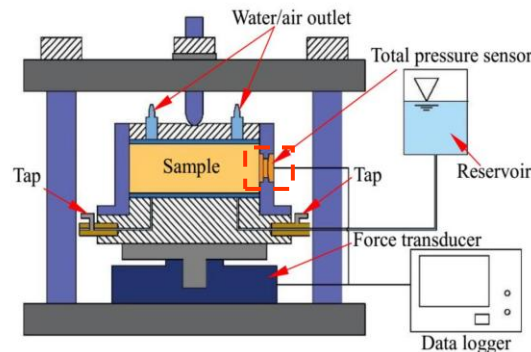
Caractérisation sur échantillons (cm → dm)

Maquettes (dm → m)

Démonstrateurs

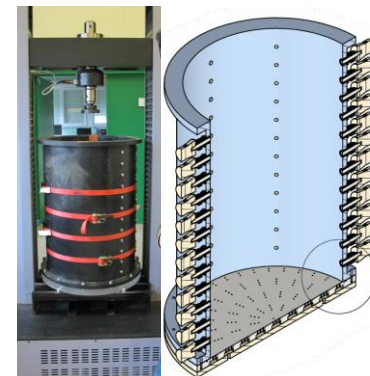


Microstructure, relation micro/macro

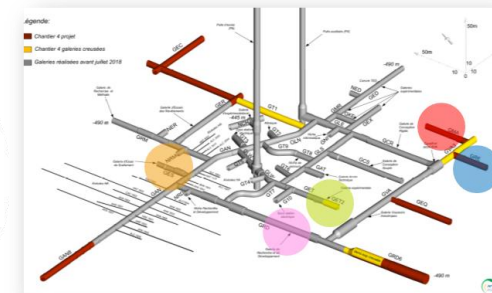


Comportement HMC-gaz

Acquisition de paramètres et calage des modèles



Effets d'échelle



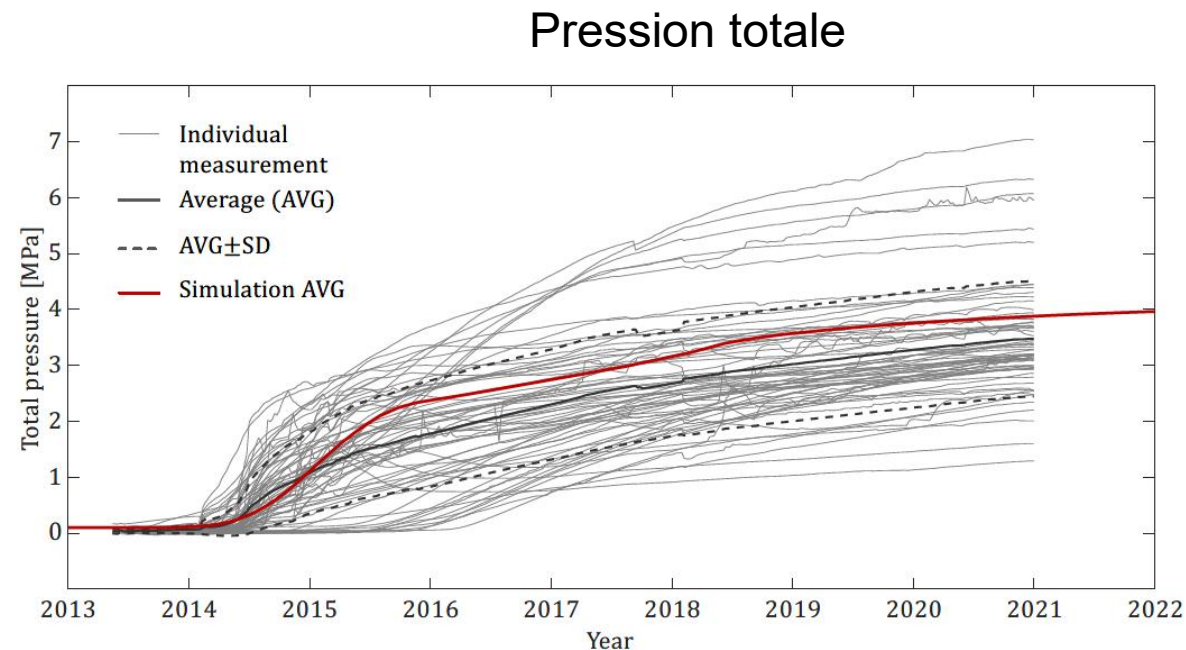
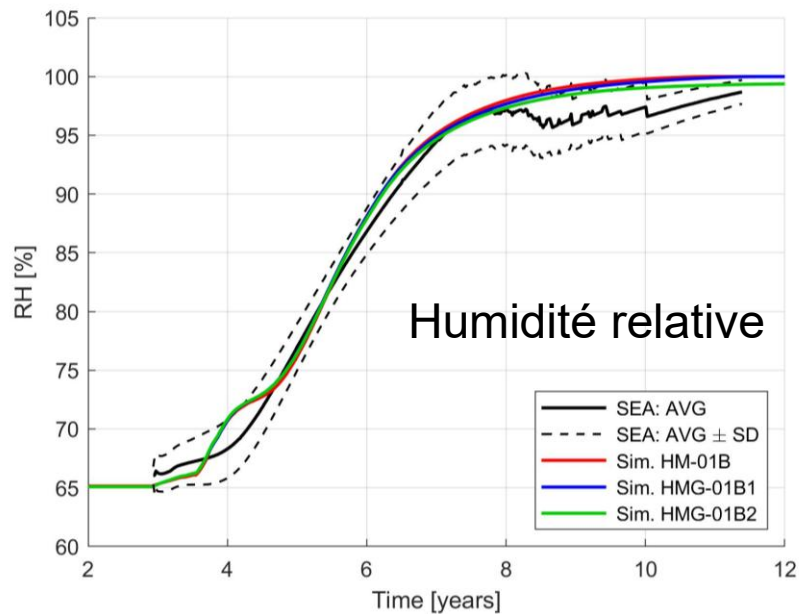
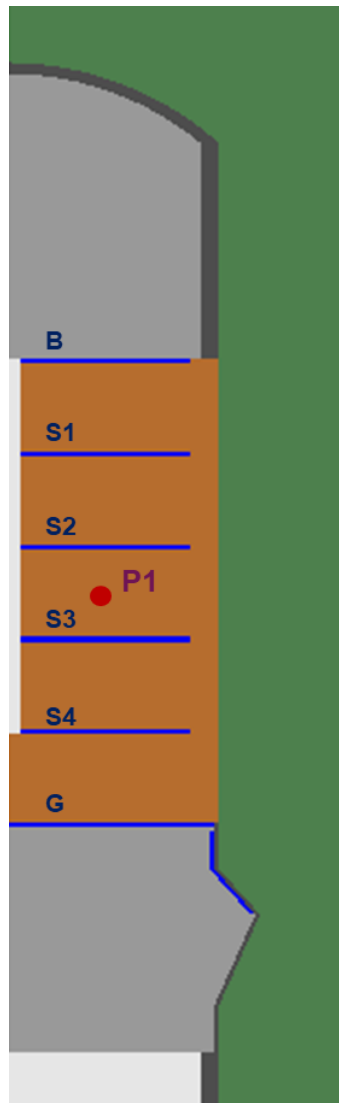
Dimensionnement/Prediction/calage/interprétation

Identification des processus

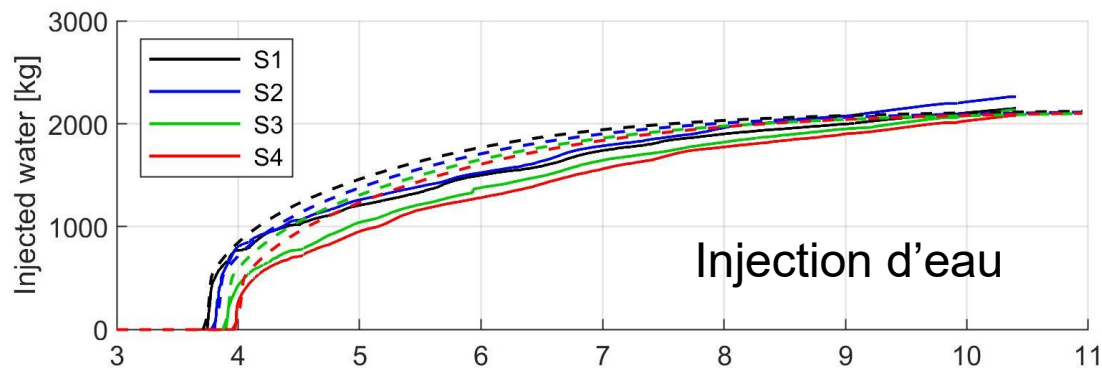
Stratégie de modélisation



Modélisation des ouvrages du stockage

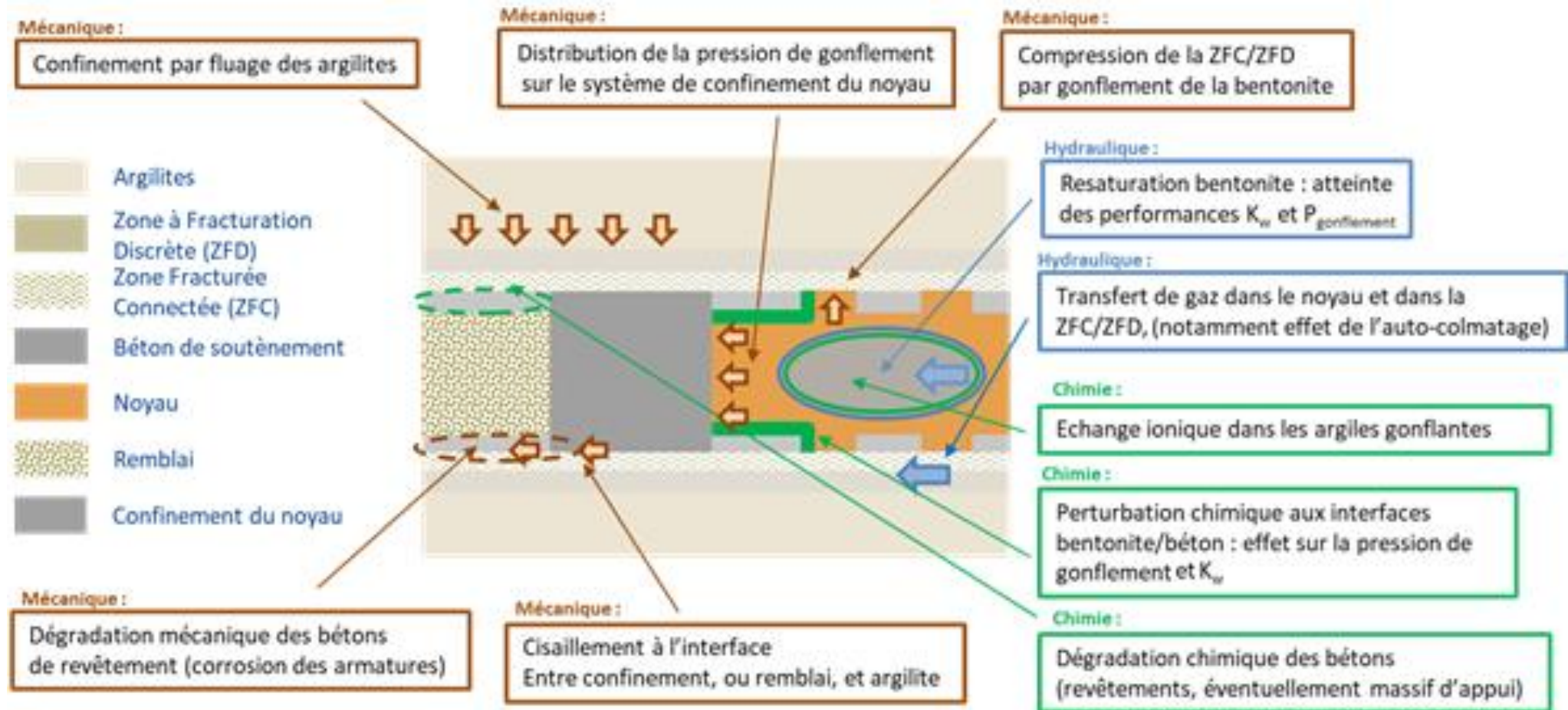


Alonso, 2025



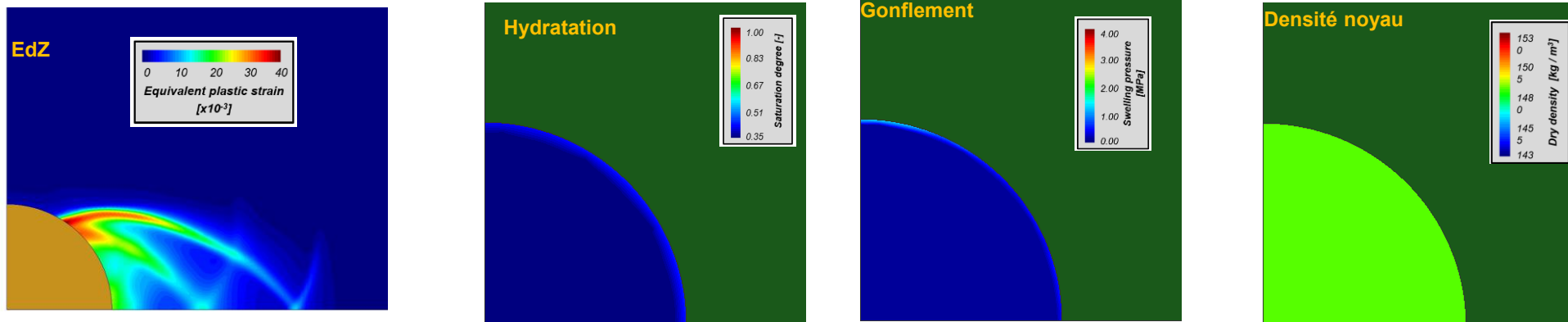
- Code_Bright (UPC)
- Modèle BExM pour la bentonite
- Phases considérées dans le modèle
 - Excavation du tunnel
 - Phase d'attente (ventilation)
 - Installation du noyau de bentonite
 - Hydratation

Une problématique **multi**processus, **multi**-matériaux et **multi**dimensionnelle



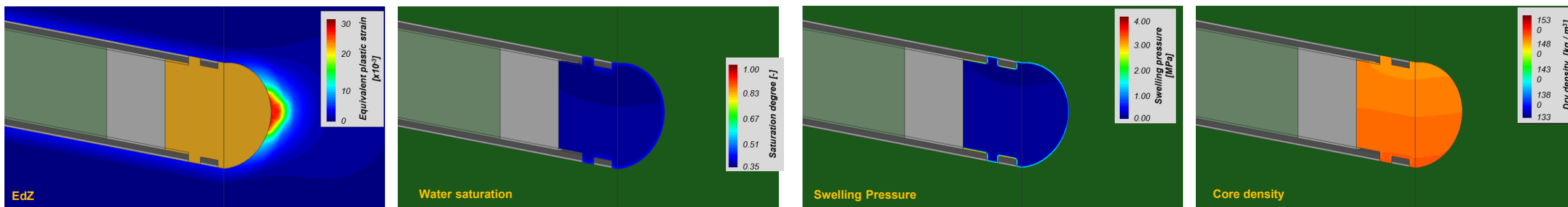
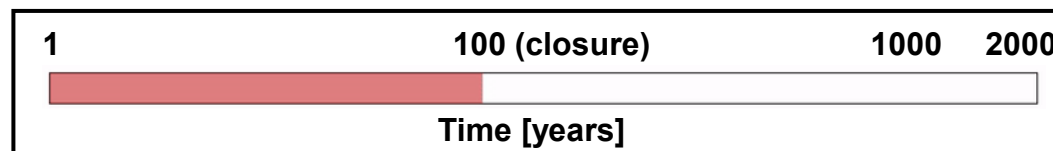
Des choix de modélisation pour une démarche progressive

Exemple de modélisation 2D et 3D



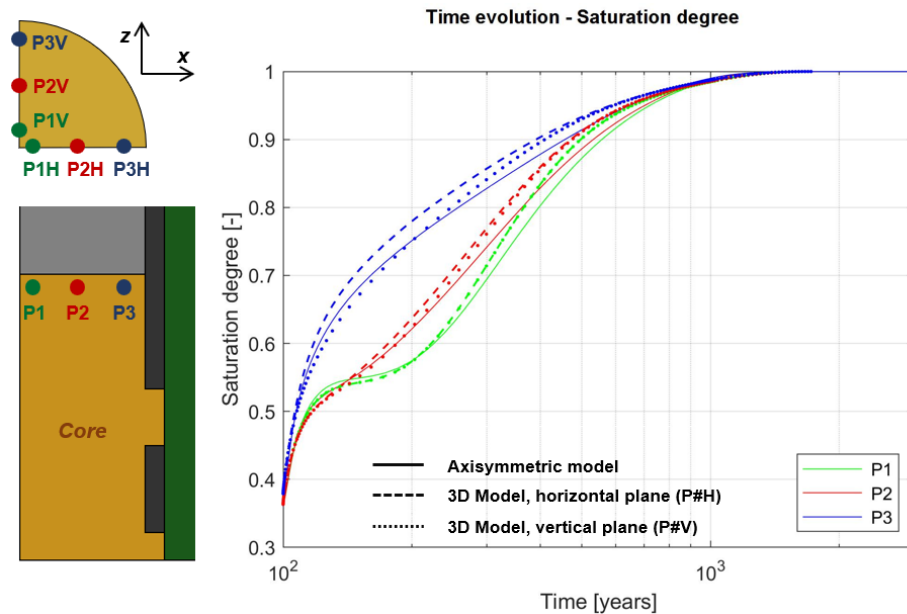
Modélisations 2D depuis le creusement jusqu'à la saturation du noyau

Modélisations scellement avec massif d'appui 3D

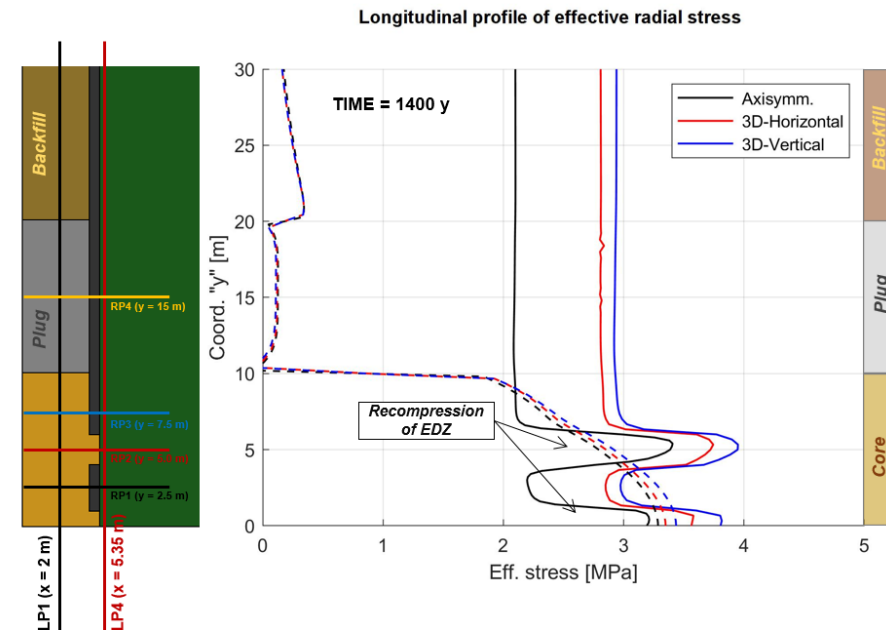


UPC - Alonso et al. (2022); Alonso et al. (2023)

Comparaisons 2D axisymétrique/3D



Evolution de la saturation en eau



Evolution de la pression de gonflement

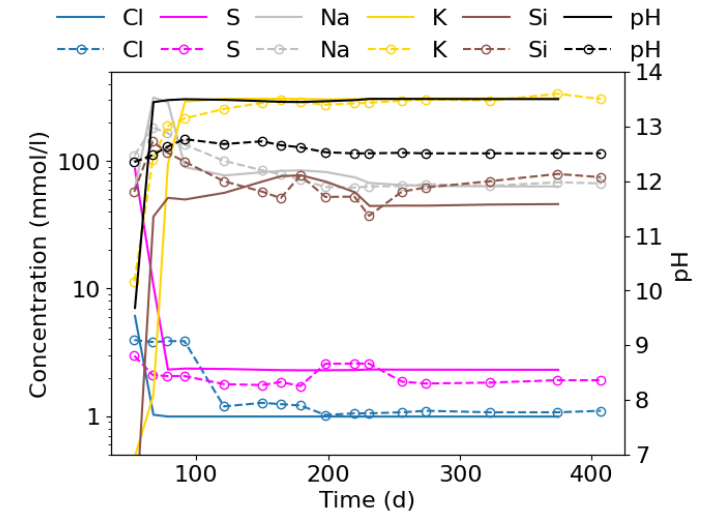
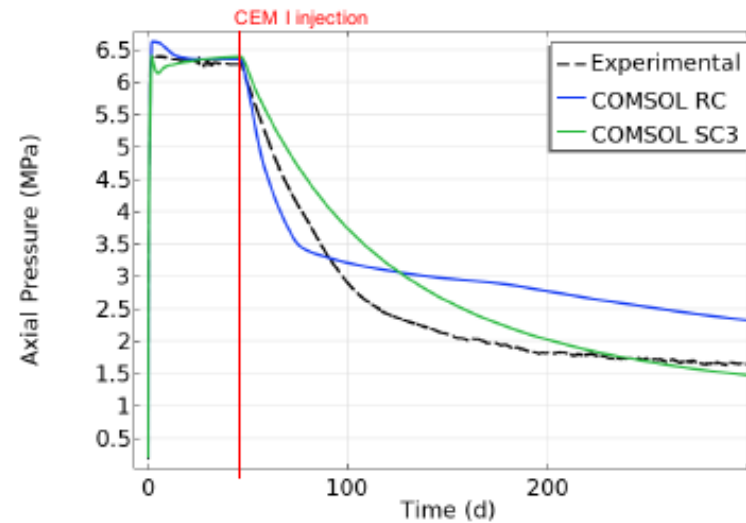
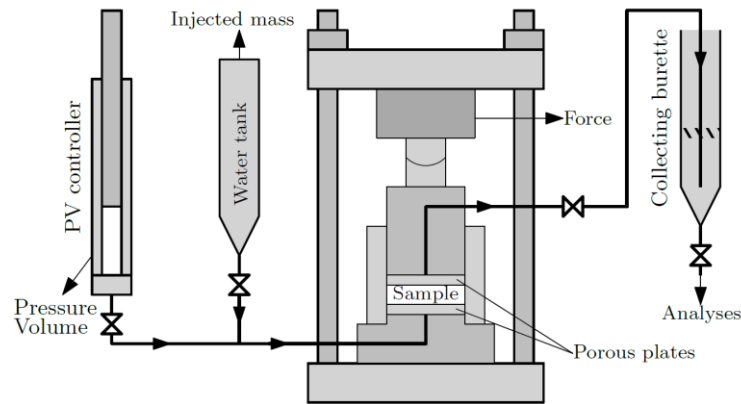
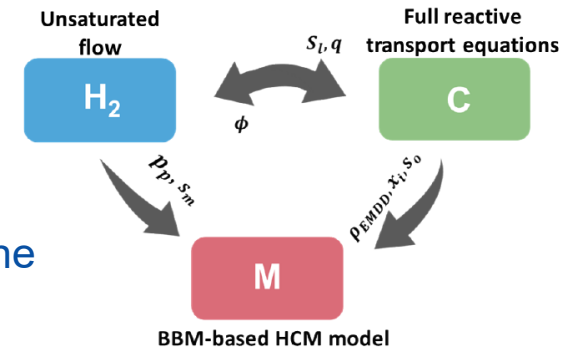
- Valide l'utilisation d'une géométrie 2D axisymétrique
- Montre la possibilité si nécessaire de modéliser une géométrie plus complexe

Objectifs

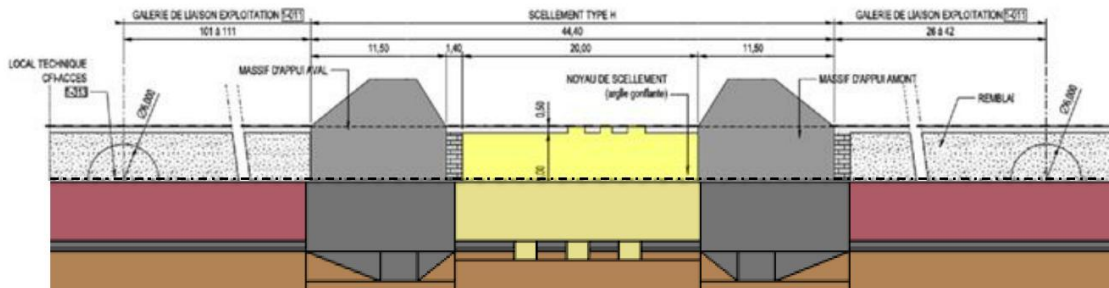
- Qualifier/Quantifier les mécanismes chimiques pouvant impacter le gonflement du noyau argileux
- Intégrer ces mécanismes dans des évaluations à l'échelle de Cigéo

Démarche mise en œuvre

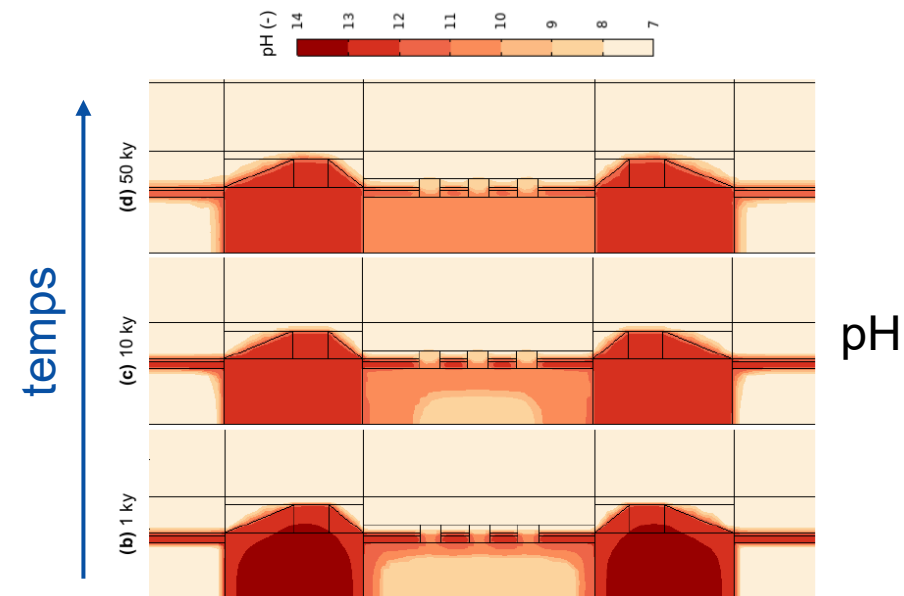
- Simulations HCM pour reproduire des expériences de gonflement sous perturbation alcaline
- Simulations HCM à l'échelle de Cigéo



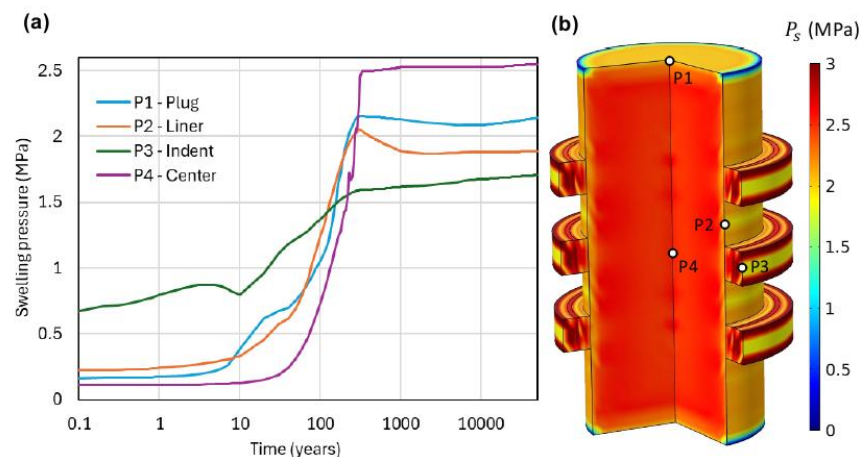
Simulation à l'échelle de Cigéo



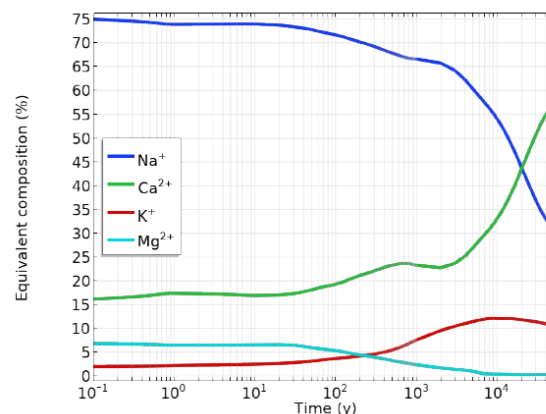
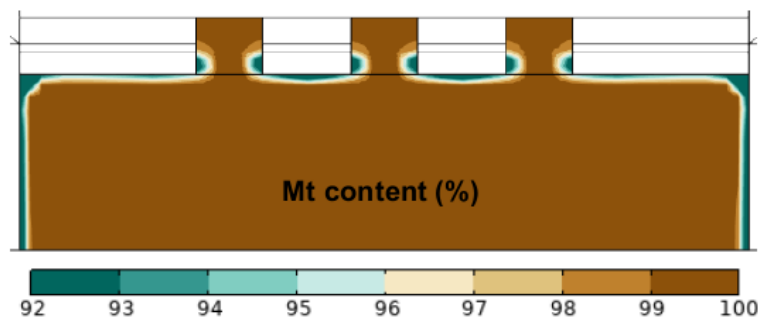
- Des transformations minéralogiques peu étendues
- Une modification durable et en profondeur des échanges d'ions
- Un effet combiné de transformations chimiques, fluage de la roche à long terme et du gonflement du matériau à base d'argile gonflante



Pression de gonflement



Teneur en montmorillonite (50 000 ans)



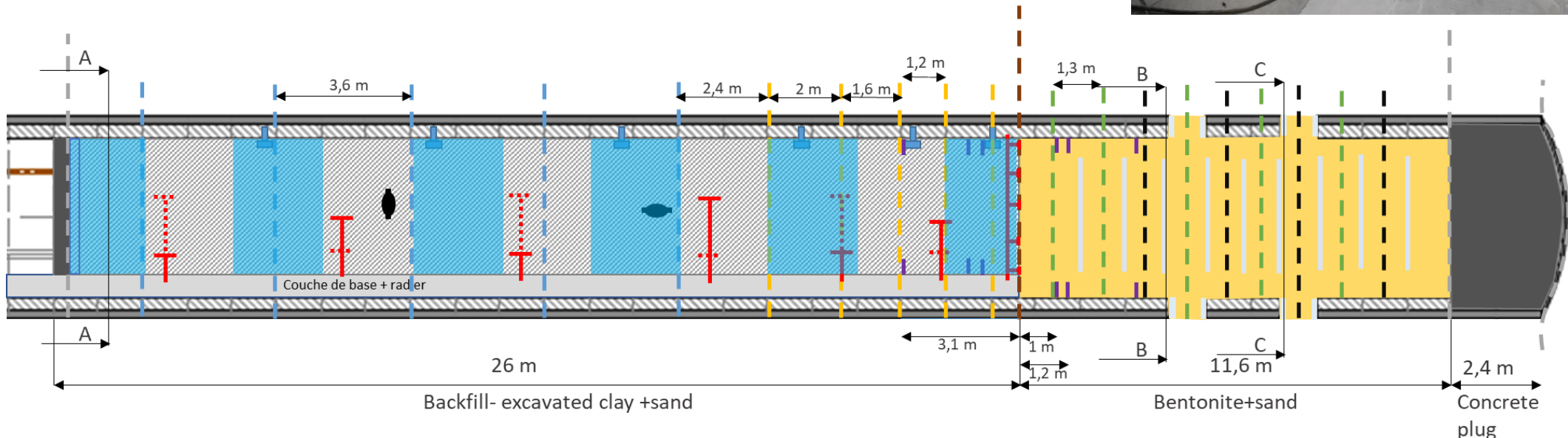
Expérimentation SSM

Scellement sans massif d'appui

Objectif : Valider la solution technique sans massif d'appui en béton

- Identifier d'éventuels problèmes lors de la mise en place
- Suivi de l'évolution hydromécanique lors de l'hydratation
- Evaluation du déplacement de l'interface remblai/noyau de scellement
- Tests de performance à l'eau et au gaz après l'hydratation

→ mise en place 2026 et hydratation 2027/2037

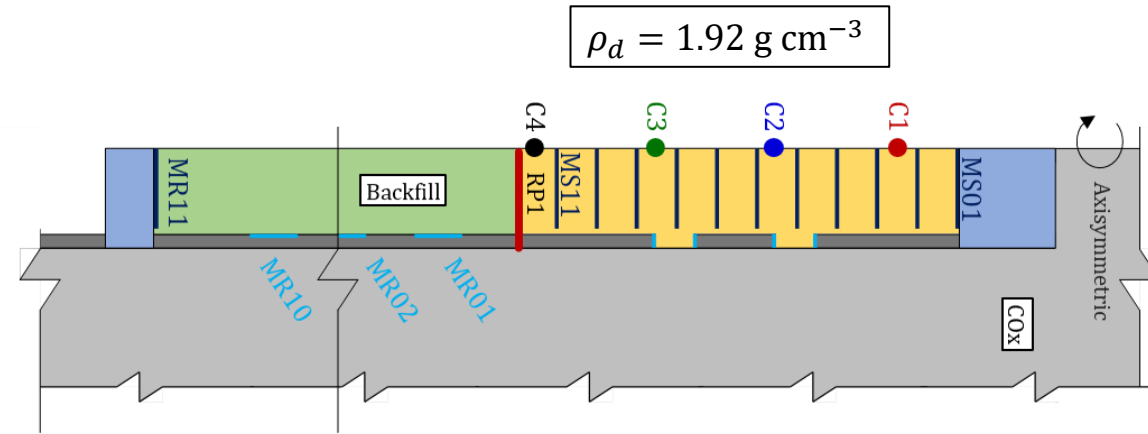
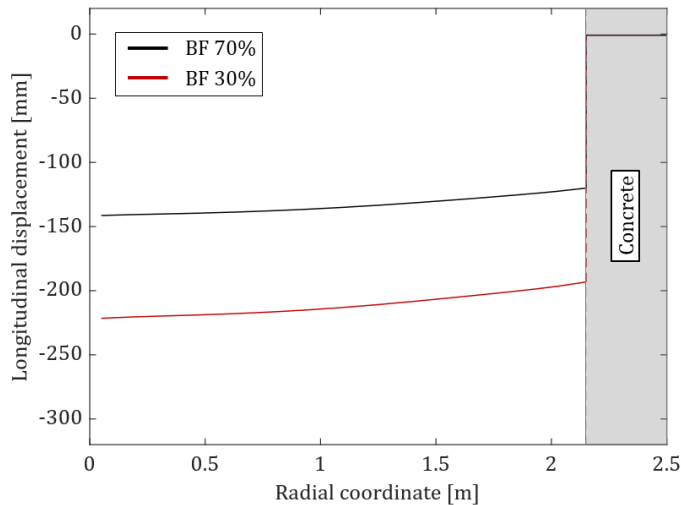


Temps de saturation totale ~ 10 ans
(équilibre hydraulique-mécanique)

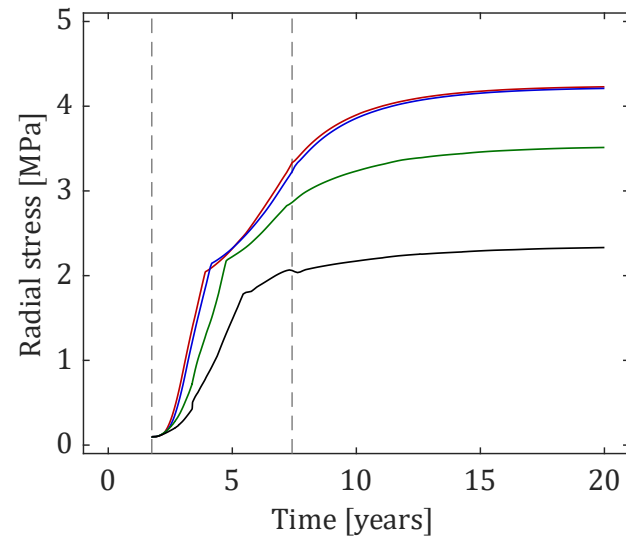
Déplacement de l'interface
pour deux types de remblais

- 70% Cox - 30% sable
- 30% Cox - 70% sable

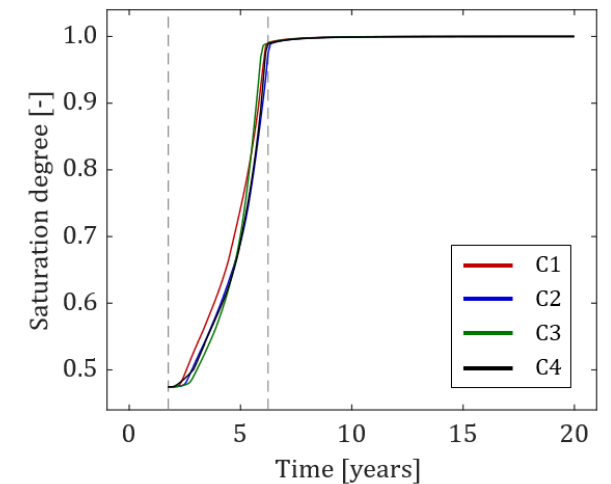
→ 25 cm au maximum



Pression totale radiale



Saturation en eau



Comment relever les défis scientifiques et technologiques liés à la fermeture de Cigéo ?

Programme ambitieux autour de démonstrateurs à grande échelle dans le laboratoire souterrain et dans Cigéo

- Démontrer la capacité de l'Andra à réaliser un scellement et à remblayer une galerie conformément aux spécifications requises
- Essais de performance à grande échelle des scellements et du remblai (essais de gaz et d'eau)

Caractérisation et choix

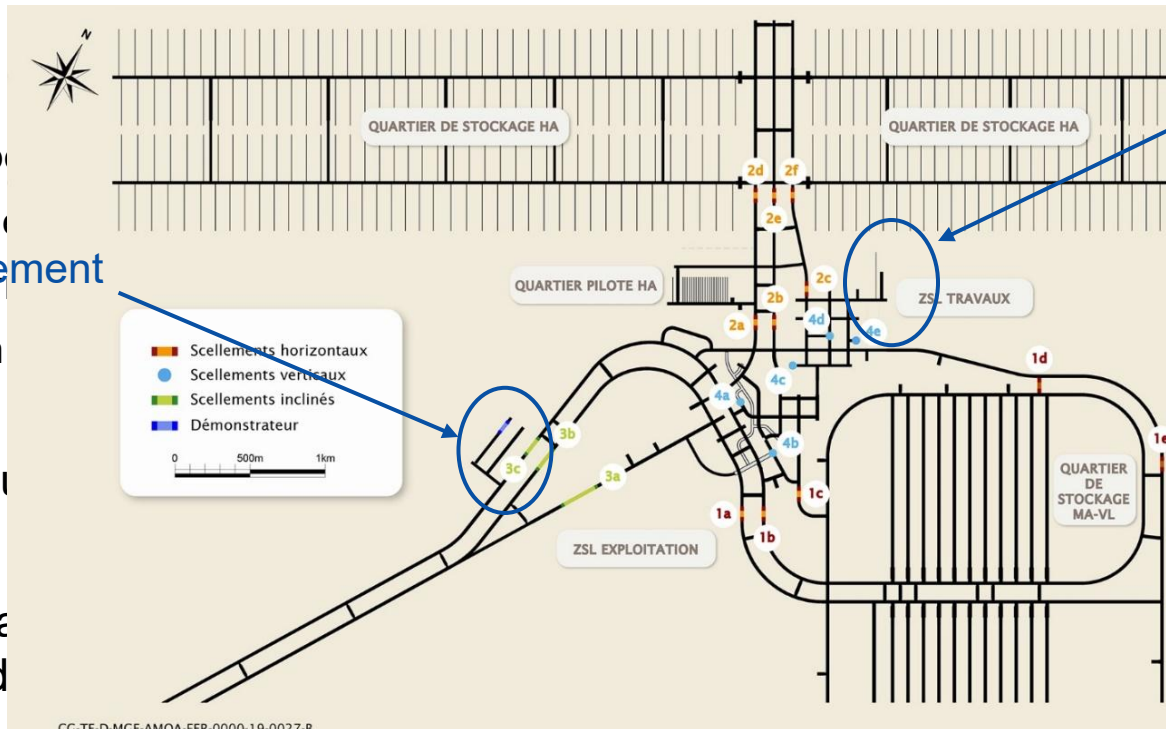
- Choix du type de b
- Définition de la ten
- Mesures des propr
- Définition du béton

Démonstrateur de scellement horizontal

Méthodes de contrôle qu

Programme de modélisa
fermeture sur la durée d

- Calibrage/validation du modèle numérique / comparaison avec les résultats expérimentaux et entre les modèles
- Participation à des benchmarks internationaux tels que DECOVALEX ou dans des programmes européens



Démonstrateur de scellement horizontal

ayage), bentonite/sable (scellement)

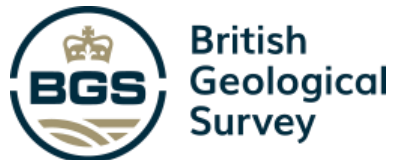
ués et après la mise en place

lire l'évolution des composants de

Les partenaires de l'Andra



AMPHOS²¹



Merci de votre attention

Rémi de La Vaissière, Minh Vu, Youssef Fawaz, Christophe de Lesquen, Jana Jaber, Roy Chaaya,
Benoit Cochepin, Gilles Armand