

Effets de l'évolution de
la perméabilité et des propriétés capillaires avec
l'endommagement.
Une étude paramétrique

Clément Chavant - Sylvie Granet : EDF R&D
Richard Giot : ENSG/LAEGO

Objectifs de l'étude

➤ Le bench Méca-gaz

- ✓ En 2007 ANDRA a organisé un exercice de comparaison hydro-mécanique sur une configuration d'alvéole C avec production de gaz de corrosion
- ✓ Un des objectifs était d'estimer le degré de couplage hydro-méca, qui s'est avéré assez faible

➤ Deux phénomènes non représentés dans Mecagaz :

- ✓ Variation perméabilité avec endommagement
- ✓ Variation $S(P_c)$ avec endommagement

Modèles de couplage proposés

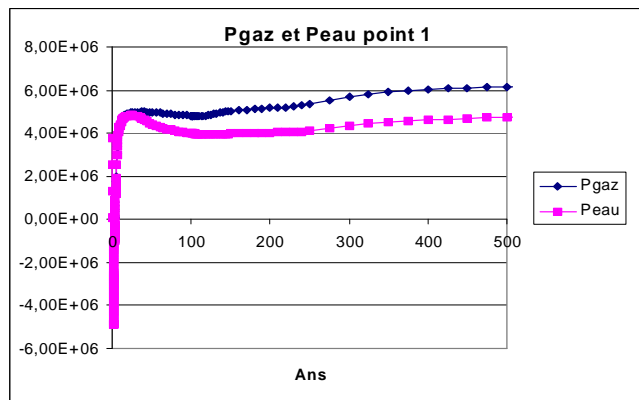
➤ Perméabilité :

$$\frac{K^{int}(\epsilon_v^p)}{K_0^{int}} = \begin{cases} 1 + 2 * 10^{12} * (\epsilon_v^p)^3 & \text{si } 0 < \epsilon_v^p < 10^{-2} \\ 1 + 2 * 10^6 & \text{si } 10^{-2} < \epsilon_v^p \end{cases}$$

- « validé » sur des données Mont Terri
- Recouvre les définitions ANDRA EDZ

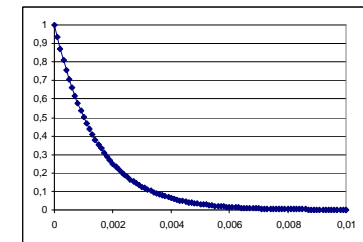
➤ S(Pc)

- ✓ écart constant entre Pg et Pw au droit des colis
- ✓ Cette propriété sera-t-elle conservée si S(Pc) dépend du dommage



$$S(P_c) = \left(1 + \left(\frac{P_c}{P_r(\epsilon_v^p)} \right)^n \right)^{-m}$$

$$\frac{P_r}{P_r^0} = \begin{cases} (10^{-3})^{\epsilon_v^p / 10^{-2}} & \text{si } \epsilon_v^p < 10^{-2} \\ 10^{-3} & \text{si } 10^{-2} < \epsilon_v^p \end{cases}$$



A propos de la pression de gaz

➤ Conservation masse hydrogène

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_H^g S_g + \phi \rho_H^l S_l) - \text{Div} \left(\rho_H^g \frac{k_r^g}{\mu_g} K_{\text{int}} \nabla P_g + \rho_H^l \frac{k_r^l}{\mu_l} K_{\text{int}} \nabla P_l + \rho_l S_l D \nabla X_H^l \right)$$

➤ Dissolution

$$(1 - S_l) \geq 0 \quad H(P_l + P_c) - \rho_H^l \geq 0 \quad (1 - S_l) [H(P_l + P_c) - \rho_H^l] \geq 0$$

➤ En variables P_l, P_g :

✓ Zone insaturée : $S_l < 1 \quad H(P_l + P_c) = H \cdot P_g = \rho_H^l$

✓ Zone saturée : $S_l = 1 \quad H \cdot P_l \geq \rho_H^l$

• Changement de variable : $\hat{P}_g = \frac{\rho_H^l}{H} \Rightarrow \hat{P}_g - P_l \leq 0$

• Prolongement courbe capillaire : $P_c(S_l) \leq 0 \Leftrightarrow S_l(P_c < 0) = 1$

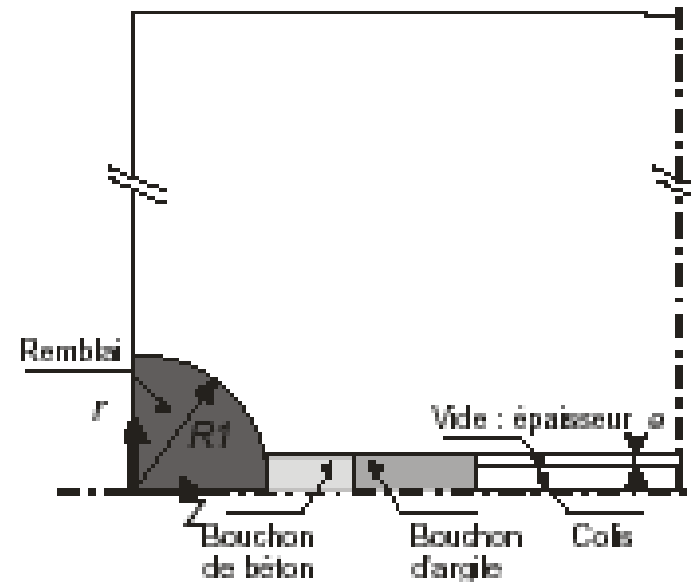
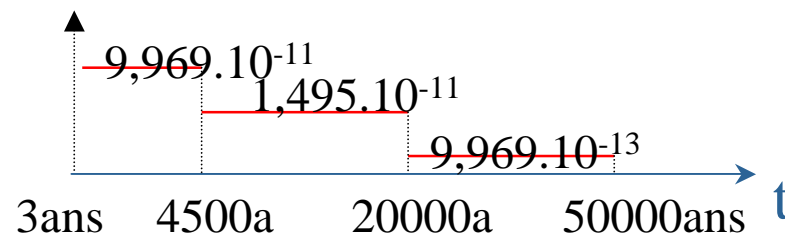
Le bench Meca-gaz : géométrie, chargements

➤ Géométrie

➤ Phasage :

- ✓ 3 Jours Creusement
- ✓ 3 Ans Mise en place bouchons
Début corrosion
- ✓ 100 Ans Remblayage
- ✓ 50 000 Ans Fin corrosion

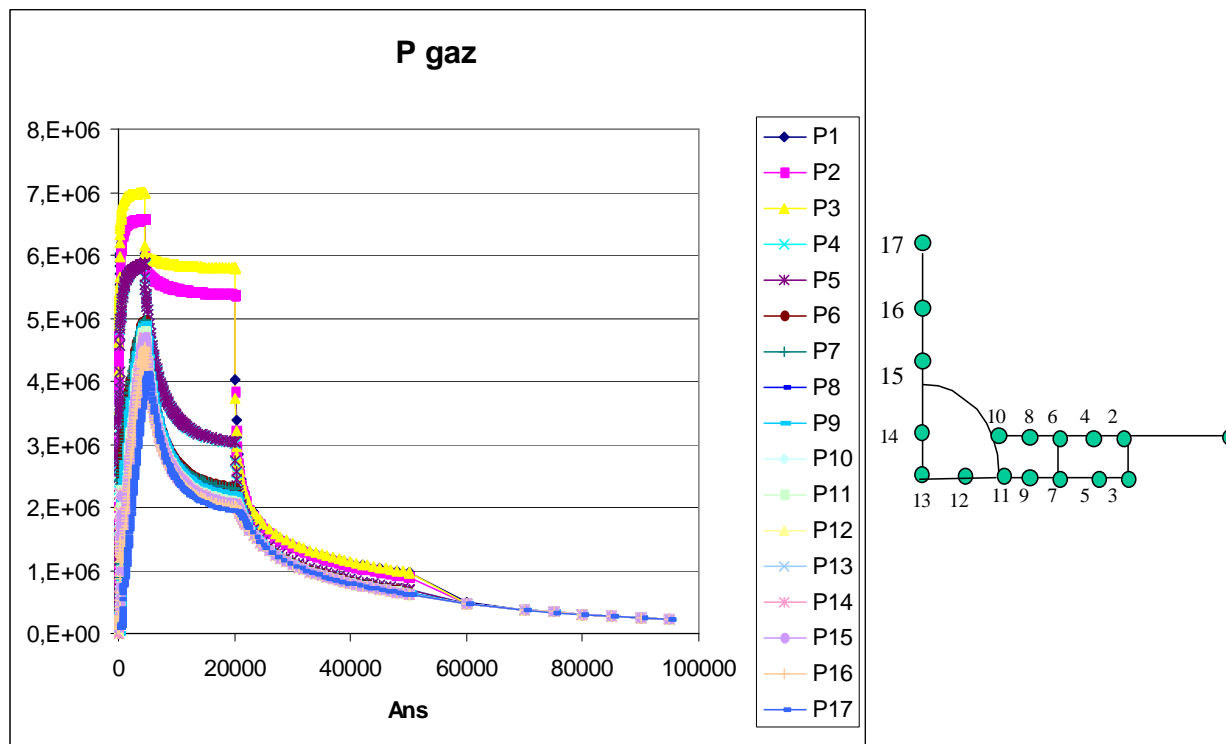
➤ Flux H₂



➤ Béton élastique, Bouchon BO gonflant, Argilite élastoplastique

Les calculs de base : Kint et Pr constants (1)

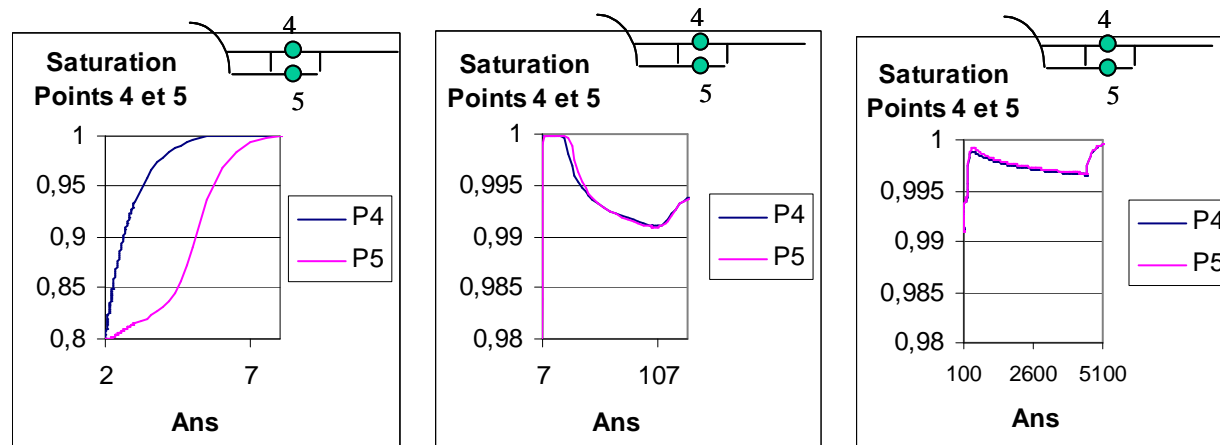
➤ La pression de gaz est de 7 Mpa. Tout le massif « voit » les phases de corrosion



Les calculs de base : Kint et Pr constants (2)

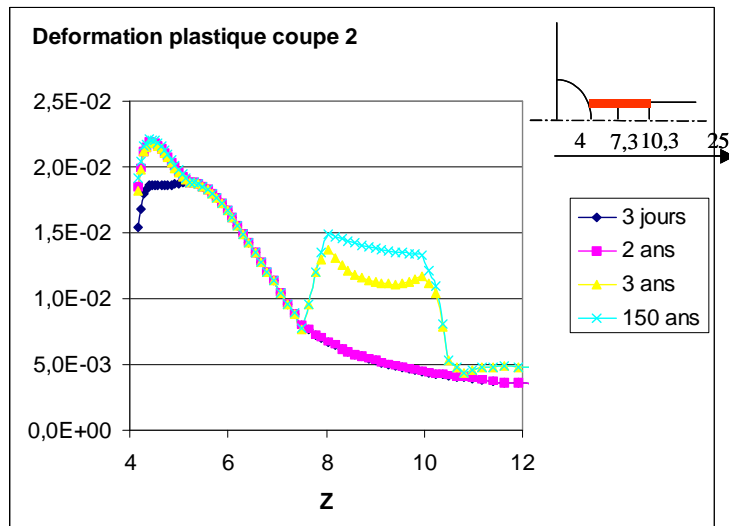
➤ Évolution hydraulique des bouchons dépend de la ventilation et des gaz

✓ Resaturation, désaturation partielle, resaturation totale

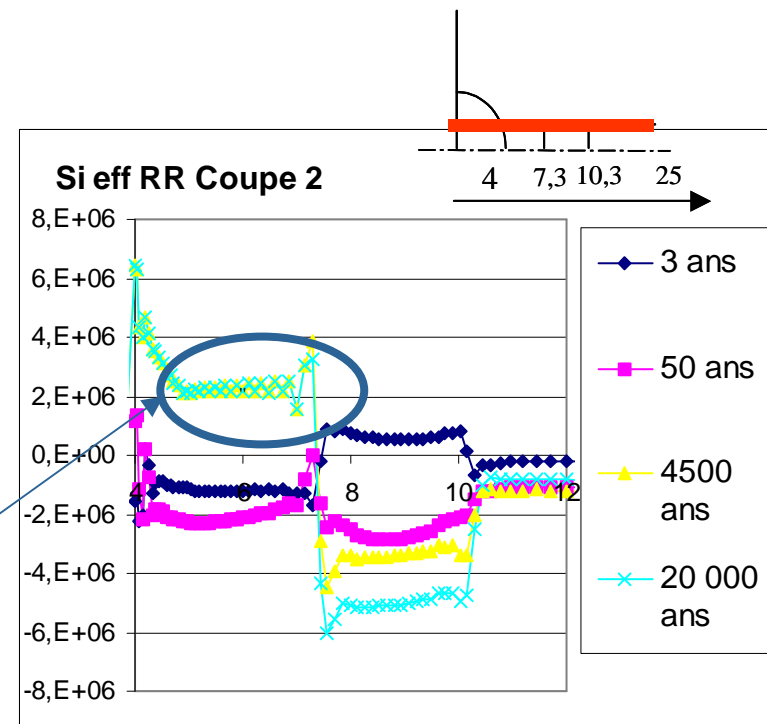


Les calculs de base : Kint et Pr constants (3)

➤ Plastification aux interfaces, avec effet significatif de la désaturation de la roche par le bouchon d'argile

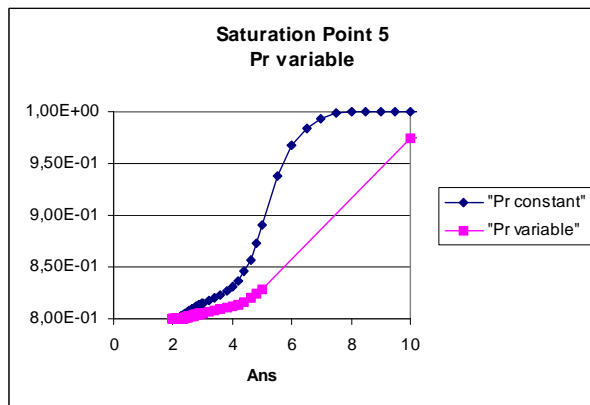
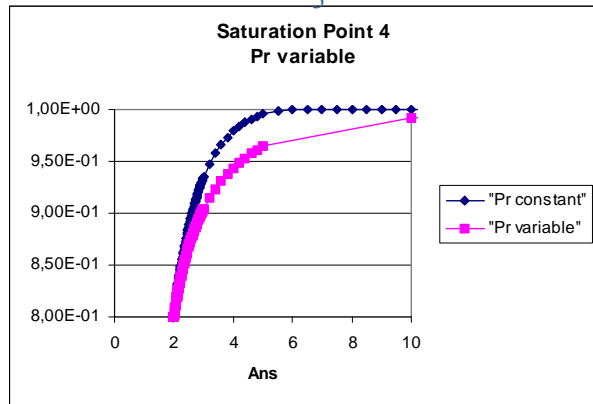
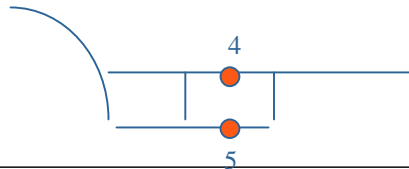


➤ Traction entre béton et roche

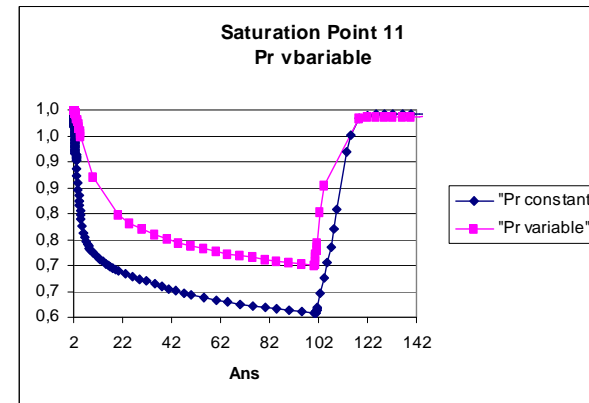
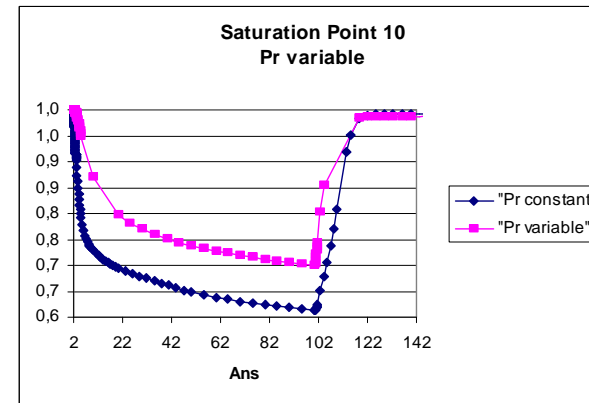
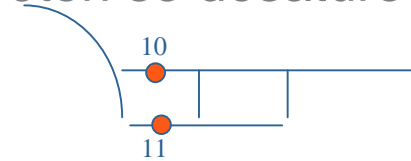


Calculs à Pr variable (1)

Bouchon BO se resature moins vite

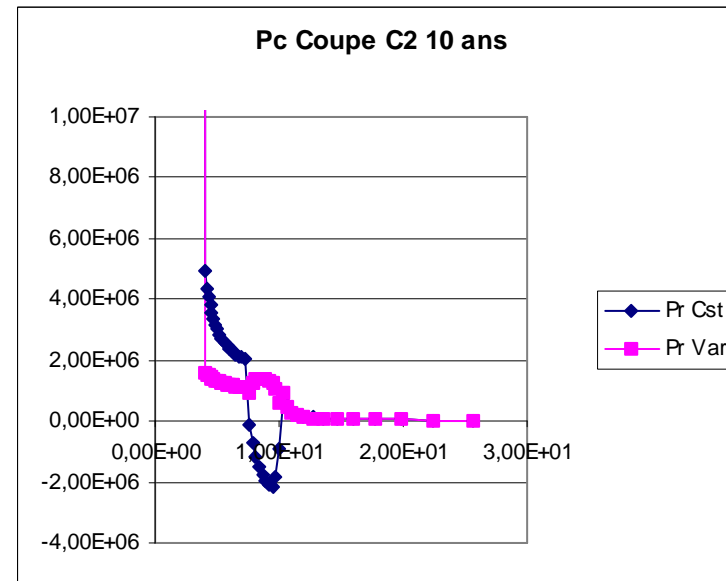
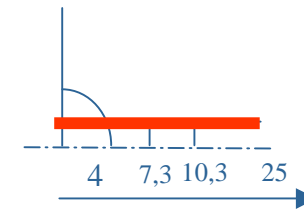
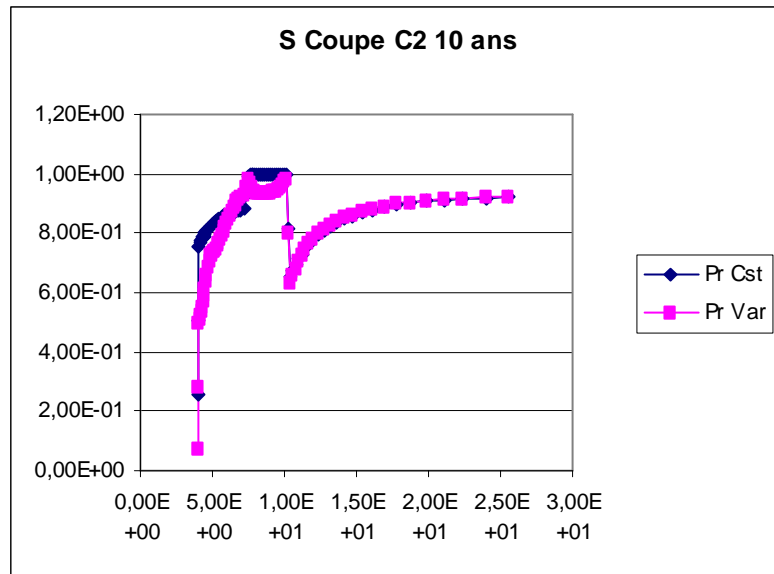


Béton se désature moins vite



Calculs à Pr variable (2)

Cinétique hydraulique ralentie dans bouchon BO



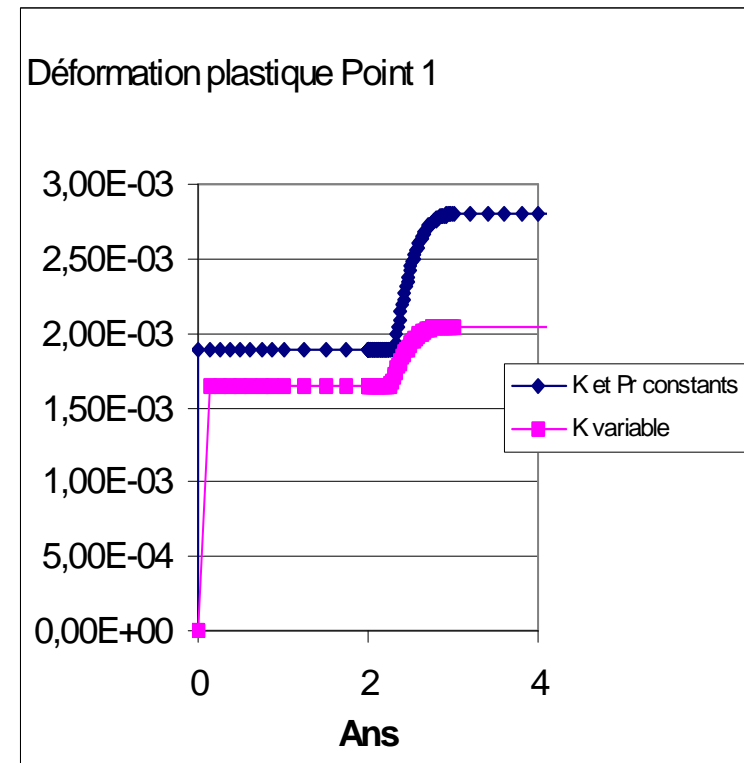
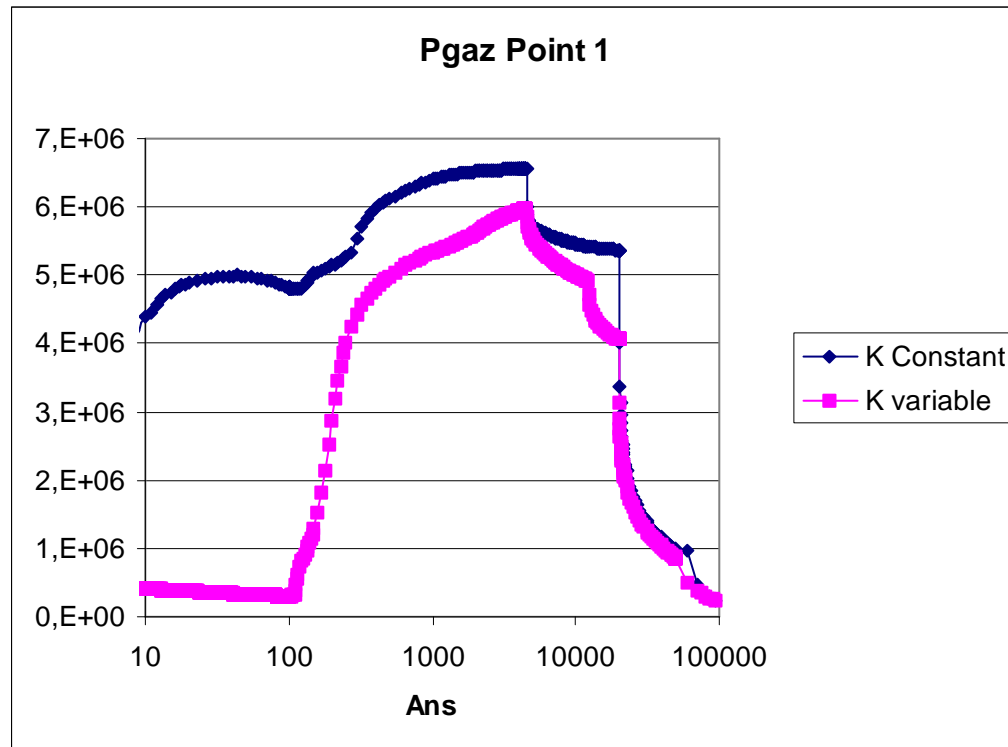
➤ Le bouchon de béton est entouré d'une zone à faible Pr donc faible PC. Il se désature moins vite

➤ La ventilation va pomper de l'eau plus loin et ralentit la resaturation du bouchon de BO

Calculs à K variable ; centre alvéole

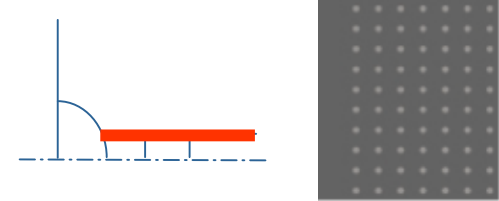


➤ Au centre de l'alvéole P_g n'évolue pas avant fin de ventilation



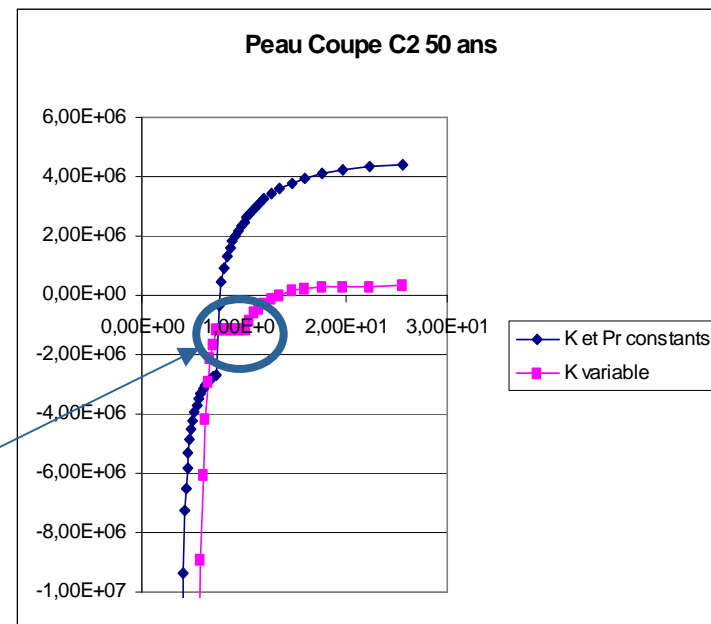
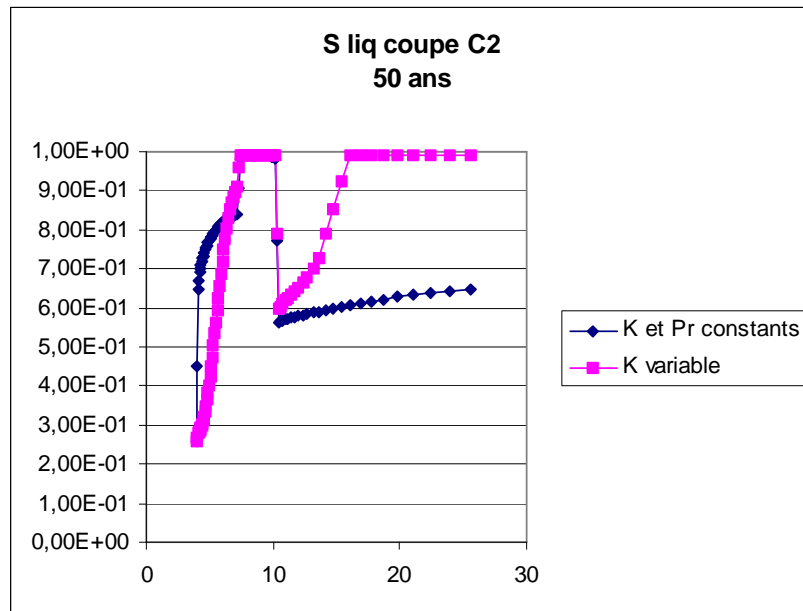
Déformation plastique inférieure

Calculs K variable ; pression interfaces



➤ Saturation liquide du vide plus grande

Pression d'eau plus basse dans vide.



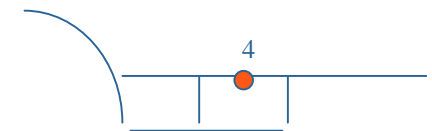
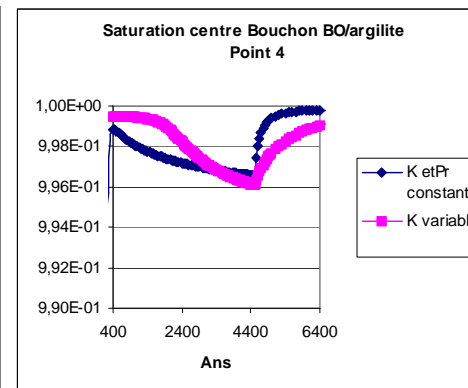
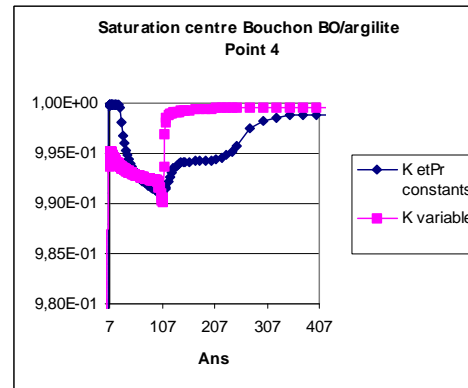
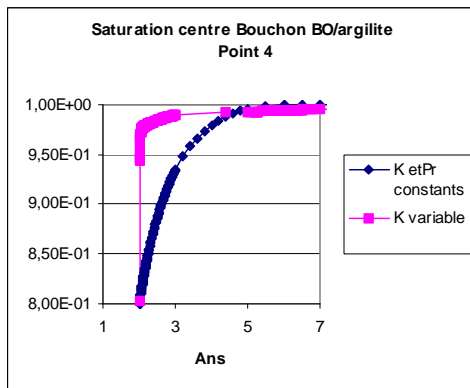
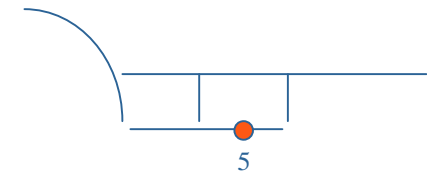
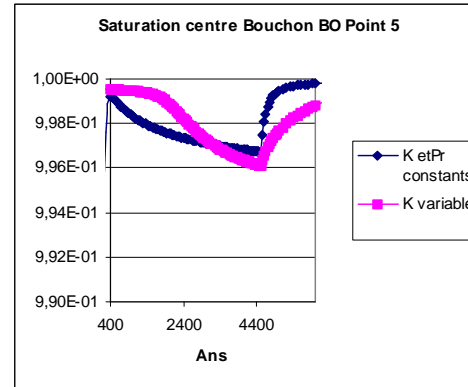
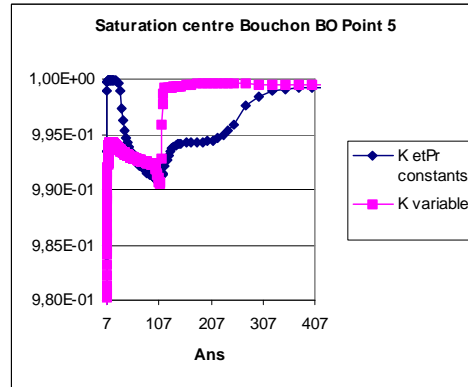
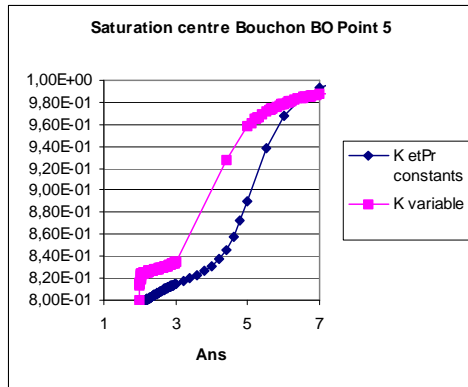
Zone très perméable

Calculs à K variable ; bouchon argile

0 -7 ans

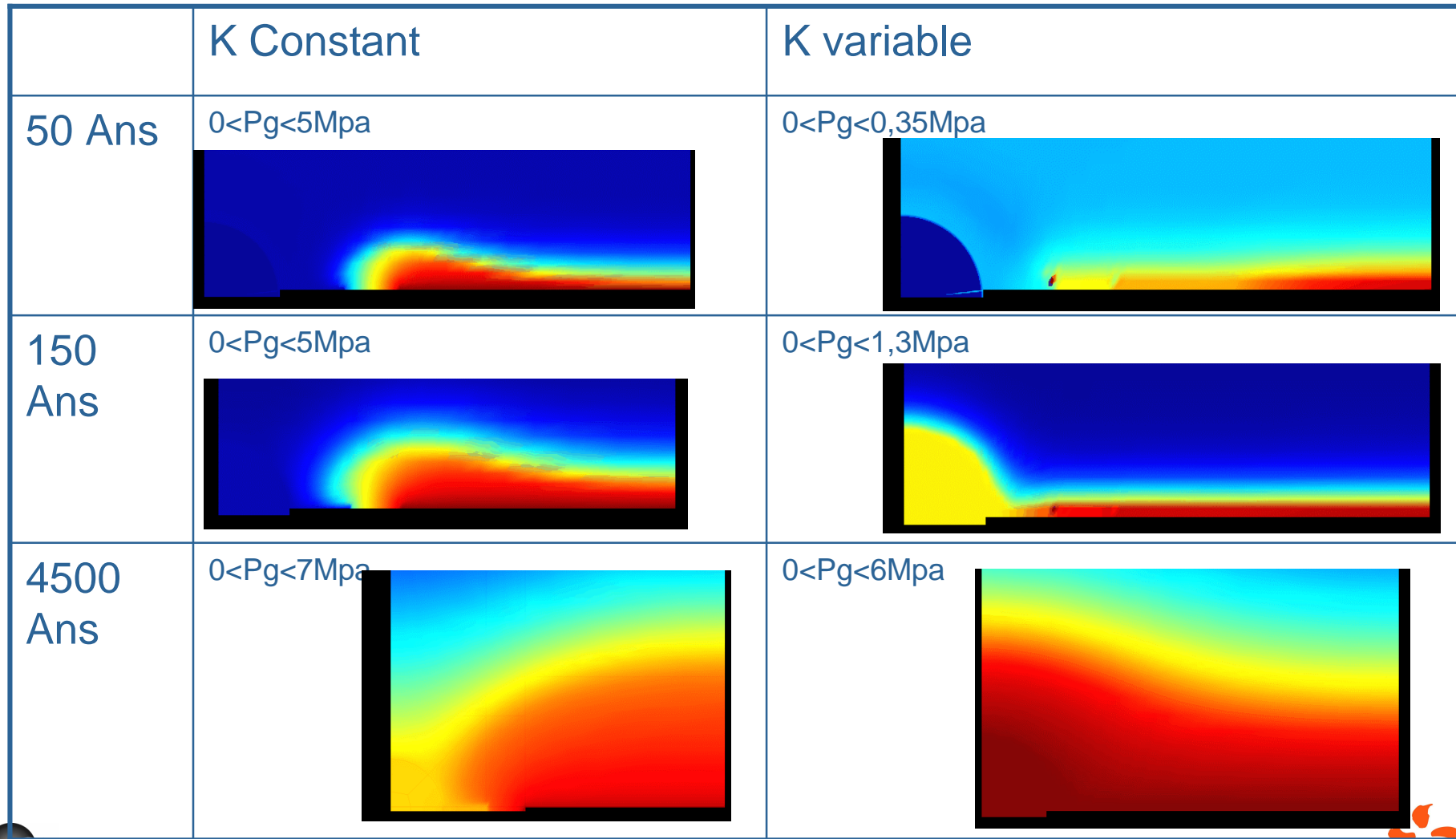
7-400 ans

400-4500 ans

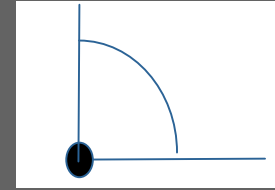


BO se resature plus vite mais ne voit pas resaturation totale à 7 ans

Effets variation K sur répartition gaz dans massif

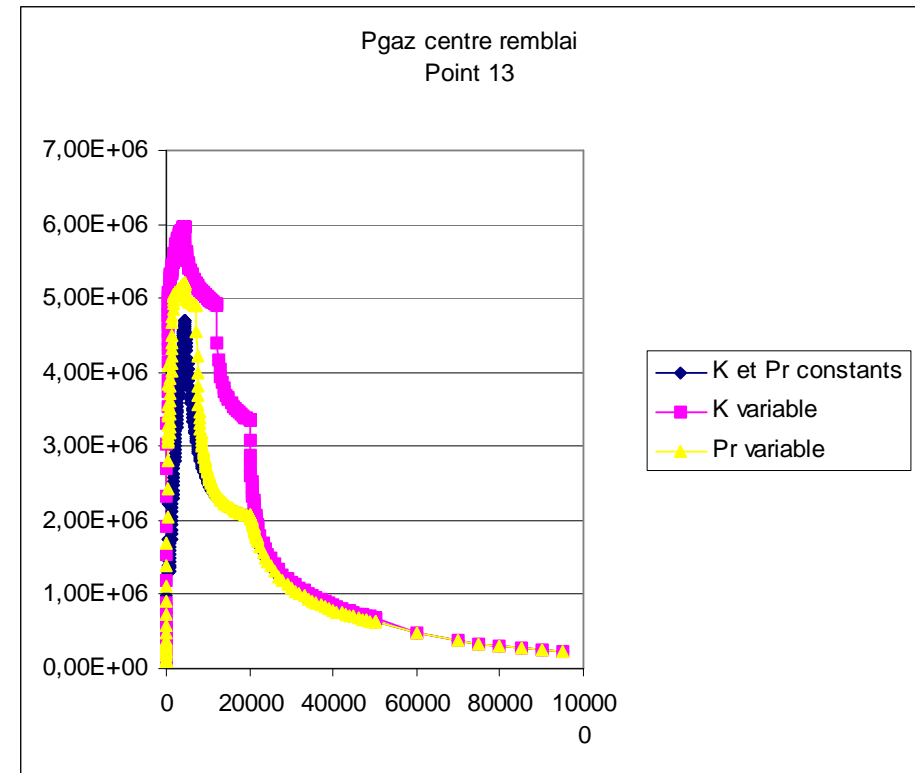
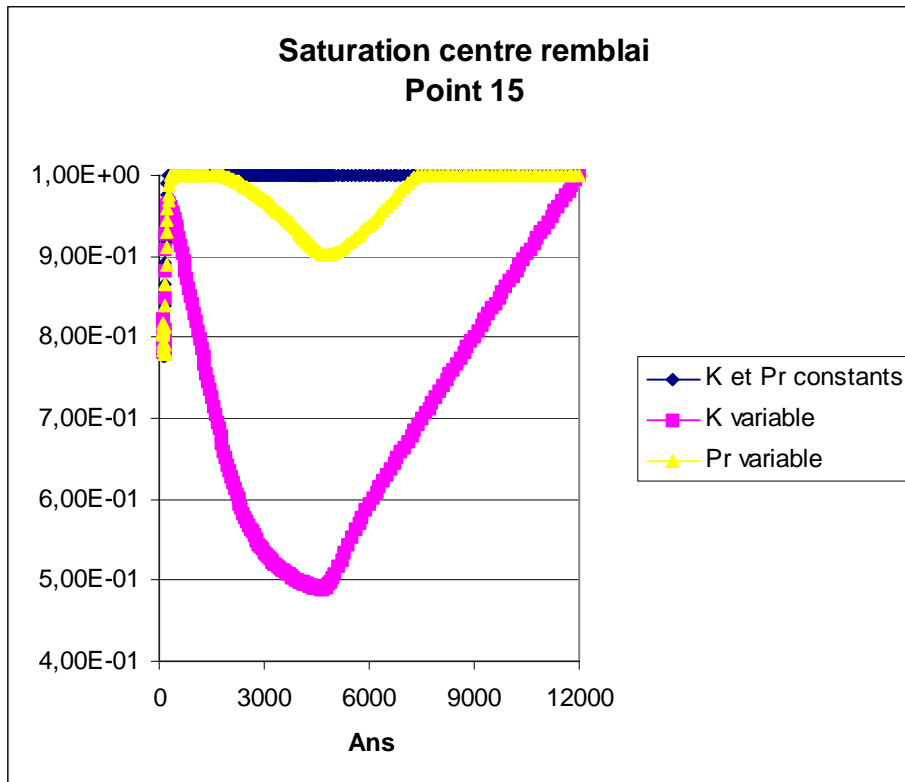


Le gaz dans la galerie : 3 modélisations



➤ Saturation

Pression gaz

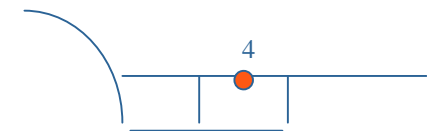
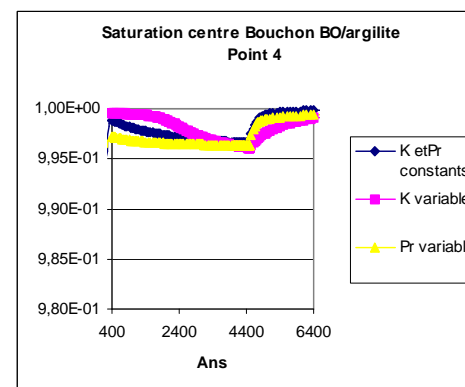
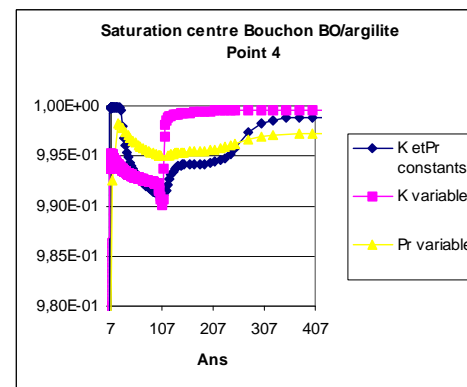
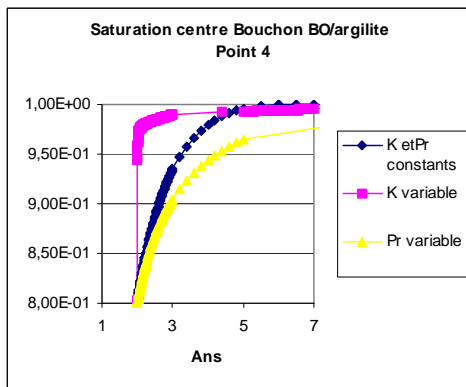
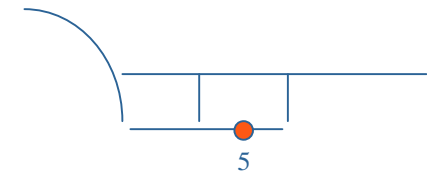
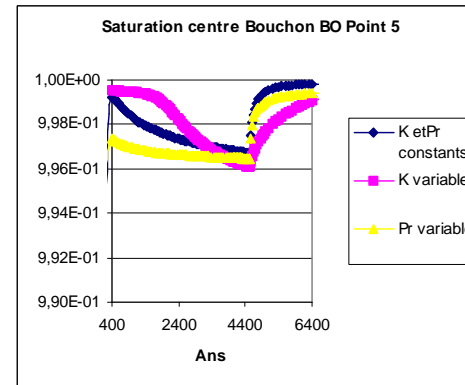
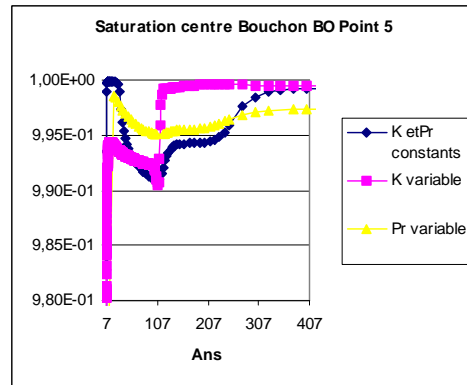
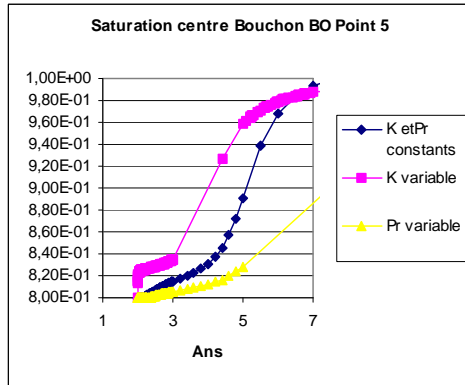


Comparaison 3 modélisations sur bouchon Argile

0 -7 ans

7-400 ans

400-4500 ans



Pr variable : plus lent

K variable : plus rapide

Effets K ou Pr variables : ce qui ne change pas

	K et Pr constants	K variable	Pr variable
Pression H2 COX	7 Mpa	6 Mpa	7 Mpa
Etendue zone plastique autour galerie	1m	1m	1m
Déformation plastique autour galerie	0,7%	0,7%	0,7%
Convergence max galerie	1,3 cm à 100 ans	1,3 cm à 100 ans	1,3 cm à 100 ans
Convergence résiduelle galerie	8 mm	6 mm	8 mm
Déformation plastique max	2,2%	2,2%	2,2%
Déformation plastique alvéole	0,28%	0,2%	0,28%
Traction béton/roche	2,4 MPa	1,3 MPa	2,4 MPa

Effets K ou Pr variables : ce qui change

	K et Pr constants	K variable	Pr variable
Temps resaturation des vides	20 000 ans	12 500 ans	20 000 ans
Pression gaz à 40 ans	5 Mpa	0,5 Mpa	4 Mpa
Profondeur désaturation roche	15 m	10 m	15 m
Première resaturation bouchon argile	7 ans		
Resaturation définitive bouchon argile	6 000 ans	15 000 ans	10 000 ans
Temps de resaturation du remblai	150 ans	12 000 ans	7 000 ans
Concentration hydrogène dissous dans remblai à 4500 ans	75g/m ³	90g/m ³	75g/m ³

Conclusions générales

- La variation de la perméabilité et des propriétés capillaires avec l'endommagement ont peu d'effet sur l'état à long terme de l'alvéole et de la galerie
- Elles ont un effet important sur les transitoires hydrauliques des bouchons et du remblai. L'état mécanique transitoire en est modifié.
- Études à faire :
 - ✓ Cumul des deux effets
 - ✓ Calculs chaînés (meca puis hydro)