

EVALUATION DE LA STABILITE APRES ENNOYAGE ET ABANDON DE CAVITES DE STOCKAGE DE GPL EN CHAMBRES ET PILIERS DANS LA CRAIE

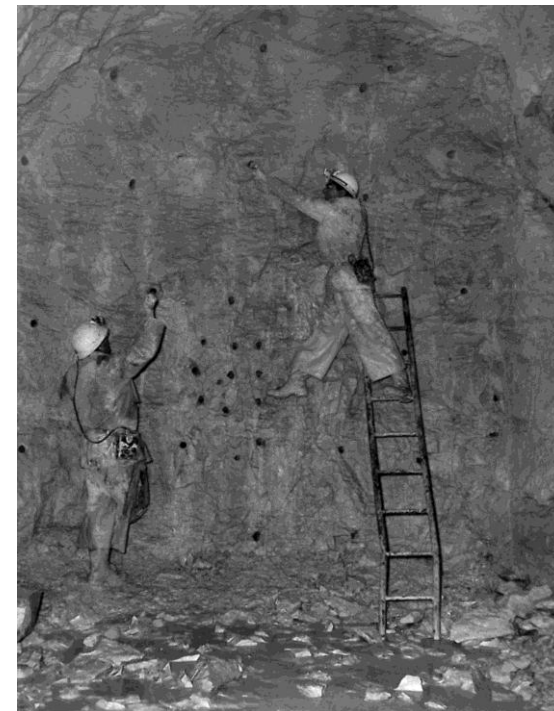
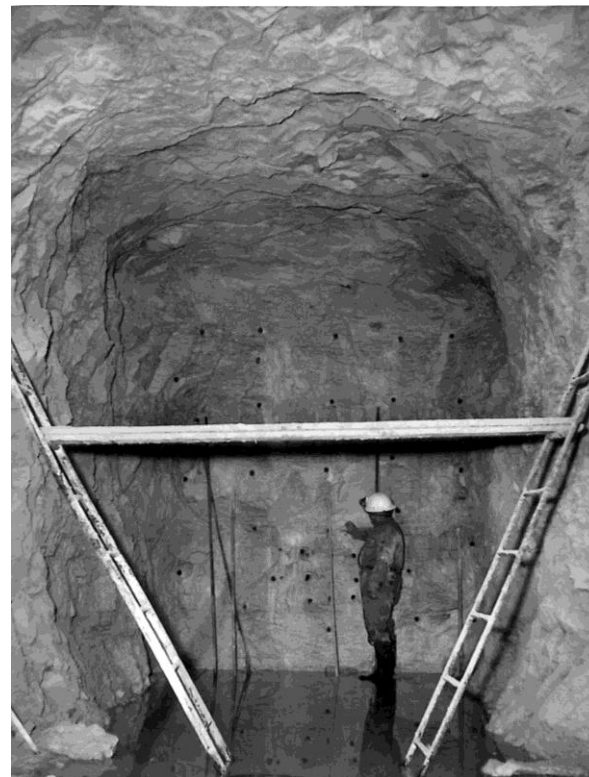
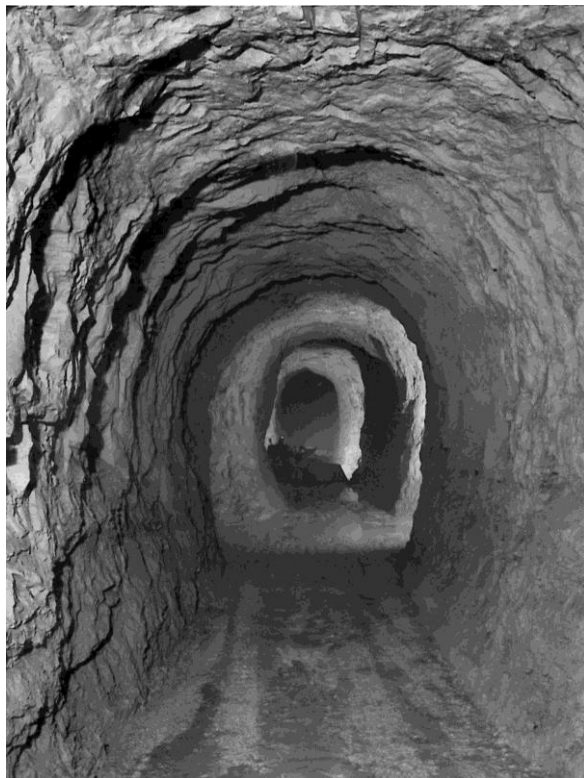
Nicolas Gatelier, Thierry You, Sophie Laurent – GEOSTOCK

Marco Camusso, Daniel Billaux - ITASCA

Séance technique CFMR, 19 mars 2026

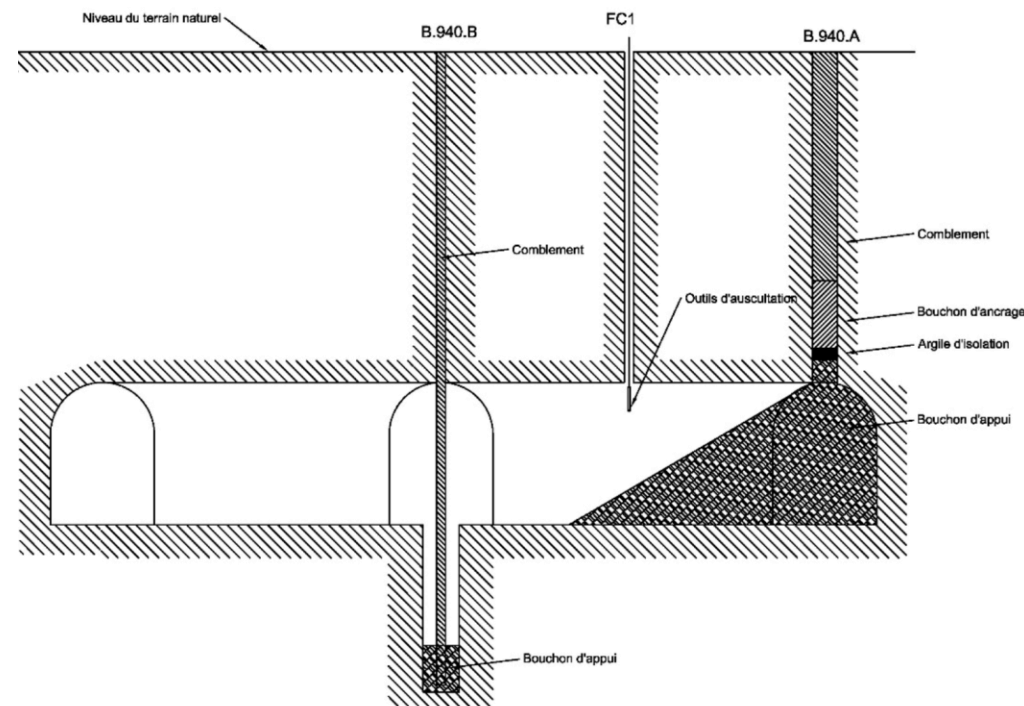
Fermeture des ouvrages souterrains

Le premier stockage souterrain de GPL en France



Les mécanismes d'instabilité envisagés

- Effondrement de la tête des puits d'accès
→ décision de remplir intégralement les puits jusqu'en surface par un coulis reposant sur bouchon d'ancrage
- Rupture généralisée des piliers et effondrement brutal du toit
- Rupture localisée du toit, formation de cloche et affaissement de surface induit
- Formation de cloche remontant au jour (fontis localisé)



Rapport d'étude INERIS, 2010, DRS-08-86168-00481D, Synthèse de l'état des connaissances et des pratiques en matière d'abandon des stockages souterrains

Des éléments de réponses préliminaires

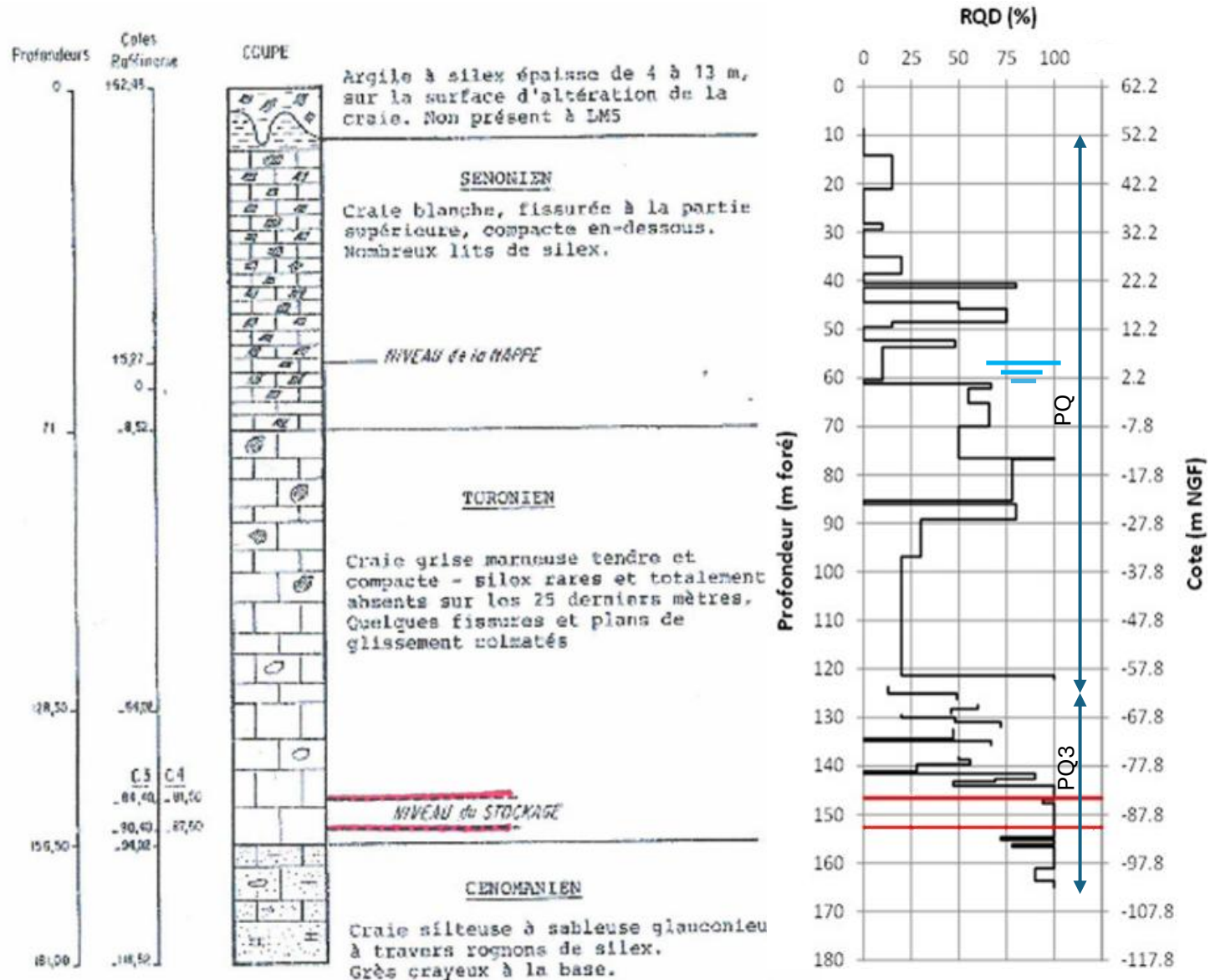
- Rupture généralisée des piliers et effondrement brutal du toit
 - Pas de banc épais de résistance mécanique élevée
 - Rapport géométrique « extension horizontale / profondeur de la cavité » $< 1,3$
 - Contrainte moyenne dans les piliers les plus sollicités $<$ résistance des piliers (défruitement $\sim 25\%$)
 - retour d'expérience minier : les cavités ne sont pas dans des conditions d'un risque d'évolution brutale généralisée
 - approche analytique par aire tributaire : les piliers jouent leur rôle de support du toit

- Rupture localisée du toit, formation de cloche et affaissement de surface induit

- Phénomène de fontis localisé
 - Remontée de cloche géométriquement possible se stabilise par auto-comblement avant la surface
 - approche analytique : risque de formation d'un fontis débouchant en surface est écarté

Sources : Rapport d'étude INERIS, 2010, DRS-08-86168-00481D, Synthèse de l'état des connaissances et des pratiques en matière d'abandon des stockages souterrains
Rapport d'étude INERIS, 2007, DRS-07-86090-05803A, Evaluation et traitement du risque de fontis lié à l'exploitation minière
T.R. Stacey, 2001, Best Practice rock engineering handbook for other mines, Safety in Mines Research Advisory Committee (SIMRAC) Publisher

Quelques caractéristiques techniques



L'environnement hydrogéologique des cavernes comporte trois horizons hydrogéologiques distincts :

- l'horizon supérieur s'étend jusqu'à environ -57 mNGF et comprend la craie sénonienne ainsi que la partie supérieure fissurée et altérée de la craie turonienne. La perméabilité moyenne de cet horizon est de 100 mD (environ 10^{-6} m/sec).
- L'horizon médian qui accueille les deux cavités correspond à la partie inférieure de la craie turonienne. La perméabilité moyenne de cet horizon est de 0,1 mD (environ 10^{-9} m/sec).
- L'horizon inférieur correspond à la craie sableuse et glauconieuse du Cénomaniens dont on peut placer le toit stratigraphique à environ -99 mNGF (apparition du premier niveau glauconieux sur LM5). Sa perméabilité est d'environ 100 mD (10^{-6} m/Sec).

Nouveau forage LM12 pour acquisition de données géotechniques

- Carottage en PQ jusqu'à 125 m
- Carottage en PQ3 de 125 à 165 m → carottes testées



Quelques caractéristiques techniques

Paramètres physiques :

teneur en eau	%	9,1
masse volumique	g/cm ³	2,3
porosité mercure	%	23,7
perméabilité à l'eau	μD	0,5 - 67
vitesse des ondes P	m/s	3406

Résistances :

traction indirecte	MPa	1,2
compression uniaxiale	MPa	21.3

Paramètres élastiques (cycles de décharge / recharge) :

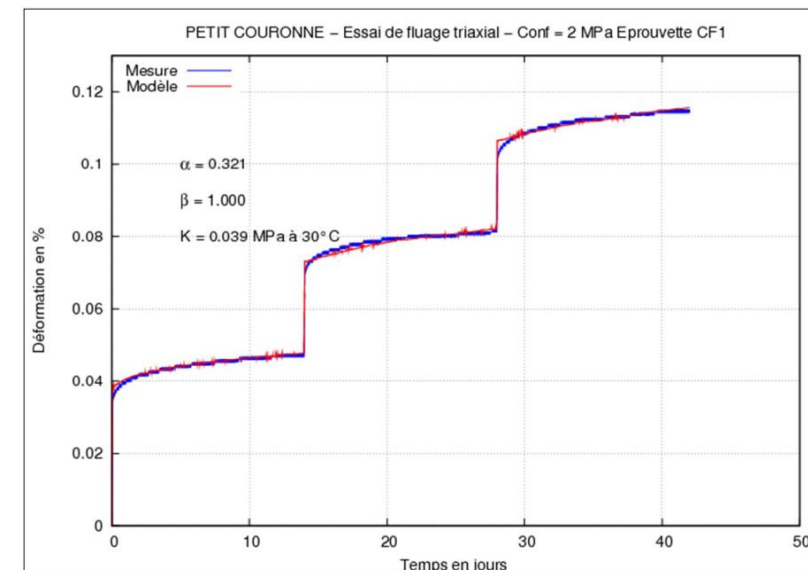
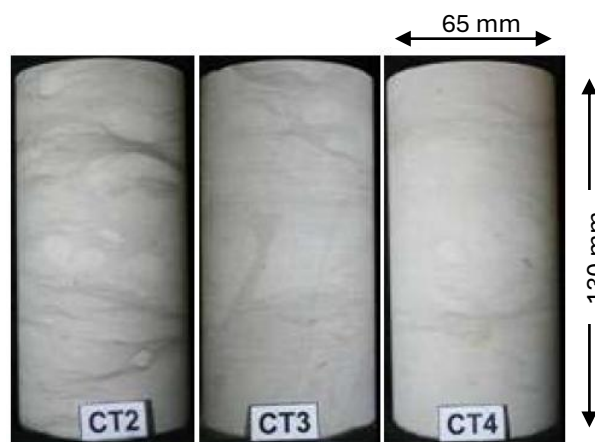
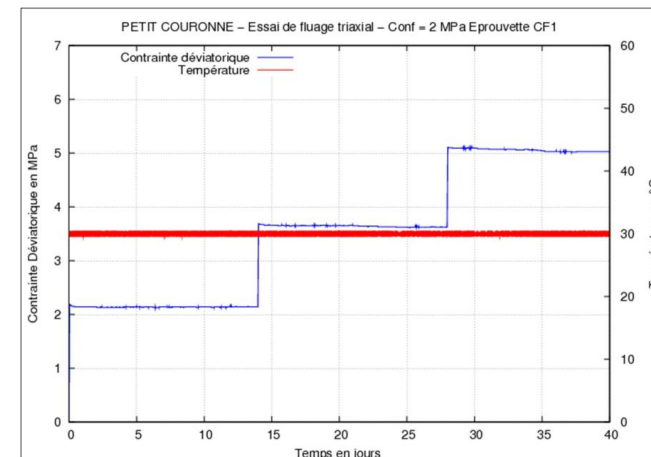
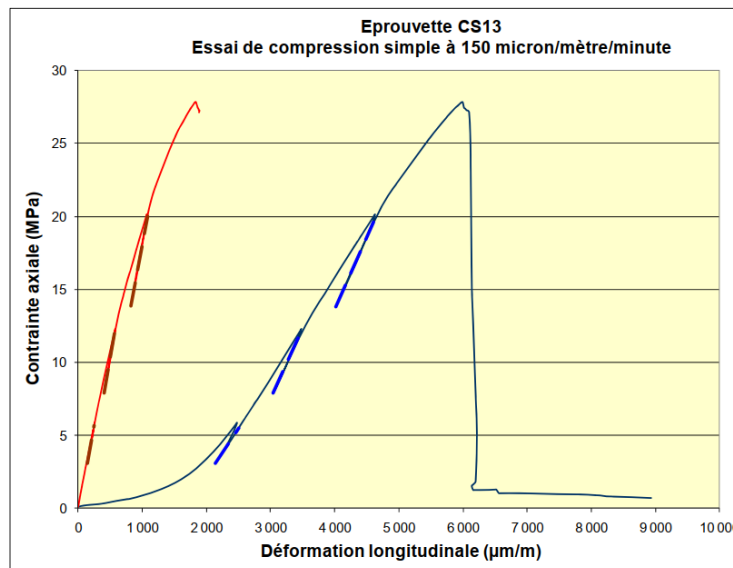
module d'Young local / global	GPa	12 / 6
coeff. de Poisson	-	0,25

Critère de Mohr-Coulomb :

cohésion pic / résiduelle	MPa	4,6 / 1,4
frottement pic / résiduelle	°	42 / 42

Critère de Hoek-Brown :

m pic / résiduel	-	16 / 5,68
s pic / résiduel	-	1 / 0,04
résistance uniax. roche intacte	MPa	18



Source: Centre des Géosciences, Mines Paris

Modélisation du comportement de la craie

Calage des paramètres sur les essais de laboratoire

- loi élastoplastique radoucissante non associée
- Critère de plasticité de Hoek-Brown
- Paramètres à caler
 - déformation plastique de cisaillement critique (0,010 - **0,025** - 0,050)
 - angle de dilatance (0° - 5° - $\phi/10$ - $\phi/5$) - ϕ angle de frottement apparent tangent au critère de Hoek-Brown
 - Évolution des paramètres entre les valeurs au pic et les valeurs résiduelles (linéaire - **polynomiale cubique**)

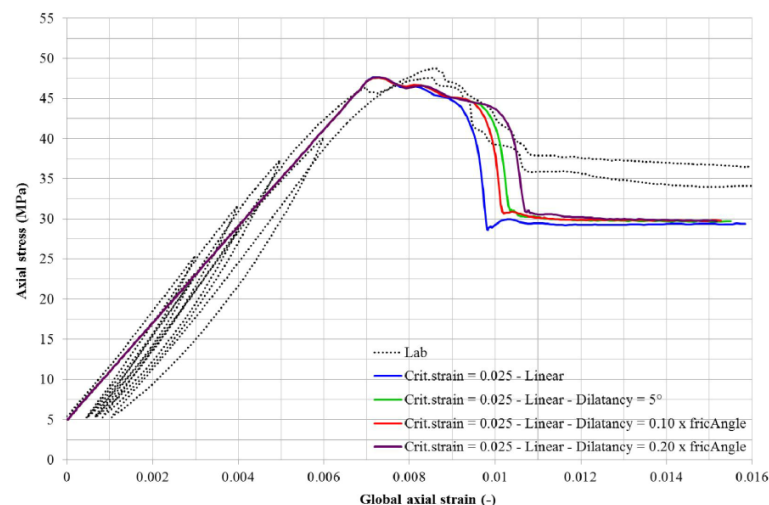
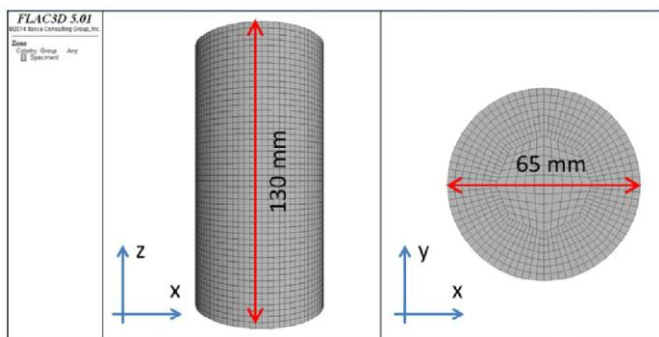


Figure 5-31 : Influence of the dilation angle. Axial stress vs. global axial strain (confining pressure = 5.00MPa).
Effet de l'angle de dilatance. Contrainte axiale vs. déformation axiale globale (pression de confinement = 5.00MPa).

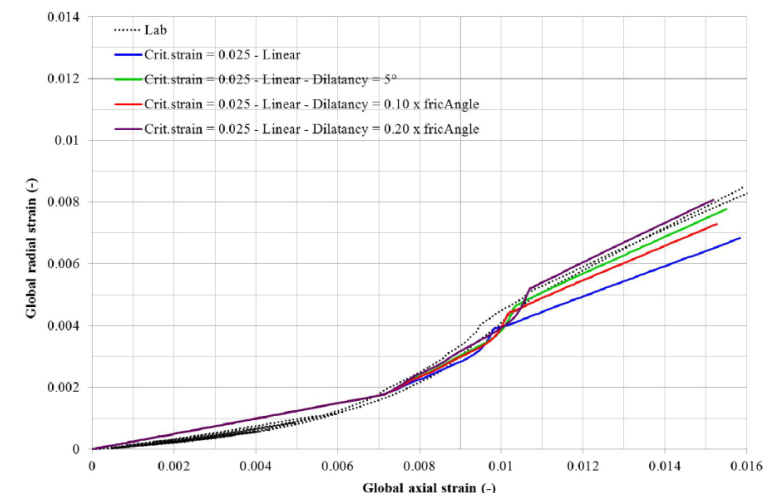


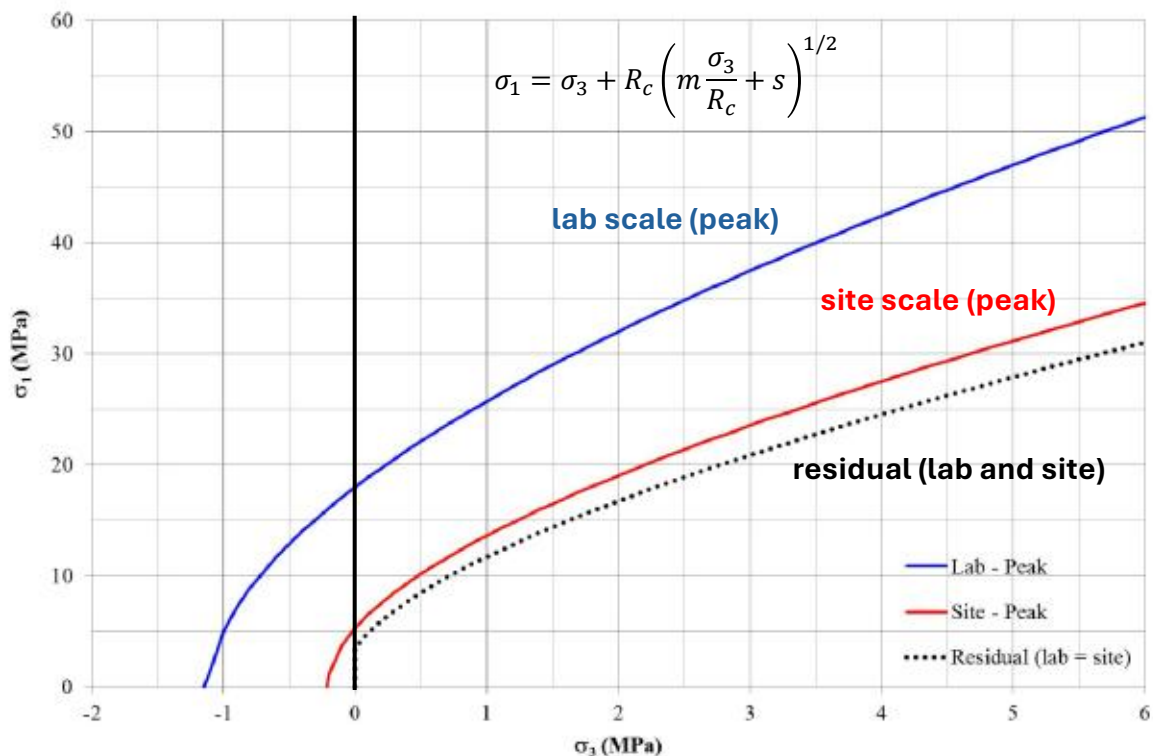
Figure 5-39 : Influence of the dilation angle. Global radial strain vs. global axial strain (confining pressure = 5.00MPa).
Effet de l'angle de dilatance. Déformation transversale globale vs. déformation axiale globale (pression de confinement = 5.00MPa).

Source: Rapport ITASCA, 14R-012A2, Calibration of the Hoek-Brown constitutive law parameters for modeling chalk formation around gas storage caverns

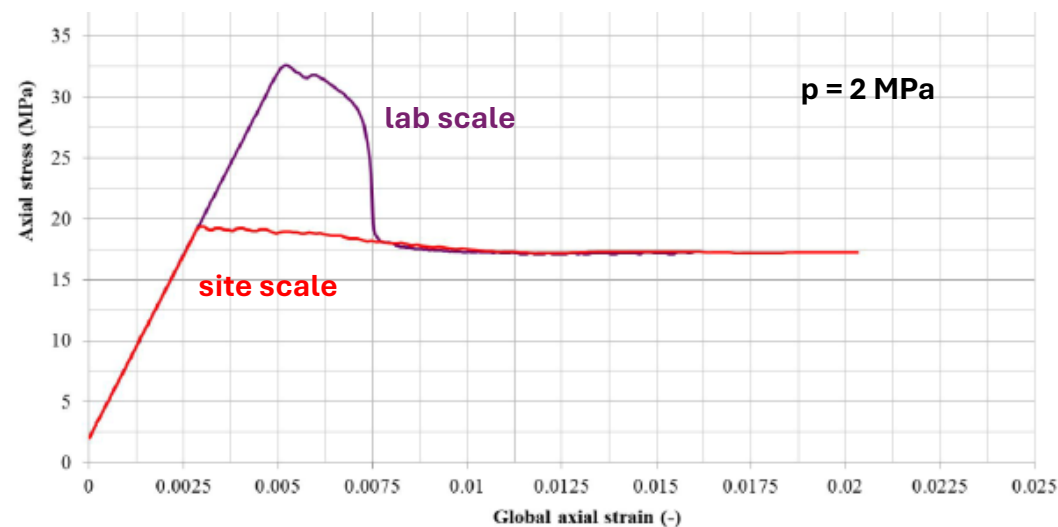
Modélisation du comportement de la craie

De l'échelle du laboratoire à l'échelle du massif

- Dégradation des paramètres mécaniques issues des essais sur échantillons de laboratoire
- Approche empirique de Hoek & Brown pour la détermination des paramètres du critère de plasticité à l'échelle du massif
- Donnée d'entrée de la méthode nécessite l'évaluation du GSI : levés structuraux sur les carottes du forage de reconnaissance à la profondeur du stockage → GSI ~ 75-80
- Les paramètres résiduels (échantillons en mode post-pic) sont supposés ne pas être affectés par le changement d'échelle

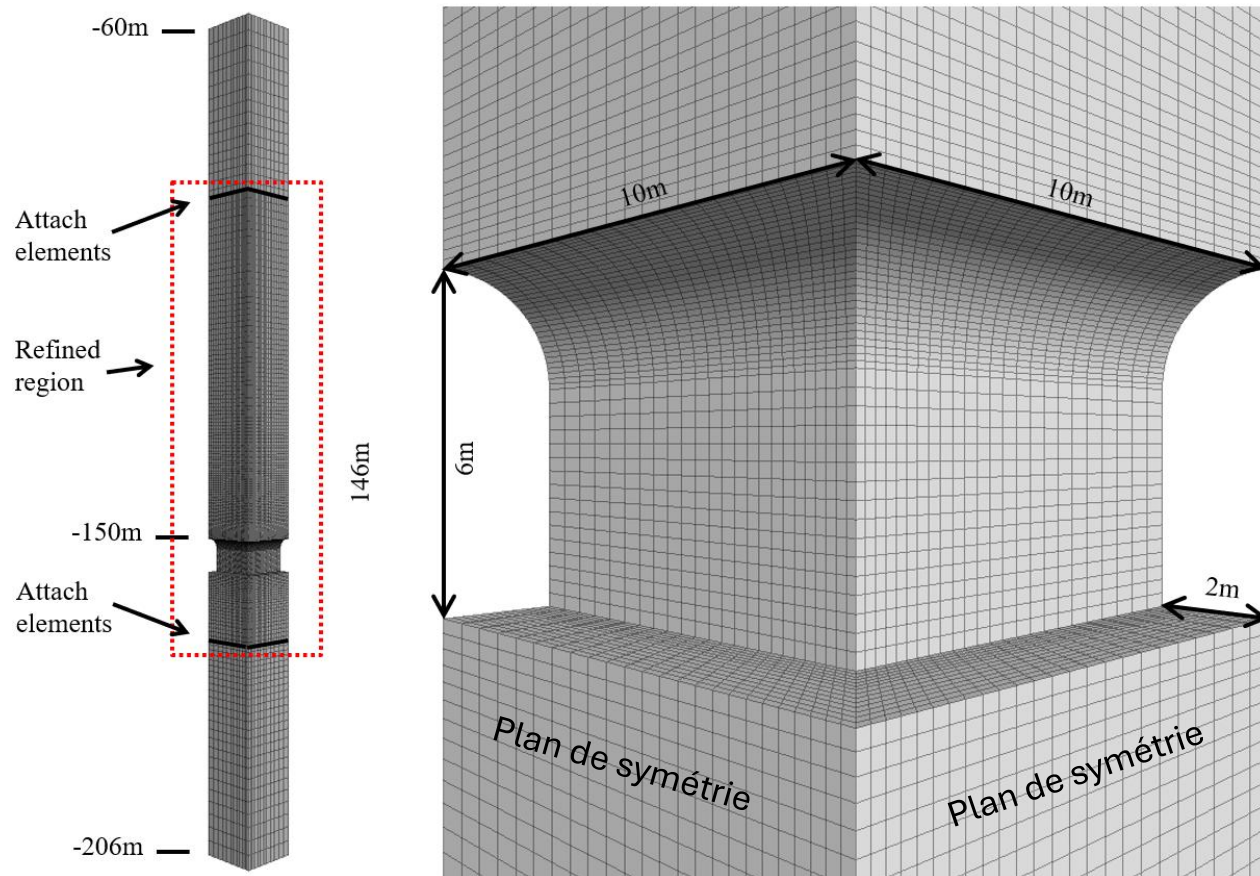


Critère de Hoek-Brown		lab scale	site scale
m ; pic / résiduel	-	16 / 5,68	7,293 / 5,68
s ; pic / résiduel	-	1 / 0,04	0,087 / 0,040
résistance compression R_c	MPa	18 / 3,6	5,3 / 3,6
résistance traction R_t	MPa	1,15 / 0	0,21 / 0



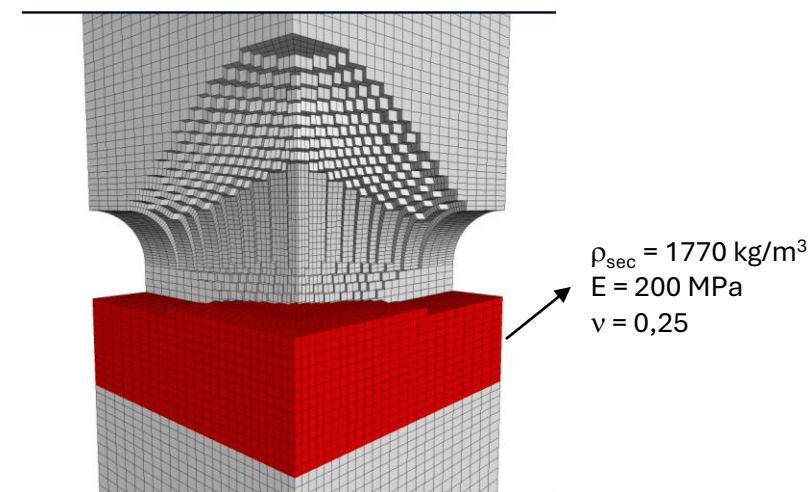
Evaluation du risque d'effondrement localisé et fontis

Intersection entre deux galeries (1/4 pilier)



- Modèle avec couplage en série écoulement stationnaire milieu poreux / mécanique
- Contraintes initiales effectives isotropes (poids des terres)
- Critère de détachement d'un élément à la paroi et prise en compte du confinement par le matériau éboulé foisonné ($f = 1,15$)

σ_1 au toit < 2 MPa

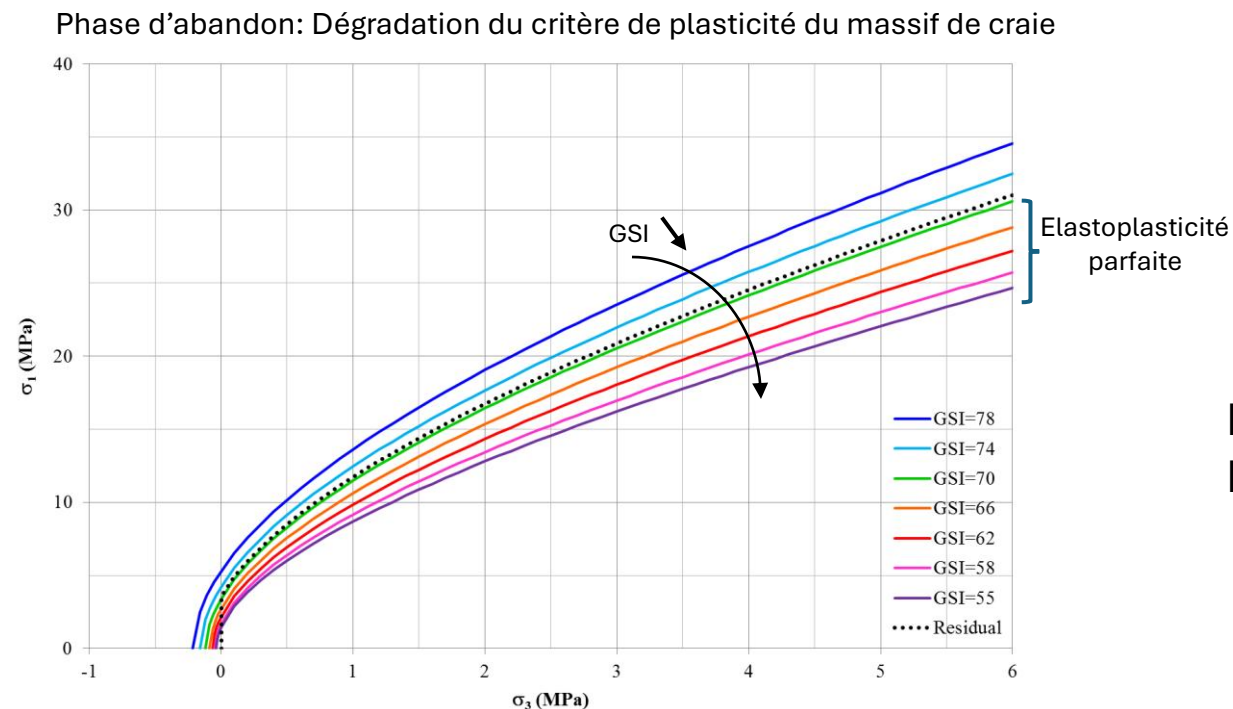


Source: Rapport ITASCA, 14R-016A2, Study of a potential caving process above the gas storage repository

Evaluation du risque d'effondrement localisé et fontis

□ Phasage du calcul

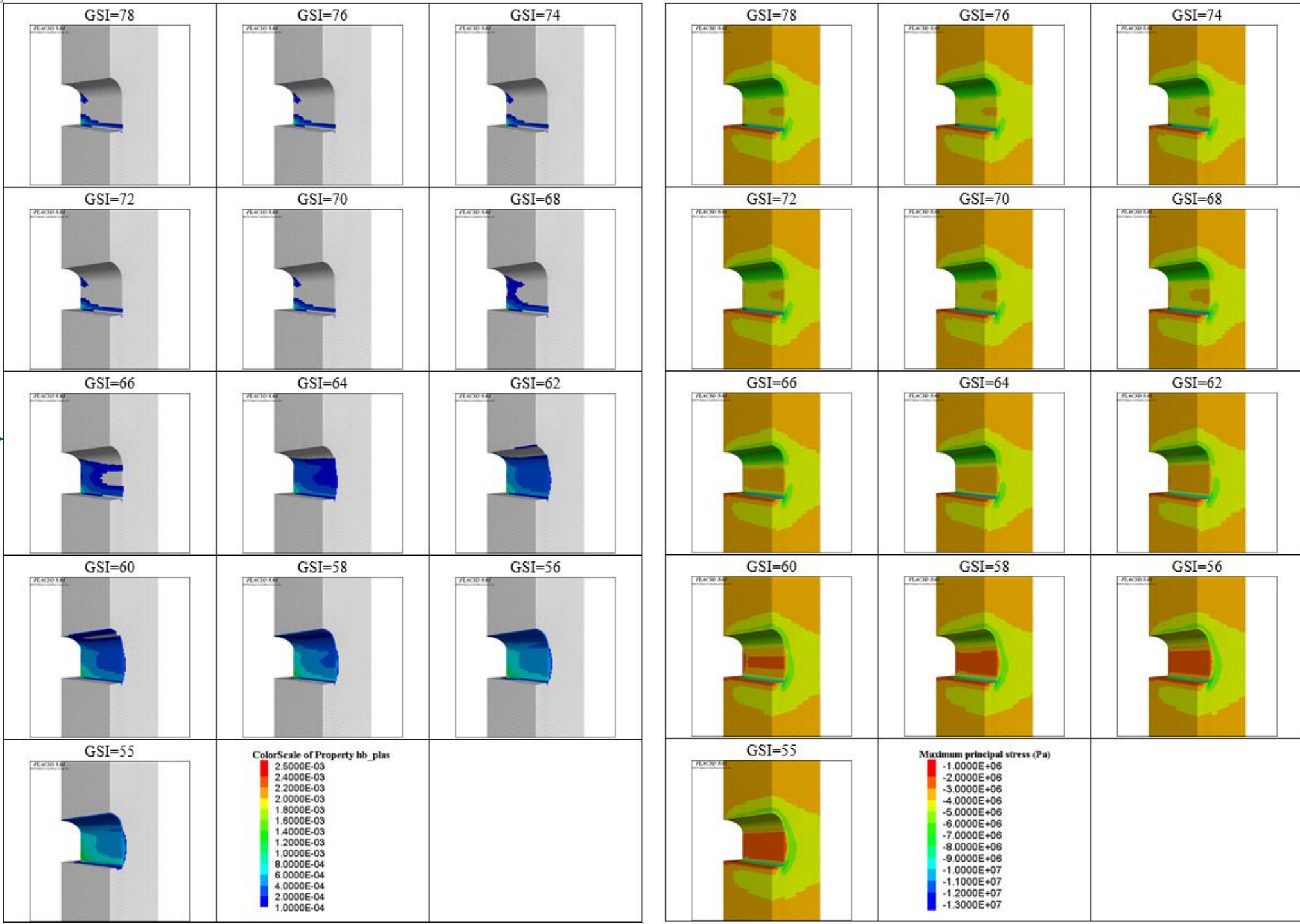
- Equilibre initial
- Excavation des galeries par étapes de déconfinement progressif
- Exploitation du stockage (pression constante de 0,2 MPa à la paroi)
- Ennoyage des galeries (pression hydrostatique à la paroi)
- Abandon avec réduction des paramètres du critère de plasticité de Hoek-Brown (diminution progressive du GSI de 78 à 55)



$$R_{cm} (\text{GSI} \sim 78) = 5,3 \text{ MPa}$$

$$R_{cm} (\text{GSI} \sim 55) = 1,5 \text{ MPa}$$

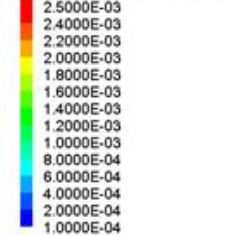
Source: Rapport ITASCA, 14R-016A2, Study of a potential caving process above the gas storage repository



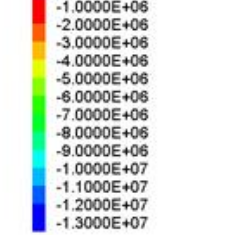
Déformation
plastique de
cisaillement →

←
Contrainte
principale
majeure

ColorScale of Property hb_plas

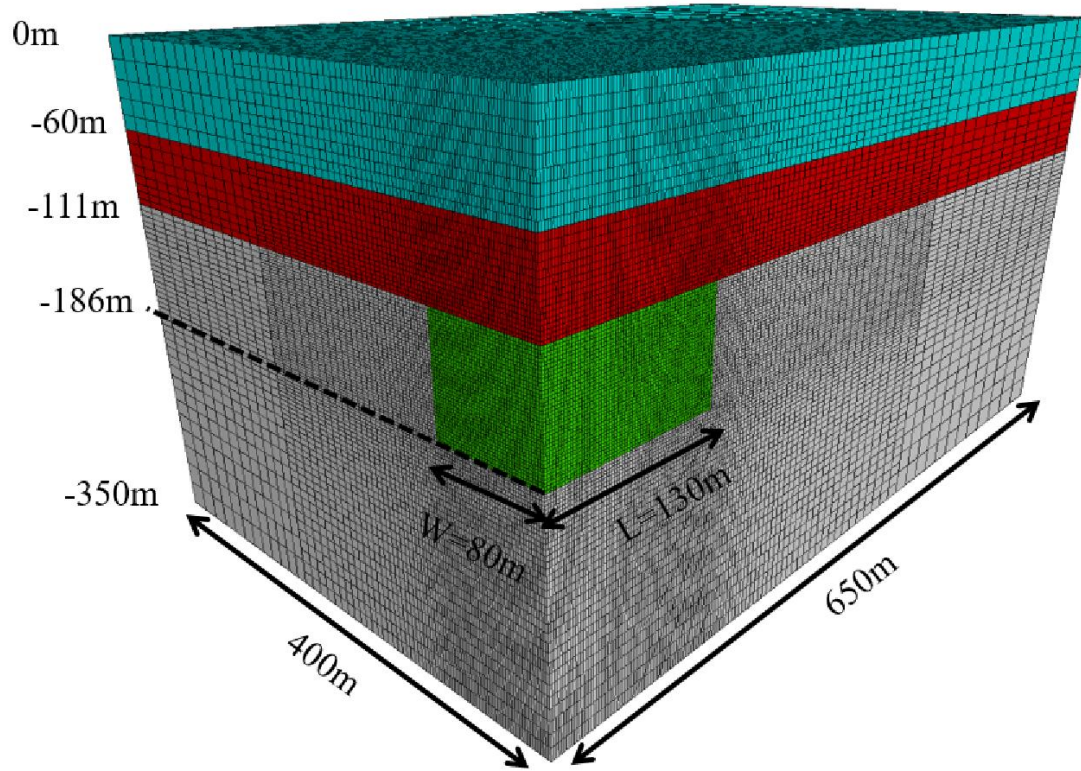


Maximum principal stress (Pa)

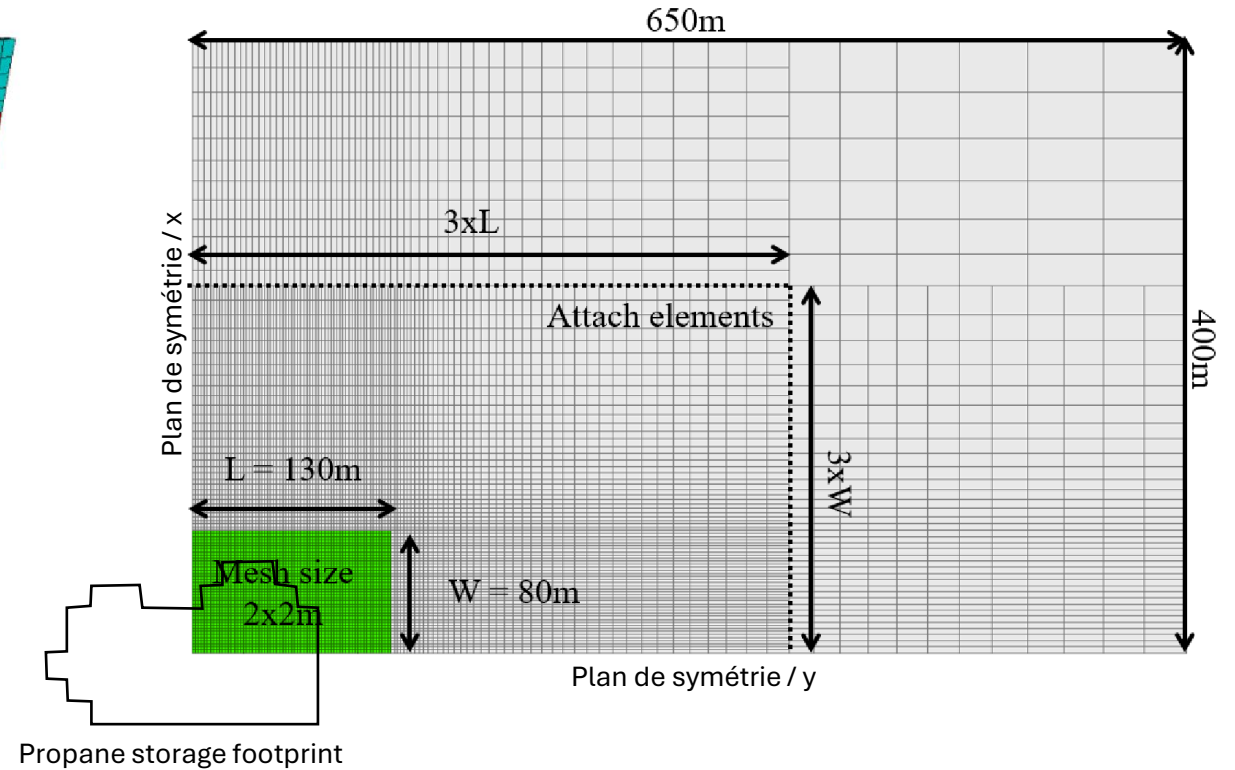


Evaluation des affaissements induits

3D model

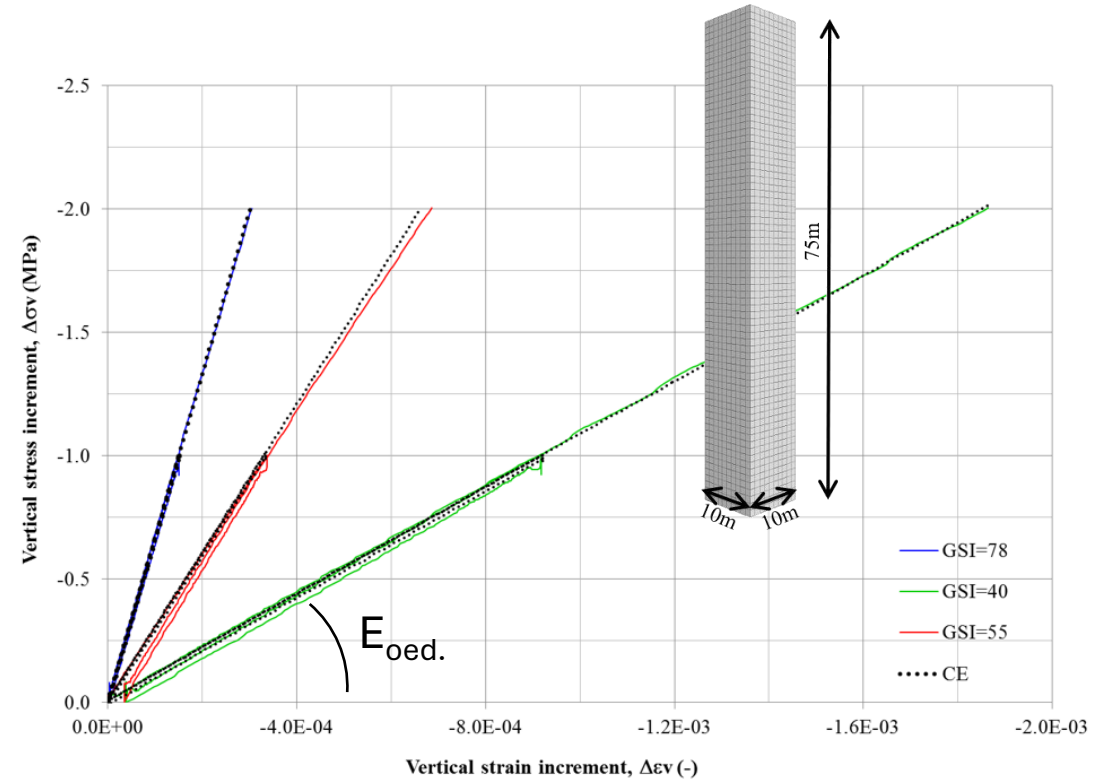
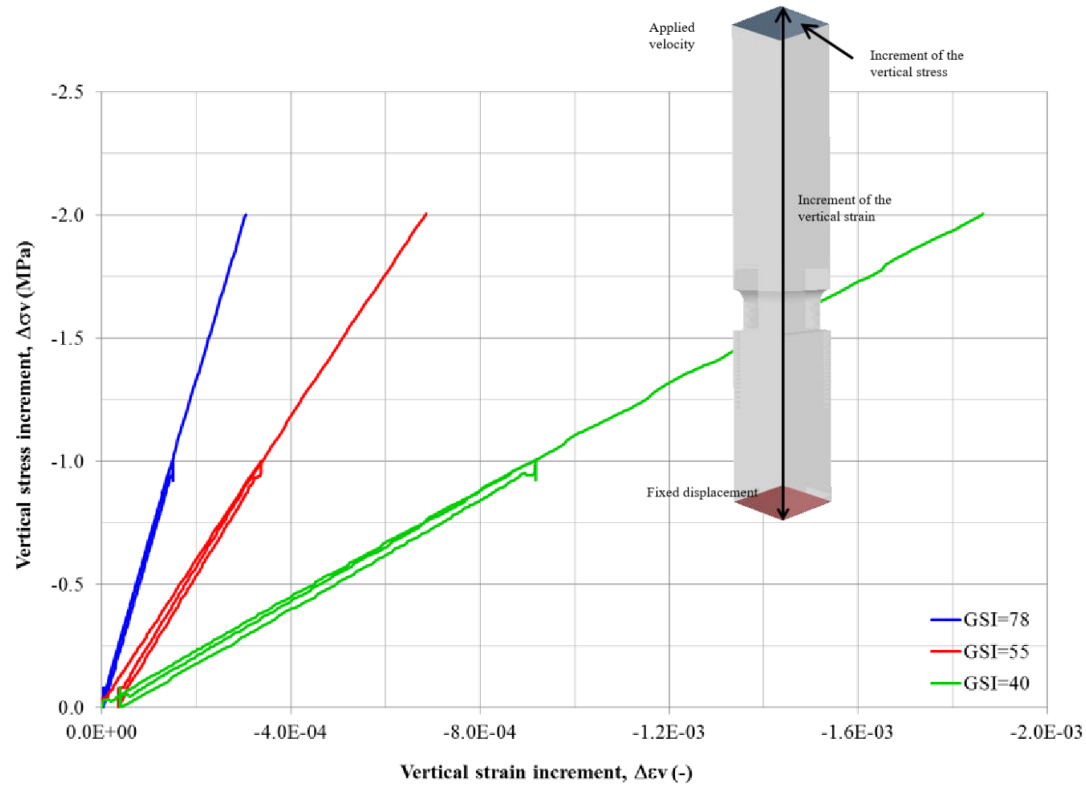


Plan view of the 3D model



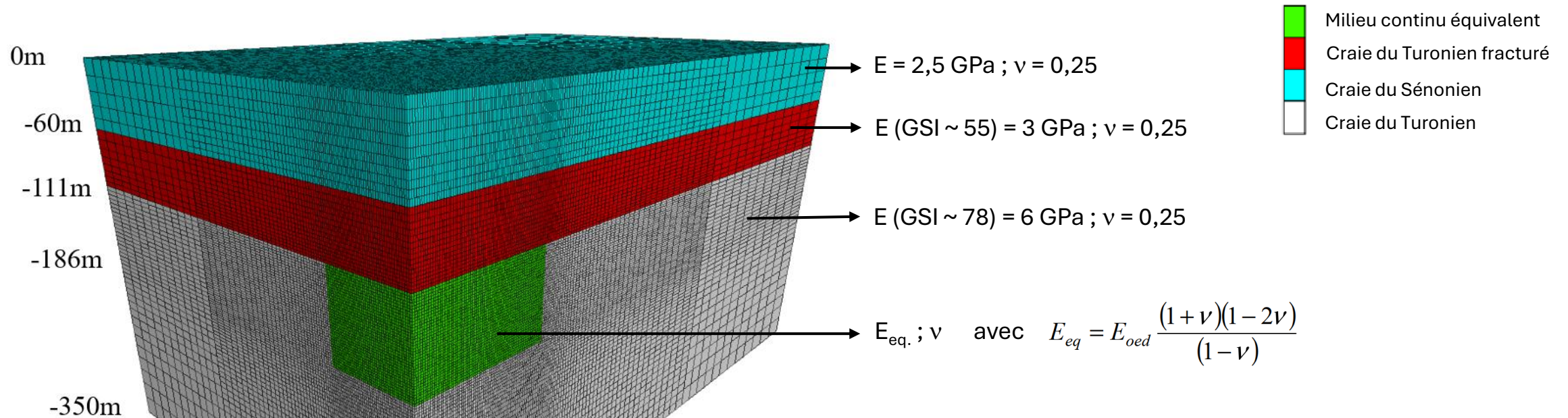
- Milieu continu équivalent
- Craie du Turonien fracturé
- Craie du Sénonien
- Craie du Turonien

Evaluation des affaissements induits



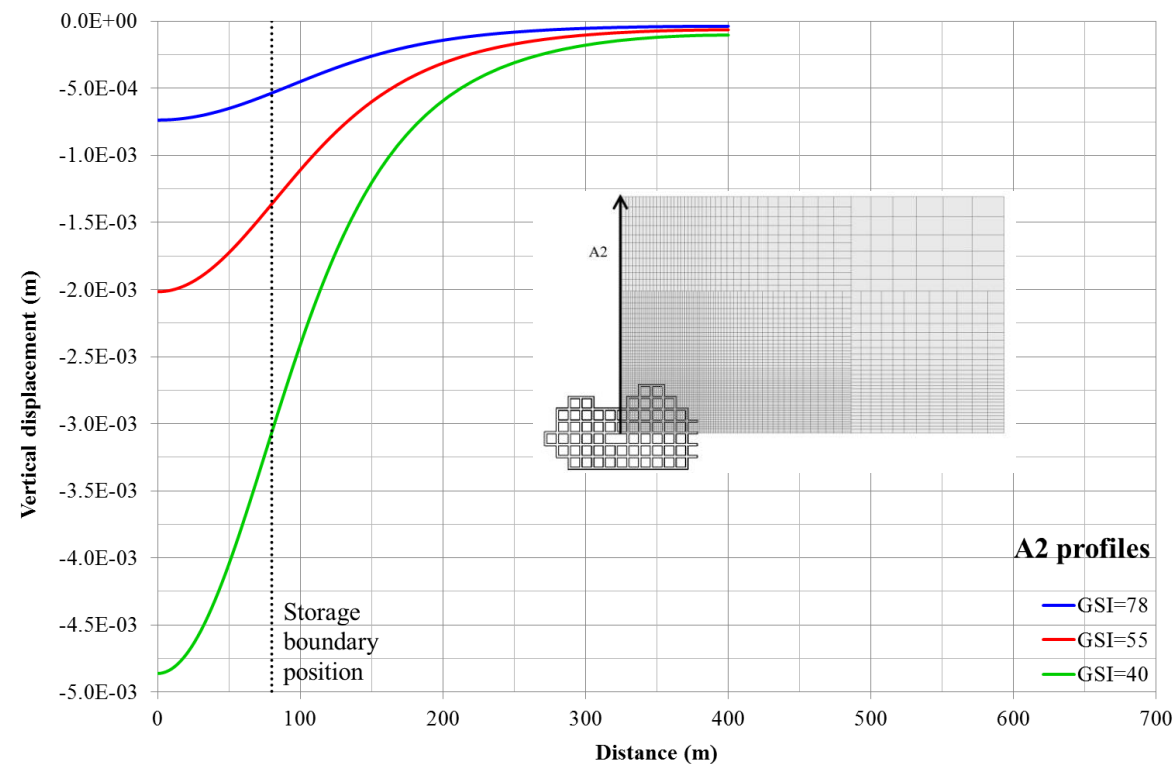
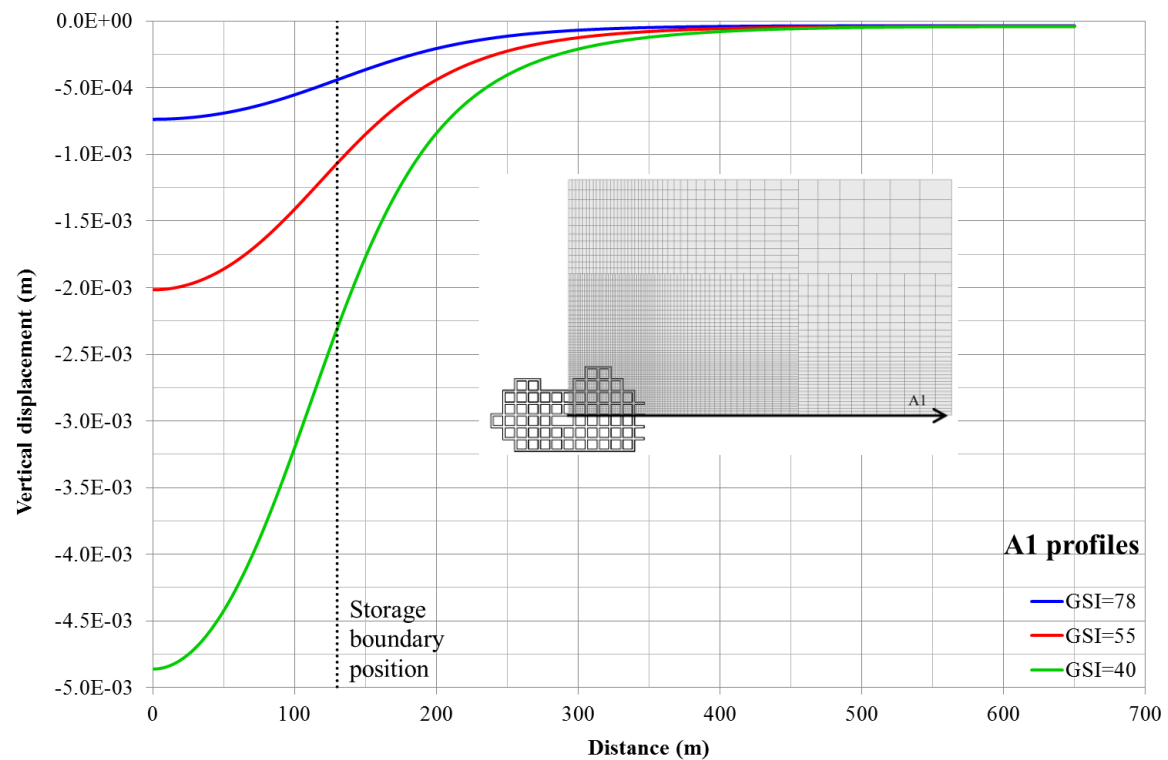
Source: Rapport ITASCA, 14R-017A1, Study of the induced ground subsidence over the long term

Evaluation des affaissements en surface

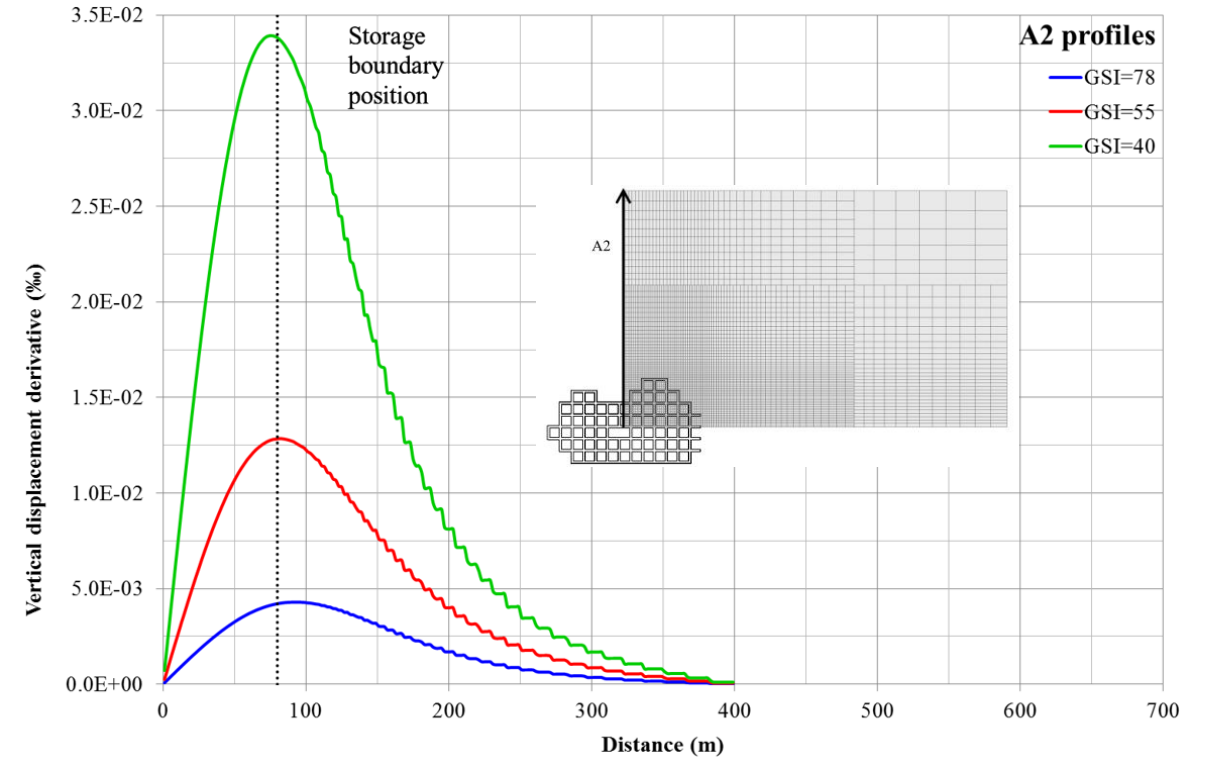
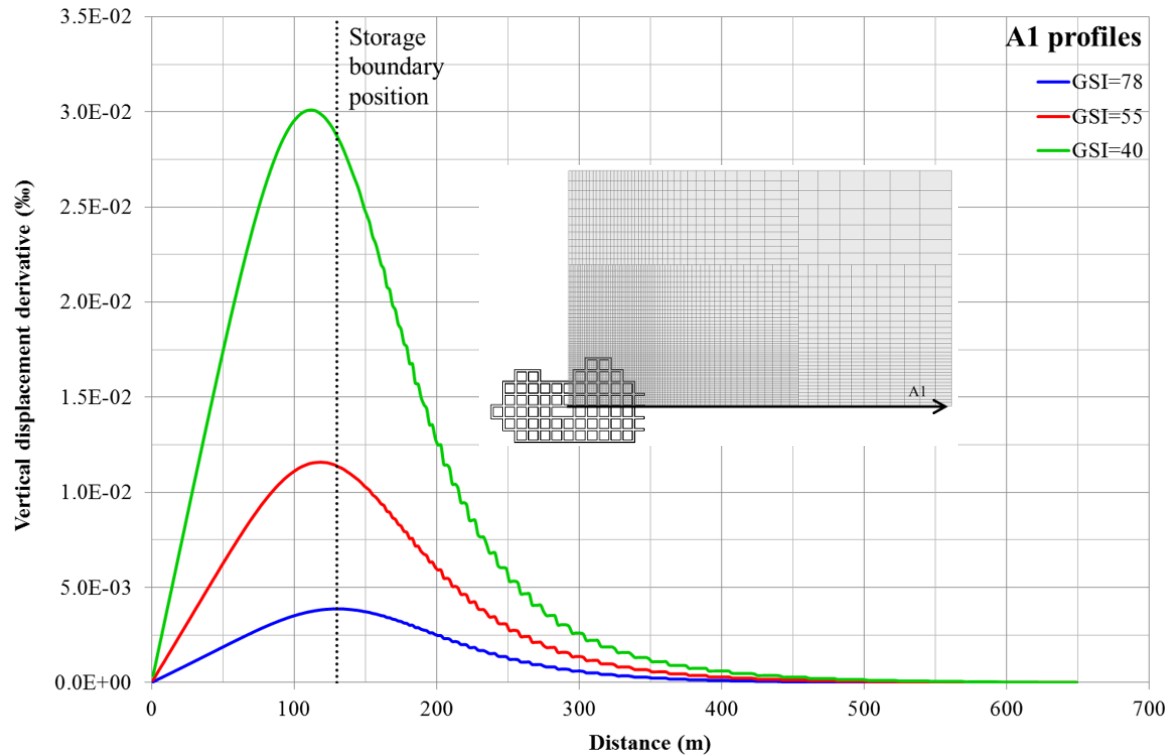


	Initial	Exploitation	Abandon (sans fontis)	Abandon (fontis 15,5m)
GSI	78	78	55	40
E _{oed.} (GPa)	--	6,6	2,9	1,1
E _{eq.} (GPa)	6	5,5	2,5	0,9
ν	0,25			

Evaluation des affaissements induits



Evaluation des affaissements induits



Conclusions

- La formation d'une cloche d'effondrement après ennoyage des cavités est très peu probable
- Dans l'éventualité de formation d'une cloche d'effondrement celle-ci se stabilise bien avant sa remontée au jour
- Les affaissements des terrains de surface sont très faibles même dans le cas conservatif considéré
- L'intégrité du site à long terme est assuré sans comblement des cavités
- Seuls les puits ont été comblés jusqu'en surface
- Il n'a pas été jugé utile de réaliser un suivi du site après démantèlement de l'ensemble des installations et abandon des cavités