



Défis et solutions numériques pour le stockage souterrain

Daniel BILLAUX, Itasca Consultants SAS

Contributions de **Marco Camusso**, **Fabian Dedecker**, **WenJie Shiu**

Travaux effectués pour l'ANDRA, et la NAGRA

Colloque **SSEE**, 25 novembre 2014, Ecole des Ponts ParisTech, Marne la Vallée

SOMMAIRE

1. Introduction
2. Thermique, fluage, corrosion : concilier les échelles de temps
3. Hydraulique, thermique, mécanique : séparer les phases
4. Conclusion

INTRODUCTION

En quoi l'étude d'un stockage souterrain est-elle différente de celle d'un tunnel, d'une mine ou d'un site pétrolier?

Les phénomènes en jeu ne sont pas « spécifiques »

Mais l'interaction entre la matière stockée et le milieu-hôte produit en général des couplages forts

Ceux-ci obéissent à des échelles de temps qui peuvent être très différentes

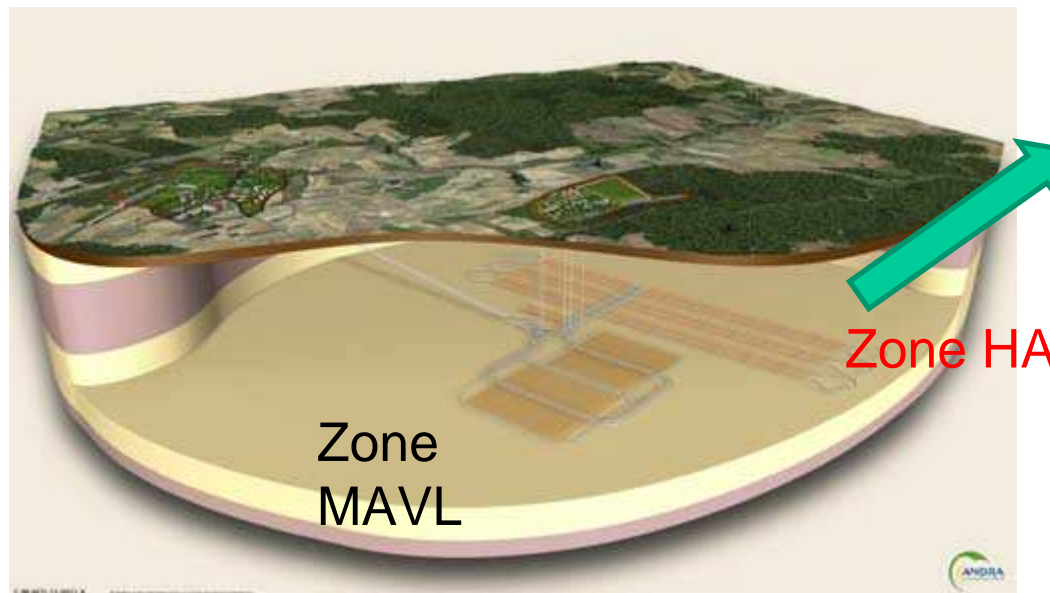
Thermique, fluage, corrosion: concilier les échelles de temps



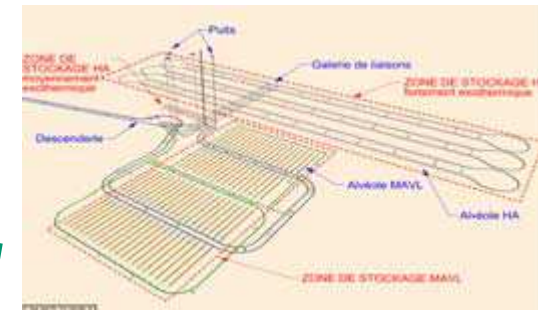
Modélisation du comportement d'une alvéole « HA0 » à long terme - approche discrète

Objectif

En quoi la **fracturation** (zone endommagée due à l'excavation) influe-t-elle sur le chargement, puis la rupture, du chemisage d'une alvéole de stockage?

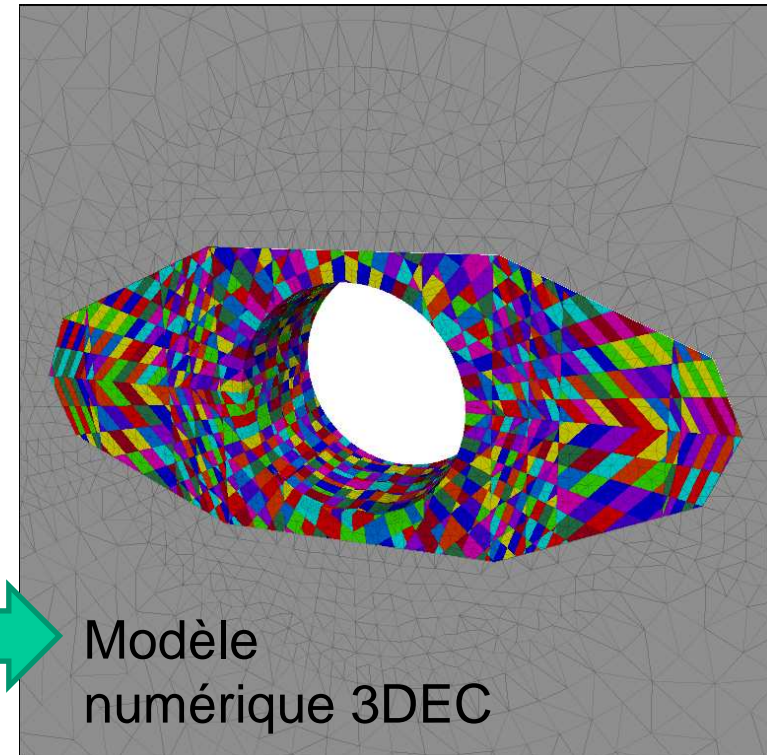
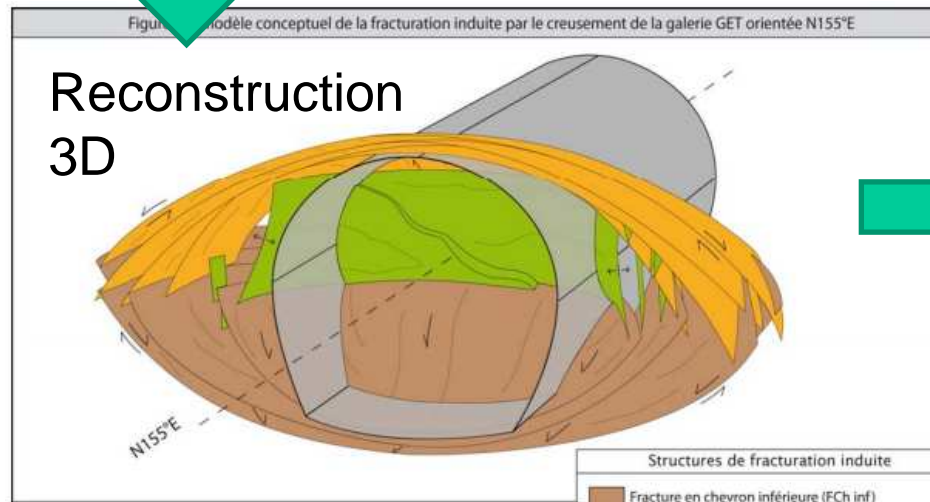


Document Andra

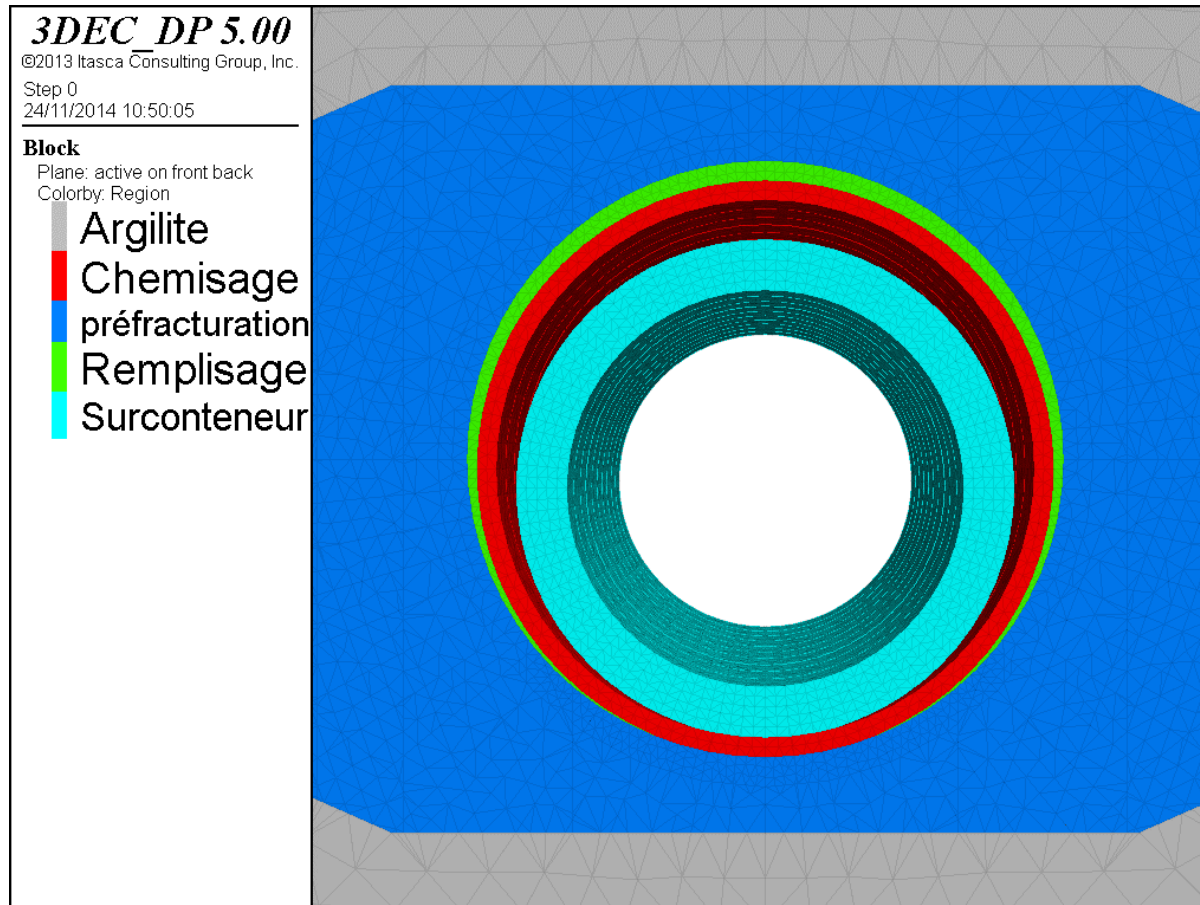


- Préfracturation (EDZ)
- Géométrie de l'alvéole

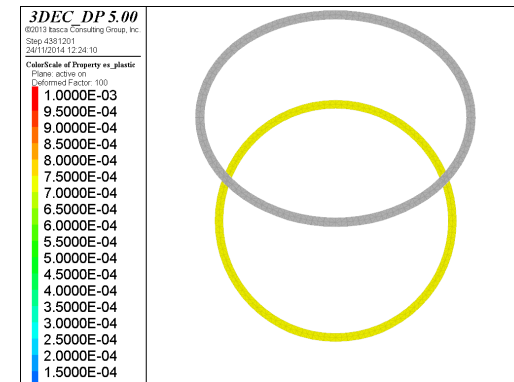
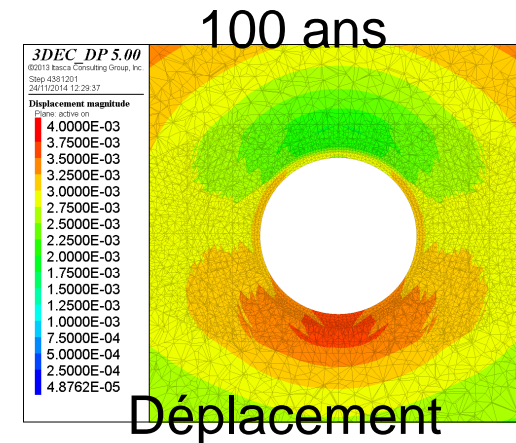
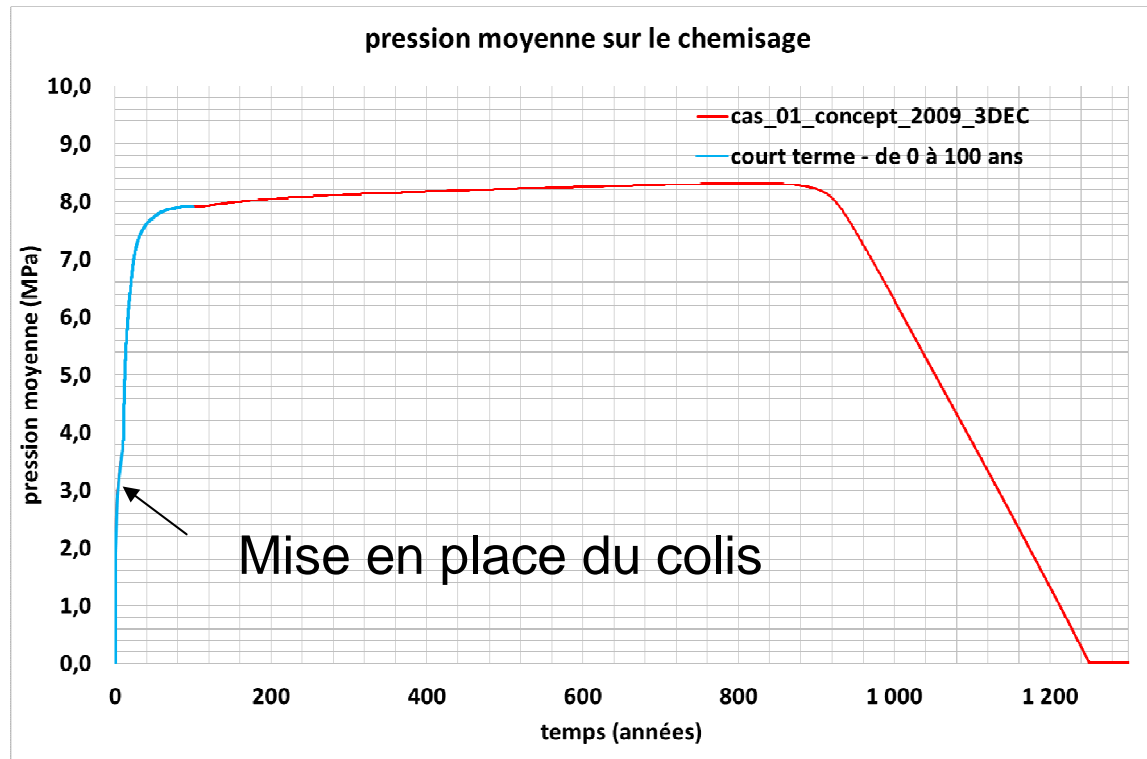
Préfracturation (EDZ)



Géométrie de l'alvéole

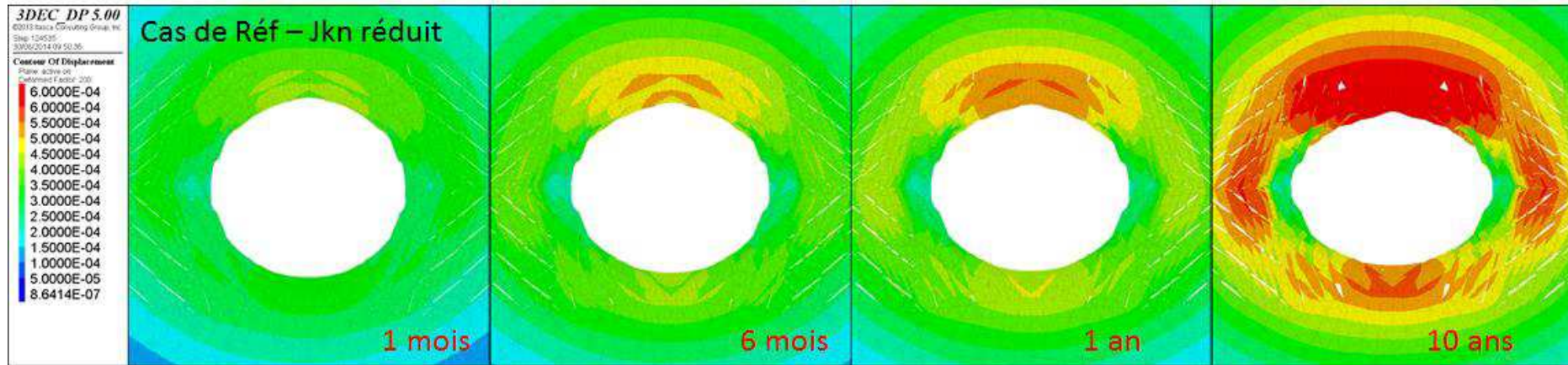


Comportement à court terme



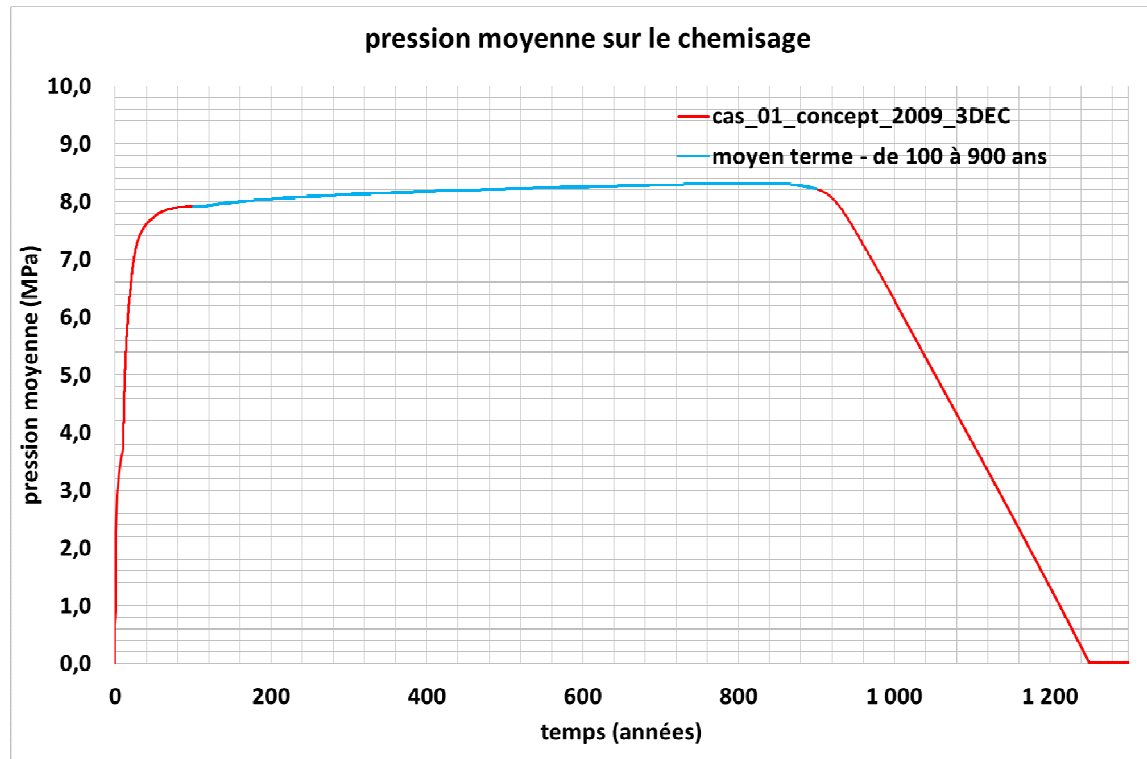
Augmentation de la pression importante:
(fluage « plus » thermique)

Comportement à court terme

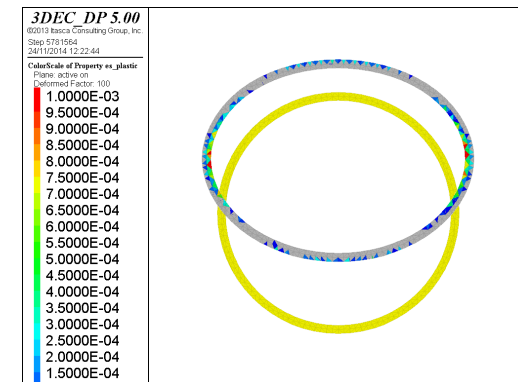
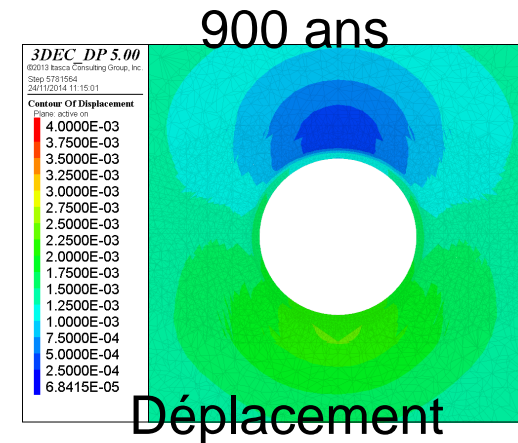


Ovalisation du chemisage :
ouverture puis refermeture des
fractures

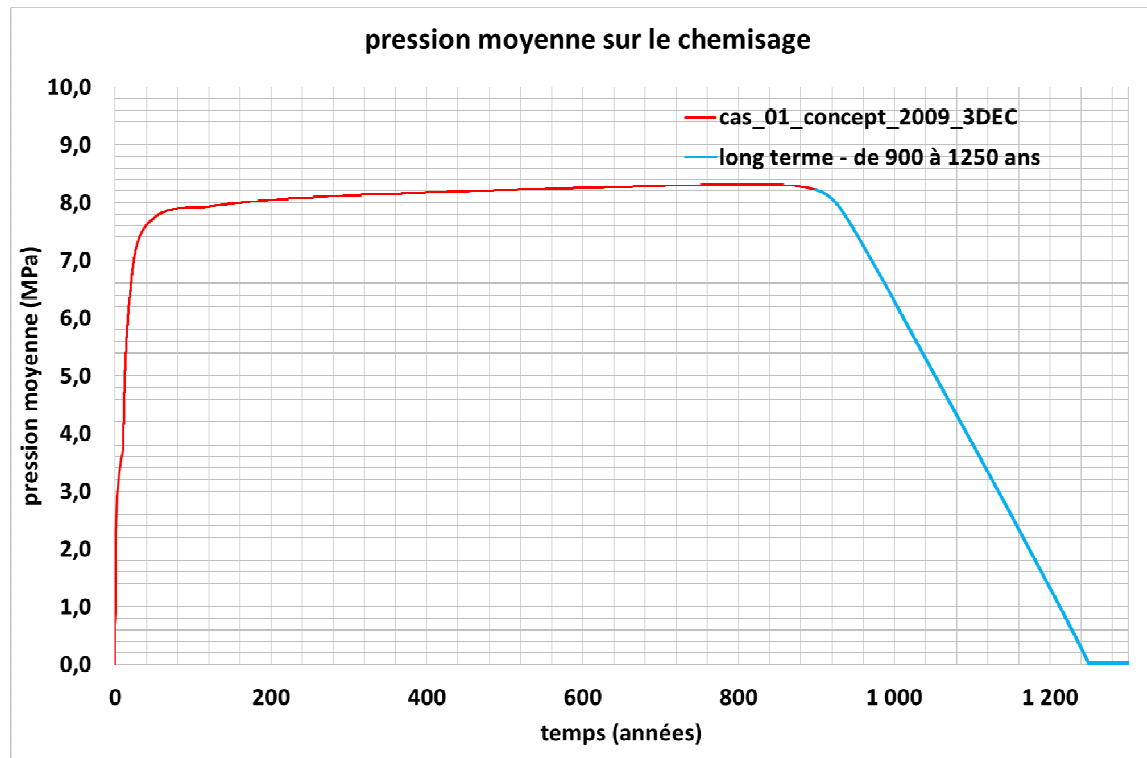
Comportement à moyen terme



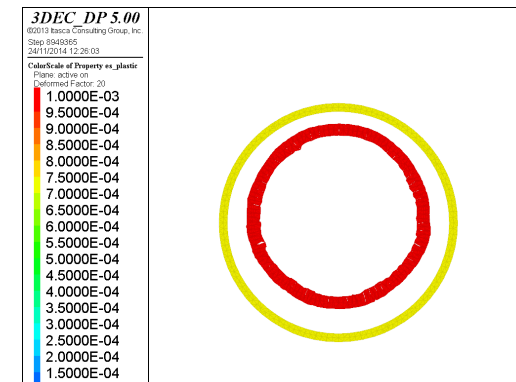
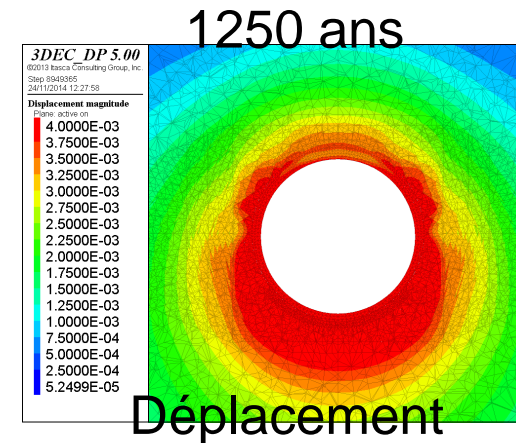
- Augmentation de la pression faible: (fluage « moins » thermique)



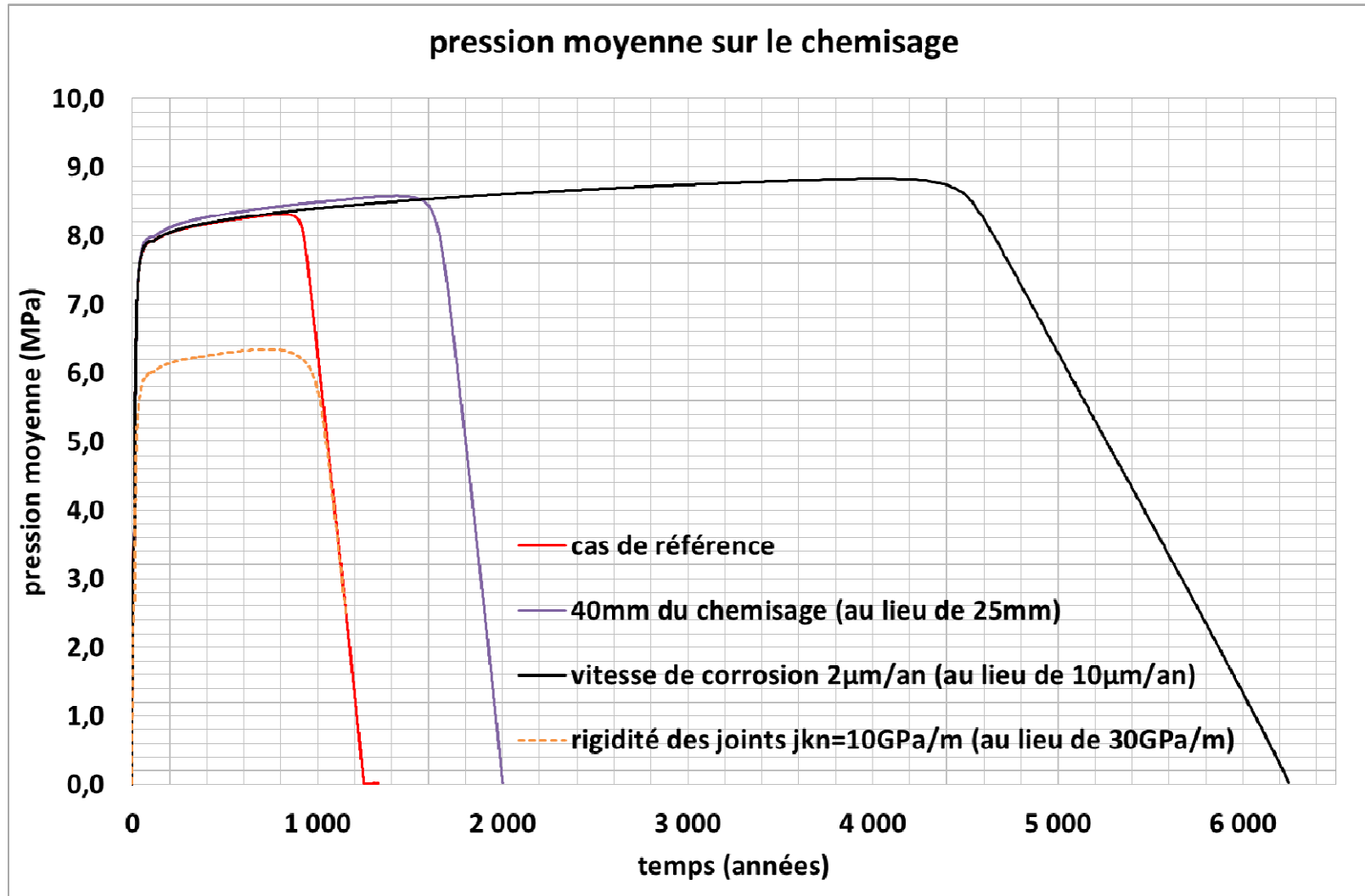
Comportement à long terme



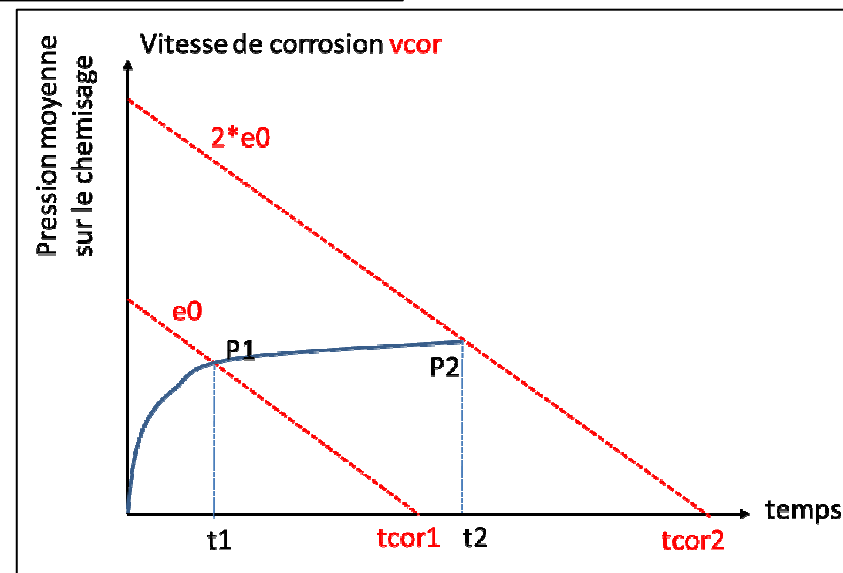
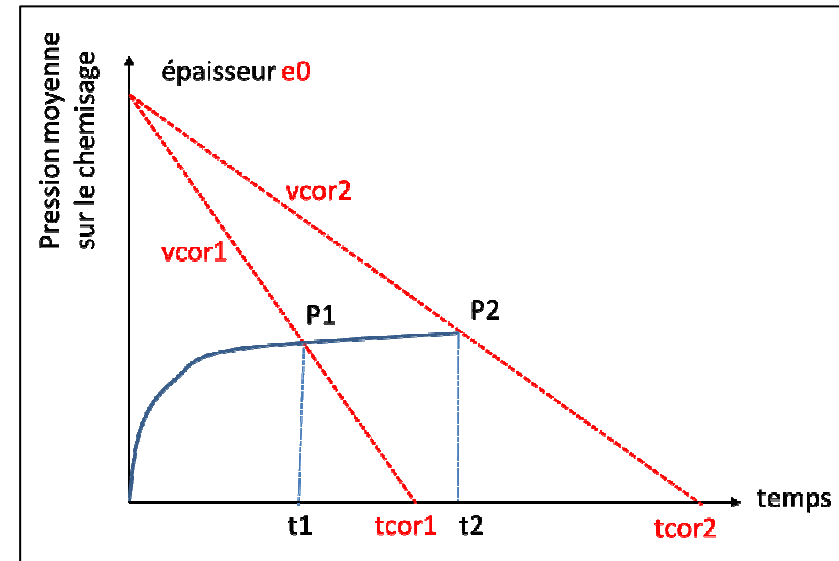
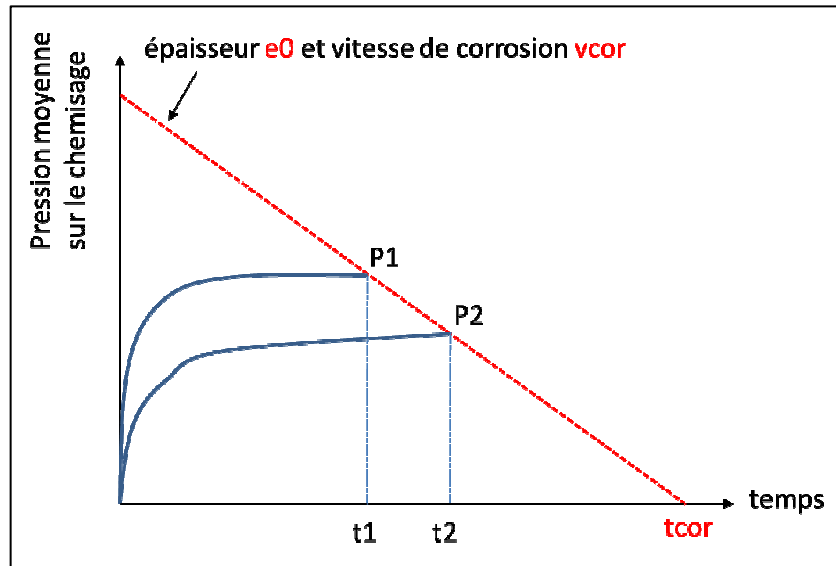
- Rupture du chemisage:
(dominée par la corrosion)



Comparaison des cas paramétriques



Discussion: (thermique) fluage et corrosion



En résumé:

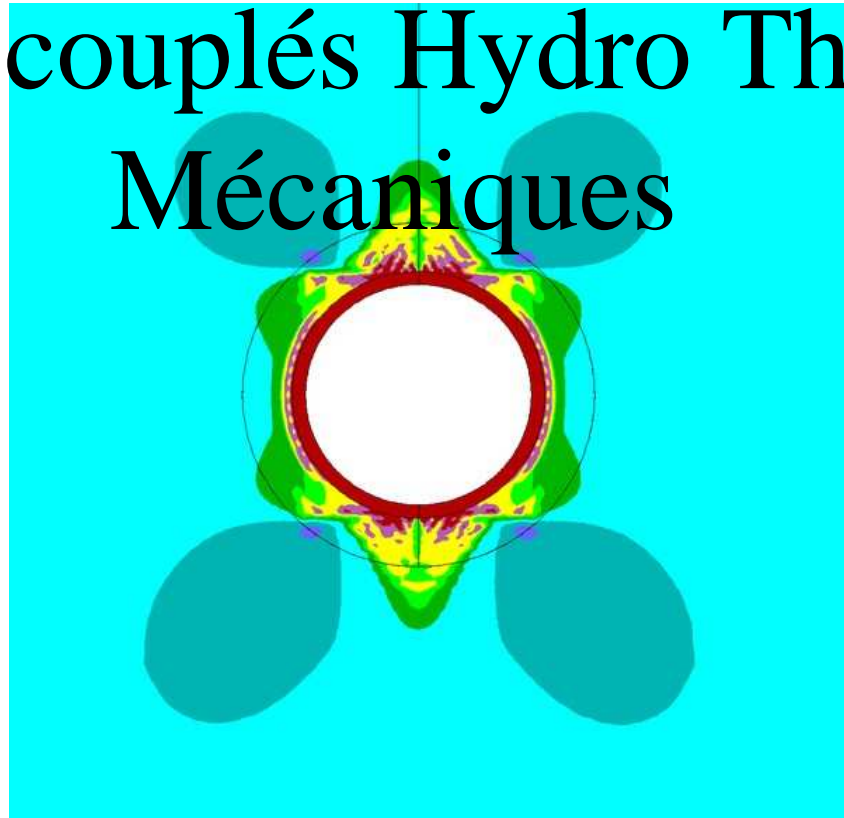
La durée de vie des chemisages est conditionnée par les vitesses de fluage (augmentation de la charge) et de corrosion (diminution de la résistance)

L'effet thermique reste limité dans le temps, et ne joue plus au moment de la rupture.

La prise en compte de la corrosion doit être affinée:

- Corrosion sous contrainte?
- Effet du remplissage sur la vitesse de corrosion?
- Evolution de cette vitesse dans le temps?

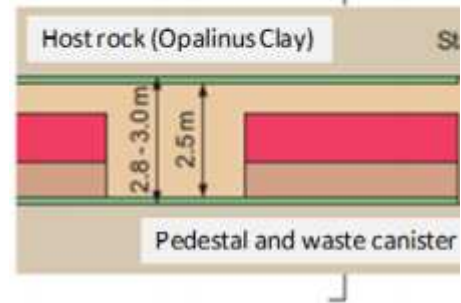
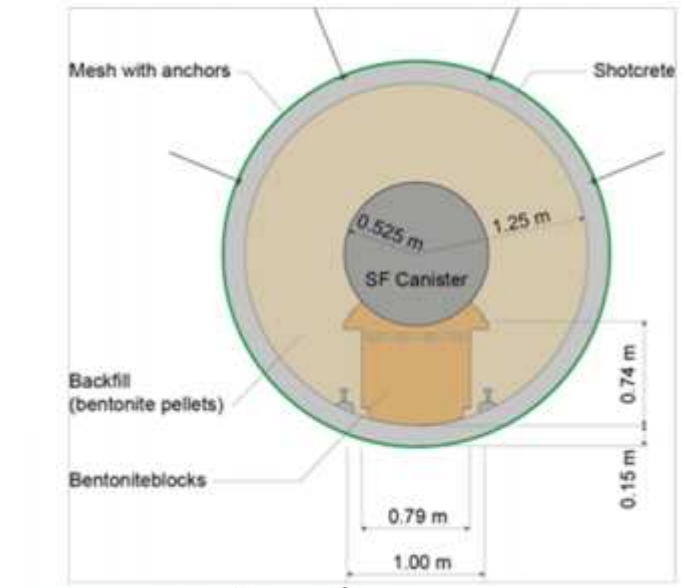
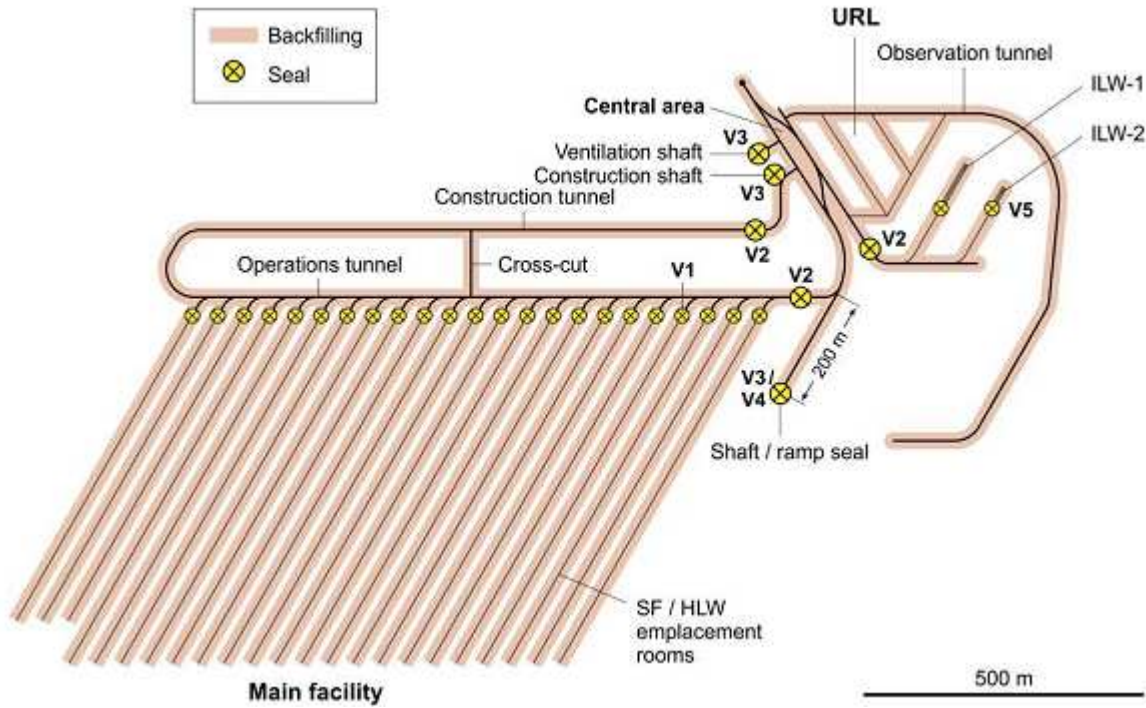
Effets couplés Hydro Thermo Mécaniques



Modélisation d'une alvéole de stockage haute activité
dans l'argile à Opalinus

Stockage de déchets de haute activité

Vue en plan du concept du stockage



Design du tunnel de stockage, figure NAGRA

Roche environnante: Argile à Opalinus (très faible perméabilité et stratifiée horizontalement)

Utilisation d'un revêtement en béton pour maintenir les contraintes mécaniques (relâchement des contraintes dans la roche lors de l'excavation)

Utilisation de bentonite pour empêcher les fuites et assurer le confinement

Le stockage est à 600m de profondeur, l'état de contrainte est isotrope

3 phases successives :

1. Excavation (sur 1 année)
2. Ventilation (jusqu'à 10 ans)
3. Remplissage de la galerie et exploitation (modèles sur 100 000 ans), prise en compte de la génération de gaz

Utilisation d'une approche découplée TOUGH2/FLAC

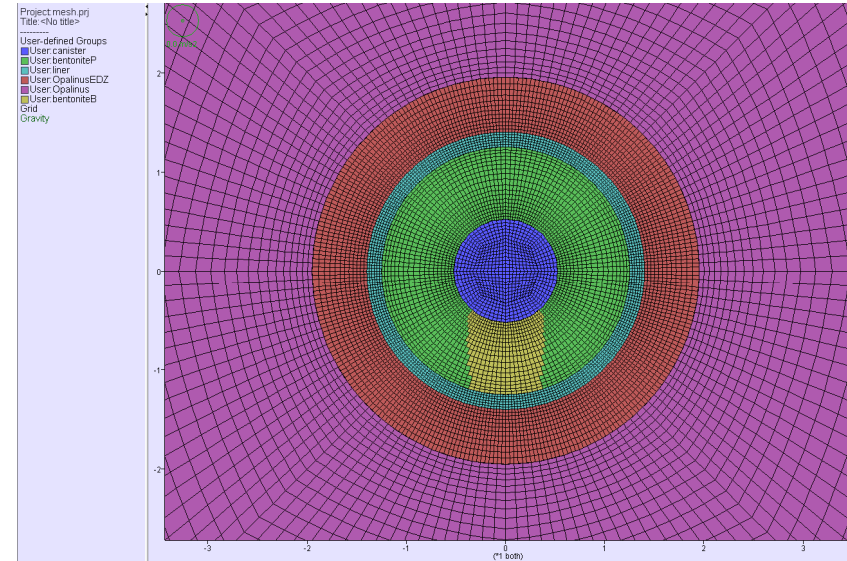
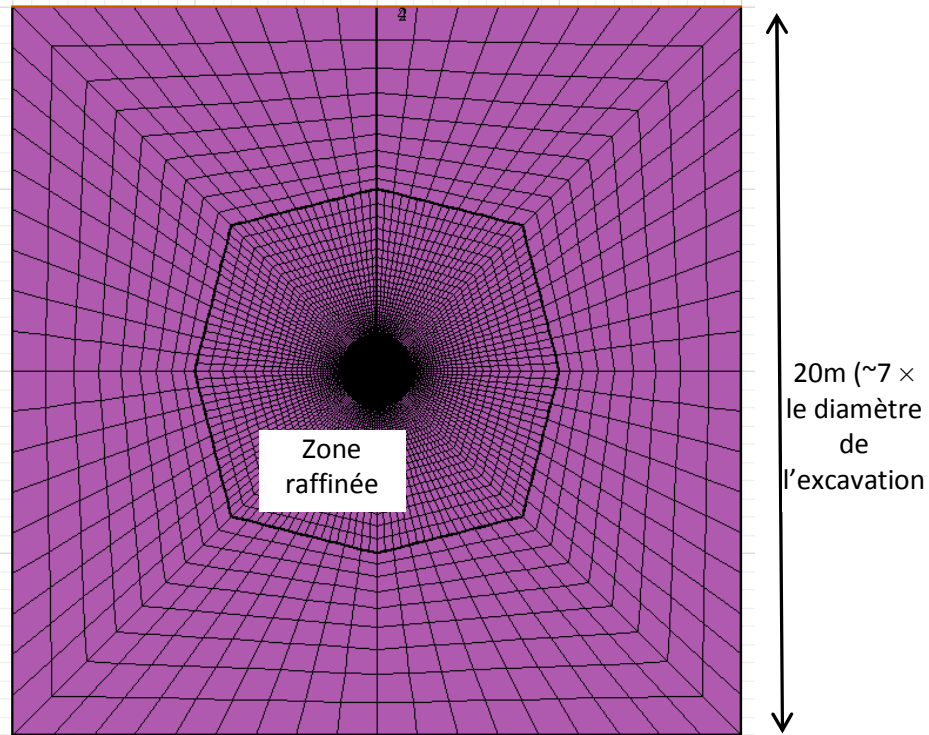
TOUGH2 : Modélisation des écoulements et de la thermique

FLAC : Modélisation de la mécanique

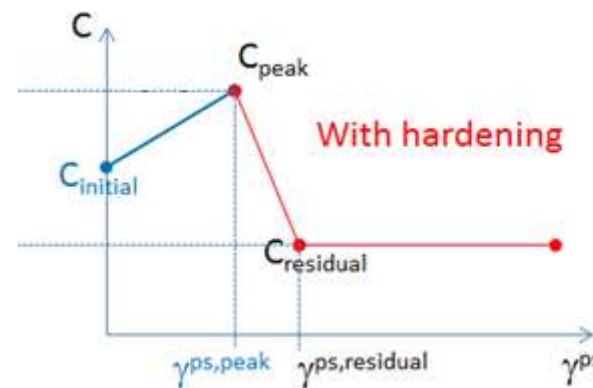
TOUGH2 fournit la pression et la saturation en gaz + les pressions capillaires → Calcul des pressions de pores et de la saturation en eau dans FLAC (pour chaque zone)

Données hydro fournies régulièrement → extrapolation dans le temps + extrapolation dans l'espace (maillage TOUGH2 \neq maillage FLAC)

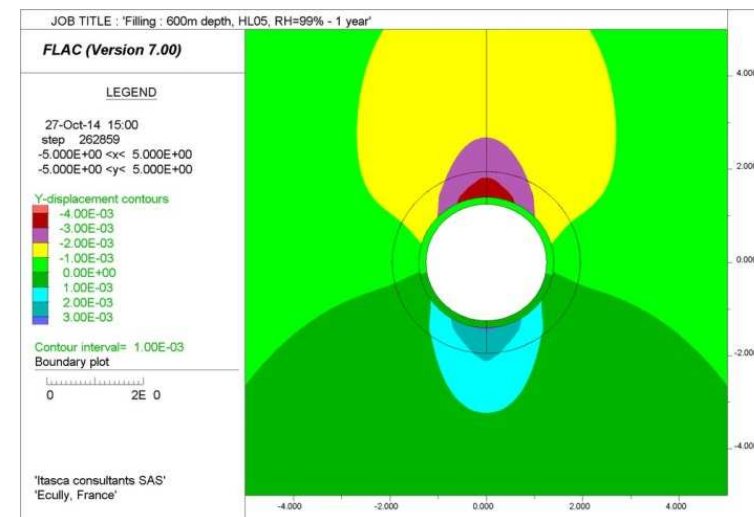
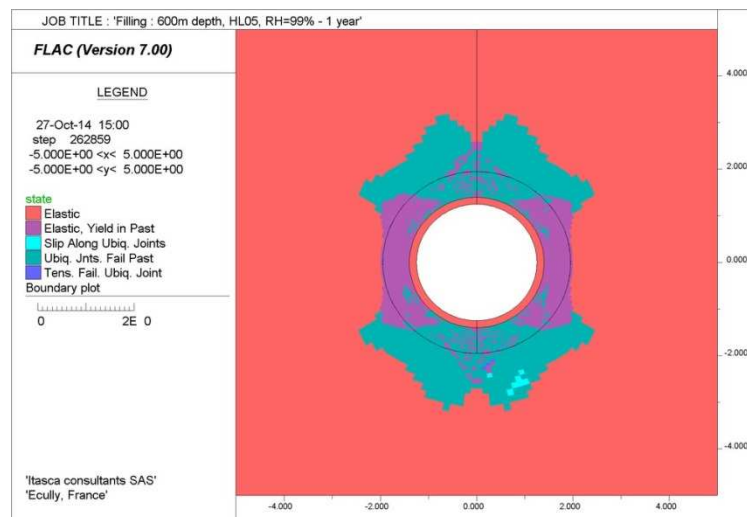
Modèle numérique 2D (FLAC)



Modèle de comportement de l'argile :
durcissant puis radoucissant



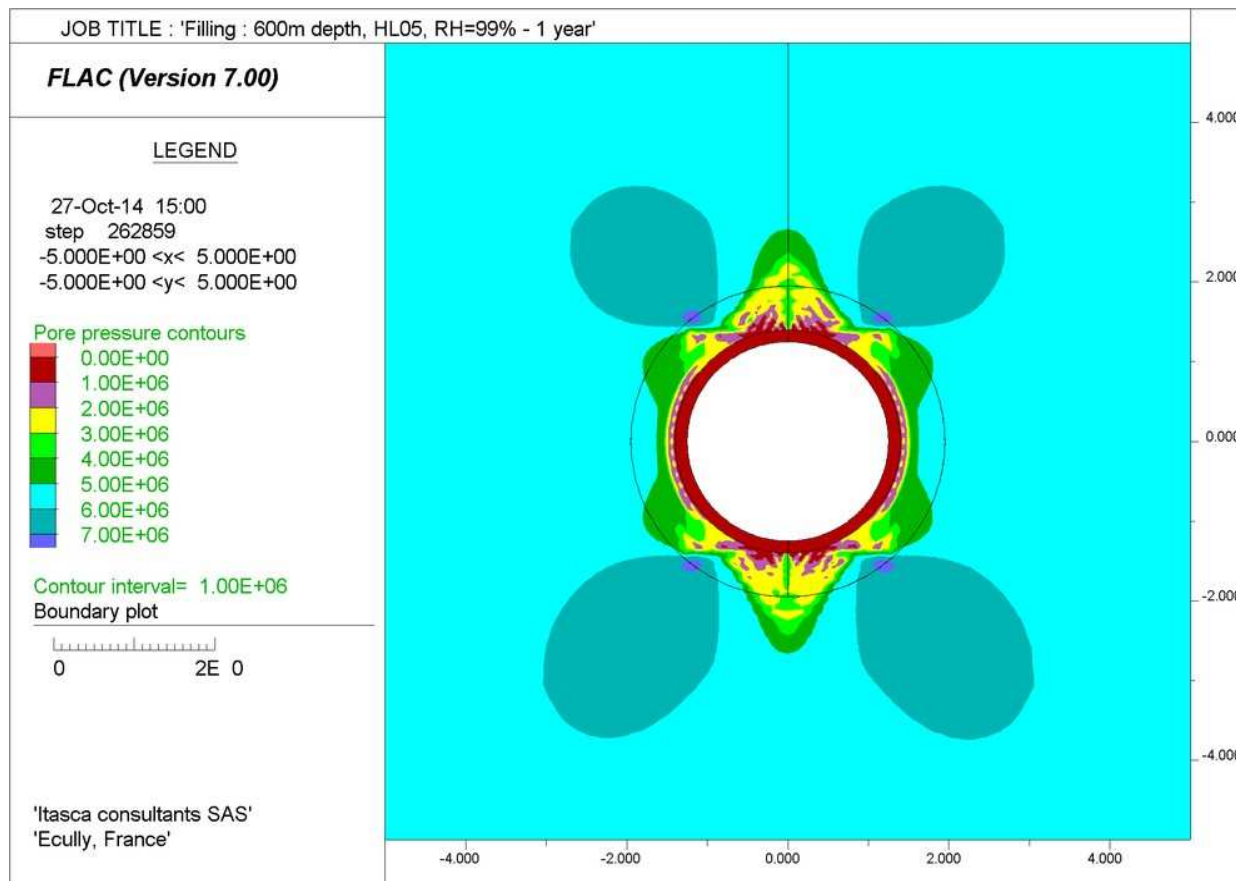
L'excavation crée une zone endommagée étendue mais peu de déplacements (quelques mm)



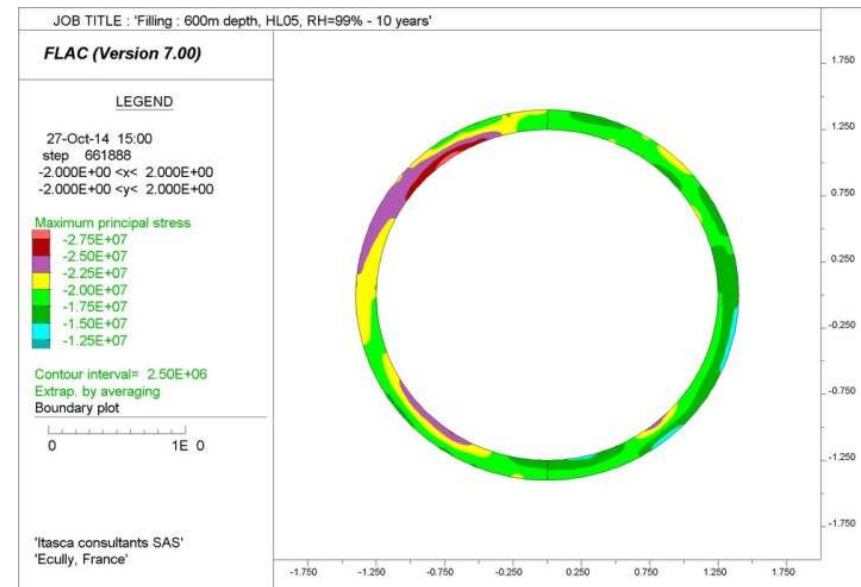
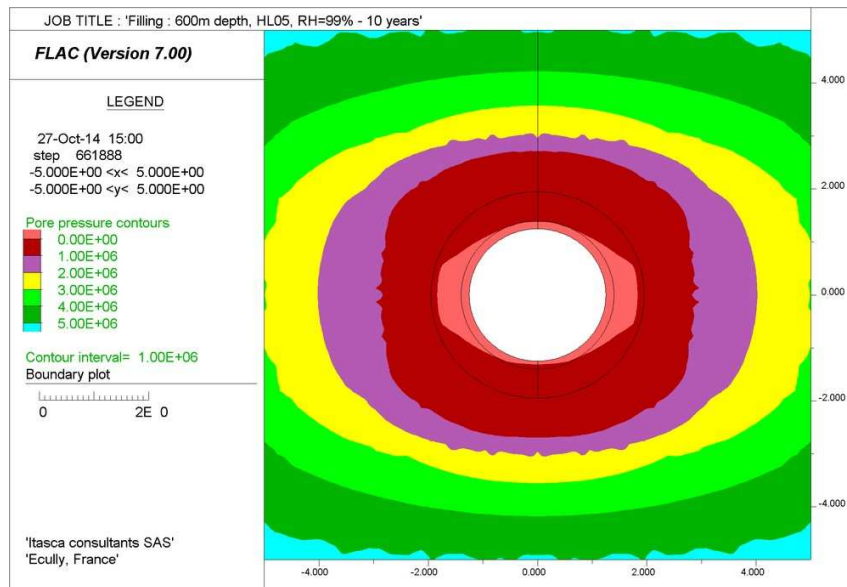
Couplage hydromécanique:

- La durée de l'excavation est telle que le comportement peut être considéré comme non-drainé:
- Ce sont les variations de volume des pores qui ont un effet prédominant sur le champ de pressions.
- L'endommagement de l'argilite par l'excavation produit par ailleurs une augmentation de la perméabilité qui va influencer sur le champ de pressions à moyen et long terme.

Les pressions de pores en fin d'excavation (calcul non drainé) sont gouvernées par les déformations volumiques. Elles représentent l'état initial du calcul non saturé.

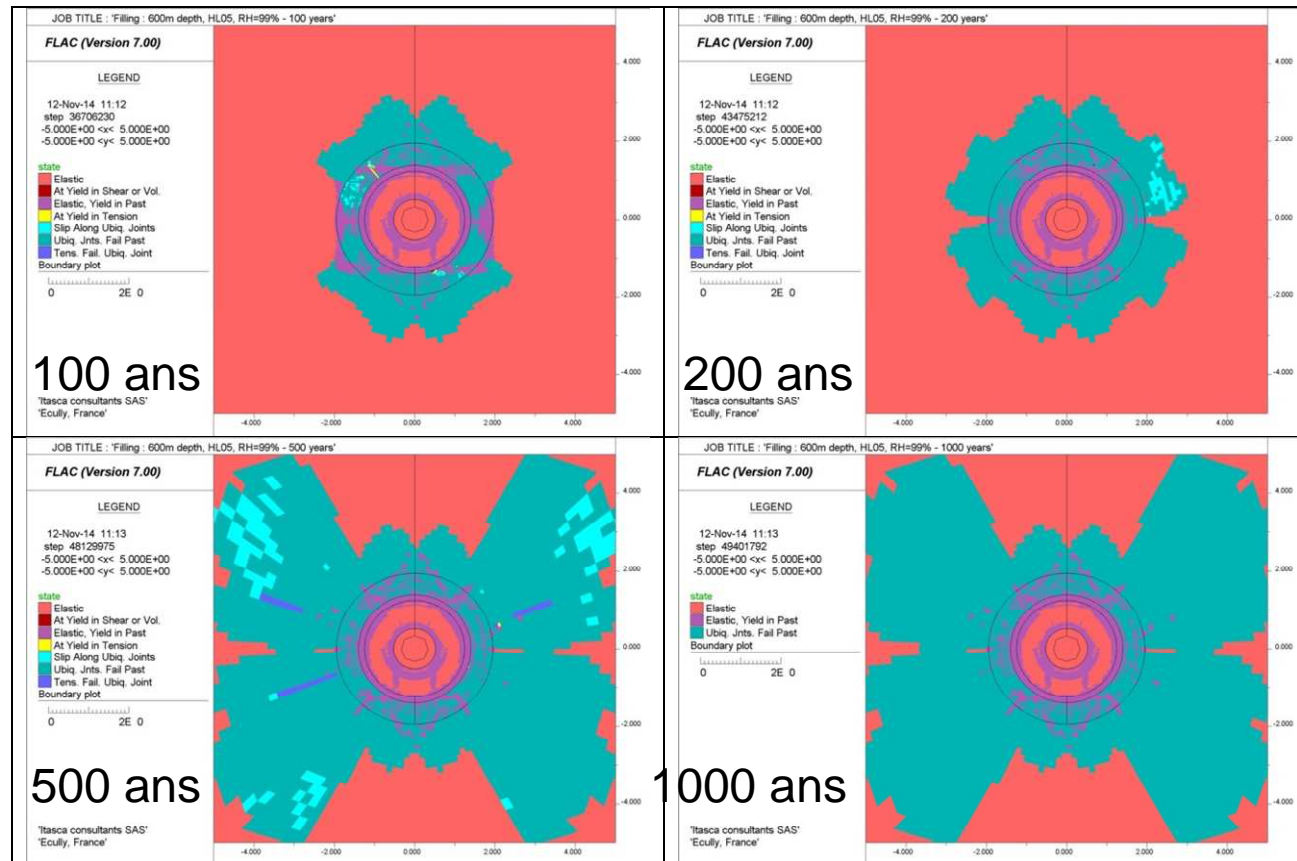


La phase de ventilation a peu d'effet sur l'endommagement et les déplacements. La réorganisation des pressions de pores s'accompagne du chargement du revêtement.

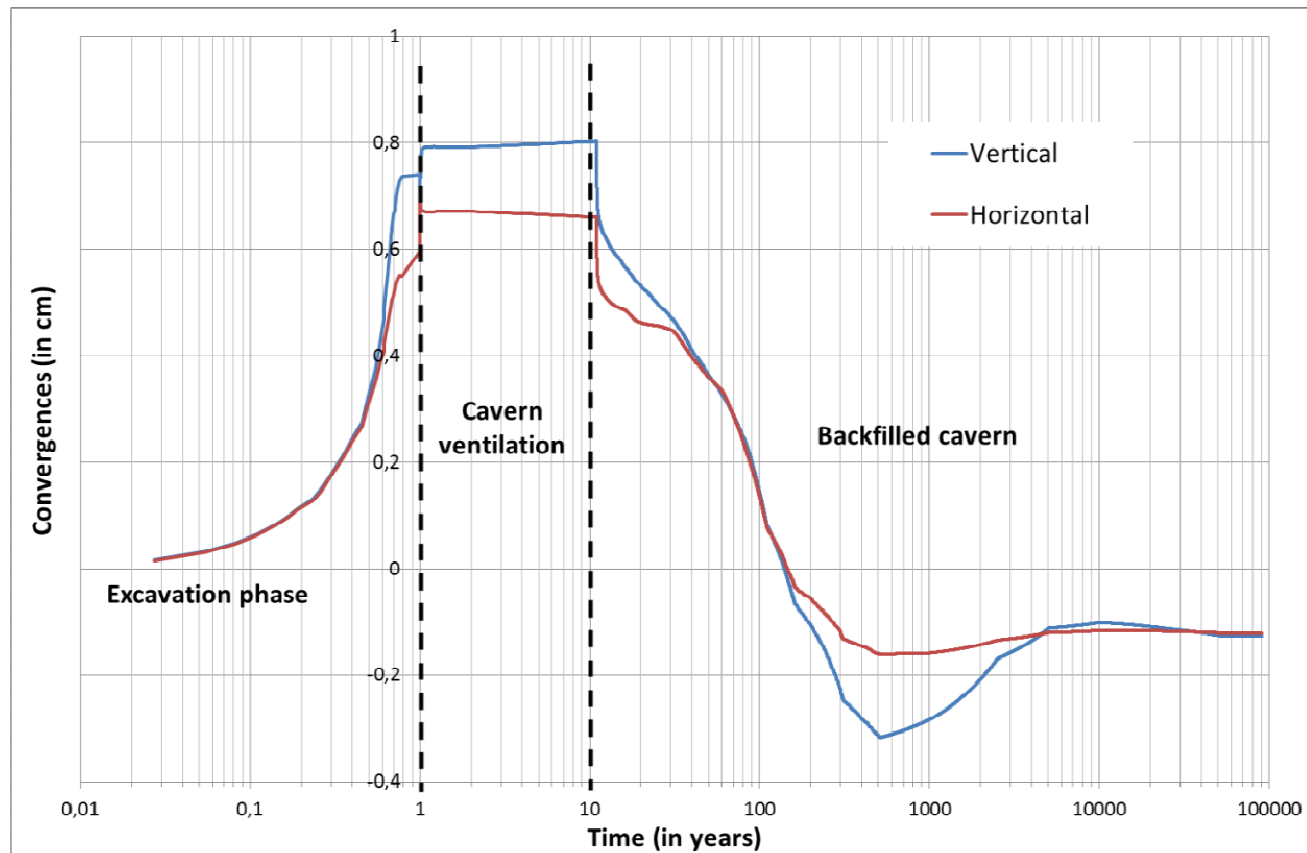


À plus long terme:

- Génération d'un fort gradient de température jusqu'à 500 ans
 - Production de gaz jusqu'à 60 000 ans
- ➔ extension de l'endommagement jusqu'à 500 ans



Evolution des convergences



En résumé:

Trois périodes, de comportements bien différenciés:

1)excavation, non drainé; l'évolution mécanique gouverne les variations de pression.

2)Ventilation, drainé et endommagé; le champ de pressions est gouverné par la ventilation et par l'extension de la zone endommagée.

3)Long terme; c'est la température (sur 500 ans) et la génération de gaz qui génèrent le chargement du revêtement.

CONCLUSION

La clef d'une représentation correcte des couplages pour la simulation d'un stockage souterrain réside dans une appréciation mesurée de leurs importances respectives.

Ne pas hésiter à découpler!

L'importance des divers couplages évolue dans le temps:
inutile de coupler « tout » tout le temps!