



géostock

Underground storage experts

Modélisations 3D Eléments Finis Geosel-Manosque

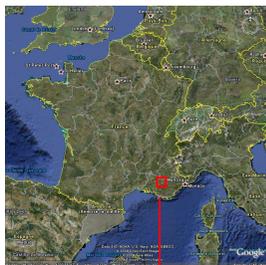
N. Gatelier, S. Laurent, H.D. Nguyen, T. You

Séance CFMR du 5 mars 2009

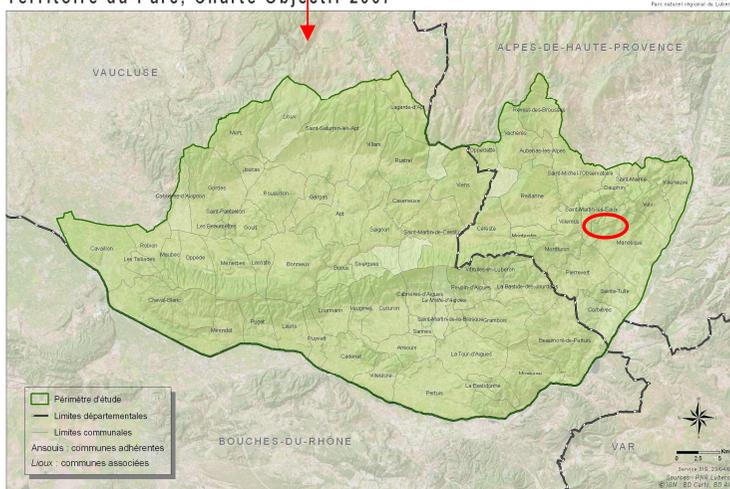


Le site de stockage de Manosque-Géosel

- 28 cavités
- capacité 6.5 Mm3
- hydrocarbures liquides
- fin des années 60



Territoire du Parc, Charte Objectif 2007



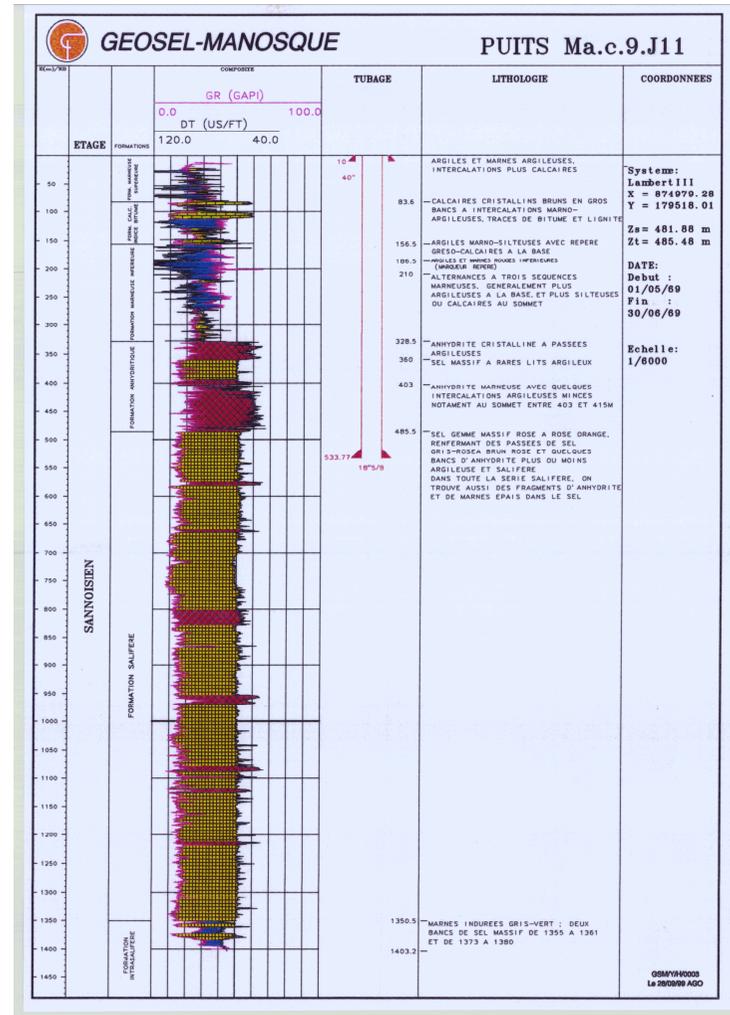


Géologie

Horizons calcaro-marneux
(de 0 à 350 m)

Couverture anhydritique
(de 350 m à 500 m)

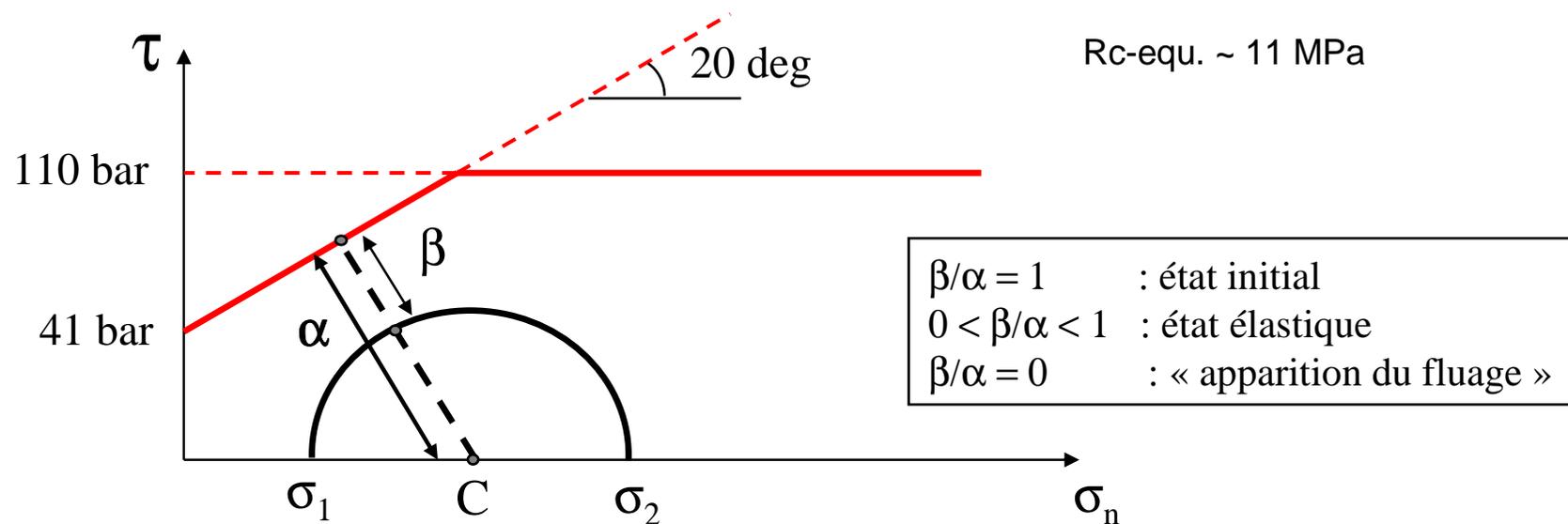
Formation salifère (halite)
(de 500 m à 1350 m)





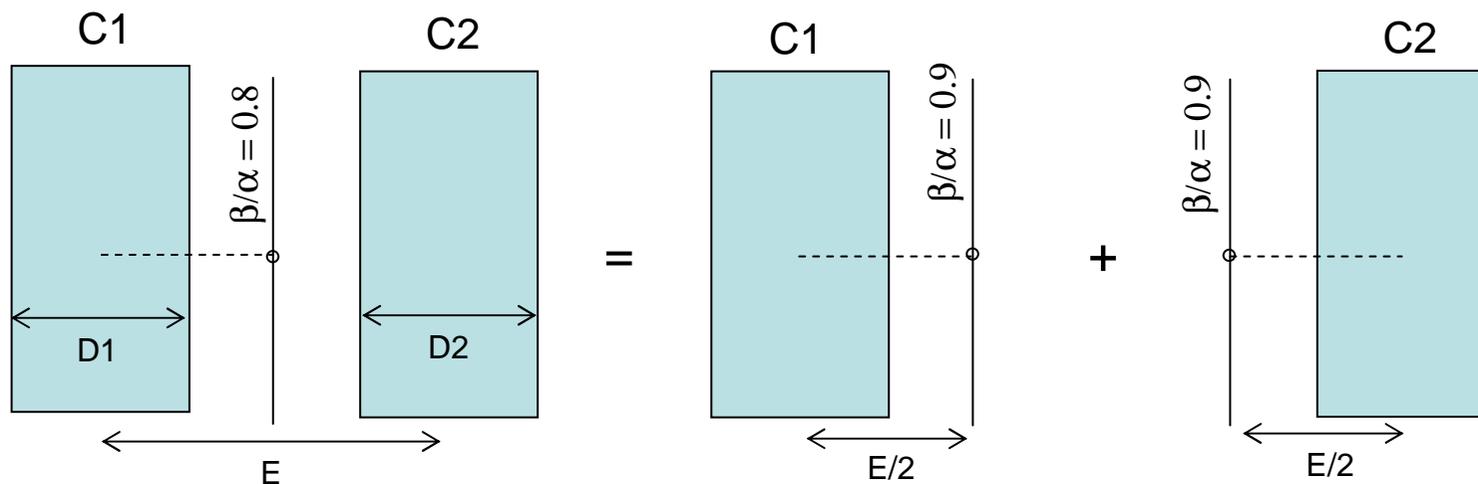
1ère étude de dimensionnement du site

- Dimensionnement du champ de cavités de Manosque 1
 - 1^{ère} étude par éléments finis (1971-1972) par D. Dubois
 - calcul en élasticité axisymétrique pour une cavité isolée
 - notion de degré de stabilité relative β/α par rapport à un critère dit « d'apparition du fluage »



Dimensionnement du site

- ❑ Critère de dimensionnement du pilier et des diamètres max des cavités
 - $\beta/\alpha \geq 0.8$ au centre du pilier entre 2 cavités adjacentes
 - Soit pour un calcul en cavité isolée un demi-pilier est donné par la distance à la paroi de la ligne isovaleur $\beta/\alpha \geq 0.9$
(approximation de superposition des contraintes)



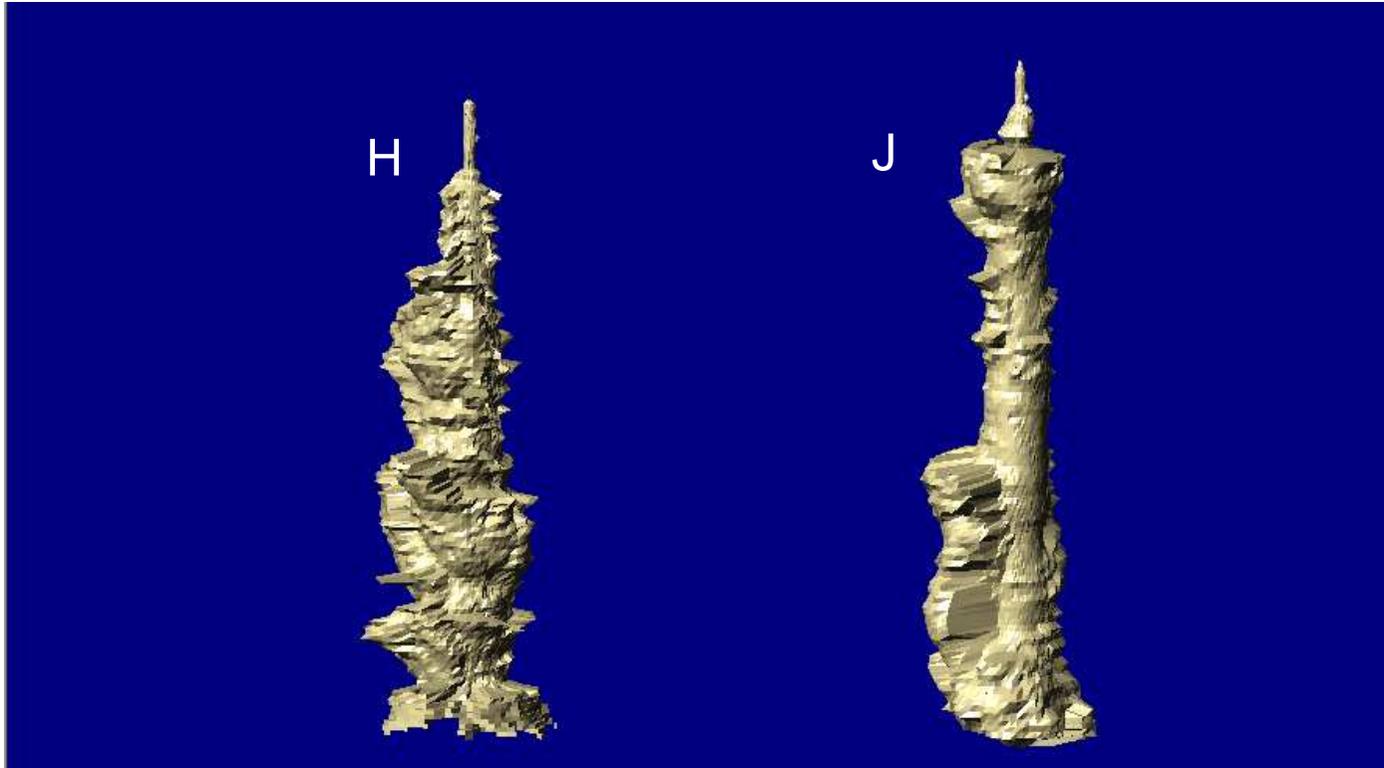
$$\Rightarrow 1.4 \times (D1 + D2) + 20 < E \quad (E, D1, D2 \text{ en mètre})$$



Dimensionnement du site

- De nombreuses études ultérieures (Geostock, Ecole des Mines de Paris, Ecole Polytechnique) profitant de la progression des connaissances de la rhéologie du sel et des moyens de calculs ont
 - Montré le caractère conservatif de la méthodologie
 - Justifié les approximations faites
 - Confirmé la règle de dimensionnement

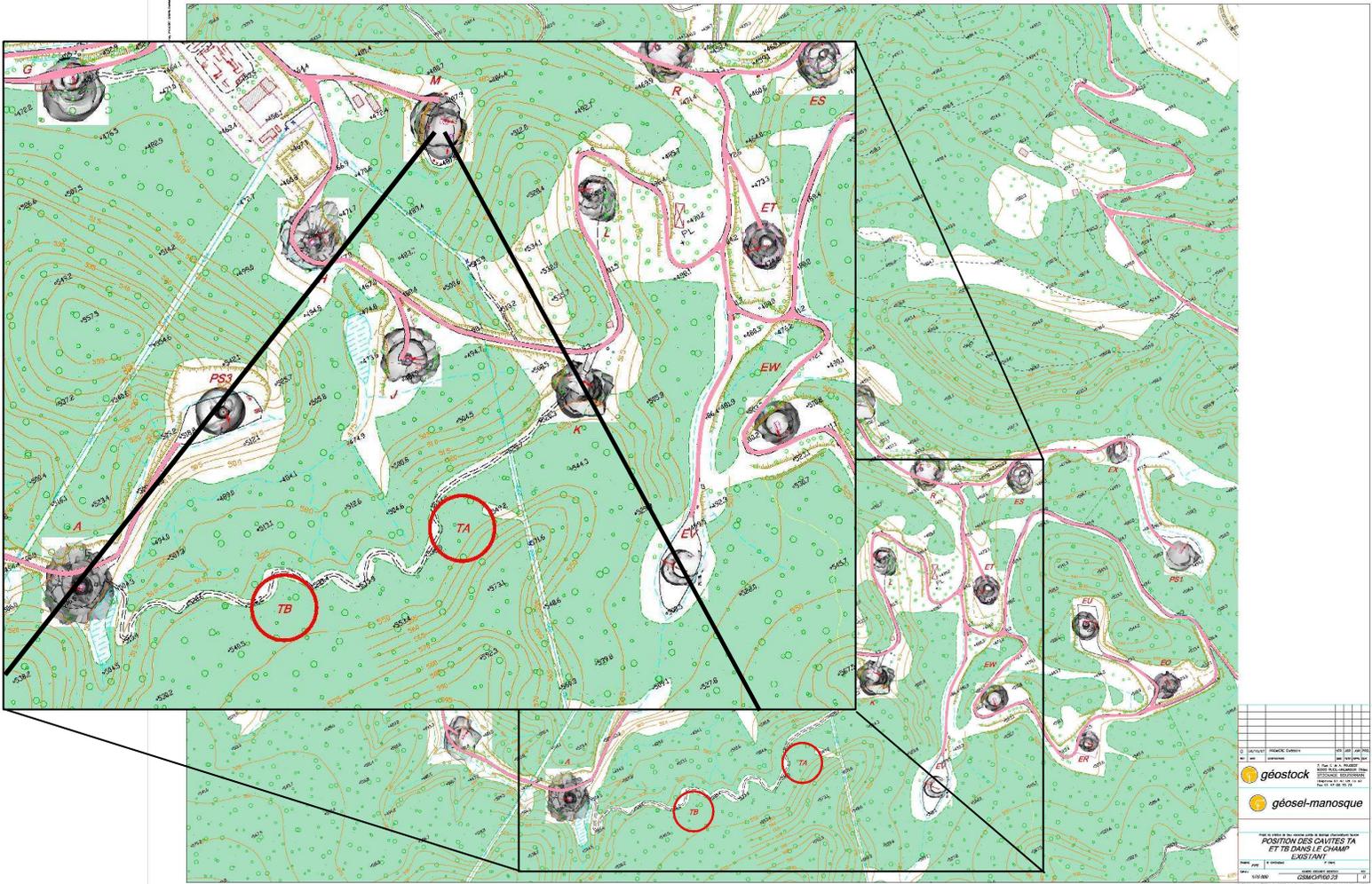
De la théorie à la pratique



- Dépassements locaux du diamètre maximum admissible (déviations de puits, asymétrie de développement au lessivage)
- Cas extrême des cavités H – J : $P_{\text{dim}} = 135 \text{ m}$; $P_{\text{sonar}} = 102 \text{ m}$

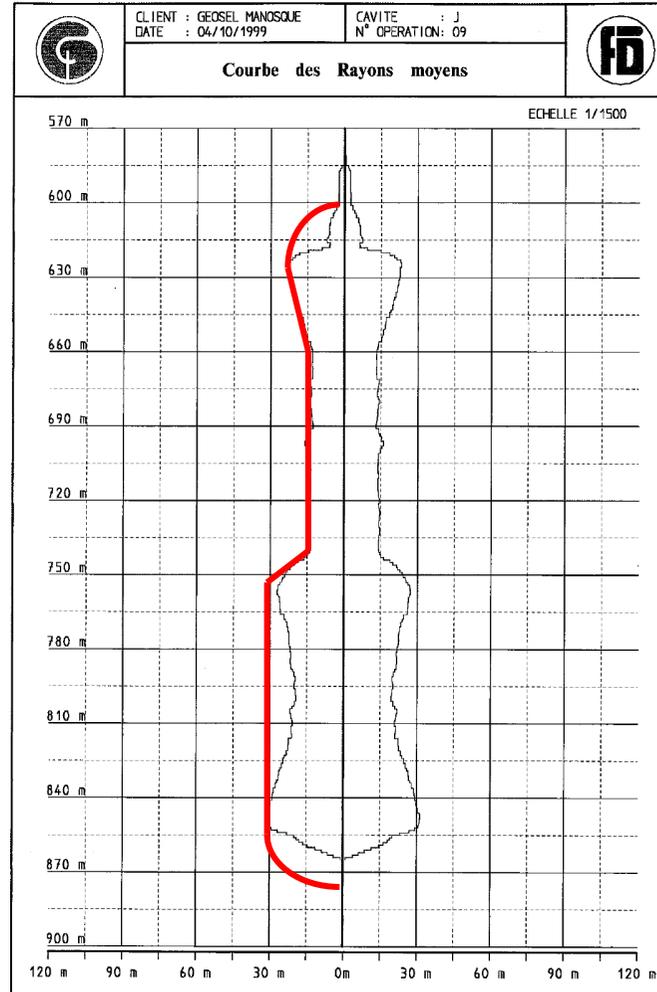
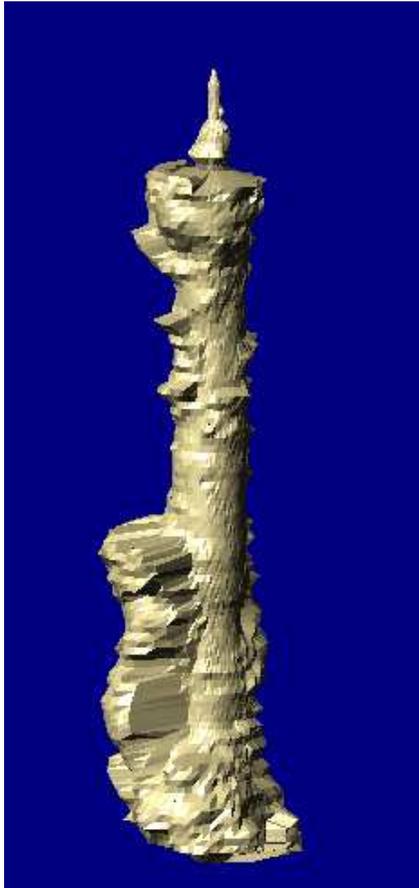


Modélisation 3D



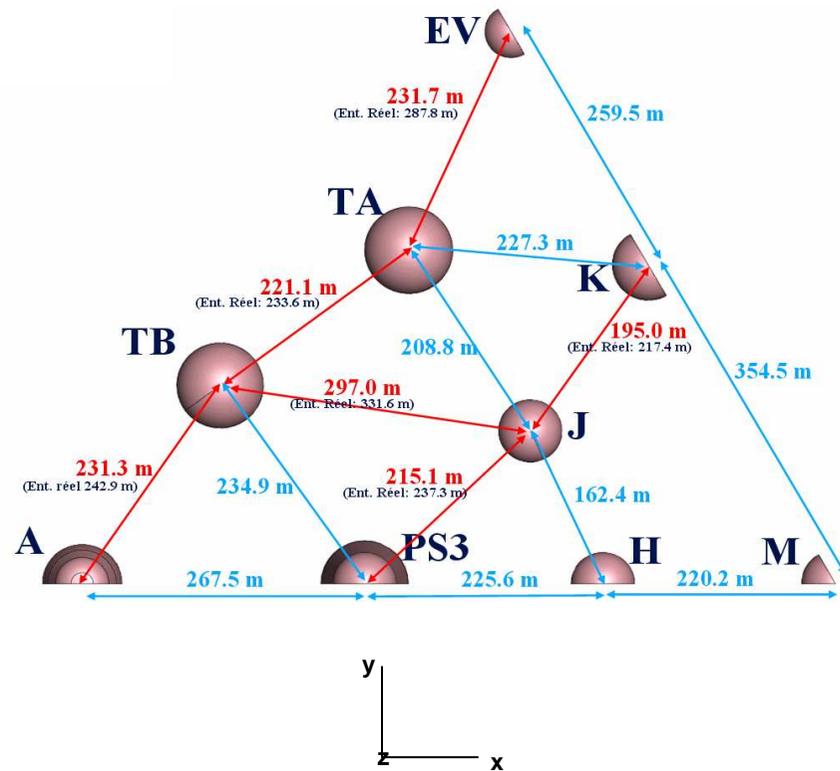
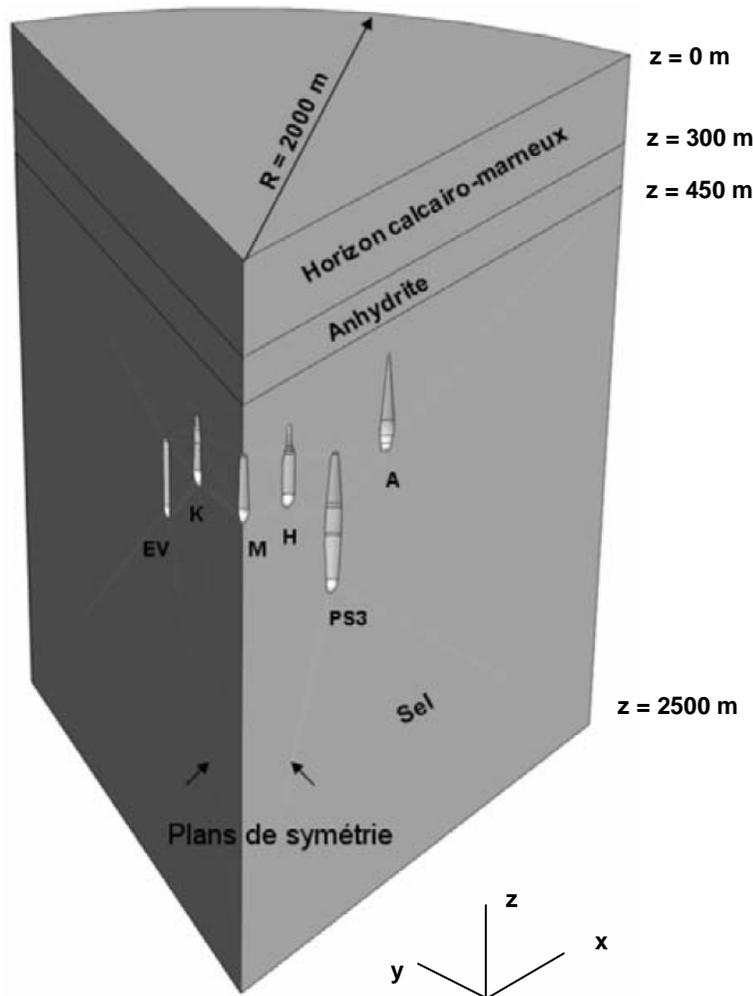


Simplification de la géométrie des cavités





Géométrie du modèle 3D



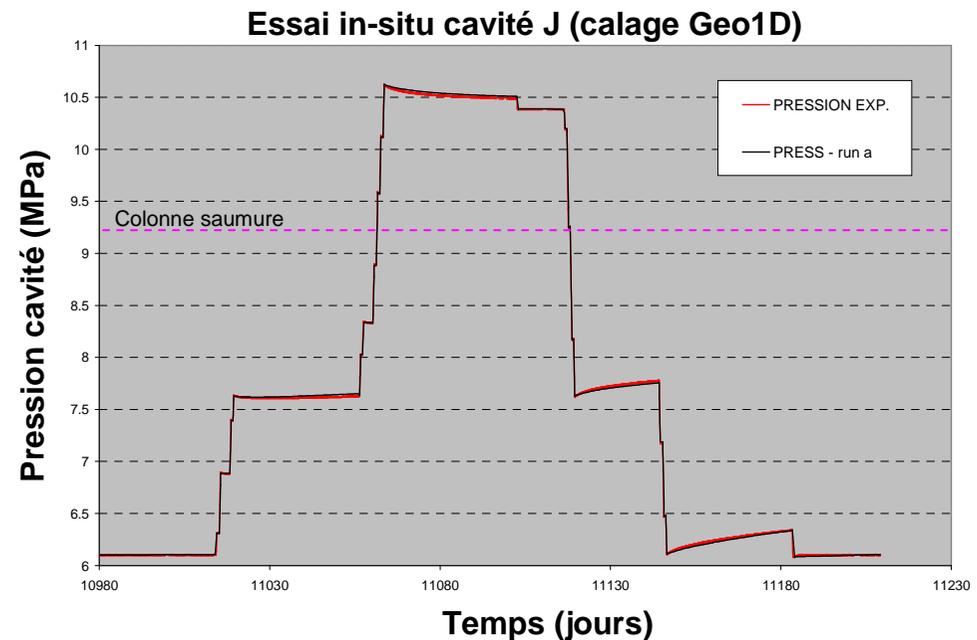
Paramètres matériaux

Formation	Module d'Young MPa	Coeff. de Poisson -	Poids volumique Kg/m3	Rhéologie
Calcaire/Marne	30 000	0.25	2 500	Élastique
Anhydrite	50 000	0.25	2 700	Élastique
Sel	25 000	0.25	2 300	Élastoviscoplastique

α	β	K MPa	Indice de Vouille (%)
0.3	2.5	0.8	0.3

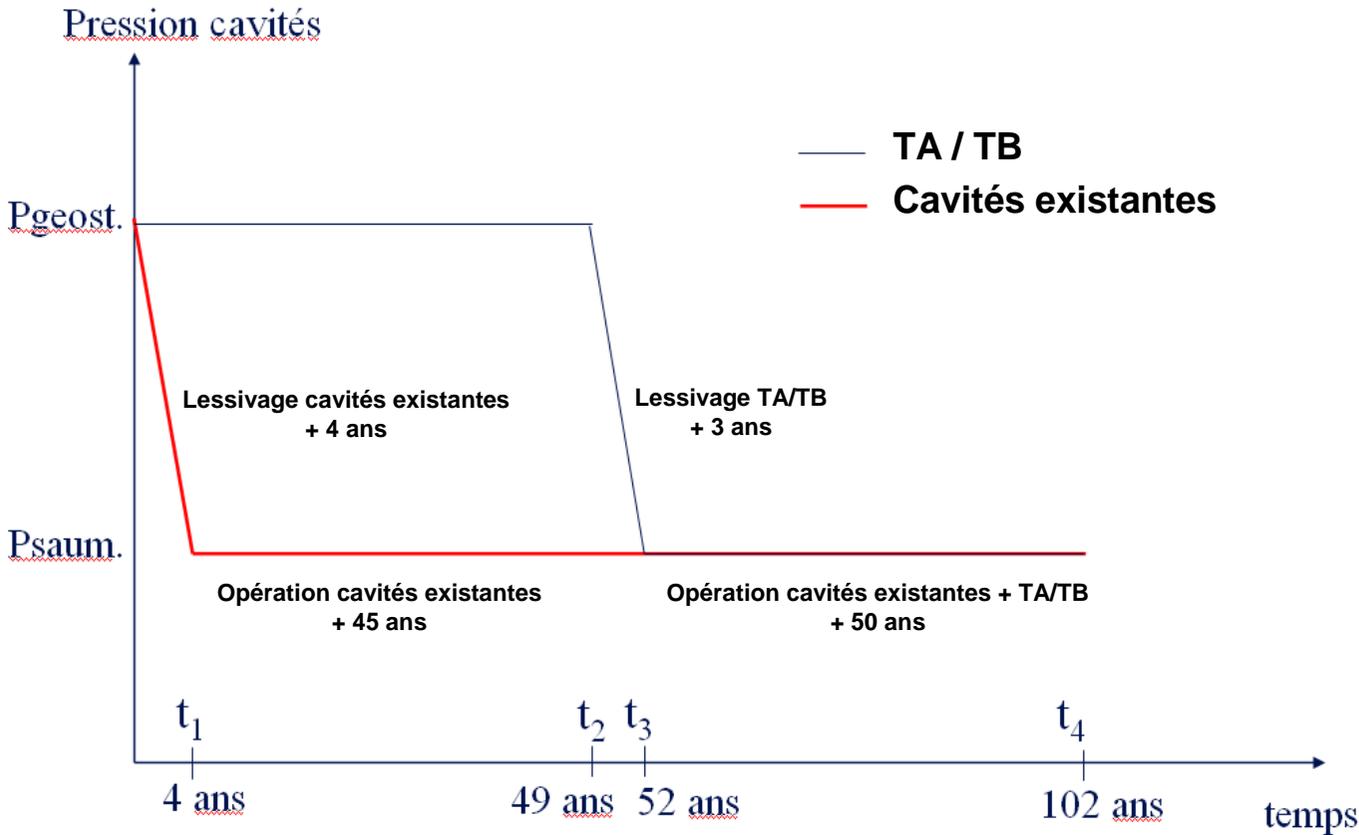
$$\varepsilon_{vp} = \left(\frac{\sigma}{K} \right)^\beta t^\alpha$$

- Loi de fluage de Lemaitre calé sur des essais de déchargement et (dé)pressurisation des cavités de Manosque



- Champ des contraintes initiales est isotrope et égal au poids des terres

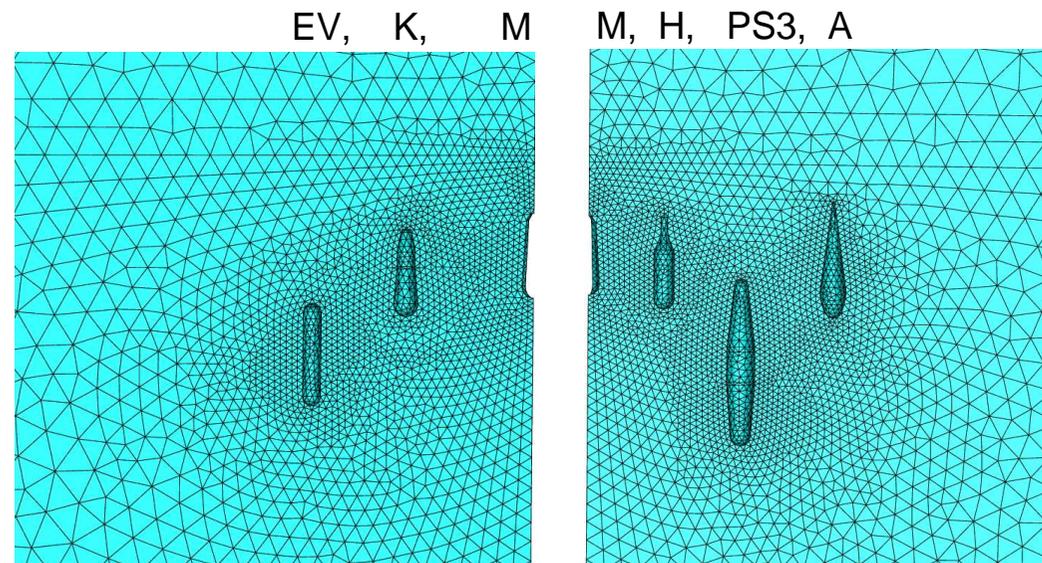
Chargement à la paroi des cavités

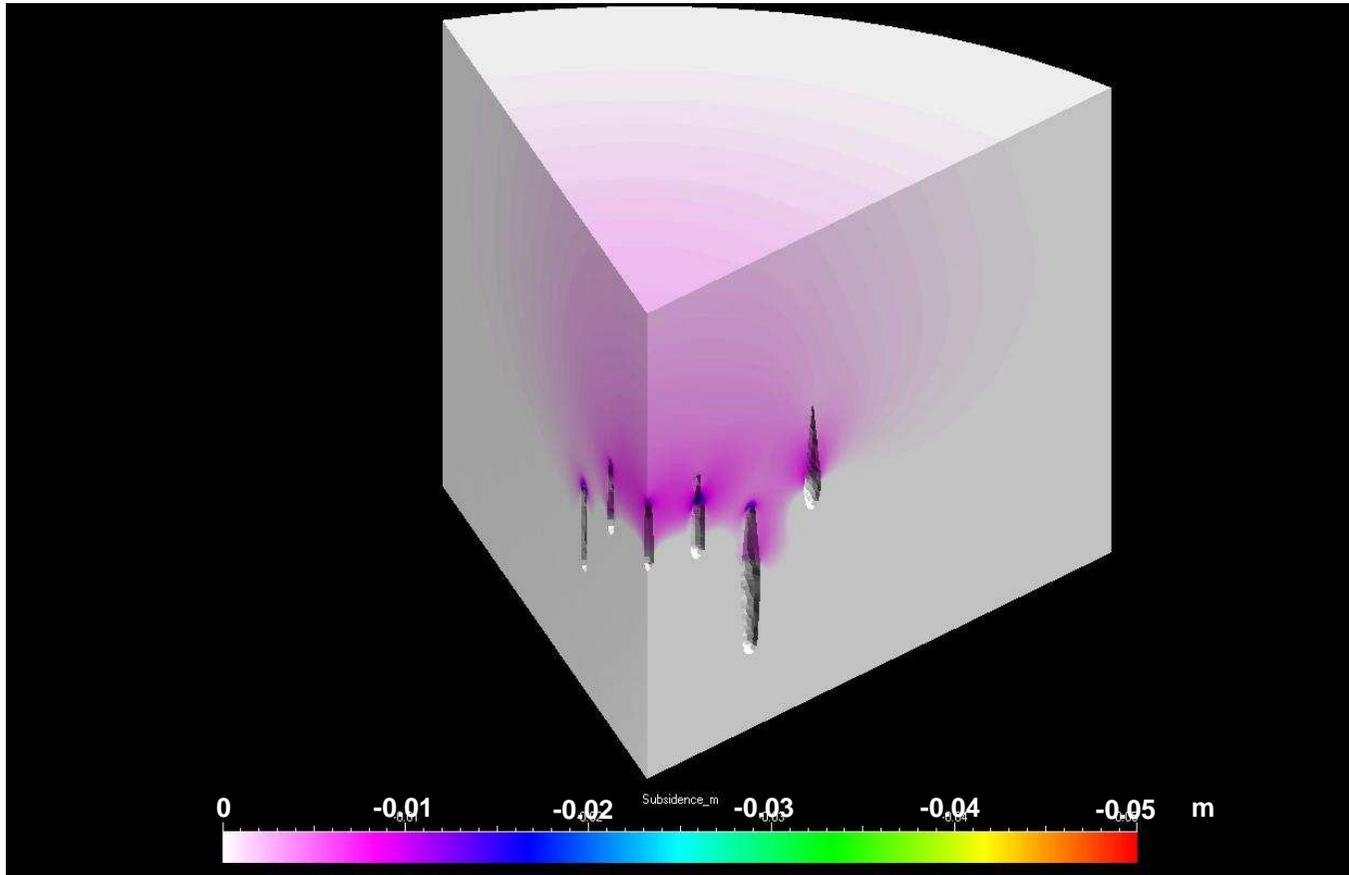




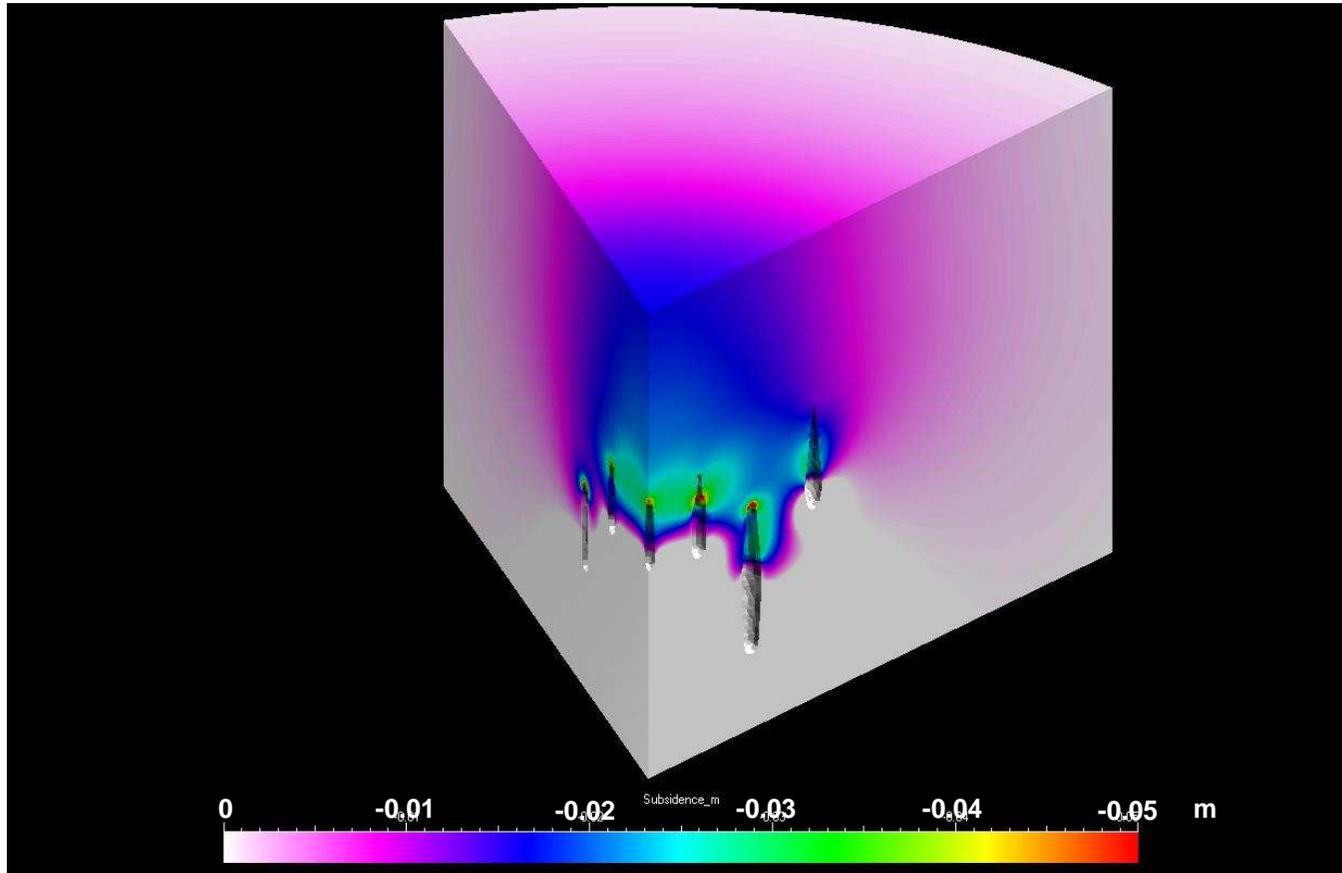
Quelques données

- Maillage éléments tétraédriques du 2nd degré (10 nœuds par élément)
- 191 101 éléments et 267 422 nœuds
- Dimension minimum éléments à la paroi ~18 m
- Pre-processeur Abaqus/CAE (Simulia)
- Solveur Viplef3D (Ecole des Mines de Paris / Armines)
- Post-processeur GoCad
- Temps de calcul = 4 jours

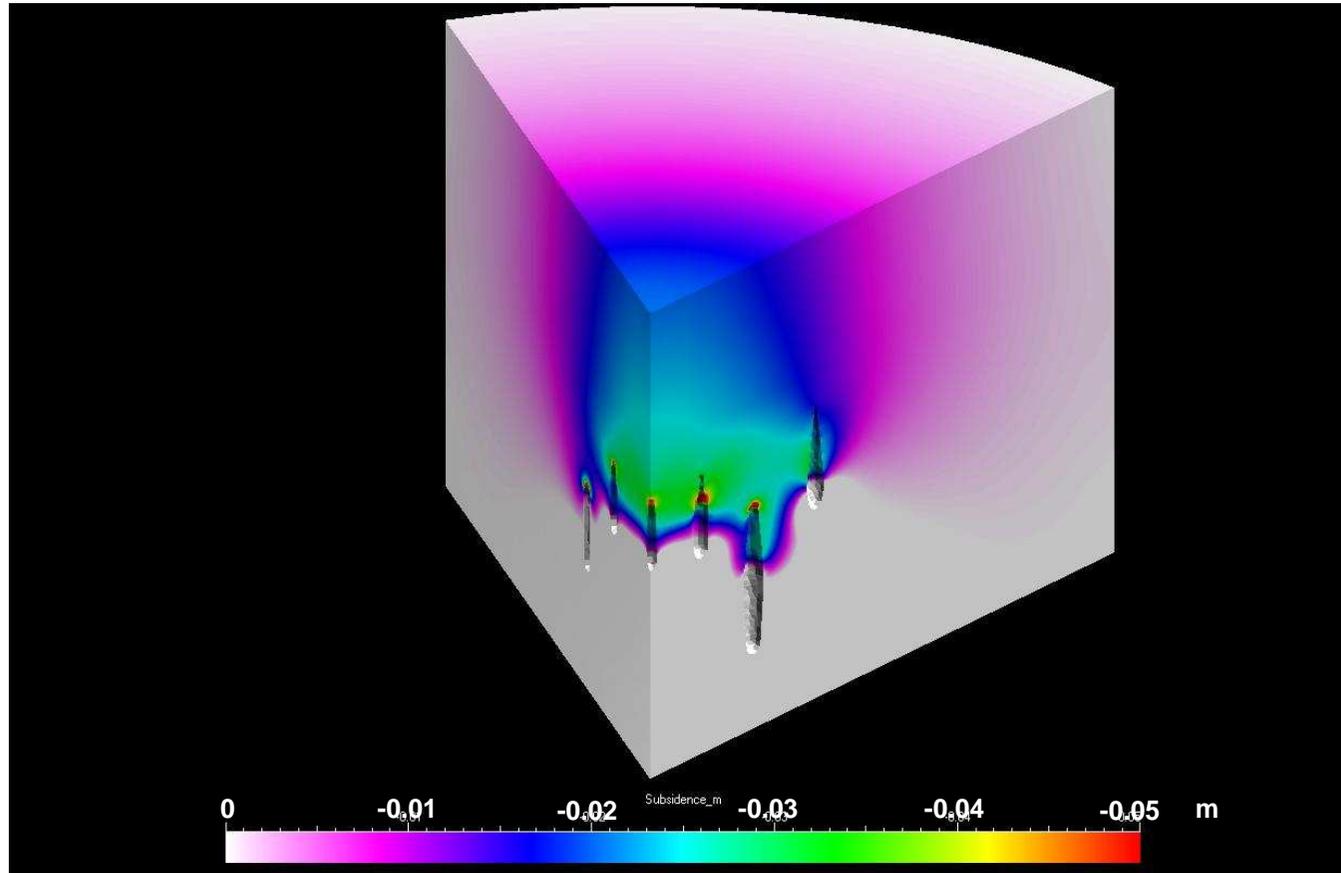




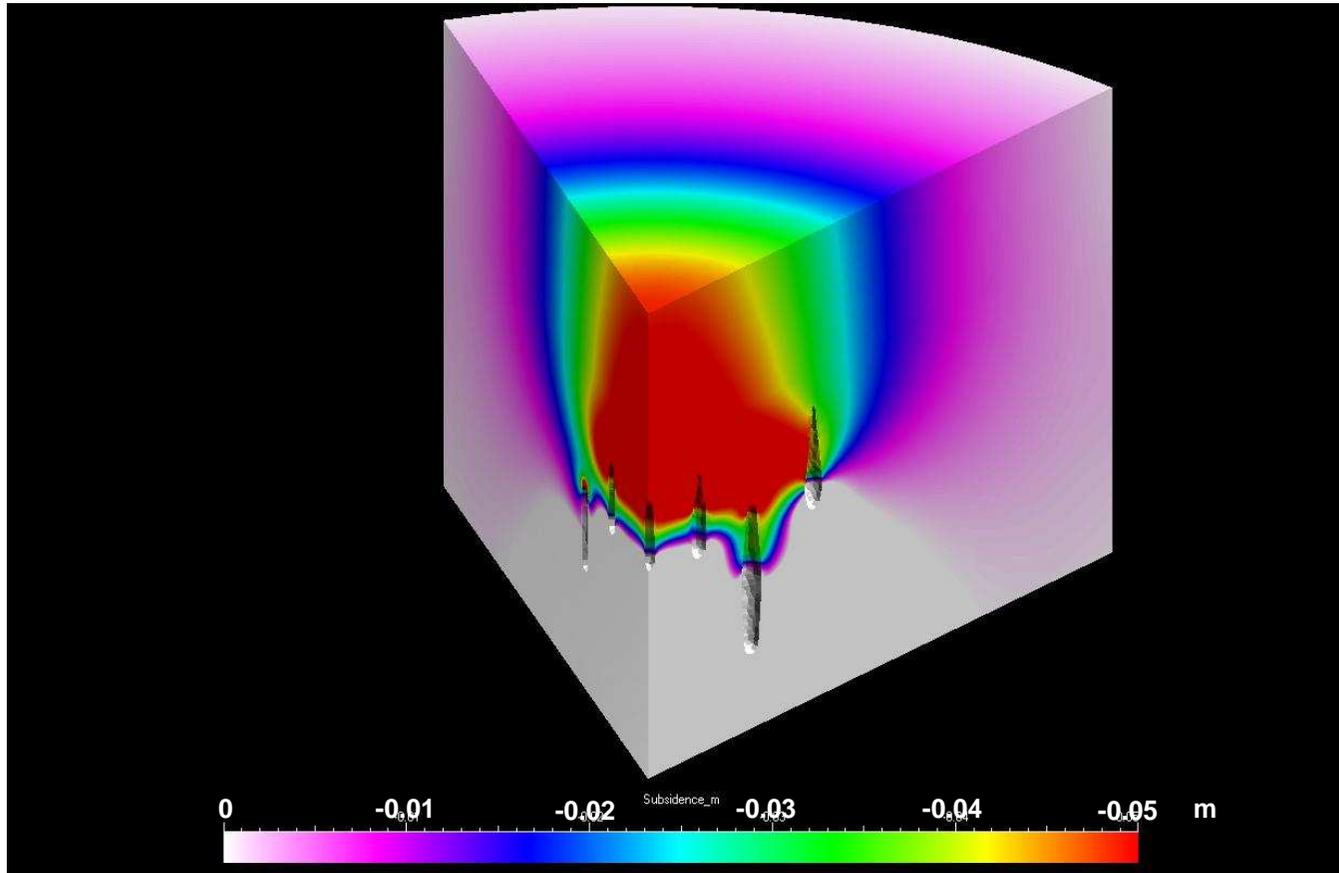
Fin du lessivage ($t_1 = 4$ ans)



Exploitation du site ($t_2 = 49$ ans)



Fin du lessivage des nouvelles cavités (t3 = 52 ans)

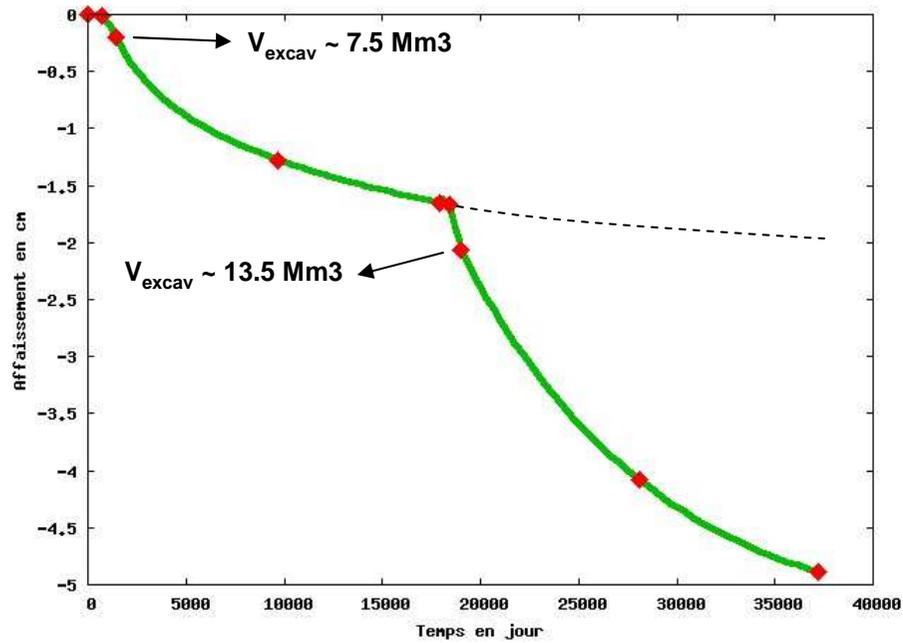


Exploitation du site ($t_4 = 102$ ans)

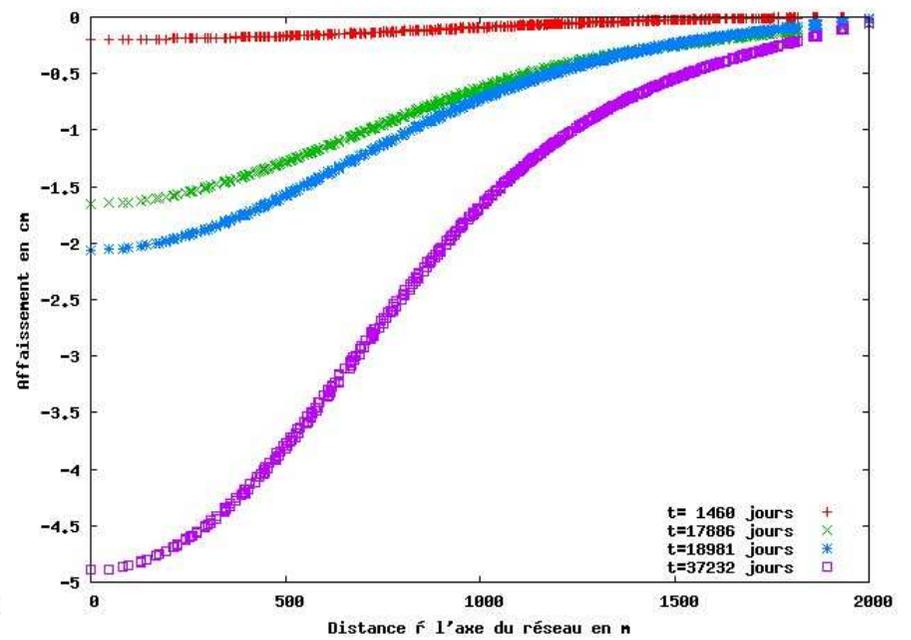


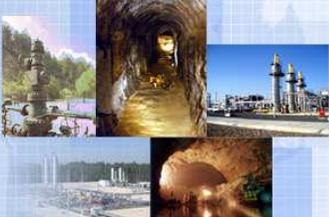
Subsidence

Historique de la subsidence au centre du réseau

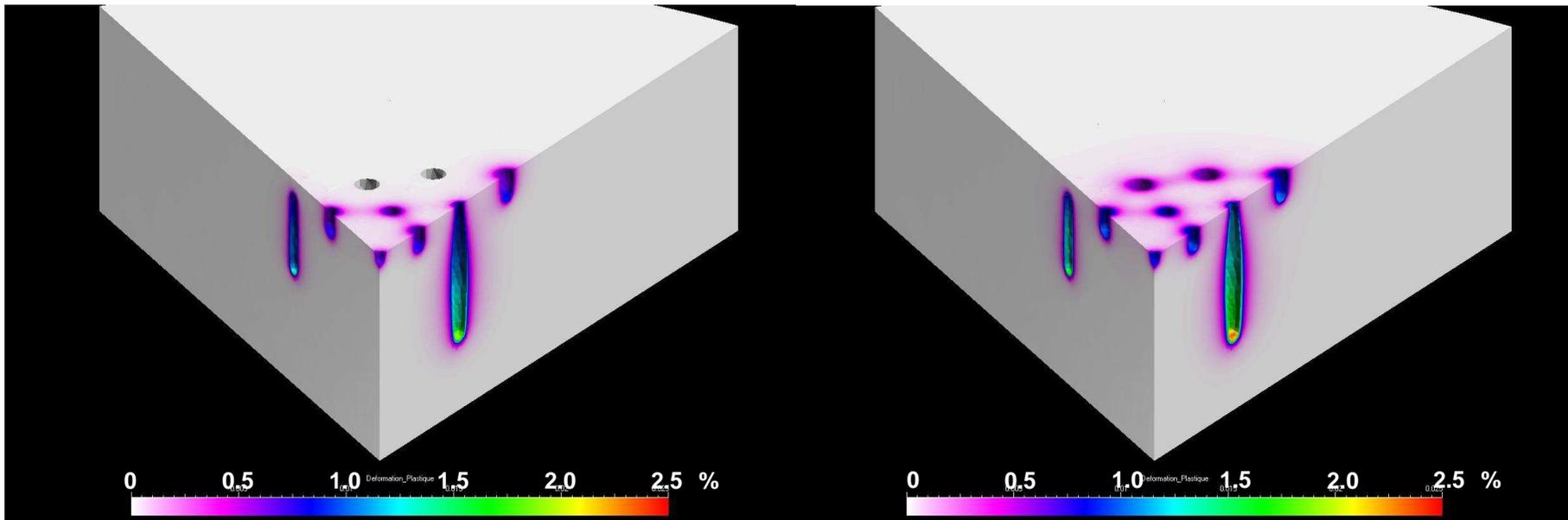


Cuvette de subsidence





Amplitude de la déformation viscoplastique



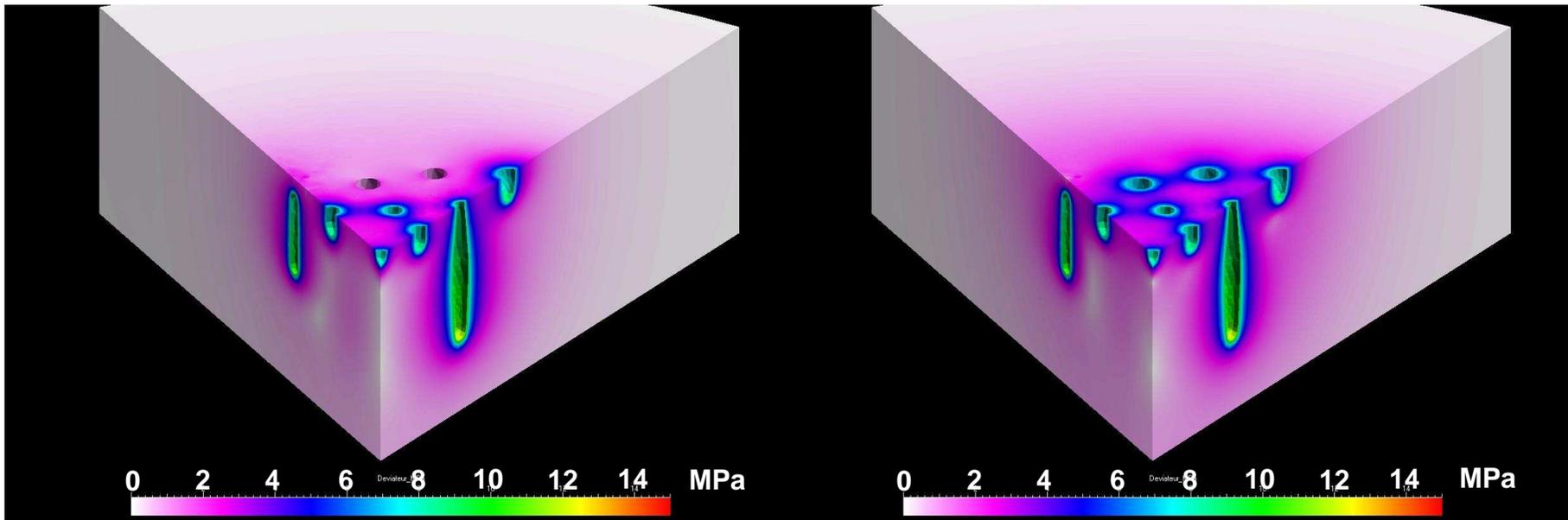
$t_2 = 49$ ans ; $z = -795$ m

$t_4 = 102$ ans ; $z = -795$ m

- Déformation max à mi-pilier < 0.3 %
- Déformation max paroi = 2.5 % (fond de la cavité PS3 la plus profonde)



Contrainte de Tresca



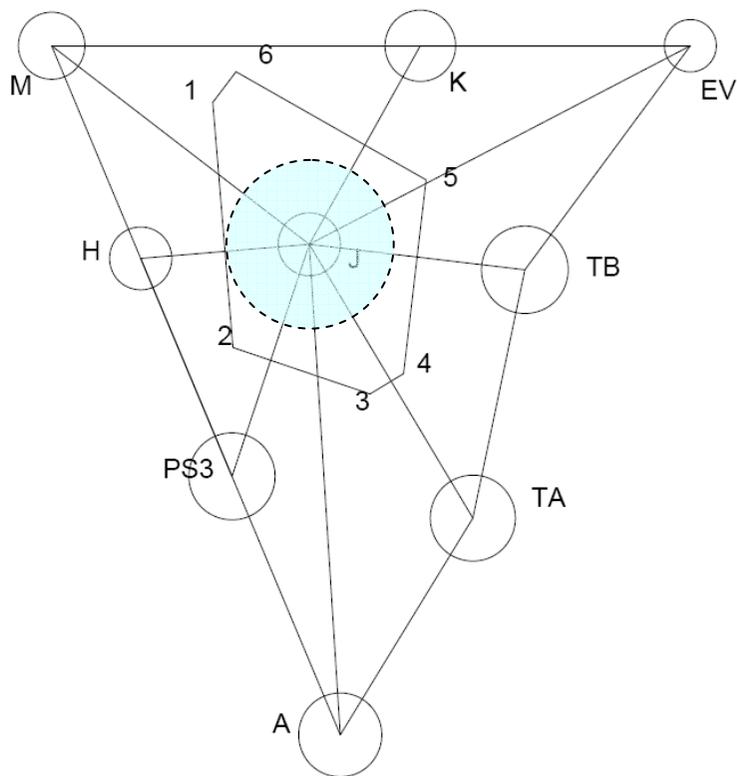
t2 = 49 ans ; z = -795 m

t4 = 102 ans ; z = -795 m

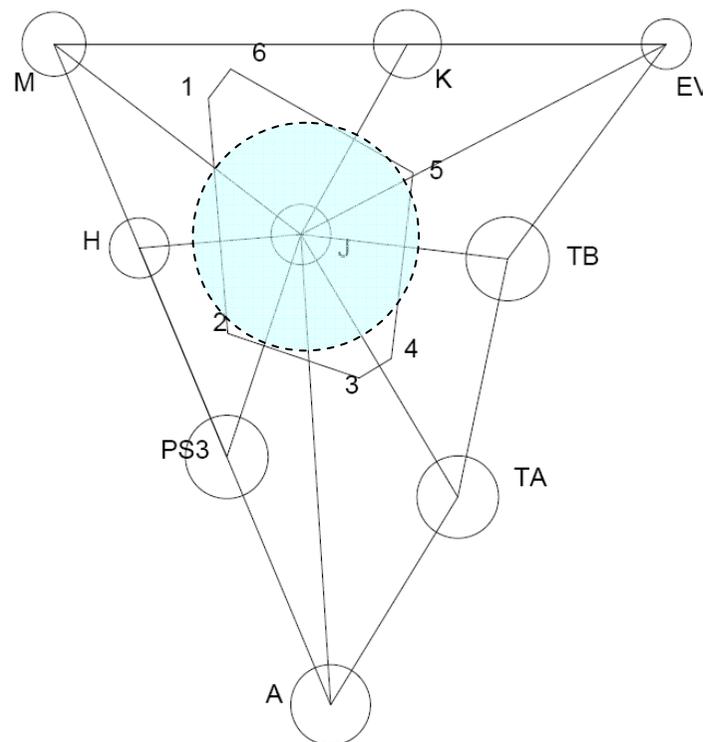
- Contrainte de Tresca max à mi-pilier < 5 MPa
- Contrainte de Tresca max paroi = 13 MPa (fond de la cavité PS3 la plus profonde)



Vers un modèle 2D équivalent ?

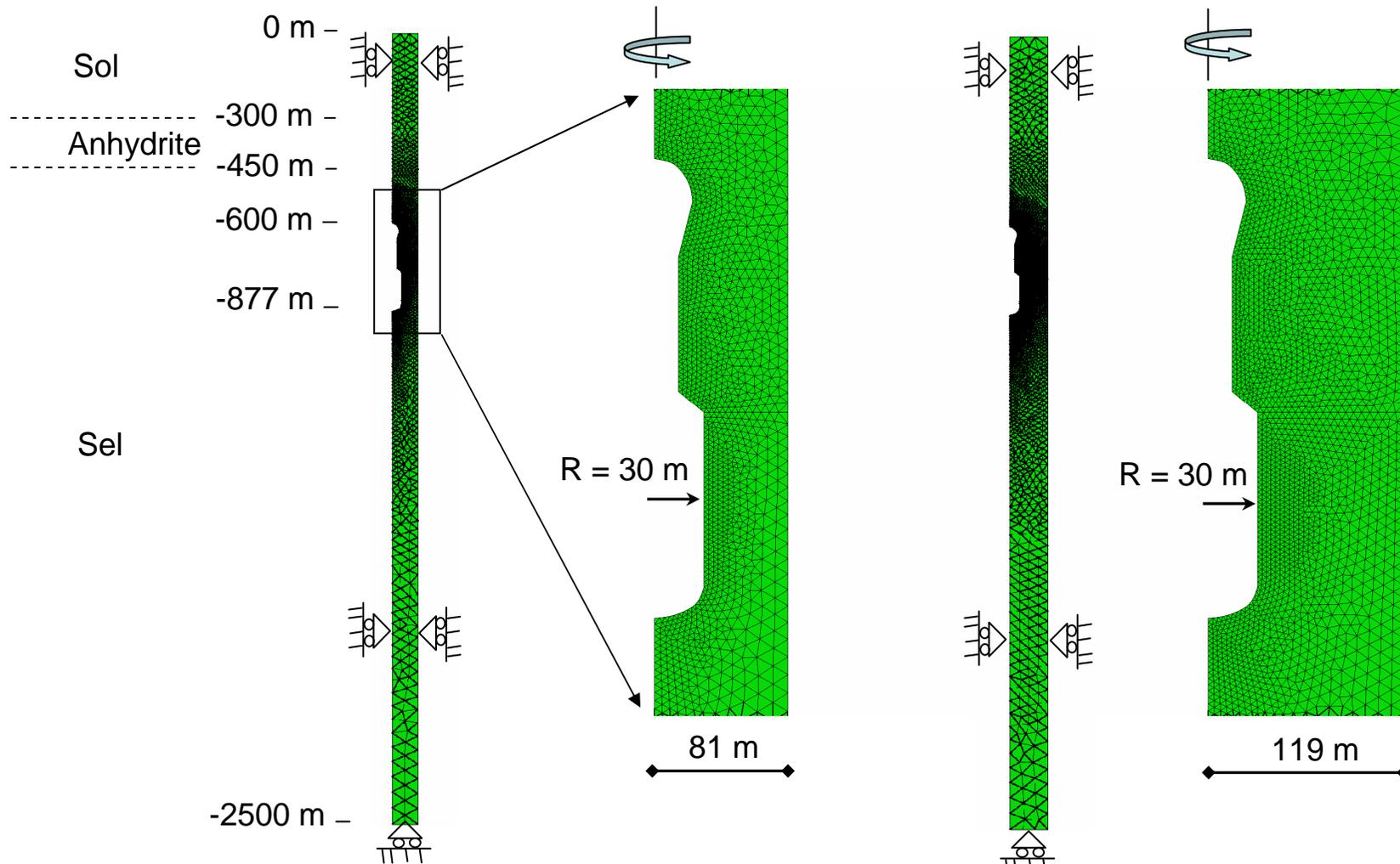


L_{pilier} minimum = 102 m
Taux de défrètement = 0.55



L_{pilier} aire tribulaire = 178 m
Taux de défrètement = 0.25

Maillages 2D axisymétrique

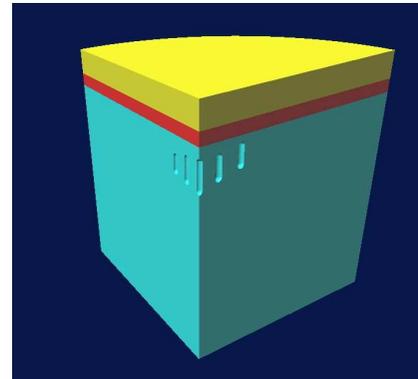
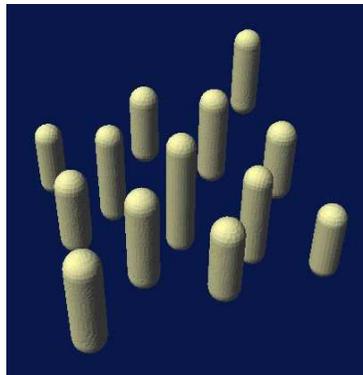
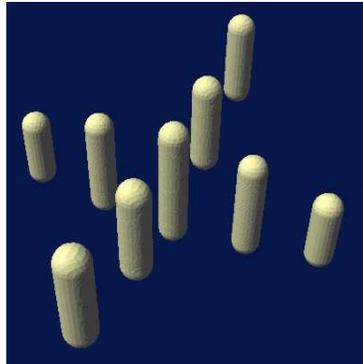




Comparaison des principaux résultats

		2D – 102 m	2D – 178 m	
	Unité	Axi Rmin	Axi Rtribut	3D
Subsidence	cm	29	11	5
Def visco. Paroi	%	0.9	0.7	0.8
Def visco. Pilier	%	0.3	<0.1	<0.1
Tresca Paroi	MPa	10.0	9.0	8.5
Tresca Pilier	MPa	6.3	4.0	4.6
β/α Pilier	—	0.70	0.82	0.75

Effet de forme des cavités

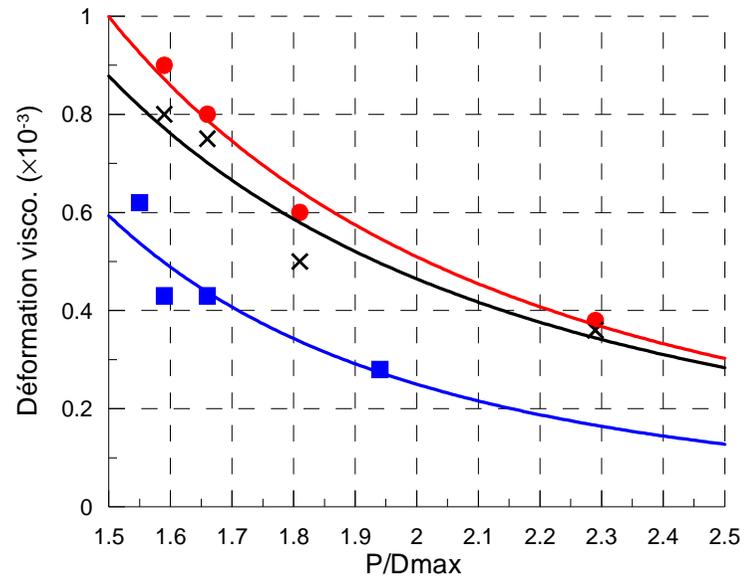


CAS	Volume M m ³	Perte k m ³	Cuvette k m ³	Subsidence mm
1	10,67	43,6 (0.4 %)	5,2	4,8
2	14,97	59,0 (0.4 %)	10,6	9,4
3	9,69	41,1 (0.4 %)	7,0	5,5



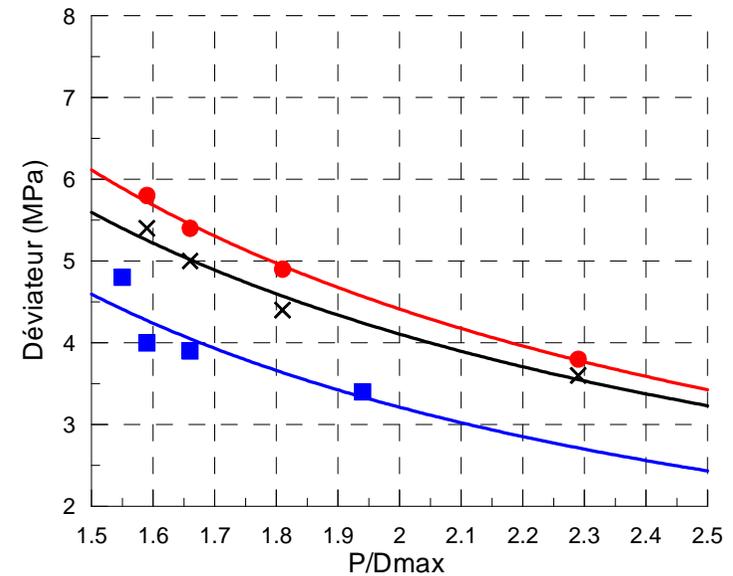
Effet de forme des cavités

Déformation max au centre du pilier



Déviateur max au centre du pilier

- Cas 1
- × Cas 2
- Cas 3



- ❑ Modèle 3D nécessaire pour calcul de subsidence
- ❑ Les dépassements de diamètre ne remettent pas en cause la stabilité
- ❑ Modèle 3D consommateur en temps:
 - ❑ de préparation (maillage),
 - ❑ de calcul (jours / 3D ; heures / 2D ; minutes / 1D)
 - ❑ d'exploitation des résultats (sorties graphiques)
- ❑ Modèle 2D équivalent (pilier minimum ou aire tributaire) permet d'encadrer les résultats d'un 3D ($R_{\text{tribut}} \sim 3D$)
- ❑ Pour le site de Manosque le volume de la cuvette de subsidence ne représente que 15% de la perte de volume des cavités
- ❑ La prise en compte de formes approchées « réalistes » des cavités permet de diviser par 2 les déformations visco dans le piler et de 30% le déviateur des contraintes par rapport à des formes cylindriques enveloppes



Merci pour votre attention...
Des questions ?