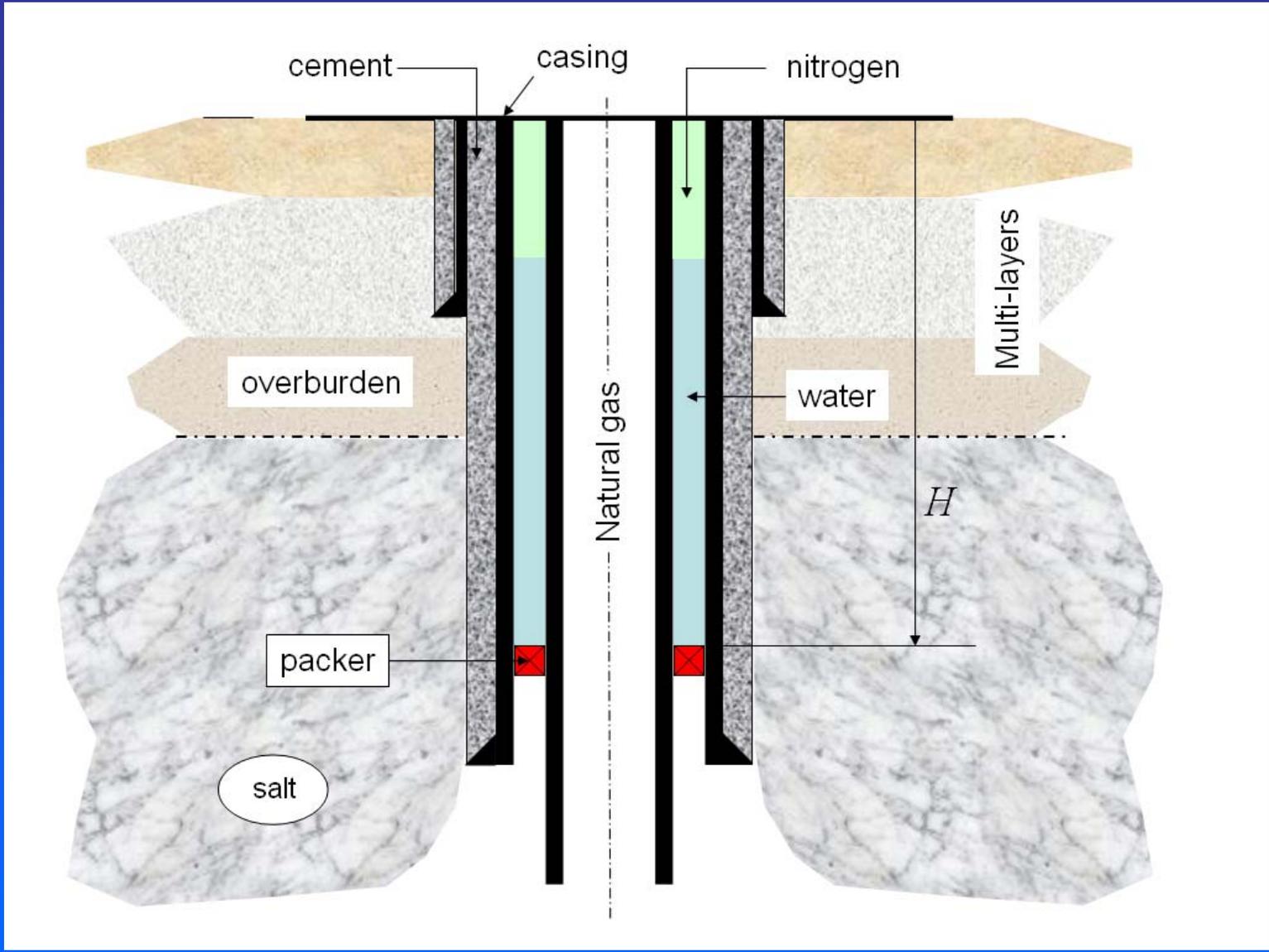


SIMULATIONS NUMERIQUES DU COMPORTEMENT MECANIQUE DE CUVELAGES CIMENTES SOUMIS A DES VARIATIONS DE PRESSION INTENSES ET RAPIDES

B. Brouard, Brouard Consulting
P. Bérest, Ecole Polytechnique, France
C. Caligaris, G. Hévin, T. Pichery, Gaz de France
A. Frangi, Politecnico di Milano, Italy

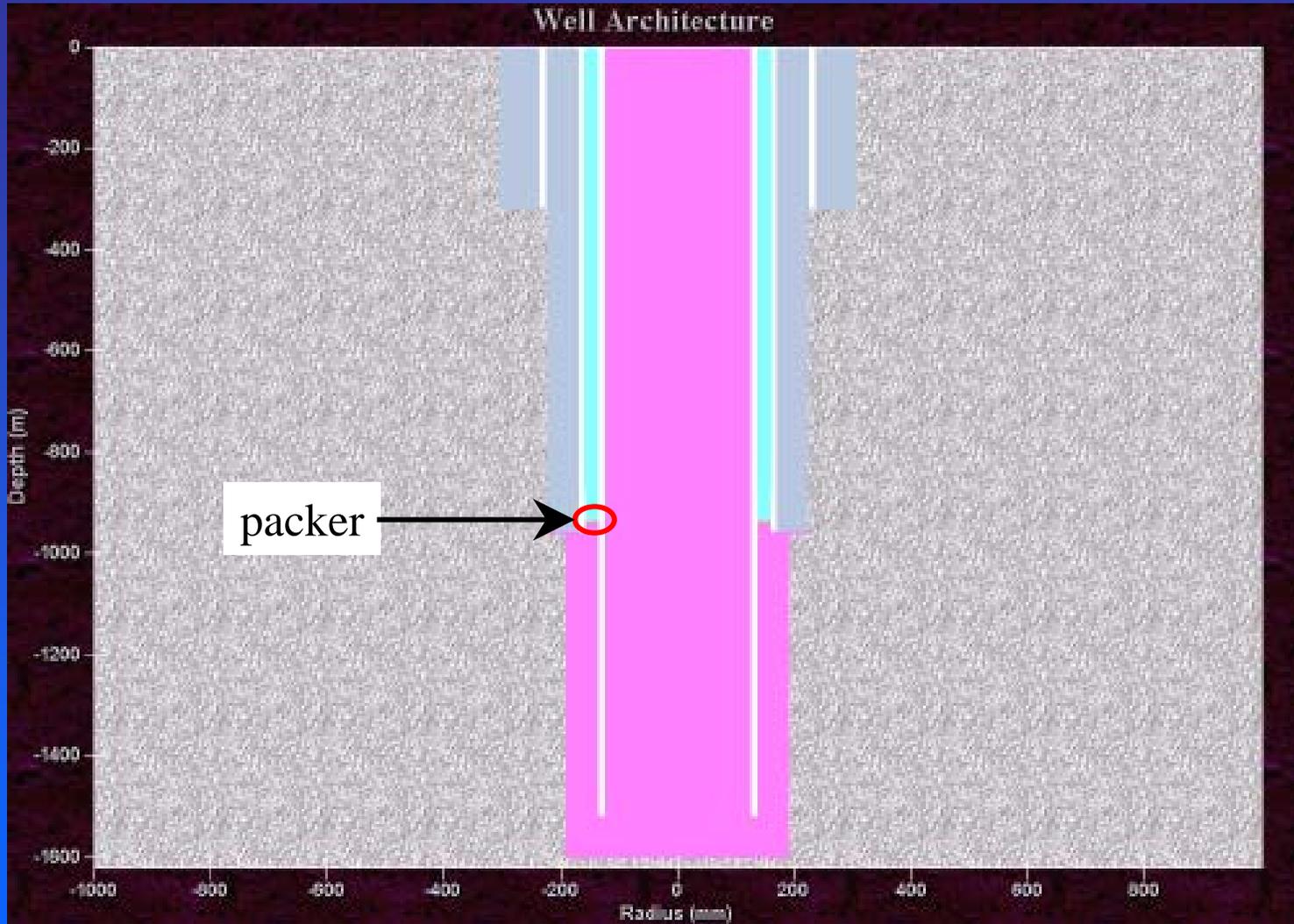
Stockage souterrain de gaz en cavité saline



PLAN

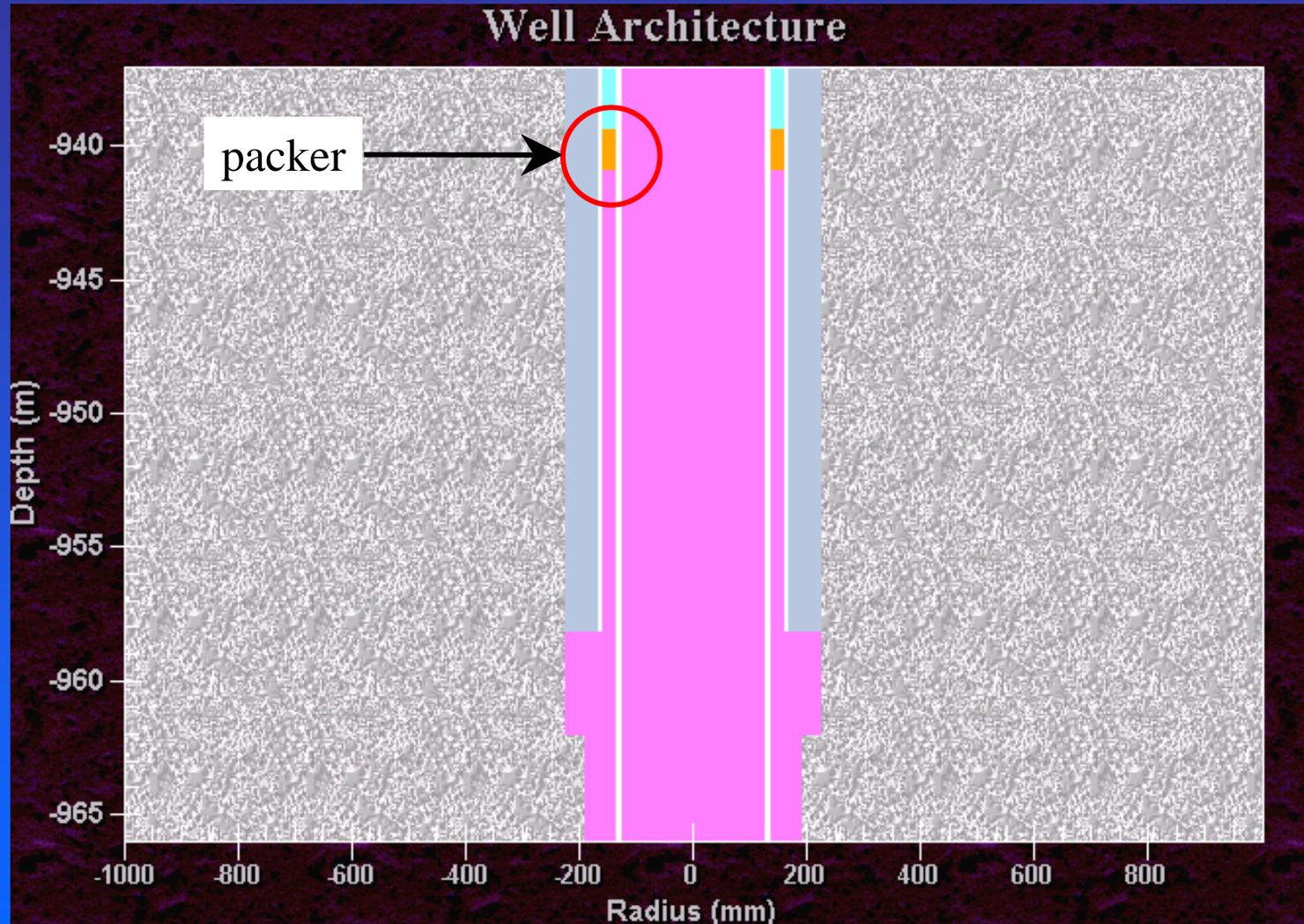
- Introduction
- Modèle géométrique - Maillage
- Propriétés des matériaux
- Etude de sensibilité
- Exemple
- Conclusions

Architecture du puits

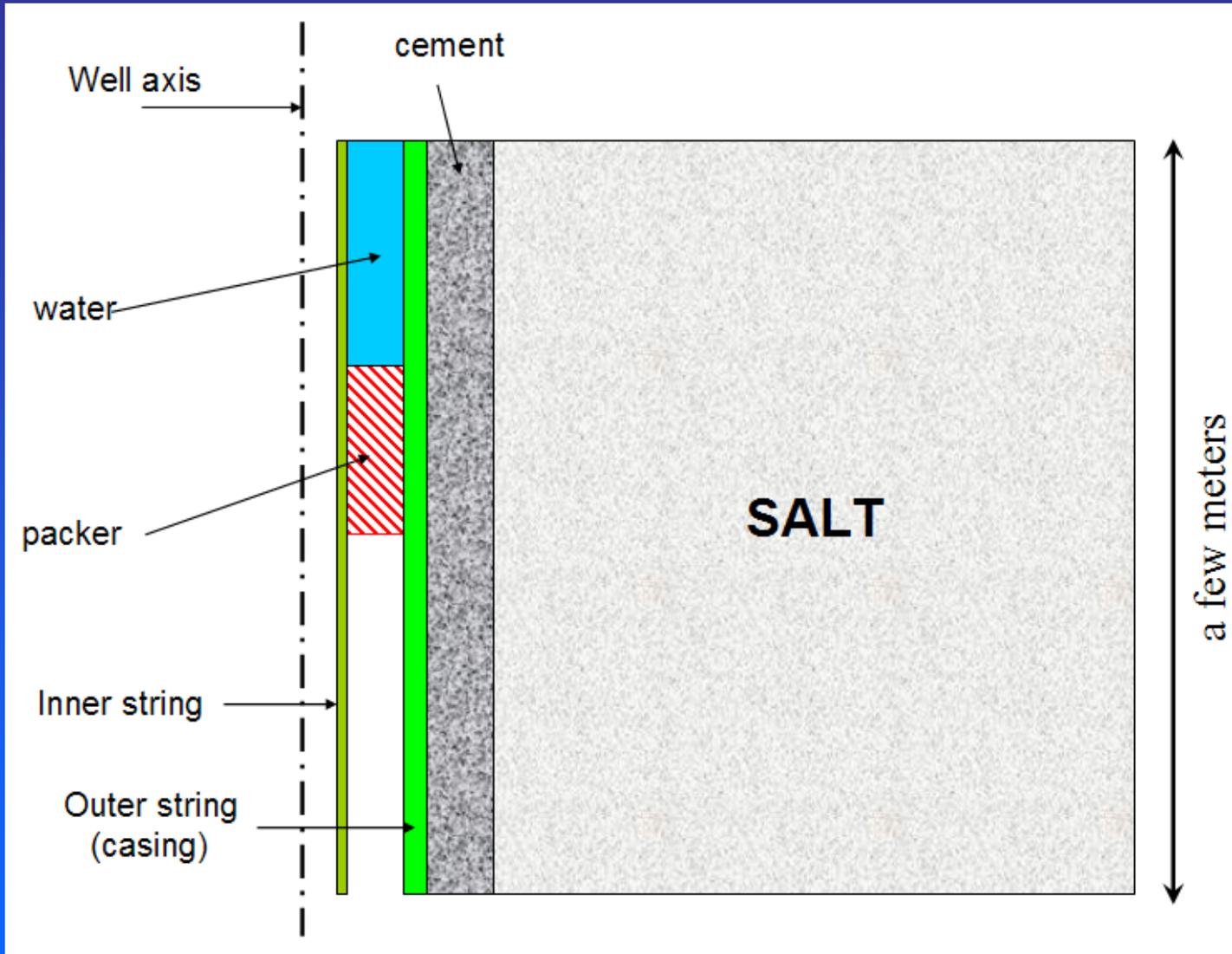


Legend

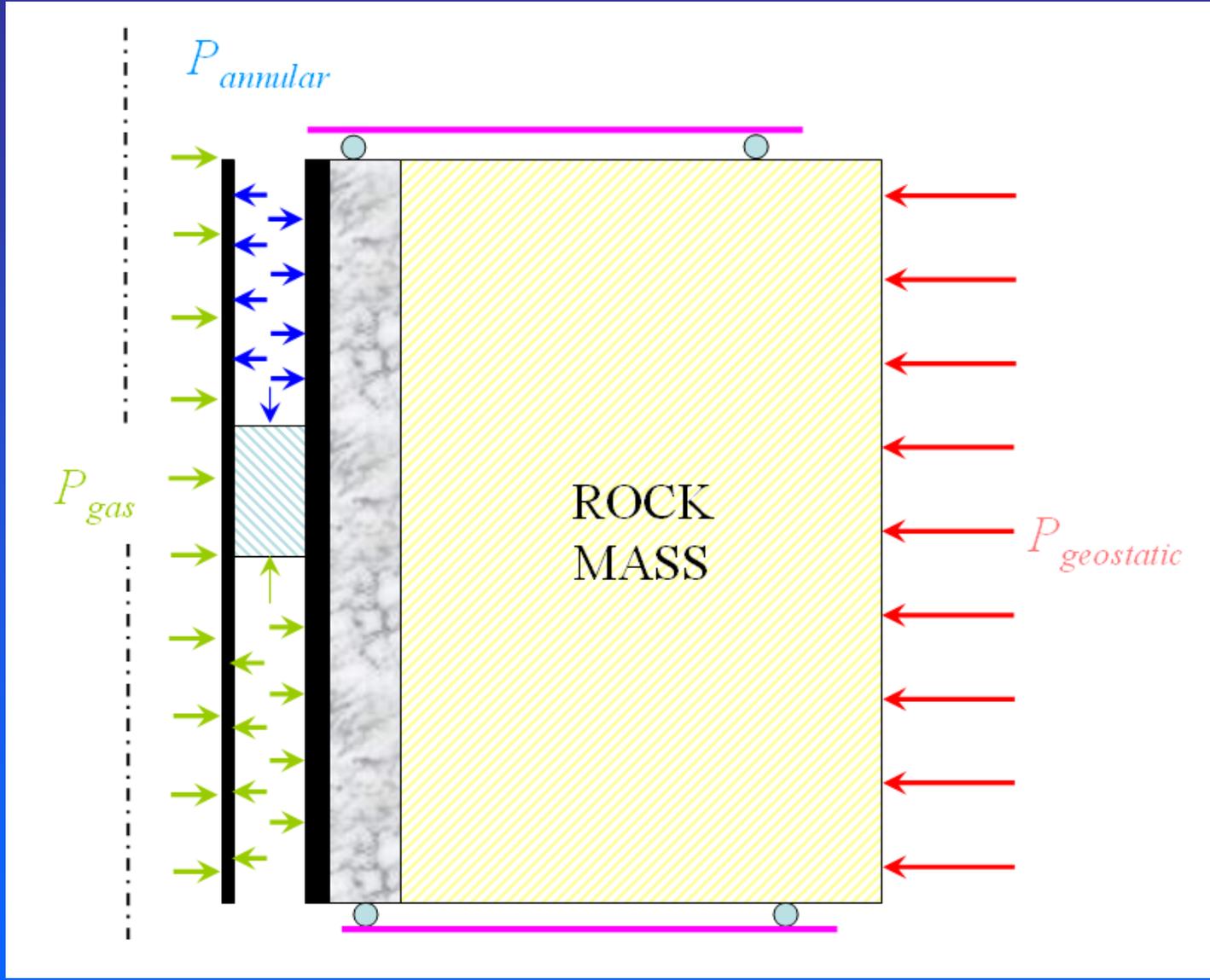
- Methane
- String
- Water
- Cement
- Packer



Modélisation de la région autour du packer

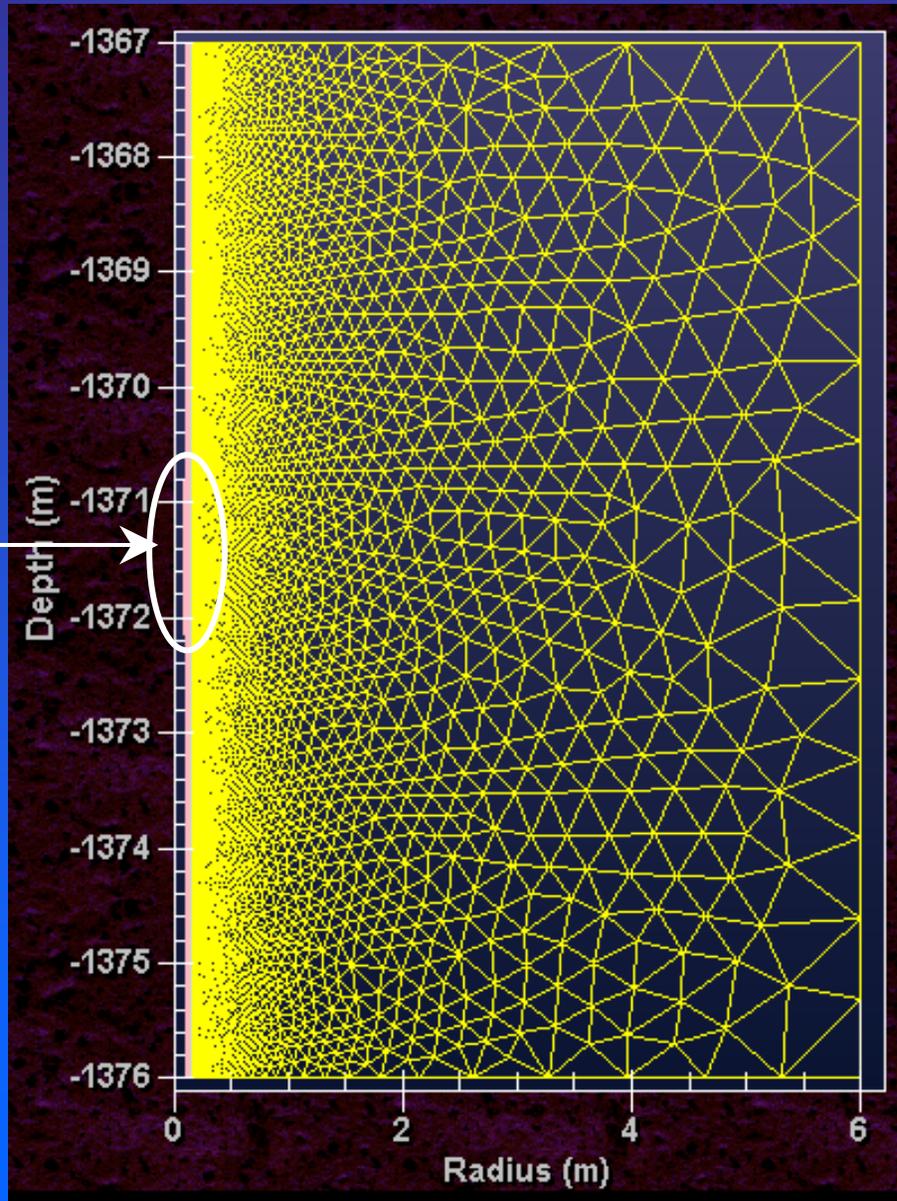
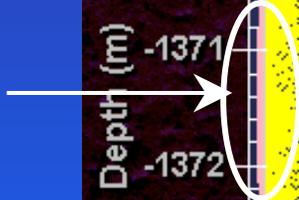


Conditions aux limites



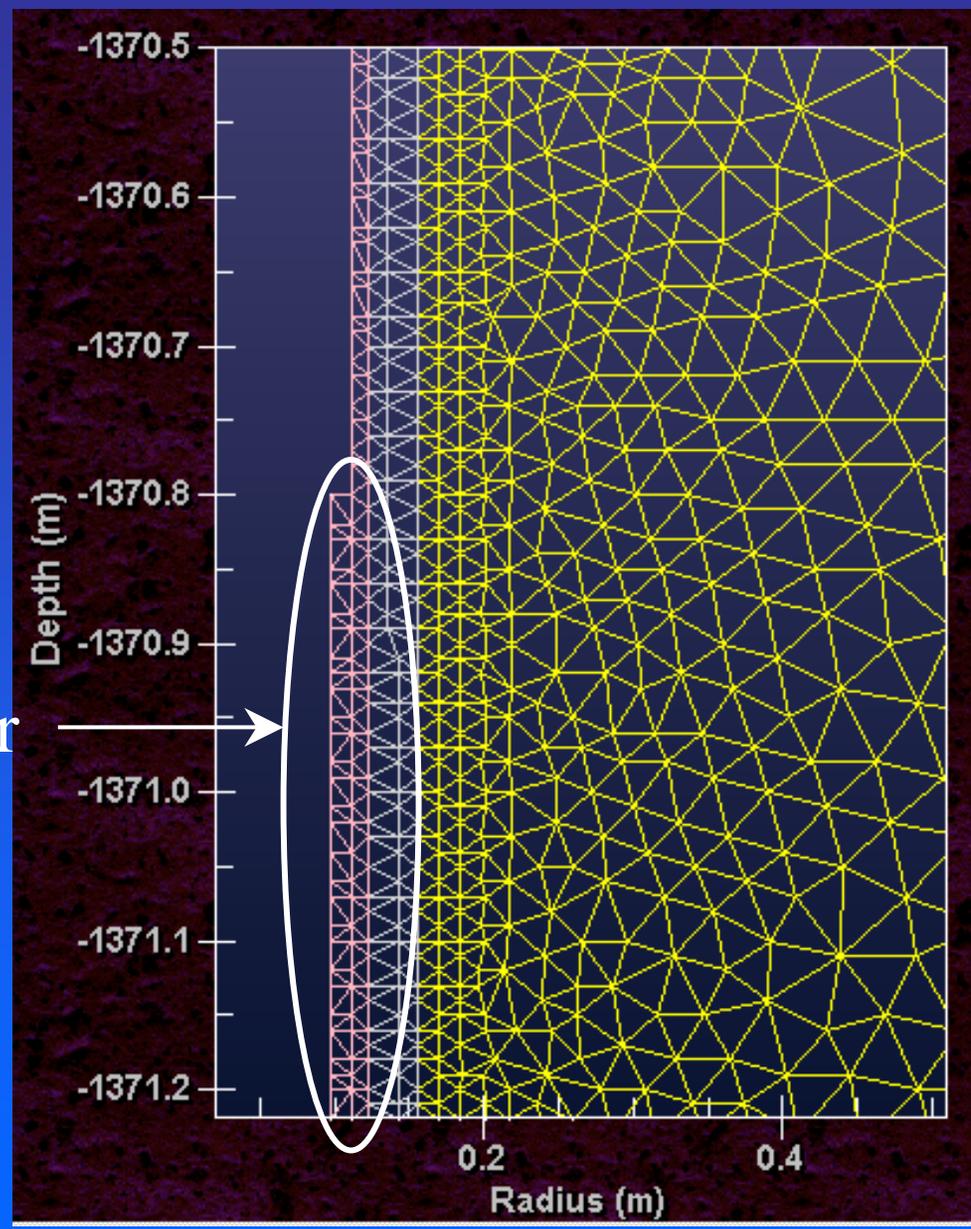
Exemple de maillage

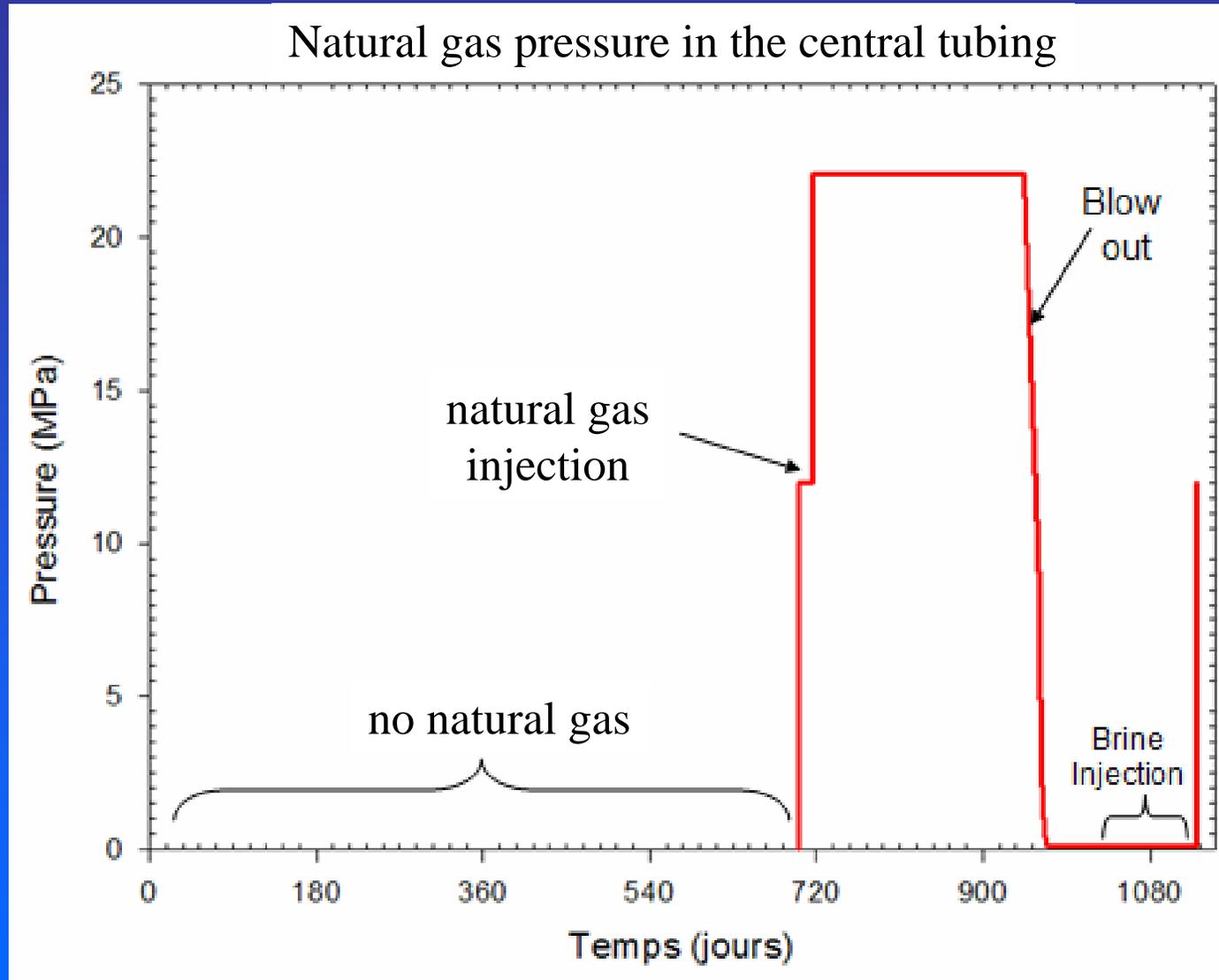
packer

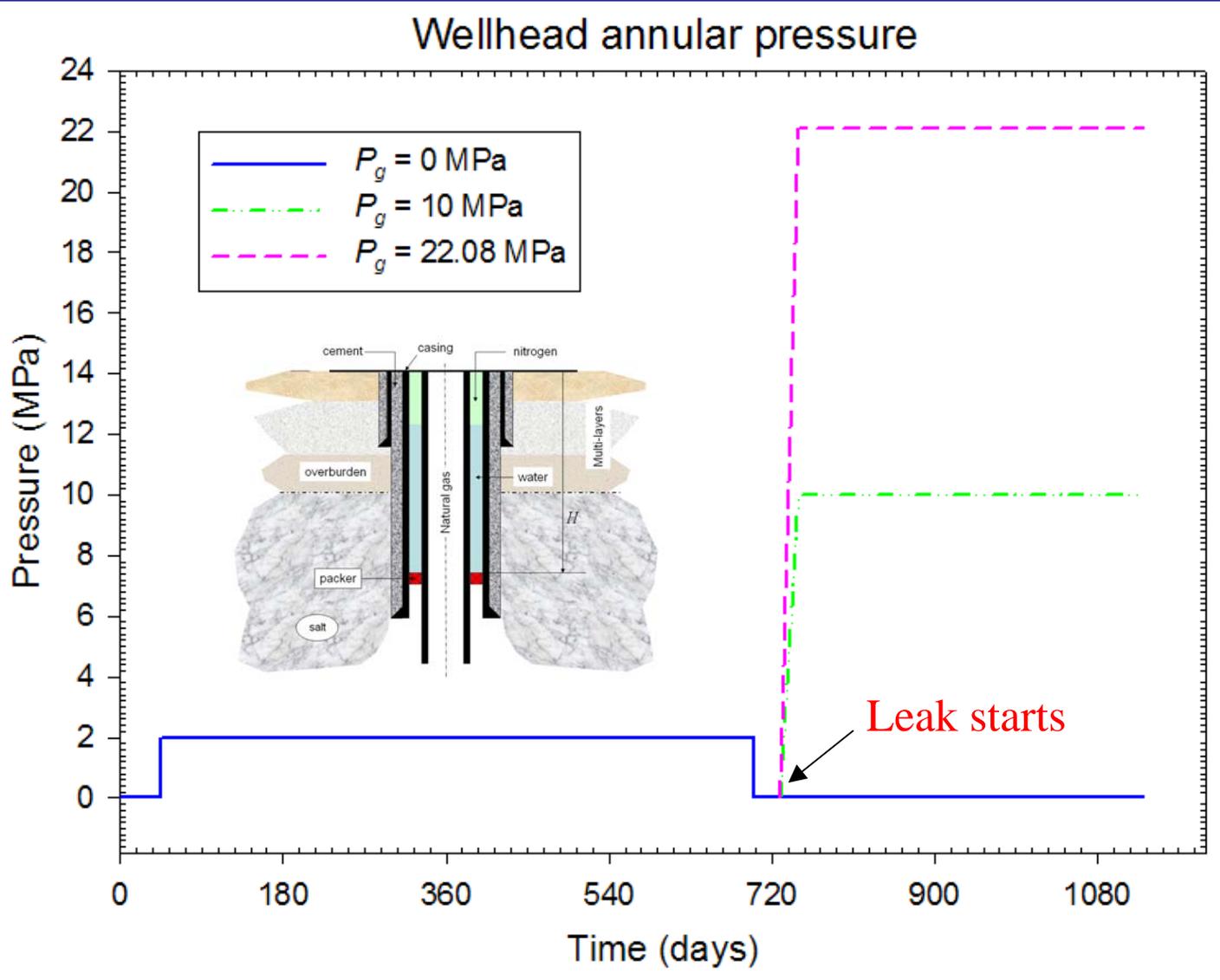


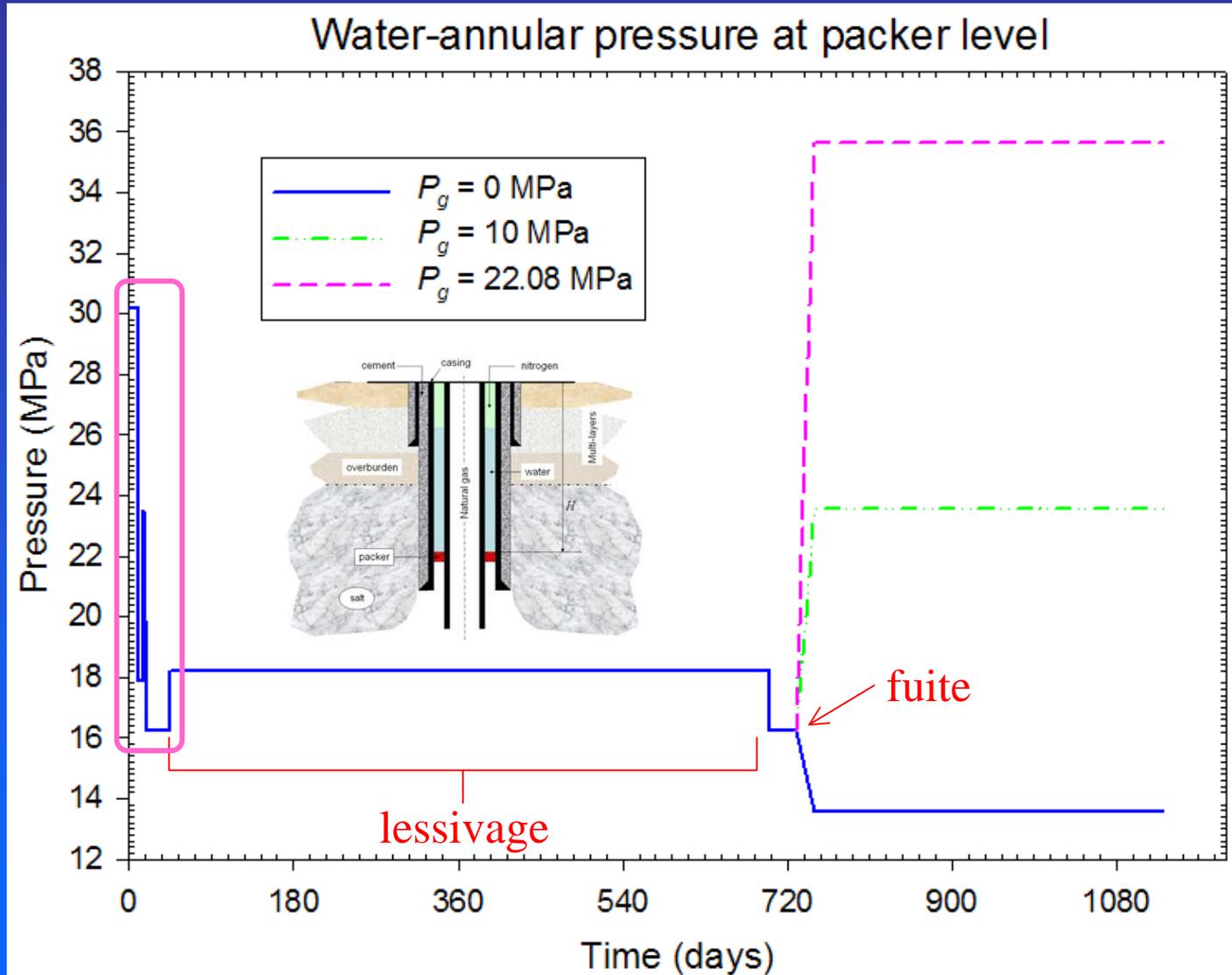
Maillage - Zoom autour du packer

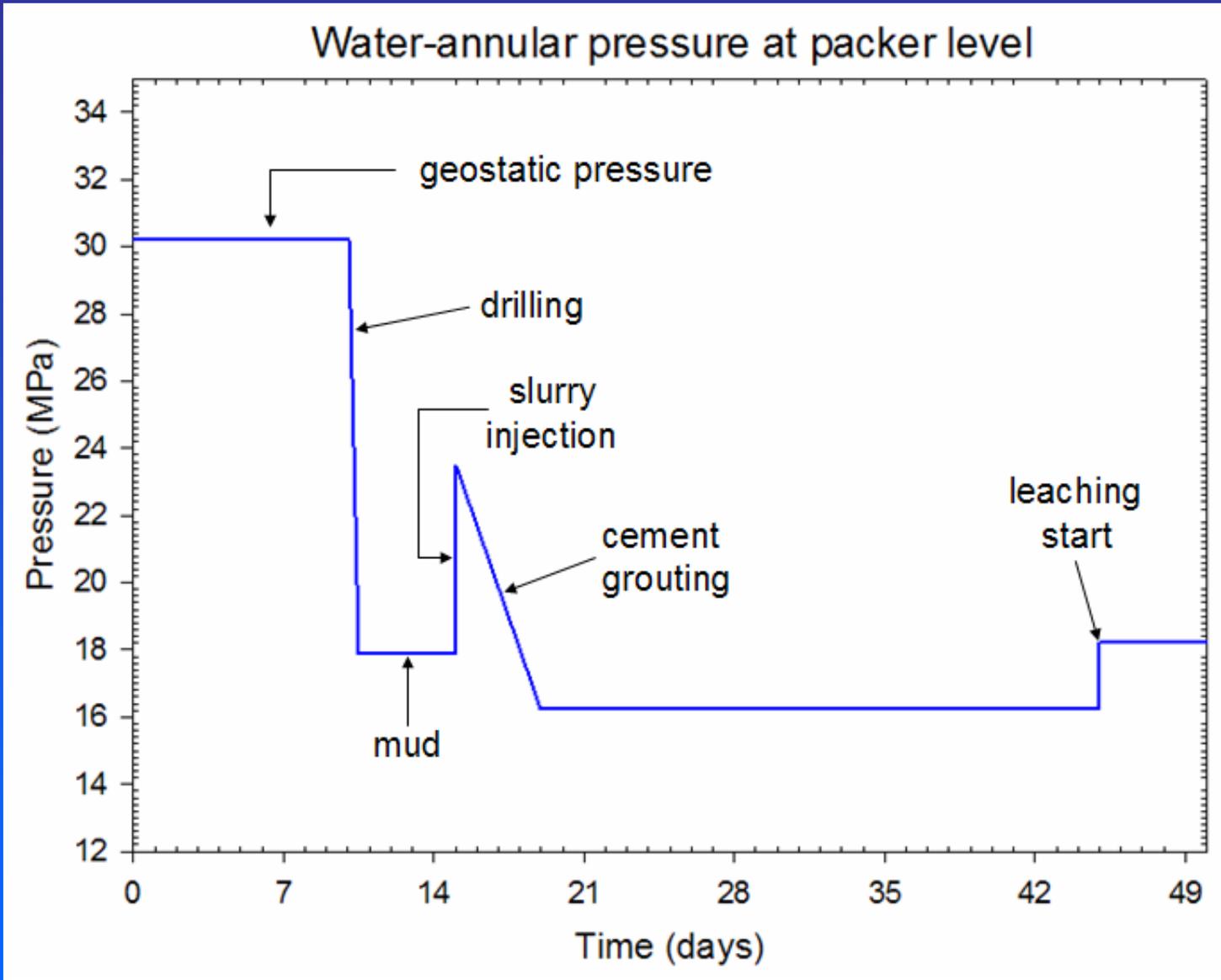
packer →











- Sel

$$E_{sel} = 25 \text{ GPa} \quad \text{et} \quad \nu_{sel} = 0,25$$

Loi de fluage de Lemaitre-Menzel-Schreiner (L-M-S) :

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

Jeux de paramètres minimum et maximum

| L-M-S Parameter | Minimum Set | Maximum Set |
|-----------------|-------------|-------------|
| α | 0.326 | 0.210 |
| β | 3.63 | 2.55 |
| K (MPa) | 1.115 | 1.075 |

• Ciment

$$E_{cim} = 12 \text{ GPa} \quad \text{et} \quad \nu_{cim} = 0,25 \quad (\text{Szary } et \text{ al., 2004})$$

Loi de Munson-Dawson (M-D)

$$\dot{\epsilon}^{vp} = F \cdot \dot{\epsilon}^s \quad \text{où} \quad \dot{\epsilon}^s = A_1 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \sigma^n$$

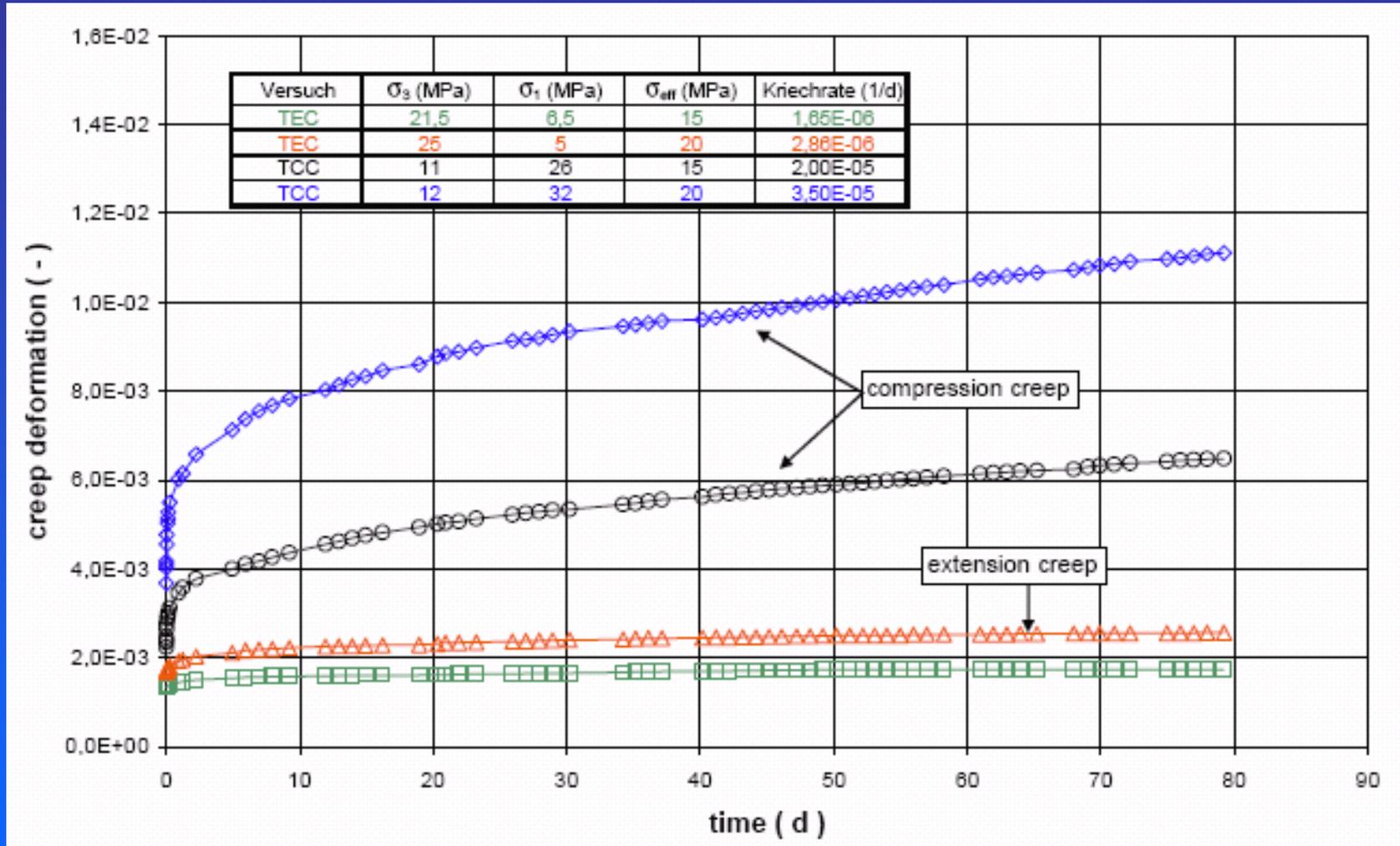
$$\dot{\zeta} = (F - 1) \cdot \dot{\epsilon}^s$$

$$\Delta = \alpha_w + \beta_w \text{Log}_{10} \frac{\sigma}{\mu}$$

$$F = \begin{cases} e^{\Delta(1-\zeta/\epsilon_t^*)^2} & \text{for } \zeta \leq \epsilon_t^* \\ 1 & \text{for } \zeta = \epsilon_t^* \\ e^{-\delta(1-\zeta/\epsilon_t^*)^2} & \text{for } \zeta \geq \epsilon_t^* \end{cases}$$

$$\epsilon_t^* = K_0 e^{-cT} \sigma^m \quad (e^{-cT} \approx 1)$$

9 paramètres indépendants : $A_1, Q/R, n, m, \alpha_w, \beta_w, \delta, K_0, c$



(D'après Szary *et al.*, 2004)

Données de Szary et al.



Calculs de calage



Jeu de paramètres de référence :

$$A_1 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) = 1,03 \cdot 10^{-7} \text{ /jour-MPa}^{1,95} \quad n = 1,95$$

$$K_0 = 1,59 \cdot 10^{-5} \text{ /MPa}^2 \quad m = 2$$

$$\alpha_w \approx 24,42 \quad \beta_w \approx 4,16 \quad \delta = 12$$

CRITERE D'ENDOMMAGEMENT DU CIMENT

PAS DE TRACTIONS

Contrainte principale la moins compressive < 0

| Material | Behavior | Parameter | Unit | Reference Value | Minimum Value | Maximum Value |
|----------|--------------------------------|--------------|---------------------------------------|-------------------------|------------------|----------------------|
| Salt | elastic | E_{salt} | GPa | 25 | 20 | 40 |
| | | ν_{salt} | — | 0.25 | 0.2 | 0.4 |
| | viscoplastic — L-M-S law | A | — | 1 | 0.5 | 2 |
| | | α | — | 0.36 | 0.36 | 0.45 |
| | | β | — | 2.98 | 2.43 | 2.98 |
| | | K | MPa | 0.85 | 0.44 | 0.85 |
| Cement | elastic | E_{cem} | GPa | 12 | 5 | 40 |
| | | ν_{cem} | — | 0.25 | 0.2 | 0.4 |
| | viscoplastic — M-D law | A_1 | day ⁻¹ x MPa ⁻ⁿ | 10 ⁻⁷ | 0 | 2.10 ⁻⁷ |
| | | n | — | 1.95 | 1 | 3 |
| | | m | — | 2 | 1 | 3 |
| | | α_w | — | 24.42 | 10 | 30 |
| | | K_0 | MPa ^{-m} | 1.59 · 10 ⁻⁵ | 10 ⁻⁵ | 3 · 10 ⁻⁵ |
| | | δ | — | 12 | 1 | 15 |

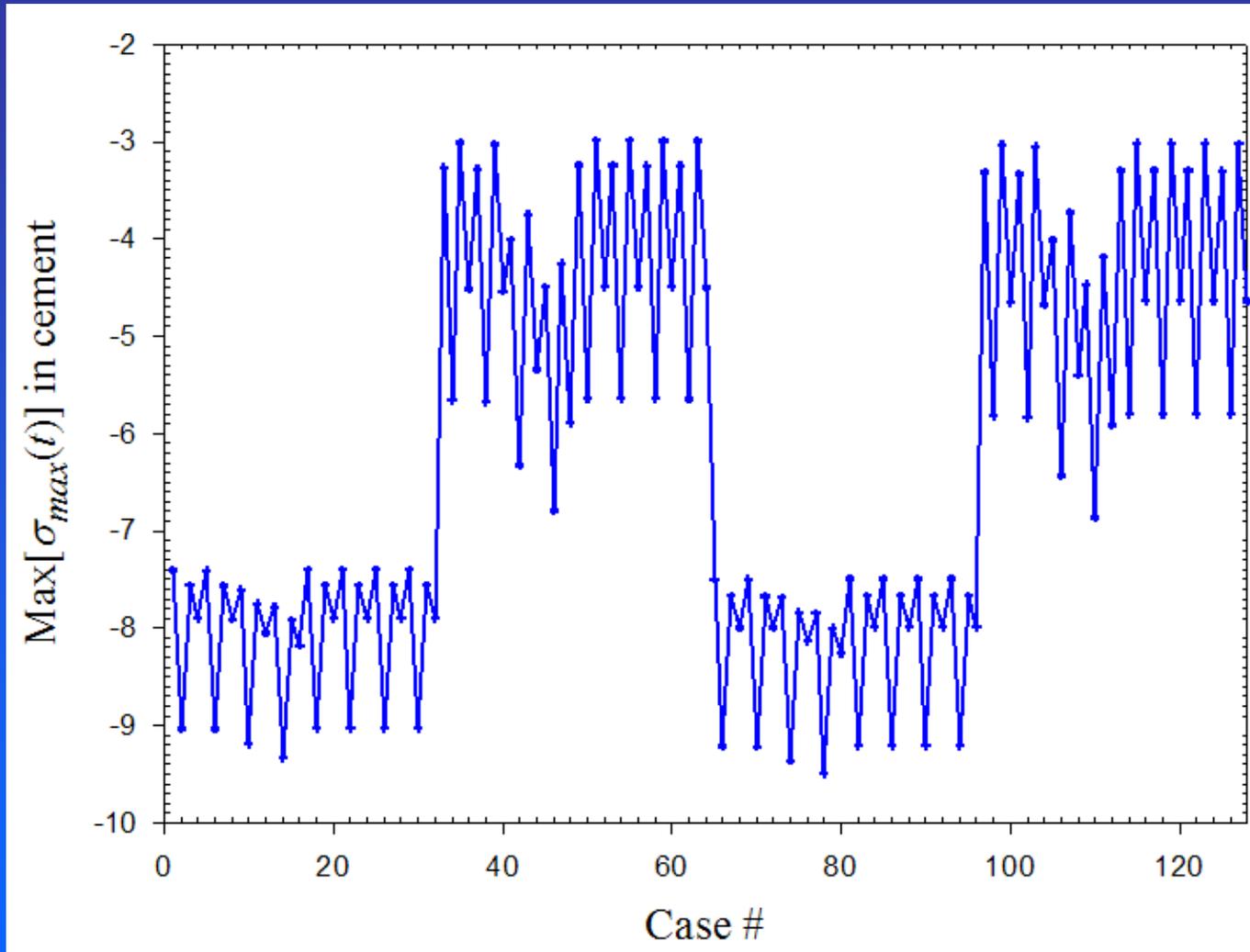
Chaque paramètre peut prendre sa valeur minimale ou maximale

14 paramètres

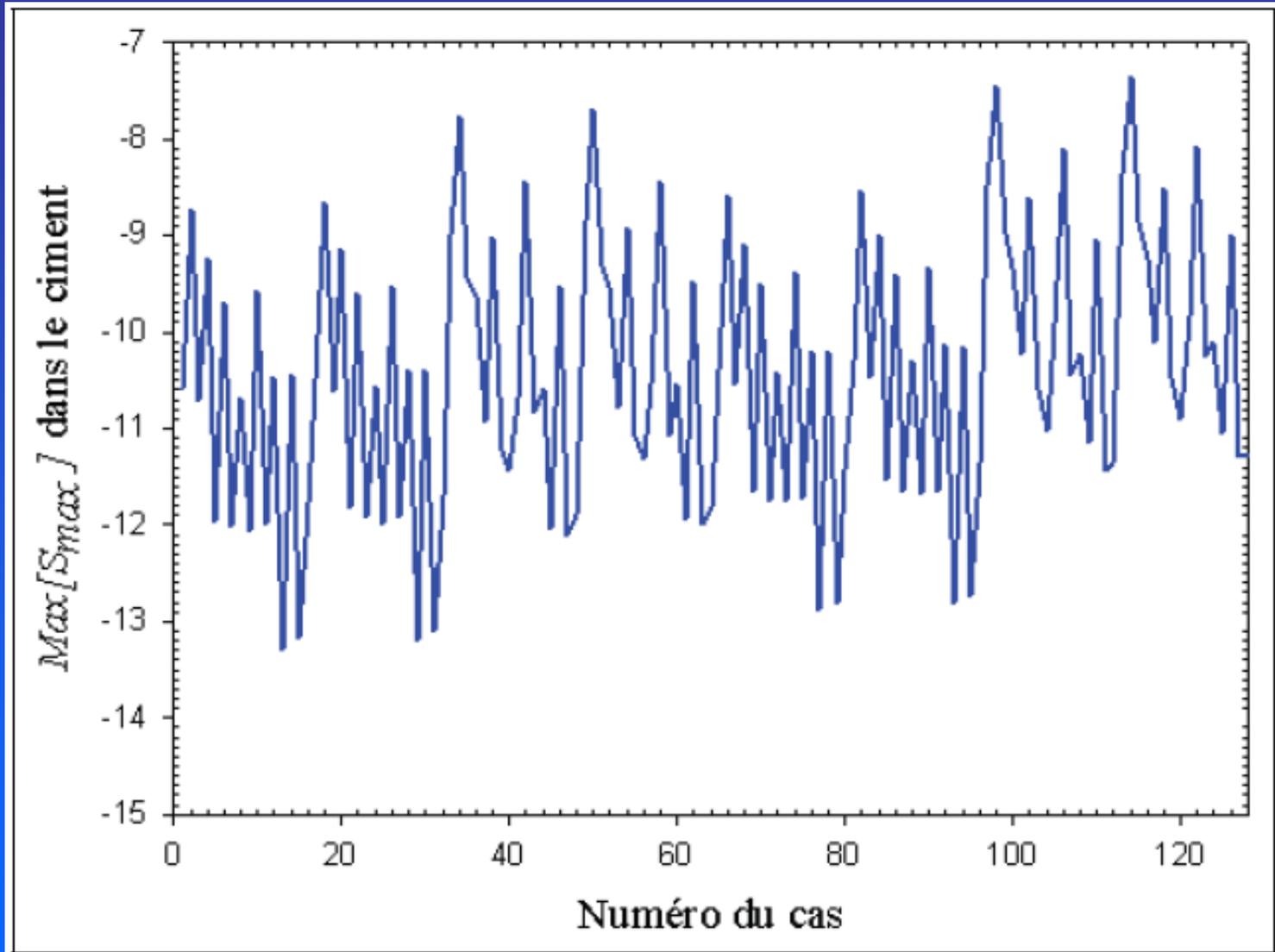


16.384 combinaisons possibles

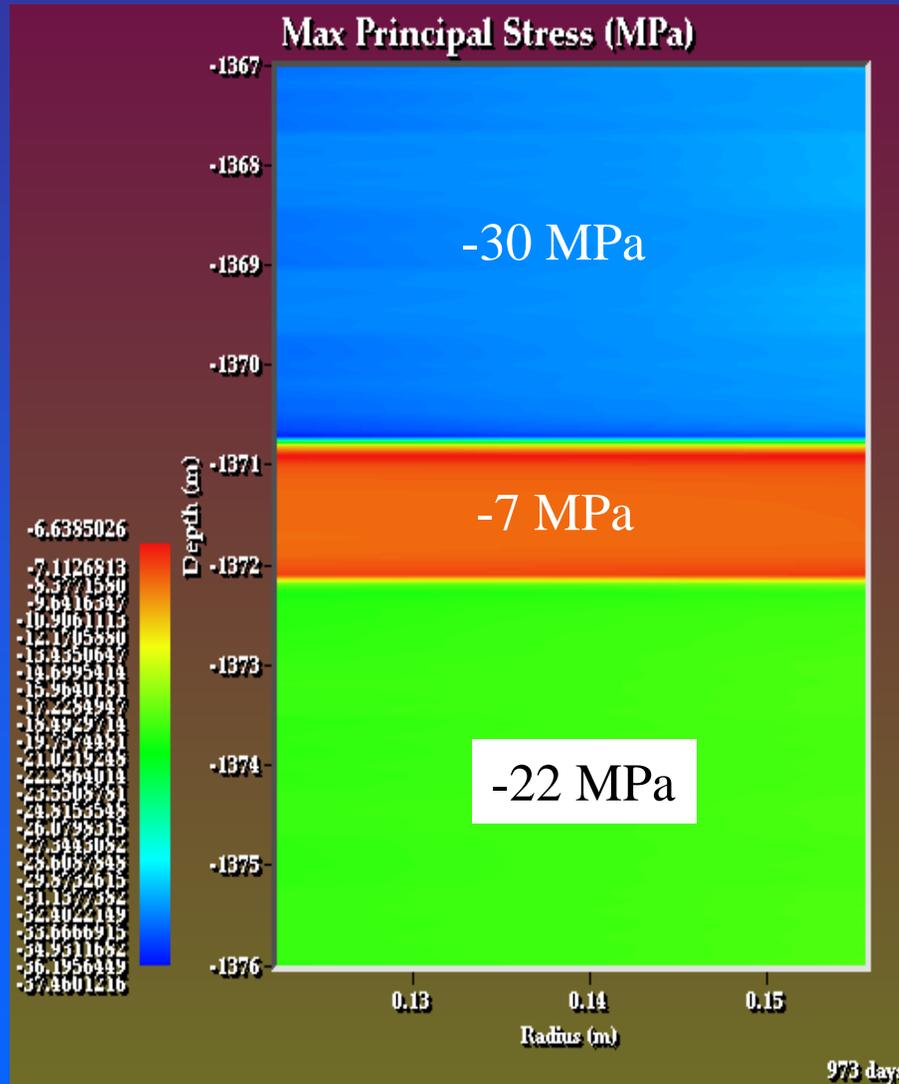
EXEMPLE DE RÉSULTAT



EXEMPLE DE RÉSULTAT



EXEMPLE D'ISOVALEURS



Contrainte principale maximale dans le ciment à la fin de l'éruption

[Scénario le + pessimiste]

CONCLUSIONS

- ✓ L'architecture complète du puits a été modélisée.
- ✓ On a considéré un comportement élasto-visco-plastique à la fois pour le sel et pour le ciment.
- ✓ Un scénario très pessimiste, incluant une éruption, a été pris en compte.
- ✓ Un logiciel aux éléments finis a été développé spécialement.
- ✓ Une étude de sensibilité comportant des milliers de calculs a été menée.
- ✓ Une étude similaire a été réalisée pour les stockages en aquifères.
- ✓ Aucun endommagement n'a été obtenu pour les puits de Gaz de France.