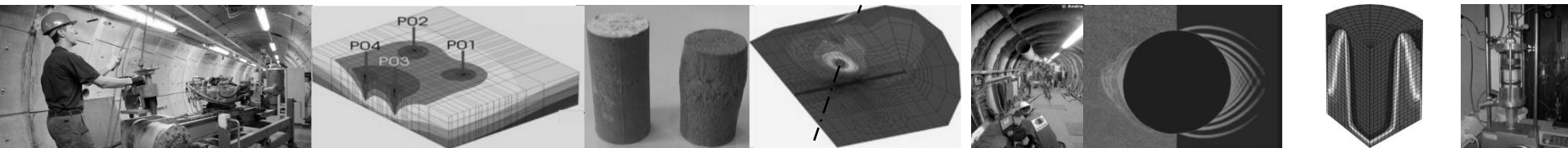


Modélisations numériques de l'expérience in-situ SDZ - Résultats de simulations

Robert Charlier, Frédéric Collin, Pierre Gerard, Jean-Pol Radu, Benoît Pardoën

Université de Liège – Département ArGEnCo

Réunion Andra – Châtenay-Malabry – 16/06/11



- Principes de l'expérience in-situ
- Modélisations numériques envisagées
- Paramètres des modèles constitutifs utilisés
- 2D état plan écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 2D état plan hydromécanique: - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Etat axisymétrique : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 3D écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Conclusions et perspectives

- Principes de l'expérience in-situ
- Modélisations numériques envisagées
- Paramètres des modèles constitutifs utilisés
- 2D état plan écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 2D état plan hydromécanique: - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Etat axisymétrique : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 3D écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Conclusions et perspectives

Objectifs de l'expérimentation SDZ :

- Evaluer les profils de **saturation**, de **pression** et de **perméabilité** autour d'un ouvrage dédié lors de **phases de ventilation contrôlée** (désaturation puis resaturation).
- Caractériser l'**EDZ** et son évolution autour d'un ouvrage dédié lors de phases de ventilation contrôlée (désaturation puis resaturation).

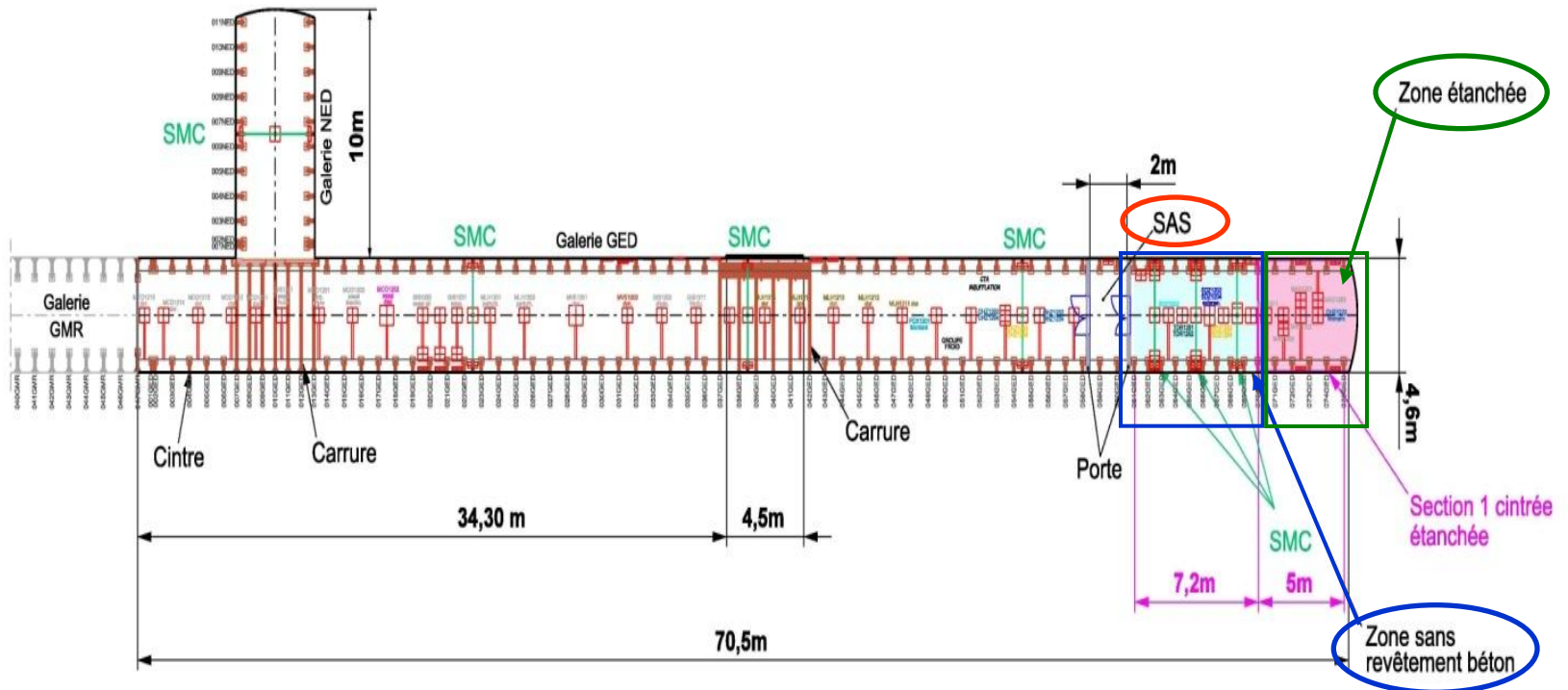
Moyens mis en œuvre :

- Soumettre une **portion de galerie isolée** du reste du laboratoire à des **paliers de ventilation** à T et Hr constants (désaturation puis resaturation).
- Suivre le **comportement hydromécanique de l'argilite** autour de cette zone au cours des cycles de ventilation.

Caractéristiques et localisation de la zone d'essai :

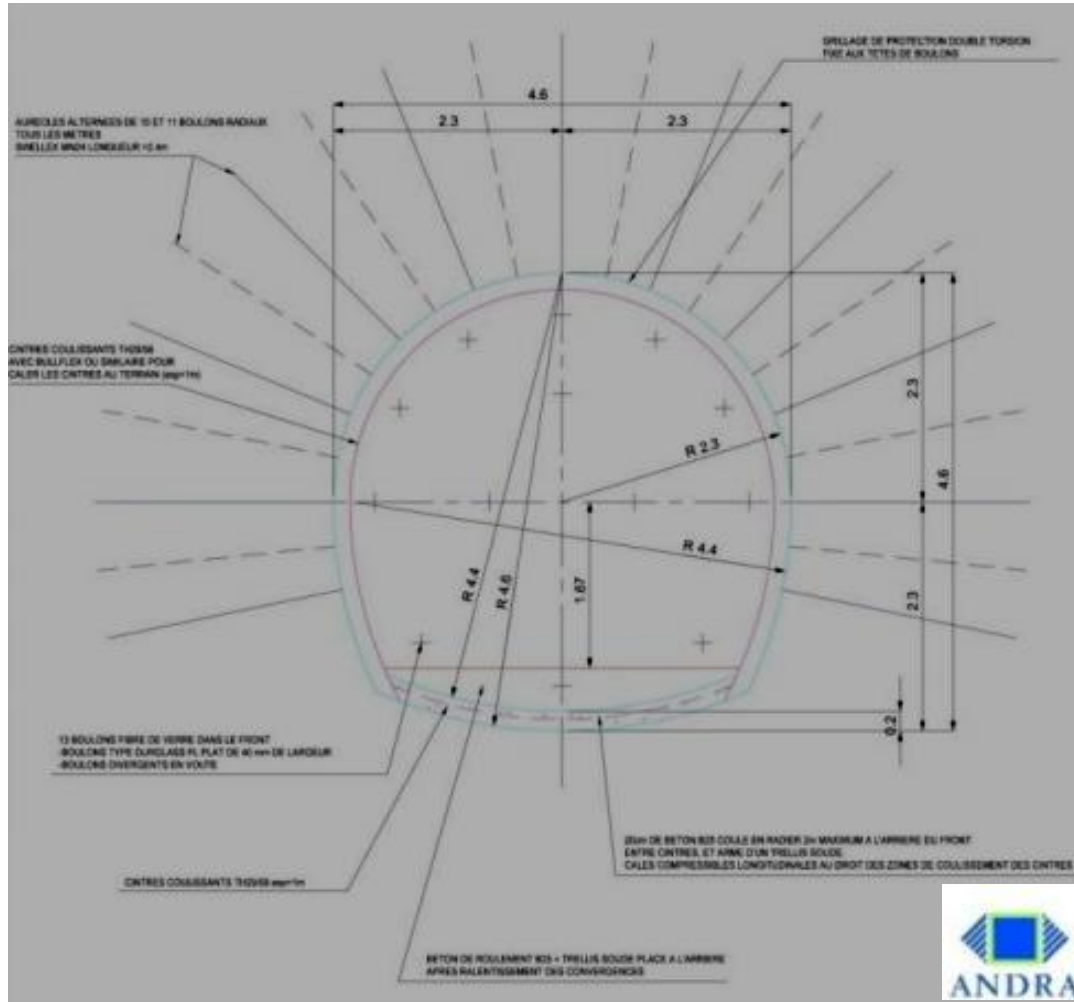


Echelle: 0 5 m



- *extrémité de la galerie GED*
- *sas de 2 m limité par deux portes étanches*
- *zone d'essai (roche à nu) de 7,2 m*
- *extrémité : zone étanchée de 5 m de long*

Coupe type SDZ



- Principes de l'expérience in-situ
- **Modélisations numériques envisagées**
- Paramètres des modèles constitutifs utilisés
- 2D état plan écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 2D état plan hydromécanique: - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Etat axisymétrique : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 3D écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Conclusions et perspectives

Aspects devant être pris en compte dans les modélisations :

- Les **conditions d'échange** entre le flux d'air contrôlé et la roche dépendent de l'humidité relative, de la vitesse de convection, de la température (entre 17 et 34 °C) et du revêtement en paroi. Ces conditions varient en longueur et sur la circonférence (radier de béton en partie basse).
- L'**anisotropie de contrainte** a une forte influence sur l'ampleur de la zone endommagée. La galerie est creusée dans les axes des contraintes principales.
- La **profondeur de la zone endommagée** varie fortement selon l'angle, elle est environ 4 fois plus grande verticalement qu'horizontalement, avec des fractures observées jusqu'à une profondeur de 0.8 m en horizontal et de 3.5 m en vertical vers le haut comme vers le bas.
- La roche est **anisotrope mécaniquement et hydrauliquement**, peut-être également thermiquement.
- La perméabilité est modifiée par l'**endommagement**.

La simulation numérique doit **coupler** les **déplacements**, les mouvements d'**eau** (liquide + vapeur) et de **gaz**, et les transferts **thermiques**.

Un **calcul 3D** est nécessaire pour prendre en compte l'ensemble des effets. Toutefois, des **calculs 2D** peuvent apporter des éléments de réponse et sont réalisés en 1^{ère} phase. Les premiers calculs portent essentiellement sur les transferts fluides.

→ Simulations présentées ici :

Calculs **2D état plan en écoulement pur**;

2D état plan en couplage hydromécanique;

axisymétrique en écoulement pur;

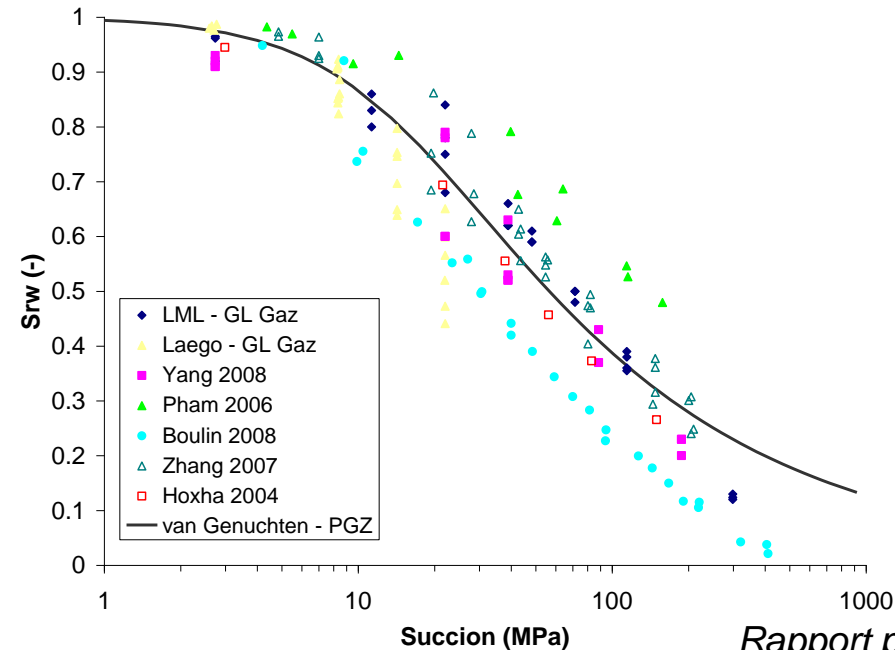
3D écoulement pur.

- Principes de l'expérience in-situ
- Modélisations numériques envisagées
- Paramètres des modèles constitutifs utilisés
- 2D état plan écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 2D état plan hydromécanique: - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Etat axisymétrique : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 3D écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Conclusions et perspectives

Paramètres hydrauliques de l'argilite

	Nom	Valeur	Unité
k_{hor}	Perméabilité intrinsèque horizontale	$4 \cdot 10^{-20}$	m^2
k_{vert}	Perméabilité intrinsèque verticale	$1.33 \cdot 10^{-20}$	m^2
φ	Porosité	0.18	-
m	Coefficient de Van Genuchten	0.55	-
n	Coefficient de Van Genuchten	1.49	-
P_r	Paramètre de Van Genuchten	15	MPa
S_{max}	Saturation maximale	1	-
S_{res}	Saturation résiduelle	0.01	-
τ	Tortuosité	0.25	-

Courbe de rétention



→ Idem modélisations numériques PGZ2 "2008", "2010" et PGZ1 "2010"

$$S_{rw} = S_{res} + (S_{max} - S_{res}) \left(1 + \left(\frac{P_c}{P_r} \right)^n \right)^{\frac{1}{n}-1}$$

$$n = 1.49$$

$$P_r = 15 \text{ MPa}$$

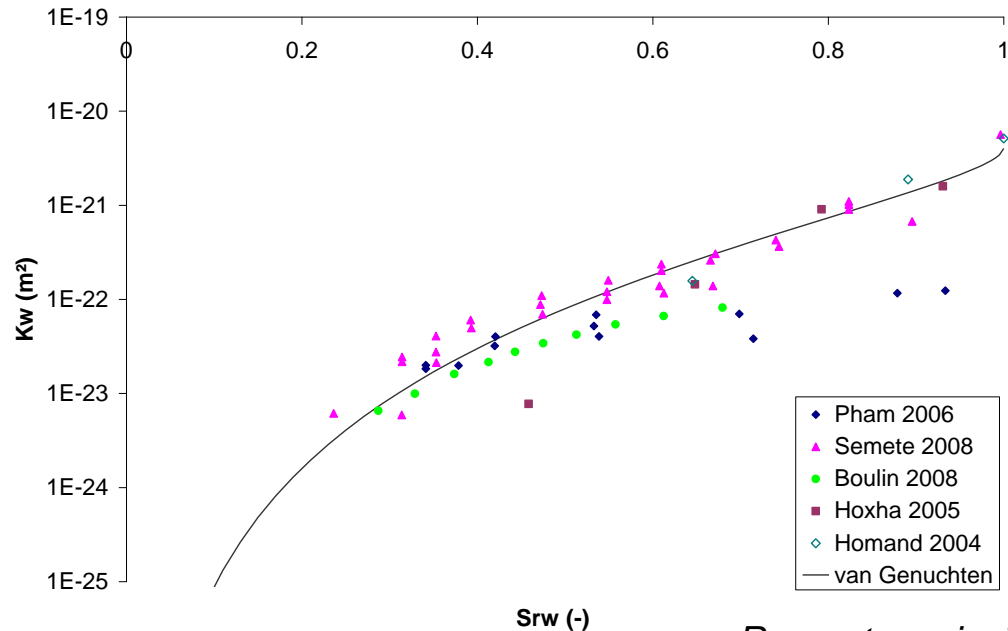
$$S_{res} = 0.01$$

$$S_{max} = 1$$

Paramètres hydrauliques de l'argilite

	Nom	Valeur	Unité
k_{hor}	Perméabilité intrinsèque horizontale	$4 \cdot 10^{-20}$	m^2
k_{vert}	Perméabilité intrinsèque verticale	$1.33 \cdot 10^{-20}$	m^2
φ	Porosité	0.18	-
m	Coefficient de Van Genuchten	0.55	-
n	Coefficient de Van Genuchten	1.49	-
P_r	Paramètre de Van Genuchten	15	MPa
S_{max}	Saturation maximale	1	-
S_{res}	Saturation résiduelle	0.01	-
τ	Tortuosité	0.25	-

Perméabilité à l'eau



→ Idem modélisations numériques PGZ2 "2008", "2010" et PGZ1 "2010"

$$K_w = K_{w,sat} \sqrt{S_{rw}} \left(1 - \left(1 - S_{rw}^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2$$

$$K_{w,sat} = 4 \cdot 10^{-20} m^2 \text{ horiz} \quad ; \quad 1.33 \cdot 10^{-20} m^2 \text{ vertical}$$

$$m = 0.55$$

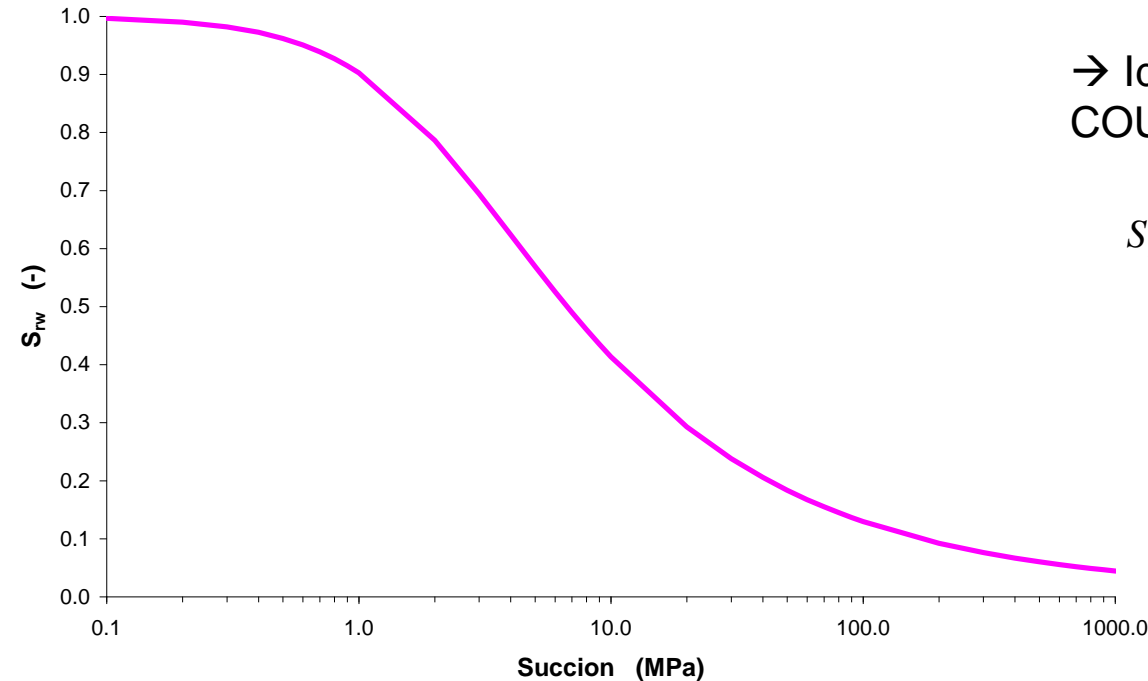
Paramètres mécaniques de l'argilite

	Nom	Valeur	Unité
E	Module de Young	4 000	MPa
ν	Coefficient de Poisson	0.3	-
ψ	Angle de dilatance	0	°
ρ	Masse volumique	2 300	kg/m ³
φ	Angle de frottement	20	°
c	Cohésion	3	MPa
b	Coefficient de Biot	0.6	-

Paramètres hydrauliques du béton (radier et revêtement)

	Nom	Valeur	Unité
k	Perméabilité intrinsèque isotrope	1.10^{-18}	m^2
φ	Porosité	0.20	-
m	Coefficient de Van Genuchten	0.35065	-
n	Coefficient de Van Genuchten	1.54	-
P_r	Paramètre de Van Genuchten	2	MPa
S_{max}	Saturation maximale	1	-
S_{res}	Saturation résiduelle	0.01	-
τ	Tortuosité	0.25	-

Courbe de rétention



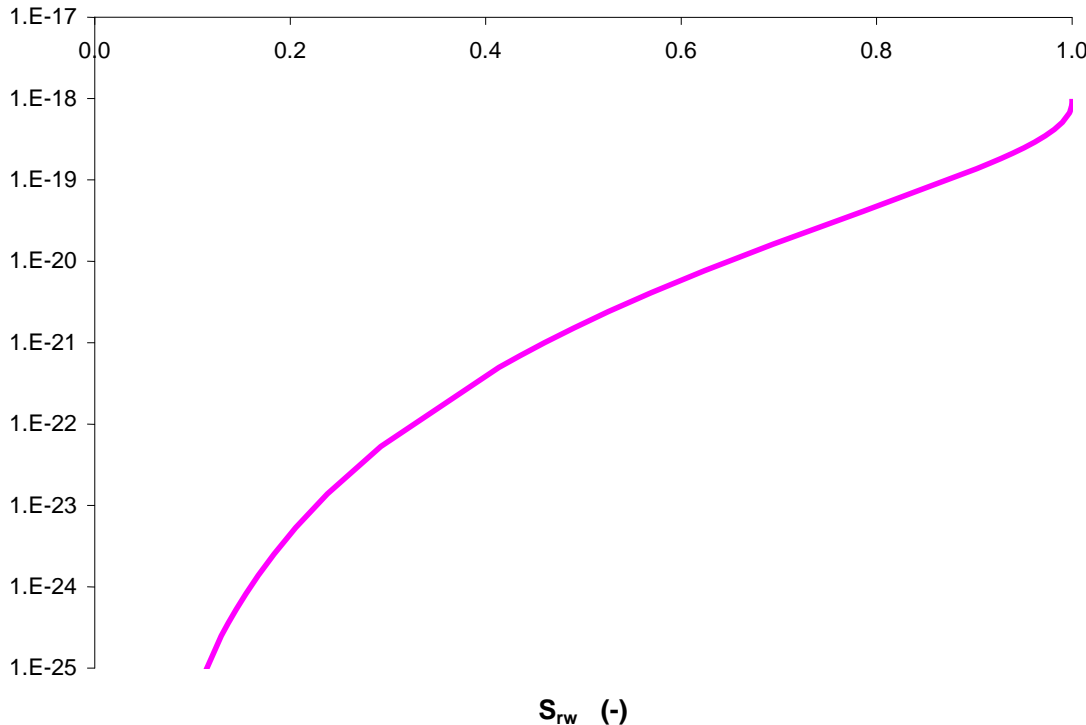
→ Idem modélisations numériques
COUPLEX

$$S_{rw} = S_{res} + (S_{max} - S_{res}) \left(1 + \left(\frac{p_c}{P_r} \right)^n \right)^{\frac{1}{m}}$$

Paramètres hydrauliques du béton (radier et revêtement)

	Nom	Valeur	Unité
k	Perméabilité intrinsèque isotrope	1.10^{-18}	m^2
φ	Porosité	0.20	-
m	Coefficient de Van Genuchten	0.35065	-
n	Coefficient de Van Genuchten	1.54	-
P_r	Paramètre de Van Genuchten	2	MPa
S_{max}	Saturation maximale	1	-
S_{res}	Saturation résiduelle	0.01	-
τ	Tortuosité	0.25	-

Perméabilité à l'eau



→ Idem modélisations numériques COUPLEX

$$K_w = K_{w,sat} \sqrt{S_{rw}} \left(1 - \left(1 - S_{rw}^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2$$

$$K_{w,sat} = 1 \cdot 10^{-18} m^2$$

$$m = 0.35065$$

Paramètres mécaniques du béton (radier et revêtement)

	Nom	Valeur	Unité
E	Module de Young	30 000	MPa
ν	Coefficient de Poisson	0.3	-
ρ	Masse volumique	2 300	kg/m ³
b	Coefficient de Biot	1	-

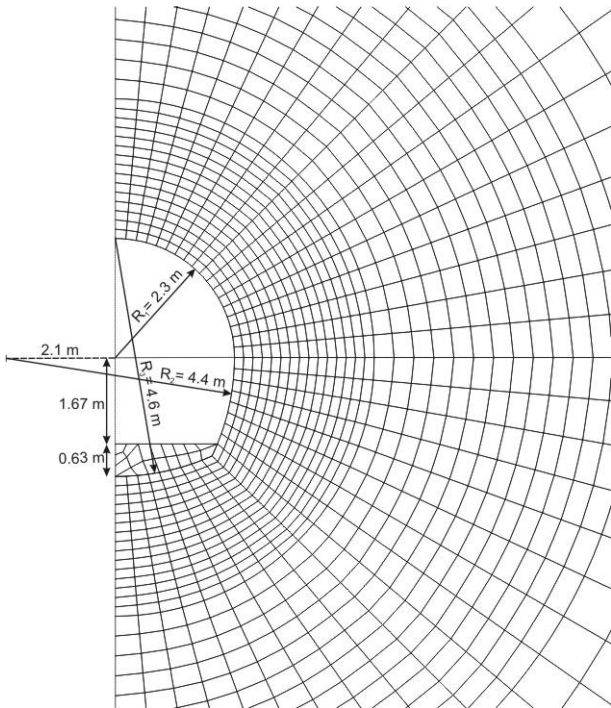
- Principes de l'expérience in-situ
- Modélisations numériques envisagées
- Paramètres des modèles constitutifs utilisés
- 2D état plan écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 2D état plan hydromécanique: - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Etat axisymétrique : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 3D écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Conclusions et perspectives

Modélisation 2D état plan

Ecoulement pur

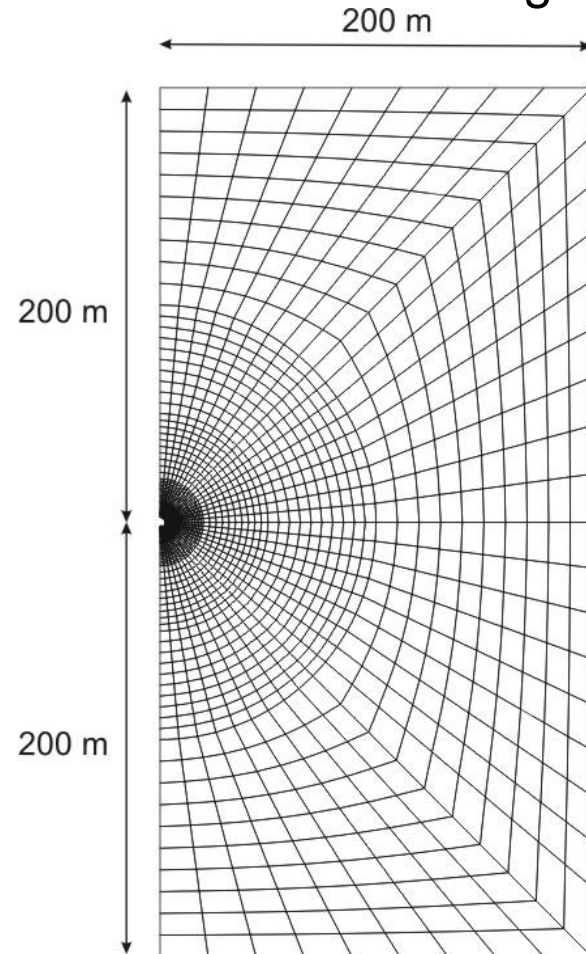
P_w initiale de 4.5 MPa, fixée aux limites lointaines (200 m de la galerie)

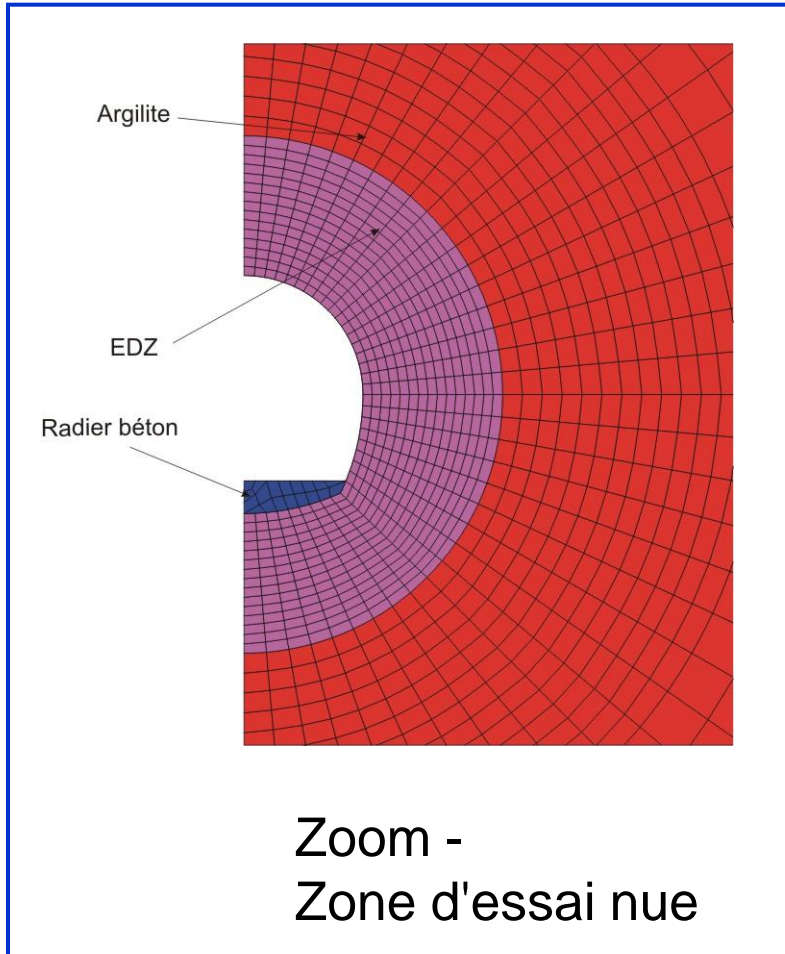
Zoom -
Zone d'essai nue



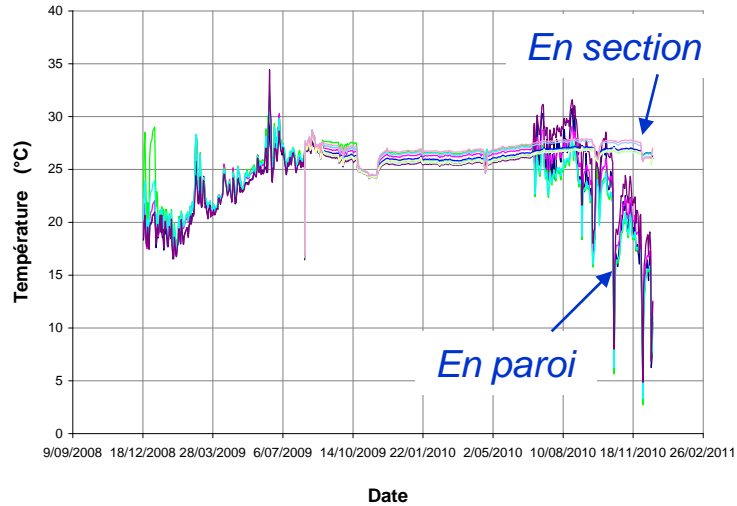
7613 nœuds
7539 équations
2512 éléments

Vue globale





Evolution de la température. SDZ1261

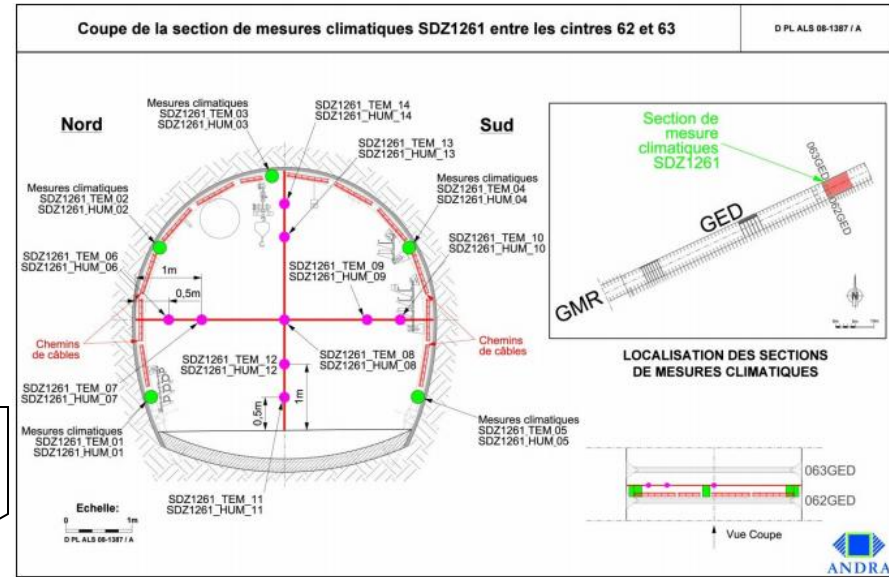


- SDZ1261_TEM_01
- SDZ1261_TEM_02
- SDZ1261_TEM_03
- SDZ1261_TEM_04
- SDZ1261_TEM_05
- SDZ1261_TEM_06
- SDZ1261_TEM_07
- SDZ1261_TEM_08
- SDZ1261_TEM_09
- SDZ1261_TEM_10
- SDZ1261_TEM_11
- SDZ1261_TEM_12
- SDZ1261_TEM_13
- SDZ1261_TEM_14

Section SDZ1261

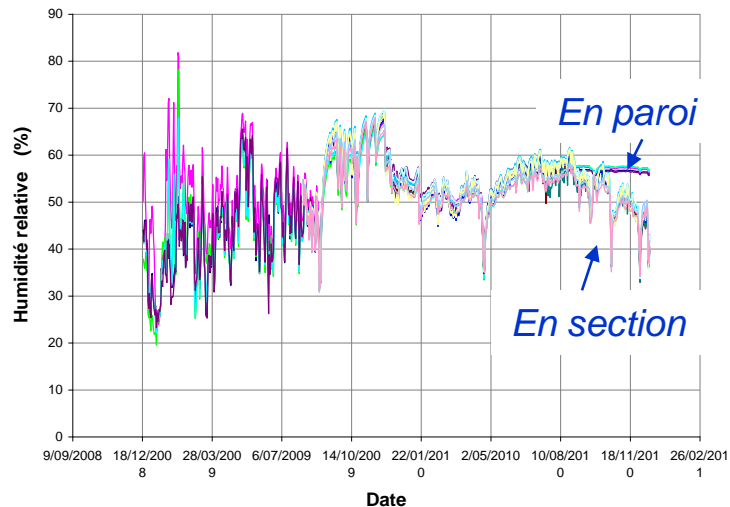
En paroi

En section



Mesures de température dans la section SDZ1261

Evolution de l'humidité relative. SDZ1261



En paroi

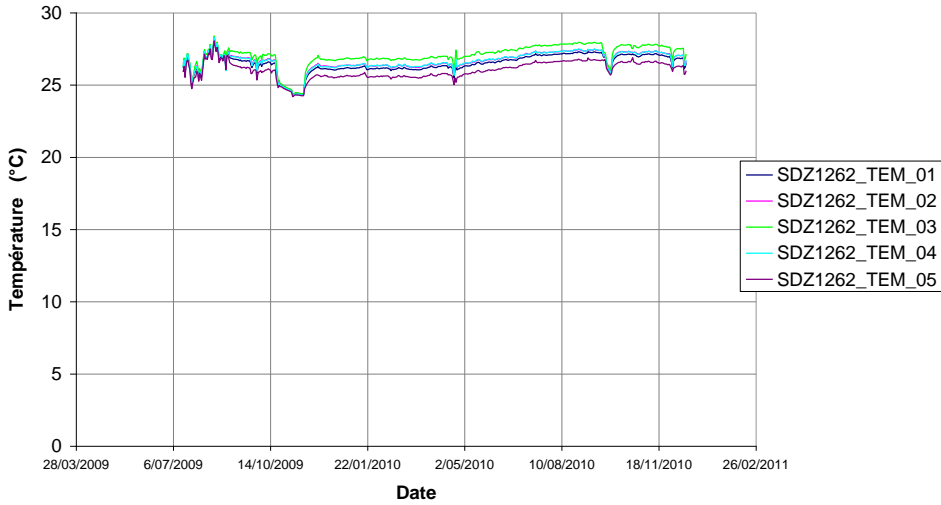
En section

- SDZ1261_HUM_01
- SDZ1261_HUM_02
- SDZ1261_HUM_03
- SDZ1261_HUM_04
- SDZ1261_HUM_05
- SDZ1261_HUM_06
- SDZ1261_HUM_07
- SDZ1261_HUM_08
- SDZ1261_HUM_09
- SDZ1261_HUM_10
- SDZ1261_HUM_11
- SDZ1261_HUM_12
- SDZ1261_HUM_13
- SDZ1261_HUM_14

Rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B

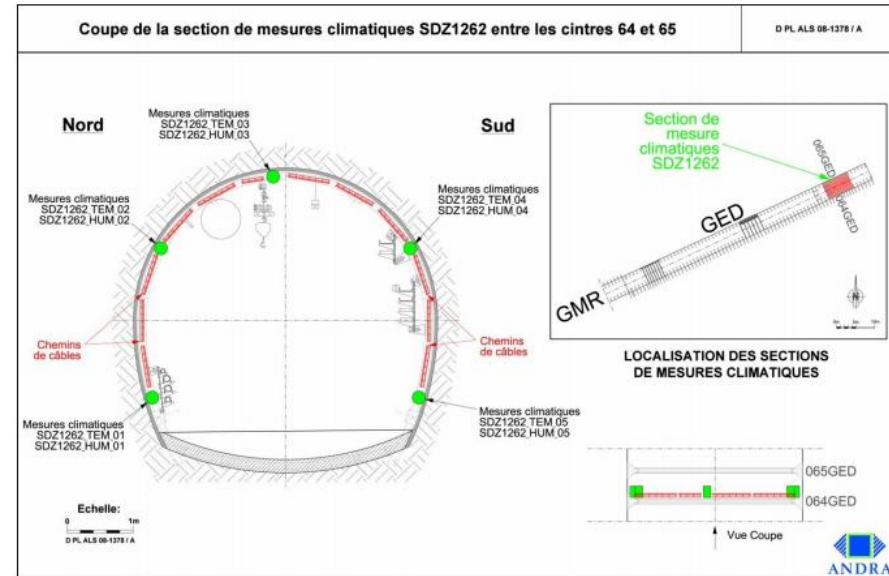
Mesures d'humidité relative dans la section SDZ1261

Evolution de la température. SDZ1262



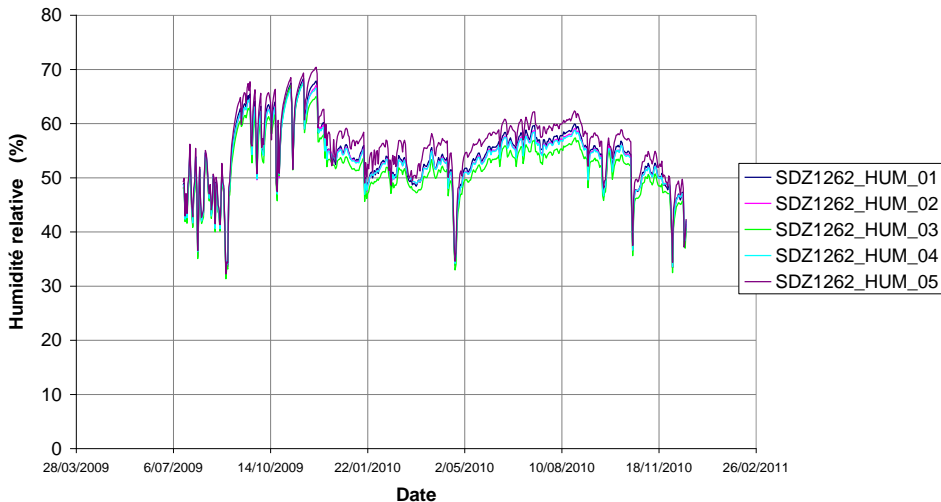
Section SDZ1262

En paroi



Mesures de température dans la section SDZ1262

Evolution de l'humidité relative. SDZ1262



En paroi

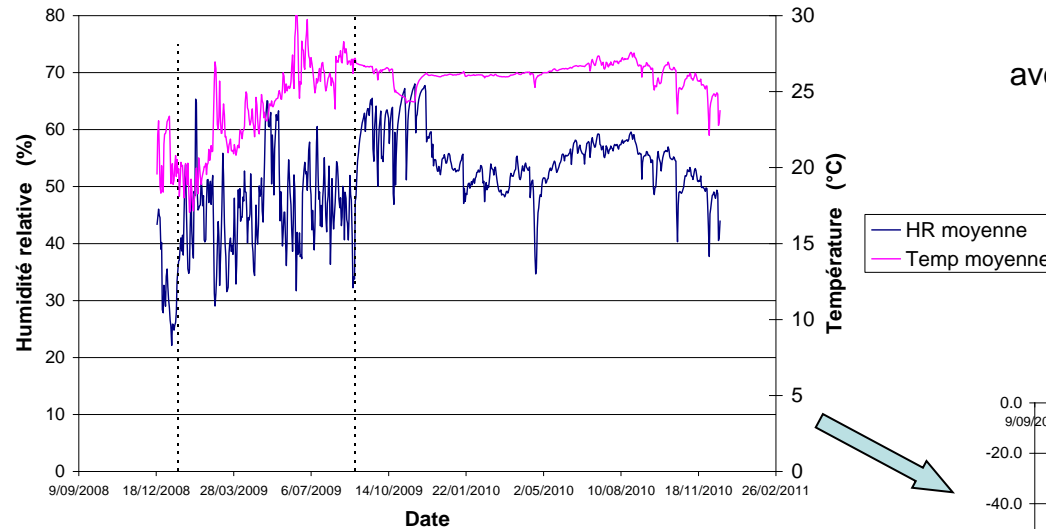
Rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B

Mesures d'humidité relative dans la section SDZ1262

Imposition de l'humidité relative Hr dans la galerie (par l'intermédiaire d'élément FMIVP à un nœud environnement) par la loi de Kelvin:

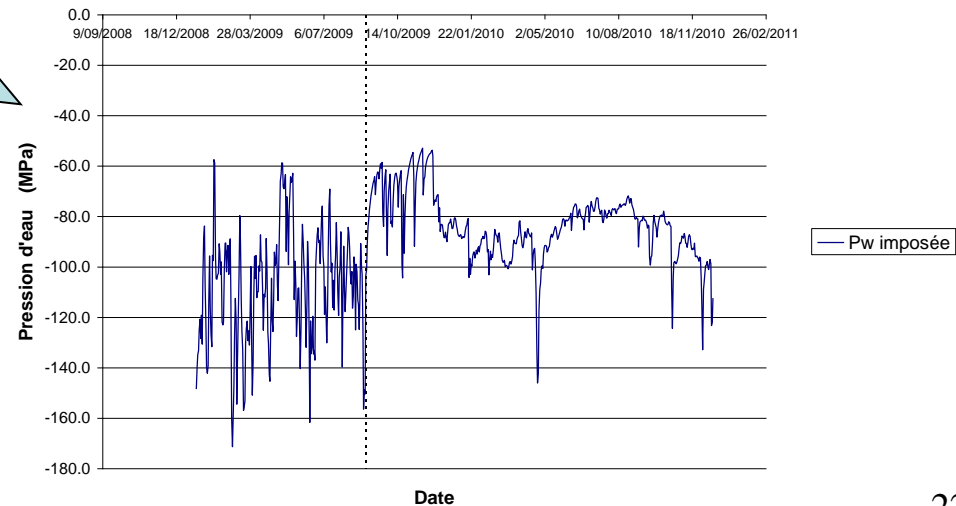
$$Hr = \exp\left(\frac{(p_w - p_g) \cdot M_{H_2O}}{\rho_w \cdot R \cdot T}\right)$$

Evolution de l'humidité relative et de la température moyenne (SDZ1261 et SDZ1262).

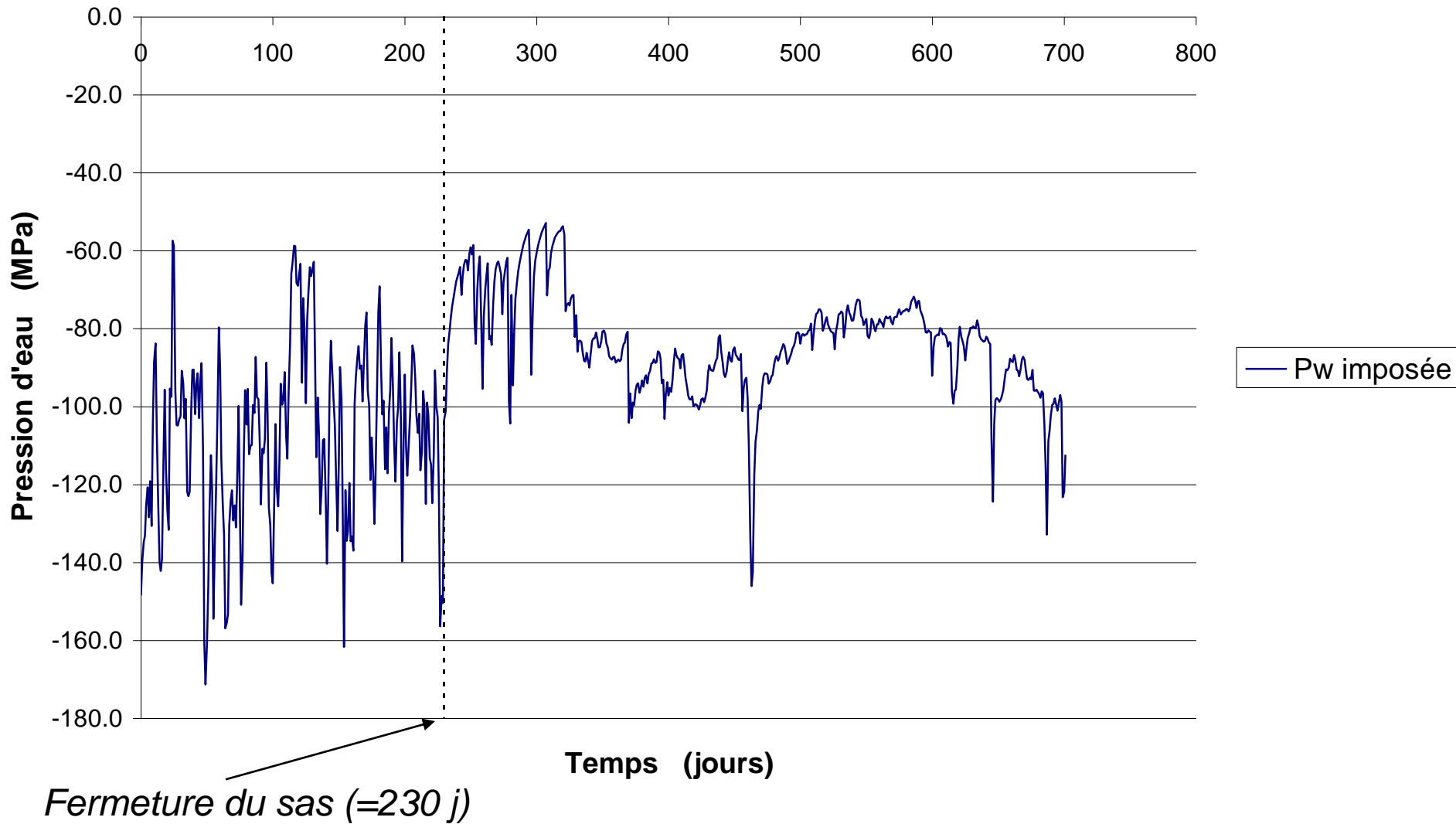


avec M_{H_2O} = la masse molaire de l'eau = 0.018 kg.mol⁻¹;
 R = la constante des gaz parfait = 8.313 J.mol⁻¹.K⁻¹;
 p_g = 0.1 MPa.

Evolution de la pression d'eau imposée en galerie.



Evolution de la pression d'eau imposée en galerie.



Elément FMIVP :

La condition aux limites du flux total d'eau est exprimée par la somme du **flux de suintement** et du **flux d'échange de vapeur** :

$$\bar{q} = \bar{S} + \bar{E}$$

Le **flux de suintement** est donné par :

$$\begin{cases} \bar{S} = K \cdot (p_w^f - p_{atm})^2 & \text{si } p_w^f \geq p_w^{cav} \text{ et } p_w^f \geq p_{atm} \\ \bar{S} = 0 & \text{si } p_w^f < p_w^{cav} \text{ ou } p_w^f < p_{atm} \end{cases}$$

avec

p_w^f la pression de pores dans la formation rocheuse;

p_w^{cav} la pression d'eau correspondant à l'humidité relative dans la cavité;

p_{atm} la pression atmosphérique;

K un coefficient de transfert pour le suintement.

L'échange par **évaporation** est exprimé par la différence entre la masse volumique de la vapeur dans l'atmosphère de la cavité et la masse volumique de la vapeur dans la formation rocheuse :

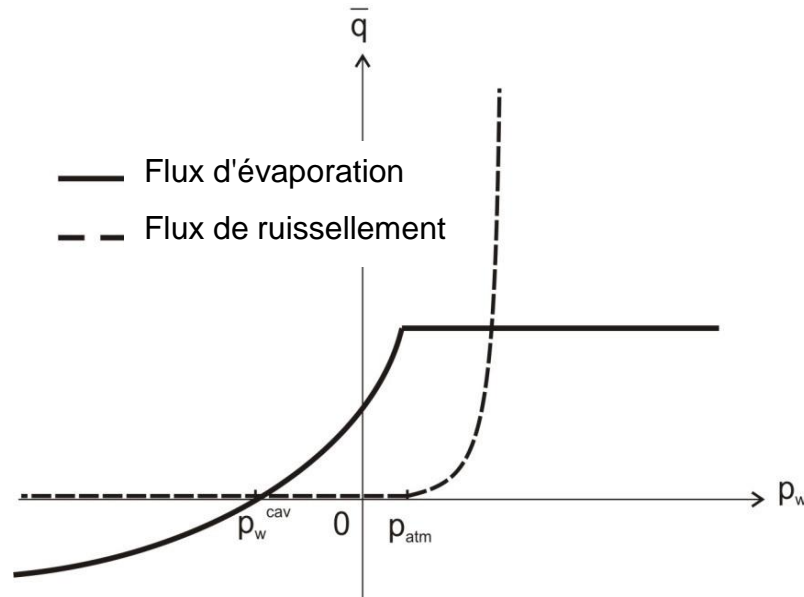
$$\bar{E} = \alpha.(\rho_v^f - \rho_v^{cav})$$

avec

ρ_v^f la masse volumique de la vapeur dans la formation rocheuse;

ρ_v^{cav} la masse volumique de la vapeur dans la cavité;

α un coefficient de transfert de masse pour l'évaporation.



Chronologie :

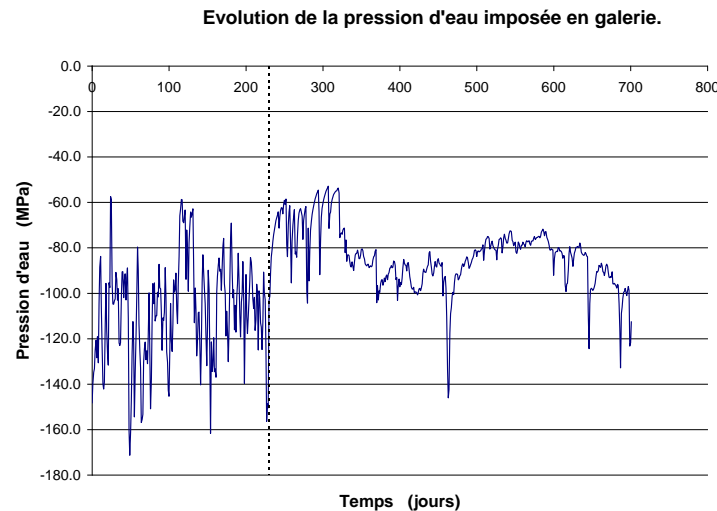
- Début de la simulation : 15/01/2009 (= Fin creusement SDZ) = jour 0
- (Mise en place du revêtement : entre le 26/01/2009 et le 28/01/2009
→ moyenne : 27/01/2009 = jour 12)
- Mise en place du radier : entre le 13/02/2009 et le 26/02/2009
→ moyenne : 20/02/2009 = jour 36
- Sas fermé : 2/09/2009 = jour 230
- Fin de la simulation : 16/12/2010 = jour 701

Radier et revêtement mis en place à $p_w = 0.1 \text{ MPa}$

Chronologie :

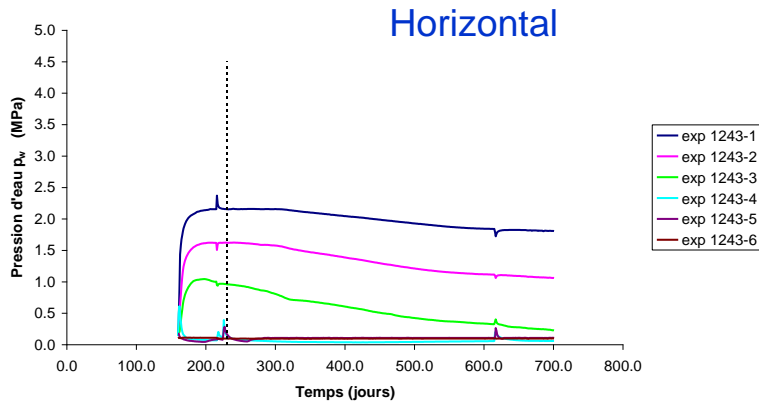
Etat 2D plan

- **Avant la fermeture du sas** : période de ventilation dans la galerie. La pression d'eau est fixée au nœud d'environnement pour imposer l'évolution de l'humidité relative voulue.
- Ensuite, le **sas est fermé** et la ventilation est fermée dans la zone SDZ. La pression d'eau sera toutefois toujours imposée au nœud d'environnement pour imposer l'humidité relative mesurée.

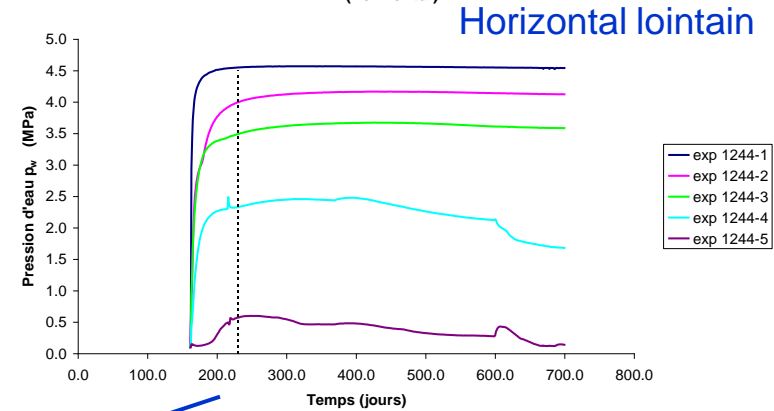


- Principes de l'expérience in-situ
- Modélisations numériques envisagées
- Paramètres des modèles constitutifs utilisés
- 2D état plan écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 2D état plan hydromécanique: - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Etat axisymétrique : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 3D écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Conclusions et perspectives

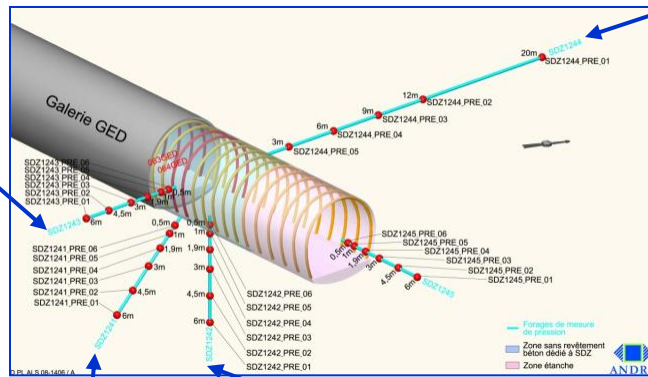
Expérimental - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1243 (horizontal)



Expérimental - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1244 (horizontal)

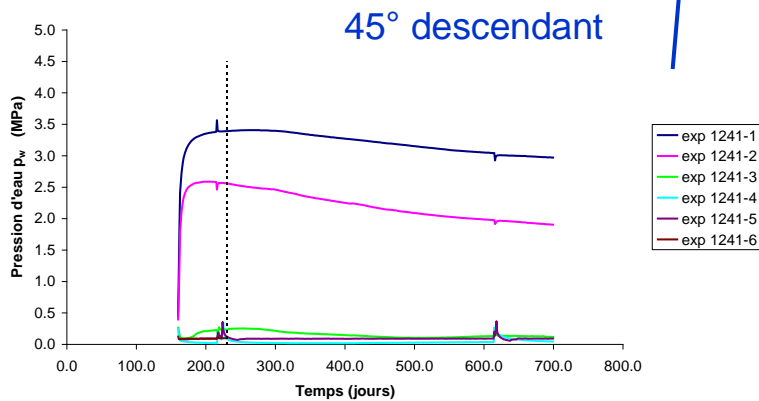


Début acquisition :
23/25 juin 2009

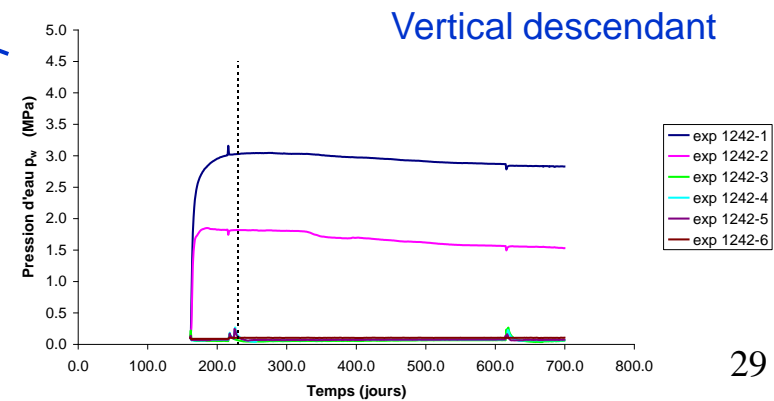


Localisation des forages de mesure de pression dédiés à SDZ

Expérimental - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1241 (45° descendant)



Expérimental - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1242 (vertical descendant)



Cas 3

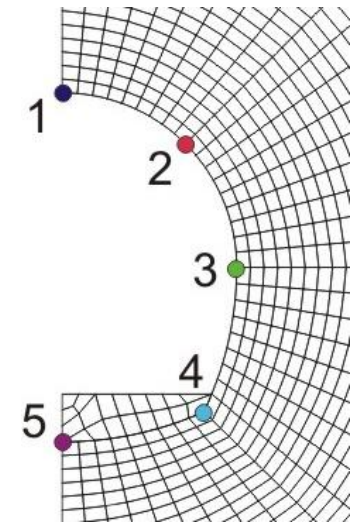
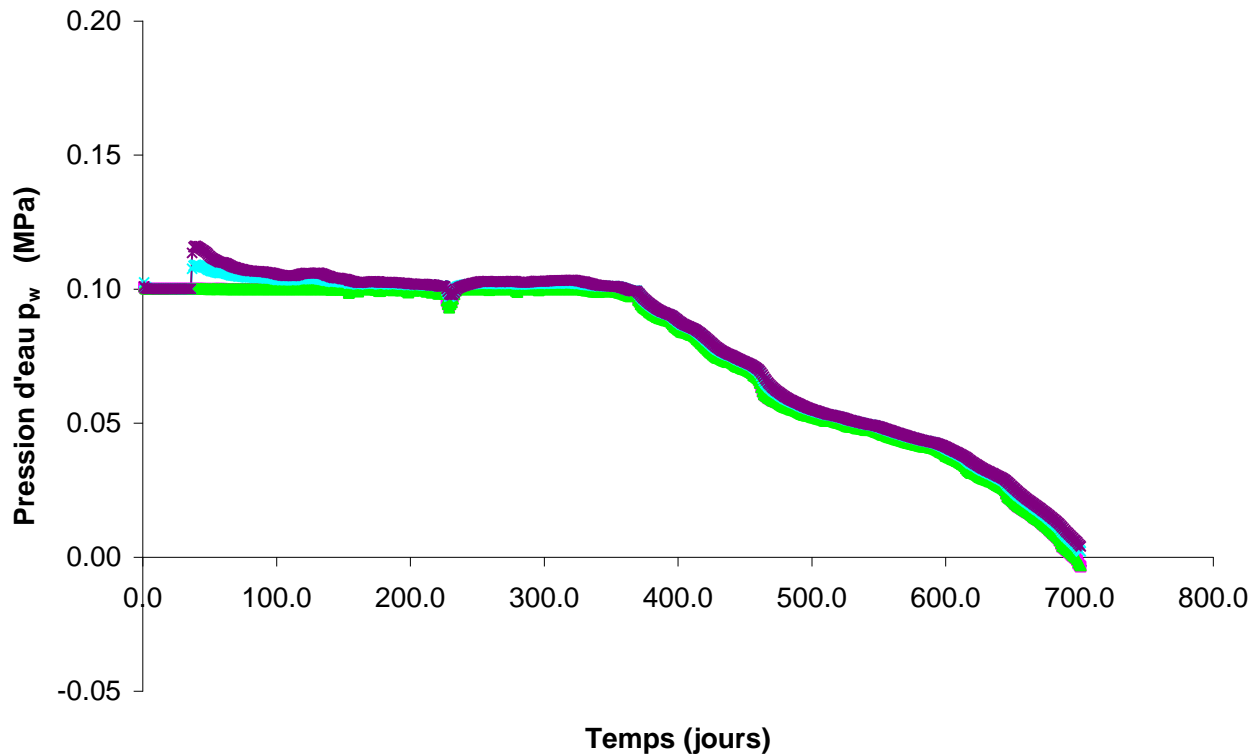
Suintement : $K = 10^{-10} \text{ s.kg}^{-1}$

Evaporation : $\alpha = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

$k_{ani} = 4 / 1,33 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ de 2,3 à 5,0 m (EDZ = 2,7 m)

$k_{ani} = 4 / 1,33 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ de 5,0 à 200 m

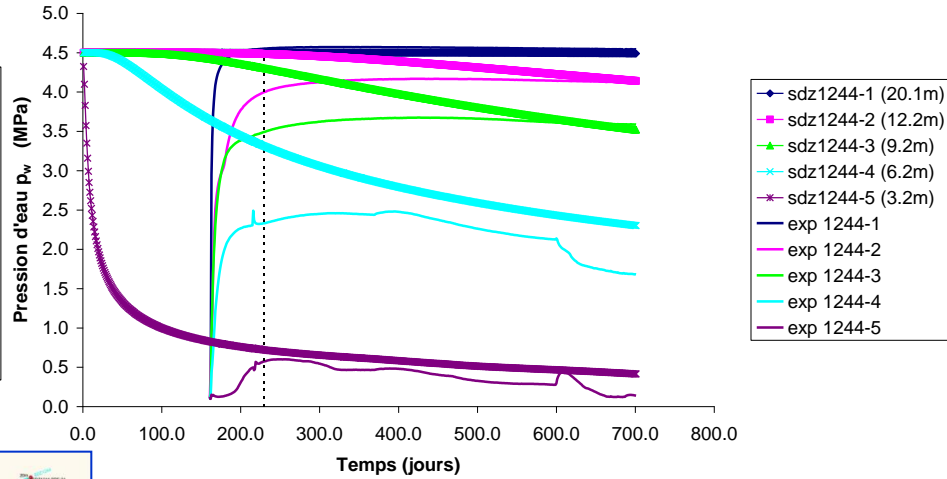
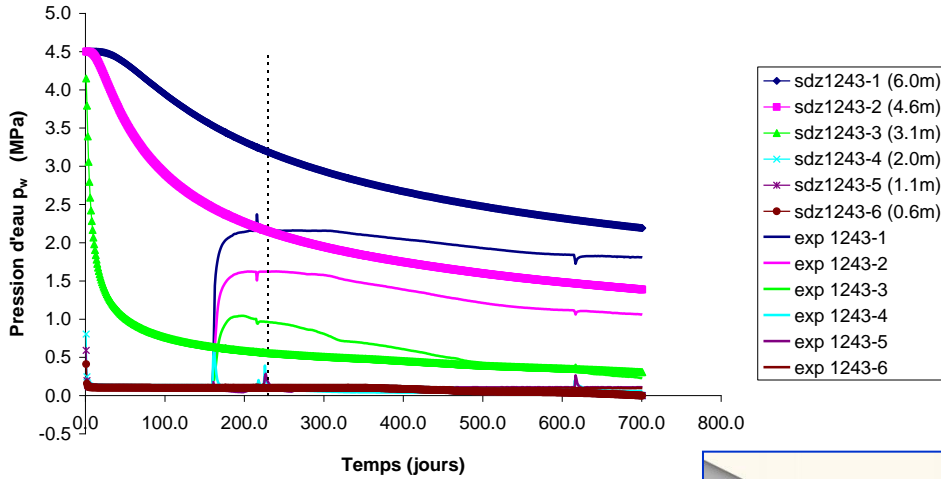
SDZ_11 - Evolution de la pression d'eau p_w en paroi



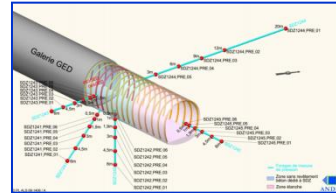
- ◆ Point 1
- Point 2
- ▲ Point 3
- ✕ Point 4
- * Point 5

SDZ_11 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1243 (horizontal)

SDZ_11 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1244 (horizontal)



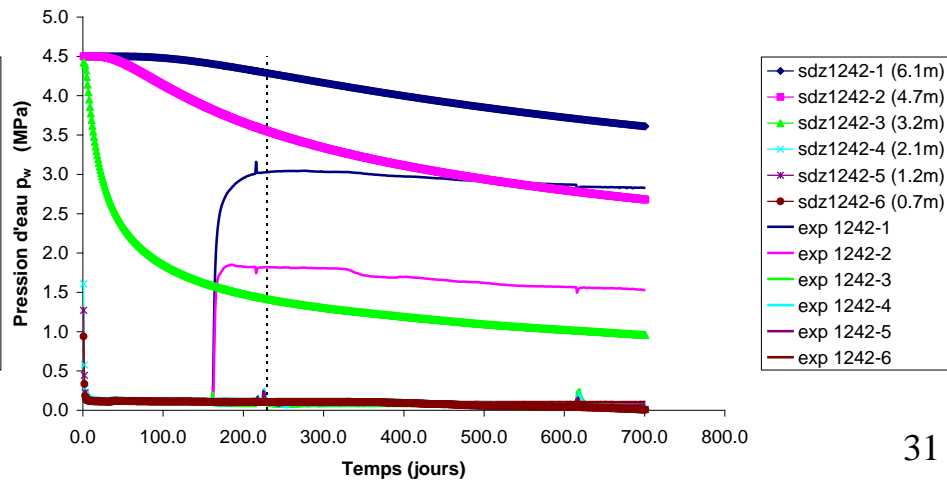
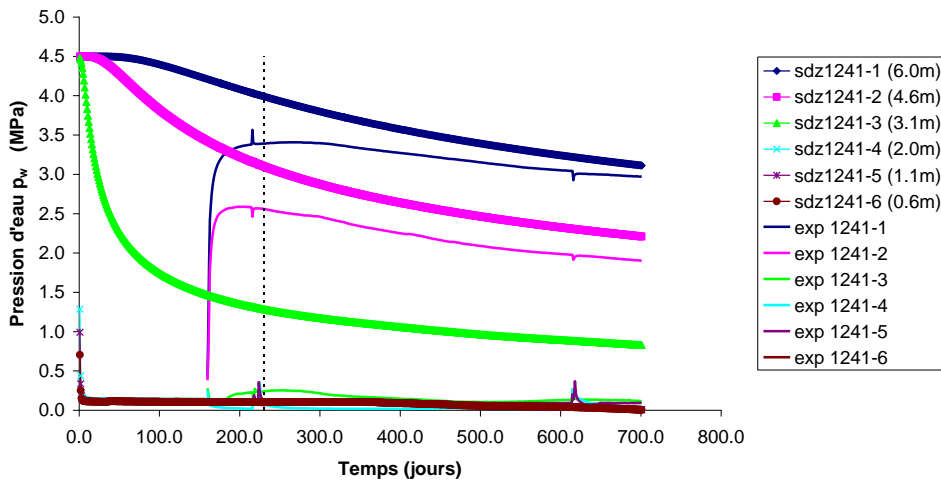
Cas 3



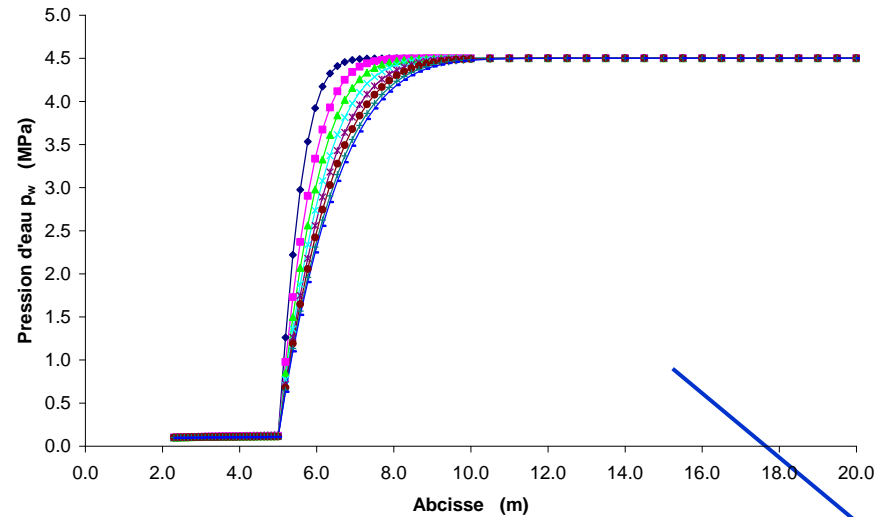
→ P_w +/- correcte en zone lointaine
 P_w +/- correcte à long terme, horizontalement
 P_w trop haute, verticalement

SDZ_11 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1241 (45° descendant)

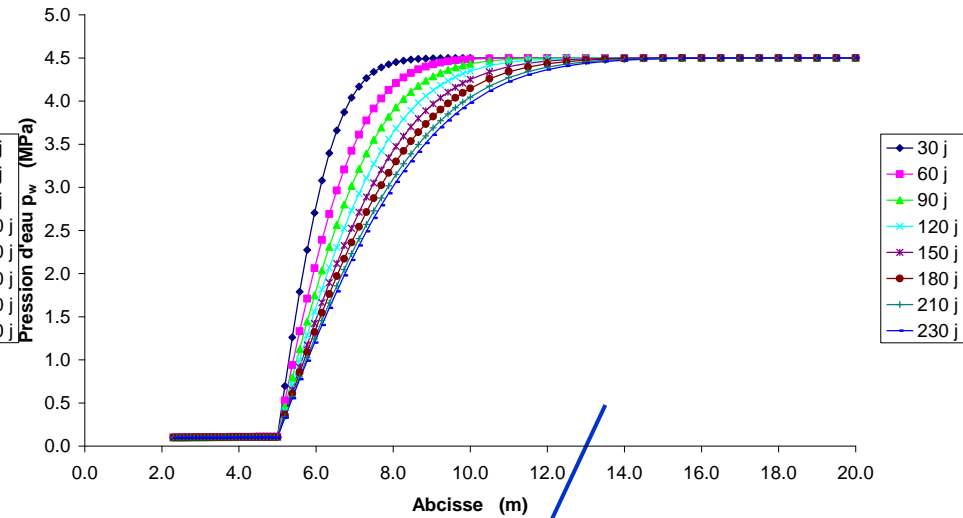
SDZ_11 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1242 (vertical descendant)



SDZ_11 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe 1-1

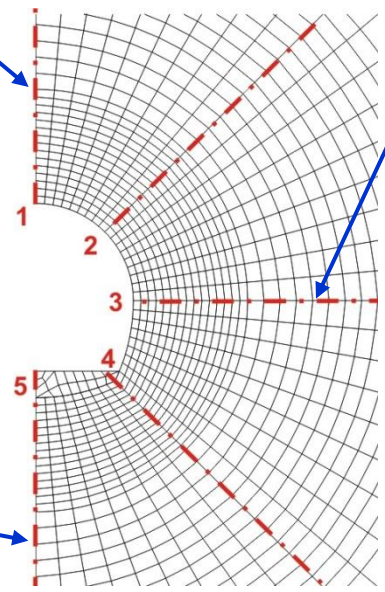
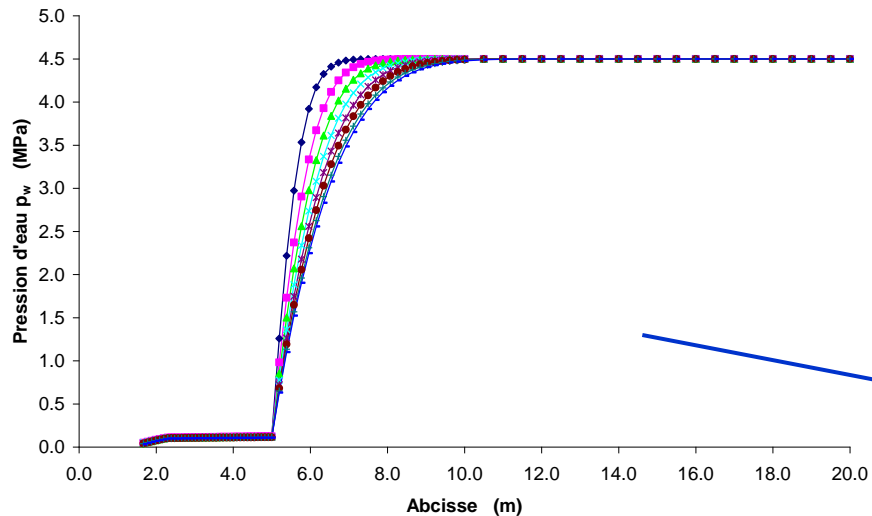


SDZ_11 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe 3-3



Cas 3

SDZ_11 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe 5-5



Cas 4

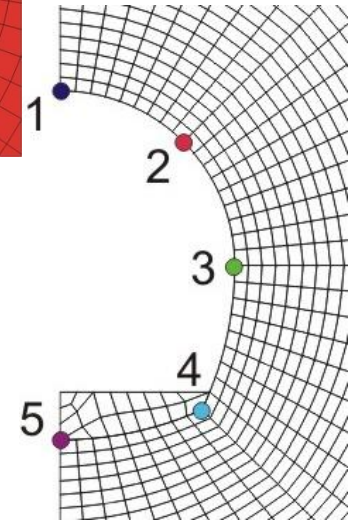
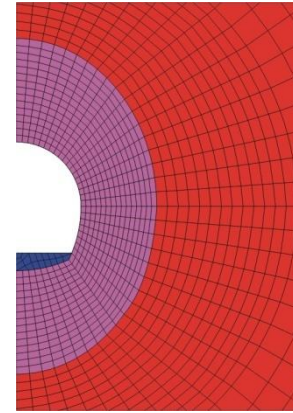
Suintement : $K = 10^{-10} \text{ s.kg}^{-1}$

Evaporation : $\alpha = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

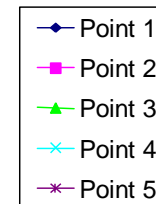
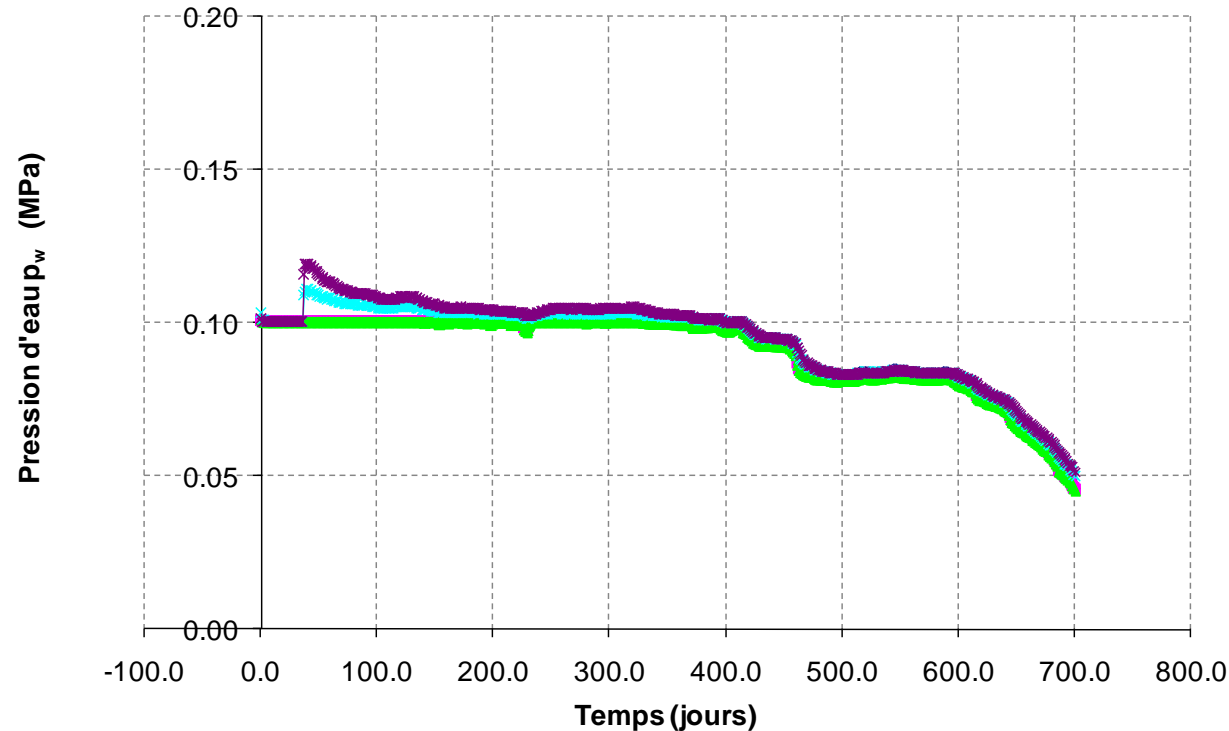
$k_{ani} = 4 / 1,33 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ de 2,3 à 5,0 / 6,0 m

(EDZ elliptique = 2,7 / 3,7 m)

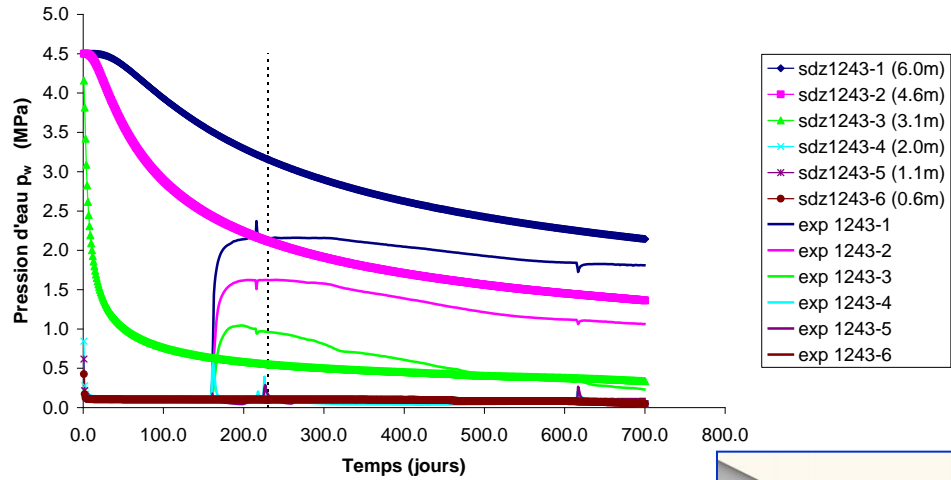
$k_{ani} = 4 / 1,33 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ de 5,0 à 200 m



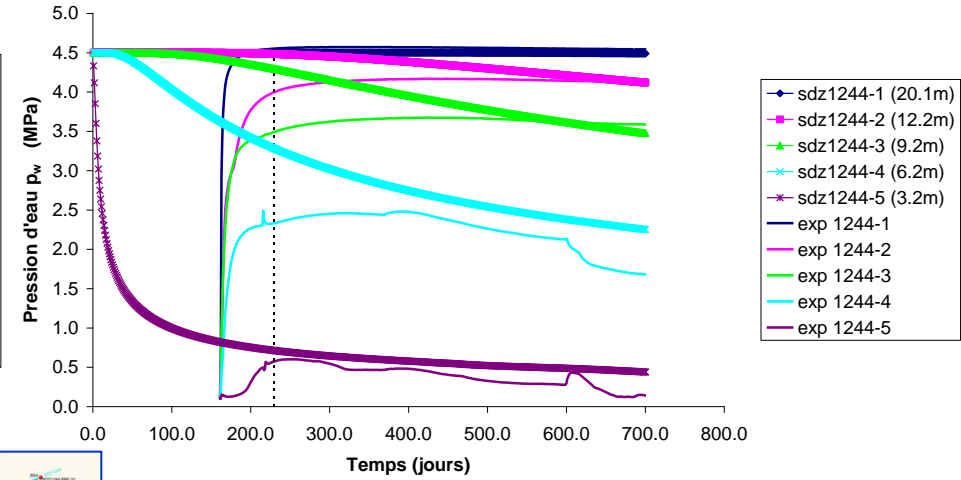
SDZ_16 - Evolution de la pression d'eau p_w en paroi



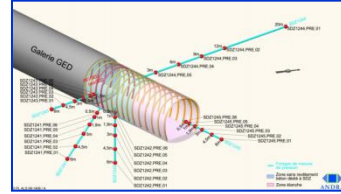
SDZ_16 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1243 (horizontal)



SDZ_16 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1244 (horizontal)

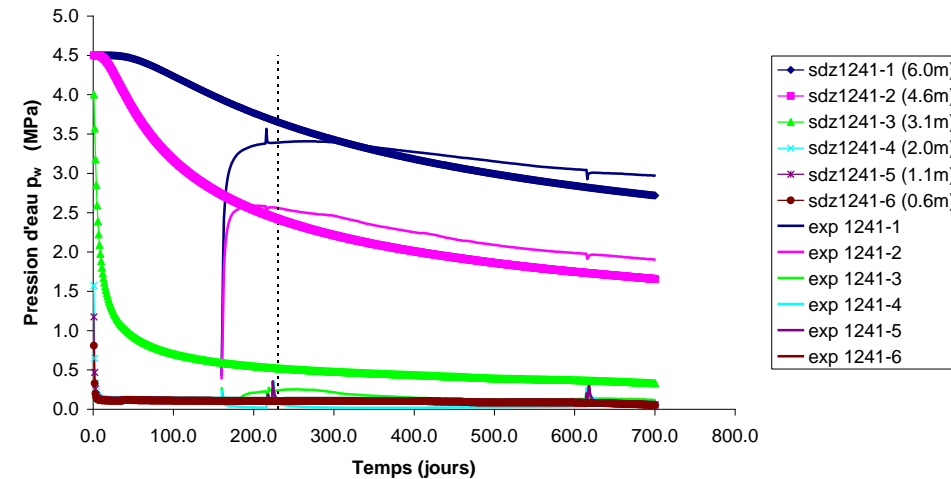


Cas 4

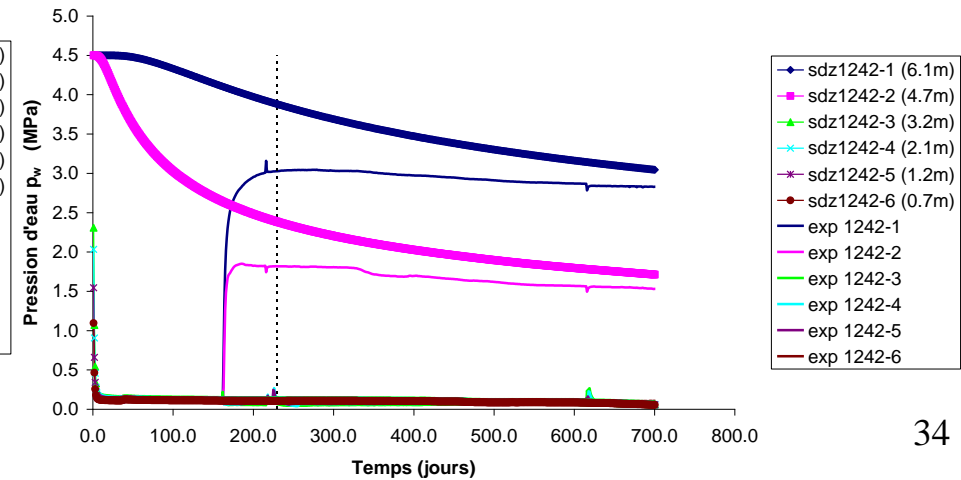


→ P_w +/- correcte en zone lointaine
 P_w +/- correcte à long terme, horizontalement
 P_w +/- correcte à long terme, verticalement

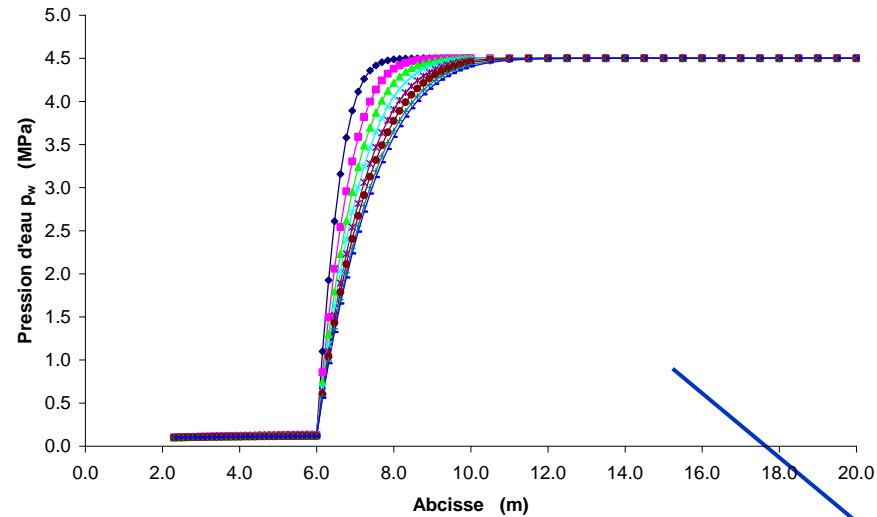
SDZ_16 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1241 (45° descendant)



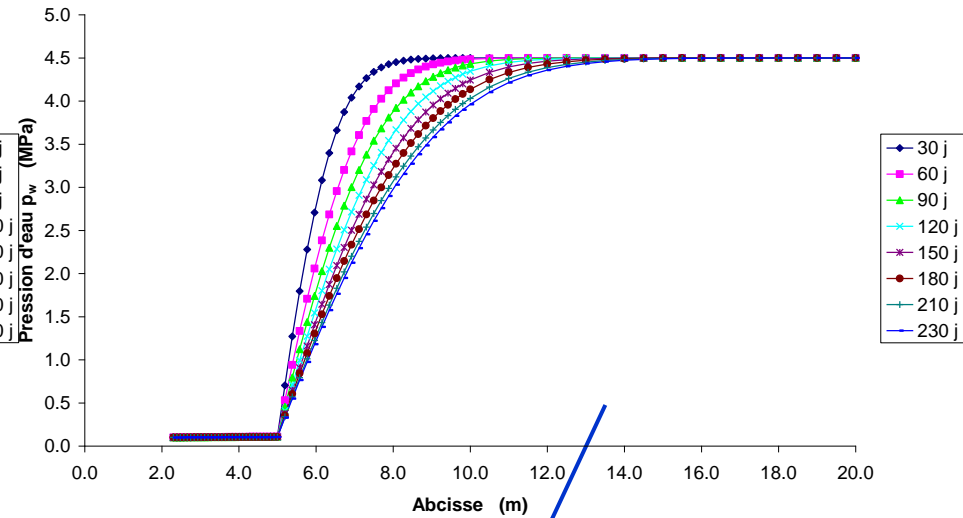
SDZ_16 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1242 (vertical descendant)



SDZ_16 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe 1-1

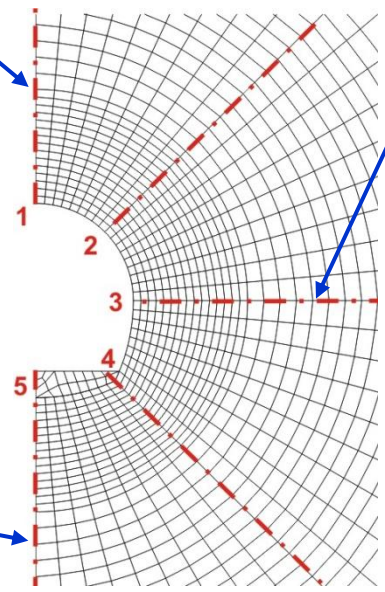
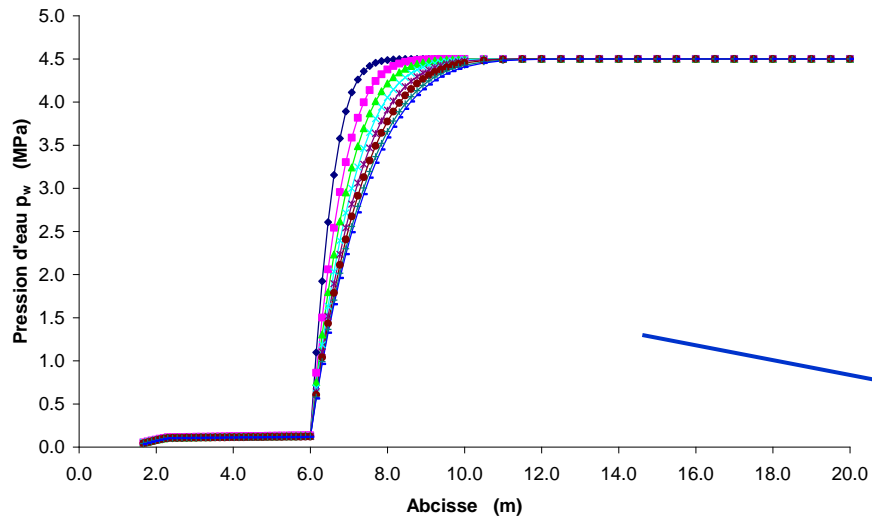


SDZ_16 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe 3-3



Cas 4

SDZ_16 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe 5-5



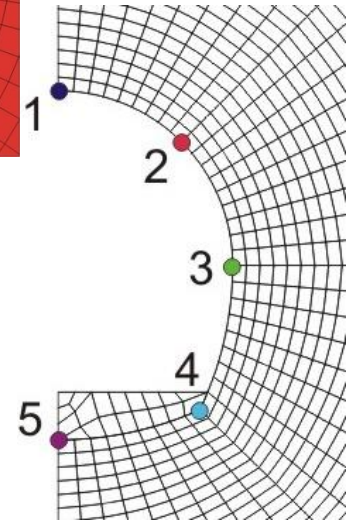
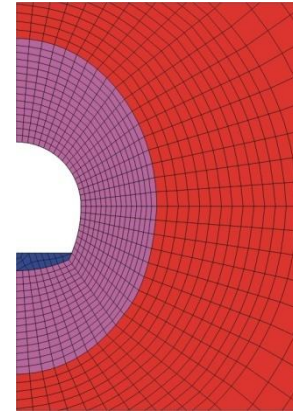
Cas 5

Suintement : $K = 10^{-10} \text{ s.kg}^{-1}$

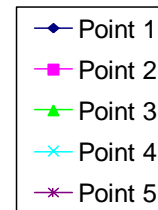
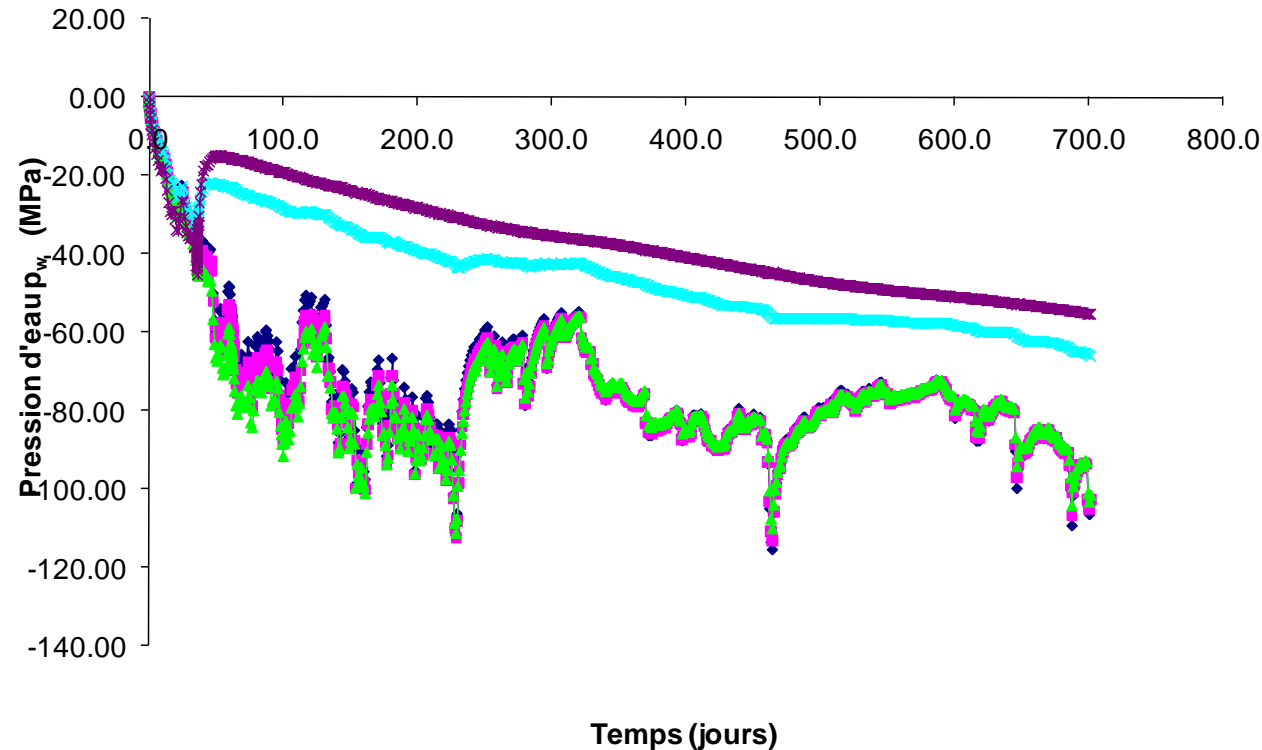
Evaporation : $\alpha = 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$

$k_{ani} = 4 / 1,33 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ de 2,3 à 5,0 / 6,0 m
(EDZ elliptique = 2,7 / 3,7 m)

$k_{ani} = 4 / 1,33 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ de 5,0 à 200 m

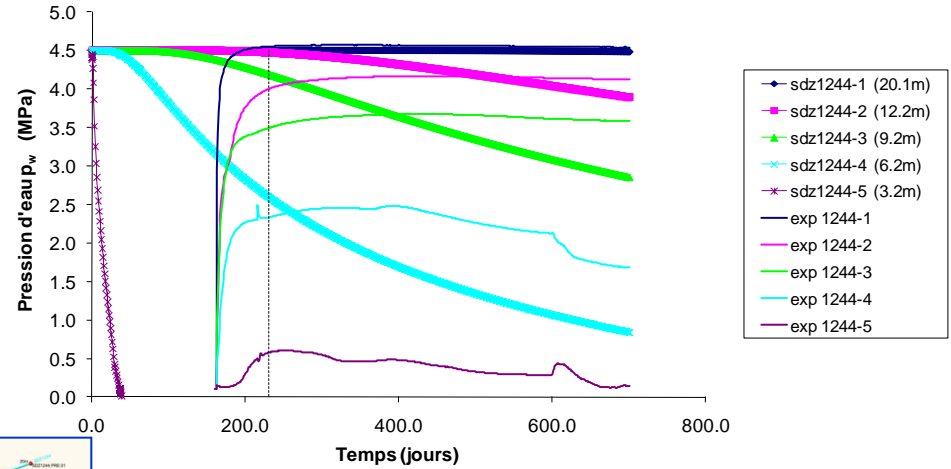
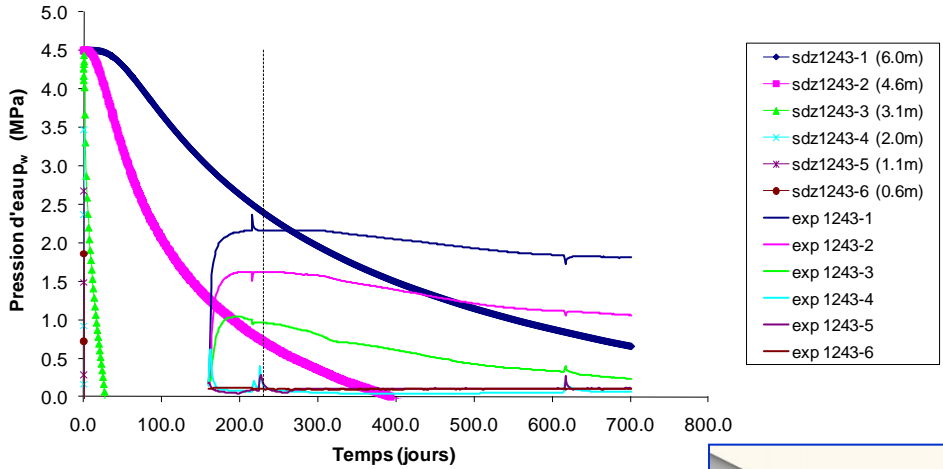


SDZ_18 - Evolution de la pression d'eau p_w en paroi

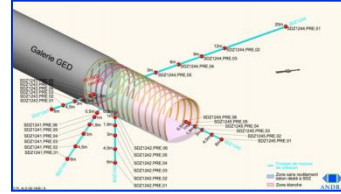


SDZ_18 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1243 (horizontal)

SDZ_18 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1244 (horizontal)



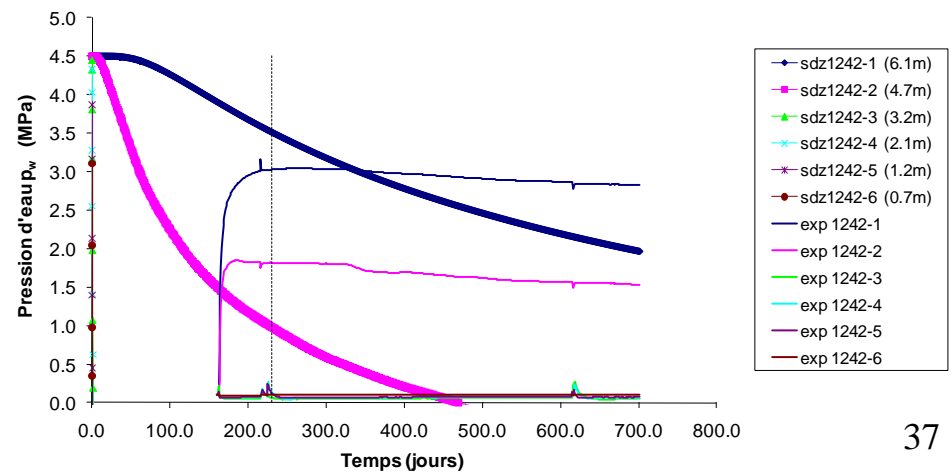
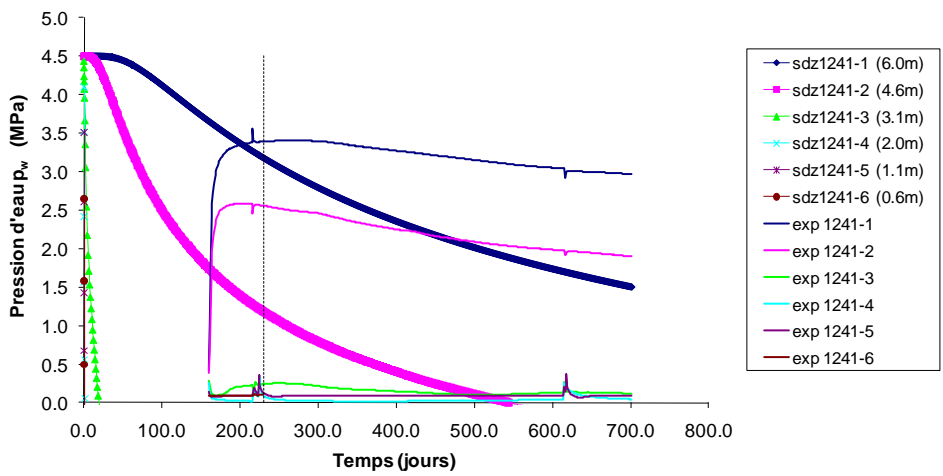
Cas 5



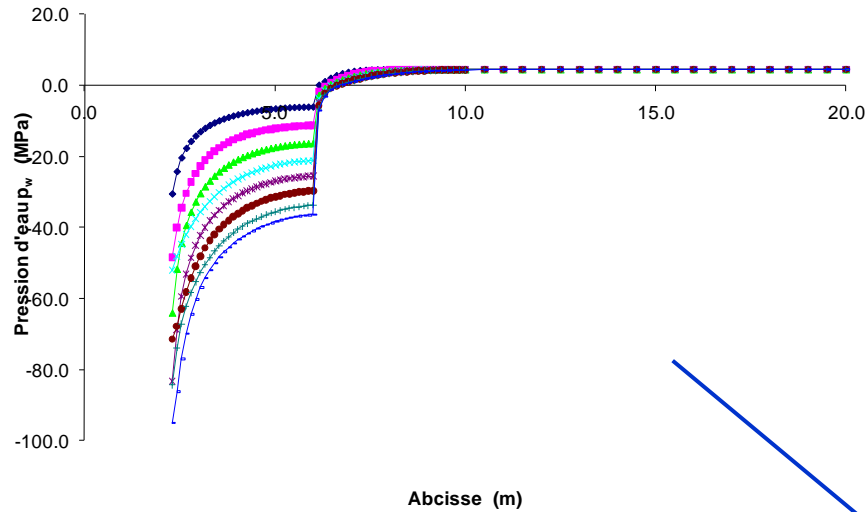
→ P_w globalement trop basses
Pentes pas du tout respectées

SDZ_18 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1241 (45° descendant)

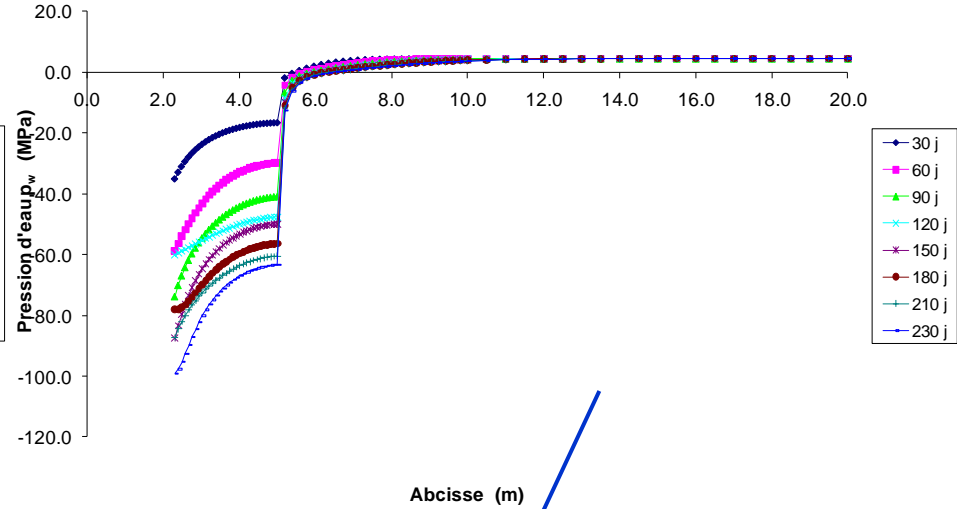
SDZ_18 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1242 (vertical descendant)



SDZ_18 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe 1-1

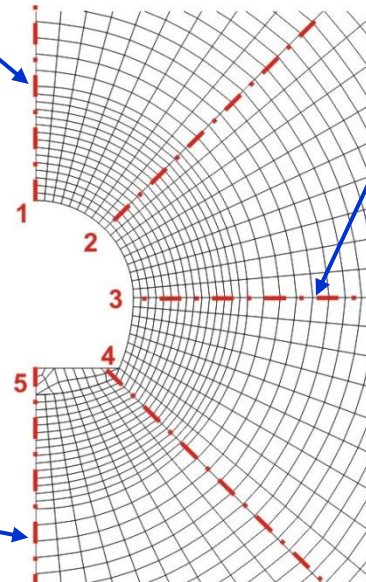
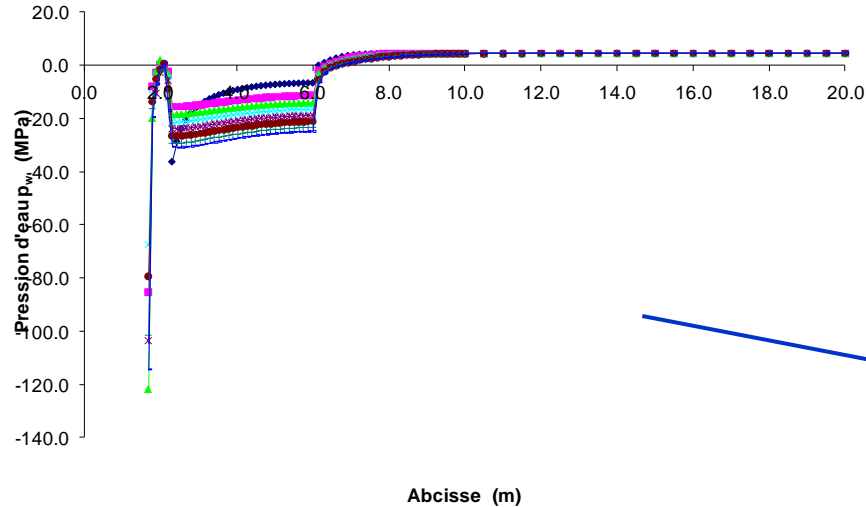


SDZ_18 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe 3-3



Cas 5

SDZ_18 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe 5-5



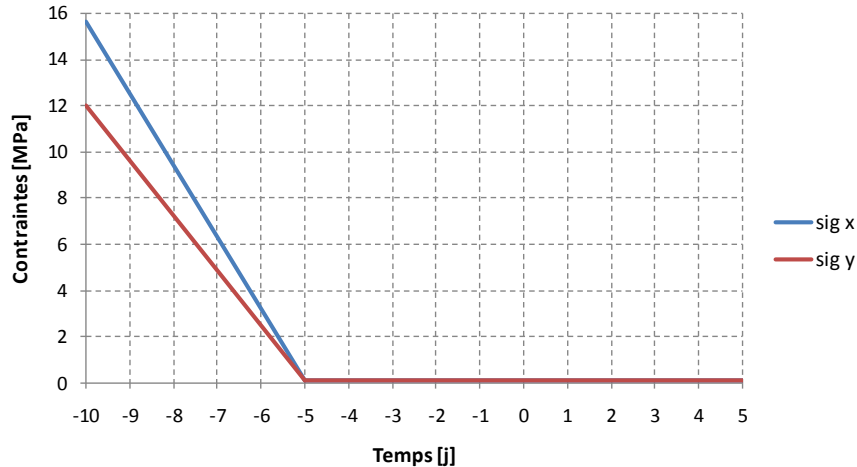
- Principes de l'expérience in-situ
- Modélisations numériques envisagées
- Paramètres des modèles constitutifs utilisés
- 2D état plan écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 2D état plan hydromécanique: - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Etat axisymétrique : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 3D écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Conclusions et perspectives

Modélisation 2D état plan Couplage hydromécanique

- Identique en écoulement pur :
géométrie, matériaux, P_w initiale, P_w fixée aux limites lointaines, P_w dans le radier, zone étanchée non étudiée, évolution de T et H_r , P_w imposée dans la galerie, éléments FMIVP.
- Contraintes initiales anisotropes :
 $\sigma_{hor,0} = 15.6$ [MPa] ; $\sigma_{vert,0} = 12$ [MPa] ; contraintes totales en compression.
- Conditions aux limites :
Contraintes initiales imposées aux limites lointaines (200m de la galerie).

Creusement

Evolution des contraintes sur la paroi pour simuler le creusement σ_x et σ_y [MPa]



Modélisation du creusement de -10 jours à 0 jours. Le reste de la chronologie est inchangé.

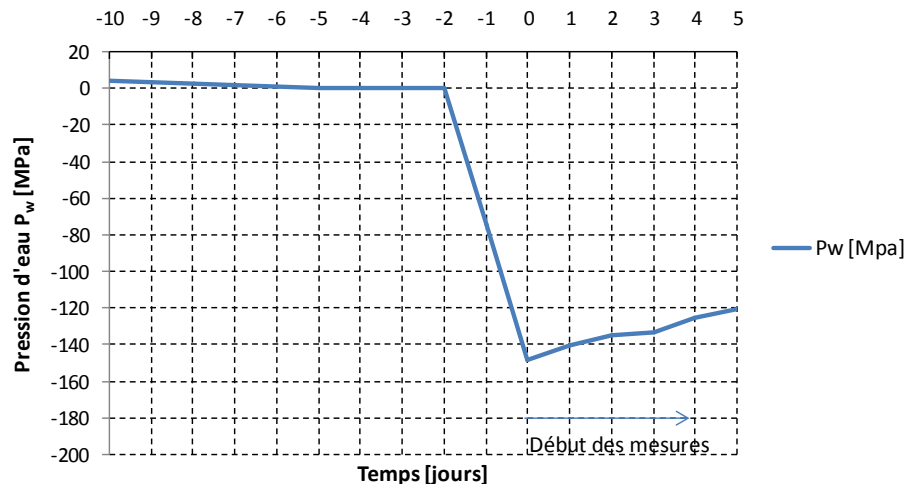
-10j à -5j Creusement SDZ
Diminution des contraintes initiale et de P_w à 0.1 [MPa], contraintes fixées ensuite

-5j à -2j Palier $P_w=0.1$ [MPa]

-2j à 0j Mise en route de la ventilation
Diminution de P_w à la 1^{ère} valeur mesurée

0j à 701j Simulation, mesures de P_w

Evolution de la pression d'eau dans la galerie P_w (noeud d'environnement) [MPa]



- Principes de l'expérience in-situ
- Modélisations numériques envisagées
- Paramètres des modèles constitutifs utilisés
- 2D état plan écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 2D état plan hydromécanique: - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Etat axisymétrique : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 3D écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Conclusions et perspectives

Cas 4

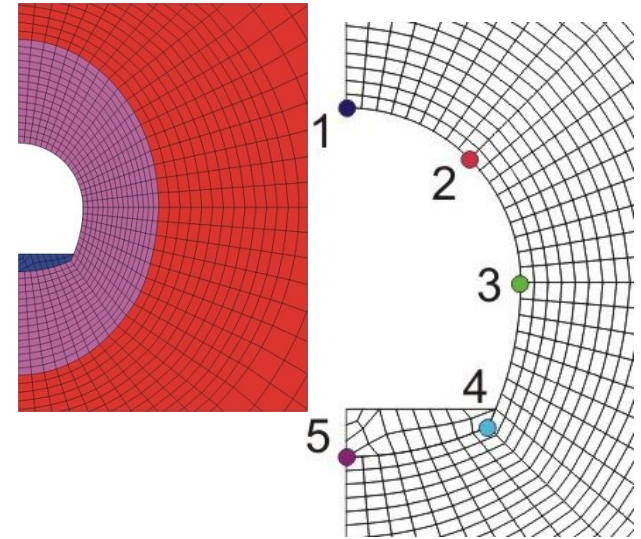
Suintement : $K = 10^{-10} \text{ s.kg}^{-1}$

Evaporation : $\alpha = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

$k_{\text{ani}} = 4 / 1,33 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ de 2,3 à 5,0 / 6,0 m

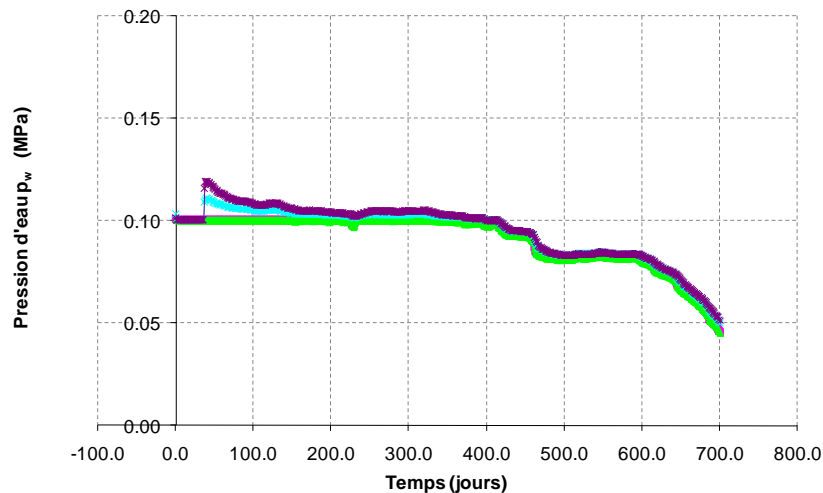
(EDZ elliptique = 2,7 / 3,7 m)

$k_{\text{ani}} = 4 / 1,33 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ de 5,0 à 200 m



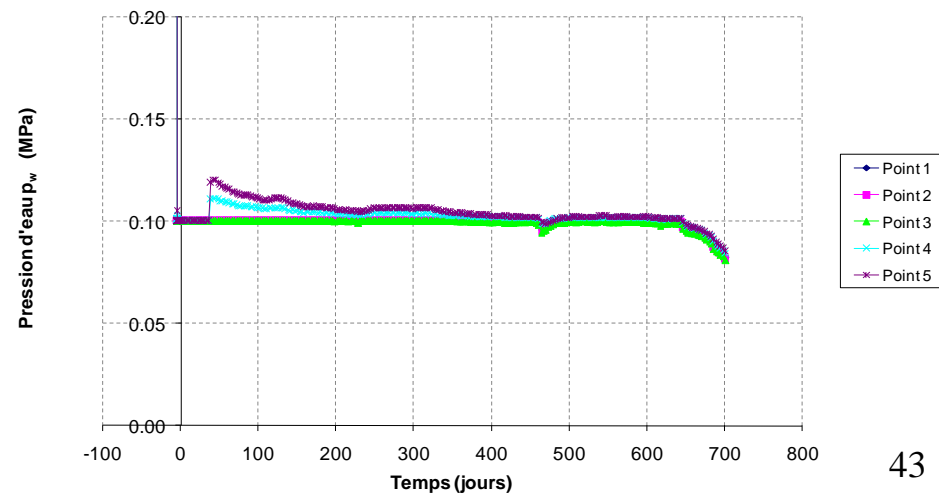
Ecoulement pur

SDZ_16 - Evolution de la pression d'eau p_w en paroi

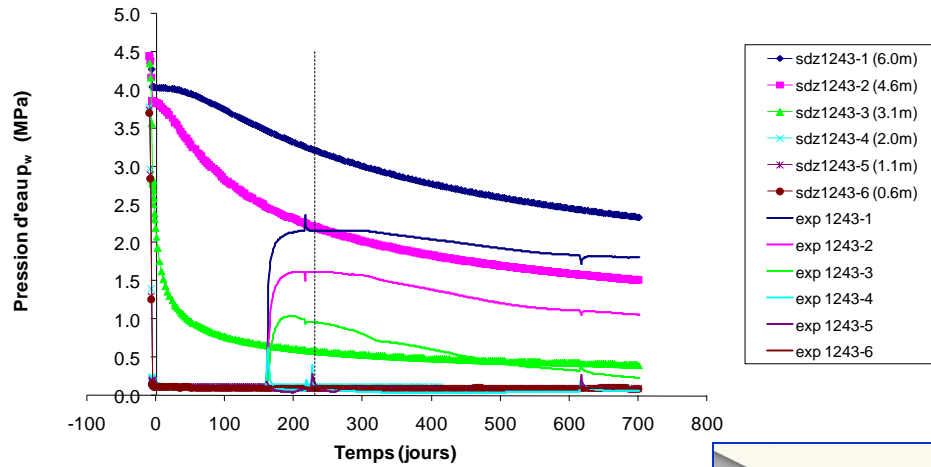


Couplage hydromécanique

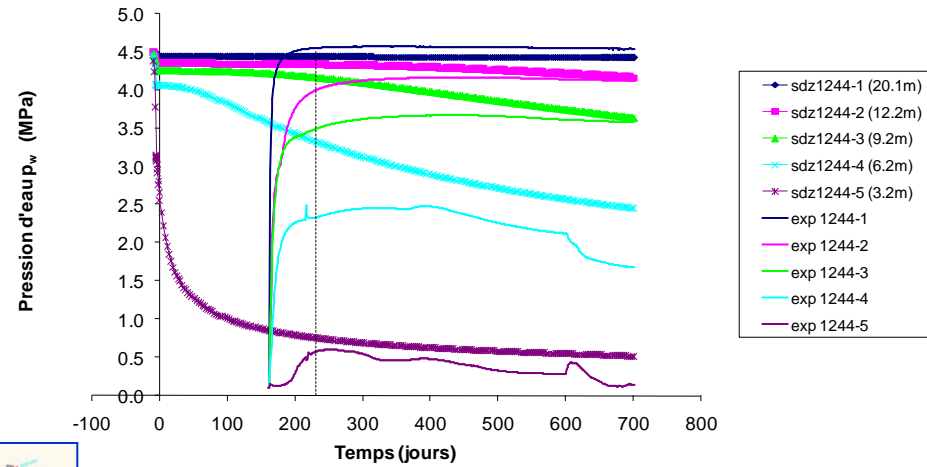
SDZ_104 - Evolution de la pression d'eau p_w en paroi



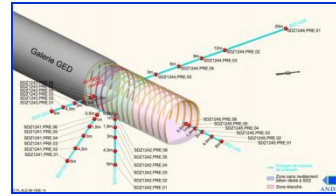
SDZ_104 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1243 (horizontal)



SDZ_104 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1244 (horizontal)

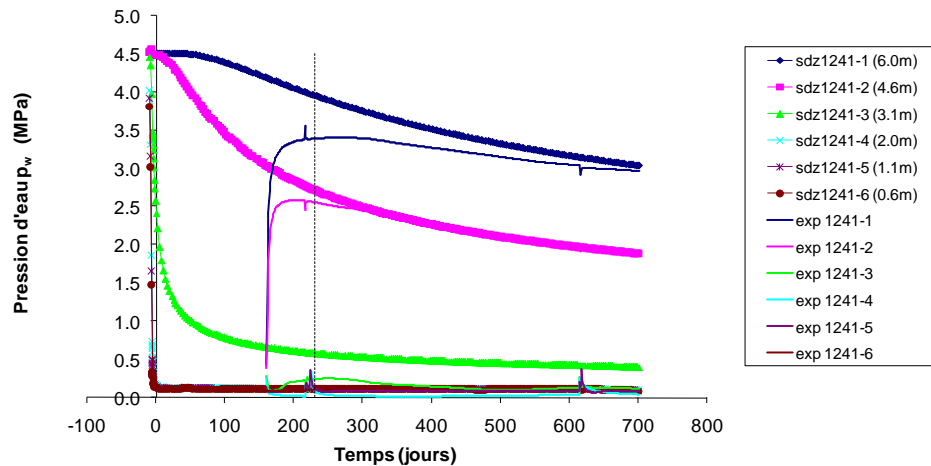


Cas 4

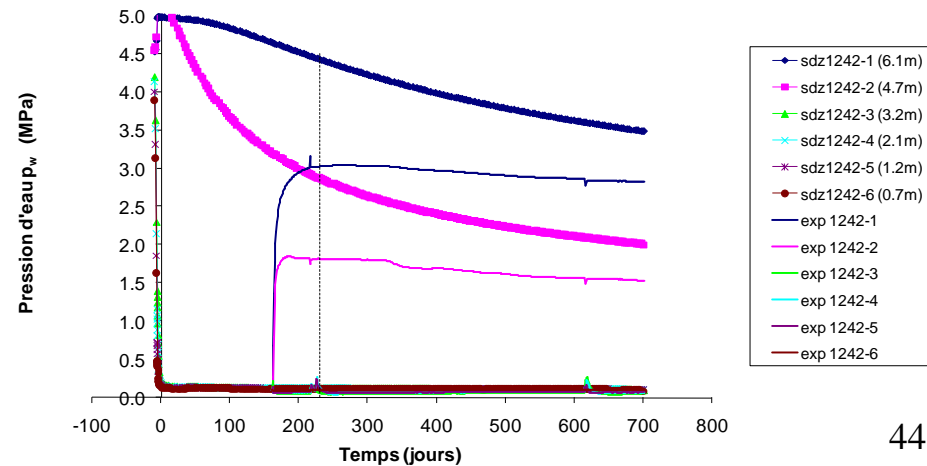


→ P_w +/- correcte en zone lointaine
 P_w +/- correcte à long terme, horizontalement
 P_w +/- correcte à long terme, verticalement

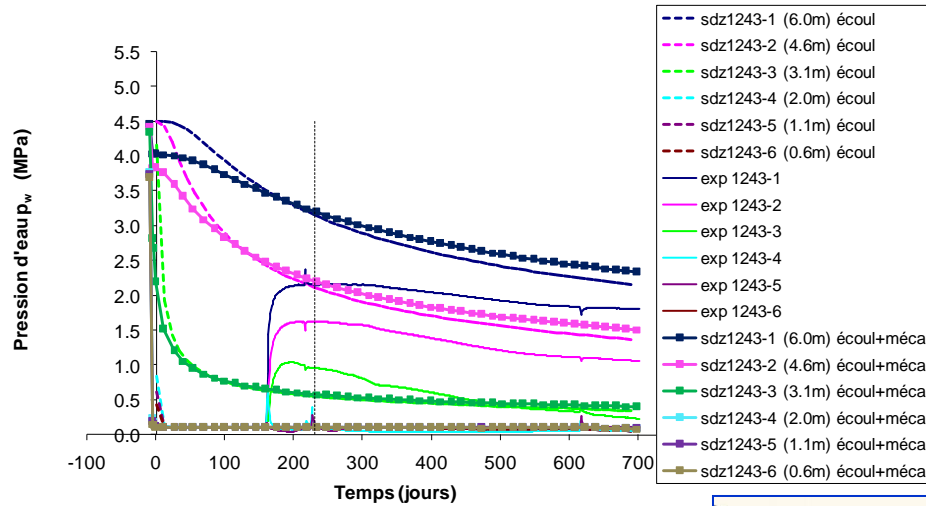
SDZ_104 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1241 (45° descendant)



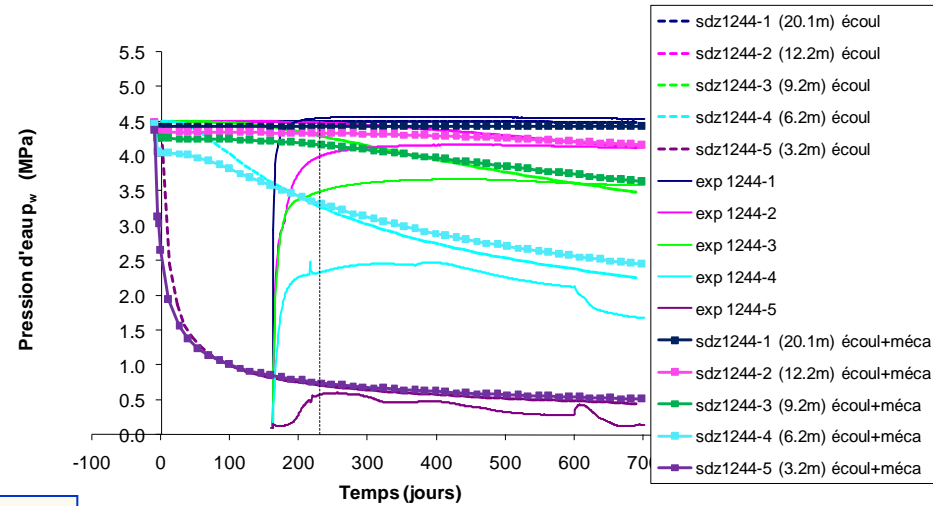
SDZ_104 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1242 (vertical descendant)



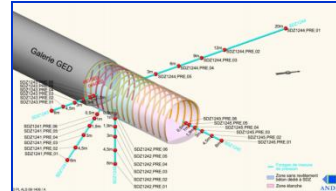
Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1243 (horizontal)



Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1244 (horizontal)

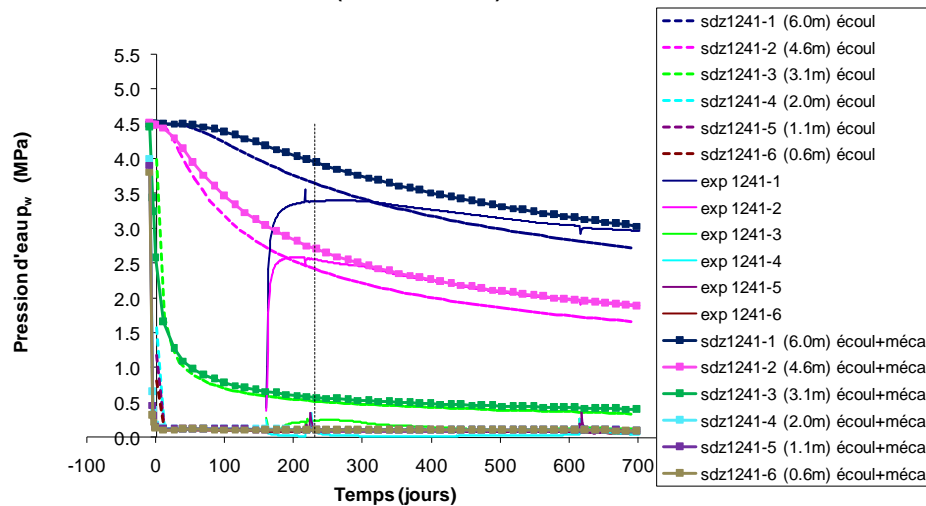


Cas 4

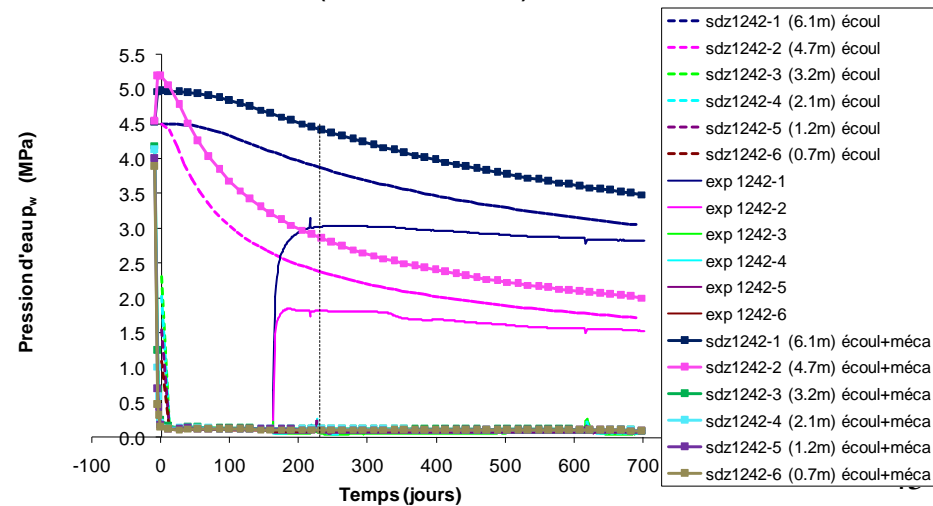


→ P_w +/- correcte en zone lointaine
 P_w +/- correcte à long terme, horizontalement
 P_w +/- correcte à long terme, verticalement

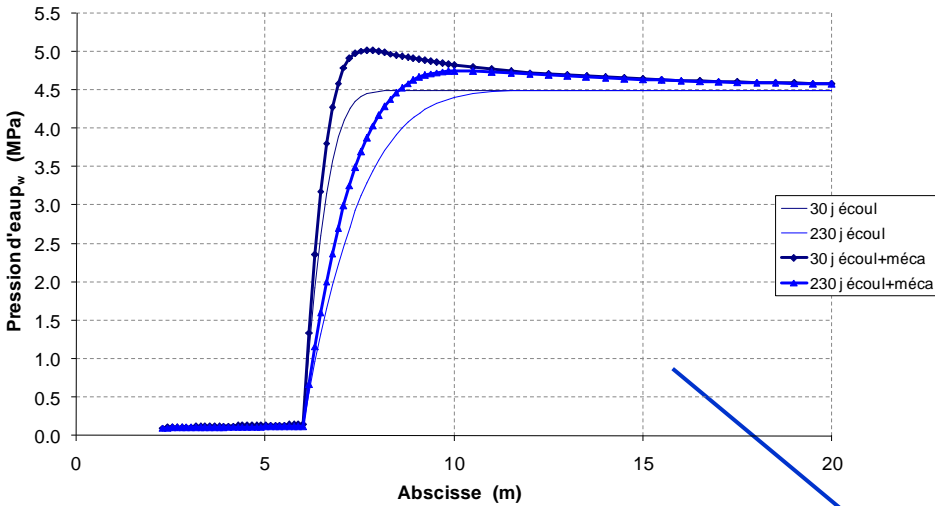
Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1241 (45° descendant)



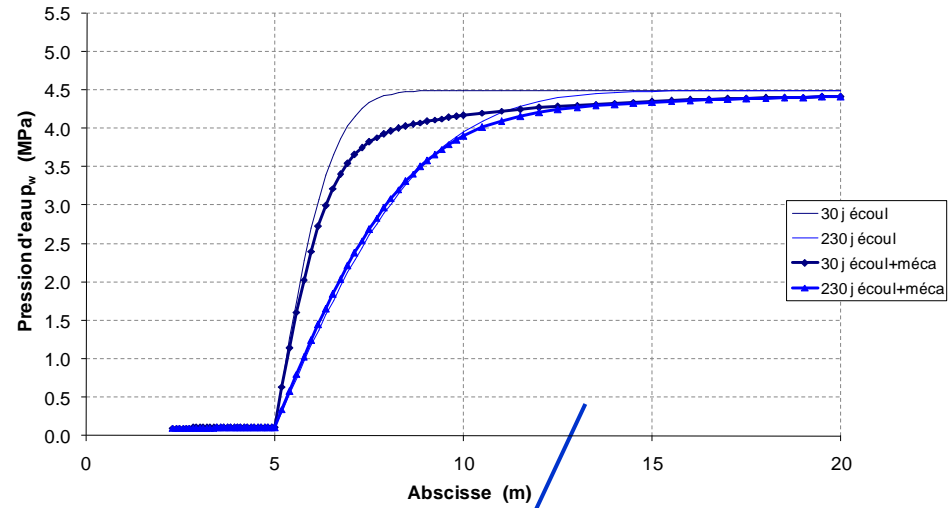
Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1242 (vertical descendant)



Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe 1-1

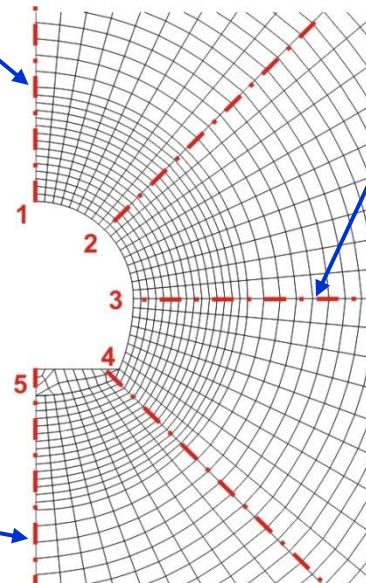
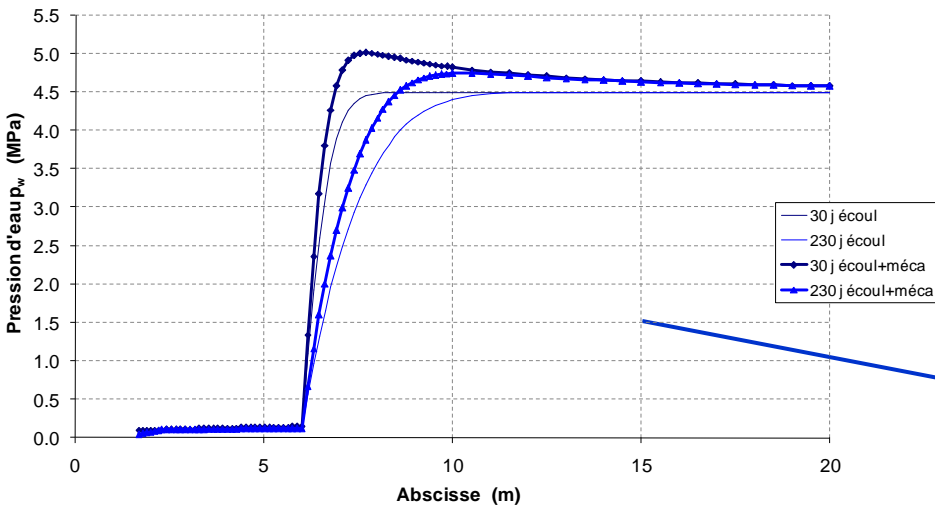


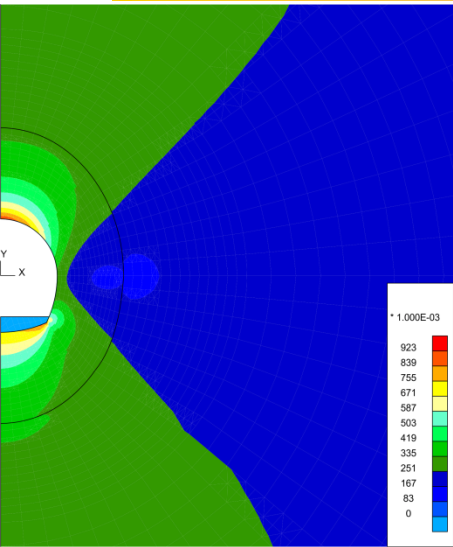
Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe 3-3



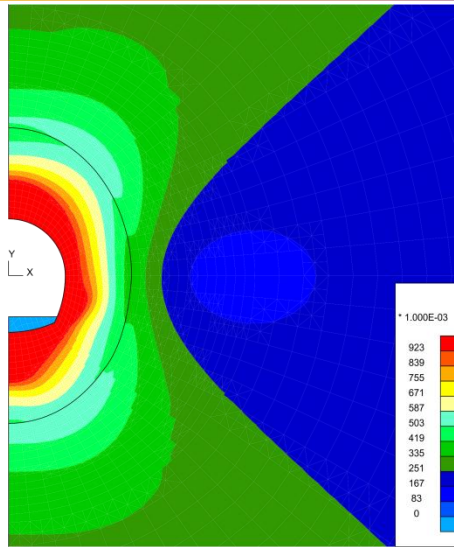
Cas 4

Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe 5-5

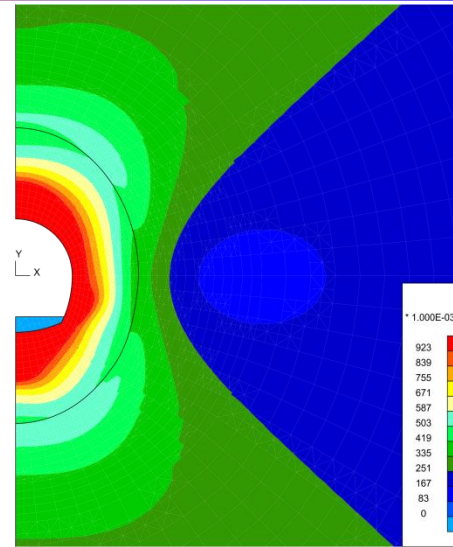




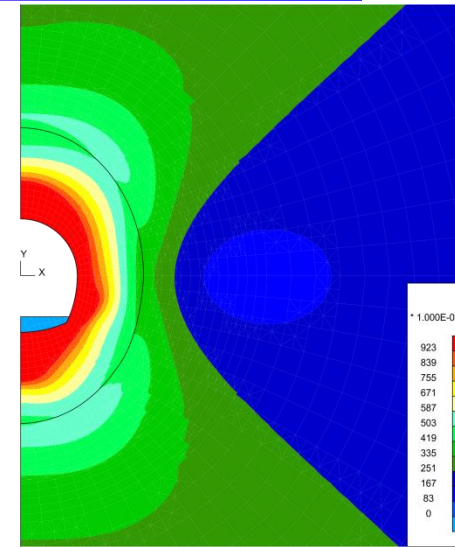
Indicateur de plasticité - t = -8 jours
-8j - creusement



Indicateur de plasticité - t = -5 jours
-5j - creusement

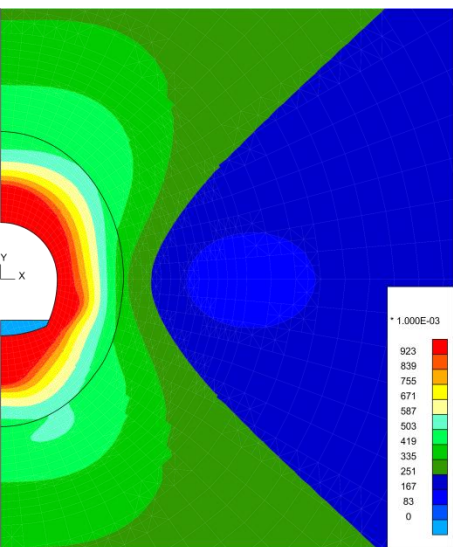


Indicateur de plasticité - t = -2 jours
-2j - creusement

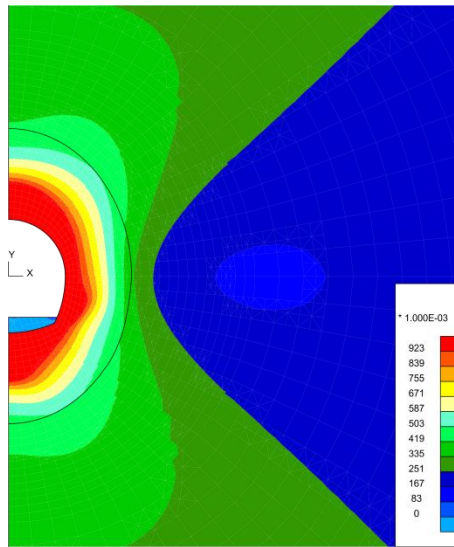


Indicateur de plasticité - t = 0 jours
0j - fin du creusement

Cas 4



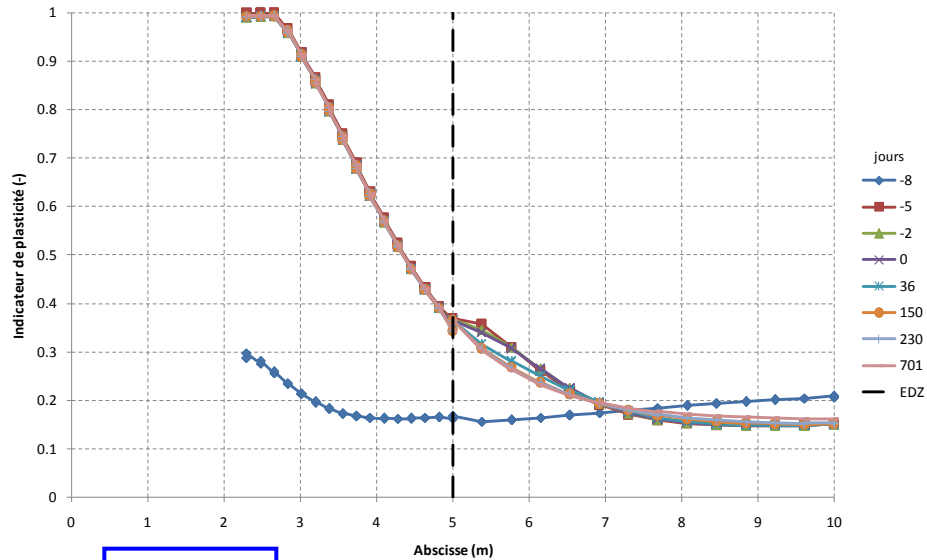
Indicateur de plasticité - t = 36 jours
36j - mise en place du radier



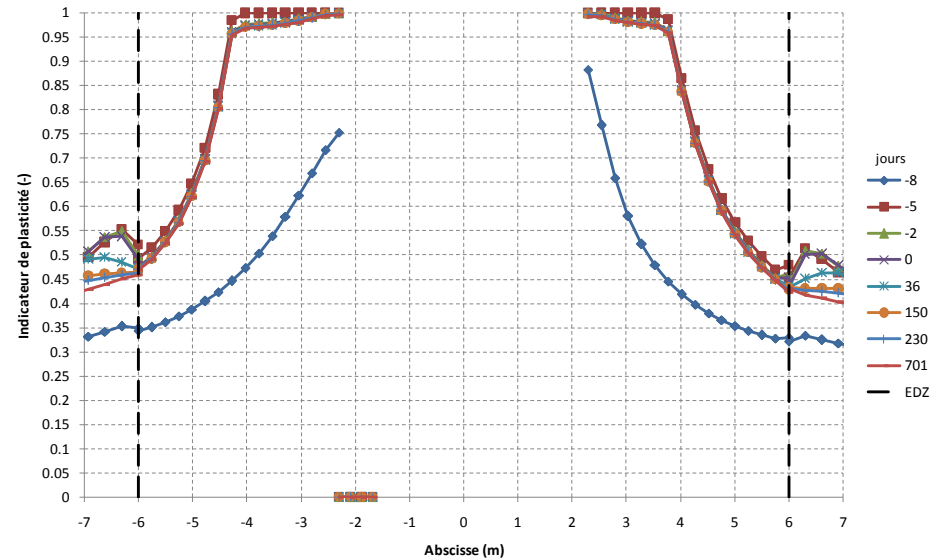
Indicateur de plasticité - t = 701 jours
701j - fin de la simulation

Evolution de l'indicateur de plasticité concentrée pendant la phase de creusement (-10 à -5j).

Evolution de l'indicateur de plasticité dans la direction horizontale



Evolution de l'indicateur de plasticité dans la direction verticale

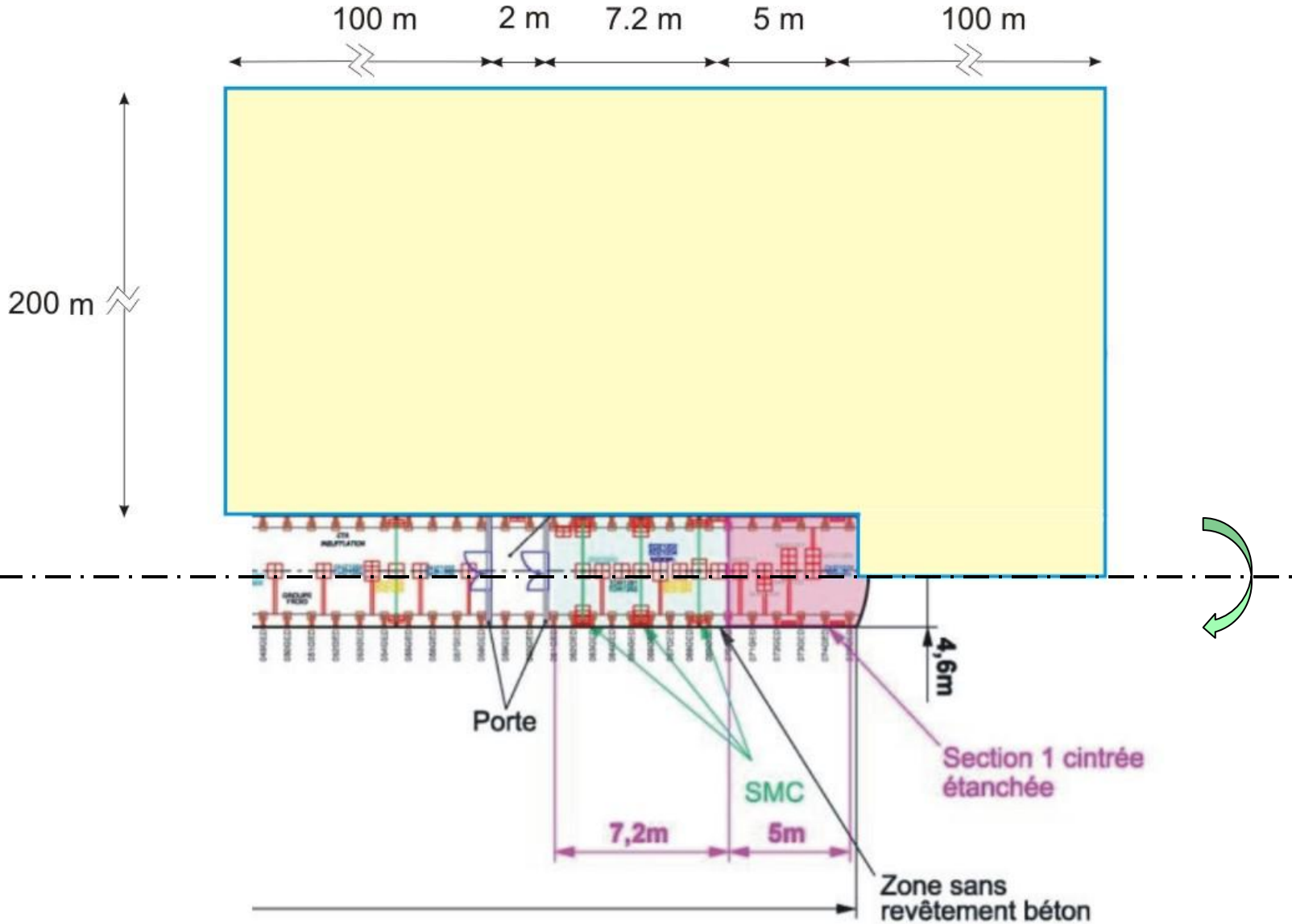


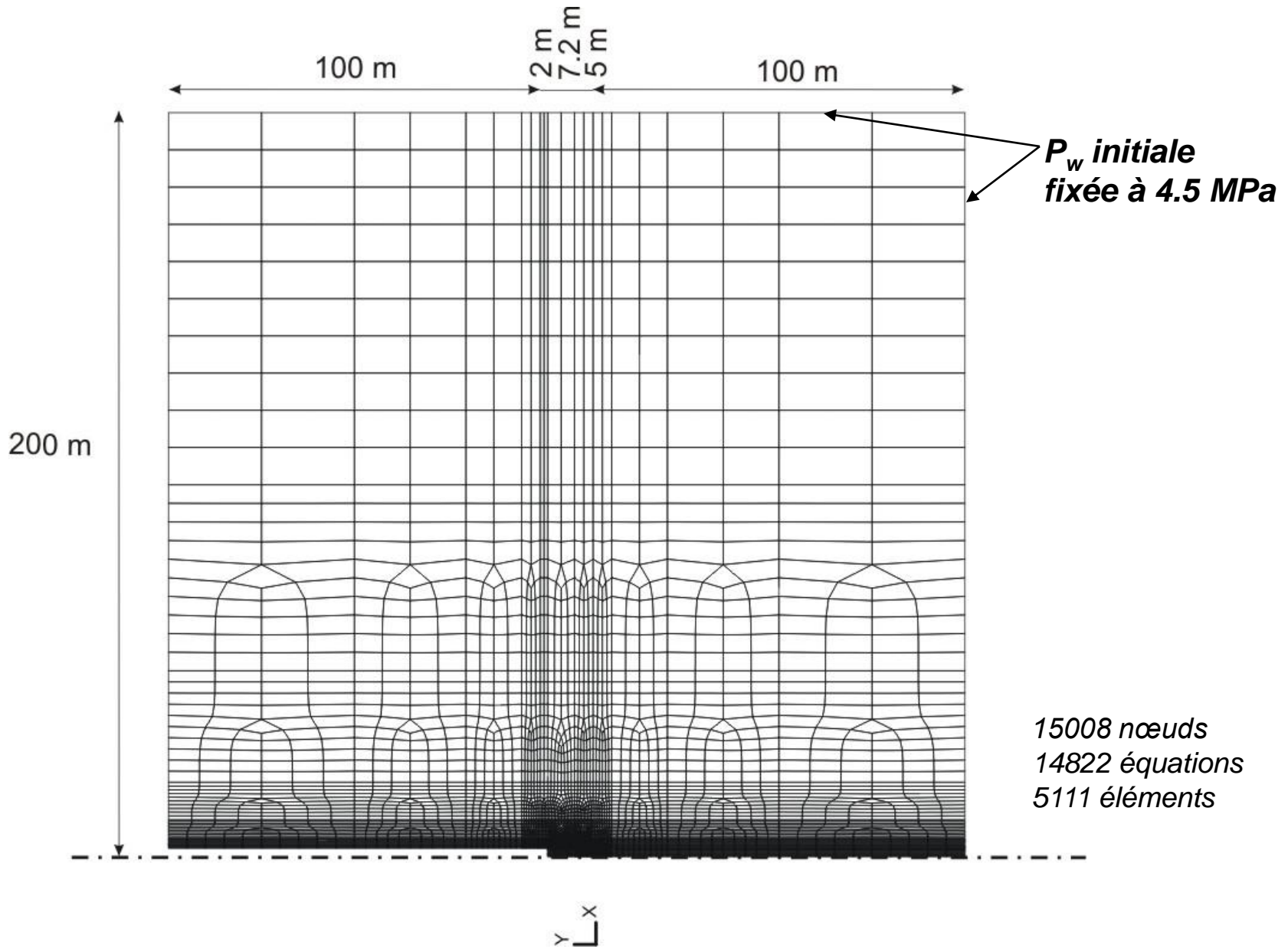
Cas 4

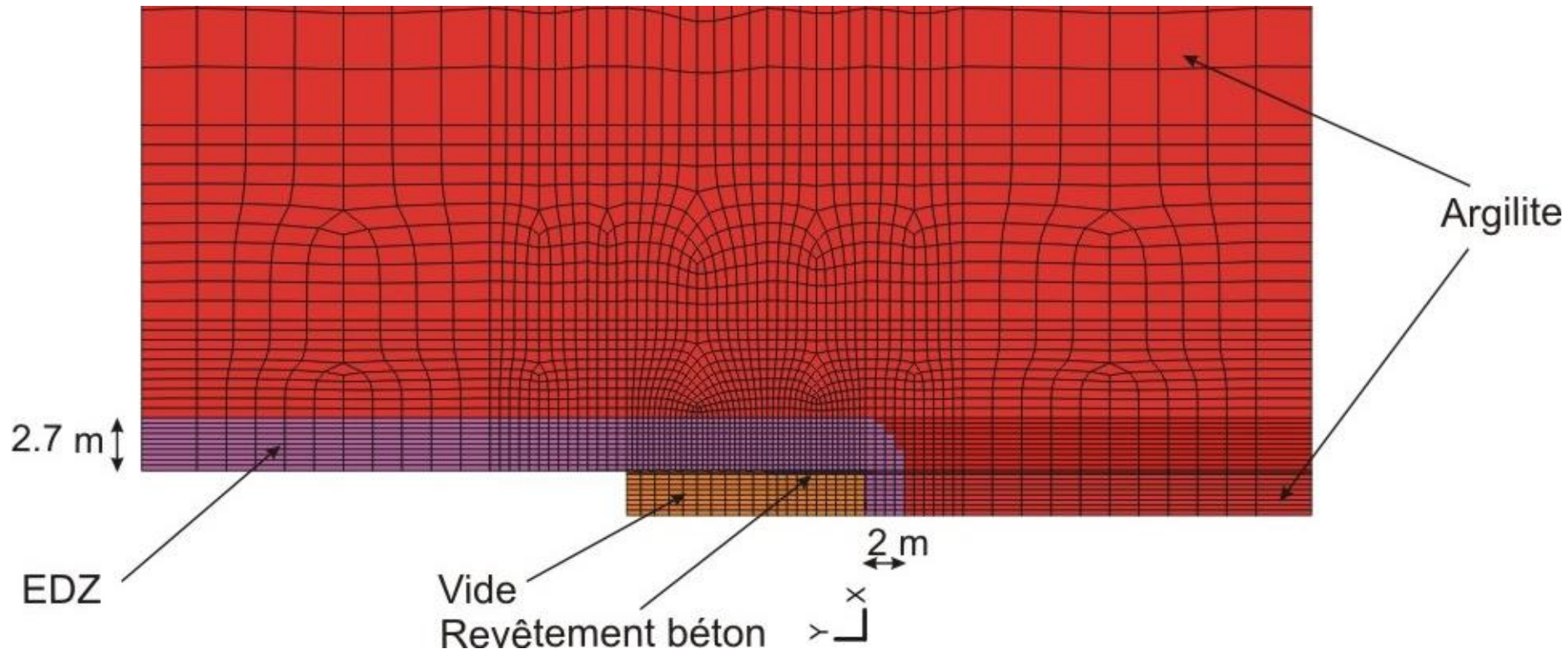
Orientation	Zone plastifiée (indicateur de plasticité = 1)	EDZ Fractures mixtes	EDZ Perméabilité très perturbée
	Epaisseur [m]	Epaisseur [m]	Epaisseur [m]
Horizontal	0.4	0.5	0.5
Vertical supérieur	1.3	1.7	1.1
Vertical inférieur	1.7	2.0	1.1

Bonne correspondance avec les mesures d'extension de EDZ.

- Principes de l'expérience in-situ
- Modélisations numériques envisagées
- Paramètres des modèles constitutifs utilisés
- 2D état plan écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 2D état plan hydromécanique: - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Etat axisymétrique : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 3D écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Conclusions et perspectives



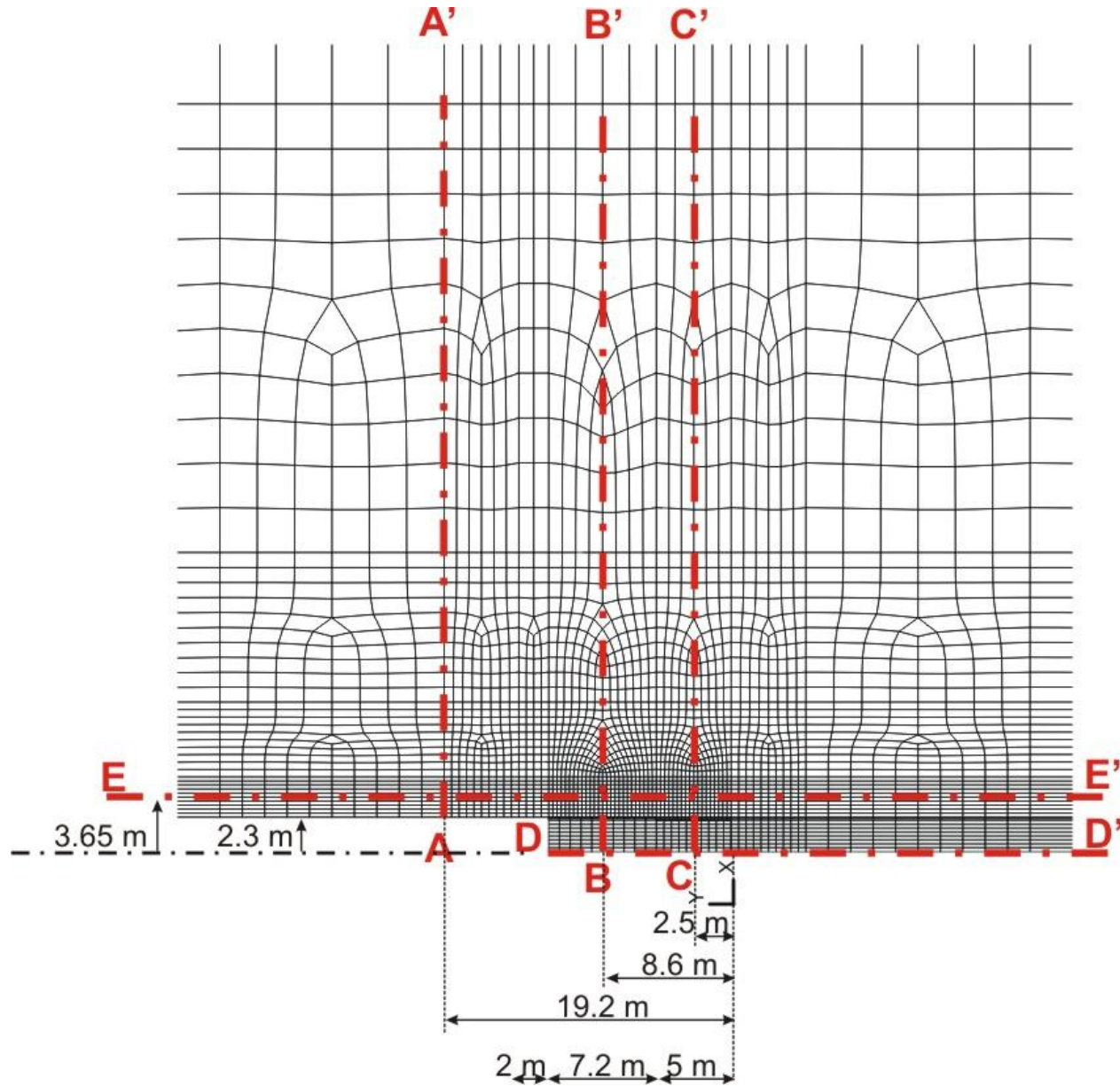


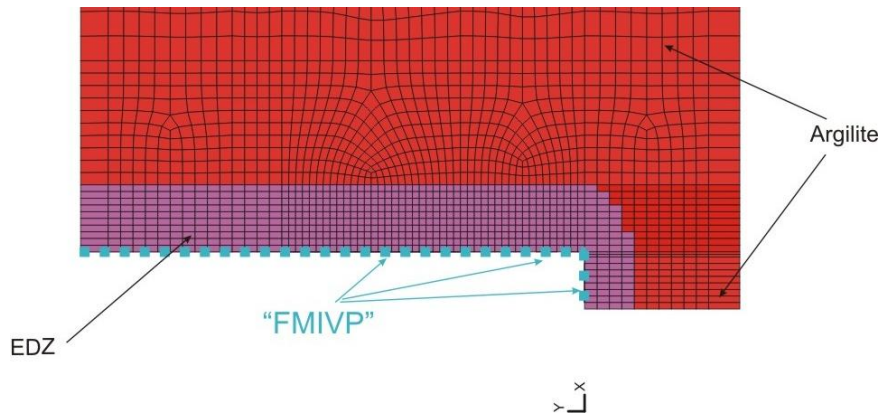


$$k_{iso} \text{ argilite} : 4 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$$

$$k_{iso} \text{ EDZ} : 4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$$

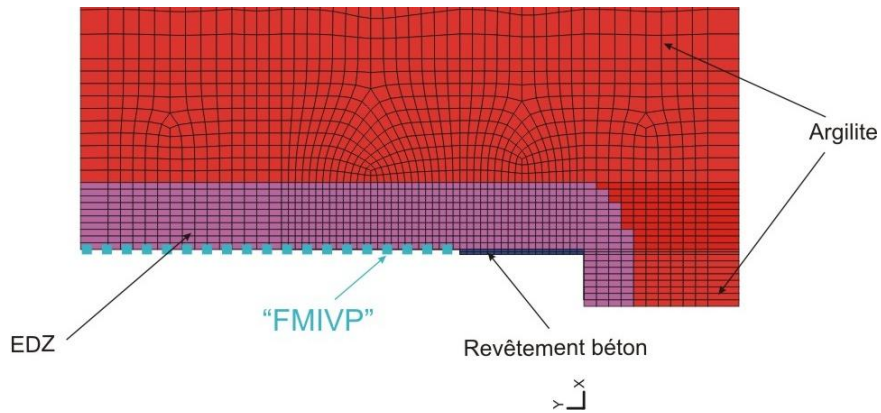
$$K_{iso} \text{ béton} : 1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$$



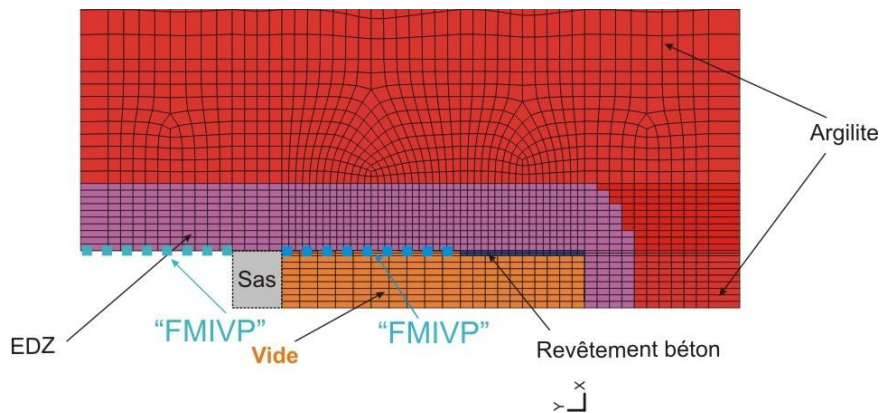


Phasage :

De 0 à 12 jours



De 12 à 230 jours



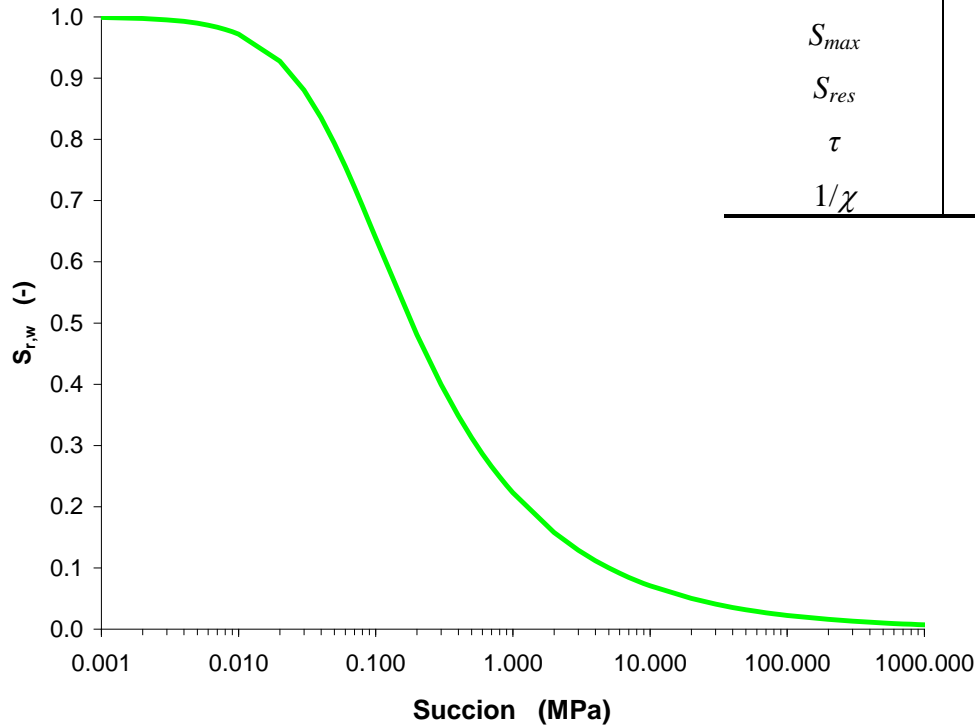
De 230 à 701 jours

Mise en place du vide à $p_w = -110$ MPa (Hr \approx 45%)

Paramètres hydrauliques du vide

	Nom	Valeur	Unité
k	Perméabilité intrinsèque	10^{-12}	m^2
ϕ	Porosité	1	-
m	Coefficient de Van Genuchten	0.33333	-
n	Coefficient de Van Genuchten	1.5	-
P_r	Paramètre de Van Genuchten	0.05	MPa
S_{max}	Saturation maximum	1	-
S_{res}	Saturation résiduelle	0	-
τ	Tortuosité	1	-
$1/\chi$	Compressibilité	$5 \cdot 10^{-10}$	Pa^{-1}

Courbe de rétention



$$S_{rw} = S_{res} + (S_{max} - S_{res}) \left(1 + \left(\frac{P_c}{P_r} \right)^n \right)^{\frac{1}{n}-1}$$

$$n = 1.5$$

$$P_r = 0.05 MPa$$

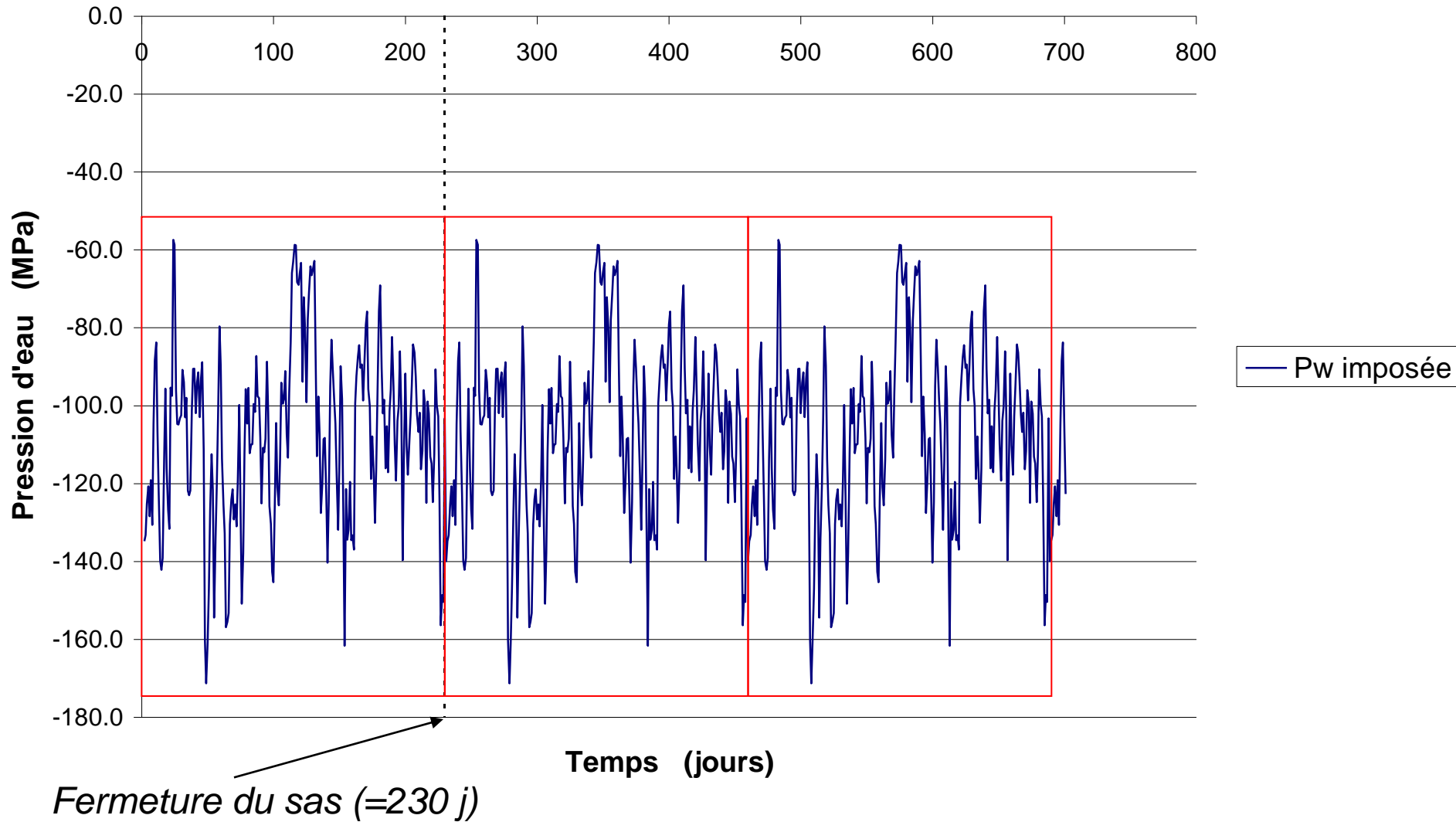
$$S_{res} = 0$$

$$S_{max} = 1$$

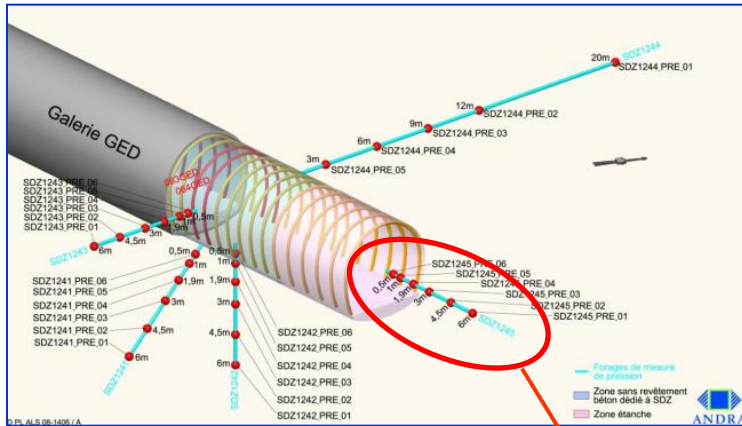
Perméabilité à l'eau

Courbe de perméabilité relative à l'eau non utilisée : perméabilité intrinsèque indépendante de la saturation.

Evolution de la pression d'eau imposée en galerie GED, hors zone SDZ.



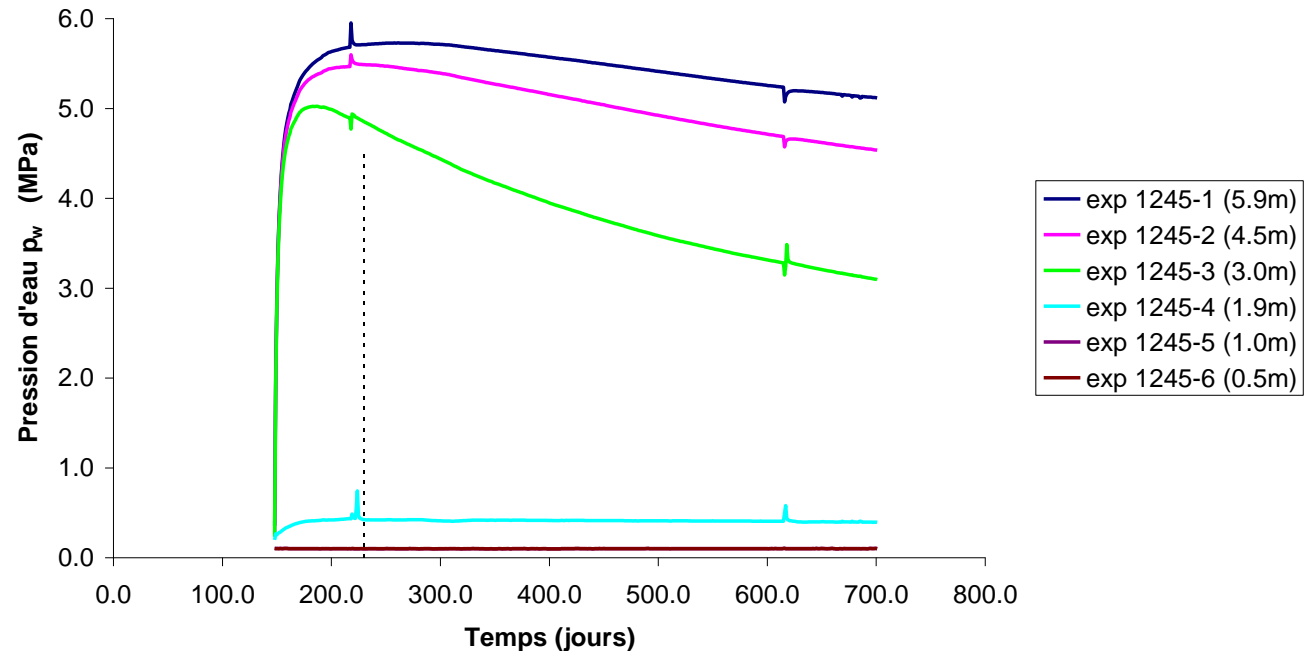
Reproduction de l'évolution fournie entre 0 et 230 jours



Longitudinalement

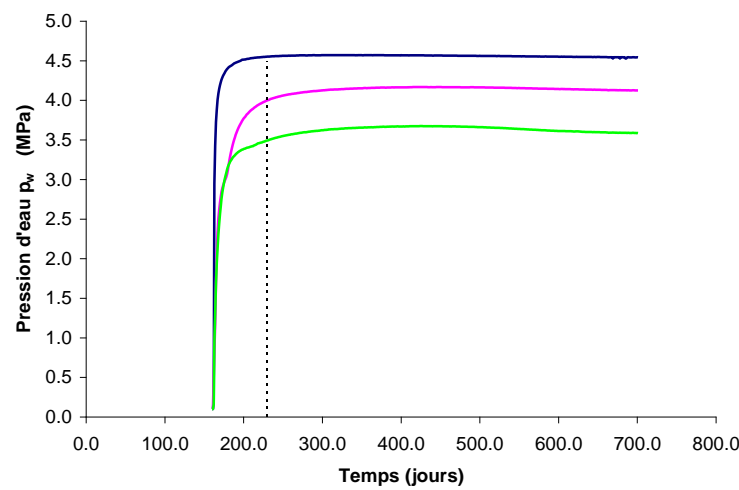
→ P_w supérieure à celle de l'argile saine

Expérimental - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1245 (horizontal au front de la galerie)

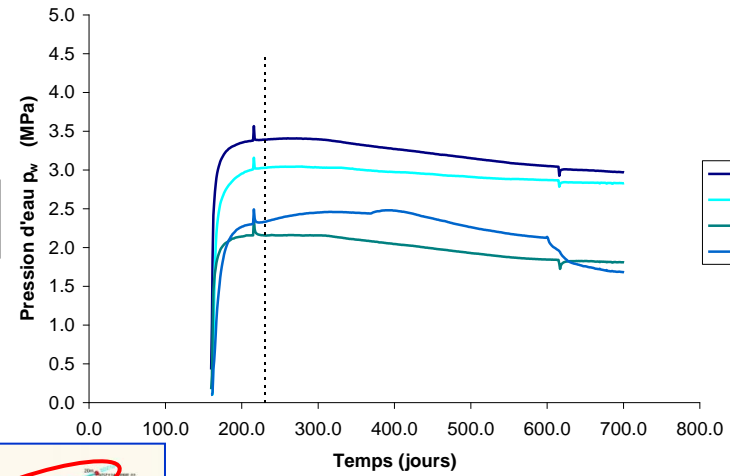


Expérimental - Evolution de la pression d'eau p_w à 20.1 m, 12.2 m et 9.2 m de la paroi

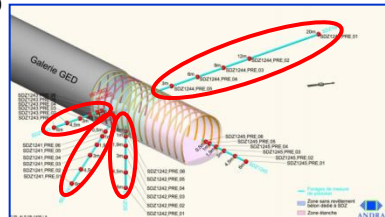
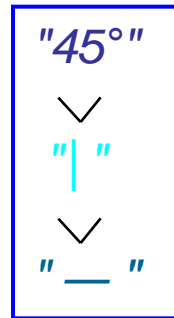
Expérimental - Evolution de la pression d'eau p_w à 6.0-6.2 m de la paroi



- exp 1244-1 (20.1m)
- exp 1244-2 (12.2m)
- exp 1244-3 (9.2m)



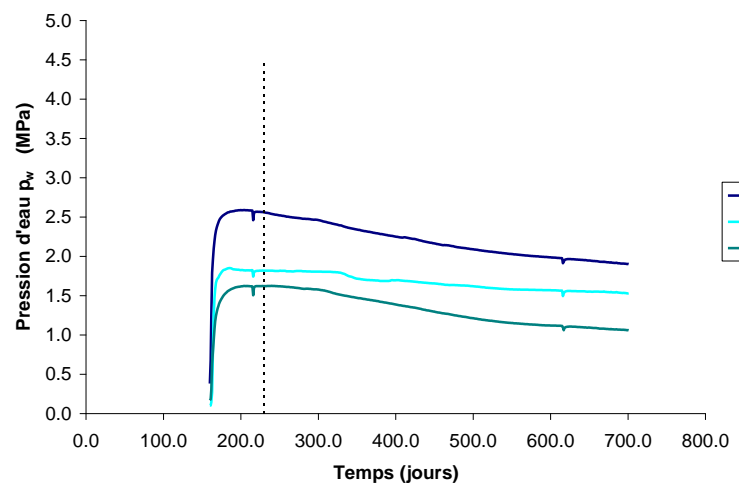
- exp 1241-1 (6.0m) 45°
- exp 1242-1 (6.1m) |
- exp 1243-1 (6.0m) —
- exp 1244-4 (6.2m) —



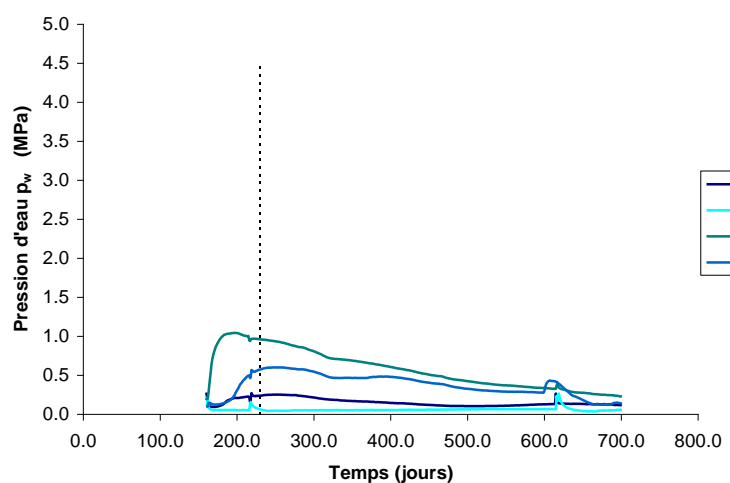
Radialement

Expérimental - Evolution de la pression d'eau p_w à 4.6-4.7 m de la paroi

Expérimental - Evolution de la pression d'eau p_w à 3.1-3.2 m de la paroi

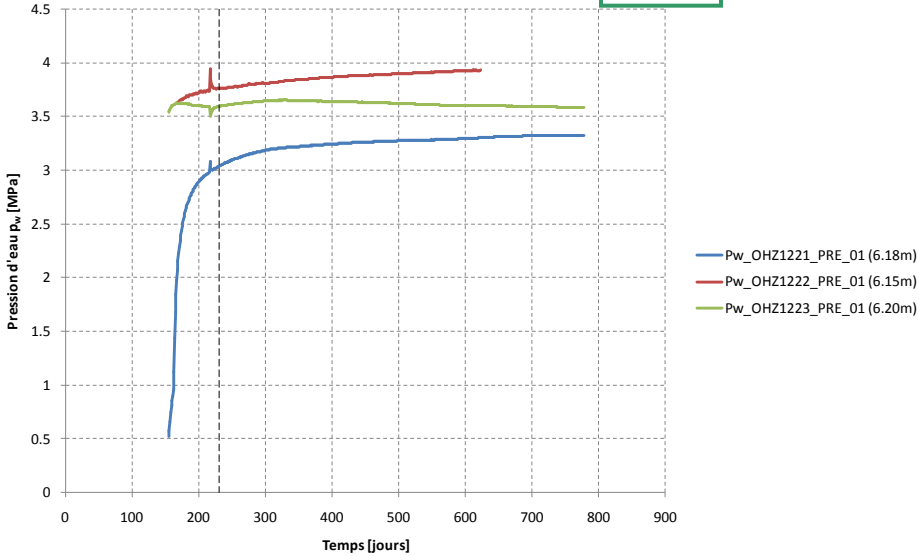


- exp 1241-2 (4.6m) 45°
- exp 1242-2 (4.7m) |
- exp 1243-2 (4.6m) —

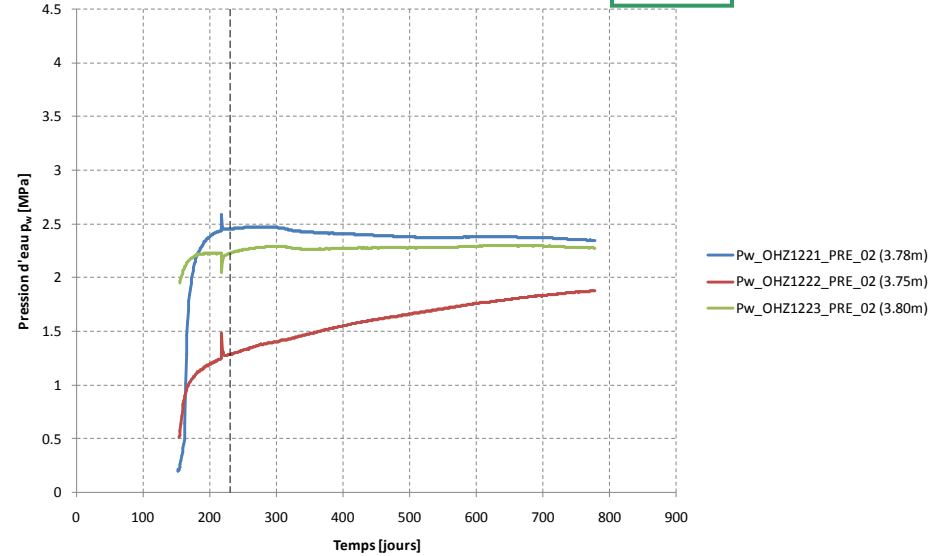


- exp 1241-3 (3.1m) 45°
- exp 1242-3 (3.2m) |
- exp 1243-3 (3.1m) —
- exp 1244-5 (3.2m) —

Evolution de la pression d'eau dans les forages OHZ à 6.15-6.20m de la paroi

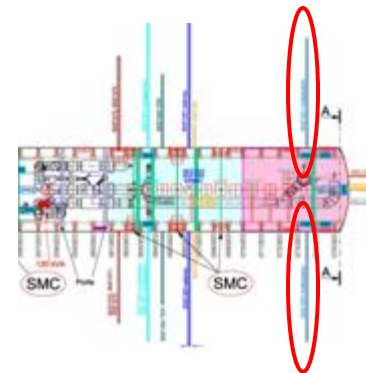
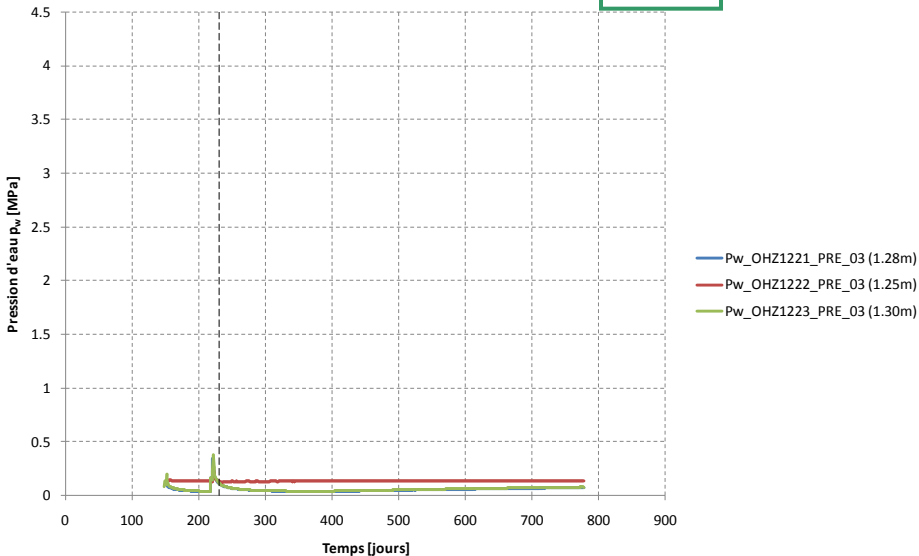


Evolution de la pression d'eau dans les forages OHZ à 3.75-3.80m de la paroi



Radialement – Zone étanchée

Evolution de la pression d'eau dans les forages OHZ à 1.25-1.30m de la paroi



Section située à 1.5m du fond
 OHZ1221 : horizontal
 OHZ1222 : vertical montant
 OHZ1223 : horizontal

- Principes de l'expérience in-situ
- Modélisations numériques envisagées
- Paramètres des modèles constitutifs utilisés
- 2D état plan écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 2D état plan hydromécanique: - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Etat axisymétrique : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 3D écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Conclusions et perspectives

Résultats numériques en état axisymétrique :

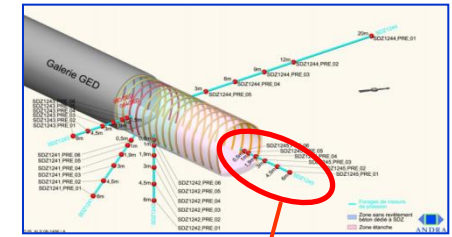
1. Calibrage du coefficient de transfert de masse pour l'évaporation
2. Influence du revêtement en galerie GED
3. Humidité relative dans le vide de la zone SDZ
4. Cycle de saturation/désaturation dans la zone SDZ

Cas 1

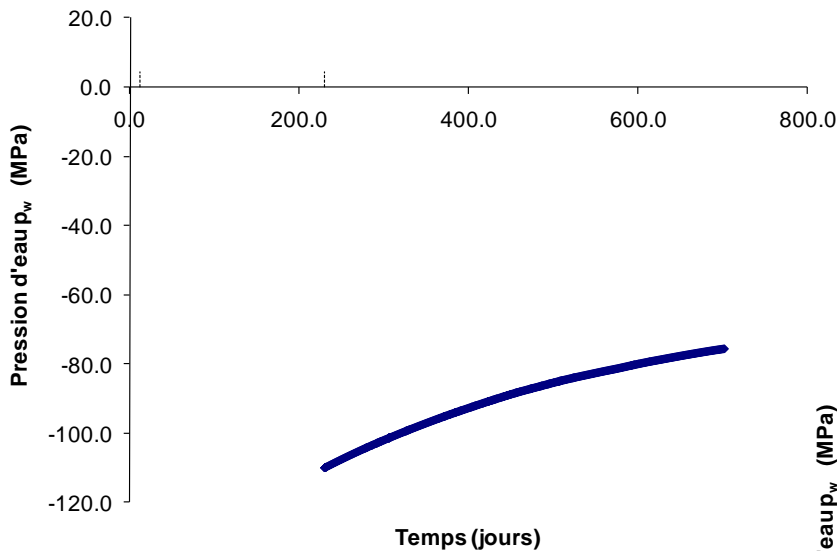
Suintement : $K = 10^{-10} \text{ s.kg}^{-1}$

Evaporation GED : $\alpha = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

Evaporation SDZ : $\alpha = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

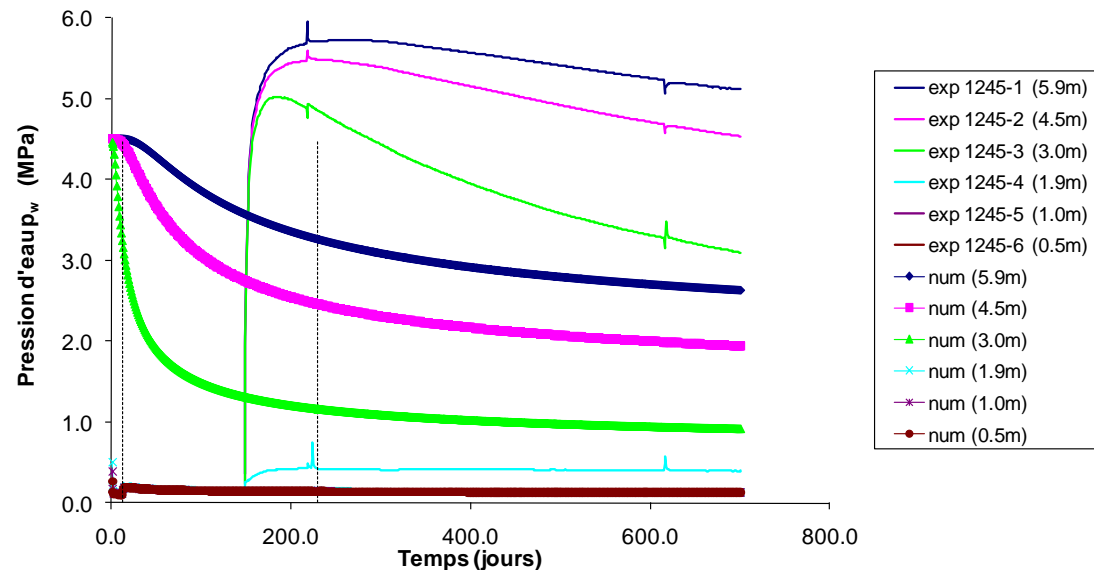


SDZ_07 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w au centre du vide (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2\text{m}$)

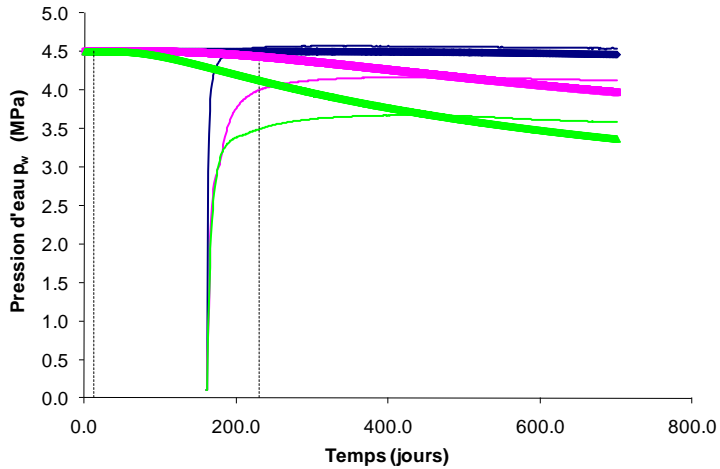


Longitudinalement

SDZ_07 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1245 (horizontal au front de la galerie)

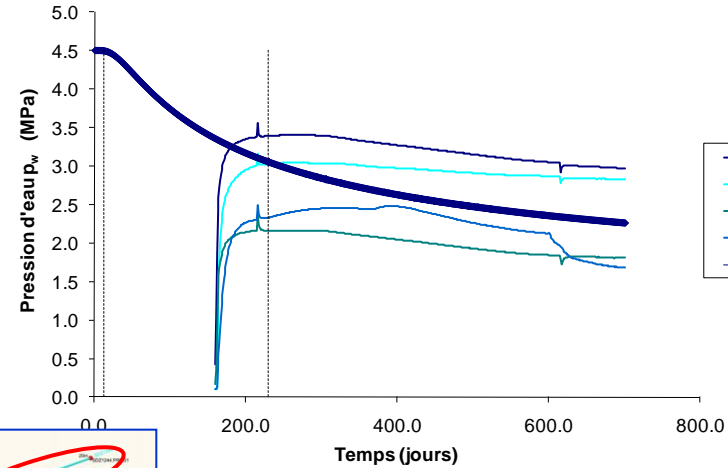


SDZ_07 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 20.1 m, 12.2 m et 9.2 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)

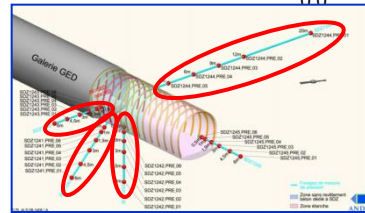


- exp 1244-1 (20.1m)
- exp 1244-2 (12.2m)
- exp 1244-3 (9.2m)
- num 20.1m
- num 12.2m
- num 9.2m

SDZ_07 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 6.0-6.2 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)



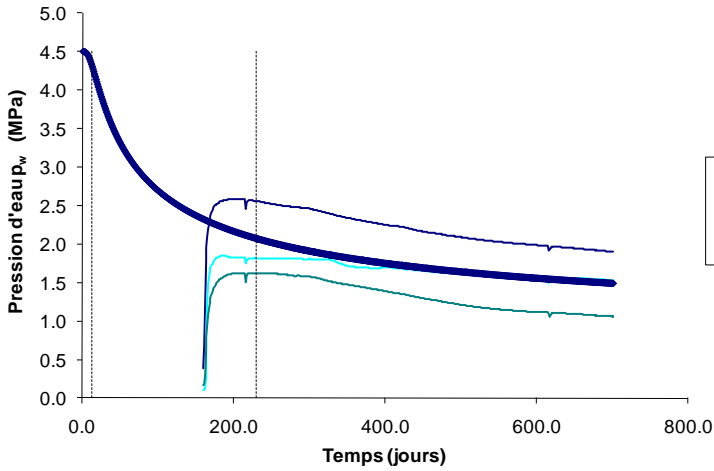
- exp 1241-1 (6.0m) 45°
- exp 1242-1 (6.1m) |
- exp 1243-1 (6.0m) —
- exp 1244-4 (6.2m) —
- num 6.1m



Radialement

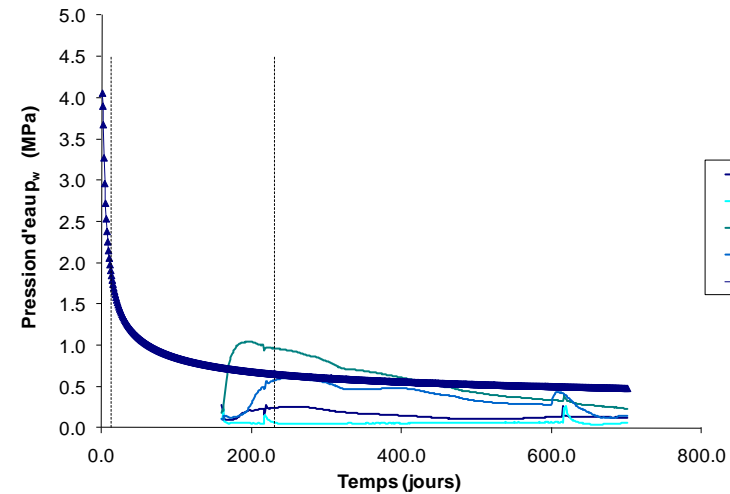
Cas 1

SDZ_07 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 4.6-4.7 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)



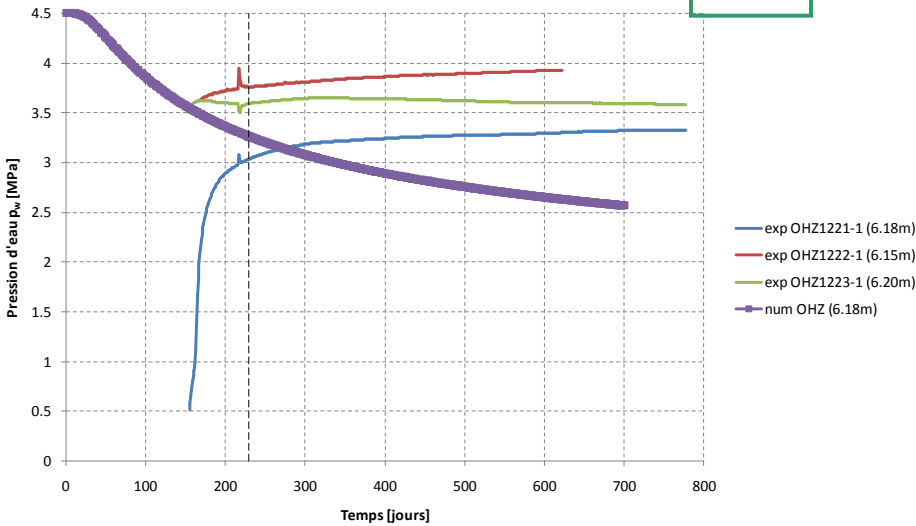
- exp 1241-2 (4.6m) 45°
- exp 1242-2 (4.7m) |
- exp 1243-2 (4.6m) —
- num 4.65m

SDZ_07 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 3.1-3.2 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)

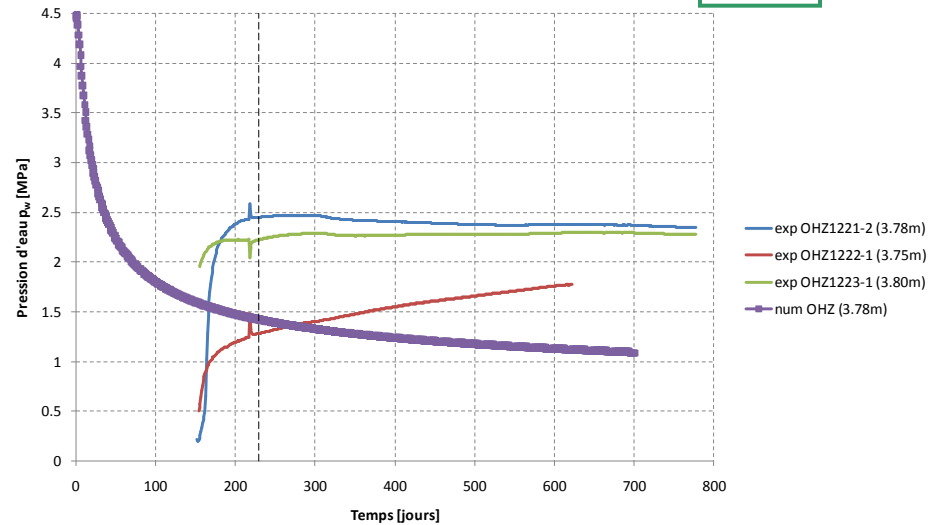


- exp 1241-3 (3.1m) 45°
- exp 1242-3 (3.2m) |
- exp 1243-3 (3.1m) —
- exp 1244-5 (3.2m) —
- num 3.15m

SDZ_11 - Evolution de la pression d'eau dans les forages OHZ (6.15-6.20m)



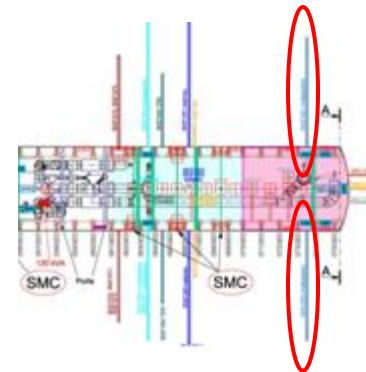
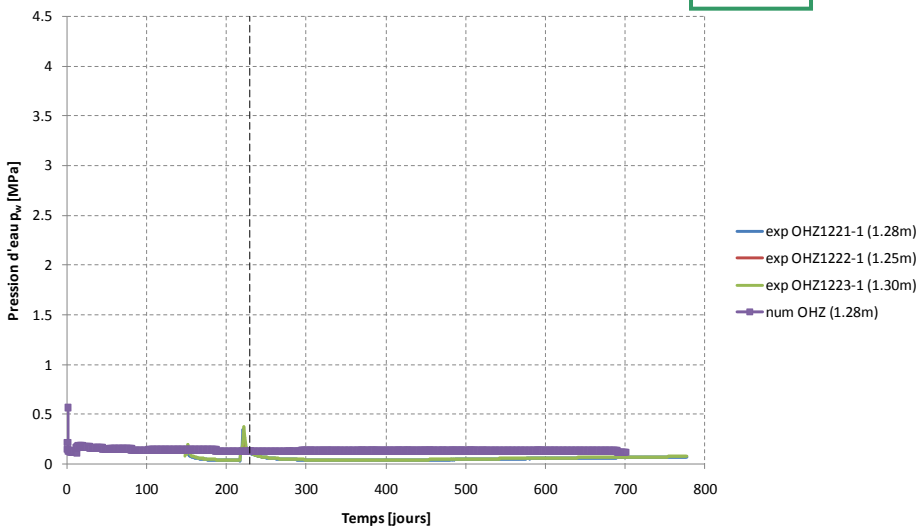
SDZ_11 - Evolution de la pression d'eau dans les forages OHZ (3.75-3.80m)



Cas 1

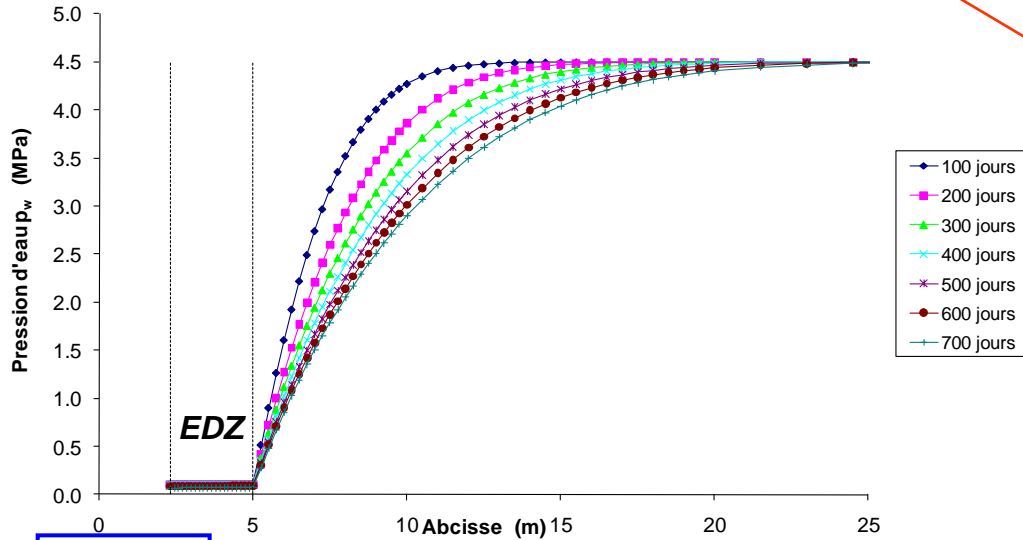
Radialement – Zone étanchée

SDZ_11 - Evolution de la pression d'eau dans les forages OHZ (1.25-1.30m)



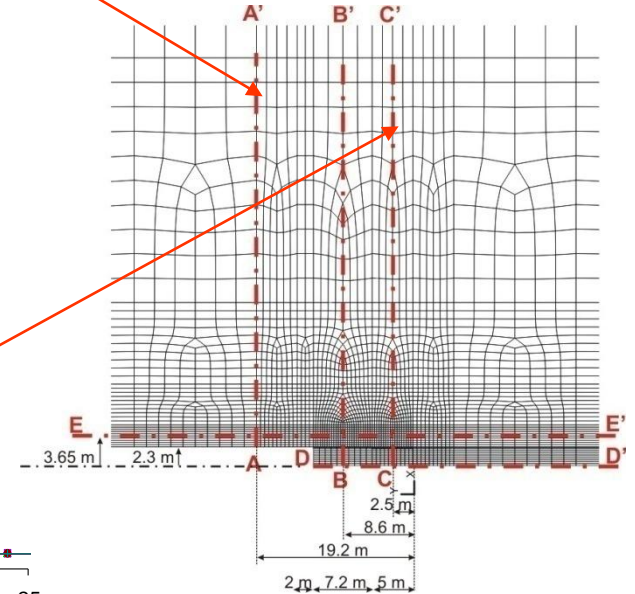
Section située à 1.5m du fond
 OHZ1221 : horizontal
 OHZ1222 : vertical montant
 OHZ1223 : horizontal

SDZ_07 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe AA'

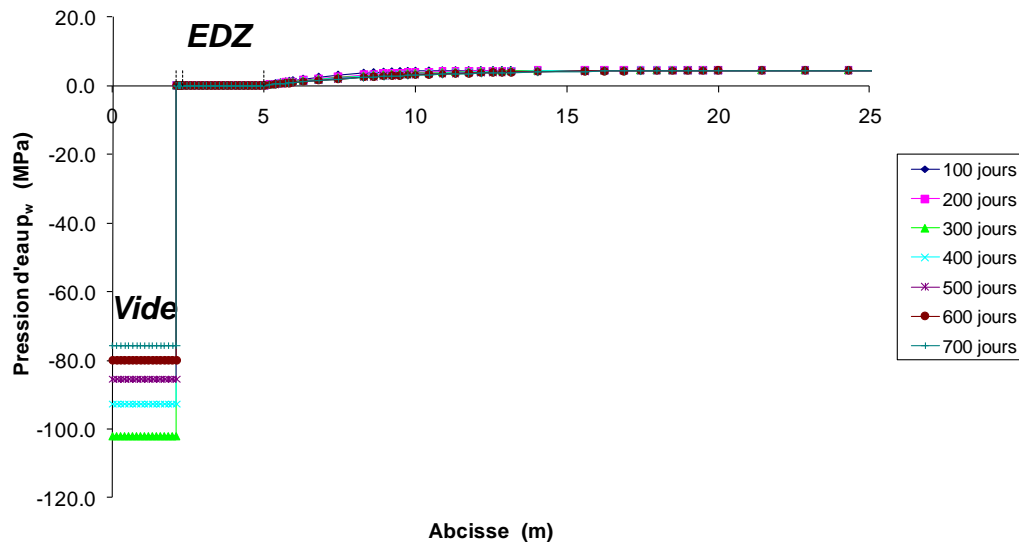


Cas 1

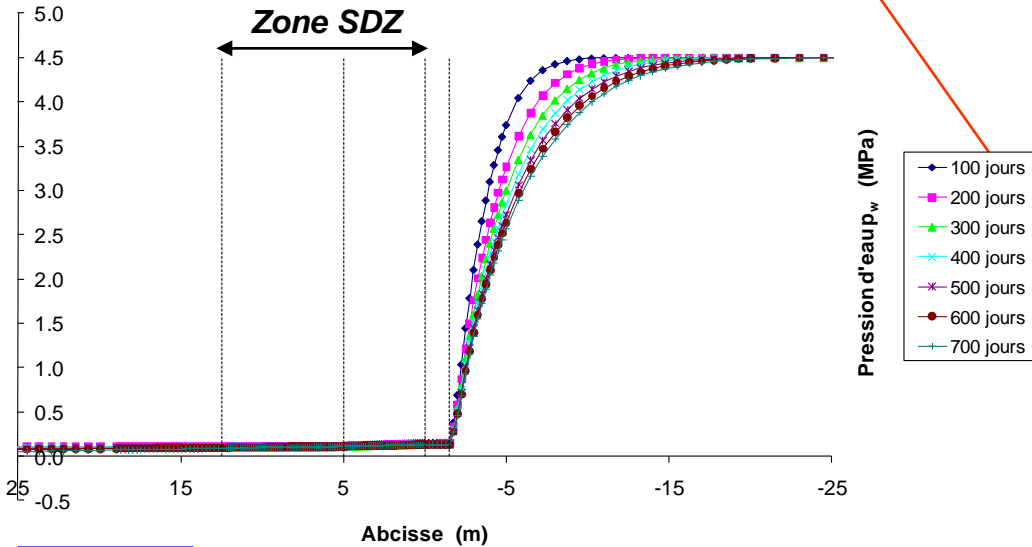
Coupes radiales



SDZ_07 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe CC'

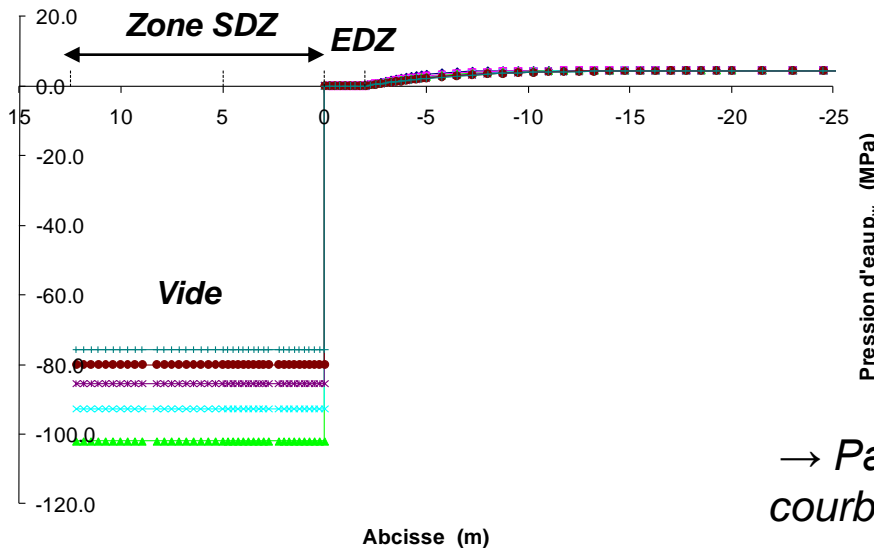


SDZ_07 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe EE'

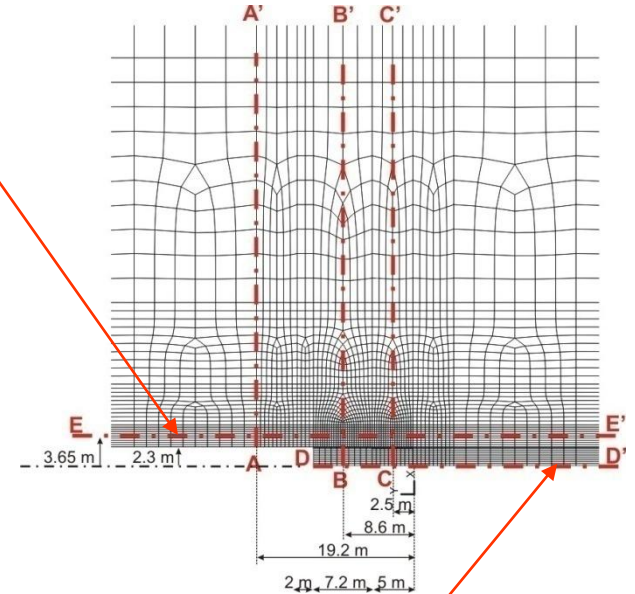


Cas 1

SDZ_07 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe DD'

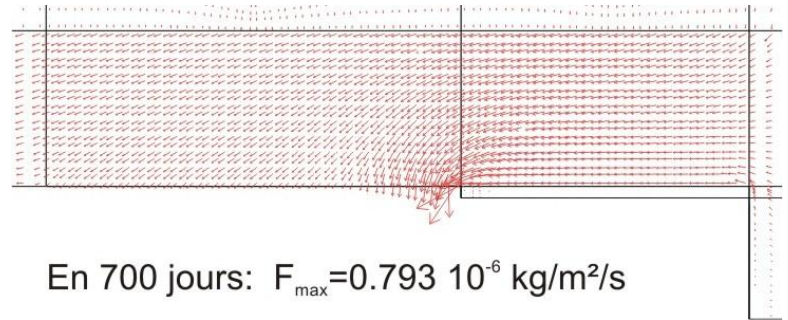
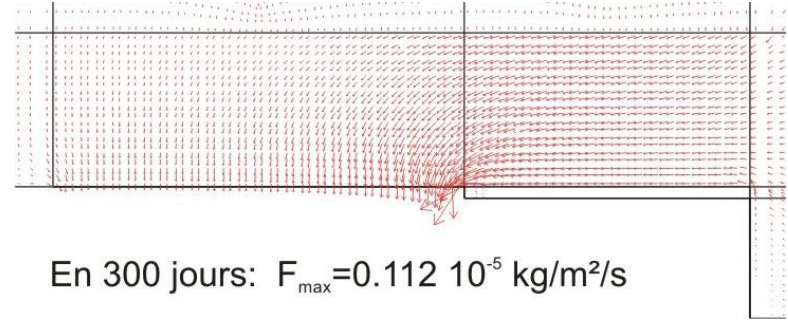
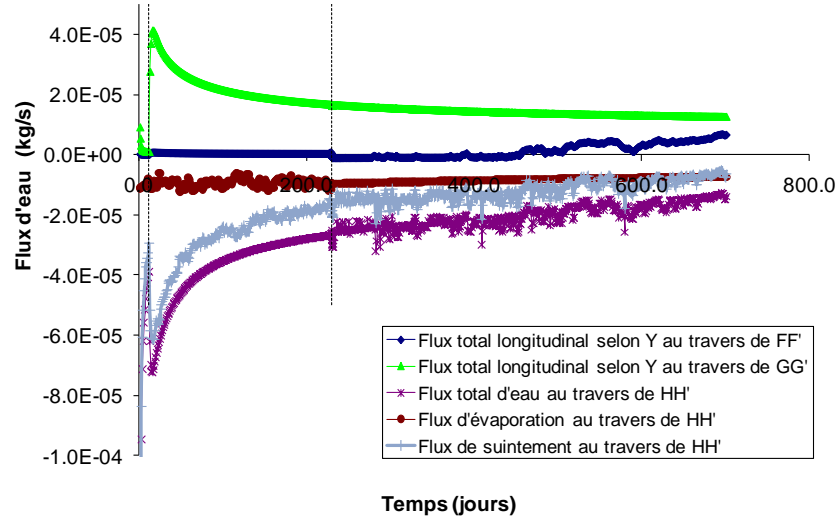


Coupes longitudinales

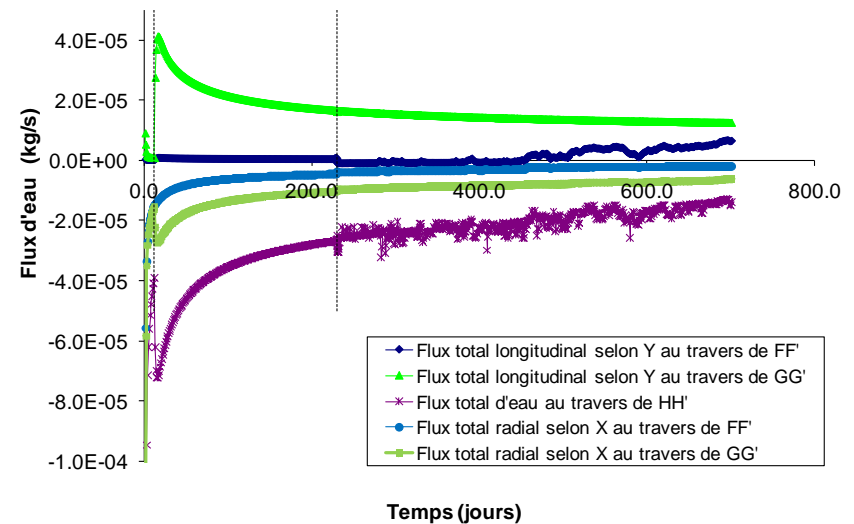


→ Pas d'effet du vide sur les courbes p_w dans la zone GED

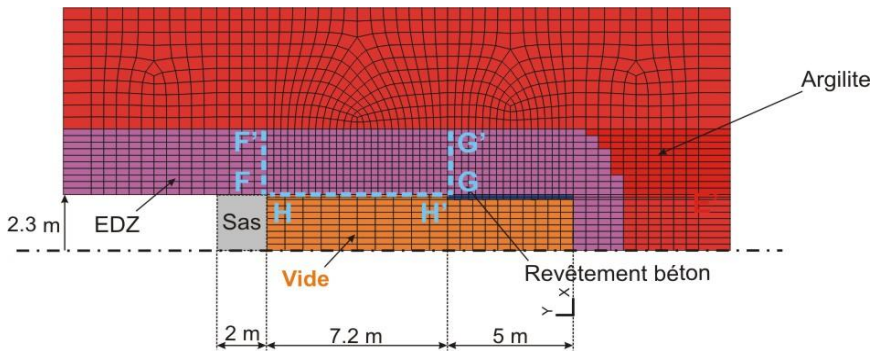
SDZ_07 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'



SDZ_07 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'



Cas 1 Flux

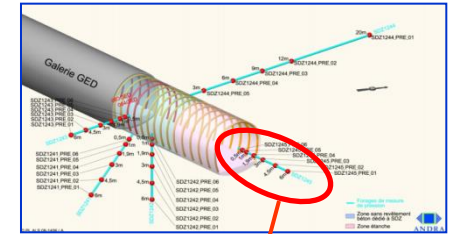


Cas 2

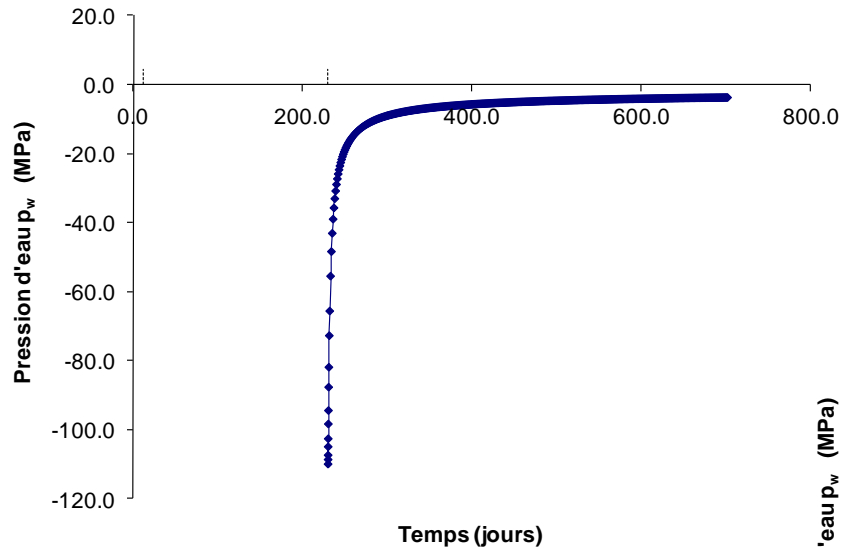
Suintement : $K = 10^{-10} \text{ s.kg}^{-1}$

Evaporation GED : $\alpha = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

Evaporation SDZ : $\alpha = 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$

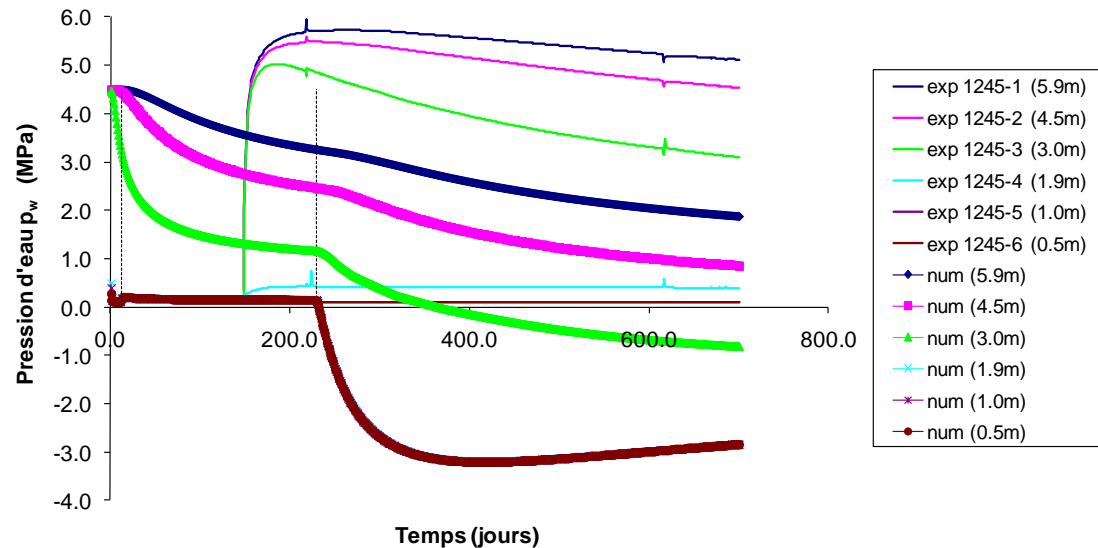


SDZ_08 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w au centre du vide (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2\text{m}$)

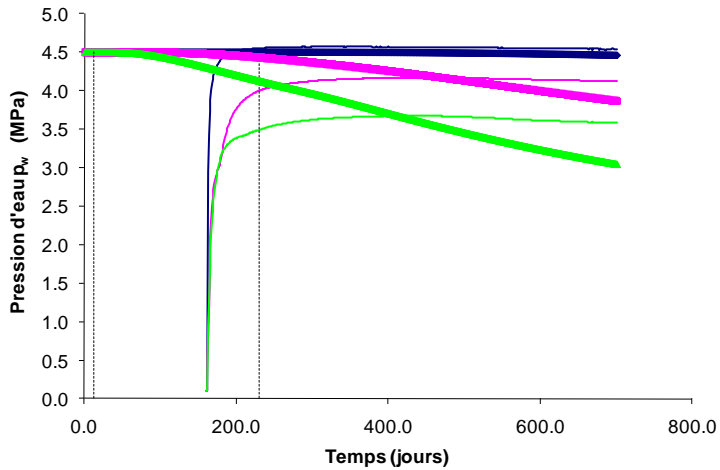


Longitudinalement

SDZ_08 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1245 (horizontal au front de la galerie)

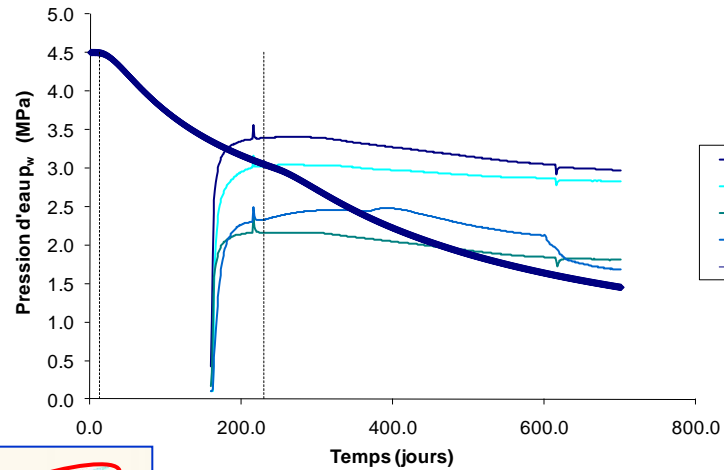


SDZ_08 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 20.1 m, 12.2 m et 9.2 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)

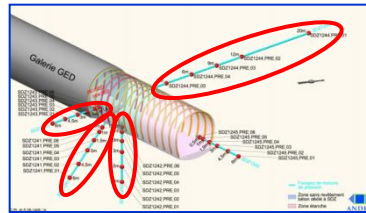


- exp 1244-1 (20.1m)
- exp 1244-2 (12.2m)
- exp 1244-3 (9.2m)
- num 20.1m
- num 12.2m
- num 9.2m

SDZ_08 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 6.0-6.2 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)



- exp 1241-1 (6.0m) 45°
- exp 1242-1 (6.1m) |
- exp 1243-1 (6.0m) —
- exp 1244-4 (6.2m) —
- num 6.1m

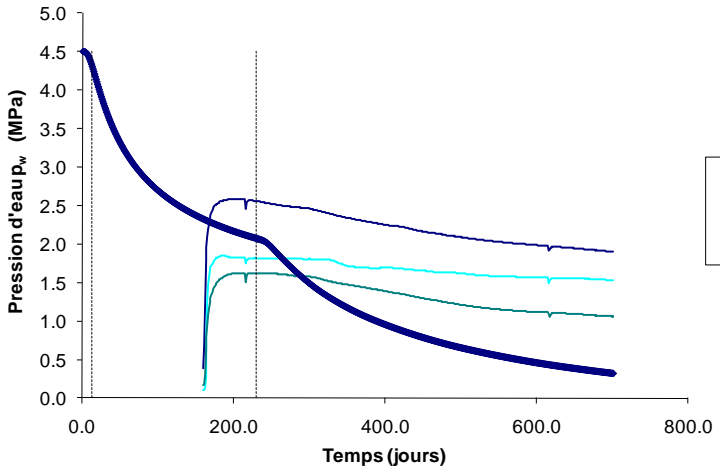


Radialement

Cas 2

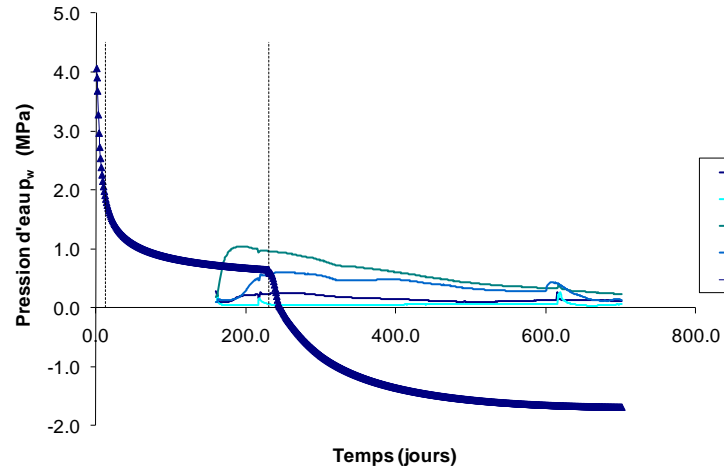
*Forte connexion avec le vide :
→ courbes de p_w tirés vers le bas*

SDZ_08 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 4.6-4.7 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)



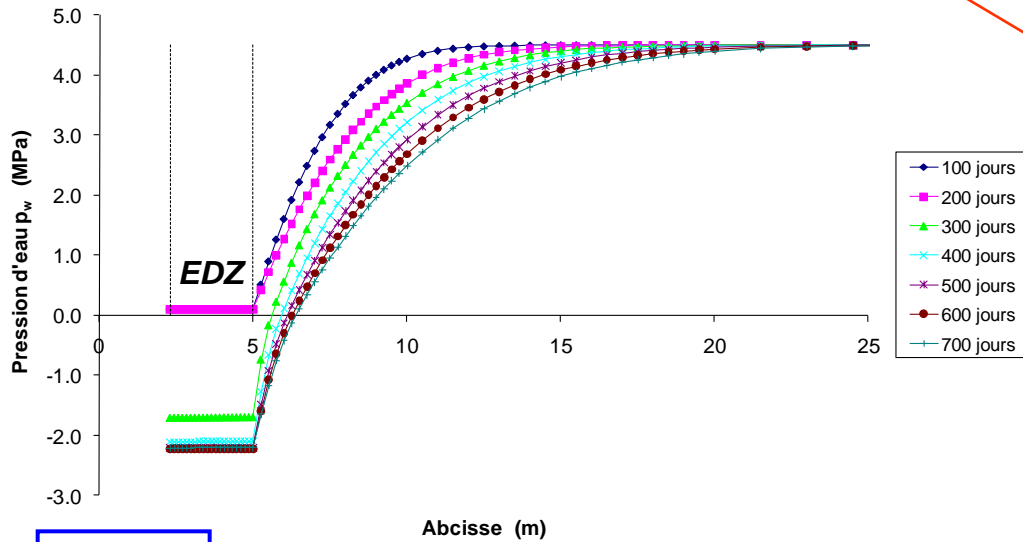
- exp 1241-2 (4.6m) 45°
- exp 1242-2 (4.7m) |
- exp 1243-2 (4.6m) —
- num 4.65m

SDZ_08 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 3.1-3.2 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)



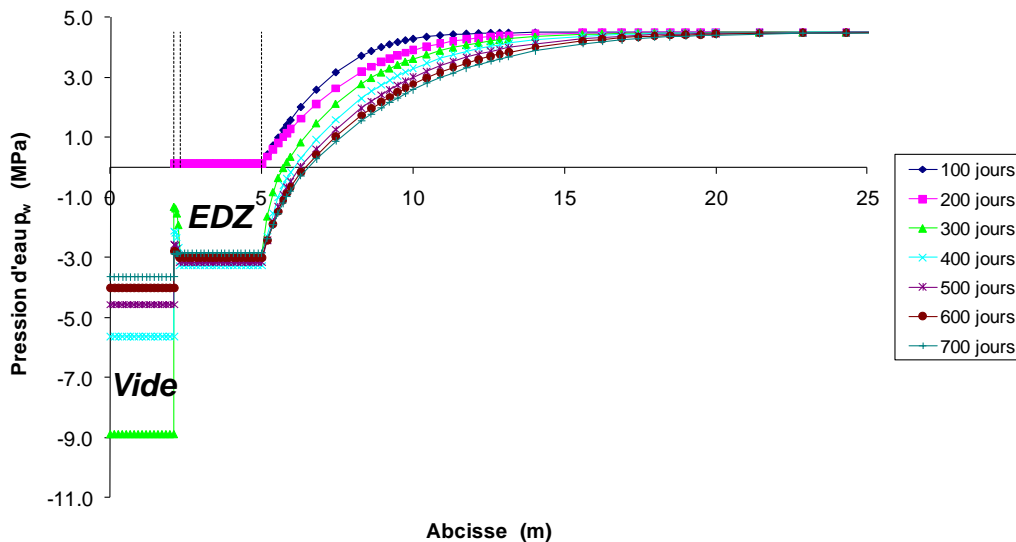
- exp 1241-3 (3.1m) 45°
- exp 1242-3 (3.2m) |
- exp 1243-3 (3.1m) —
- exp 1244-5 (3.2m) —
- num 3.15m

SDZ_08 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe AA'

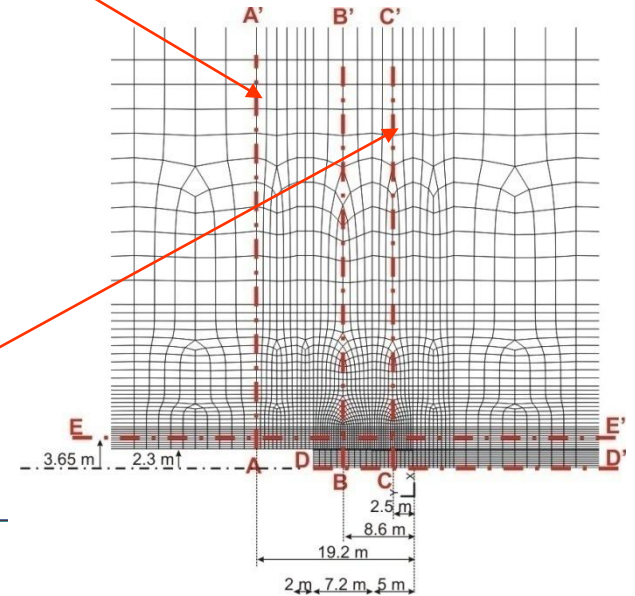


Cas 2

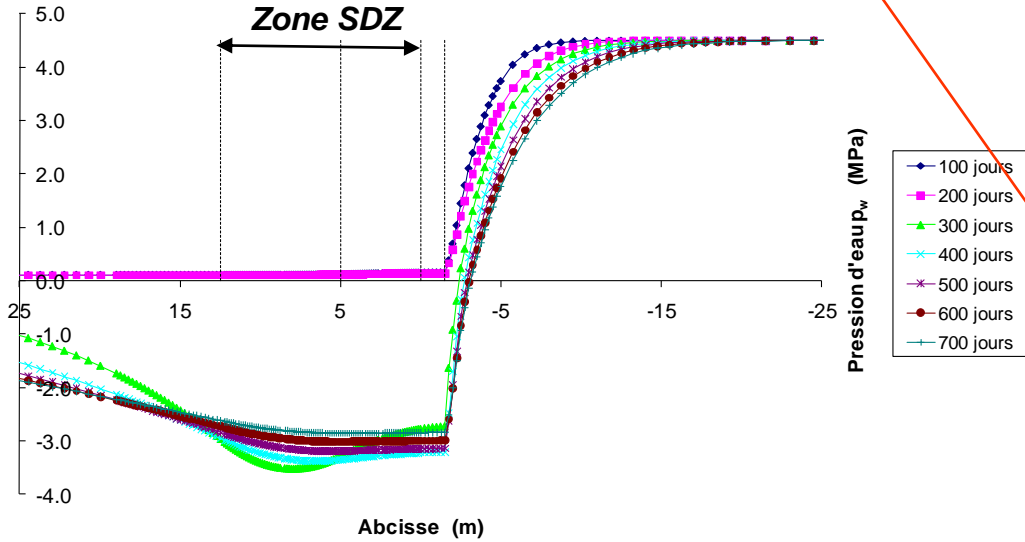
SDZ_08 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe CC'



Coupes radiales

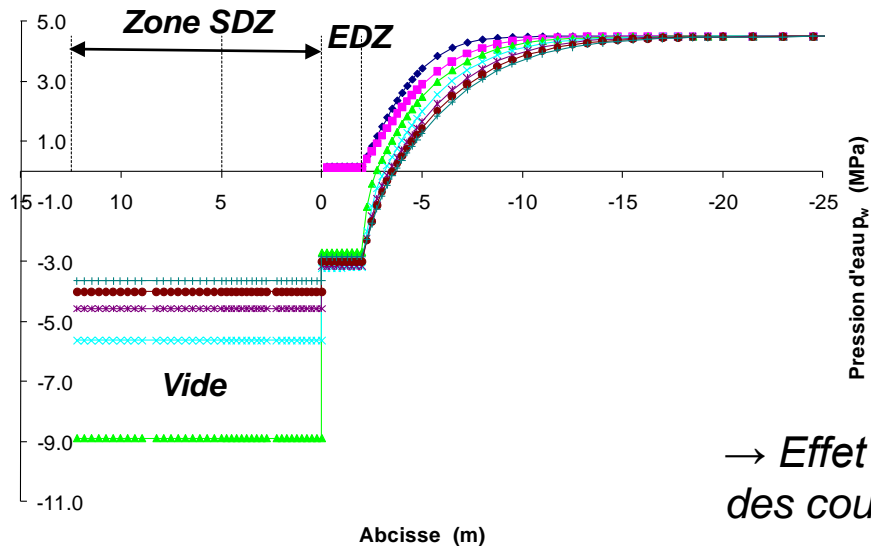


SDZ_08 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe EE'

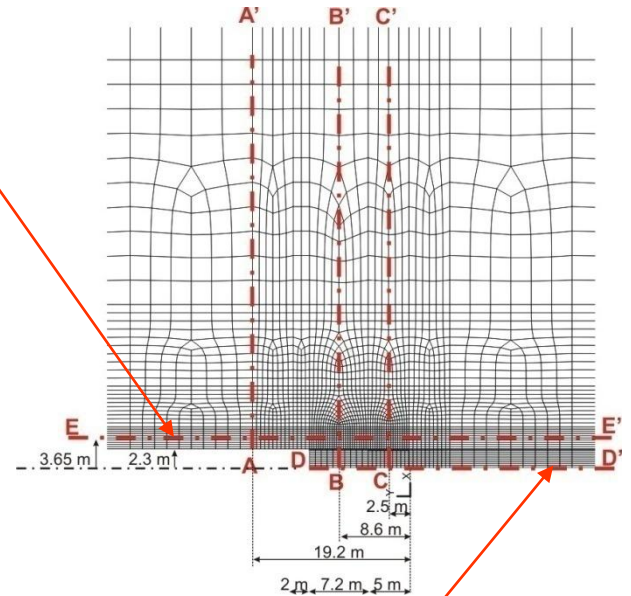


Cas 2

SDZ_08 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe DD'

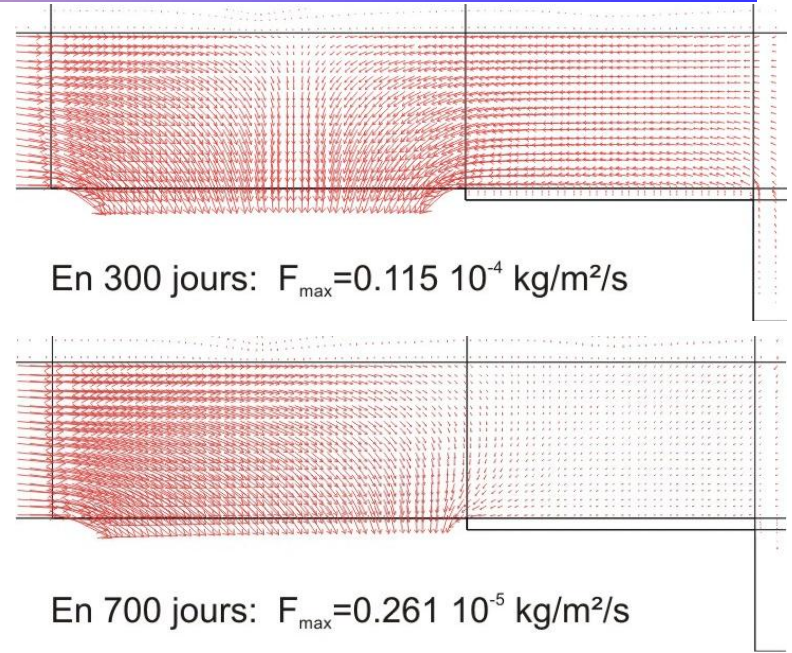
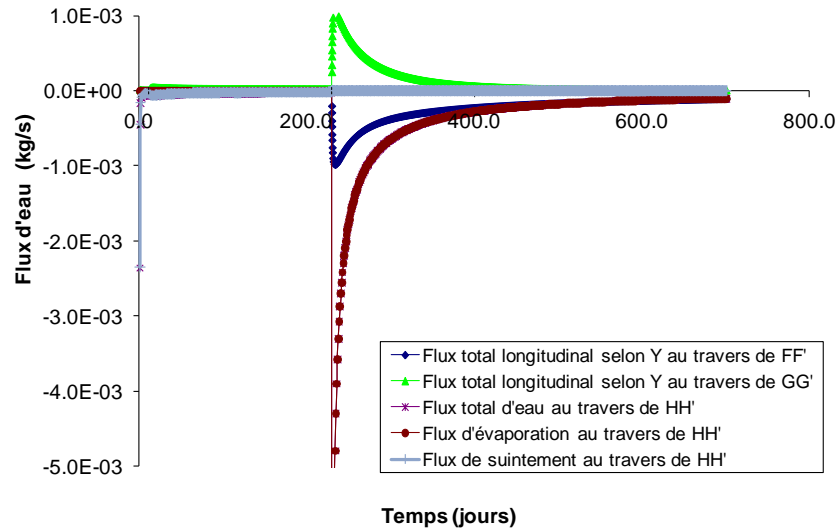


Coupes longitudinales

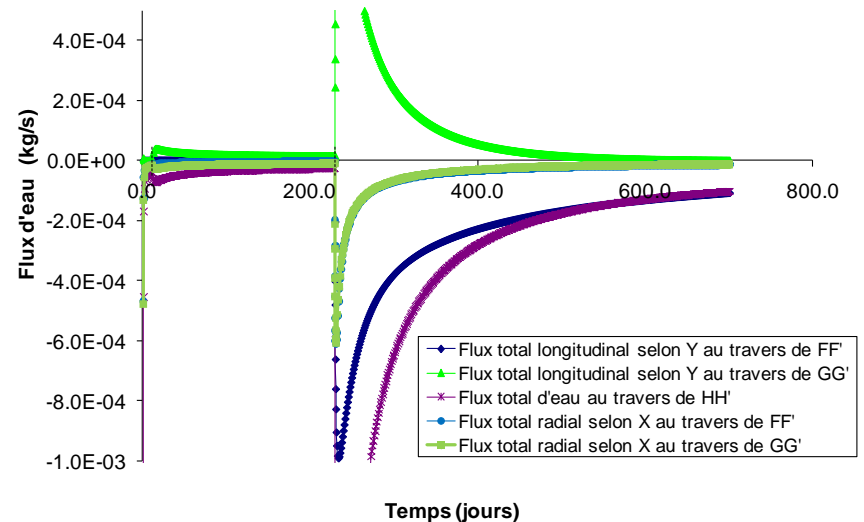


→ Effet du vide sur le rabattement des courbes p_w dans la zone GED

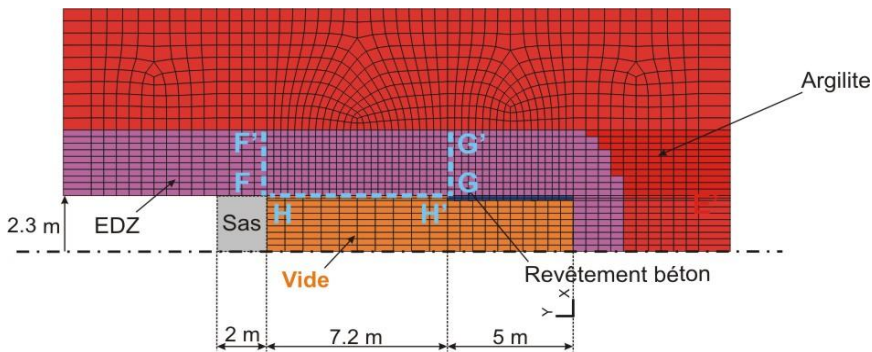
SDZ_08 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'



SDZ_08 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'



Cas 2 Flux

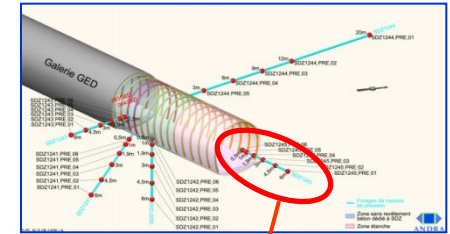


Cas 3

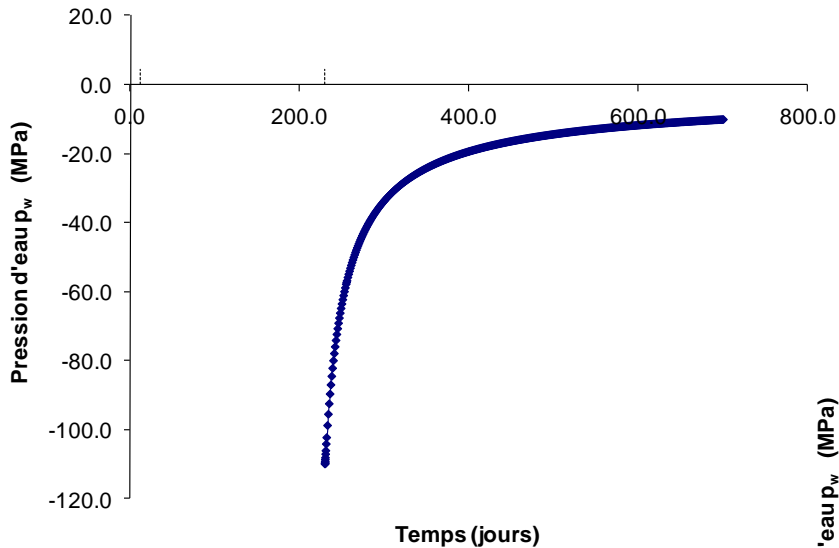
Suintement : $K = 10^{-10} \text{ s.kg}^{-1}$

Evaporation GED : $\alpha = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

Evaporation SDZ : $\alpha = 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$

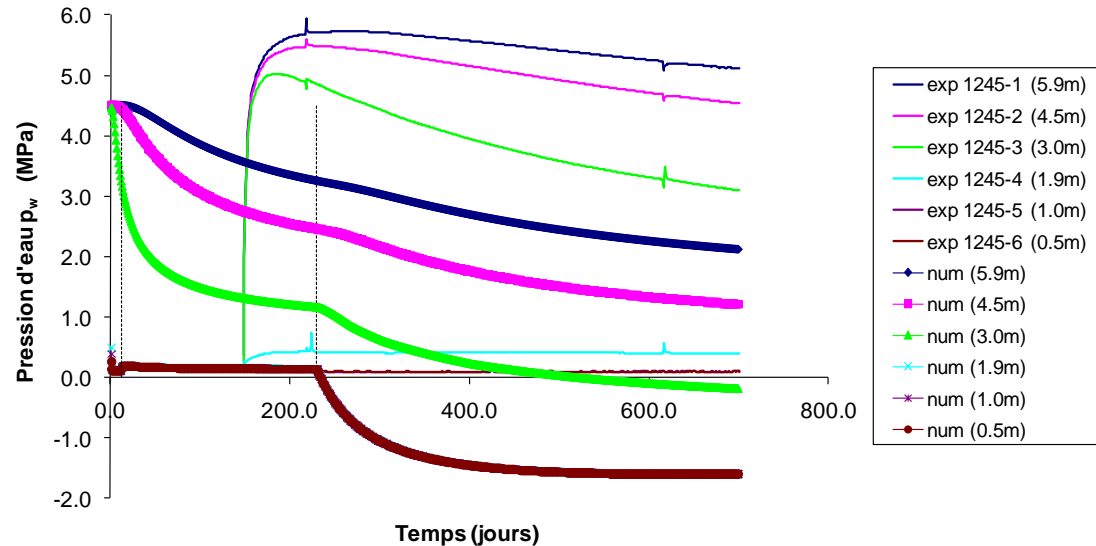


SDZ_09 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w au centre du vide (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2\text{m}$)

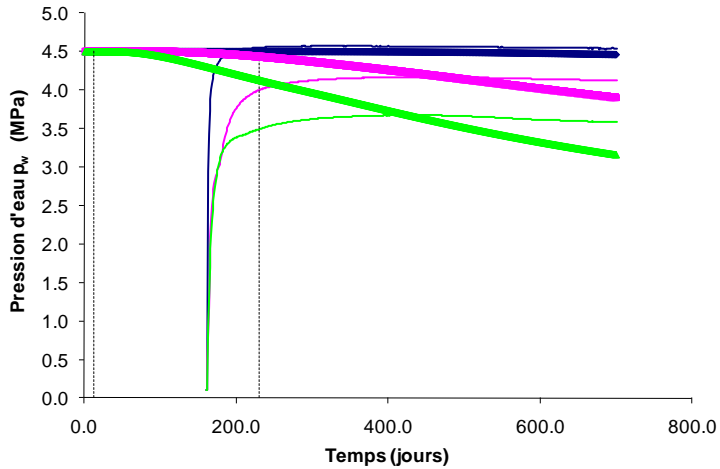


Longitudinalement

SDZ_09 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1245 (horizontal au front de la galerie)

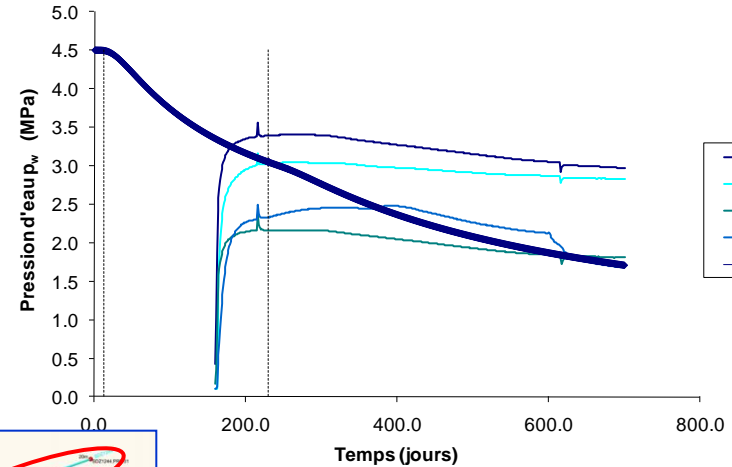


SDZ_09 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 20.1 m, 12.2 m et 9.2 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)

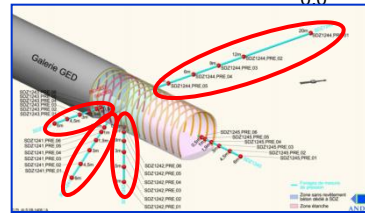


- exp 1244-1 (20.1m)
- exp 1244-2 (12.2m)
- exp 1244-3 (9.2m)
- num 20.1m
- num 12.2m
- num 9.2m

SDZ_09 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 6.0-6.2 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)



- exp 1241-1 (6.0m) 45°
- exp 1242-1 (6.1m) |
- exp 1243-1 (6.0m) —
- exp 1244-4 (6.2m) —
- num 6.1m

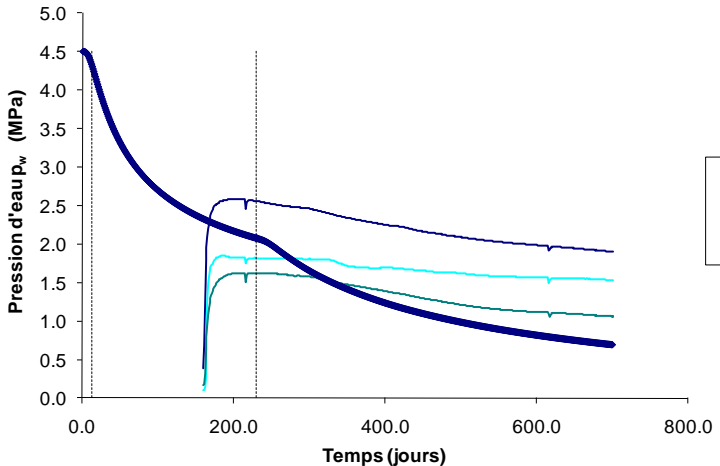


Radialement

Cas 3

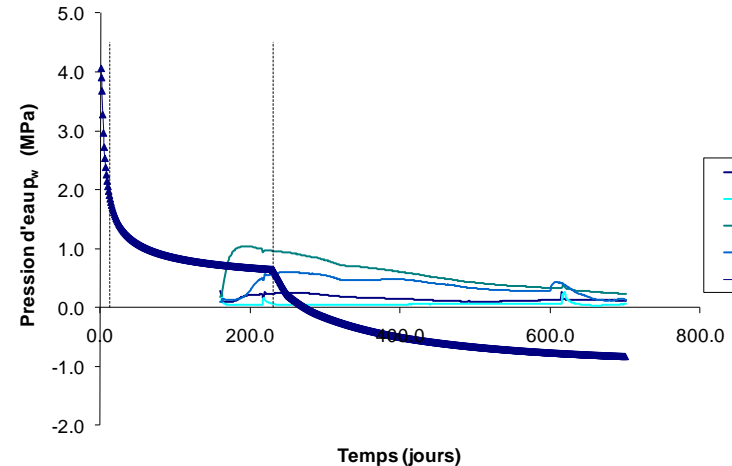
*Forte connexion avec le vide :
→ courbes de p_w tirés vers le bas*

SDZ_09 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 4.6-4.7 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)



- exp 1241-2 (4.6m) 45°
- exp 1242-2 (4.7m) |
- exp 1243-2 (4.6m) —
- num 4.65m

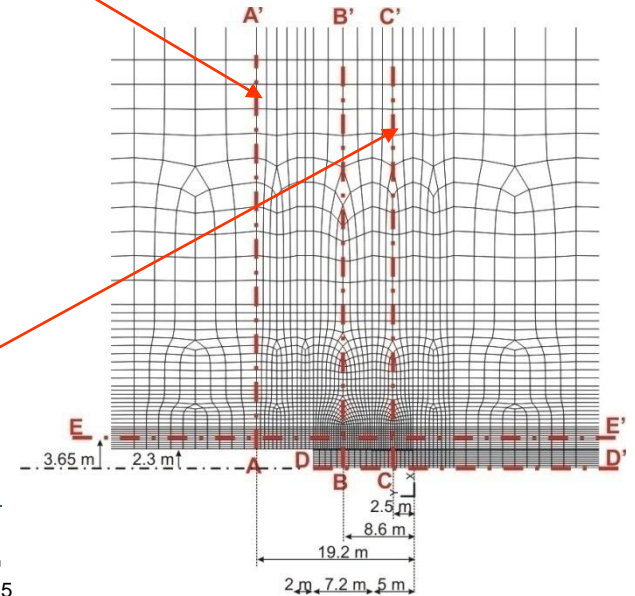
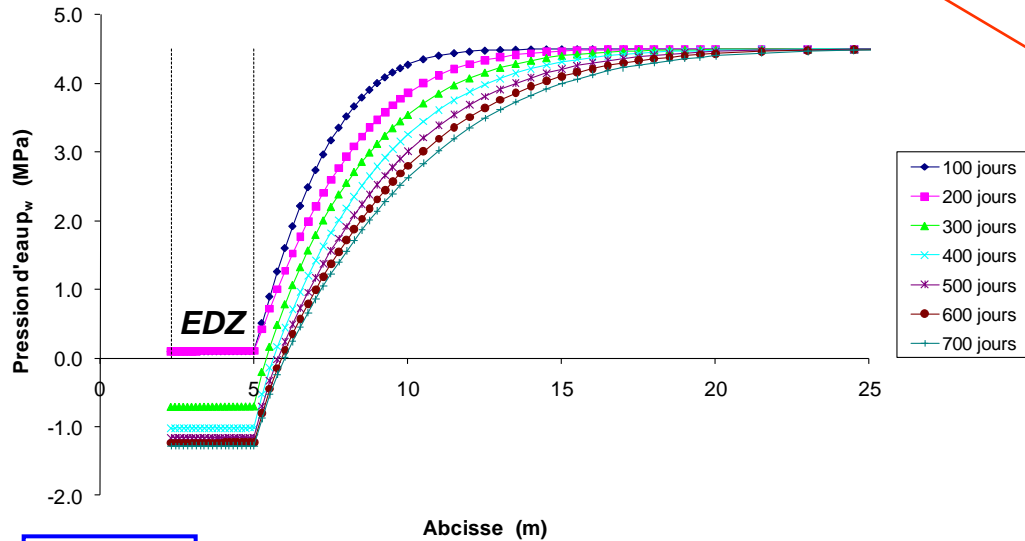
SDZ_09 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 3.1-3.2 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)



- exp 1241-3 (3.1m) 45°
- exp 1242-3 (3.2m) |
- exp 1243-3 (3.1m) —
- exp 1244-5 (3.2m) —
- num 3.15m

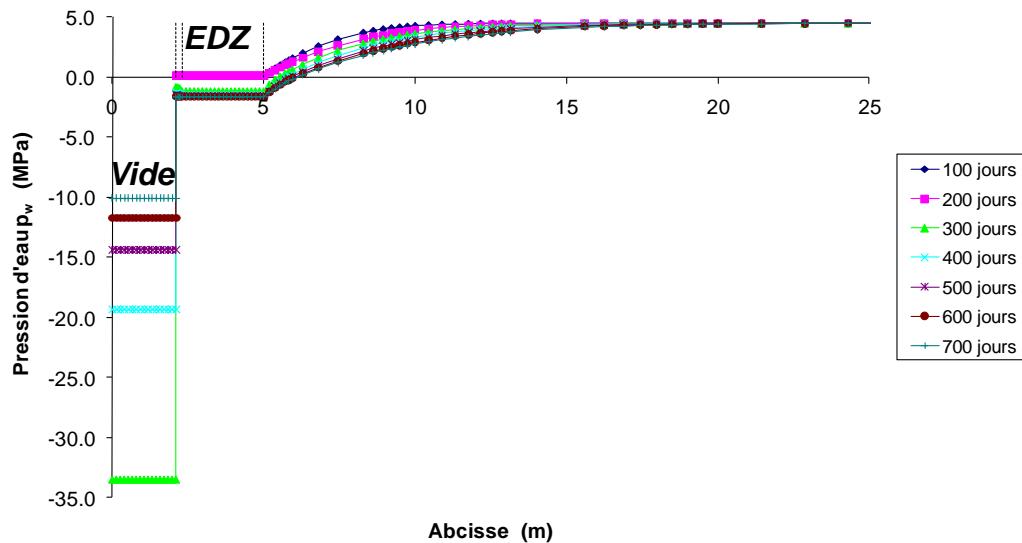
SDZ_09 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe AA'

Coupes radiales

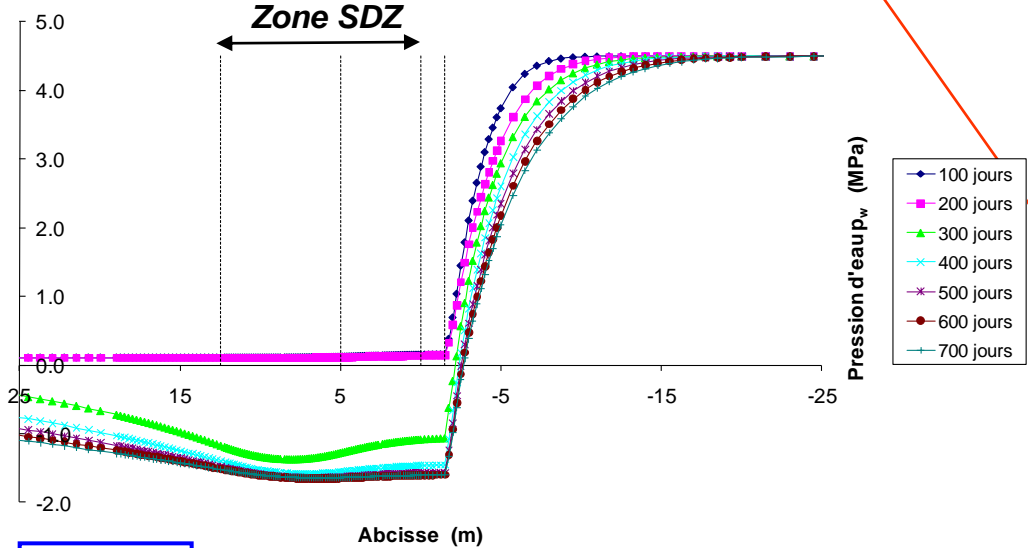


Cas 3

SDZ_09 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe CC'

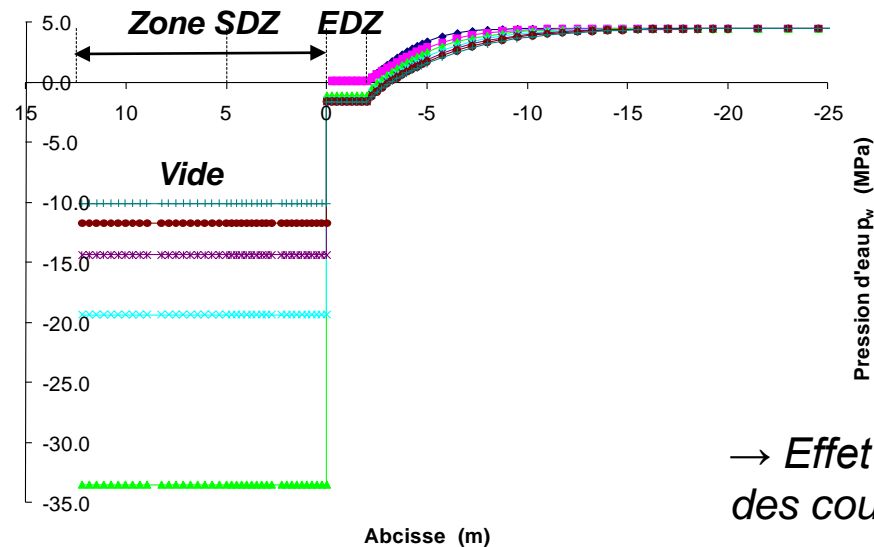


SDZ_09 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe EE'

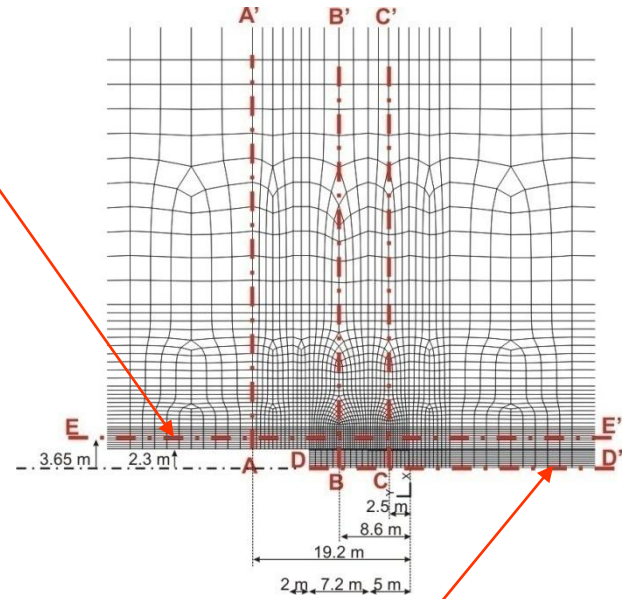


Cas 3

SDZ_09 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe DD'

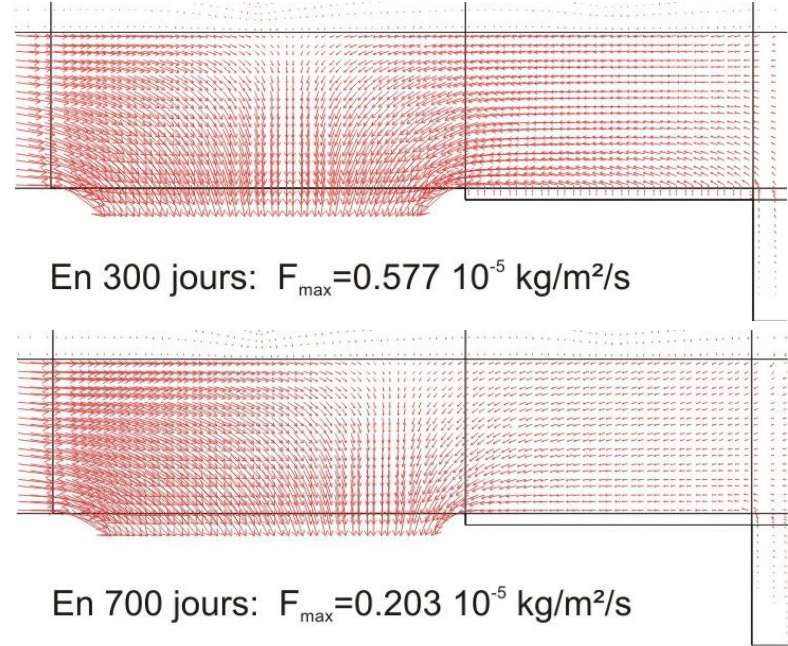
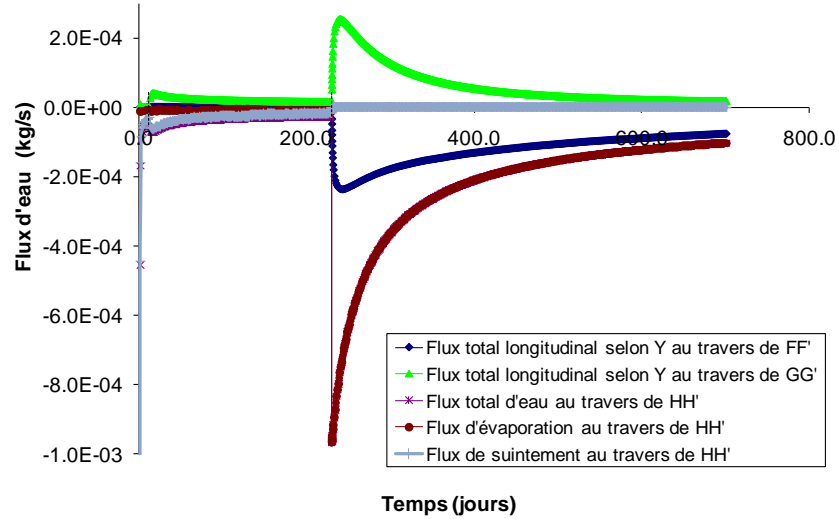


Coupes longitudinales



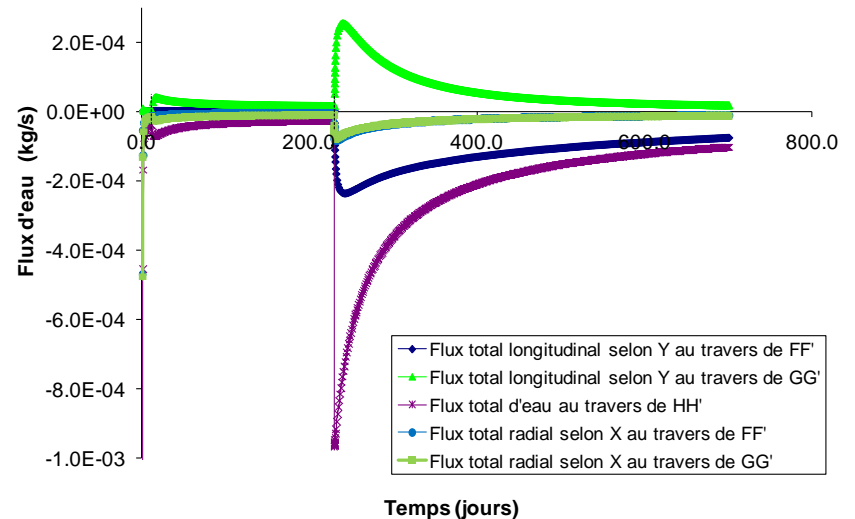
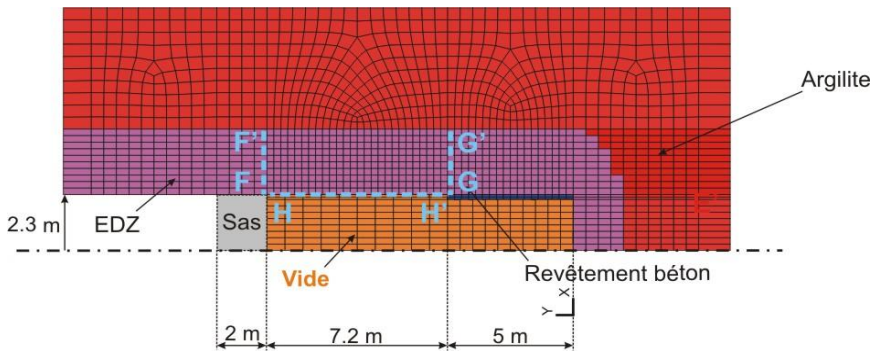
→ Effet du vide sur le rabattement des courbes p_w dans la zone GED

SDZ_09 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'

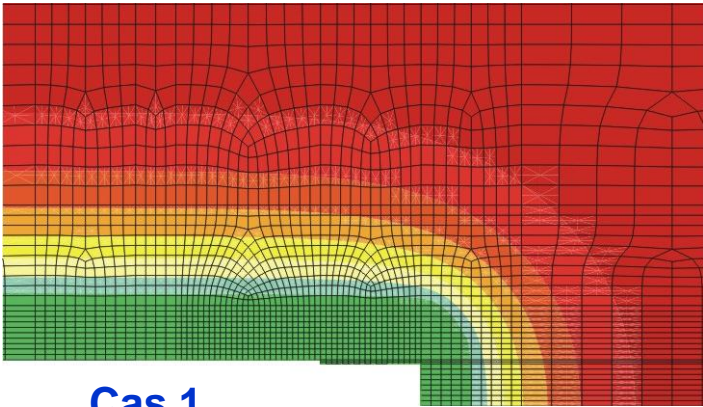


SDZ_09 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'

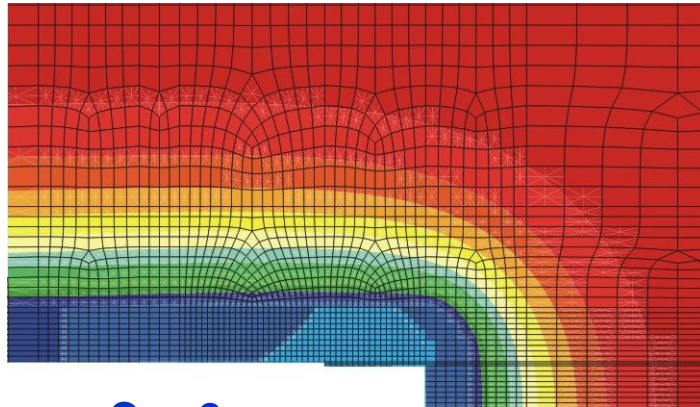
Cas 3 Flux



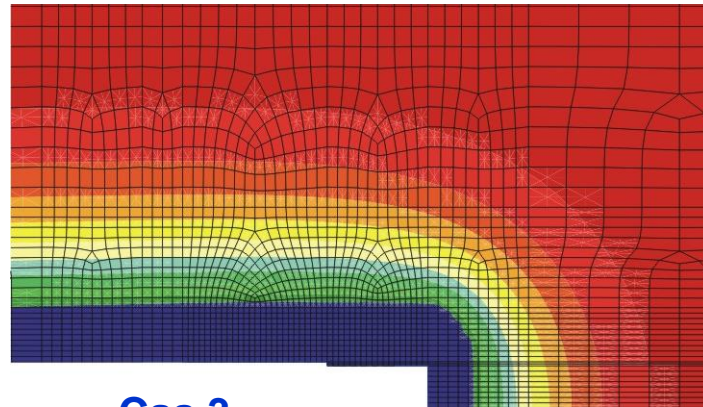
Comparaison de la pression d'eau après 700 jours



Cas 1
Evaporation SDZ :
 $\alpha = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

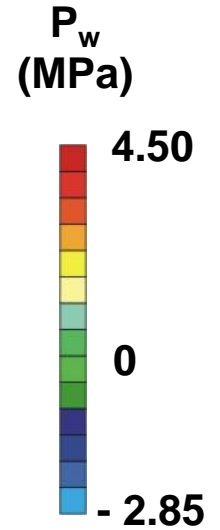


Cas 2
Evaporation SDZ :
 $\alpha = 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$



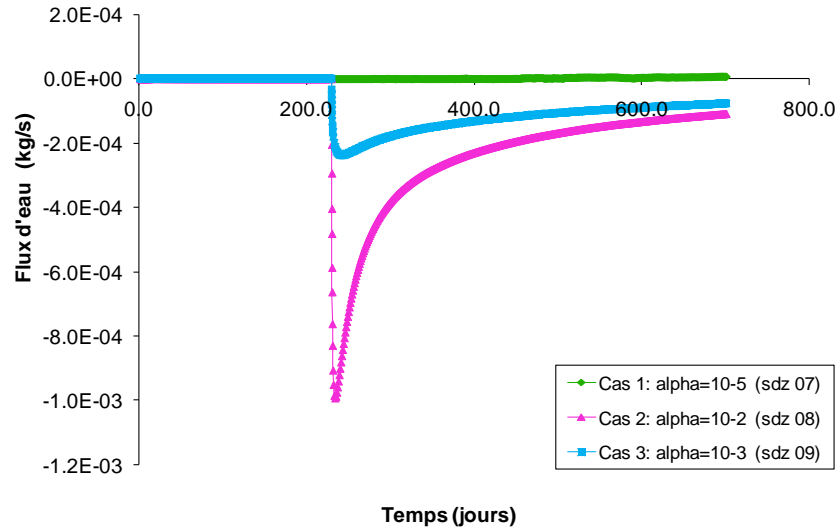
Evaporation SDZ :
 $\alpha = 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$

Cas 3

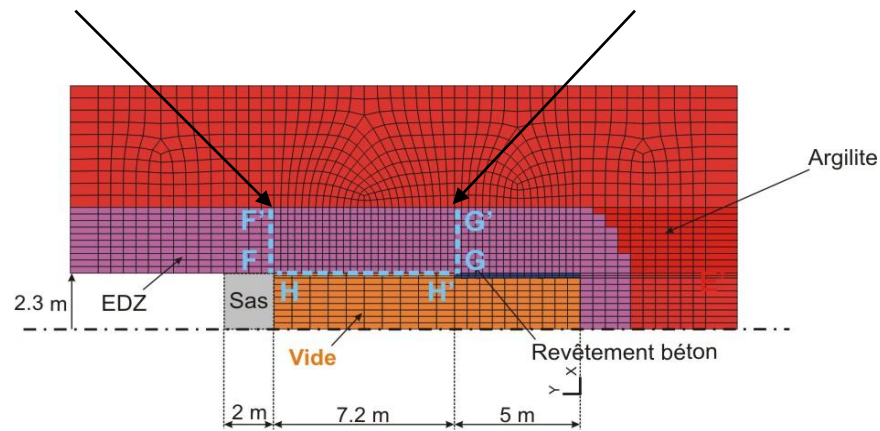
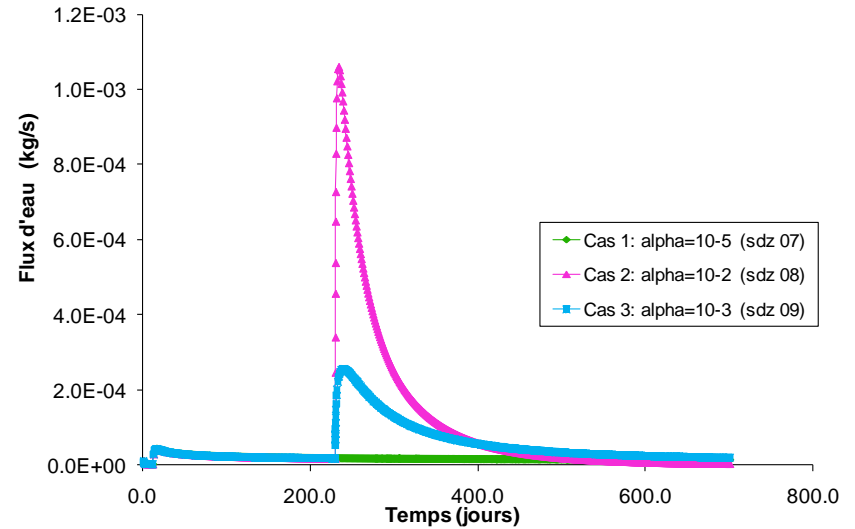


Comparaison des flux longitudinaux au travers des sections FF' et GG'

SDZ - Axisymétrique - Evolution temporelle du flux total d'eau selon Y au travers de la section FF'

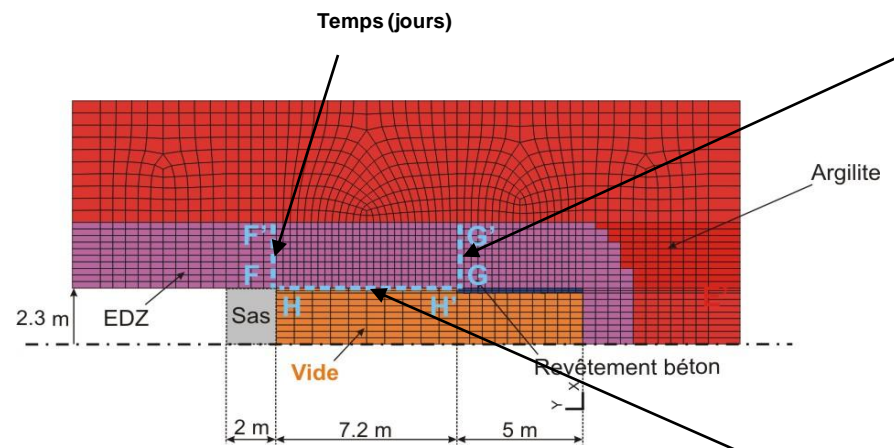
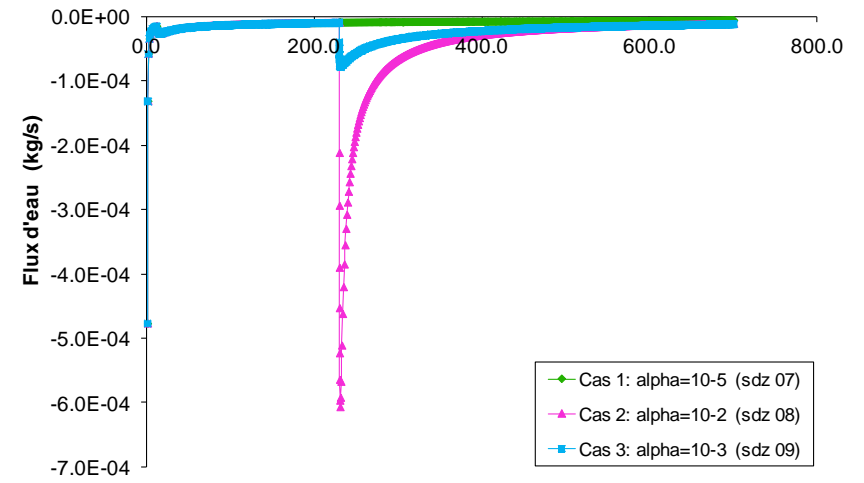
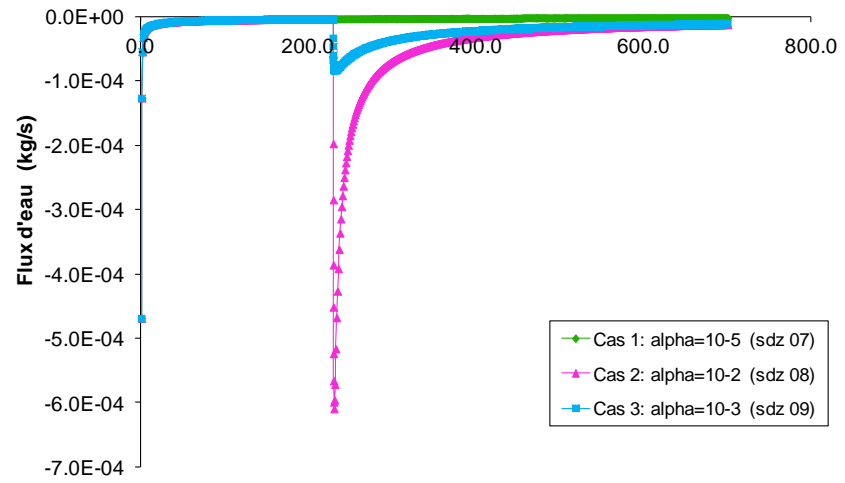


SDZ - Axisymétrique - Evolution temporelle du flux total d'eau selon Y au travers de la section GG'

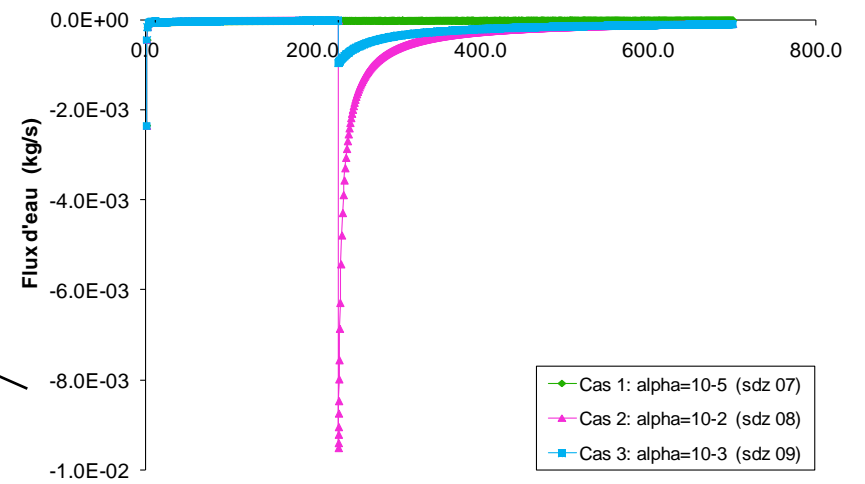


SDZ - Axisymétrique - Evolution temporelle du flux total d'eau selon X au travers de la section FF'

SDZ - Axisymétrique - Evolution temporelle du flux total d'eau selon X au travers de la section GG'



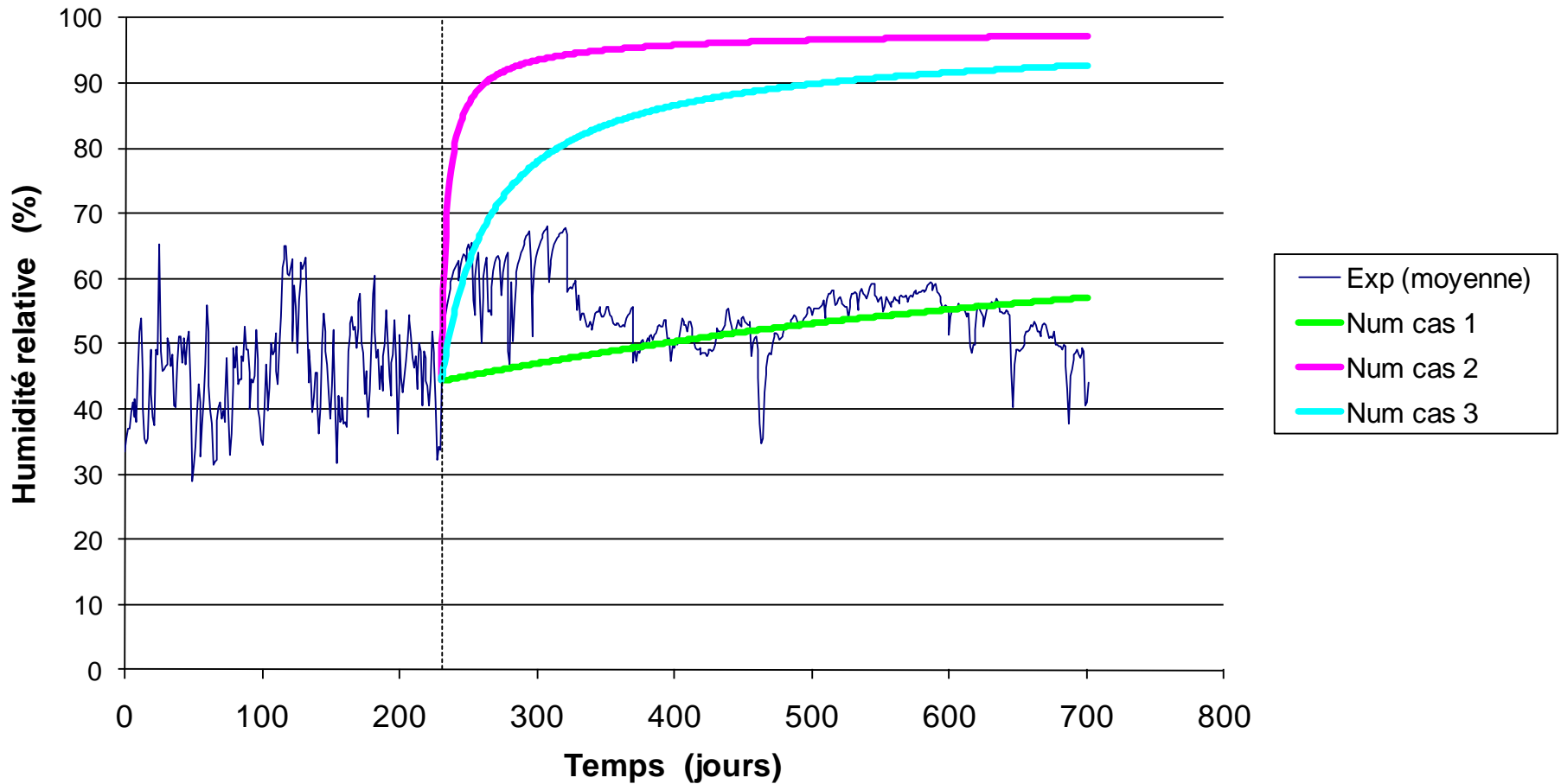
SDZ - Axisymétrique - Evolution temporelle du flux total d'eau au travers de la section HH'



Comparaison des flux radiaux au travers des sections FF', GG' et HH'

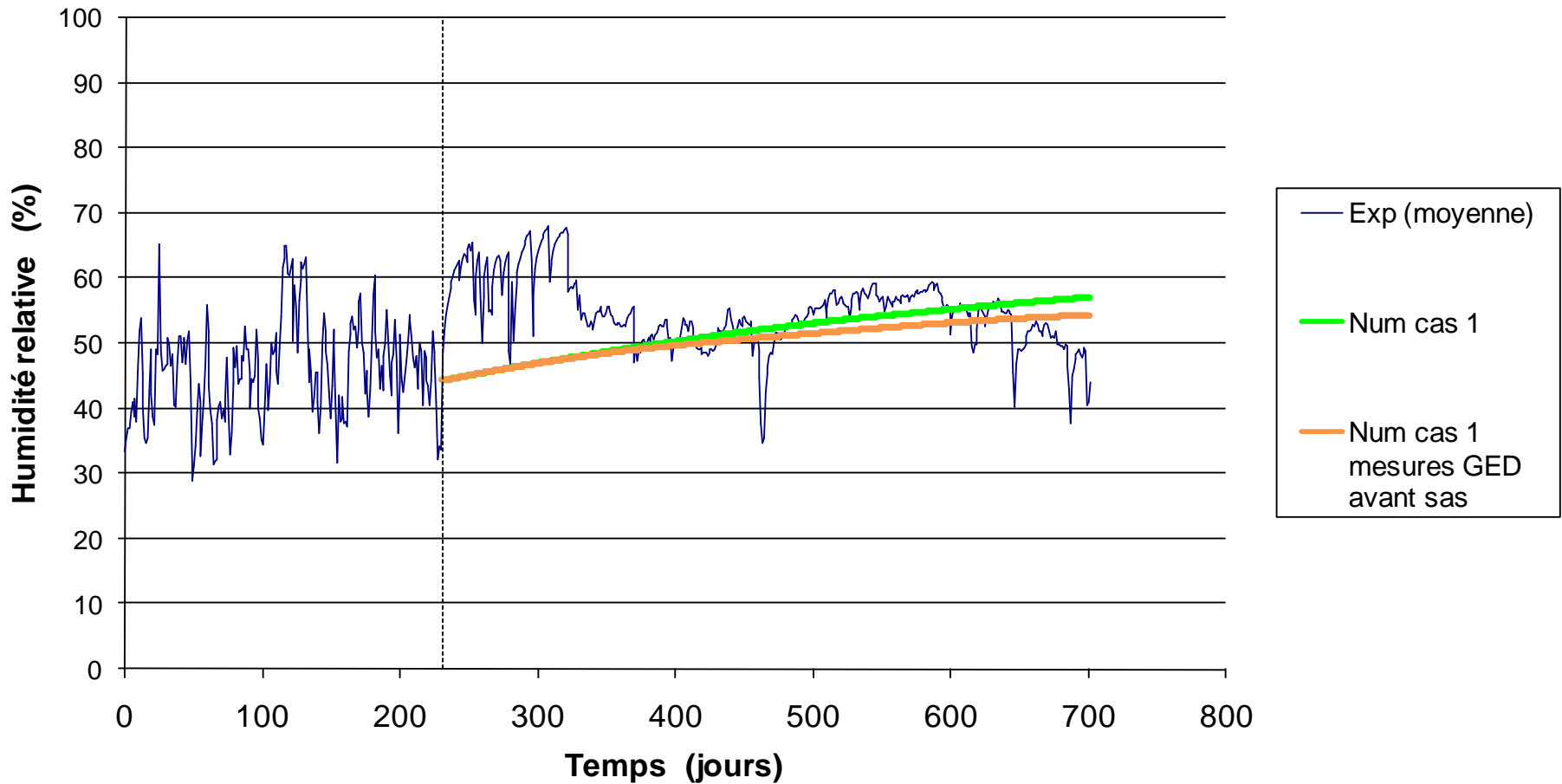
Comparaison dans le vide

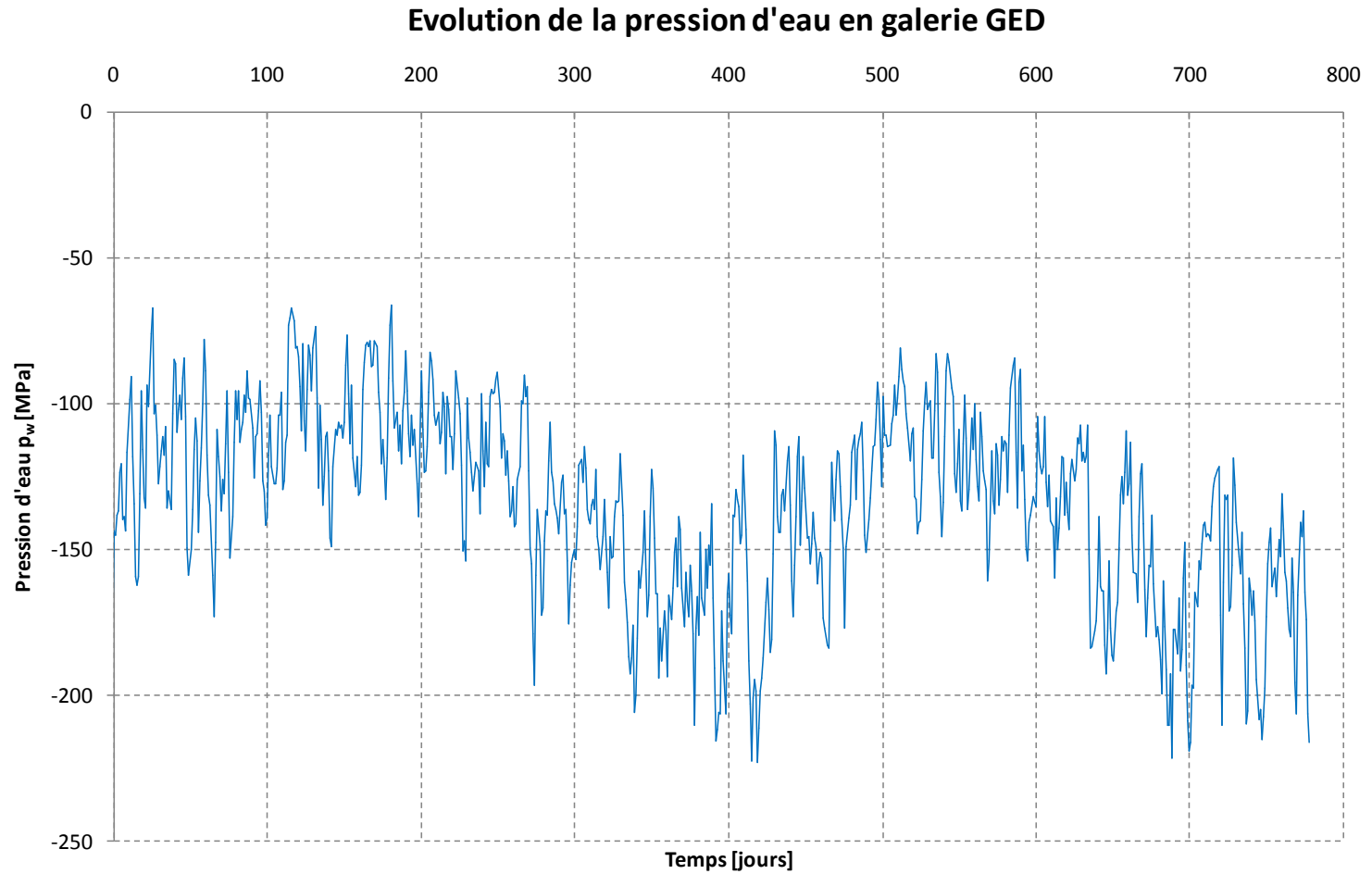
Comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale (moyenne SDZ1261 et SDZ1262) et numériques.



Comparaison dans le vide

Comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale (moyenne SDZ1261 et SDZ1262) et numériques.





P_w issue des mesures de T et Hr en GED

Influence du revêtement en galerie

Précédemment : pas de béton en GED

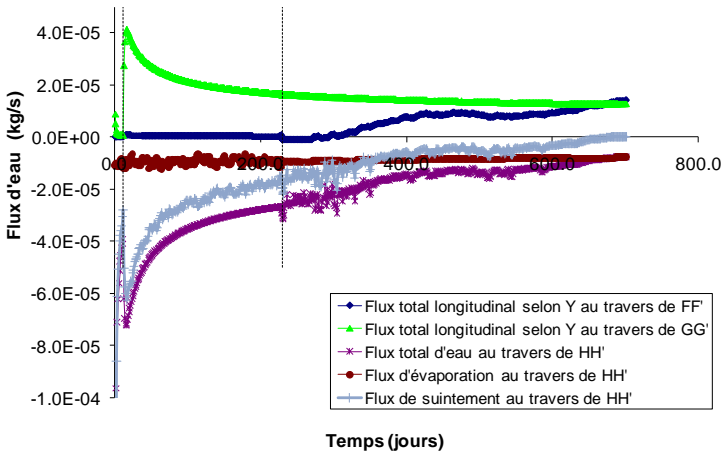
**Envisagé : - GED étanche : suppression des éléments FMIVP en GED
- GED avec 20cm de béton**

Propriétés : $K = 10^{-10} \text{ s}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, $\alpha_{\text{ged}} = 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\alpha_{\text{sdz}} = 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $k_{\text{iso, argilite}} = 4 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$, $k_{\text{iso, EDZ}} = 4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$, $k_{\text{iso, béton}} = 1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$

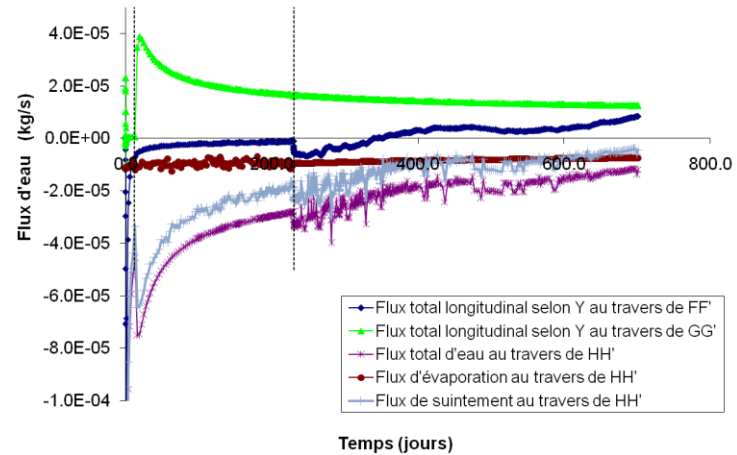
Flux d'eau en EDZ autour de SDZ (longitudinaux)

GED non revêtue, $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

SDZ_12 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'

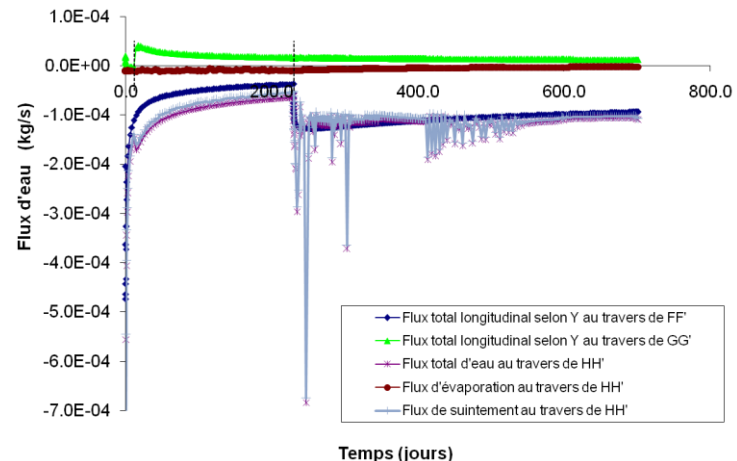


SDZ_30 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'

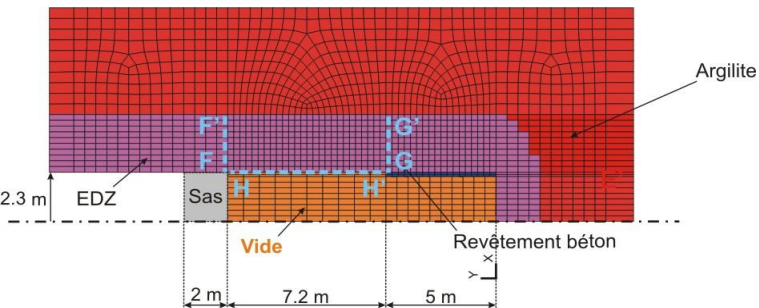


GED avec béton :
 $k=10^{-18} \text{ m}^2$, $\alpha_{sdz}=10^{-5}$
 (cas 1), peu d'influence

SDZ_13 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'



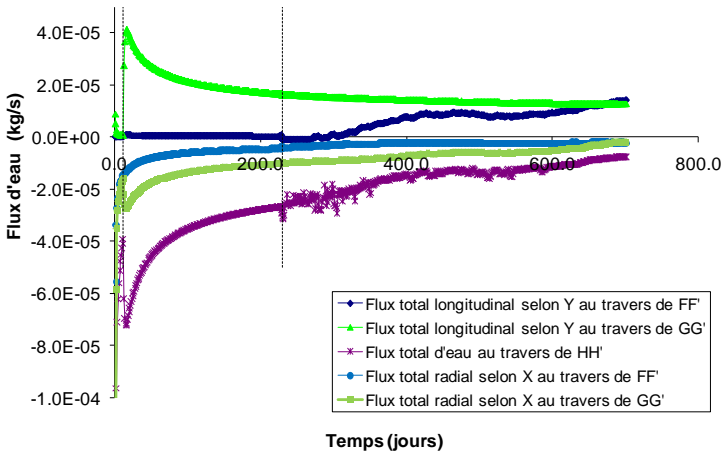
GED étanche :
 $\alpha_{sdz}=10^{-5}$ (cas 1) : forte influence,
 $(\alpha_{sdz}=10^{-3}$ - cas 3 : pas d'influence)



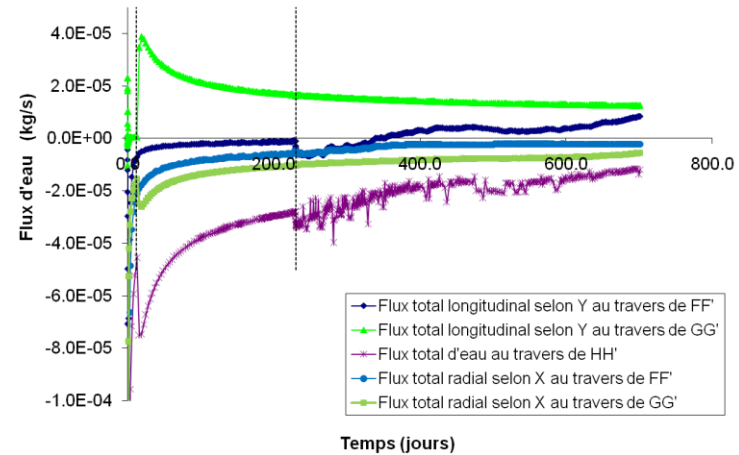
Flux d'eau en EDZ autour de SDZ (longitudinaux et radiaux)

GED non revêtue, $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

SDZ_12 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'

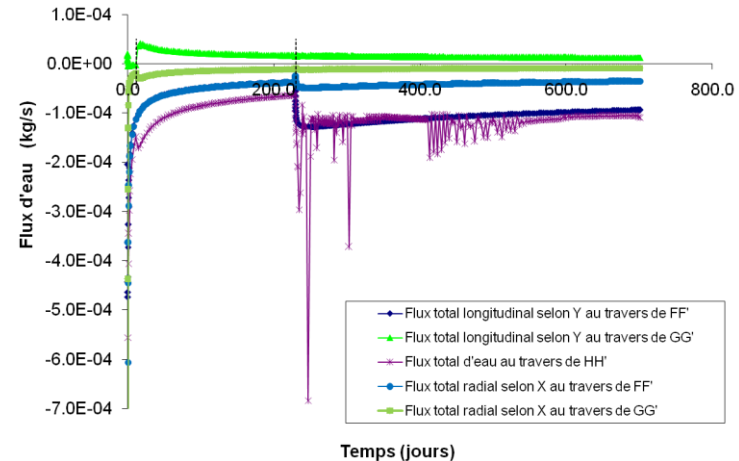


SDZ_30 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'

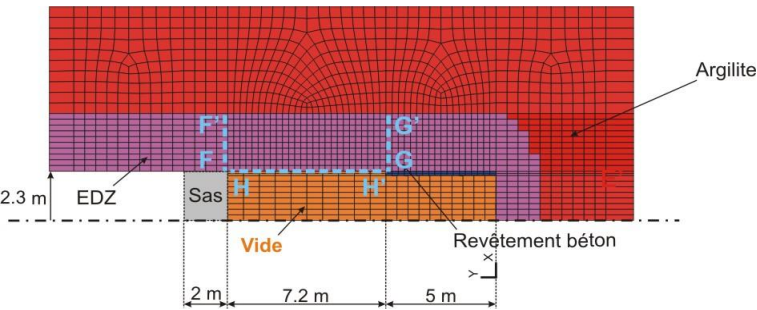


GED avec béton : $k=10^{-18}\text{m}^2$, $\alpha_{sdz}=10^{-5}$ (cas 1), peu d'influence

SDZ_13 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'



GED étanche : $\alpha_{sdz}=10^{-5}$ (cas 1) : forte influence, ($\alpha_{sdz}=10^{-3}$ - cas 3 : pas d'influence)



Pression d'eau en EDZ autour de la galerie GED :

Coupe EE' dans EDZ

$$\alpha_{sdz} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$$

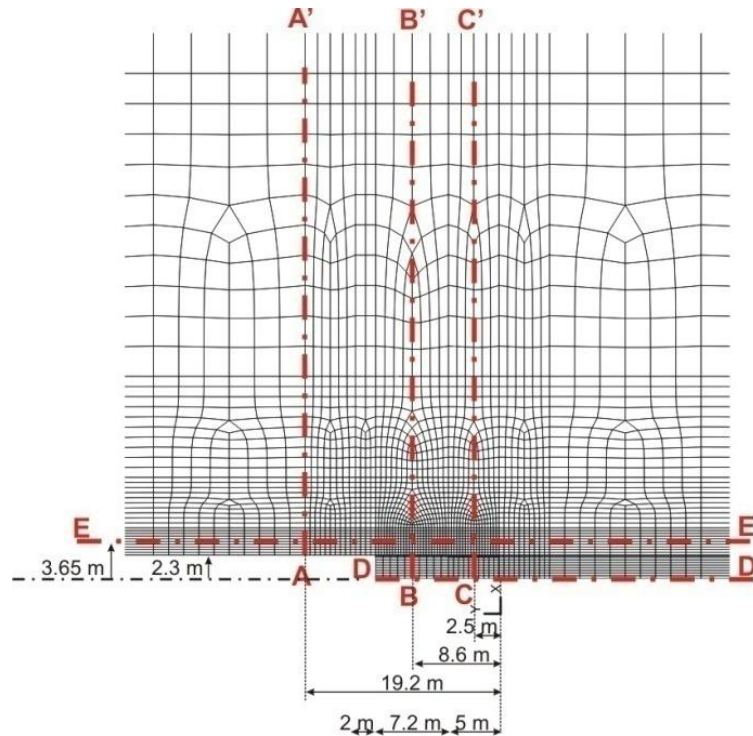
Perméabilité intrinsèque :

Argilite saine $4 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$

Argilite EDZ $4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$

Béton 10^{-18} ou 10^{-19} m^2

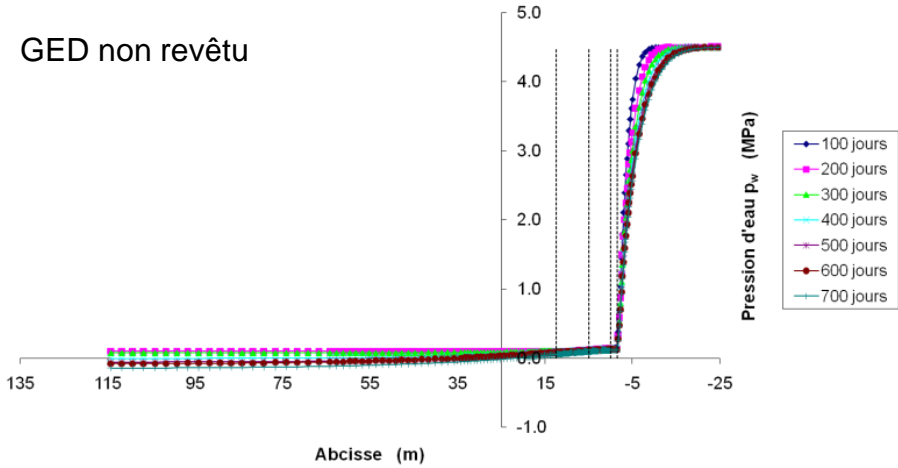
→ Béton hydrauliquement « isolant »



Pression d'eau en EDZ autour de la galerie GED :

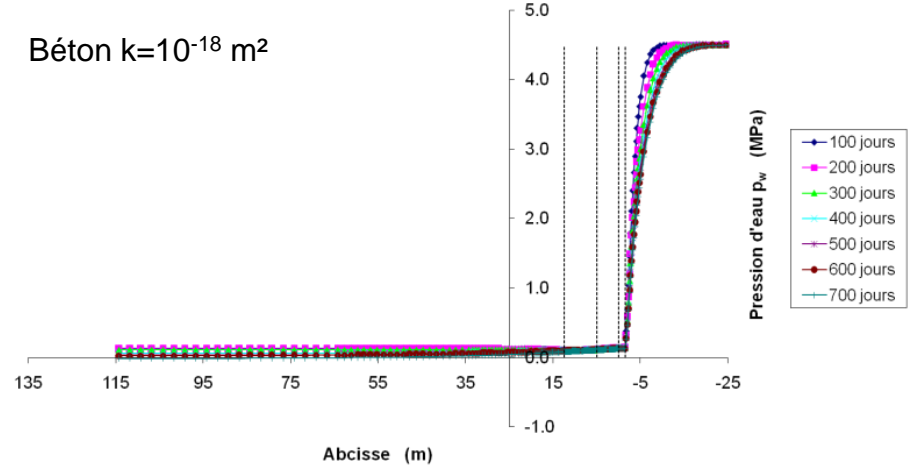
SDZ_12 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe EE'

GED non revêtu



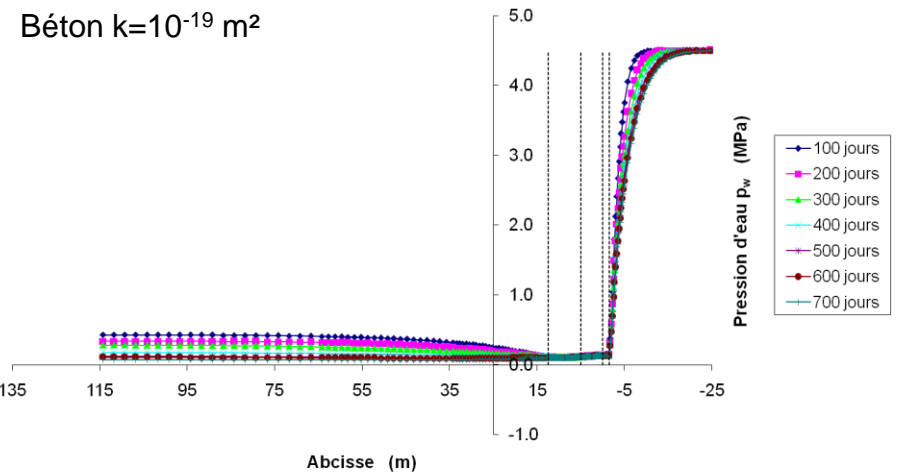
SDZ_30 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe EE'

Béton $k=10^{-18} \text{ m}^2$



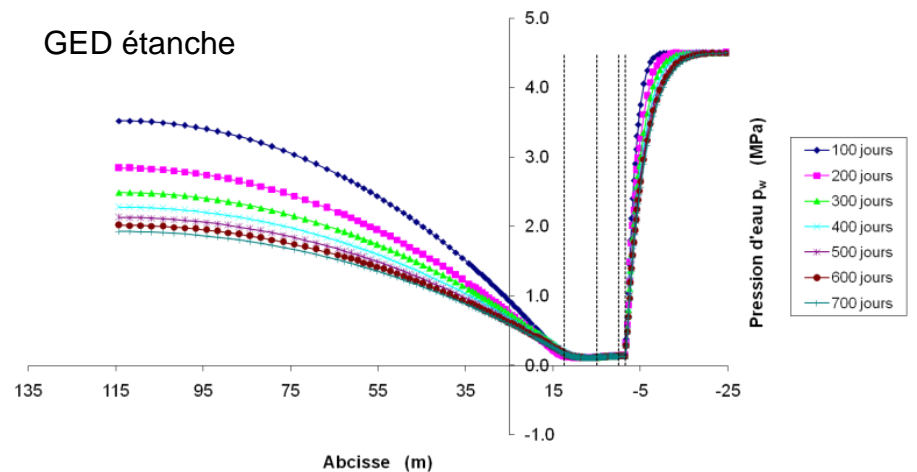
SDZ_34 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe EE'

Béton $k=10^{-19} \text{ m}^2$



SDZ_13 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe EE'

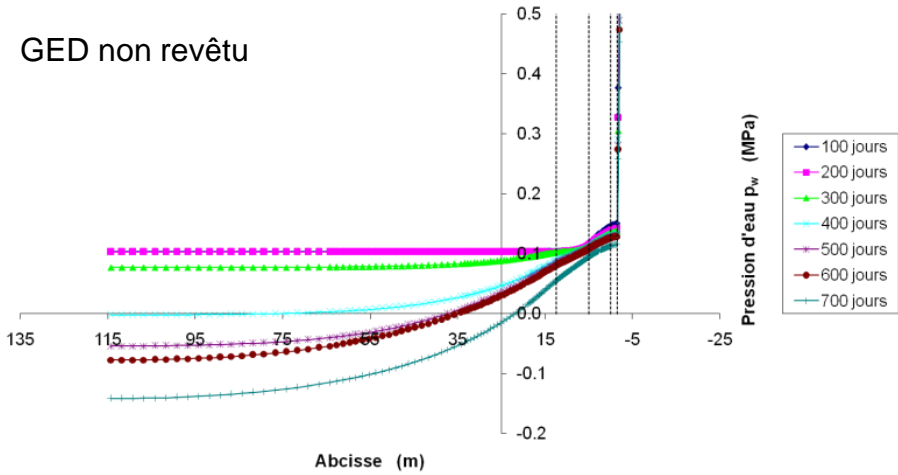
GED étanche



Pression d'eau en EDZ autour de la galerie GED :

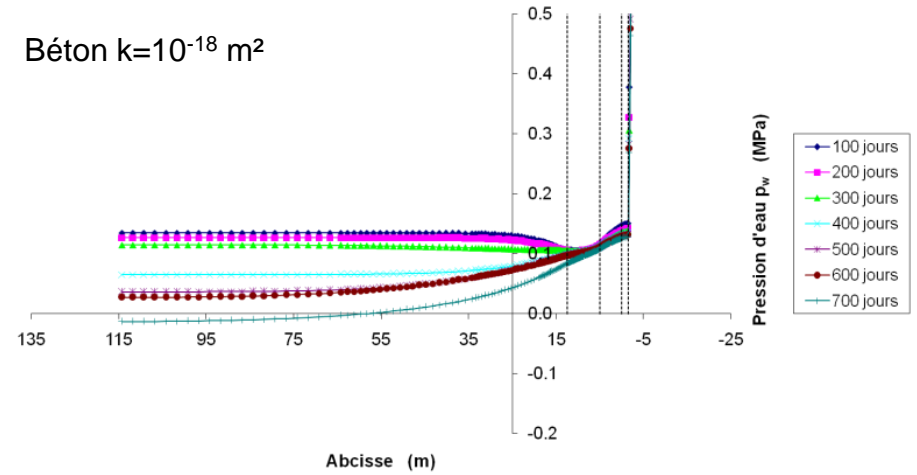
SDZ_12 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe EE'

GED non revêtu



SDZ_30 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe EE'

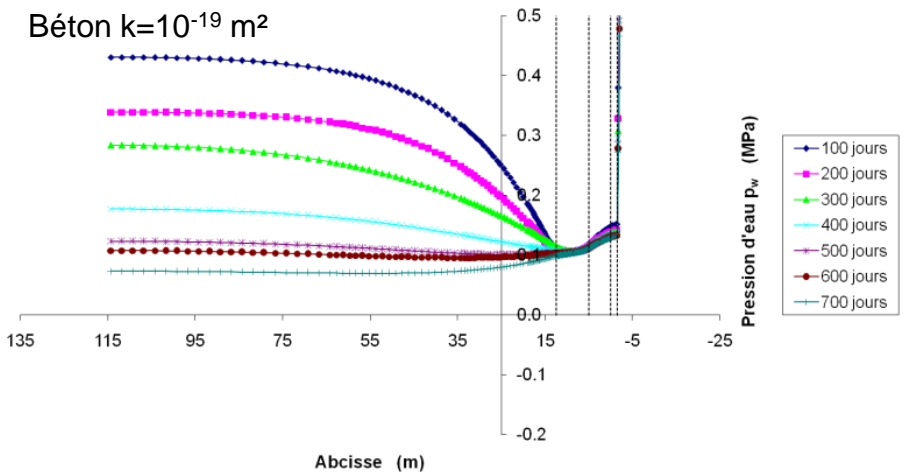
Béton $k=10^{-18} \text{ m}^2$



→ Besoin de mesures en forages GED pour déterminer la valeur de perméabilité,
 → Peu d'influence du revêtement

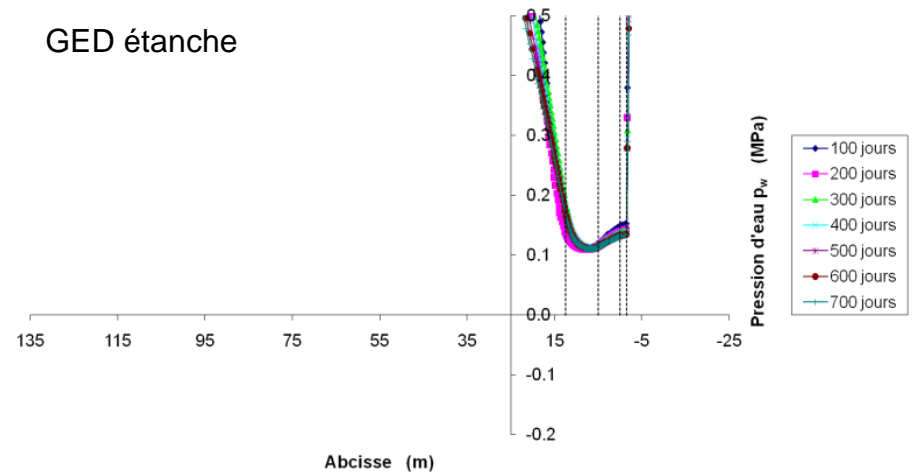
SDZ_34 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe EE'

Béton $k=10^{-19} \text{ m}^2$



SDZ_13 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe EE'

GED étanche

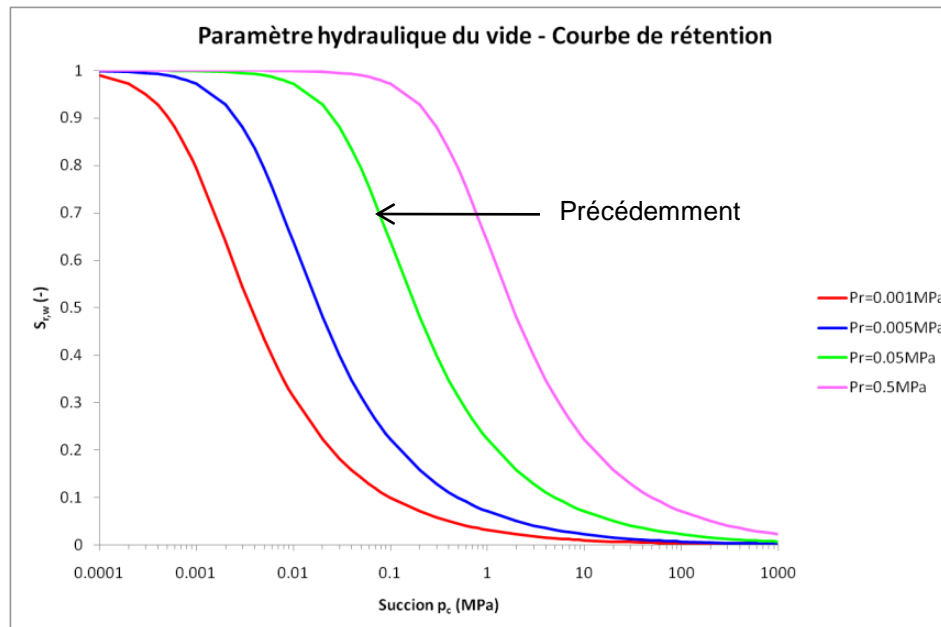


Humidité relative dans le vide de la zone SDZ

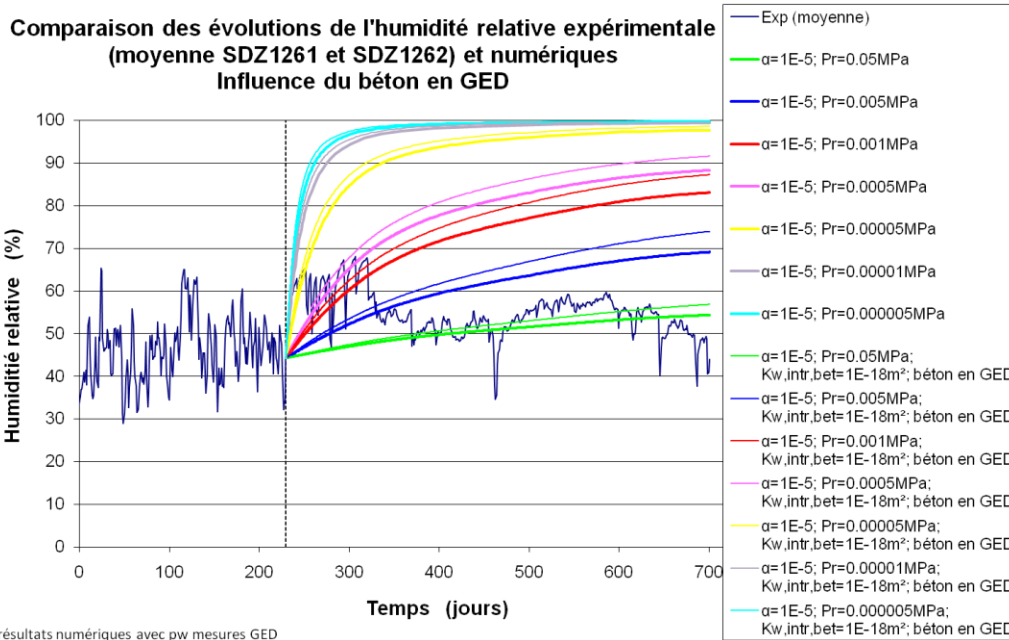
Objectifs :

- observer la remontée des courbes d'humidité relative (jusqu'à $H_r=100\%$) après fermeture du sas
- reproduire au mieux les mesures de H_r dans l'air en zone SDZ non revêtue.

Influence de la pression d'entrée d'air du vide situé en zone SDZ, Pr_{vide} et du revêtement en galerie GED :



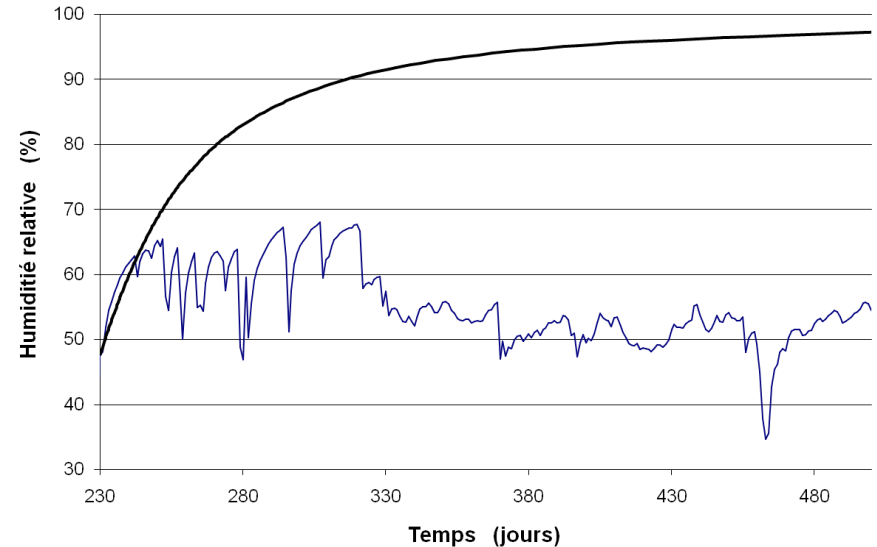
Comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale (moyenne SDZ1261 et SDZ1262) et numériques Influence du béton en GED



Pr_{vide} : influence
 Revêtement : peu d'influence

Comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale (moyenne SDZ1261 et SDZ1262) et numériques

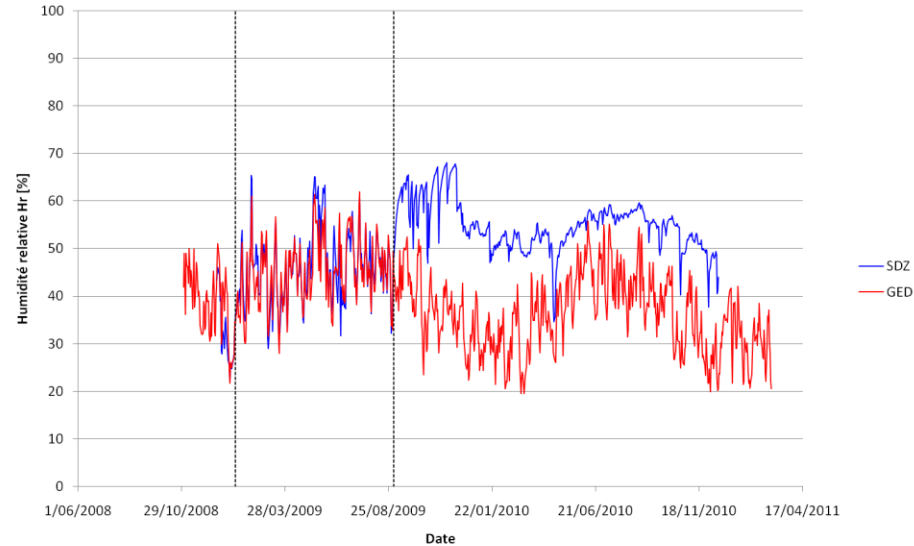
$\alpha_{sdz} = 10^{-5}$, $Pr_{vide} = 50 \text{ Pa}$, $k_{intr,bet} = 10^{-18} \text{ m}^2$ et $p_{w,vide,initial} = -100 \text{ MPa}$



Fuite à travers le sas :

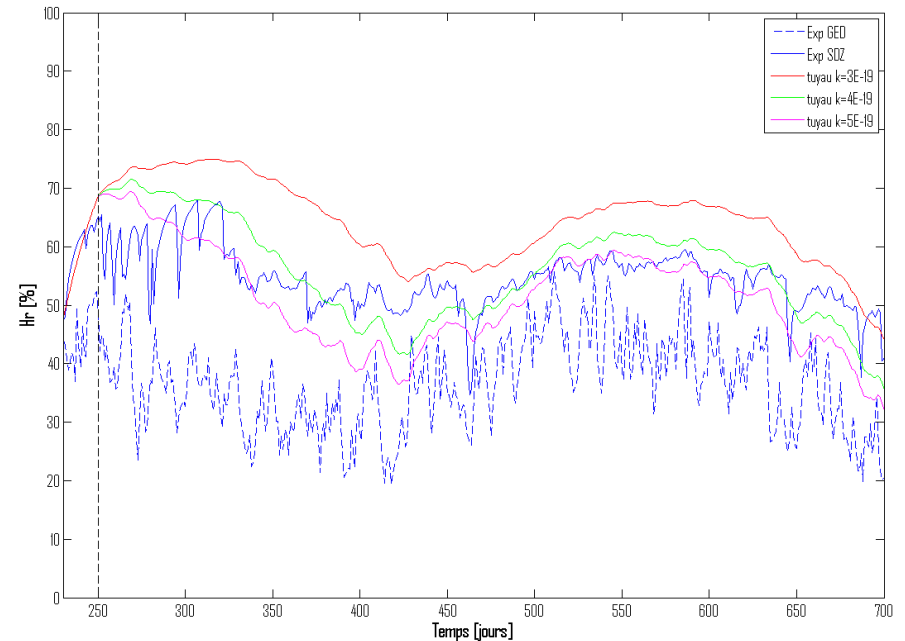
Lien entre Hr en GED et en SDZ → fuite

Evolution de l'humidité relative en SDZ et GED



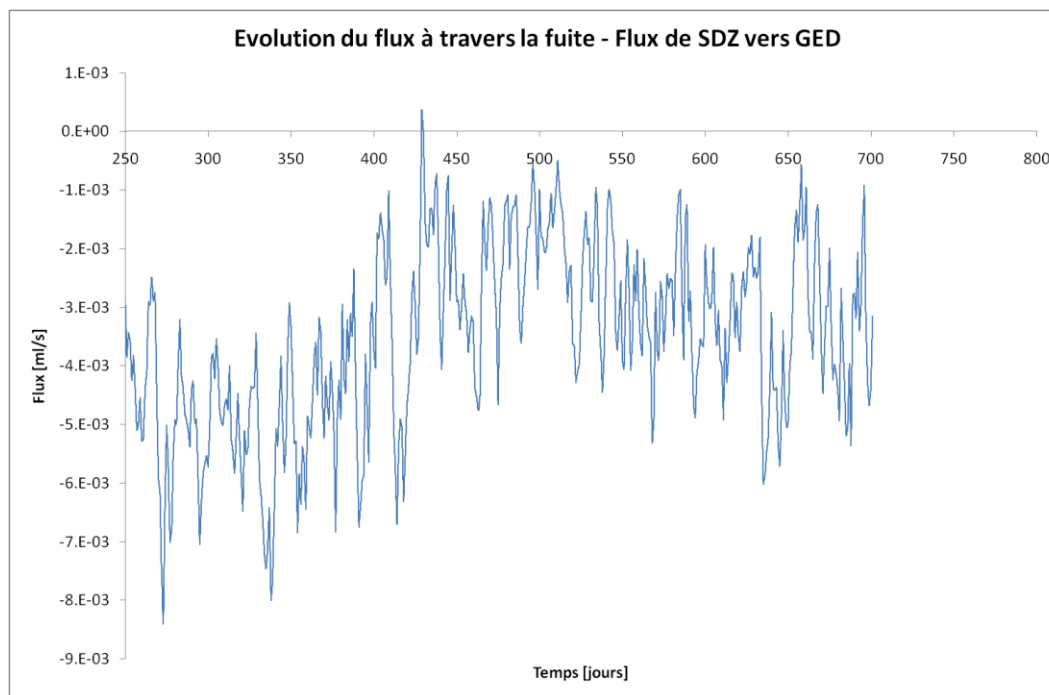
Fuite à partir de 250 j

Evolution de Hr dans le vide



Flux à travers la fuite (cas intermédiaire) :

- p_w en GED < p_w en SDZ
- flux négatif, dirigé de SDZ vers GED
- flux total de 250 à 700 j = 138.3 litres
- flux moyen = env. 0.3 l/j

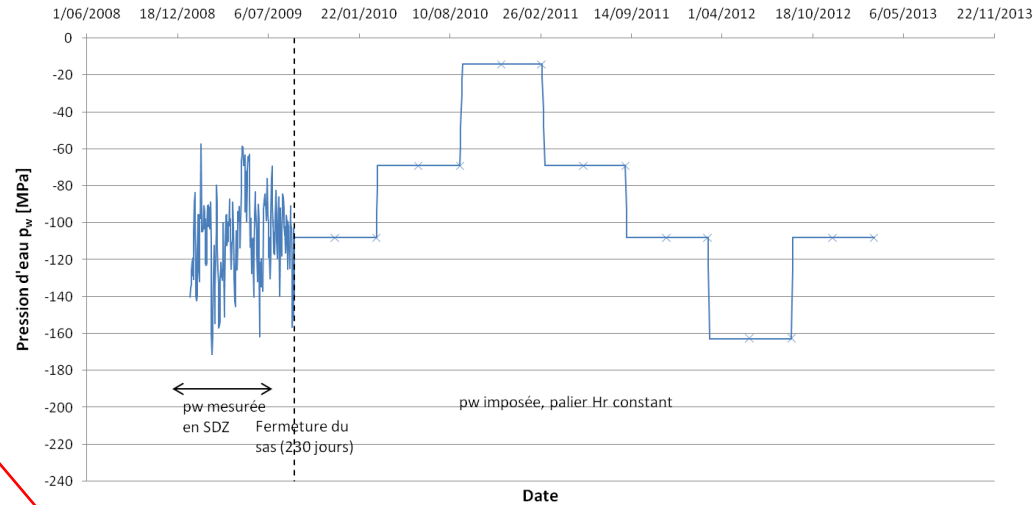


Cycle de saturation/désaturation dans la zone SDZ

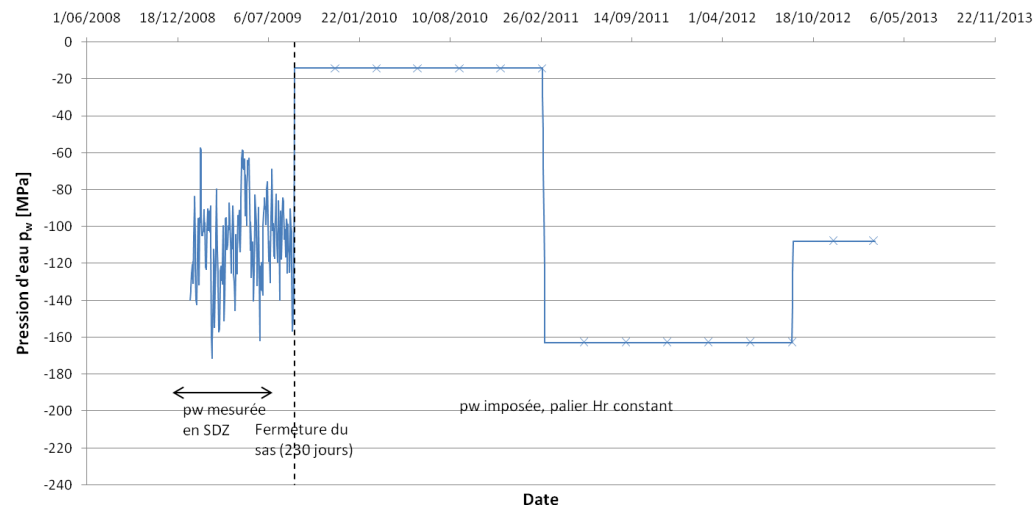
Soumettre la zone SDZ à des paliers de ventilation à T et H_r constants. $T=20^\circ\text{C}$.
 $\alpha_{\text{sdz}}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

Date début	Date fin	Paliers de 6 mois		Paliers de 18 mois	
		H_r [%]	p_w [MPa]	H_r [%]	p_w [MPa]
2/09/2009	1/03/2010	45	-107.95	90	-14.16
2/03/2010	1/09/2010	60	-69.02	90	-14.16
2/09/2010	1/03/2011	90	-14.16	90	-14.16
2/03/2011	1/09/2011	60	-69.02	30	-162.82
2/09/2011	1/03/2012	45	-107.95	30	-162.82
2/03/2012	1/09/2012	30	-162.82	30	-162.82
2/09/2012	1/03/2013	45	-107.95	45	-107.95

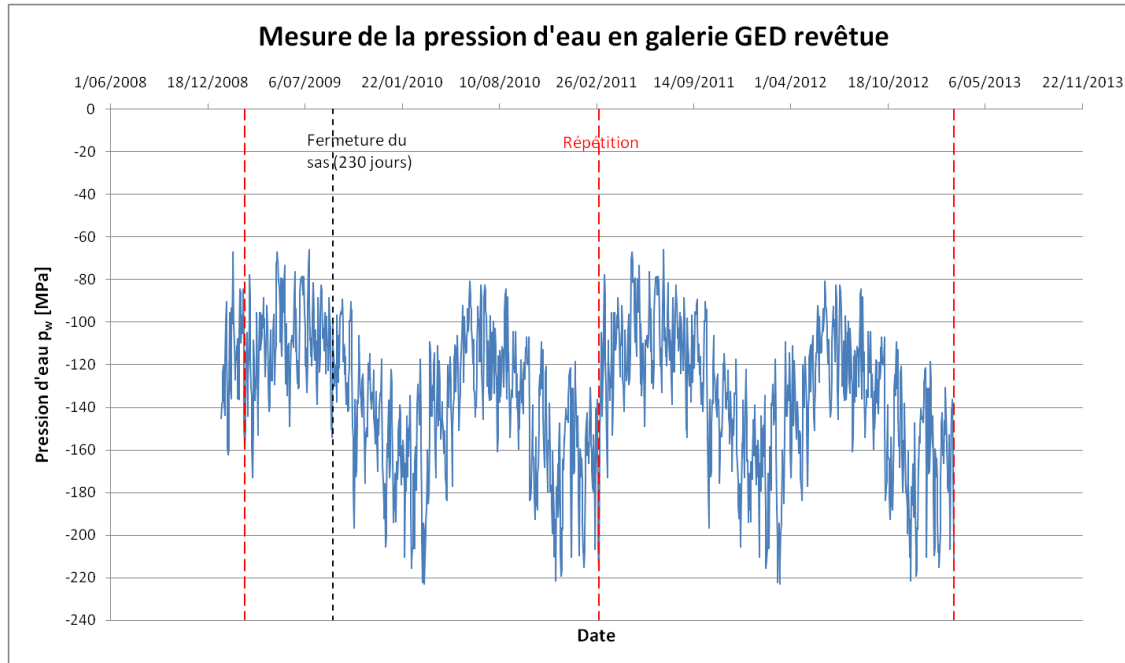
Imposition de la pression d'eau en zone SDZ non revêtue, palier de Hr constant



Imposition de la pression d'eau en zone SDZ non revêtue, palier de Hr constant



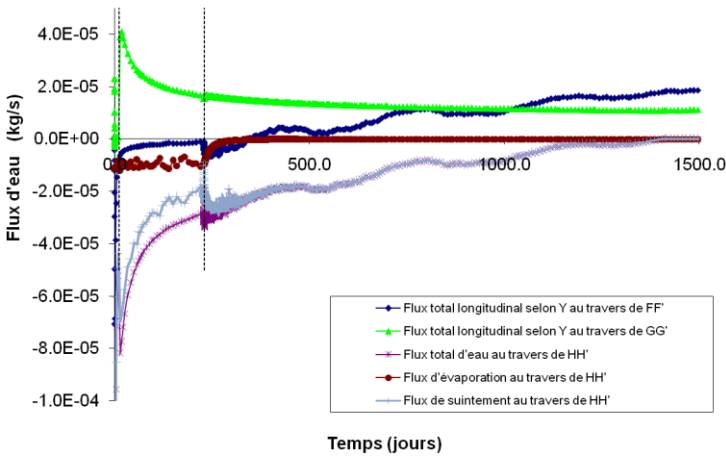
GED : p_w imposée, répétition des mesures



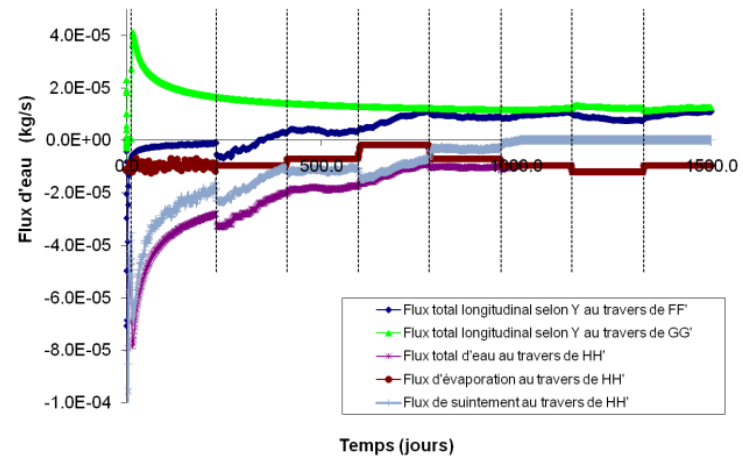
Modèle avec un revêtement en béton en galerie GED : $\alpha_{GED} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, $k_{\text{intr,bet}} = 10^{-18} \text{ m}^2$

Flux d'eau en EDZ autour de SDZ (longitudinaux)

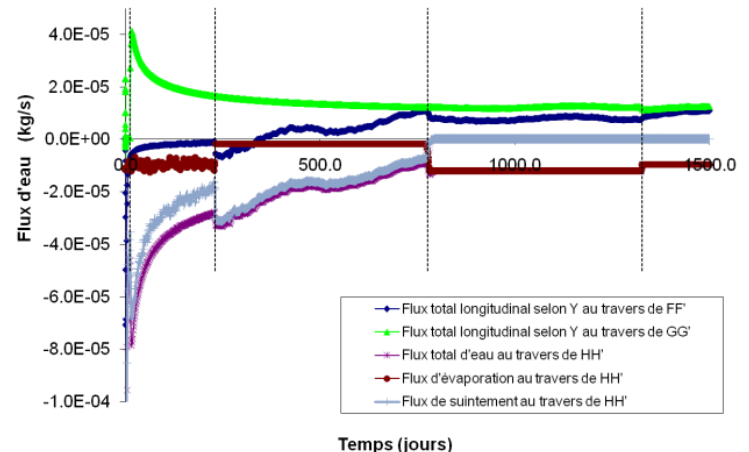
Pas d'imposition en SDZ, pas de fuite ($Pr_{vide} = 10Pa$)
 SDZ_45v2 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'



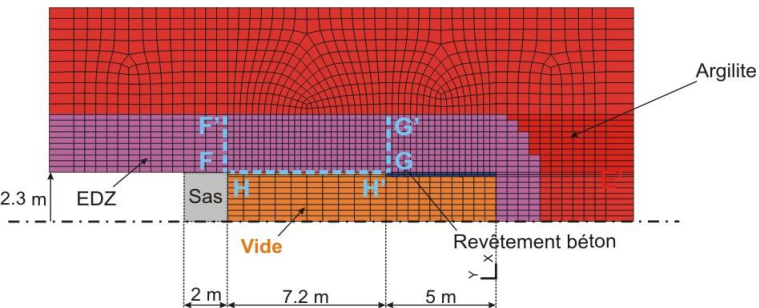
Paliers de 6 mois
 SDZ_70 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'



Paliers de 18 mois
 SDZ_80 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'



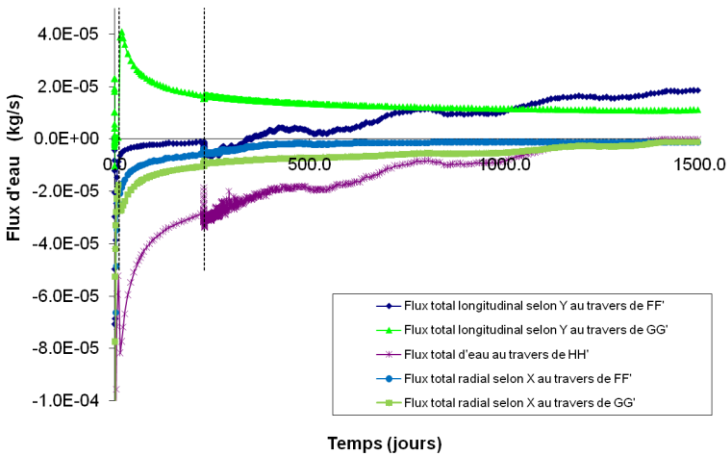
- Faible influence des paliers de ventilation avant 800 jours.
- Les flux au travers de FF' à long terme et les flux d'évaporation sont modifiés.
- L'évaporation domine à long terme.



Flux d'eau en EDZ autour de SDZ (longitudinaux et radiaux)

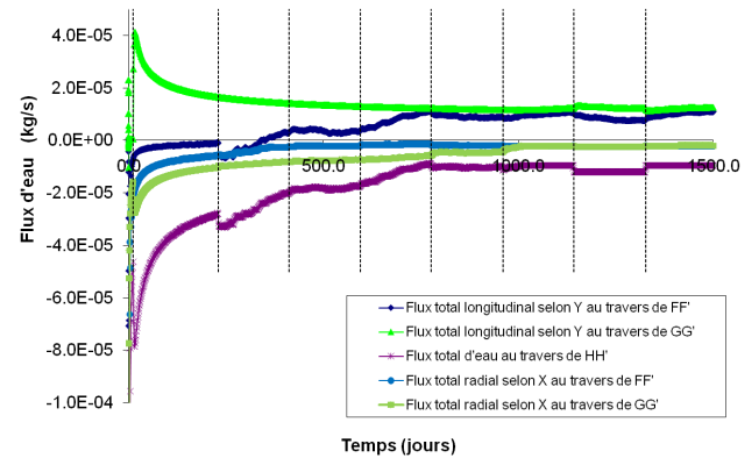
Pas d'imposition en SDZ, pas de fuite

SDZ_45v2 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'



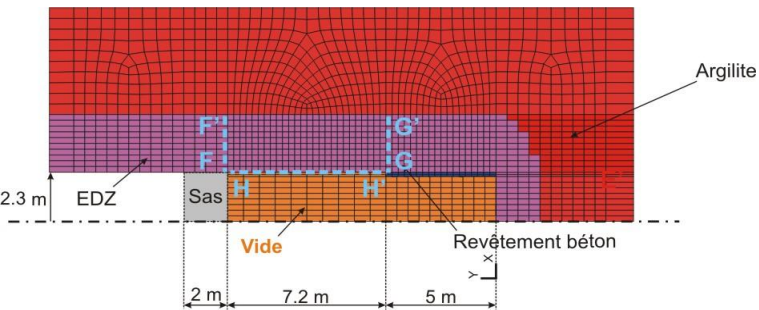
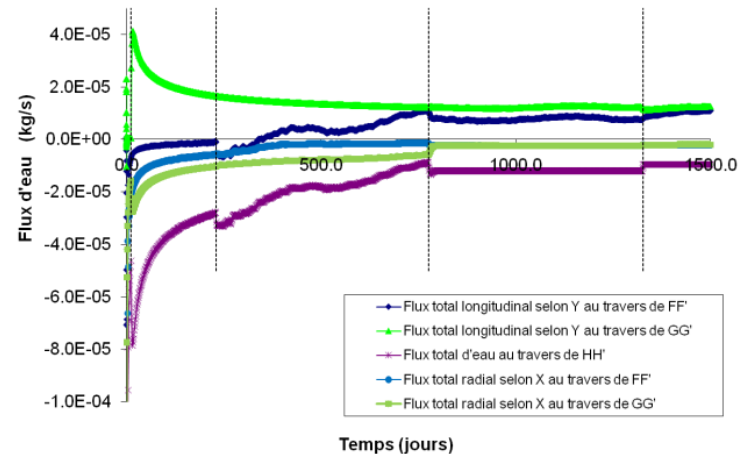
Paliers de 6 mois

SDZ_70 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'



Paliers de 18 mois

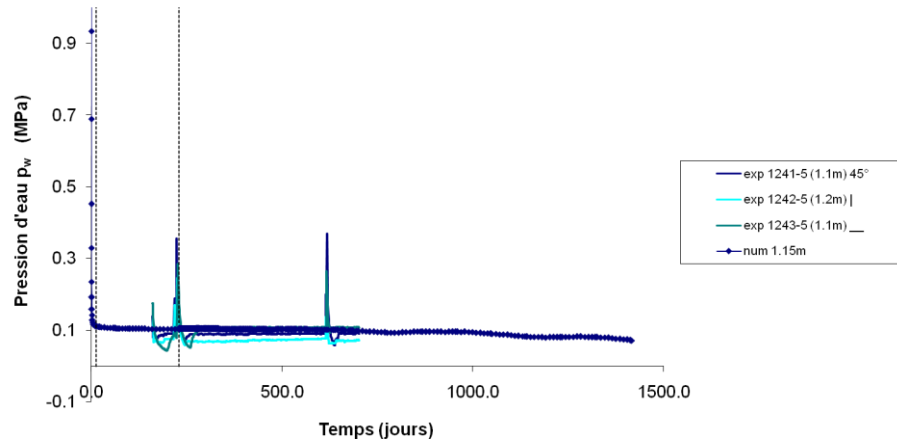
SDZ_80 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'



Pression d'eau en EDZ autour de SDZ (1.1 m de la paroi) :

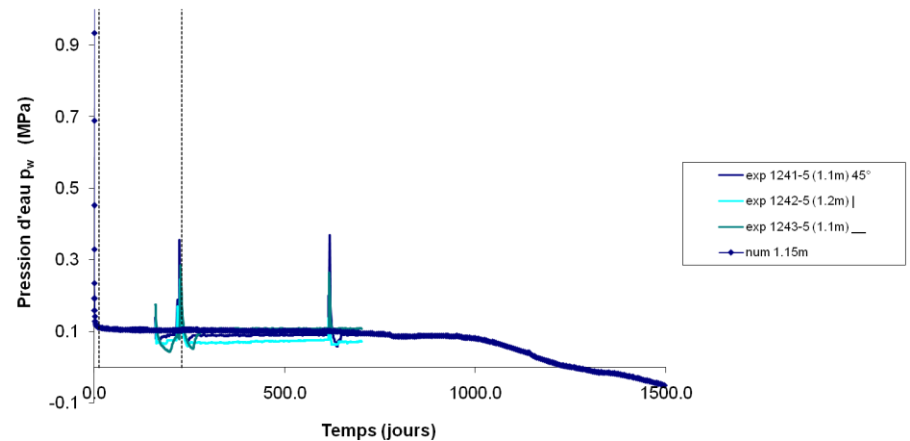
Pas d'imposition en SDZ, pas de fuite

SDZ_45v2 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 1.1-1.2 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)



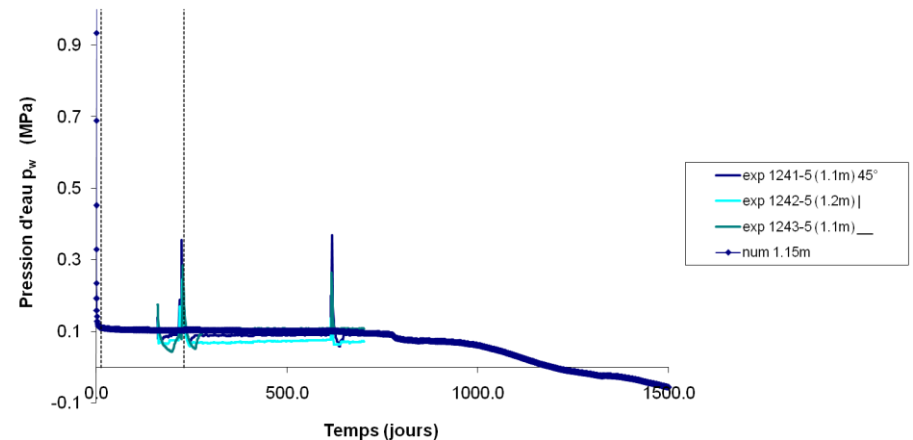
Paliers de 6 mois

SDZ_70 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 1.1-1.2 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)



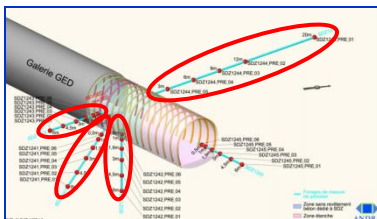
Paliers de 18 mois

SDZ_80 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 1.1-1.2 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)



p_w à 1.1-1.2m de la paroi de la galerie en zone SDZ

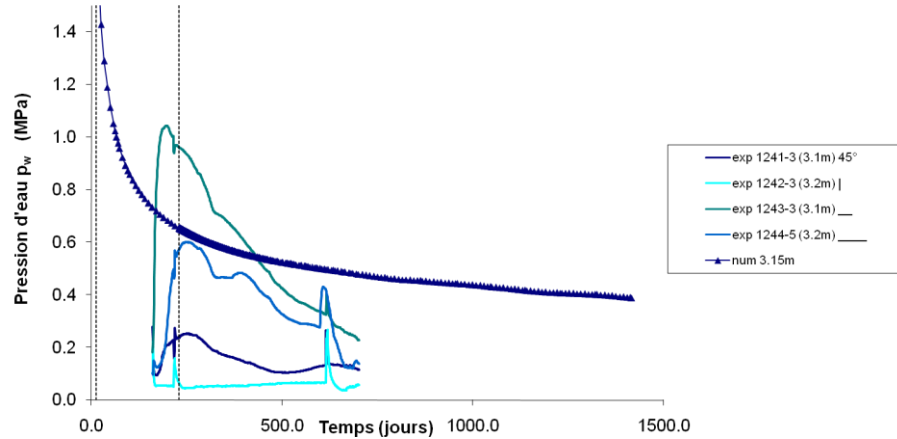
A long terme et proche de la paroi on observe une diminution de p_w



Pression d'eau au-delà de EDZ autour de SDZ (3.1 m de la paroi) :

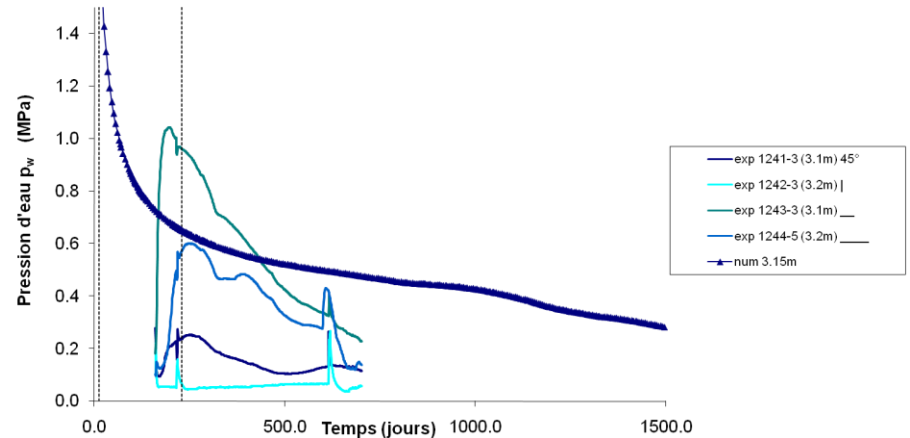
Pas d'imposition en SDZ, pas de fuite

SDZ_45v2 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 3.1-3.2 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)



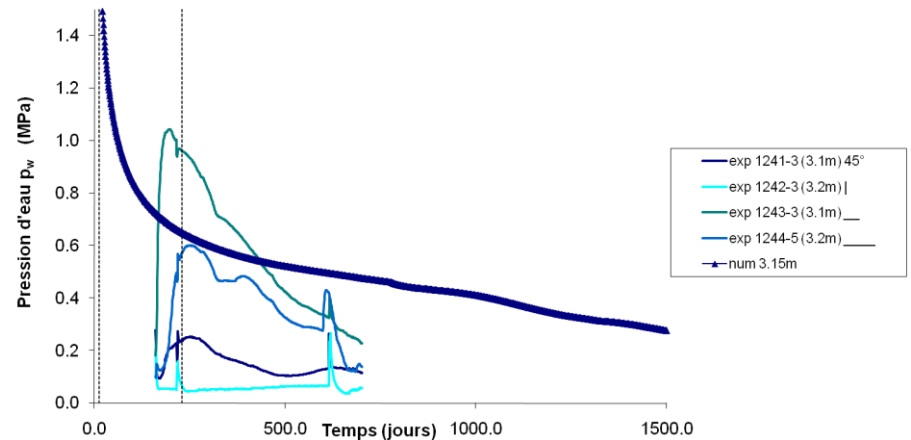
Paliers de 6 mois

SDZ_70 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 3.1-3.2 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)



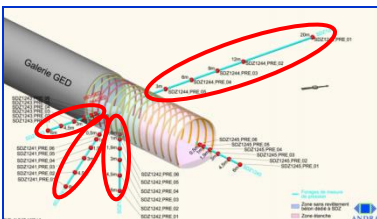
Paliers de 18 mois

SDZ_80 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 3.1-3.2 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)



p_w à 3.1-3.2m de la paroi de la galerie en zone SDZ

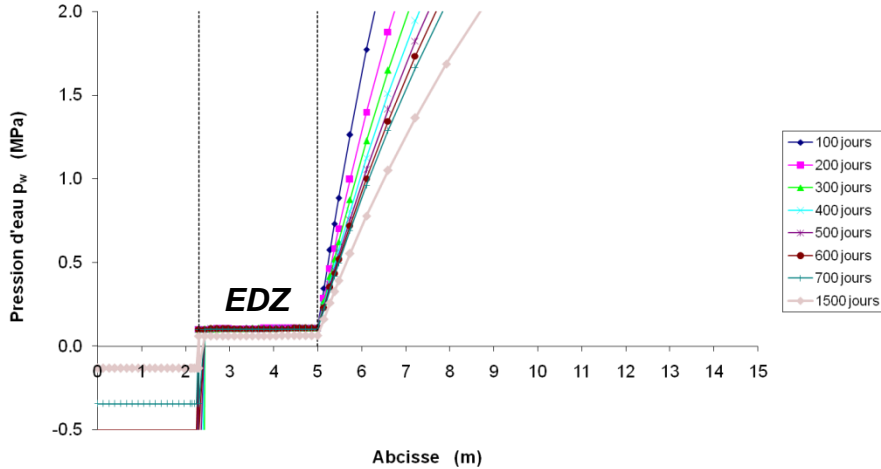
Faible diminution de p_w visible jusqu'à env. 3.5 m autour de la galerie (EDZ jusqu'à 2.7m), diminution de p_w localisée dans EDZ.



Pression d'eau en EDZ autour de SDZ (coupe radiale) :

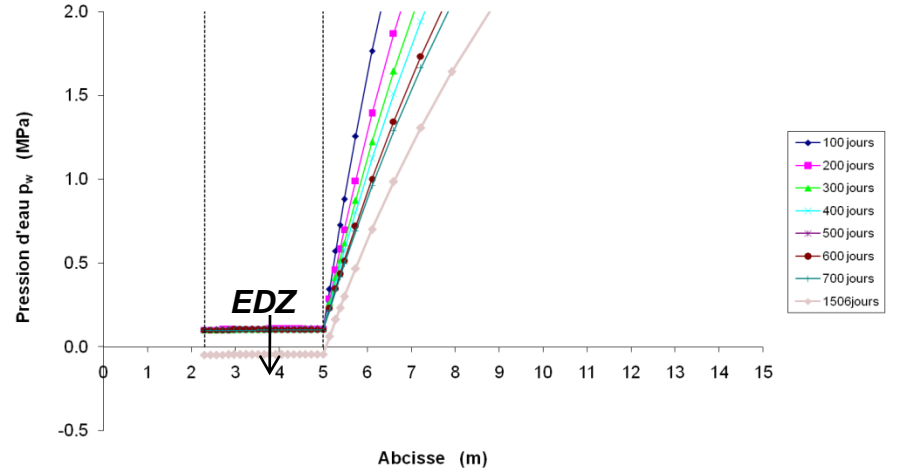
Pas d'imposition en SDZ, pas de fuite

SDZ_45v2 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe BB'

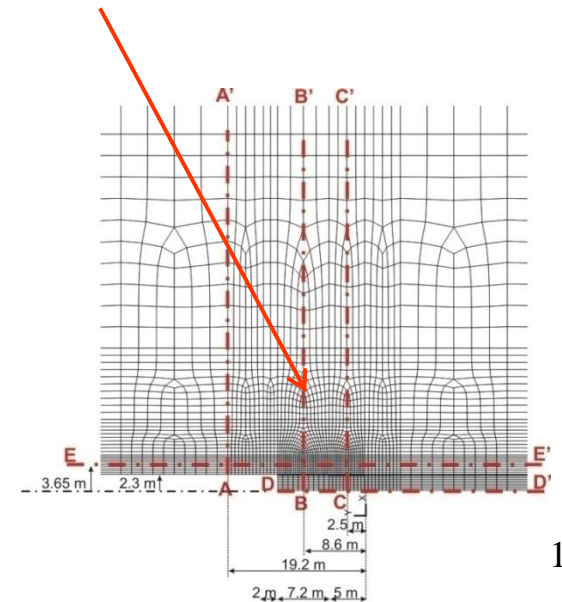


Paliers de 6 mois

SDZ_70 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe BB'



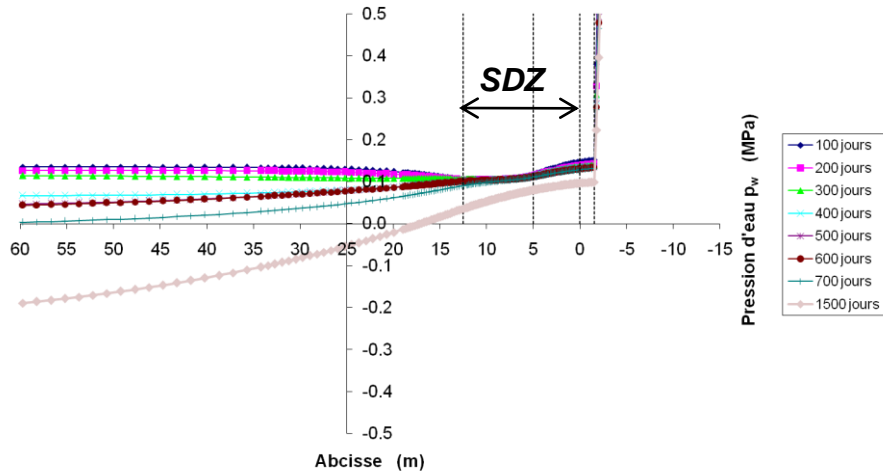
Diminution de p_w dans EDZ
 $p_w < p_{atm} \rightarrow$ suintement = 0



Pression d'eau en EDZ autour de SDZ (coupe axiale) :

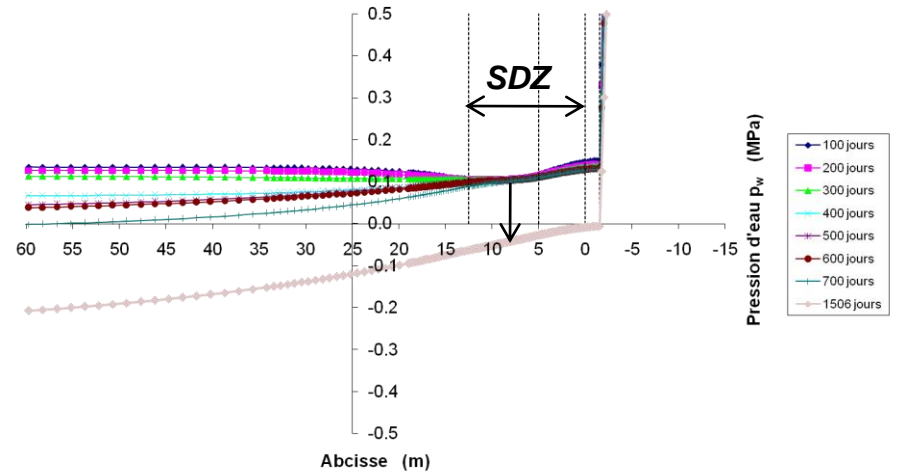
Pas d'imposition en SDZ, pas de fuite

SDZ_45v2 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe EE'

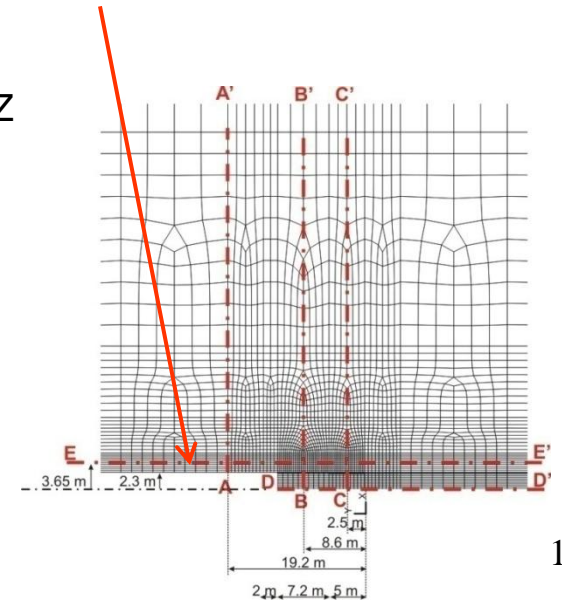


Paliers de 6 mois

SDZ_70 - Evolution de la pression d'eau p_w - Coupe EE'



Diminution de p_w dans EDZ autour de SDZ
 $p_w < p_{atm} \rightarrow$ suintement = 0



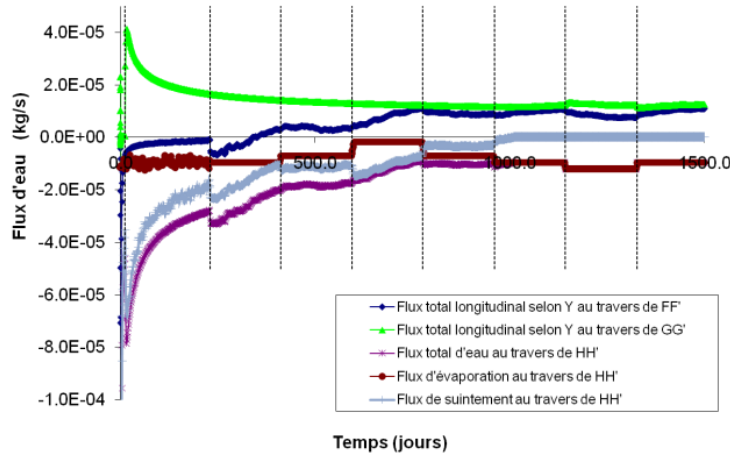
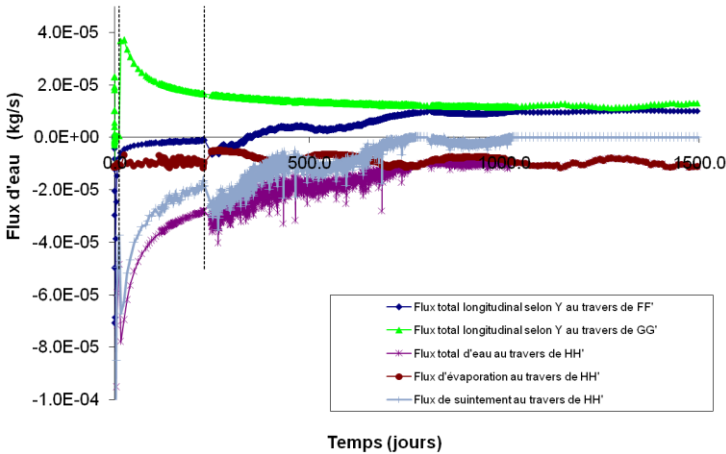
Cas avec fuite (imposition de p_w non contrôlée en SDZ) :

Pas d'imposition en SDZ, avec fuite

Paliers de 6 mois

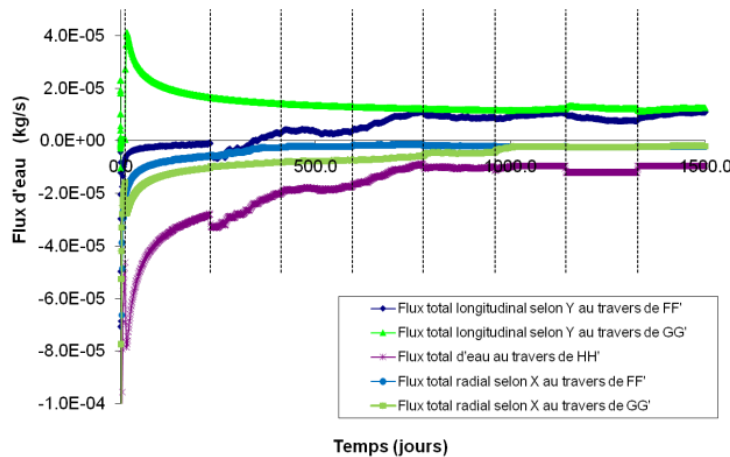
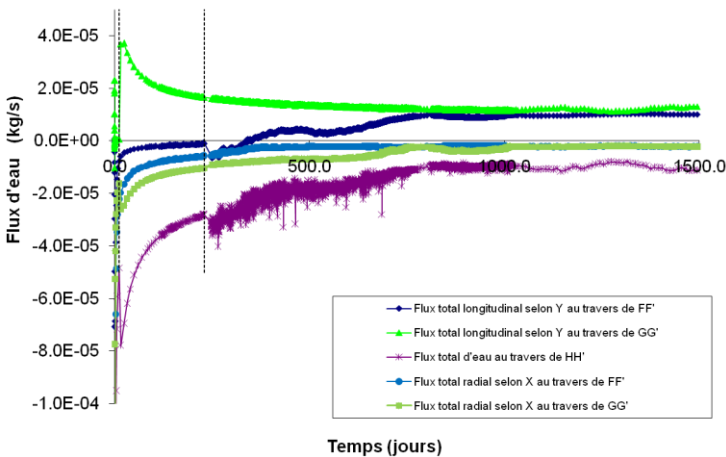
SDZ_61 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'

SDZ_70 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'



SDZ_61 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'

SDZ_70 - Axisymétrique - Evolution temporelle des différents flux d'eau au travers des sections FF', GG' et HH'



Ventilation contrôlée ou non en SDZ :

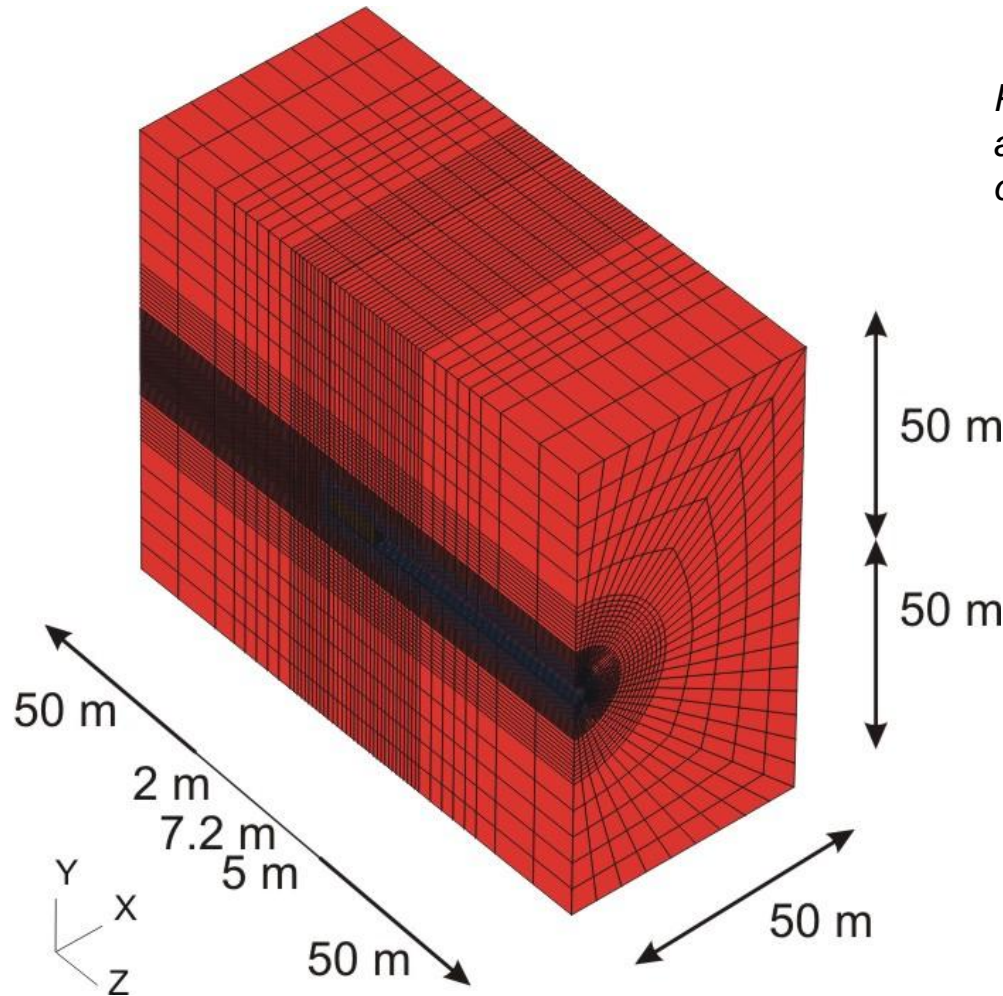
- Mêmes observations pour les flux et la diminution de p_w proche de la paroi (en EDZ).

- Effet d'une ventilation à long terme, pas d'une ventilation contrôlée.

- Principes de l'expérience in-situ
- Modélisations numériques envisagées
- Paramètres des modèles constitutifs utilisés
- 2D état plan écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 2D état plan hydromécanique: - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Etat axisymétrique : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 3D écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Conclusions et perspectives

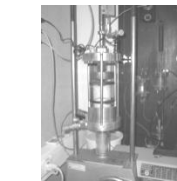
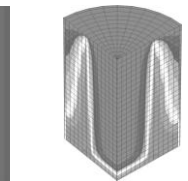
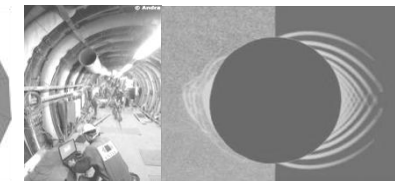
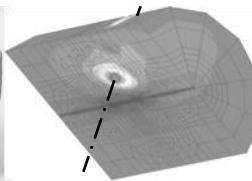
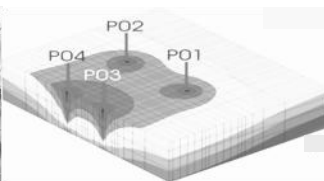
Modélisation 3D – Ecoulement pur :

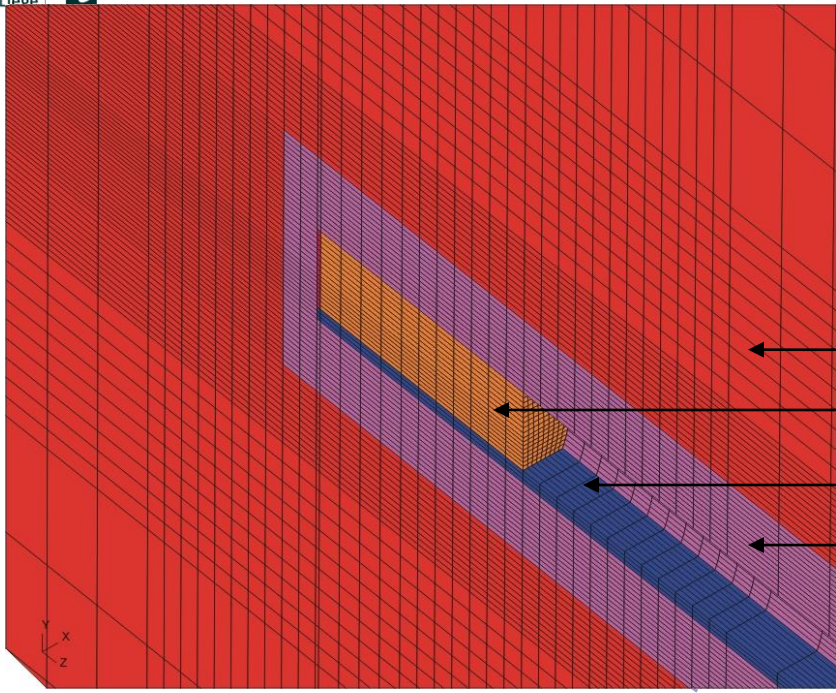
Vue globale



P_w initiale de 4.5 MPa, fixée aux limites lointaines (50 m de la galerie)

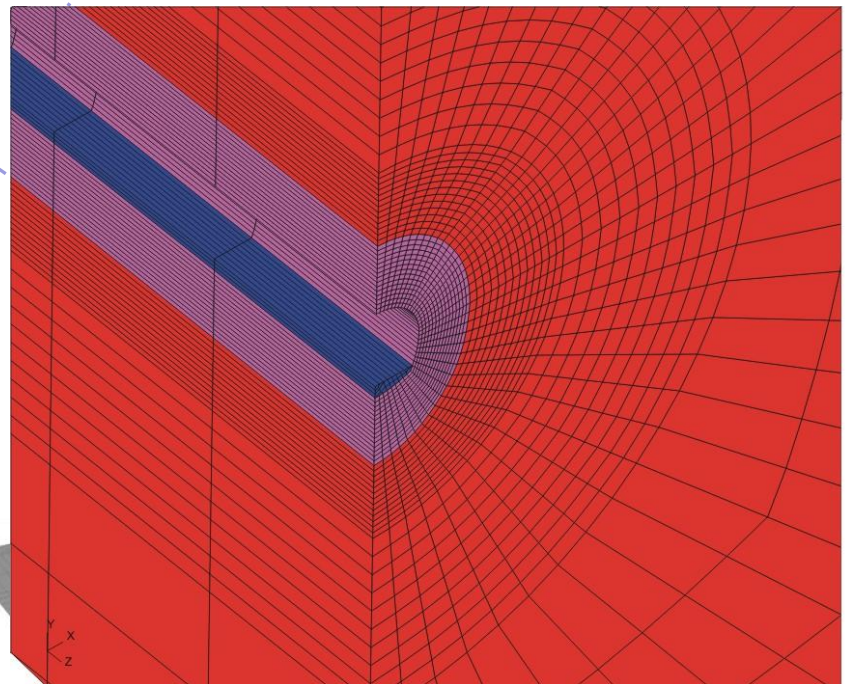
93229 nœuds ;
84380 éléments brique-8 nœuds ;
87057 équations





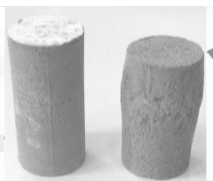
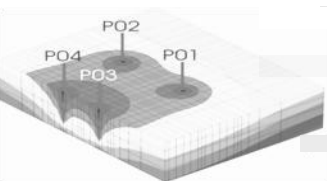
Zoom - Zone d'essai

- ← **Argilite** ($k_{iso} = 4 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$)
- ← **Vide** ($n=1.25, m=0.2, P_r=0.5\text{MPa}$)
- ← **Radier** ($k_{iso} = 1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$)
- ← **EDZ** ($k_{iso} = 4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$,
épaisseur vert - horiz = 3,7 - 2,7 m)



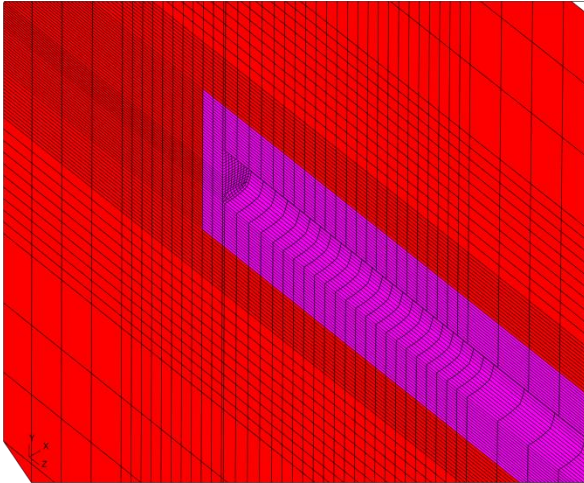
Parois étanche : fond de galerie et paroi SDZ de la zone revêtue

Revêtement en béton : non



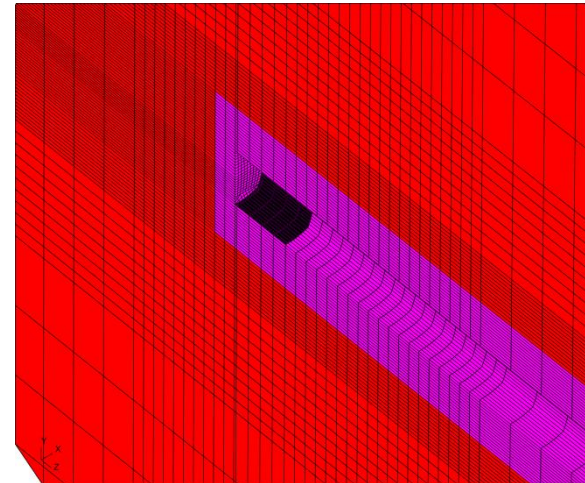
Phasage :

De 0 à 12 jours



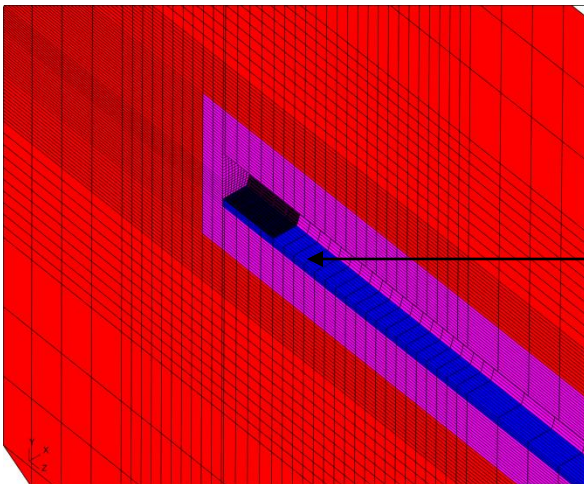
FMIVP sur les parois de la galerie

De 12 à 36 jours



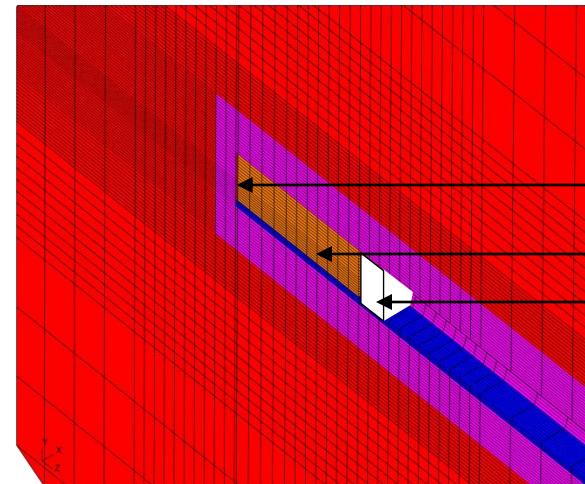
Revêtement étanche
→ FMIVP retirés

De 36 à 230 jours



Radier
→ FMIVP sous radier retirés
→ FMIVP ajoutés au dessus du radier

De 230 à 701 jours

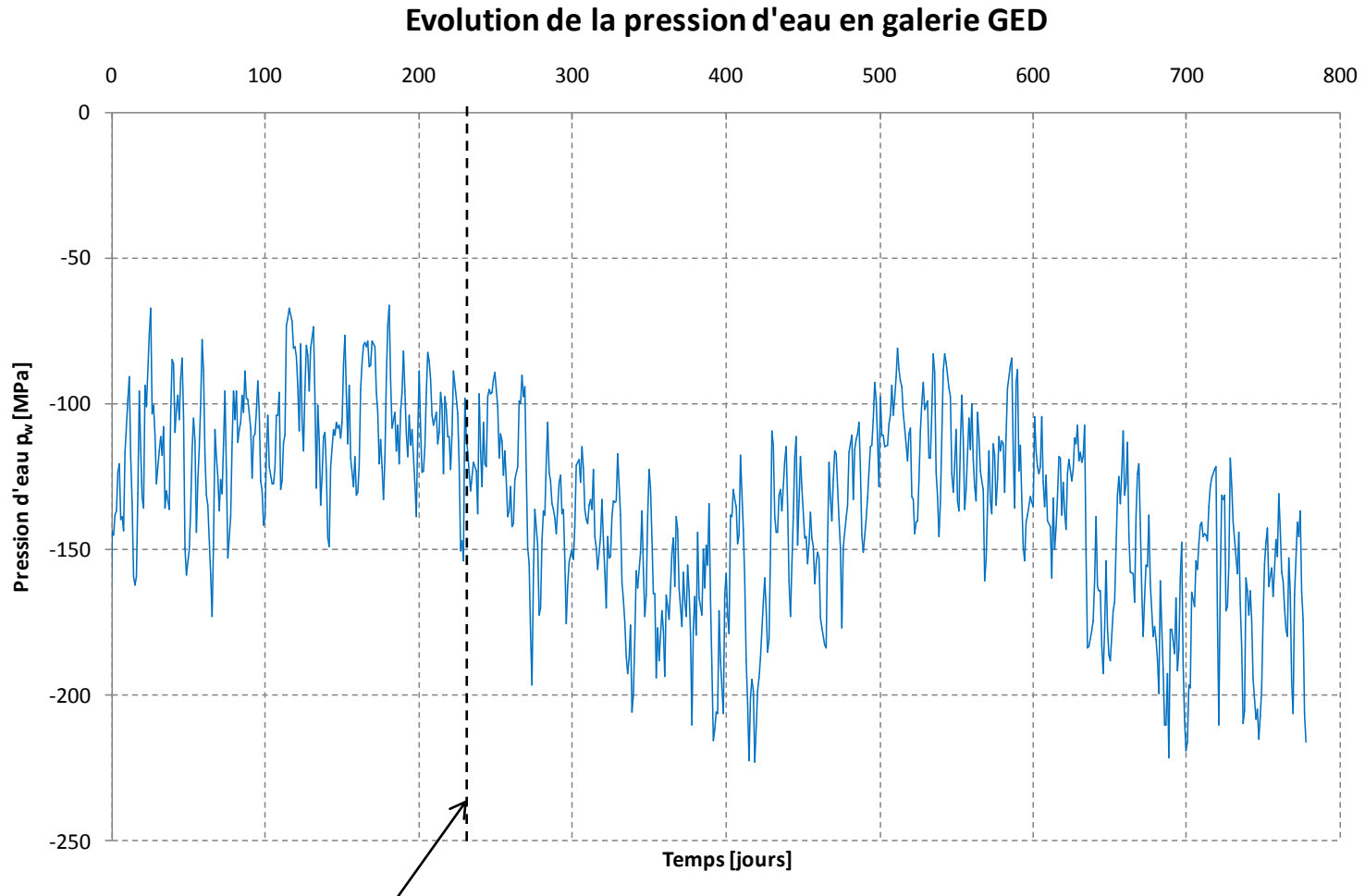


Matr. Imperméable au fond
Vide
Sas

Sas étanche
→ FMIVP retirés

Mise en place du vide à $p_w = -110$ MPa (Hr \approx 45%)

Imposition de p_w en GED (éléments FMIVP) :



Fermeture du sas = 230j

Temps > 230j : ventilation en GED mais arrêtée dans la zone SDZ

- Principes de l'expérience in-situ
- Modélisations numériques envisagées
- Paramètres des modèles constitutifs utilisés
- 2D état plan écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 2D état plan hydromécanique: - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Etat axisymétrique : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 3D écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Conclusions et perspectives

Cas 1

Suintement : $K = 10^{-13} \text{ s.kg}^{-1}$

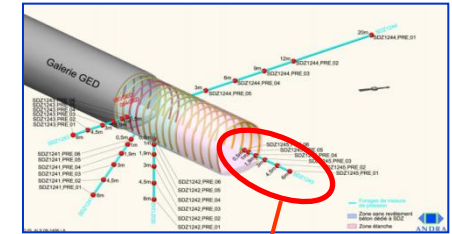
Evaporation GED : $\alpha = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

Evaporation SDZ : $\alpha = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$

EDZ : $k_{iso} = 4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ de 2,3 à 5,0 / 6,0 m (EDZ elliptique = 2,7 / 3,7 m)

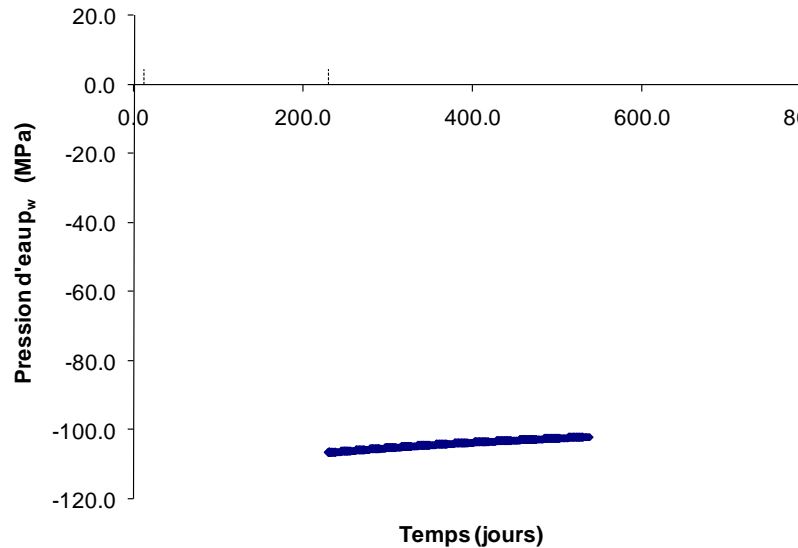
Argilite : $k_{iso} = 4 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ de 5,0 à 50 m

Temps de calcul pour 701 j de simulation : 11 à 12 jours

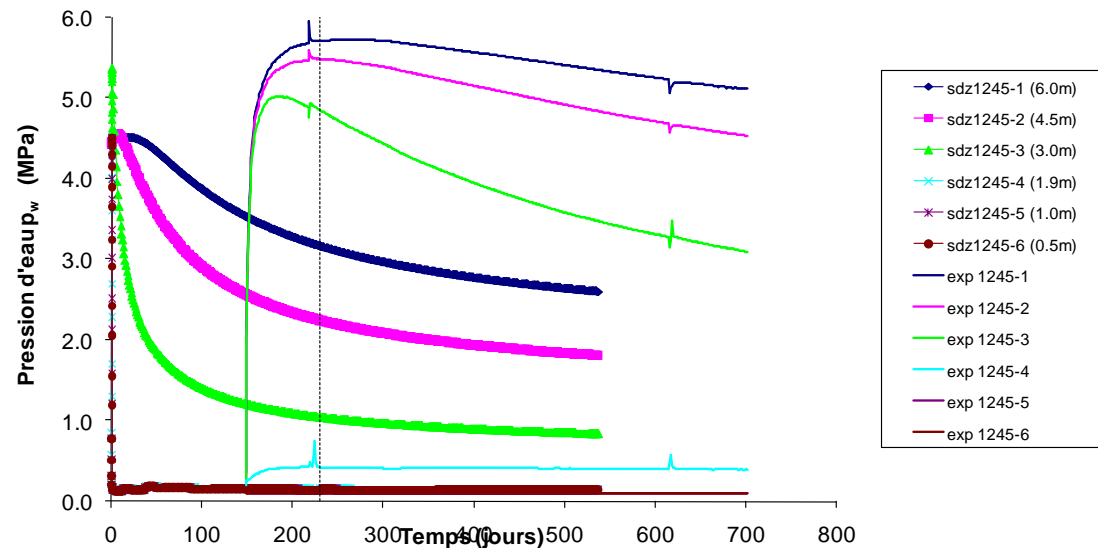


Longitudinalement

SDZ3D_03v2 - Evolution de la pression d'eau p_w au centre du vide (au niveau des forages SDZ, entre les cintres 63 et 64, $y=10.2\text{m}$)

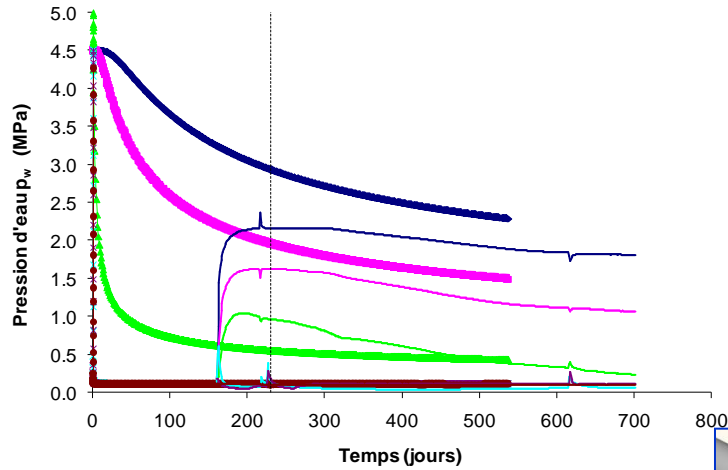


SDZ3D_03v2 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1245 (horizontal au front de la galerie)

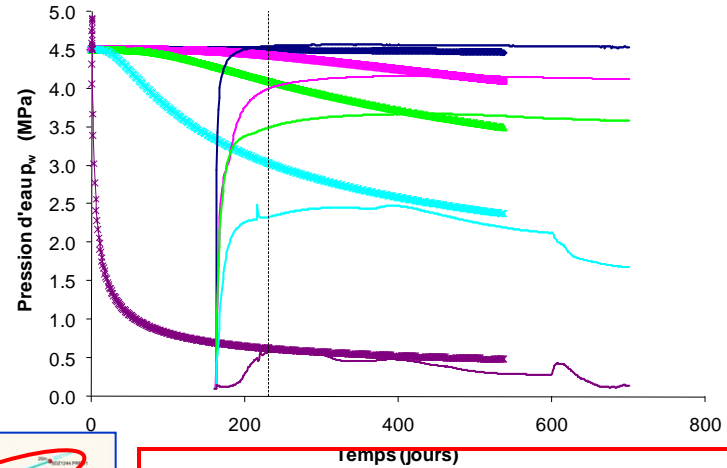


SDZ3D_03v2 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1243 (horizontal)

SDZ3D_03v2 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1244 (horizontal)



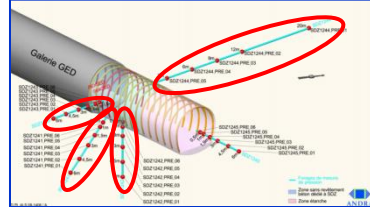
- sdz1243-1 (6.0m)
- sdz1243-2 (4.6m)
- sdz1243-3 (3.1m)
- sdz1243-4 (2.0m)
- sdz1243-5 (1.1m)
- sdz1243-6 (0.6m)
- exp 1243-1
- exp 1243-2
- exp 1243-3
- exp 1243-4
- exp 1243-5
- exp 1243-6



- sdz1244-1 (20.1m)
- sdz1244-2 (12.2m)
- sdz1244-3 (9.2m)
- sdz1244-4 (6.2m)
- sdz1244-5 (3.2m)
- exp 1244-1
- exp 1244-2
- exp 1244-3
- exp 1244-4
- exp 1244-5

Cas 1

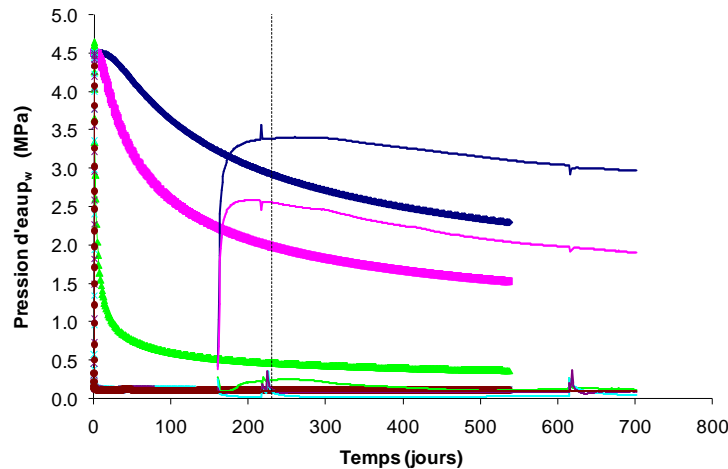
Radialement



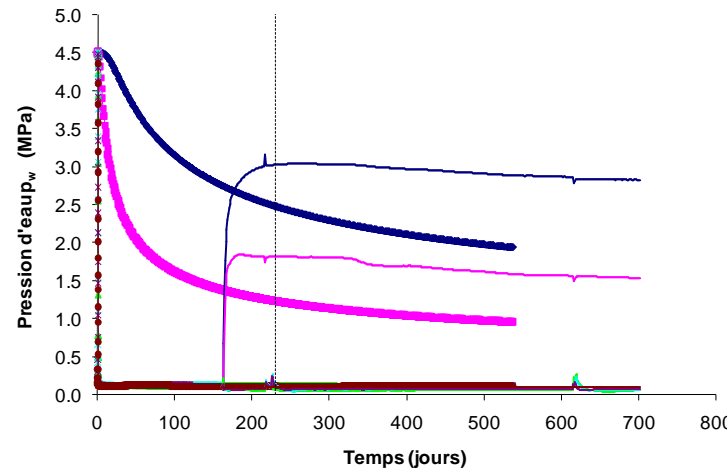
→ P_w +/- correcte en zone lointaine
 P_w +/- correcte à long terme, horizontalement
 P_w sous estimées verticalement, anisotropie de k pas prise en compte

SDZ3D_03v2 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1241 (45° descendant)

SDZ3D_03v2 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage SDZ1242 (vertical descendant)



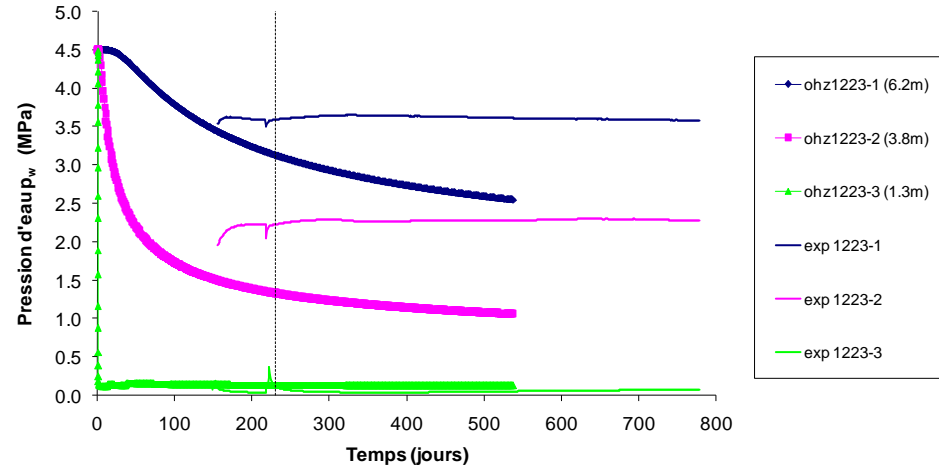
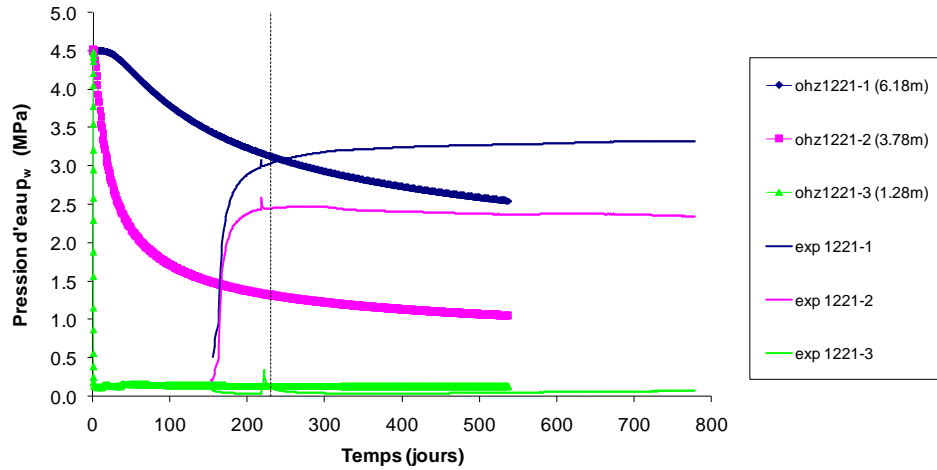
- sdz1241-1 (6.0m)
- sdz1241-2 (4.6m)
- sdz1241-3 (3.1m)
- sdz1241-4 (2.0m)
- sdz1241-5 (1.1m)
- sdz1241-6 (0.6m)
- exp 1241-1
- exp 1241-2
- exp 1241-3
- exp 1241-4
- exp 1241-5
- exp 1241-6



- sdz1242-1 (6.1m)
- sdz1242-2 (4.7m)
- sdz1242-3 (3.2m)
- sdz1242-4 (2.1m)
- sdz1242-5 (1.2m)
- sdz1242-6 (0.7m)
- exp 1242-1
- exp 1242-2
- exp 1242-3
- exp 1242-4
- exp 1242-5
- exp 1242-6

SDZ3D_03v2 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage OHZ1221 (horizontal)

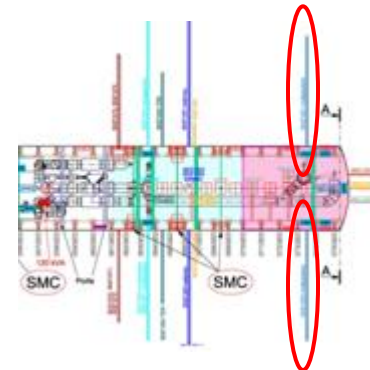
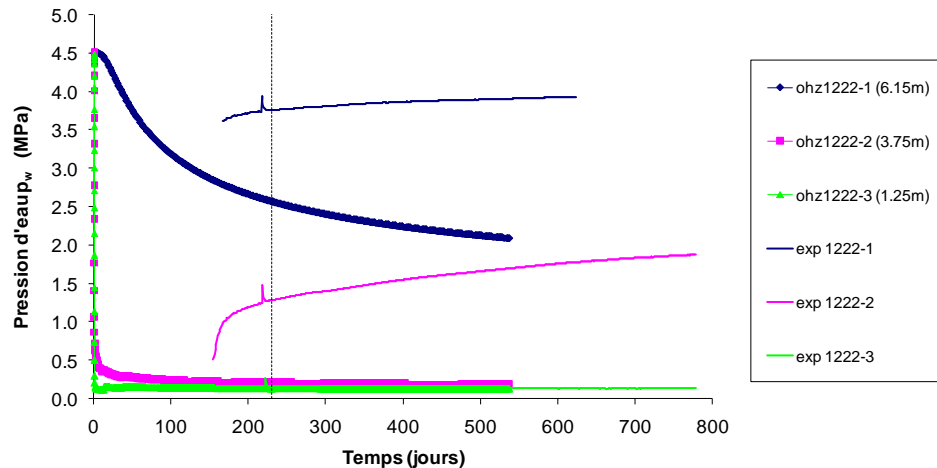
SDZ3D_03v2 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage OHZ1223 (horizontal)



Cas 1 Radialement – Zone étanchée

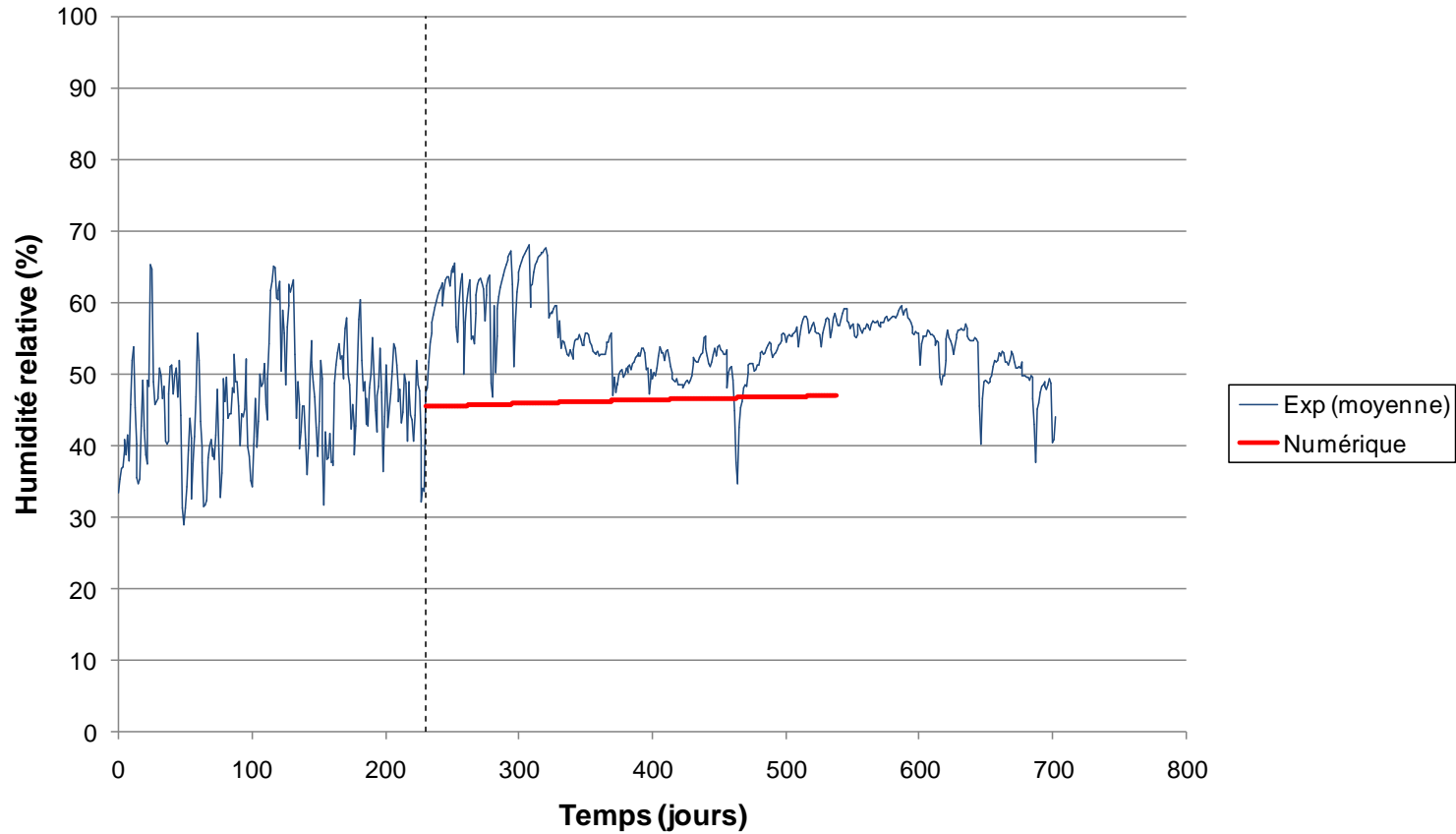
→ P_w sous estimée

SDZ3D_03v2 - Evolution de la pression d'eau p_w dans le forage OHZ1222 (vertical montant)



Section située à 1.5m du fond
 OHZ1221 : horizontal
 OHZ1222 : vertical montant
 OHZ1223 : horizontal

Comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale (moyenne SDZ1261 et SDZ1262) et numériques.



Faible remontée car courbe de rétention modifiée (Pr et n).

- Principes de l'expérience in-situ
- Modélisations numériques envisagées
- Paramètres des modèles constitutifs utilisés
- 2D état plan écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 2D état plan hydromécanique: - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Etat axisymétrique : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- 3D écoulement pur : - Géométrie, cond. initiales/limites, sollicitations
 - Résultats numériques
- Conclusions et perspectives

Etat 2D plan :

- Difficile de trouver une calibration +/- correcte sur l'ensemble des capteurs (vertical descendant, incliné à 45°, horizontal et horizontal lointain). Difficile de calibrer à la fois sur le "court terme" (230 j) et le "long terme" (701 jours).
- Combinaison cas 4 satisfaisante. Plusieurs combinaisons de paramètres différents peuvent sans doute fournir une réponse assez similaire.
- Couplage hydromécanique : légères variations de P_w causées par l'anisotropie des contraintes, zone plastique correspond relativement bien aux mesures d'extension de l'EDZ (fracturation et perméabilité).

Axisymétrique :

- La simulation pour un coefficient transfert de masse α faible (cas 1) où le vide est "isolé" de l'EDZ, donne un comportement physique à long terme relativement proche des mesures expérimentales. Le coefficient de transfert de masse retenu est le même en 2D et en axisymétrique.
- Différentes alternatives ont été réalisées : prise en compte du revêtement en galerie GED, reproduction de H_r dans le vide de SDZ via une fuite à travers le sas, influence limitée des cycles de saturation/désaturation.

3D écoulement pur :

- La simulation pour un coefficient transfert de masse α faible (10^{-5} m.s^{-1} , le vide est "isolé" de l'EDZ), donne un comportement physique à long terme relativement proche des mesures expérimentales réalisées autour de la zone SDZ non revêtue. La correspondance des résultats numériques et expérimentaux n'est pas aussi correcte autour de la zone SDZ revêtue.
- Temps de calcul pour 700 j de simulation : 11 à 12 jours.

Pour la suite ...

- Différentes **variantes en 3D écoulement pur** : prise en compte de l'anisotropie de la perméabilité, modification de la taille de l'EDZ sur base des observations de fracturation autour de la galerie...
- Un calcul **axisymétrique couplé** (ok pour les échanges d'eau dans le sens longitudinal, mais EDZ pas bien représenté car la perméabilité ne peut dépendre de l'orientation).
- Un **calcul 3D couplé**.
- Différentes **variantes** (modèle de perméabilité dépendante de la déformation plus élaboré, structure en bandes de cisaillement de la zone endommagée, adaptations en fonction du suivi de l'expérience dans le temps ...).