

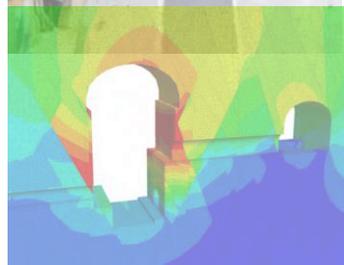
*Transitions et Perspectives*

# Rôle de la modélisation numérique en géotechnique dans le contexte de transition énergétique

Rima Ghazal  
ITASCA Consultants



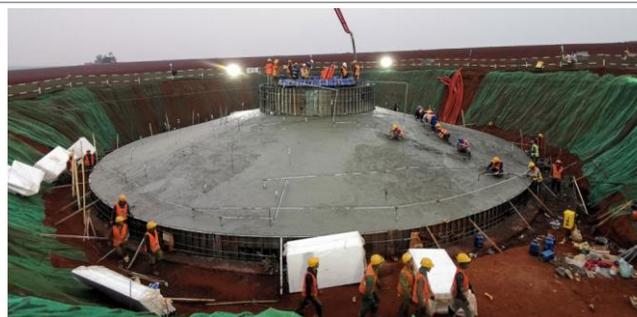
14 juin 2023



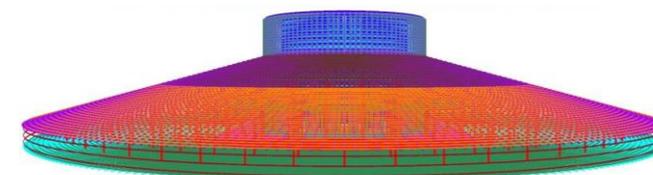
# Sol et sous-sol, alliés de la transition énergétique



Fondations  
Renforcement du sol



Fondation d'une éolienne

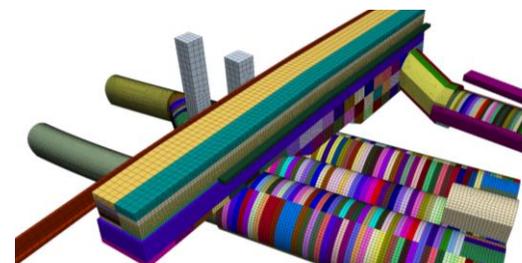


Modèle numérique de la fondation

10-100m  
Réseau de métro  
Tunnels

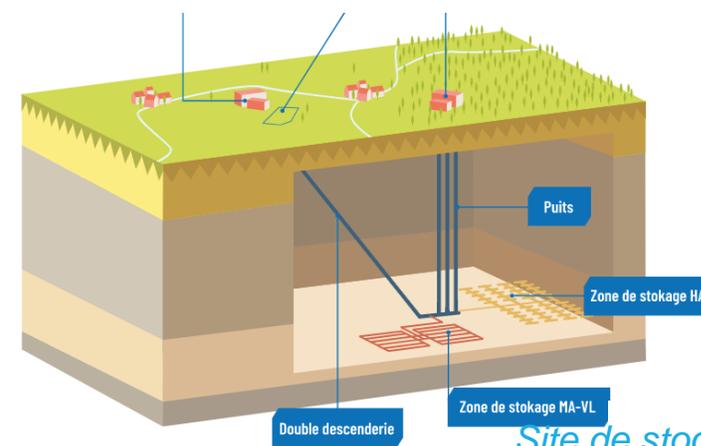


Grand Paris (extension de la ligne du RER E)

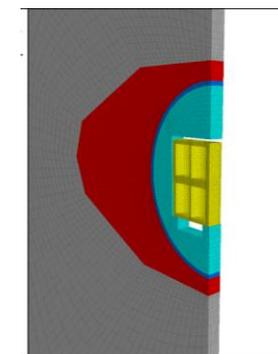


Phasage d'un réseau de tunnels

400-800m  
Stockage souterrain (déchets nucléaires, gaz, CO2)  
Géothermie profonde  
Centrales hydro-électriques souterraines  
Excavations minières (métaux et terres rares, lithium, ...)



Site de stockage CIGEO

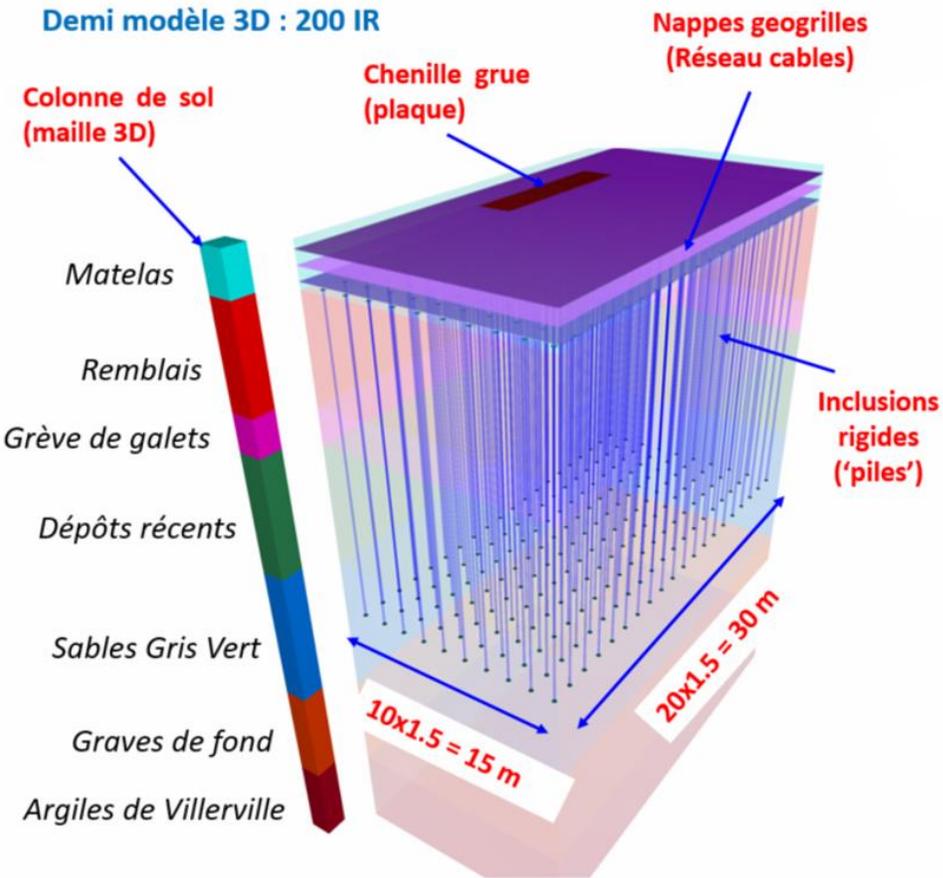


# Défis de la transition énergétique en géotechnique – Quelques exemples ...

- **Energie éolienne:** chargement important appliqué sur le sol sur le chemin des grues lourdes transportant le matériel
- **Extension des réseaux de transport souterrains:** limiter le tassement en surface en milieu urbain et l'impact sur les ouvrages déjà existant
- **Centrales hydro-électrique souterraines:** stabilité et soutènement des ouvrages souterrains à grande profondeur
- **Géothermie profonde et cavités de stockage:** connaissance du sous-sol et prise en compte de phénomènes couplés : THM
- **Enfouissement de déchets radioactifs :** problématiques de stabilité et sécurité à très long terme des stockages (100 000 ans)

**La modélisation numérique est un outil clé pour les études en géotechnique lorsque les approches classiques ou empiriques ne sont pas applicables**

# Energie eolienne – renforcement du sol par inclusions rigides



Grue se déplaçant vers un parc éolien

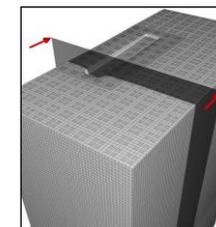
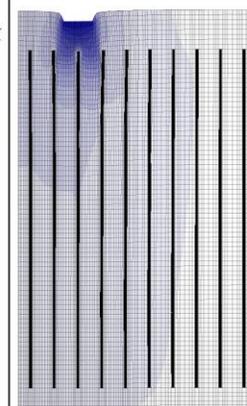
Le niveau de la contrainte s'exerçant sous les chenilles des grues étant supérieur aux niveaux usuels des projets de renforcement de sol, le recours à une modélisation numérique (logiciel *Flac3D*) est nécessaire.

### Objectifs :

- Comprendre et évaluer les mécanismes de transfert de charge se développant dans le matelas
- Estimer les tassements associés
- Justifier la section en béton des inclusions rigides

FLAC3D 7.00  
©2022 Itasca Consulting Group, Inc.

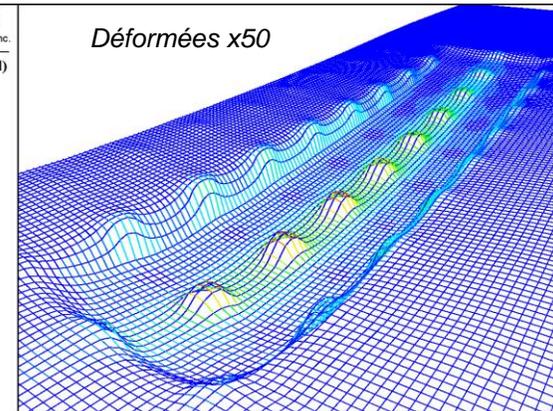
Zone Z Displacement
0.0000E+00
-5.0000E-03
-1.0000E-02
-1.5000E-02
-2.0000E-02
-2.5000E-02
-3.0000E-02
-3.5000E-02



Déformées x25

FLAC3D 7.00  
©2022 Itasca Consulting Group, Inc.

Traction géo grille (kN/ml)
5.0000E+01
4.5000E+01
4.0000E+01
3.5000E+01
3.0000E+01
2.5000E+01
2.0000E+01
1.5000E+01
1.0000E+01
5.0000E+00
0.0000E+00



Déformées x50

- Renforcement du quai par
- Inclusions rigides
  - Plateforme de transfert de charges (matériau granulaire armée par trois nappes de géogrilles)

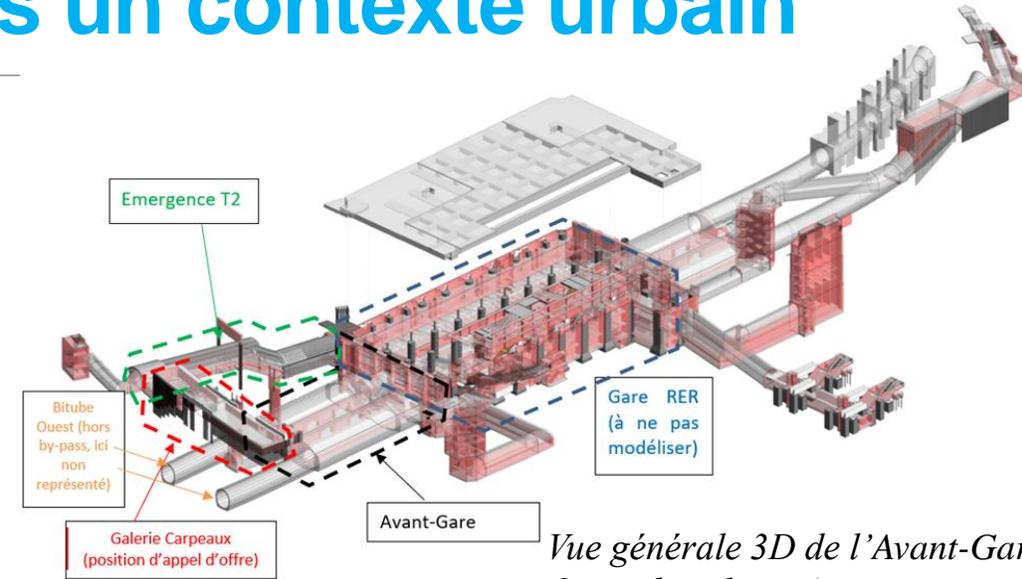
# Extension du réseau de métro dans un contexte urbain

Dans le contexte du Grand Paris, projet d'excavation de la gare du RER E sous la défense (groupement VINCI-SPIE)

## Complexité de l'avant-gare Ouest :

- Phasage : 70 étapes principales
- Nombreuses structures avoisinantes : ligne T2, fondation du bâtiment CNIT et de son parking

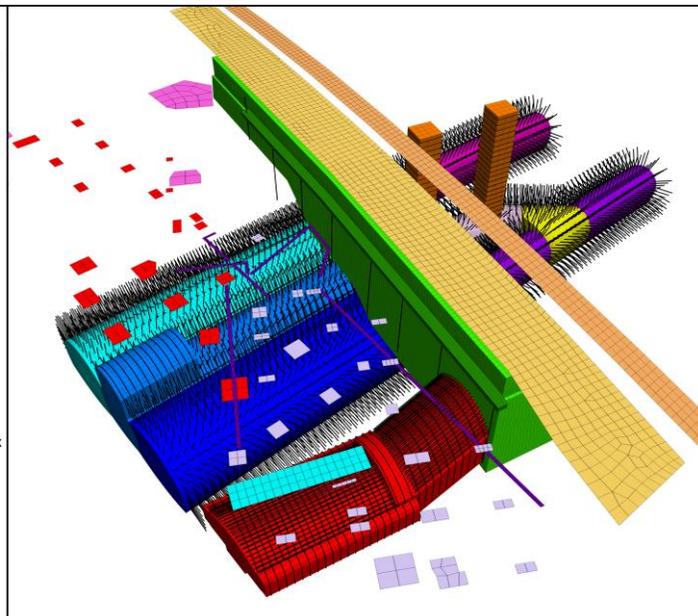
**Objectif :** estimer les tassements induits afin de valider le phasage et le système de soutènement choisi.



Vue générale 3D de l'Avant-Gare Ouest dans le projet

FLAC3D 6.00  
©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

- Zone Group Slot galerie**
- AG V1
  - AG V2
  - AG centrale
  - Ascenseur 10
  - Ascenseur 11
  - Bypass
  - Carpeaux
  - Connexion
  - Emergence T2
  - Niche CNIT
  - Niche T2
  - Tube 1
  - Tube 2
  - chapelle
- ID Structural elements**
- 1D structural elements
- Loading surfaces**
- Longrine
  - Semelle CNIT
  - Semelle S5
  - Semelles abord Carpeaux
  - Semelles loins Carpeaux
  - T2
  - rue Carpeaux

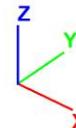
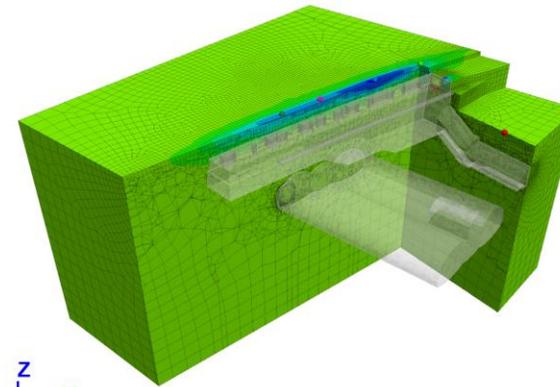


Maillage et charges surfaciques

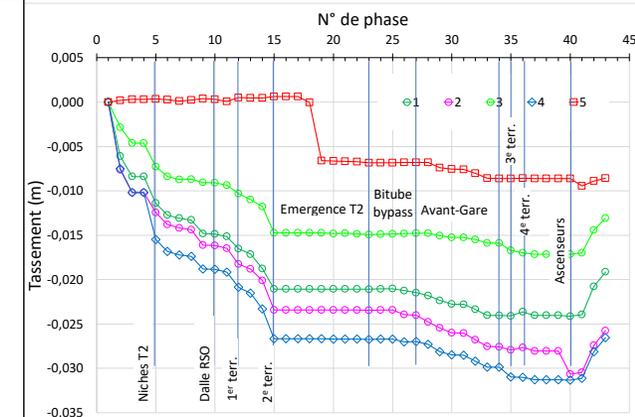
FLAC3D 6.00  
©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

## 01\_Carpeaux\_niches\_T2

- Excavations**
- Cut Wedge: on front
  - excav\_wo\_niches
  - niches
- Displacement Z**
- Cut Wedge: on back
  - 1.2201E-02
  - 7.5000E-03
  - 2.5000E-03
  - 2.5000E-03
  - 7.5000E-03
  - 1.2500E-02
  - 1.7308E-02
- Points**
- 1
  - 2
  - 3
  - 4
  - 5



Evolution des déplacements aux différents phasages

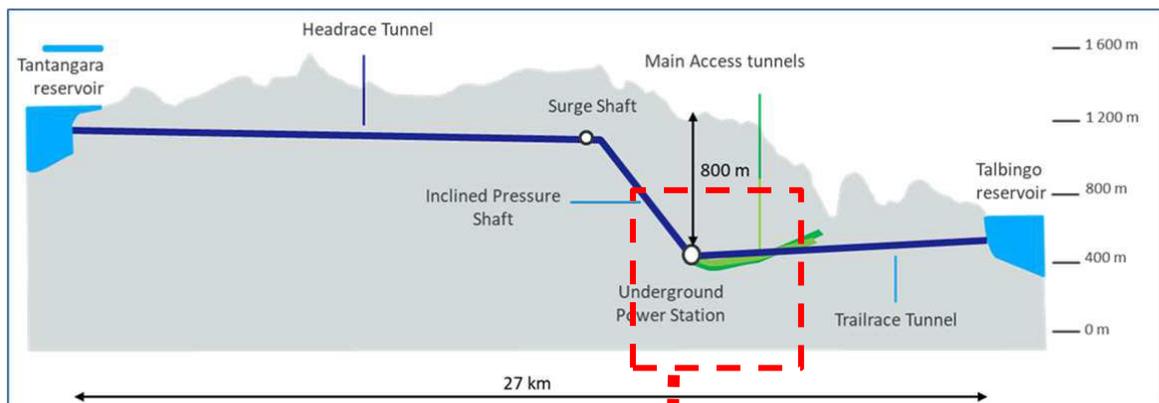


Tassements de quelques points sur la voie T2

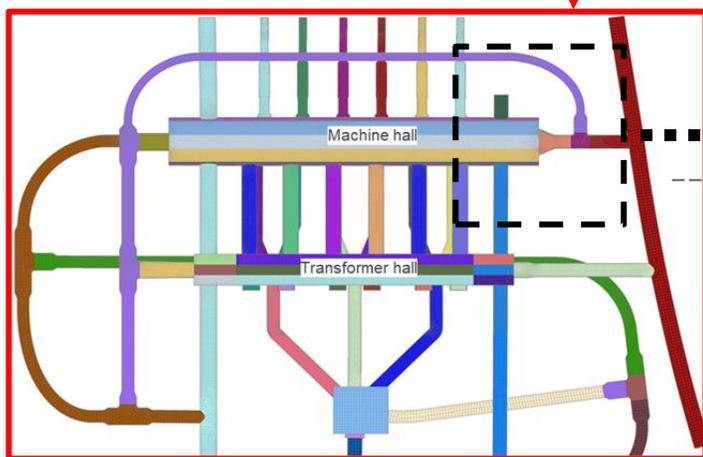
# Centrale hydro-électrique souterraine

Projet de centrale hydro électrique souterraine avec deux cavernes larges (~50m x 30m) et l'existence de joints pré-cisaillés. **Objectifs** de la modélisation numérique discrète (logiciel 3DEC) :

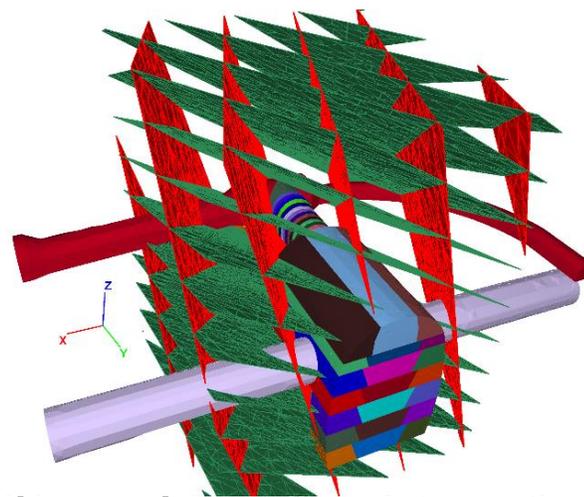
- Evaluation de la stabilité
- Justification du soutènement
- Impact de la présence des joints rocheux sur le comportement de la masse rocheuse



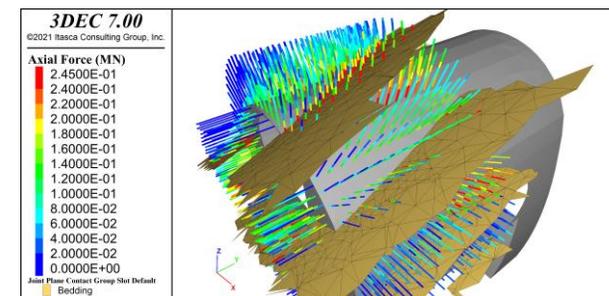
Station de pompage-turbinage de 2000 MW reliant deux réservoirs



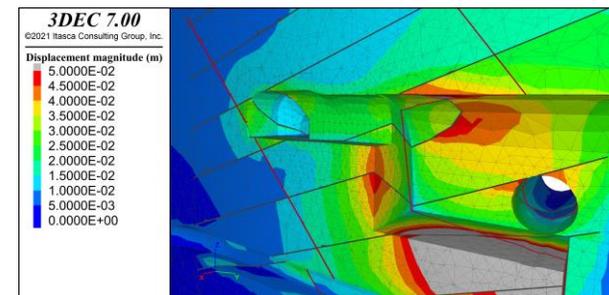
Complexe usinier à 800m de profondeur comprenant deux larges cavernes



Modèle numérique d'une intersection entre une caverne et les tunnels d'accès avec prise en compte du phasage d'excavation



Efforts dans les boulons



Contour des déplacements et influence des joints pré-cisaillés

# Modélisation HM du sous-sol fracturé

Stockage de déchets radioactifs en milieu cristallin (roche fortement fracturée et anisotrope) dans les pays scandinaves.

**Objectif** : caractériser la barrière géologique environnante pour s'assurer de son étanchéité à travers un processus de modélisation basé sur l'approche DFN



Affleurement à Aspö en Suède

$$K_{eq}(\theta)$$

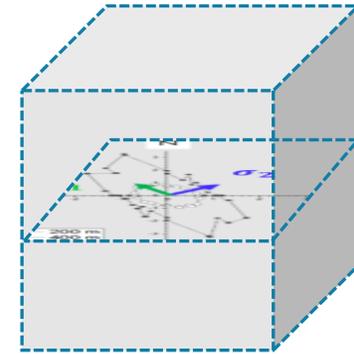
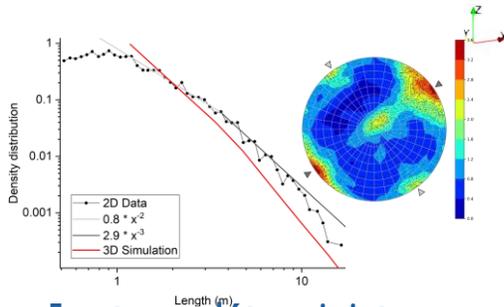
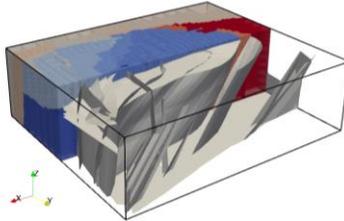
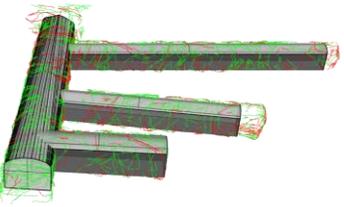
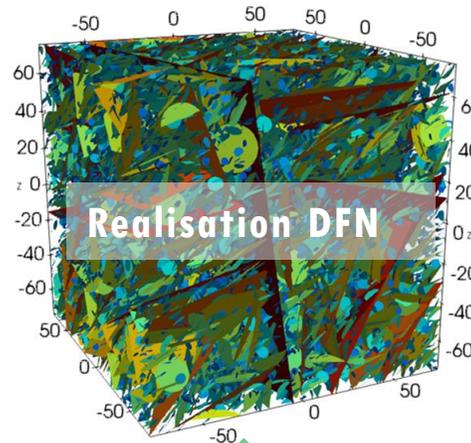


Illustration en 2D



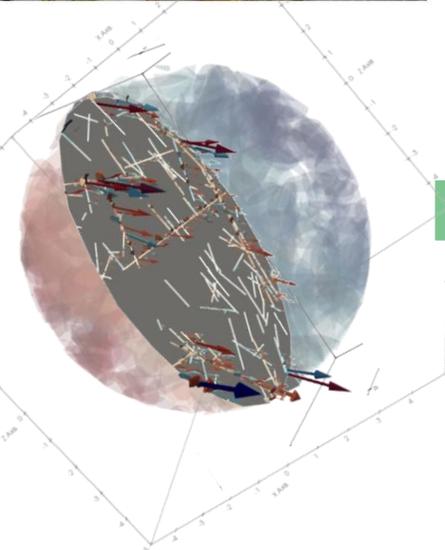
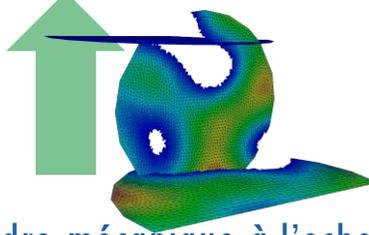
Données de reconnaissance in situ et de forage

Fractures déterministes et stochastiques  
Modèles statistiques



Couplage hydro-mécanique à l'échelle de chaque fracture

- Estimation des contraintes
- Loi de transmissivité  $T$  en fonction de la contrainte normale  $\sigma_n$

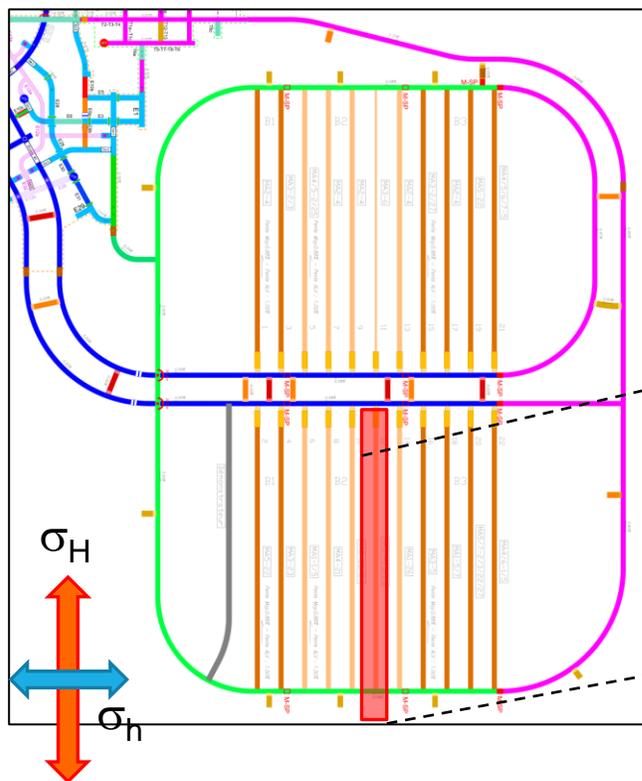


Simulation de flux dans toutes les directions

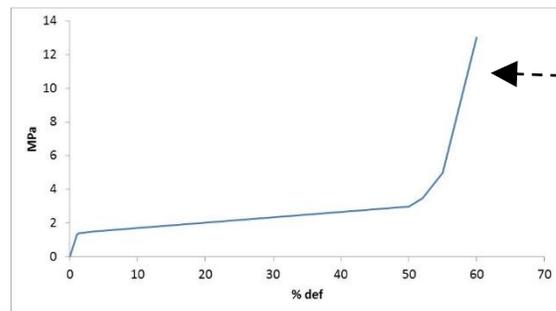
Estimation de la perméabilité équivalente  $K_{eq}(\theta)$

# Enfouissement des déchets radioactifs (cas de CIGEO)

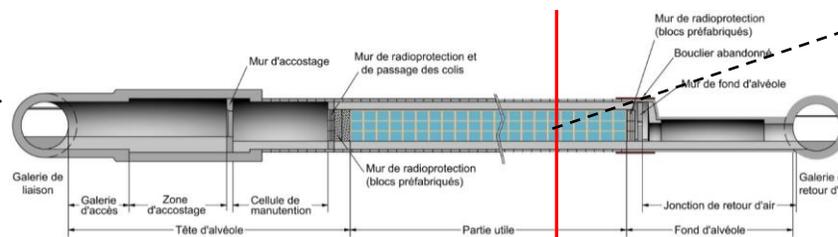
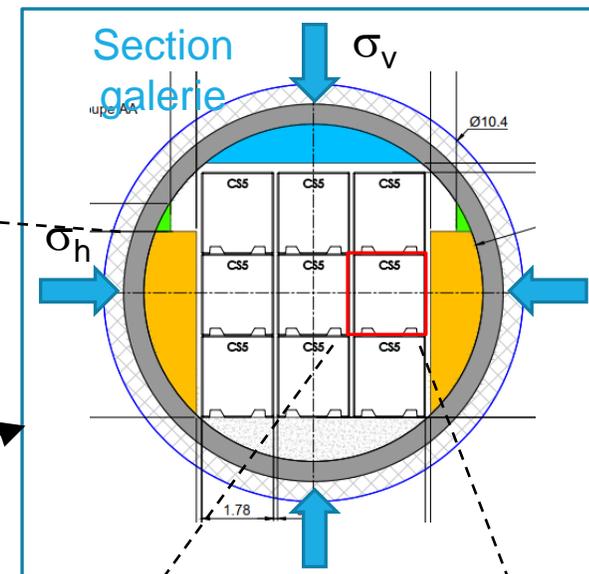
Quartier MA-VL



Comportement du matériau compressible



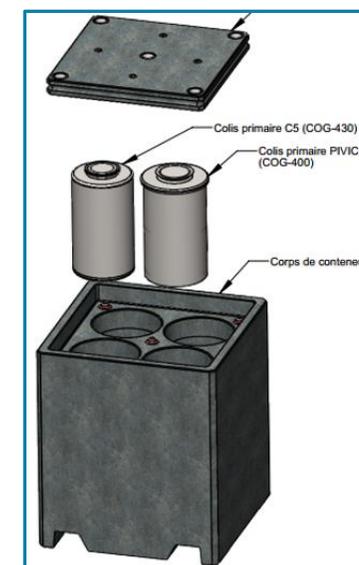
Voussoir compressible



Galerie de stockage

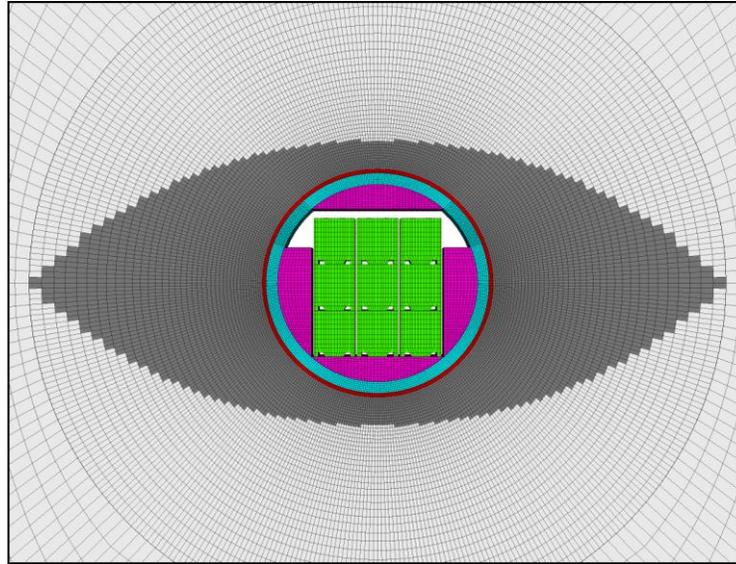
## Objectifs

- Comportement à long terme du site de stockage de déchets MA-VL (100k-ans)
- Effet du fluage de l'argillite et conséquences sur la tenue des voussoirs
- Estimation du moment de rupture des voussoirs
- Estimation des effets de température et d'eau sur le comportement de l'argillite
- Analyse de sensibilité (géométrie des alvéoles de stockage)

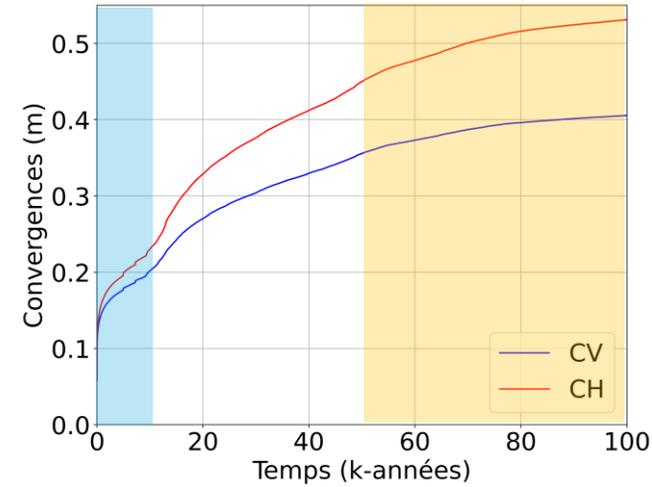


Colis de stockage

# Enfouissement des déchets radioactifs

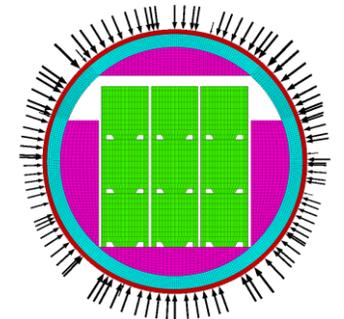
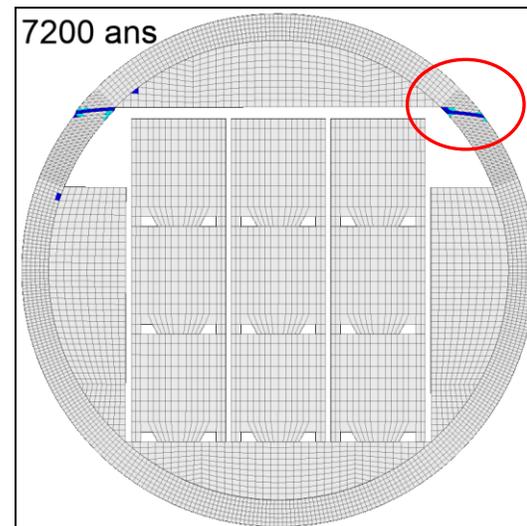
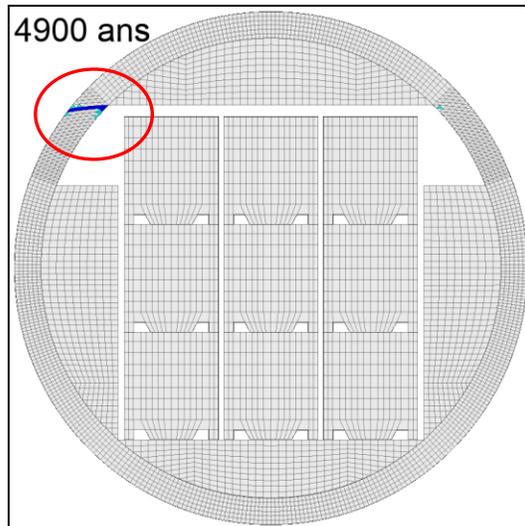
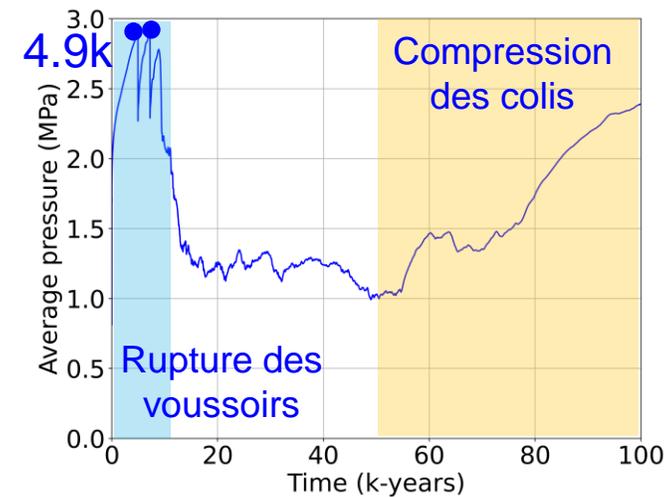


Convergence (0-100kans)



7.2k

Pression appliquée (0-100kans)



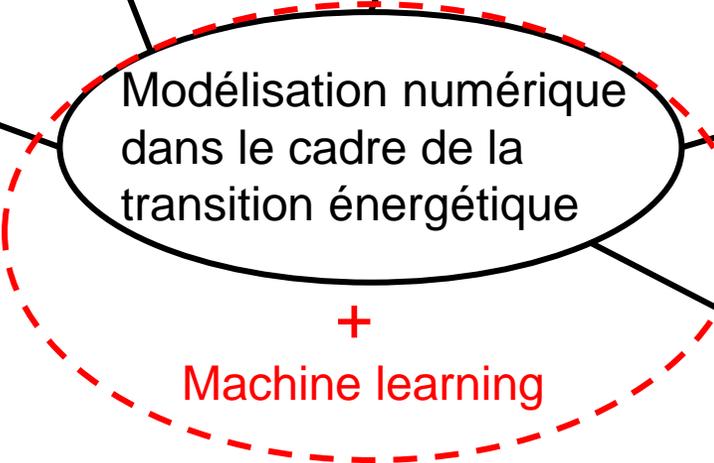
# Conclusions et perspectives

Interactions sol-structure en configuration complexe

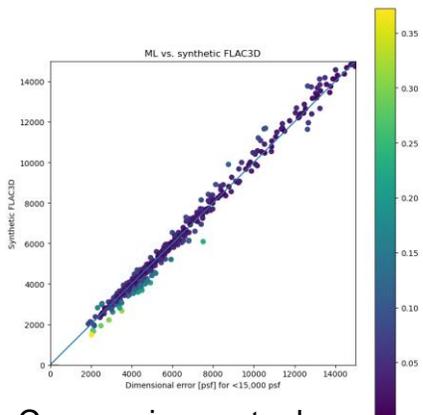
Couplage Thermo-Hydro-Mécanique

Géométrie 3D complexe (intersections de tunnels)

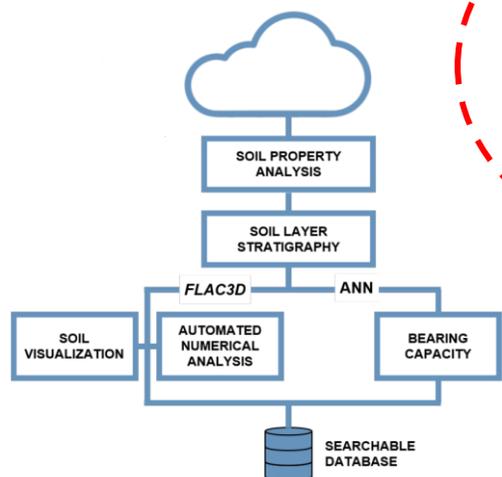
Caractérisation de la roche fracturée



Comportement à long terme (fluage) sur des milliers d'années



Comparaison entre les prédictions de ML et de Flac3D



Intégration du ML au processus de calcul de la capacité portante