

Modélisation numérique de l'expérience SDZ pour l'Andra

Résultats de simulations

Rapport

Mai 2011

R. Charlier, F. Collin, P. Gerard, J.P. Radu, B. Pardoën



Université de Liège – ArGEnCo
www.argenco.ulg.ac.be
Secteur Géotechnologies, Hydrogéologie, Prospection géophysique (GEO³)

Institut de Mécanique et de Génie Civil, Chemin des Chevreuils 1, Bât. B52/3 B 4000 Liège 1 -
Sart Tilman – Belgique
Tél.: 04/366.93.34 ; Fax: 04/366.93.26
E-mail : Robert.Charlier@ulg.ac.be

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	15
2	DESCRIPTION DE L'EXPERIENCE	15
3	MODELISATIONS NUMERIQUES ENVISAGEES	17
4	MODELE MATHEMATIQUE	18
4.1	Modèle de transfert biphasique	18
4.1.1	Advection du mélange eau liquide – air dissous	19
4.1.2	Diffusion dans le mélange gazeux air sec – vapeur d'eau	19
4.1.3	Diffusion de l'air dissous dans l'eau	20
4.2	Modèles mécaniques.....	20
4.2.1	Modèle élasto-plastique de l'argilite	20
4.2.2	Modèle élastique linéaire du béton.....	21
4.3	Echanges d'eau et de vapeur en paroi – élément FMIVP	22
4.4	Equations de conservation.....	22
4.4.1	Conservation de la quantité de mouvement	23
4.4.2	Conservation de la masse d'eau	23
4.4.3	Conservation de la masse d'air.....	23
4.4.4	Variation de la porosité	24
5	PARAMÈTRES DES MODÈLES HYDRAULIQUE ET MÉCANIQUE.....	25
5.1	Eau et air	25
5.2	Argilite.....	25
5.3	Béton.....	26
5.4	Vide.....	27
5.5	Courbes de saturation à l'eau et de perméabilité relative à l'eau	27
6	SIMULATIONS ET RESULTATS NUMERIQUES	30
6.1	2D état plan de déformation écoulement pur	30
6.1.1	Géométrie	30
6.1.2	Conditions initiales.....	32
6.1.3	Conditions aux limites.....	33
6.1.4	Chronologie	34
6.1.5	Mesures expérimentales	35
6.1.6	Résultats numériques.....	35
6.2	2D état plan de déformation couplage hydromécanique	58
6.2.1	Géométrie	58
6.2.2	Conditions initiales.....	58
6.2.3	Conditions aux limites.....	58
6.2.4	Chronologie	60

6.2.5	Résultats numériques.....	60
6.3	Axisymétrique écoulement pur	68
6.3.1	Géométrie	68
6.3.2	Conditions initiales.....	69
6.3.3	Chronologie	69
6.3.4	Conditions aux limites.....	71
6.3.5	Mesures expérimentales	72
6.3.6	Résultats numériques – Calibrage du coefficient de transfert de masse	73
6.3.7	Résultats numériques – Influence du revêtement en galerie GED.....	104
6.3.8	Résultats numériques – Humidité relative dans le vide	113
6.3.9	Résultats numériques – Cycle de saturation/désaturation	118
6.4	3D écoulement pur	129
6.4.1	Géométrie	129
6.4.2	Conditions initiales.....	129
6.4.3	Chronologie	129
6.4.4	Conditions aux limites.....	131
6.4.5	Mesures expérimentales	131
6.4.6	Résultats numériques.....	132
7	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	137
8	ANNEXES	139
8.1	Annexe 1 : Mesures de température et d'hygrométrie en SDZ	139
8.2	Annexe 2 : Mesures de pression dans les forages SDZ	142
8.3	Annexe 3 : Mesures de pression dans les forages OHZ	145

Liste des figures

Figure 1 : Situation de l'expérimentation SDZ dans la galerie GED.	16
Figure 2 : Section type de la zone SDZ et de la galerie GED.....	17
Figure 3 : Condition aux limites de flux des éléments FMIVP.	22
Figure 4 : Evolution de la saturation en eau $S_{r,w}$ avec la pression capillaire p_c (suction) pour l'argilite (avec une comparaison avec des données expérimentales).	28
Figure 5 : Evolution de la perméabilité relative verticale à l'eau $k_{r,w}$ en fonction de la saturation à l'eau $S_{r,w}$ pour l'argilite.	28
Figure 6 : Evolution de la saturation en eau $S_{r,w}$ avec la pression capillaire p_c (suction) pour le béton (radier et revêtement).	29
Figure 7 : Evolution de la perméabilité relative à l'eau $k_{r,w}$ en fonction de la saturation à l'eau $S_{r,w}$ pour le béton (radier et revêtement).	29
Figure 8 : Evolution de la saturation en eau $S_{r,w}$ avec la pression capillaire p_c (suction) pour le vide.	30
Figure 9 : Vue 2D globale de la géométrie du maillage.	31
Figure 10 : Vue 2D de la galerie en zone d'essai non revêtue et en zone revêtue étanchée (non étudiée).	32
Figure 11 : Evolution de l'humidité relative et de la température moyenne journalière dans la section de galerie non revêtue dédiée à l'expérience SDZ.	34
Figure 12 : Evolution de la pression d'eau imposée en galerie (zone SDZ).	34
Figure 13 : Localisation des forages, des points en paroi et des coupes de sortie des résultats de pression.	35
Figure 14 : Evolution de la pression d'eau en paroi, cas 1, 2D écoulement pur.	36
Figure 15 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1241 descendant à 45°, cas 1, 2D écoulement pur.	36
Figure 16 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1242 vertical descendant, cas 1, 2D écoulement pur.	37
Figure 17 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1243 horizontal, cas 1, 2D écoulement pur.	37
Figure 18 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1244 horizontal « lointain », cas 1, 2D écoulement pur.	38

<i>Figure 19 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 1-1 verticale montante, cas 1, 2D écoulement pur.</i>	<i>38</i>
<i>Figure 20 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 3-3 horizontale, cas 1, 2D écoulement pur.</i>	<i>39</i>
<i>Figure 21 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 5-5 verticale descendante, cas 1, 2D écoulement pur.</i>	<i>39</i>
<i>Figure 22 : Evolution de la pression d'eau en paroi, cas 2, 2D écoulement pur.</i>	<i>40</i>
<i>Figure 23 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1241 descendant à 45°, cas 2, 2D écoulement pur.</i>	<i>41</i>
<i>Figure 24 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1242 vertical descendant, cas 2, 2D écoulement pur.</i>	<i>41</i>
<i>Figure 25 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1243 horizontal, cas 2, 2D écoulement pur.</i>	<i>42</i>
<i>Figure 26 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1244 horizontal « lointain », cas 2, 2D écoulement pur.</i>	<i>42</i>
<i>Figure 27 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 1-1 verticale montante, cas 2, 2D écoulement pur.</i>	<i>43</i>
<i>Figure 28 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 3-3 horizontale, cas 2, 2D écoulement pur.</i>	<i>43</i>
<i>Figure 29 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 5-5 verticale descendante, cas 2, 2D écoulement pur.</i>	<i>44</i>
<i>Figure 30 : Evolution de la pression d'eau en paroi, cas 3, 2D écoulement pur.</i>	<i>45</i>
<i>Figure 31 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1241 descendant à 45°, cas 3, 2D écoulement pur.</i>	<i>45</i>
<i>Figure 32 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1242 vertical descendant, cas 3, 2D écoulement pur.</i>	<i>46</i>
<i>Figure 33 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1243 horizontal, cas 3, 2D écoulement pur.</i>	<i>46</i>
<i>Figure 34 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1244 horizontal « lointain », cas 3, 2D écoulement pur.</i>	<i>47</i>
<i>Figure 35 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 1-1 verticale montante, cas 3, 2D écoulement pur.</i>	<i>47</i>
<i>Figure 36 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 3-3 horizontale, cas 3, 2D écoulement pur.</i>	<i>48</i>

<i>Figure 37 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 5-5 verticale descendante, cas 3, 2D écoulement pur.</i>	<i>48</i>
<i>Figure 38 : Evolution de la pression d'eau en paroi, cas 4, 2D écoulement pur.</i>	<i>49</i>
<i>Figure 39 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1241 descendant à 45°, cas 4, 2D écoulement pur.</i>	<i>50</i>
<i>Figure 40 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1242 vertical descendant, cas 4, 2D écoulement pur.</i>	<i>50</i>
<i>Figure 41 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1243 horizontal, cas 4, 2D écoulement pur.</i>	<i>51</i>
<i>Figure 42 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1244 horizontal « lointain », cas 4, 2D écoulement pur.</i>	<i>51</i>
<i>Figure 43 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 1-1 verticale montante, cas 4, 2D écoulement pur.</i>	<i>52</i>
<i>Figure 44 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 3-3 horizontale, cas 4, 2D écoulement pur.</i>	<i>52</i>
<i>Figure 45 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 5-5 verticale descendante, cas 4, 2D écoulement pur.</i>	<i>53</i>
<i>Figure 46 : Evolution de la pression d'eau en paroi, cas 5, 2D écoulement pur.</i>	<i>54</i>
<i>Figure 47 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1241 descendant à 45°, cas 5, 2D écoulement pur.</i>	<i>54</i>
<i>Figure 48 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1242 vertical descendant, cas 5, 2D écoulement pur.</i>	<i>55</i>
<i>Figure 49 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1243 horizontal, cas 5, 2D écoulement pur.</i>	<i>55</i>
<i>Figure 50 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1244 horizontal « lointain », cas 5, 2D écoulement pur.</i>	<i>56</i>
<i>Figure 51 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 1-1 verticale montante, cas 5, 2D écoulement pur.</i>	<i>56</i>
<i>Figure 52 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 3-3 horizontale, cas 5, 2D écoulement pur.</i>	<i>57</i>
<i>Figure 53 : Evolution de la pression d'eau le long d la coupe 5-5 verticale descendante, cas 5, 2D écoulement pur.</i>	<i>57</i>
<i>Figure 54 : Conditions aux limites, 2D couplage hydromécanique.</i>	<i>59</i>
<i>Figure 55 : Imposition des contraintes en paroi pour modéliser le creusement de la galerie.</i>	<i>59</i>

<i>Figure 56 : Imposition des pressions d'eau en paroi pour modéliser le creusement de la galerie.</i>	60
<i>Figure 57 : Evolution de la pression d'eau en paroi, cas 4, 2D couplage hydromécanique.</i>	61
<i>Figure 58 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1241 descendant à 45°, cas 4, 2D couplage hydromécanique et écoulement pur.</i>	62
<i>Figure 59 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1242 vertical descendant, cas 4, 2D couplage hydromécanique et écoulement pur.</i>	62
<i>Figure 60 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1243 horizontal, cas 4, 2D couplage hydromécanique et écoulement pur.</i>	63
<i>Figure 61 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1244 horizontal « lointain », cas 4, 2D couplage hydromécanique et écoulement pur.</i>	63
<i>Figure 62 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 1-1 verticale montante, cas 4, 2D couplage hydromécanique et écoulement pur.</i>	64
<i>Figure 63 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 3-3 horizontale, cas 4, 2D couplage hydromécanique et écoulement pur.</i>	64
<i>Figure 64 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 5-5 verticale descendante, cas 4, 2D couplage hydromécanique et écoulement pur.</i>	65
<i>Figure 65 : Evolution de l'indicateur de plasticité et de la zone plastifiée, cas 4, 2D couplage hydromécanique.</i>	66
<i>Figure 66 : Evolution de l'indicateur de plasticité dans la direction horizontale, cas 4, 2D couplage hydromécanique.</i>	67
<i>Figure 67 : Evolution de l'indicateur de plasticité dans la direction verticale, cas 4, 2D couplage hydromécanique.</i>	67
<i>Figure 68 : Vue globale du modèle axisymétrique autour de l'axe de la galerie GED.</i>	68
<i>Figure 69 : Géométrie et détail du maillage axisymétrique.</i>	69
<i>Figure 70 : Phasage de la modélisation axisymétrique.</i>	70
<i>Figure 71 : Evolution de la pression d'eau imposée en galerie GED à partir des mesures en zone SDZ avant fermeture du sas (reproduction).</i>	71
<i>Figure 72 : Evolution de l'humidité relative et de la température dans la galerie GED.</i>	72
<i>Figure 73 : Evolution de la pression d'eau imposée en galerie GED.</i>	72
<i>Figure 74 : Localisation des coupes de sorties de résultats, modélisation axisymétrique.</i>	74
<i>Figure 75 : Evolution de la pression d'eau au centre du vide en zone SDZ non étanche, cas 1, axisymétrique écoulement pur.</i>	75

<i>Figure 76 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1245 horizontal au front de la galerie, cas 1, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>76</i>
<i>Figure 77 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 20,1 m, 12,2 m et 9,2 m de la paroi, cas 1, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>76</i>
<i>Figure 78 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 6,1 m de la paroi, cas 1, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>77</i>
<i>Figure 79 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 4,65 m de la paroi, cas 1, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>77</i>
<i>Figure 80 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 3,15 m de la paroi, cas 1, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>78</i>
<i>Figure 81 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone étanche à 6,18 m de la paroi, cas 1, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>78</i>
<i>Figure 82 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone étanche à 3,78 m de la paroi, cas 1, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>79</i>
<i>Figure 83 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone étanche à 1,28 m de la paroi, cas 1, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>79</i>
<i>Figure 84 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe radiale AA', cas 1, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>80</i>
<i>Figure 85 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe radiale CC', cas 1, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>80</i>
<i>Figure 86 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale DD', cas 1, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>81</i>
<i>Figure 87 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale EE', cas 1, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>81</i>
<i>Figure 88 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', cas 1, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>82</i>
<i>Figure 89 : Evolution des flux d'eau de Darcy au niveau de la zone SDZ, cas 1, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>83</i>
<i>Figure 90 : Evolution de la pression d'eau au centre du vide en zone SDZ non étanche, cas 2, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>84</i>
<i>Figure 91 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1245 horizontal au front de la galerie, cas 2, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>84</i>
<i>Figure 92 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 20,1 m, 12,2 m et 9,2 m de la paroi, cas 2, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>85</i>

<i>Figure 93 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 6,1 m de la paroi, cas 2, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>85</i>
<i>Figure 94 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 4,65 m de la paroi, cas 2, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>86</i>
<i>Figure 95 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 3,15 m de la paroi, cas 2, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>86</i>
<i>Figure 96 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe radiale AA', cas 2, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>87</i>
<i>Figure 97 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe radiale CC', cas 2, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>87</i>
<i>Figure 98 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale DD', cas 2, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>88</i>
<i>Figure 99 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale EE', cas 2, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>88</i>
<i>Figure 100 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', cas 2, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>89</i>
<i>Figure 101 : Evolution des flux d'eau de Darcy au niveau de la zone SDZ, cas 2, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>90</i>
<i>Figure 102 : Evolution de la pression d'eau au centre du vide en zone SDZ non étanche, cas 3, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>91</i>
<i>Figure 103 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1245 horizontal au front de la galerie, cas 3, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>91</i>
<i>Figure 104 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 20,1 m, 12,2 m et 9,2 m de la paroi, cas 3, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>92</i>
<i>Figure 105 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 6,1 m de la paroi, cas 3, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>92</i>
<i>Figure 106 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 4,65 m de la paroi, cas 3, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>93</i>
<i>Figure 107 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 3,15 m de la paroi, cas 3, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>93</i>
<i>Figure 108 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe radiale AA', cas 3, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>94</i>
<i>Figure 109 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe radiale CC', cas 3, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>94</i>

<i>Figure 110 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale DD', cas 3, axisymétrique écoulement pur.</i>	95
<i>Figure 111 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale EE', cas 3, axisymétrique écoulement pur.</i>	95
<i>Figure 112 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', cas 3, axisymétrique écoulement pur.</i>	96
<i>Figure 113 : Evolution des flux d'eau de Darcy au niveau de la zone SDZ, cas 3, axisymétrique écoulement pur.</i>	97
<i>Figure 114 : Evolution de la pression d'eau au niveau de la zone SDZ, cas 3, axisymétrique écoulement pur.</i>	98
<i>Figure 115 : Comparaison de la pression d'eau après 700 jours au niveau de la zone SDZ, cas 1-2-3, axisymétrique écoulement pur.</i>	99
<i>Figure 116 : Comparaison des flux axiaux le long des sections FF' et GG', cas 1-2-3, axisymétrique écoulement pur.</i>	100
<i>Figure 117 : Comparaison des flux radiaux le long des sections FF', GG' et HH', cas 1-2-3, axisymétrique écoulement pur.</i>	101
<i>Figure 118 : Comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale et numériques dans la zone SDZ (vide), cas 1-2-3, axisymétrique écoulement pur.</i>	102
<i>Figure 119 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', cas 1, axisymétrique écoulement pur, imposition de la pression d'eau mesurée en galerie GED.</i>	103
<i>Figure 120 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED étanche, axisymétrique écoulement pur.</i>	105
<i>Figure 121 : Evolution des flux d'eau de Darcy au niveau de la zone SDZ, $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED étanche, axisymétrique écoulement pur.</i>	106
<i>Figure 122 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED avec revêtement en béton de perméabilité intrinsèque 10^{-18} m^2, axisymétrique écoulement pur.</i>	107
<i>Figure 123 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale EE', $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED sans revêtement, axisymétrique écoulement pur.</i>	109
<i>Figure 124 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale EE', $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED avec revêtement en béton de perméabilité intrinsèque 10^{-18} m^2, axisymétrique écoulement pur.</i>	110
<i>Figure 125 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale EE', $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED avec revêtement en béton de perméabilité intrinsèque 10^{-19} m^2, axisymétrique écoulement pur.</i>	111

<i>Figure 126 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale EE', $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED étanche, axisymétrique écoulement pur.....</i>	<i>112</i>
<i>Figure 127 : Comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale et numériques dans la zone SDZ (vide) en fonction de α_{sdz}, galerie GED étanche, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>113</i>
<i>Figure 128 : Evolution de la saturation en eau $S_{r,w}$ avec la pression capillaire p_c (suction) pour le vide, influence de la pression d'entrée d'air Pr.</i>	<i>114</i>
<i>Figure 129 : Comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale et numériques dans la zone SDZ (vide) en fonction de Pr_{vide} et du revêtement, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>115</i>
<i>Figure 130 : Comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale et numériques dans la zone SDZ (vide) pour les paramètres retenus, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>115</i>
<i>Figure 131 : Comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale en zone SDZ et en galerie GED.</i>	<i>116</i>
<i>Figure 132 : Modélisation d'une fuite à travers le sas pour modéliser au mieux l'humidité relative expérimentale en zone SDZ.</i>	<i>117</i>
<i>Figure 133 : Flux d'eau à travers la fuite.</i>	<i>117</i>
<i>Figure 134 : Evolution de la pression d'eau imposée en galerie GED avec répétition des mesures expérimentales.....</i>	<i>118</i>
<i>Figure 135 : Evolution de la pression d'eau imposée en zone SDZ, paliers de 6 mois.</i>	<i>119</i>
<i>Figure 136 : Evolution de la pression d'eau imposée en zone SDZ, paliers de 18 mois.....</i>	<i>119</i>
<i>Figure 137 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', $\alpha_{sdz}= 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED avec revêtement en béton de perméabilité intrinsèque 10^{-18} m^2, sans fuite à travers le sas, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>120</i>
<i>Figure 138 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', paliers de 6 mois à H_r constant, $\alpha_{sdz}= 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED avec revêtement en béton de perméabilité intrinsèque 10^{-18} m^2, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>121</i>
<i>Figure 139 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', paliers de 18 mois à H_r constant, $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED avec revêtement en béton de perméabilité intrinsèque 10^{-18} m^2, axisymétrique écoulement pur.</i>	<i>122</i>
<i>Figure 140 : Evolution de la pression d'eau à 1.1-1.2m de la paroi de la galerie en zone SDZ, paliers de ventilation constants, $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, axisymétrique écoulement pur.....</i>	<i>124</i>
<i>Figure 141 : Evolution de la pression d'eau à 3.1-3.2m de la paroi de la galerie en zone SDZ, paliers de ventilation constants, $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, axisymétrique écoulement pur.....</i>	<i>125</i>
<i>Figure 142 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe radiale BB', paliers de ventilation constants, $\alpha_{sdz}= 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, axisymétrique écoulement pur.....</i>	<i>126</i>

<i>Figure 143 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale EE', paliers de ventilation constants, $\alpha_{sdz} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, axisymétrique écoulement pur.</i>	127
<i>Figure 144 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', $\alpha_{sdz} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED avec revêtement en béton de perméabilité intrinsèque 10^{-18} m^2, avec fuite à travers le sas, axisymétrique écoulement pur.</i>	128
<i>Figure 145 : Vue globale du modèle 3D.</i>	130
<i>Figure 146 : Phasage de la modélisation 3D.</i>	131
<i>Figure 147 : Comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale et numériques dans la zone SDZ non étanche (vide), 3D écoulement pur.</i>	132
<i>Figure 148 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1241 descendant à 45°, 3D écoulement pur.</i>	133
<i>Figure 149 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1242 vertical descendant, 3D écoulement pur.</i>	133
<i>Figure 150 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1243 horizontal, 3D écoulement pur.</i>	134
<i>Figure 151 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1244 horizontal « lointain », 3D écoulement pur.</i>	134
<i>Figure 152 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1245 horizontal au front de la galerie, 3D écoulement pur.</i>	135
<i>Figure 153 : Evolution de la pression d'eau dans le forage OHZ1221 horizontal, 3D écoulement pur.</i>	135
<i>Figure 154 : Evolution de la pression d'eau dans le forage OHZ1222 vertical montant, 3D écoulement pur.</i>	136
<i>Figure 155 : Evolution de la pression d'eau dans le forage OHZ1223 horizontal, 3D écoulement pur.</i>	136
<i>Figure 156 : Coupe de la section de mesures climatiques SDZ1261 (rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B) et position des capteurs.</i>	139
<i>Figure 157 : Coupe de la section de mesures climatiques SDZ1262 (rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B) et position des capteurs.</i>	139
<i>Figure 158 : Evolution de la température dans la section de mesures climatiques SDZ1261 (rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B).</i>	140
<i>Figure 159 : Evolution de l'humidité relative dans la section de mesures climatiques SDZ1261 (rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B).</i>	140
<i>Figure 160 : Evolution de la température dans la section de mesures climatiques SDZ1262 (rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B).</i>	141

<i>Figure 161 : Evolution de l'humidité relative dans la section de mesures climatiques SDZ1262 (rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B).....</i>	<i>141</i>
<i>Figure 162 : Localisation des forages de mesures de pression SDZ.</i>	<i>142</i>
<i>Figure 163 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1241 descendant à 45°.</i>	<i>142</i>
<i>Figure 164 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1242 descendant verticalement.</i>	<i>143</i>
<i>Figure 165 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1243 horizontal.</i>	<i>143</i>
<i>Figure 166 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1244 horizontal « lointain »....</i>	<i>144</i>
<i>Figure 167 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1245 horizontal au front de la galerie.....</i>	<i>144</i>
<i>Figure 168 : Localisation des forages de mesures de pression OHZ.</i>	<i>145</i>
<i>Figure 169 : Evolution de la pression d'eau dans le forage OHZ1221 horizontal.</i>	<i>145</i>
<i>Figure 170 : Evolution de la pression d'eau dans le forage OHZ1222 vertical montant.</i>	<i>146</i>
<i>Figure 171 : Evolution de la pression d'eau dans le forage OHZ1223 horizontal.</i>	<i>146</i>

Liste des tableaux

Tableau 1 : Propriétés de l'eau et de l'air.....	25
Tableau 2 : Paramètres hydrauliques de l'argilite.....	25
Tableau 3 : Paramètres mécaniques de l'argilite.....	26
Tableau 4 : Paramètres hydrauliques du béton (radier et revêtement).....	26
Tableau 5 : Paramètres mécaniques du béton (radier et revêtement).....	26
Tableau 6 : Paramètres hydrauliques du vide.....	27
Tableau 7 : Cycles de saturation/désaturation imposés en zone SDZ après fermeture du sas.....	118

1 INTRODUCTION

L'expérimentation SDZ vise à caractériser l'effet de la saturation et de la désaturation de la zone endommagée EDZ (« Excavation damaged zone ») située autour de la galerie suite à une ventilation imposée dans celle-ci. Les objectifs sont :

- évaluer les profils de saturation, de pression et de perméabilité dans l'argilite (EDZ et saine),
- caractériser l'EDZ et son évolution autour d'un ouvrage dédié lors de phases de ventilation contrôlée (désaturation puis resaturation),
- caractériser l'évolution mécanique (convergence, déformation,...) de la galerie lors de phases de séchage et mouillage.

Dans cette optique, différentes modélisations sont réalisées pour l'Andra. Le présent rapport présente les résultats des simulations en 2D état plan de déformation et en axisymétrique. Les calculs portent principalement sur les transferts fluides (écoulement pur), un couplage hydromécanique sera réalisé en 2D état plan de déformation pour un cas envisagé. Une calibration des paramètres sera réalisée afin que les résultats numériques correspondent le mieux possible aux mesures expérimentales.

2 DESCRIPTION DE L'EXPERIENCE

Une portion de galerie isolée du reste du laboratoire est soumise à des paliers de ventilation à température T et humidité relative H_r constantes (désaturation puis resaturation). Le comportement hydromécanique de l'argilite autour de cette zone est étudié au cours des cycles de ventilation.

Les caractéristiques et la localisation de la zone d'essai sont présentées à la **Figure 1**. La zone SDZ est située à l'extrémité de la galerie GED (« Galerie expérimentale deux »). Elle est composée d'un sas de 2 m limité par deux portes étanches, d'une zone d'essai (roche à nu) de 7,2 m et d'une zone étanchée de 5 m de long à son extrémité. La section type de la zone SDZ et de la galerie GED est présentée à la **Figure 2**.

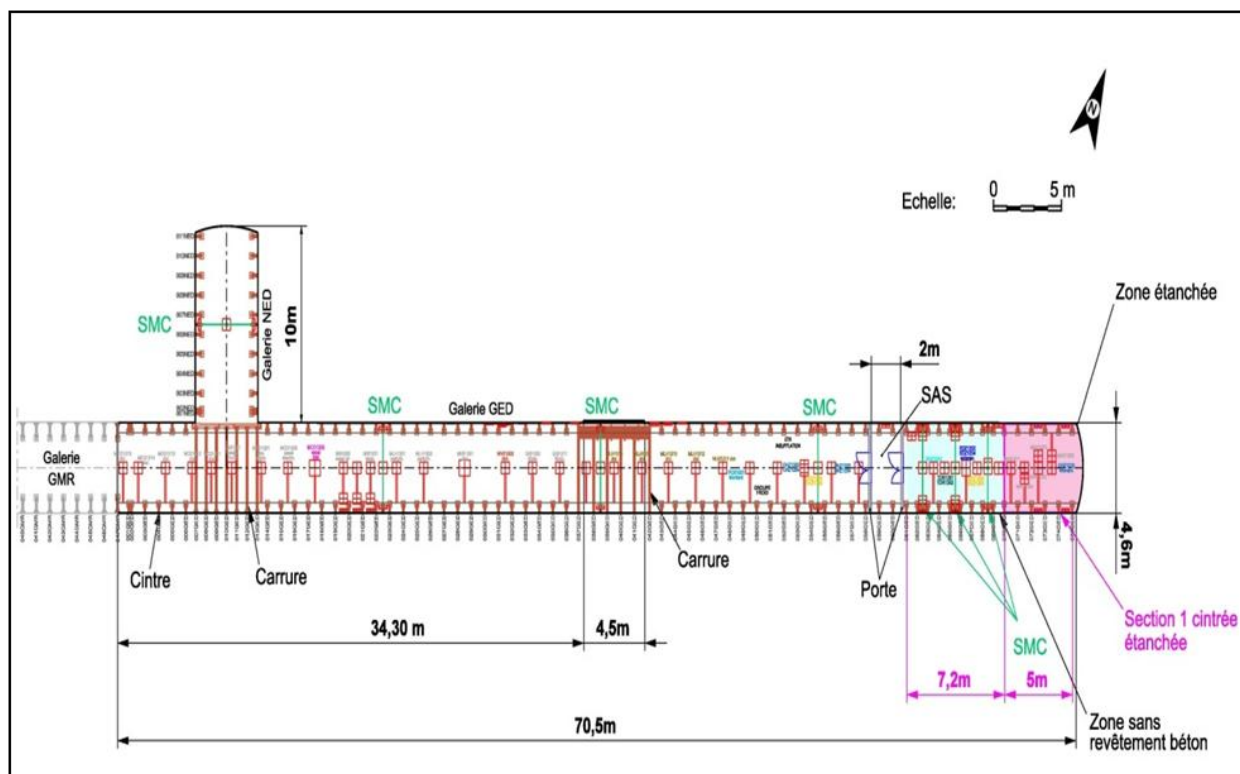


Figure 1 : Situation de l'expérimentation SDZ dans la galerie GED.

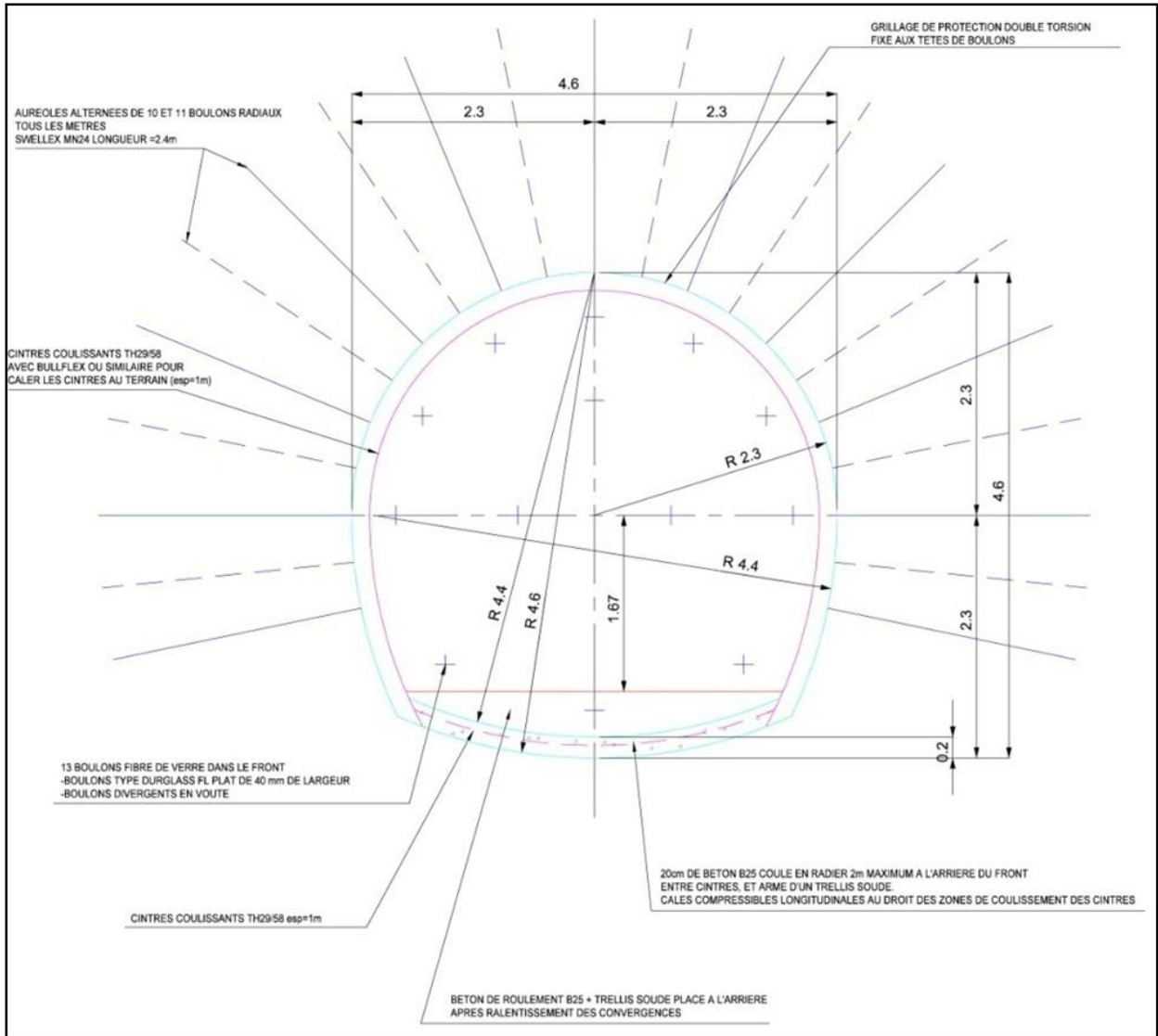


Figure 2 : Section type de la zone SDZ et de la galerie GED.

3 MODELISATIONS NUMERIQUES ENVISAGEES

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 en 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 (principalement jusqu'à 0.5m), de 3.9 m en vertical vers le haut et de 5.1 m en vertical 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), les mouvements 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 principalement sur les transferts fluides.

Les tâches envisagées sont :

- Sous tâche 0 : Un calcul 2D état plan et un calcul axisymétrique, restreints aux transferts fluides, donneront une première représentation des échanges hydriques dans l'argilite entre la cavité SDZ, les zones étanchée et non étanchée, la galerie GED.
- Sous tâche 1 : Un calcul 2D en état plan de déformation donnera une bonne représentation de la zone endommagée. Mais les échanges d'eau et de chaleur seront biaisés par l'absence de flux longitudinal.
- Sous tâche 2 : Un calcul axisymétrique donnera une bonne représentation des échanges de chaleur et d'eau dans le sens de l'axe de la galerie et mettra donc en évidence les effets du front de galerie et de la zone hors expérience. Cependant la perméabilité ne dépendra pas de l'orientation et donc ne pourra représenter finement l'effet de la zone endommagée.
- Sous tâche 3 : Un calcul 3D permettra de prendre en compte tous les effets, mais sera fort lourd à mettre en œuvre et le maillage sera moins fin ce qui occasionnera des pertes de précision.
- Sous tâche 4 à 6 : des variantes, portant respectivement sur le modèle de couplage écoulement – mécanique, sur la structure en bandes de cisaillement de l'EDZ, sur d'autres facettes déduites de la confrontation entre les simulations et les résultats expérimentaux.

4 MODELE MATHEMATIQUE

4.1 Modèle de transfert biphasique

Le modèle de transfert biphasique est présenté ci-après. Dans le cadre de ces calculs, nous considérons que la phase gazeuse est constituée de vapeur d'eau et d'air sec. Dans les modélisations numériques qui seront présentées, la pression de gaz est maintenue constante.

Dans le modèle de transfert biphasique eau – air, les phénomènes suivants sont pris en considération :

- advection du mélange eau liquide – air dissous ;
- diffusion dans le mélange gazeux air sec – vapeur d'eau ;
- diffusion de l'air dissous dans l'eau.

4.1.1 Advection du mélange eau liquide – air dissous

Nous négligeons l'influence de l'air dissous sur les propriétés du mélange eau liquide – air dissous. Dès lors, l'advection du mélange est définie par l'advection de l'eau au sein du milieu poreux, représentée par la loi de Darcy généralisée :

$$\underline{q}_l = -\frac{kk_r^w(S_{r,w})}{\mu_w}(\nabla p_w + \rho_w g \nabla z) \quad (1)$$

Avec k la perméabilité intrinsèque [m^2], $k_{r,w}$ la perméabilité relative à l'eau [-], $S_{r,w}$ la saturation en eau [-], μ_w la viscosité de l'eau [$kg.m^{-1}.s^{-1}$], ρ_w la masse volumique de l'eau [$kg.m^{-3}$], g l'accélération de la pesanteur [$m.s^{-2}$] et z l'altitude [m].

L'eau est supposée être compressible et suit la loi de comportement suivante :

$$\frac{d\rho_w}{\rho_w} = \frac{dp_w}{\chi_w} \quad (2)$$

La saturation en eau du milieu $S_{r,w}$ s'exprime en fonction de la pression capillaire grâce au modèle de Van Genuchten :

$$S_{r,w} = S_{res} + \frac{S_{max} - S_{res}}{\left[1 + \left(\frac{p_c}{P_r}\right)^n\right]^m} \quad (3)$$

avec $p_c (= p_g - p_w)$ la pression capillaire [Pa], S_{max} la saturation maximale [-], S_{res} la saturation résiduelle [-], n et m des coefficients de la loi de Van Genuchten tels que : $m = 1 - 1/n$ et P_r un paramètre de la loi de Van Genuchten [Pa].

La perméabilité relative à l'eau s'exprime en intégrant le modèle de prédiction proposé par Mualem dans le modèle de capillarité de Van Genuchten. Nous avons alors :

$$k_{r,w} = \sqrt{S_{r,w}} \left[1 - (1 - S_{r,w}^{1/m})^m\right]^2 \quad (4)$$

4.1.2 Diffusion dans le mélange gazeux air sec – vapeur d'eau

La diffusion d'air sec dans le mélange air sec – vapeur d'eau s'exprime grâce à la loi de Fick :

$$\underline{i}_{(a)_g} = -\rho_g(1 - S_{r,w})\varphi \tau D_a^{vapeur} \nabla \left(\frac{\rho_a^g}{\rho_g} \right) = -\underline{i}_{(H_2O)_g} \quad (5)$$

avec φ la porosité [-], τ la tortuosité [-], D_a^{vapeur} le coefficient de diffusion d'air sec dans la vapeur d'eau [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$], qui s'exprime grâce à la relation suivante :

$$D_a^{vapeur} = 5.893 \cdot 10^{-6} \frac{T^{2.3}}{P_g} \quad (6)$$

4.1.3 Diffusion de l'air dissous dans l'eau

La diffusion de l'air dissous est également intégrée dans le modèle via la loi de Fick.

$$i_{(a)_d} = -\rho_w S_{r,w} \varphi \tau D_a^{H_2O} \nabla \left(\frac{\rho_a^w}{\rho_w} \right) \quad (7)$$

avec ρ_a^w la masse volumique de l'air dissous [$\text{kg}.\text{m}^{-3}$], $D_a^{H_2O}$ le coefficient de diffusion de l'air dissous dans l'eau liquide [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$].

La masse volumique de l'air dissous est fournie par la loi de Henry :

$$\rho_a^w = H_a(T) \cdot \rho_a^g \quad (8)$$

avec H_a la constante de Henry pour l'air dissous [-].

Le coefficient de diffusion de l'air dissous dans l'eau est donné par :

$$D_a^{H_2O} = 5.03 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1} \quad (9)$$

4.2 Modèles mécaniques

L'argilite a un comportement élasto-plastique et il est proposé d'utiliser un modèle de Van-Eekelen. Le modèle de comportement mécanique du béton est un modèle élastique linéaire. Le vide n'est pris en compte que dans les modélisations axisymétriques pour lesquelles seules des simulations en écoulement pur sont réalisées. Il n'y a donc pas lieu de définir un modèle de comportement mécanique pour ce matériau.

4.2.1 Modèle élasto-plastique de l'argilite

La loi de comportement choisie pour l'argilite est un modèle élastique linéaire-parfaitement plastique avec une surface de plasticité de Van-Eekelen donnée par l'équation suivante (convention résistance des matériaux) :

$$F \equiv II_{\dot{\sigma}} + m \left(I_{\sigma} - \frac{3c}{\tan \phi_c} \right) = 0 \quad (10)$$

où $II_{\hat{\sigma}} = \sqrt{\frac{1}{2} \hat{\sigma}_{ij} \hat{\sigma}_{ij}}$ est le deuxième invariant des contraintes déviatoriques, $\hat{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{I_{\sigma}}{3} \delta_{ij}$ est le tenseur des contraintes déviatoriques, $I_{\sigma} = \sigma_{ij} \delta_{ij}$ est le premier invariant des contraintes, ϕ_C est l'angle de frottement en compression et c est la cohésion.

Le coefficient m est défini par :

$$m = a(1 + b \sin 3\beta)^n \quad (11)$$

fonction de l'angle de Lode donné par :

$$\sin 3\beta = - \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{III_{\hat{\sigma}}}{II_{\hat{\sigma}}^3} \right) \quad (12)$$

où $III_{\hat{\sigma}} = \frac{1}{3} \hat{\sigma}_{ij} \hat{\sigma}_{jk} \hat{\sigma}_{ki}$ est le troisième invariant des contraintes déviatoriques.

Les trois paramètres a , b et n doivent vérifier les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} a &> 0, \\ bn &> 0, \\ -1 &< b < 1 \end{aligned} \quad (13)$$

La valeur du paramètre n , qui contrôle la convexité de la surface de plasticité, est choisie classiquement à -0.229 (valeur par défaut de Van-Eekelen) et les deux coefficients a et b permettent un choix indépendant pour ϕ_C et ϕ_E , l'angle de frottement en extension :

$$\begin{aligned} b &= \frac{\left(\frac{r_C}{r_E} \right)^{\frac{1}{n}} - 1}{\left(\frac{r_C}{r_E} \right)^{\frac{1}{n}} + 1} \\ a &= \frac{r_C}{(1+b)^n} \end{aligned} \quad (14)$$

où les rayons réduits en compression r_C et en extension r_E sont donnés par :

$$\begin{aligned} r_C &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{2 \sin \phi_C}{3 - \sin \phi_C} \right) \\ r_E &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{2 \sin \phi_E}{3 + \sin \phi_E} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

4.2.2 Modèle élastique linéaire du béton

La loi de comportement choisie pour le béton est un modèle élastique linéaire.

4.3 Echanges d'eau et de vapeur en paroi – élément FMIVP

Pour modéliser les échanges d'eau et de vapeur entre la galerie et l'argilite, une condition limite hydraulique non conventionnelle a été développée. Cette condition limite appliquée en paroi de galerie considère que le flux total est la combinaison d'un flux de suintement et d'un flux d'échange de vapeur (*Figure 3*) :

$$\bar{q} = \bar{S} + \bar{E} \quad (16)$$

Le flux de suintement $\bar{S}$ est donné par :

$$\begin{cases} \bar{S} = K.(p_w^f - p_{atm})^2 & \text{si } p_w^f \geq p_w^{cav} \text{ et } p_w^f \geq p_{atm} \\ \bar{S} = 0 & \text{si } p_w^f < p_w^{cav} \text{ ou } p_w^f < p_{atm} \end{cases} \quad (17)$$

avec p_w^f la pression d'eau 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 pénalisation pour le suintement.

L'échange par évaporation $\bar{E}$ 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 :

$$\bar{E} = \alpha.(\rho_v^f - \rho_v^{cav}) \quad (18)$$

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.

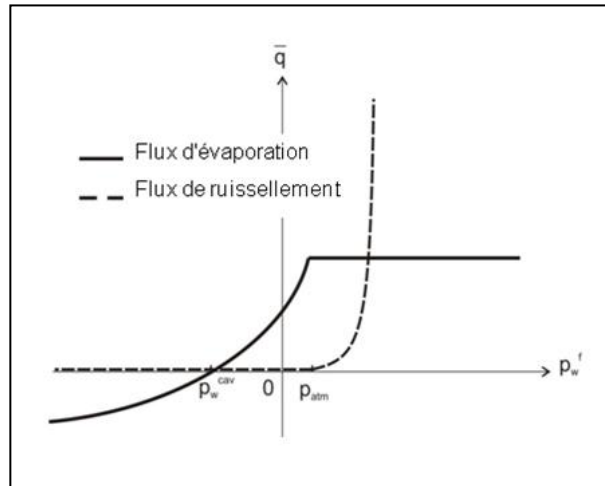


Figure 3 : Condition aux limites de flux des éléments FMIVP.

4.4 Equations de conservation

Nous avons trois équations de conservation à respecter pour résoudre notre problème : l'équation de conservation de quantité de mouvement, les équations de conservation des masses d'eau et d'air.

4.4.1 Conservation de la quantité de mouvement

Cette équation s'écrit en conditions quasi-statiques selon :

$$\text{div}(\sigma_{ij}) + \rho g_i = 0 \quad (19)$$

où σ_{ij} est le tenseur de contrainte totale [Pa], ρ est la masse volumique homogénéisée [kg.m^{-3}] et g_i est le vecteur gravité [m.s^{-2}].

La contrainte totale s'exprime selon :

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + b \cdot (p_w S_{r,w} + p_g S_{r,g}) \cdot \delta_{ij} \quad (20)$$

avec b le coefficient de Biot [-].

4.4.2 Conservation de la masse d'eau

L'eau se trouve dans la phase liquide et la phase gazeuse. En écrivant la conservation de la masse d'eau liquide et de vapeur d'eau, nous obtenons :

$$\dot{S}_{(H_2O)_l} + \text{div}(\underline{f}_{(H_2O)_l}) + \dot{E}_{H_2O}^{l \rightarrow g} = Q_{(H_2O)_l} \quad (21)$$

$$\dot{S}_{(H_2O)_g} + \text{div}(\underline{f}_{(H_2O)_g}) - \dot{E}_{H_2O}^{l \rightarrow g} = Q_{(H_2O)_g} \quad (22)$$

où $\dot{S}_{(H_2O)_l}$ est le terme d'emmagasinement d'eau liquide [$\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$], $\underline{f}_{(H_2O)_l}$ est le flux massique d'eau liquide [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$], $\dot{E}_{H_2O}^{l \rightarrow g}$ est le terme d'échange de la phase liquide vers la phase gazeuse [$\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$] et $Q_{(H_2O)_l}$ est un terme de production / consommation d'eau liquide [$\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$] (respectivement pour la vapeur d'eau).

$$\underline{f}_{(H_2O)_l} = \rho_w \cdot \underline{q}_l \quad (23)$$

$$\underline{f}_{(H_2O)_g} = \underline{i}_{(H_2O)_g} \quad (24)$$

où $\underline{q}_l$ est la vitesse moyenne de la phase liquide par rapport à la phase solide [m.s^{-1}] et $\underline{i}_{(H_2O)_g}$ est le flux de vapeur diffusif [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$].

Les deux équations de bilan (21) et (22) peuvent être regroupées dans une seule équation où le terme d'évaporation disparaît. En incluant les relations (23) et (24), nous obtenons :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \cdot \phi \cdot S_{r,w} + \rho_{H_2O}^g \cdot \phi \cdot S_{r,g}) + \text{div}(\rho_w \cdot \underline{q}_l) + \text{div}(\underline{i}_{(H_2O)_g}) - Q_{H_2O} = 0 \quad (25)$$

avec Q_{H_2O} le terme de production / consommation totale d'eau [$\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$].

4.4.3 Conservation de la masse d'air

L'air se trouve dans la phase liquide et la phase gazeuse. En écrivant la conservation de la masse d'air dissous et d'air sec, nous obtenons :

$$\dot{S}_{(a)_g} + \text{div}(\underline{f}_{(a)_g}) + \dot{E}_a^{g \rightarrow d} = Q_{(a)_g} \quad (26)$$

$$\dot{S}_{(a)_d} + \text{div}(\underline{f}_{(a)_d}) - \dot{E}_a^{g \rightarrow d} = Q_{(a)_d} \quad (27)$$

où $\dot{S}_{(a)_g}$ est le terme d'emménagement d'air sec [$\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$], $\underline{f}_{(a)_g}$ est le flux massique d'air sec [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$], $\dot{E}_a^{g \rightarrow d}$ est le terme d'échange de la phase gazeuse vers la phase liquide [$\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$] et $Q_{(a)_g}$ est un terme de production / consommation d'air [$\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$] (respectivement pour l'air dissous).

$$\underline{f}_{(a)_g} = \underline{i}_{(a)_g} \quad (28)$$

$$\underline{f}_{(a)_d} = \rho_a^g . H_a . \underline{q}_l + \underline{i}_{(a)_d} \quad (29)$$

où $\underline{q}_l$ [m.s^{-1}] est la vitesse moyenne de la phase liquide par rapport à la phase solide et $\underline{i}_{(a)_g}$ et $\underline{i}_{(a)_d}$ sont les flux diffusifs d'air sec et d'air dissous [$\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$].

Nous pouvons ainsi regrouper les équations de bilan (26) et (27), le terme d'échange de la phase gazeuse vers la phase liquide disparaissant :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_a^g . \phi . S_{r,g} + \rho_a^g . H_a . \phi . S_{r,w}) + \text{div}(\underline{i}_{(a)_g}) + \text{div}(\underline{i}_{(a)_d} + \rho_a^g . H_a . \underline{q}_l) - Q_a = 0 \quad (30)$$

avec Q_a le terme de production / consommation totale d'air [$\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$].

4.4.4 Variation de la porosité

L'évolution de la porosité tient compte de la compressibilité du squelette et des grains solides :

$$d\phi = (b - \phi) . \left(\varepsilon_v + \frac{S_{r,w} . dp_w + S_{r,g} . dp_g}{K_s} \right) \quad (31)$$

où b est le coefficient de Biot [-], $\varepsilon_v = \varepsilon_{ii}$ et K_s le module d'incompressibilité des grains [Pa], qui se calcule à partir du coefficient de Biot et du module d'incompressibilité drainé du squelette K_0 [Pa] par :

$$b = 1 - \frac{K_0}{K_s} \quad (32)$$

avec $K_0 = \frac{E_0}{3(1 - 2\nu_0)}$, E_0 et ν_0 étant le module de Young drainé [Pa] et le coefficient de Poisson drainé du squelette [-].

5 PARAMÈTRES DES MODÈLES HYDRAULIQUE ET MÉCANIQUE

Voici tout d'abord les différentes propriétés de l'eau et de l'air, qui sont les deux constituants de la phase gazeuse. Ensuite, nous donnons les valeurs des paramètres qui sont utilisés dans les lois de transfert biphasique et mécaniques caractérisant chaque matériau.

5.1 Eau et air

Les propriétés des différents composants sont données ci-dessous pour une température de 293°K et une pression de 0.1 MPa.

	Nom	Valeur	Unité
μ_w	Viscosité dynamique de l'eau	0.001	Pa.s
ρ_w	Masse volumique de l'eau	1000	kg.m ⁻³
$1/\chi_w$	Compressibilité de l'eau	$5 \cdot 10^{-10}$	Pa ⁻¹
μ_a^g	Viscosité dynamique de l'air	$18.6 \cdot 10^{-6}$	Pa.s
$\mu_{H_2O}^g$	Viscosité dynamique de la vapeur d'eau	10^{-5}	Pa.s
ρ_a^g	Masse volumique de l'air	1.205	kg.m ⁻³
H_a	Coefficient de Henry	0.0234	-

Tableau 1 : Propriétés de l'eau et de l'air.

5.2 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	-

Tableau 2 : Paramètres hydrauliques de l'argilite.

	Nom	Valeur	Unité
E_0	Module de Young drainé	4000	MPa
ν_0	Coefficient de Poisson drainé	0.30	-
c	Cohésion	3	MPa
Φ	Angle de frottement	20	°
b	Coefficient de Biot	0.6	-
ρ	Masse volumique	2300	kg.m ⁻³

Tableau 3 : Paramètres mécaniques de l'argilite.

5.3 Béton

	Nom	Valeur	Unité
k	Perméabilité intrinsèque	$1 \cdot 10^{-18}$	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	-

Tableau 4 : Paramètres hydrauliques du béton (radier et revêtement).

	Nom	Valeur	Unité
E_0	Module de Young drainé	30000	MPa
ν_0	Coefficient de Poisson drainé	0.3	-
b	Coefficient de Biot	1.0	-
ρ	Masse volumique	2300	kg.m ⁻³

Tableau 5 : Paramètres mécaniques du béton (radier et revêtement).

5.4 Vide

Des éléments de vides sont présents dans les modélisations numériques axisymétriques. Les paramètres du vide sont donnés dans le tableau ci-dessous.

	Nom	Valeur	Unité
k	Perméabilité intrinsèque	$1 \cdot 10^{-12}$	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 maximale	1	-
S_{res}	Saturation résiduelle	0	-
τ	Tortuosité	1	-
$1/\chi_w$	Compressibilité	$5 \cdot 10^{-10}$	Pa^{-1}

Tableau 6 : Paramètres hydrauliques du vide.

5.5 Courbes de saturation à l'eau et de perméabilité relative à l'eau

On donne ci-après, pour l'argilite (avec une comparaison avec des données expérimentales), le béton et le vide, les courbes d'évolution de la saturation en eau $S_{r,w}$ avec la pression capillaire p_c (*Figure 4*, *Figure 6* et *Figure 8*) et, pour l'argilite et le béton, les courbes de perméabilité relative à l'eau $k_{r,w}$ avec la saturation à l'eau $S_{r,w}$ (*Figure 5* et *Figure 7*).

Pour le vide, la courbe de perméabilité relative à l'eau n'est pas détaillée car elle n'est pas utilisée : la perméabilité intrinsèque est indépendante de la saturation.

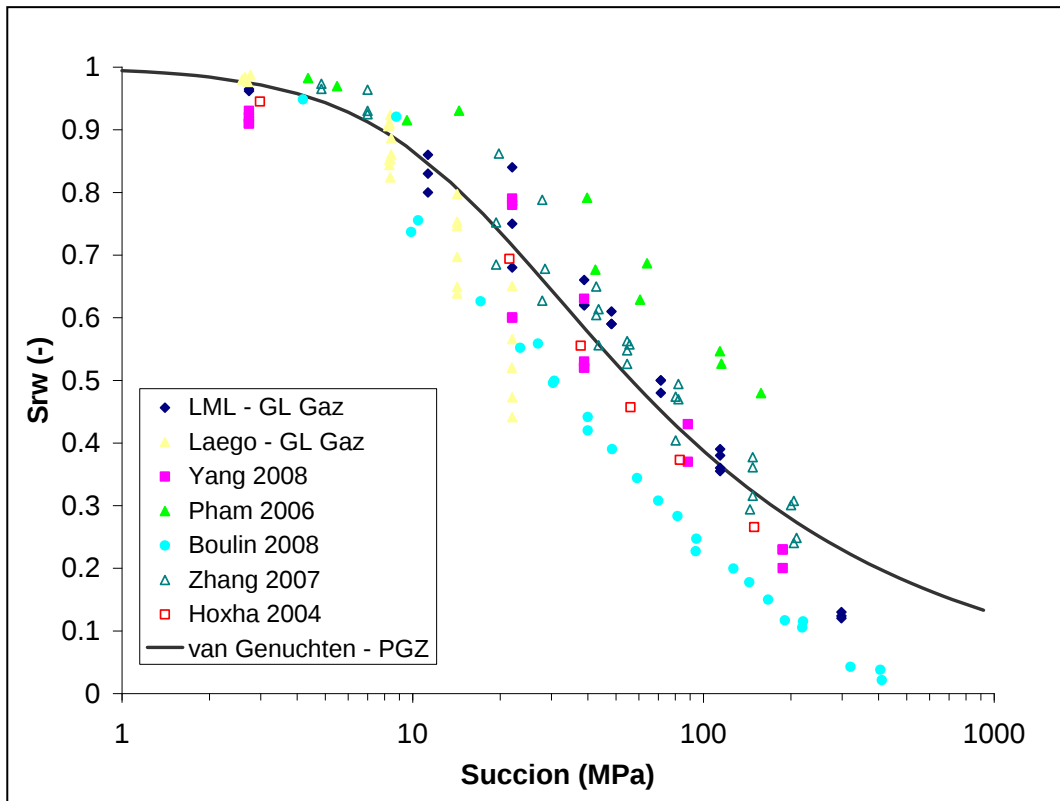


Figure 4 : Evolution de la saturation en eau $S_{r,w}$ avec la pression capillaire p_c (suction) pour l'argilite (avec une comparaison avec des données expérimentales).

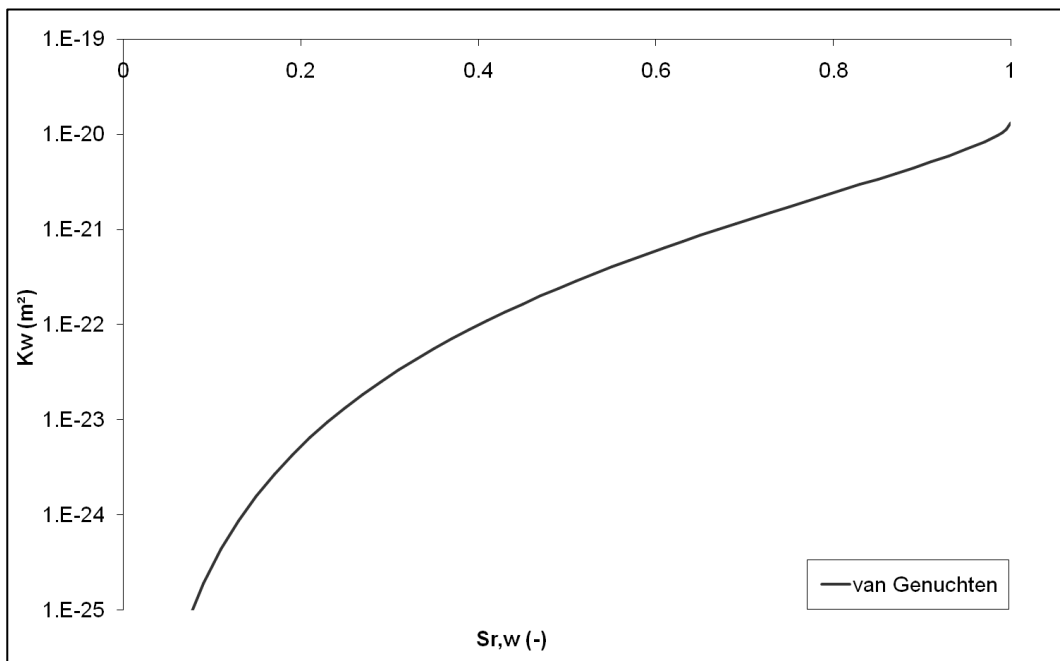


Figure 5 : Evolution de la perméabilité relative verticale à l'eau $k_{r,w}$ en fonction de la saturation à l'eau $S_{r,w}$ pour l'argilite.

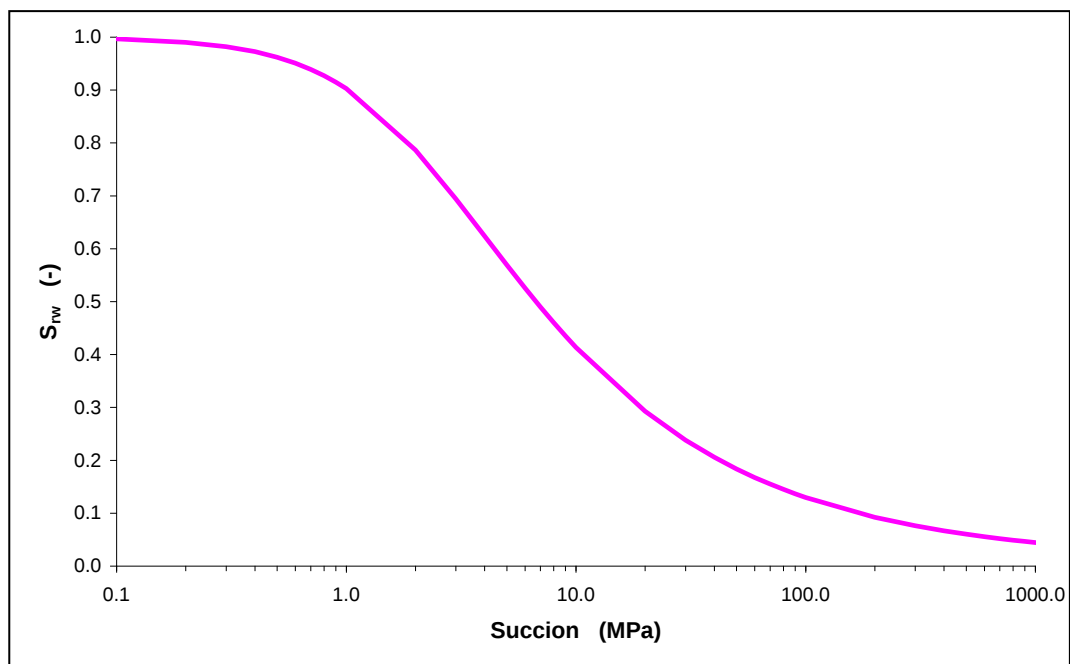


Figure 6 : Evolution de la saturation en eau $S_{r,w}$ avec la pression capillaire p_c (suction) pour le béton (radier et revêtement).

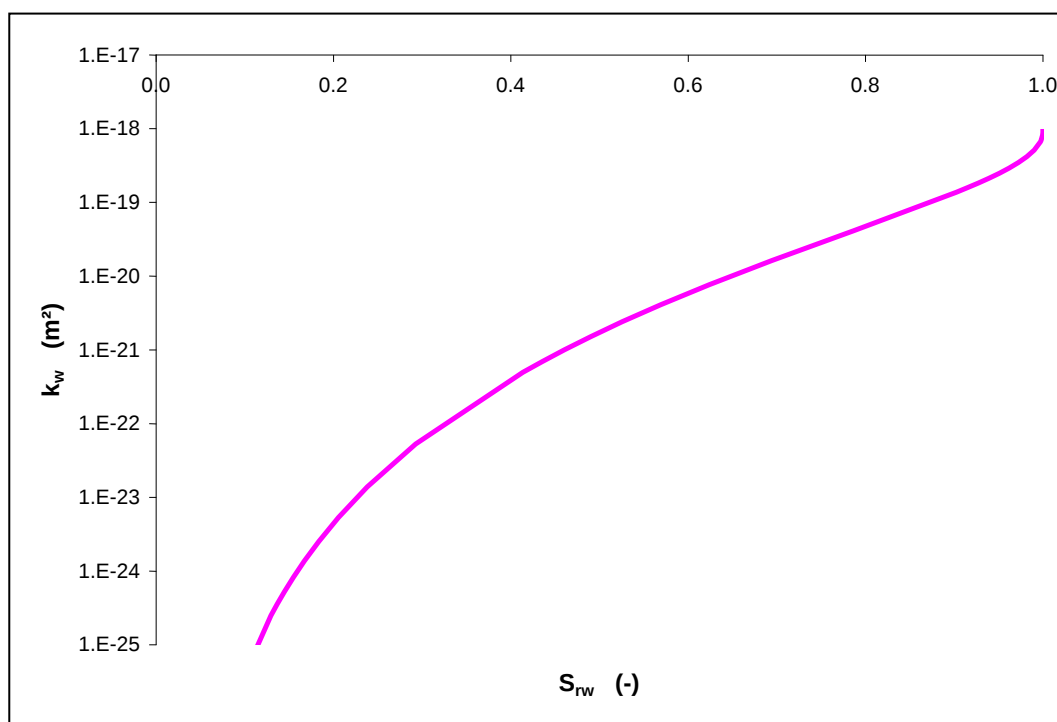


Figure 7 : Evolution de la perméabilité relative à l'eau $k_{r,w}$ en fonction de la saturation à l'eau $S_{r,w}$ pour le béton (radier et revêtement).

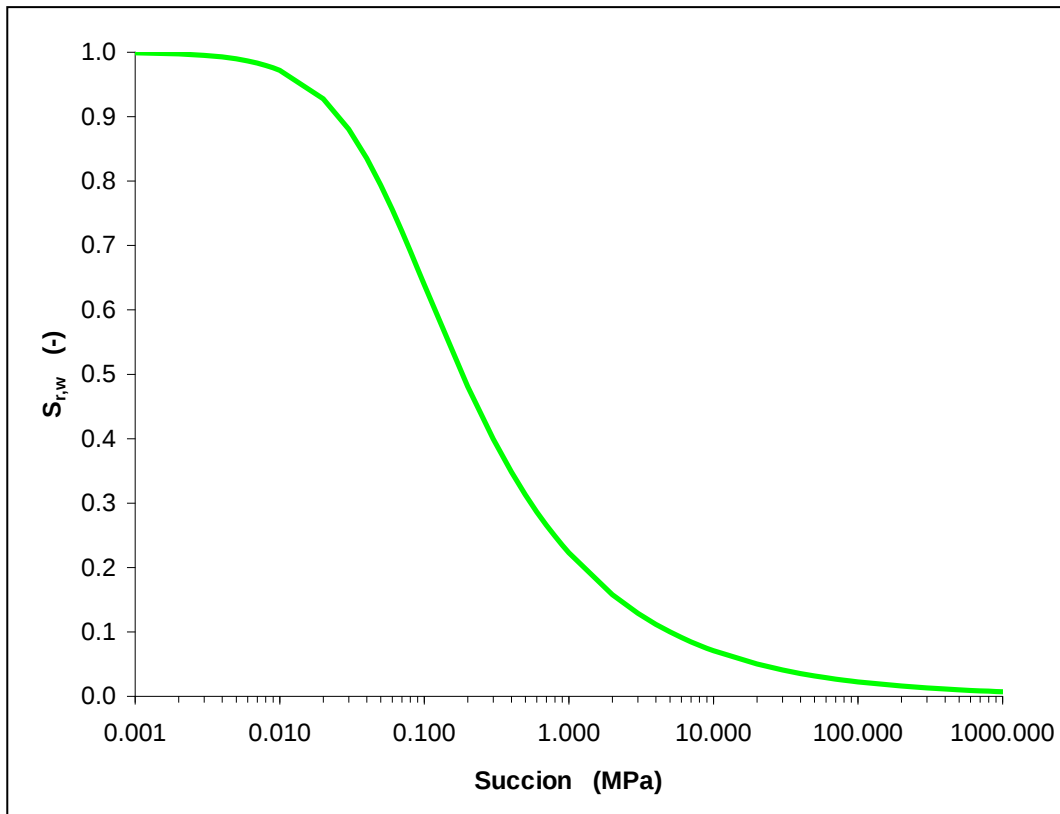


Figure 8 : Evolution de la saturation en eau $S_{r,w}$ avec la pression capillaire p_c (suction) pour le vide.

6 SIMULATIONS ET RESULTATS NUMERIQUES

La simulation de l'expérience SDZ a été réalisée, à l'aide du logiciel non-linéaire aux éléments finis LAGAMINE développé à l'Université de Liège, en conditions :

- 2D état plan de déformation écoulement pur,
- 2D état plan de déformation couplage hydromécanique,
- axisymétrique écoulement pur, autour de l'axe de la galerie,
- en 3D.

6.1 2D état plan de déformation écoulement pur

Dans ce calcul 2D état plan de déformation, la pression de gaz p_g est maintenue constante et les conditions sont isothermes dans tout le modèle.

6.1.1 Géométrie

La géométrie du maillage 2D est détaillée sur les figures ci-dessous (*Figure 9* et *Figure 10*). L'étendue du maillage est de 200 m horizontalement et 400 m verticalement. La discrétisation est réalisée avec un total de 7613 nœuds et 2512 éléments. On notera évidemment une discrétisation plus raffinée autour de la galerie.

La zone endommagée EDZ (« Excavation damaged zone ») est représentée autour de la galerie. Le radier et le revêtement en béton sont également pris en compte dans le maillage. Seule la zone d'essai non revêtue sera étudiée en 2D état plan de déformation.

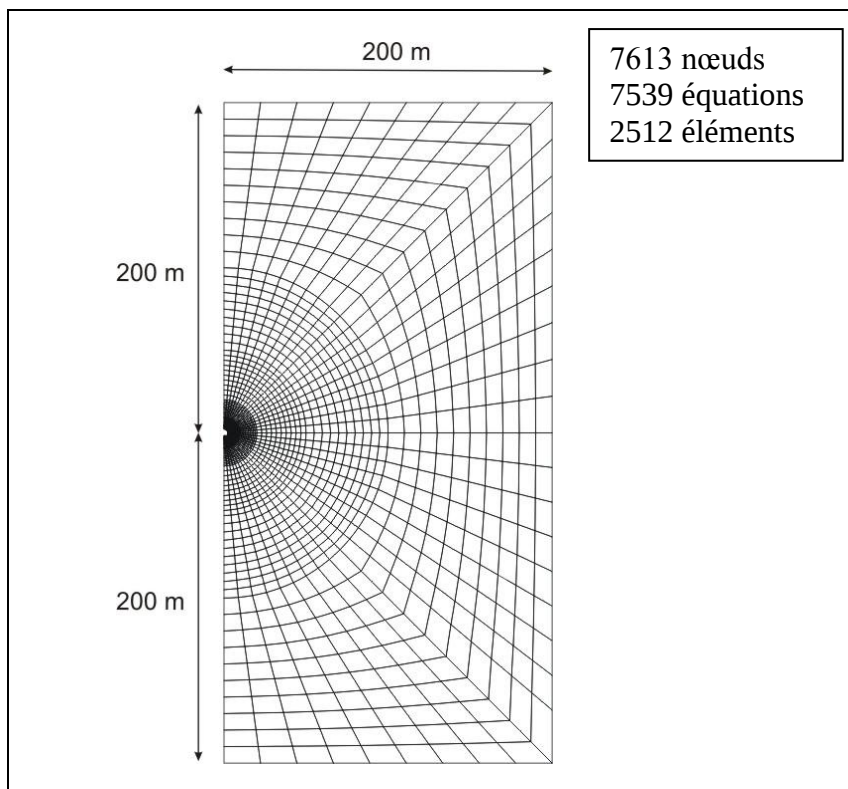


Figure 9 : Vue 2D globale de la géométrie du maillage.

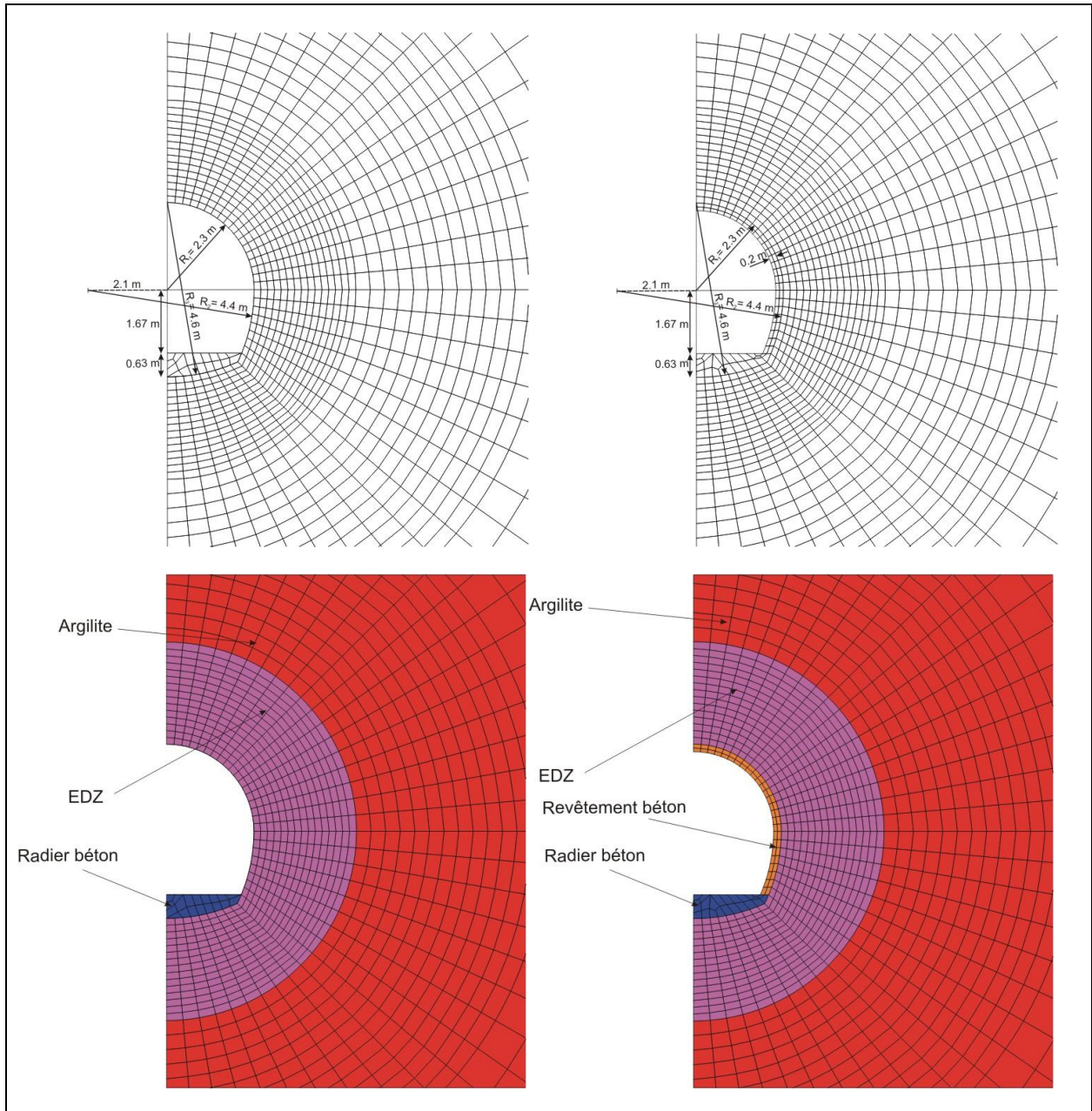


Figure 10 : Vue 2D de la galerie en zone d'essai non revêtue et en zone revêtue étanchée (non étudiée).

6.1.2 Conditions initiales

Les conditions initiales dans l'argilite (saine et EDZ) correspondent à celles au niveau de la galerie GED, à savoir :

$$p_w = 4.5 \text{ MPa}$$

$$p_g = 0.1 \text{ MPa}$$

$$T = 293 \text{ °K}$$

La pression de gaz est prise égale à la pression atmosphérique. Le radier et le revêtement en béton sont mis en place à la pression d'eau $p_w = 0.1 \text{ MPa}$.

6.1.3 Conditions aux limites

Imposition aux limites lointaines :

Les déplacements sont bloqués dans l'ensemble du modèle. La pression d'eau initiale p_w de 4.5 MPa est fixée aux limites lointaines, à 200 m de la galerie.

Imposition de l'humidité relative H_r dans la galerie :

Des mesures de température et d'hygrométrie ont été effectuées dans les sections SDZ1261 et SDZ1262 (rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B) situées dans la zone de galerie non revêtue dédiée à l'expérience SDZ.

L'annexe 8.1 détaille les positions des sections, des capteurs de température et d'hygrométrie et l'évolution des mesures au cours du temps. La **Figure 11** représente les valeurs moyennes journalières de ces mesures.

L'humidité relative H_r est définie par la loi de Kelvin qui peut s'écrire :

$$H_r = \exp\left(\frac{(p_w - p_g).M_{H_2O}}{\rho_w.R.T}\right) \quad (33)$$

avec M_{H_2O} la masse molaire de l'eau [=0.018 kg.mol⁻¹], R la constante des gaz parfaits [=8.313 J.mol⁻¹.K⁻¹] et p_g la pression de gaz [=0.1 MPa].

La pression d'eau p_w correspondant aux mesures de température et d'humidité relative moyenne journalière est représentée à la **Figure 12**. Cette pression sera imposée en galerie à un nœud d'environnement par l'intermédiaire d'éléments FMIVP (échanges d'eau et de vapeur, voir paragraphe 4.3).

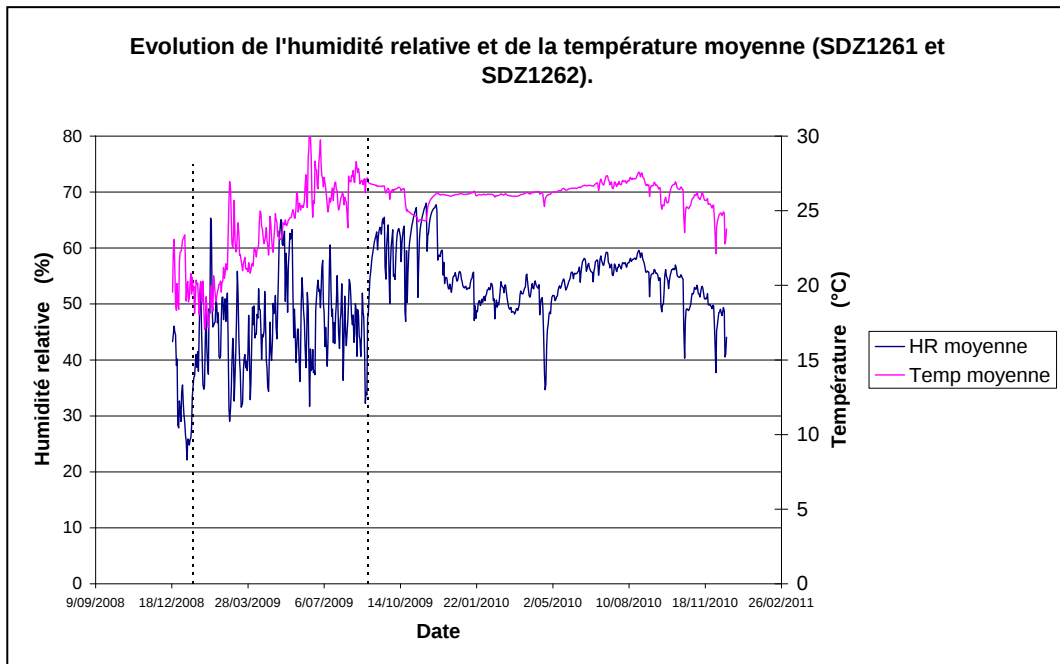


Figure 11 : Evolution de l'humidité relative et de la température moyenne journalière dans la section de galerie non revêtue dédiée à l'expérience SDZ.

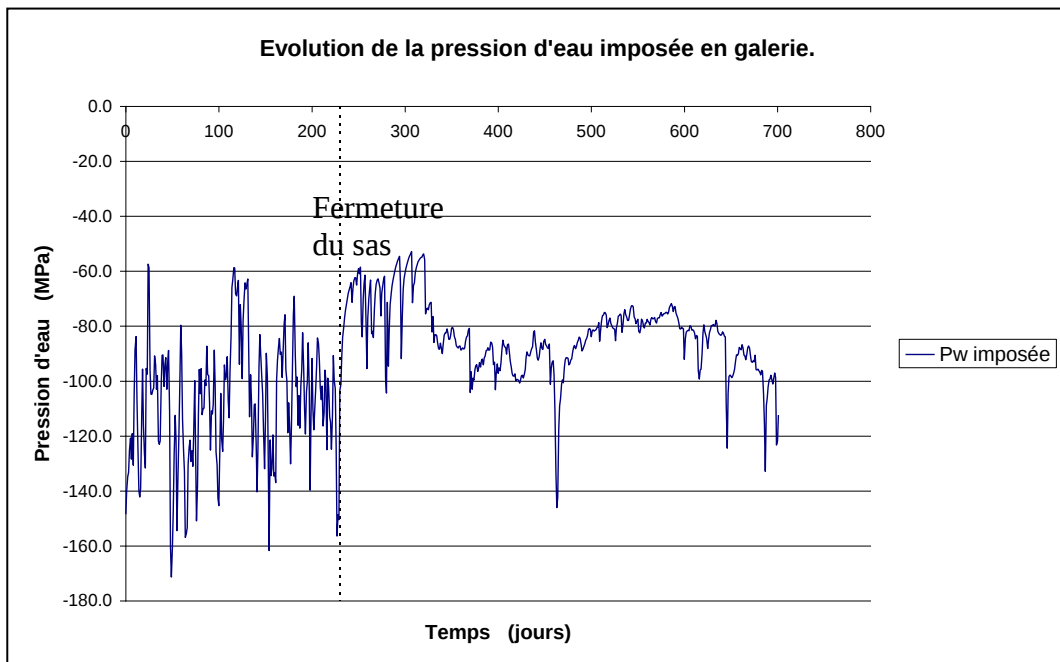


Figure 12 : Evolution de la pression d'eau imposée en galerie (zone SDZ).

6.1.4 Chronologie

Jour 0	15/01/2009	Début de la simulation (= Fin creusement SDZ).
Jour 12	27/01/2009	Mise en place du revêtement (entre le 26/01/2009 et le 28/01/2009).
Jour 36	20/02/2009	Mise en place du radier (entre le 13/02/2009 et le 26/02/2009).
Jour 230	02/09/2009	Fermeture du sas.

Jour 701 16/12/2010 Fin de la simulation.

Avant la fermeture du sas il y a une 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.

6.1.5 Mesures expérimentales

Des mesures de pression ont été effectuées dans les forages situés dans la zone de galerie non revêtue dédiée à l'expérience SDZ : forages SDZ1241 à 1244 (rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B). Les résultats numériques seront comparés à ces mesures.

L'annexe 8.2 détaille la position des forages, la position des capteurs de mesures de pression et l'évolution des mesures au cours du temps.

6.1.6 Résultats numériques

Différents cas sont envisagés en vue de déterminer une combinaison de paramètres adéquate fournissant des résultats proches des mesures expérimentales effectuées. Les paramètres visés par cette calibration sont la prise en compte ou non du suintement, le coefficient de transfert de masse pour l'évaporation α , la perméabilité intrinsèque de l'argilite saine et endommagée et la dimension de la zone endommagée (EDZ).

Les résultats présentés sont l'évolution de la pression d'eau en paroi, l'évolution des pressions d'eau dans les forages dédiés à la zone SDZ comparée aux mesures expérimentales et l'évolution de la pression d'eau le long de coupes situées dans l'argilite (**Figure 13**).

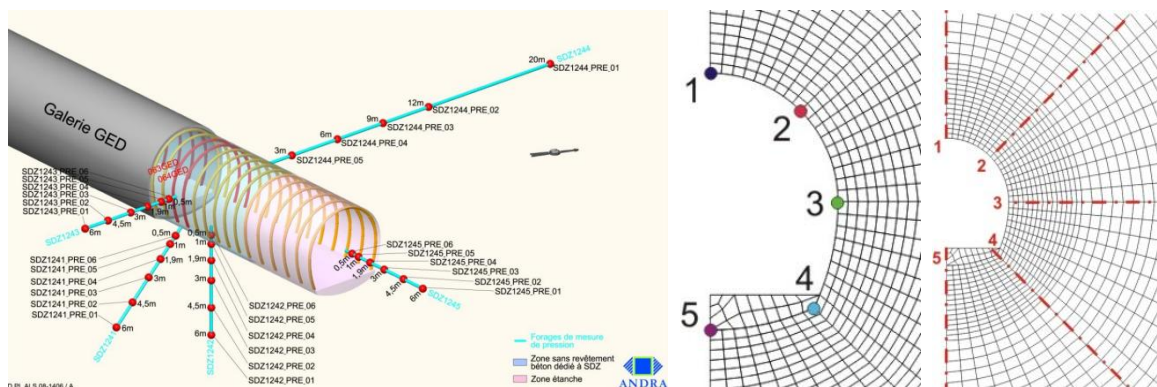


Figure 13 : Localisation des forages, des points en paroi et des coupes de sortie des résultats de pression.

Cas 1 :

Pour ce premier cas, sont envisagés :

- Pas de suintement : $K = 0 \text{ s}^3.\text{kg}^{-1}$
- Evaporation : $\alpha = 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$
- Pas d'EDZ
- Perméabilité argilite saine : $k_{\text{ani}} (\text{hor/vert}) = 4 / 1,33 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ dans tout le massif

La **Figure 14** présente l'évolution de la pression en paroi qui est en équilibre avec la pression en galerie.

Les **Figure 15**, **Figure 16**, **Figure 17** et **Figure 18** présentent l'évolution de la pression en forages comparée avec les mesures expérimentales. Les pressions d'eau sont globalement trop élevées et les pentes trop importantes horizontalement. Le drainage est trop rapide à cause du coefficient de transfert de masse α trop élevé.

Les **Figure 19**, **Figure 20** et **Figure 21** présentent l'évolution de la pression d'eau le long de coupes situées dans l'argilite.

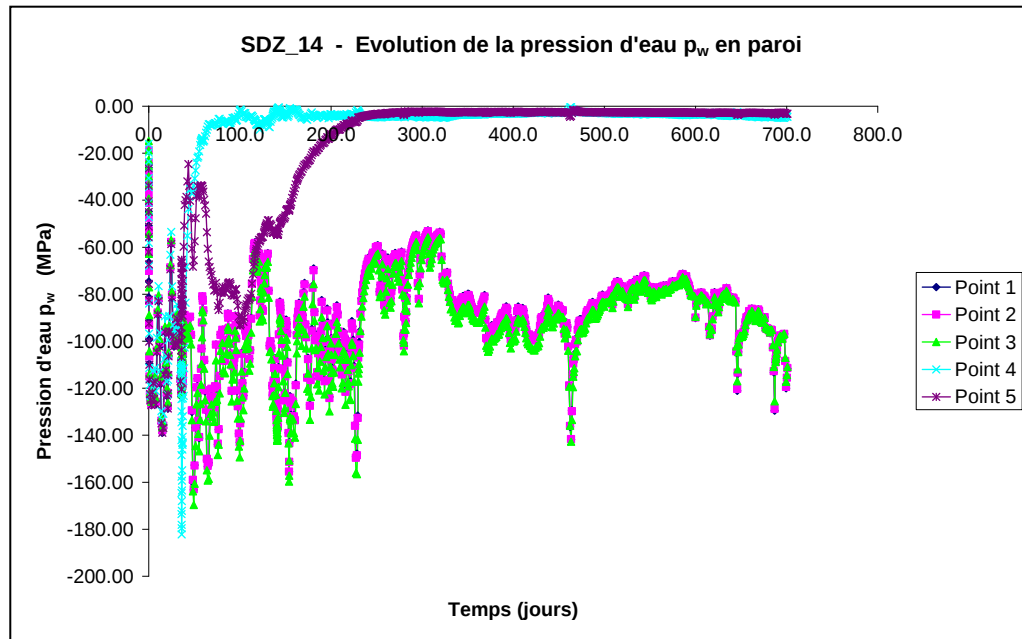


Figure 14 : Evolution de la pression d'eau en paroi, cas 1, 2D écoulement pur.

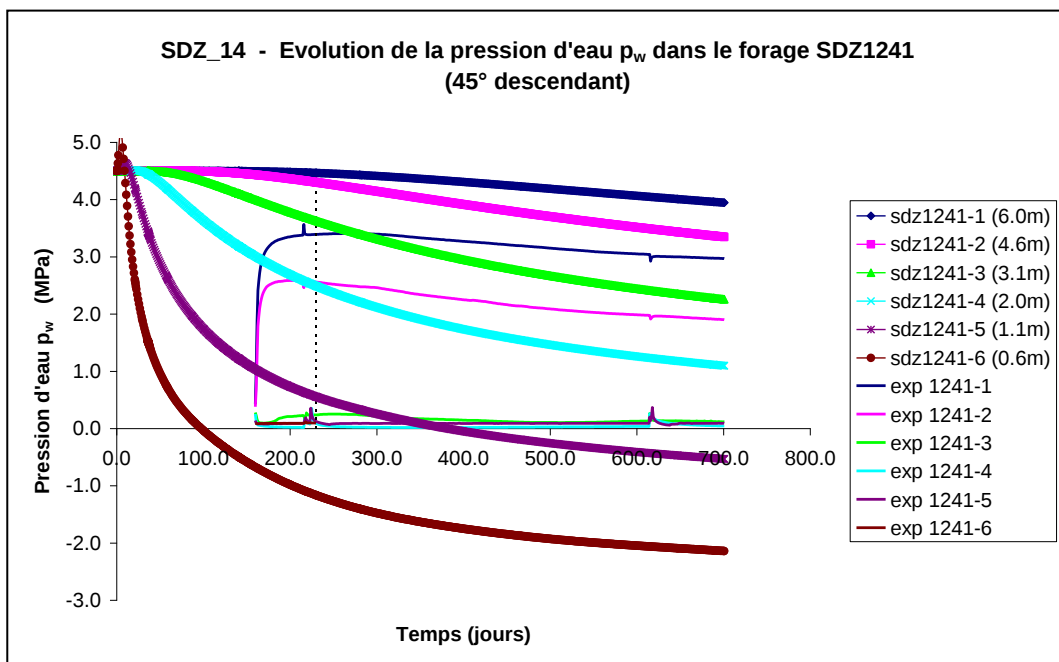


Figure 15 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1241 descendant à 45°, cas 1, 2D écoulement pur.

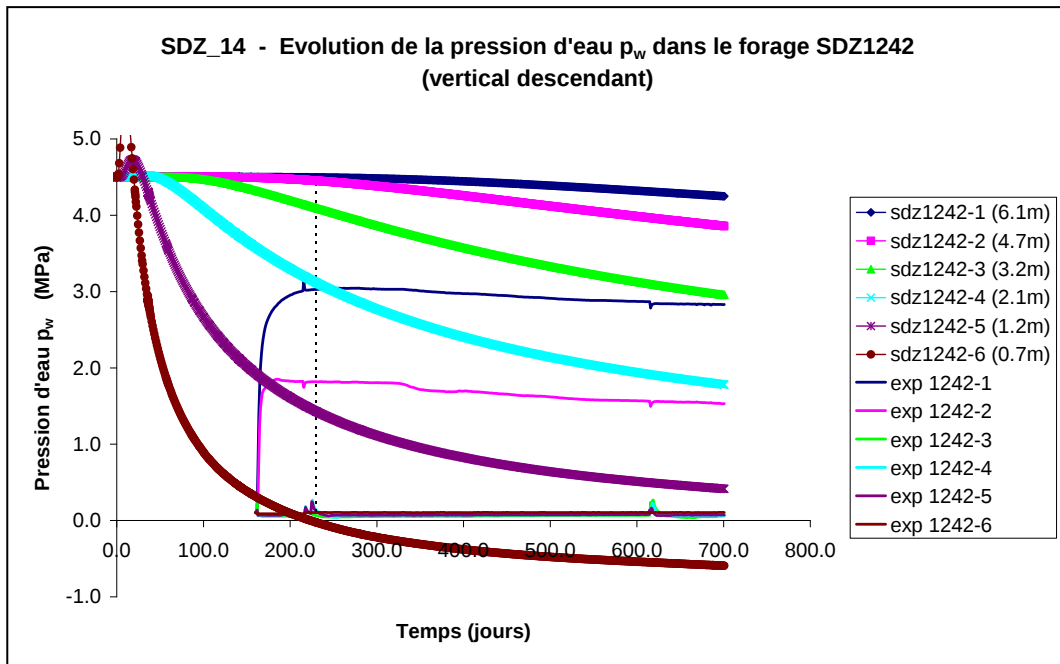


Figure 16 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1242 vertical descendant, cas 1, 2D écoulement pur.

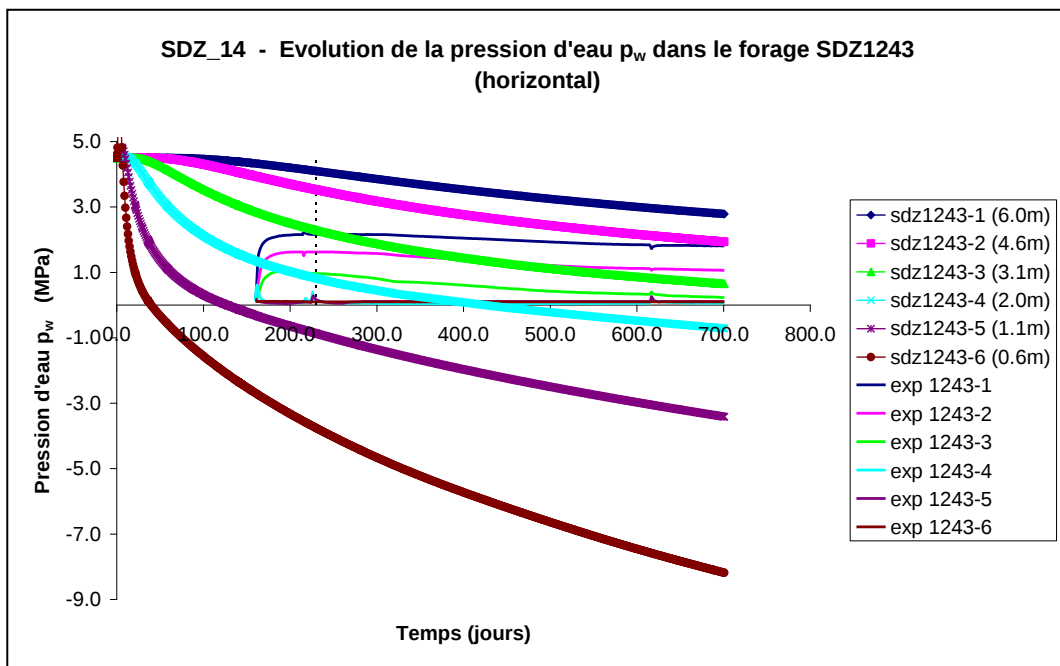


Figure 17 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1243 horizontal, cas 1, 2D écoulement pur.

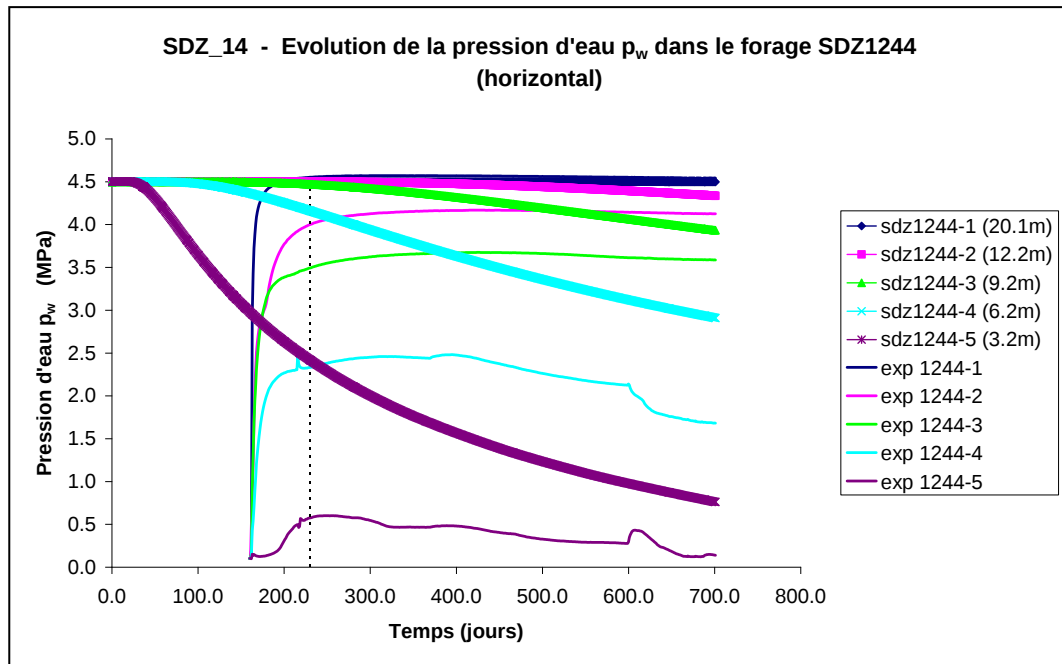


Figure 18 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1244 horizontal « lointain », cas 1, 2D écoulement pur.

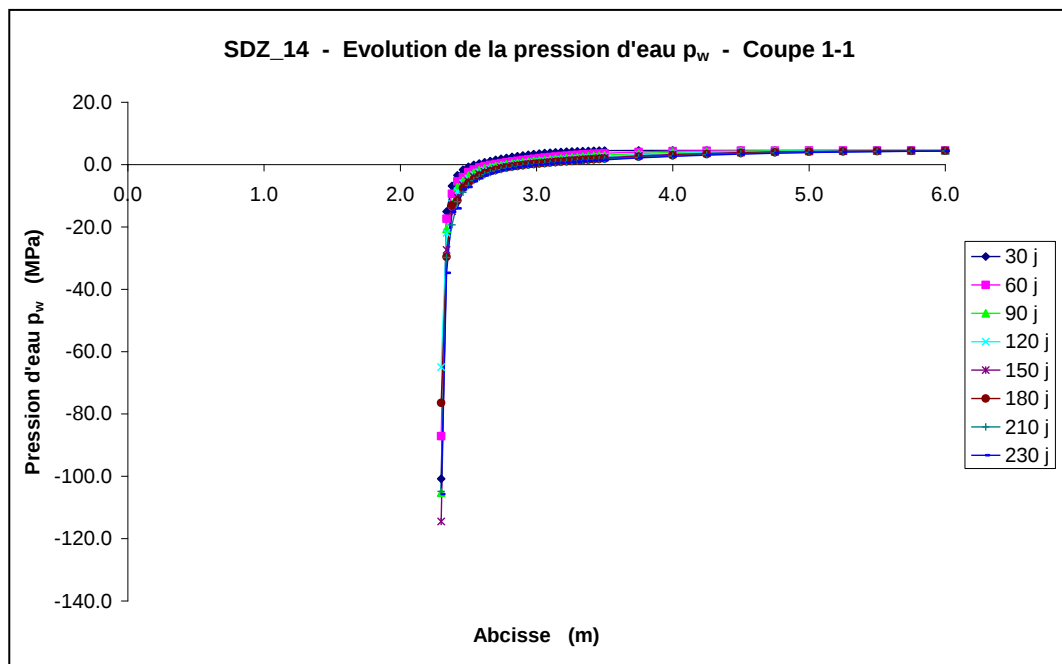


Figure 19 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 1-1 verticale montante, cas 1, 2D écoulement pur.

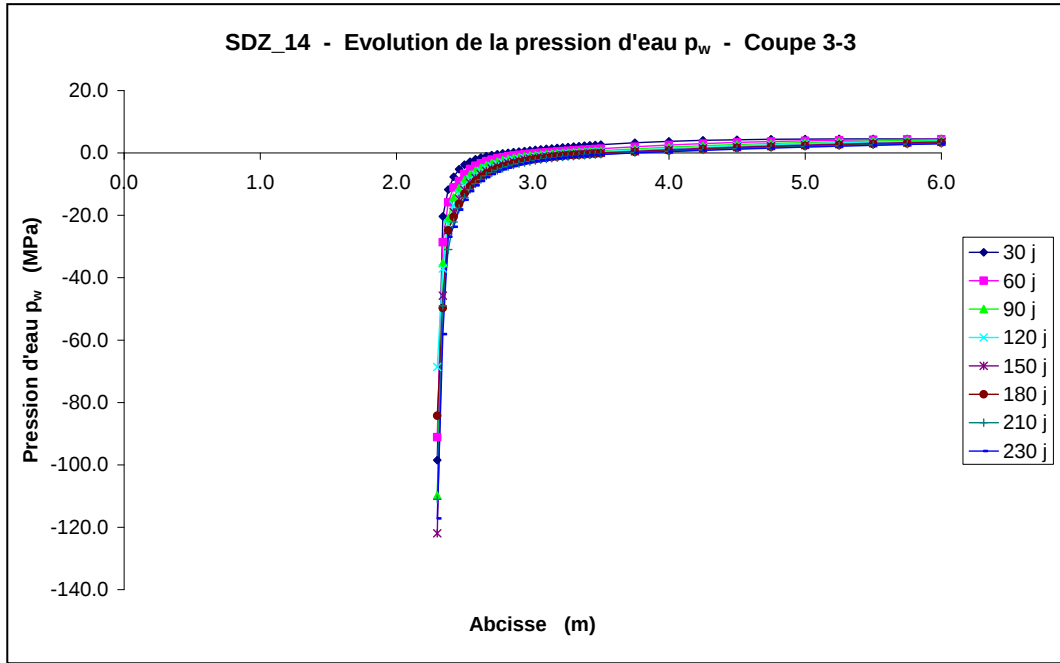


Figure 20 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 3-3 horizontale, cas 1, 2D écoulement pur.

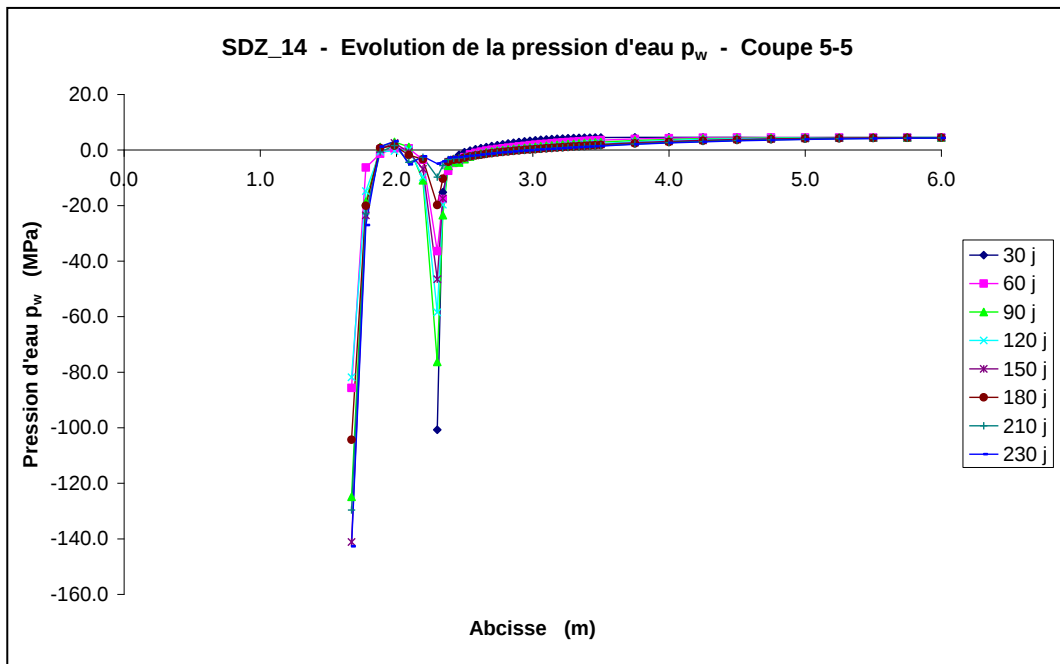


Figure 21 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 5-5 verticale descendante, cas 1, 2D écoulement pur.

Cas 2 :

Pour ce cas et par rapport au cas précédent, un suintement, une diminution de l'évaporation, une augmentation de la perméabilité de l'argilite saine et une zone EDZ sont envisagés :

- Suintement : $K = 10^{-10} \text{ s}^3.\text{kg}^{-1}$
- Evaporation : $\alpha = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$
- EDZ circulaire de 1,2 m d'épaisseur
- Perméabilité argilite EDZ : $k_{\text{ani}} (\text{hor/vert}) = 4 / 1,33 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ de 2,3 à 3,5 m
- Perméabilité argilite saine : $k_{\text{ani}} (\text{hor/vert}) = 4 / 1,33 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ de 3,5 à 200 m

La **Figure 22** présente l'évolution de la pression en paroi qui n'est pas en équilibre avec la pression en galerie.

Les **Figure 23**, **Figure 24**, **Figure 25** et **Figure 26** présentent l'évolution de la pression en forages comparée avec les mesures expérimentales. Les pressions d'eau sont trop basses en zone lointaine, relativement correctes à court terme horizontalement et trop élevées verticalement.

Les **Figure 27**, **Figure 28** et **Figure 29** présentent l'évolution de la pression d'eau le long de coupes situées dans l'argilite. Un drainage progressif (transitoire) dans l'argilite et une pression similaire à la pression atmosphérique dans la zone EDZ sont observés.

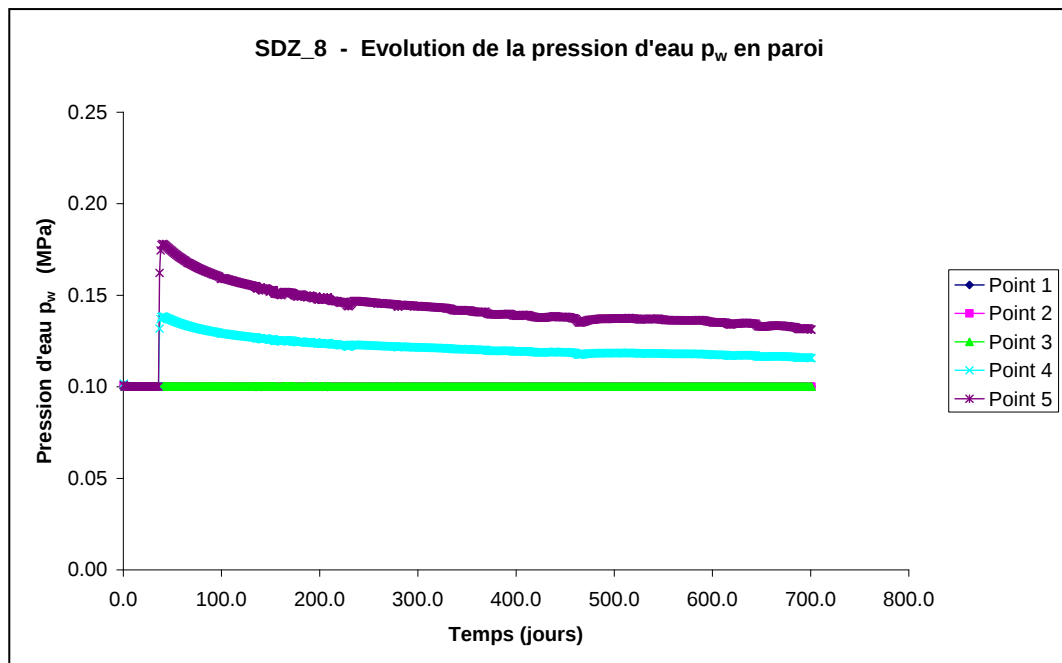


Figure 22 : Evolution de la pression d'eau en paroi, cas 2, 2D écoulement pur.

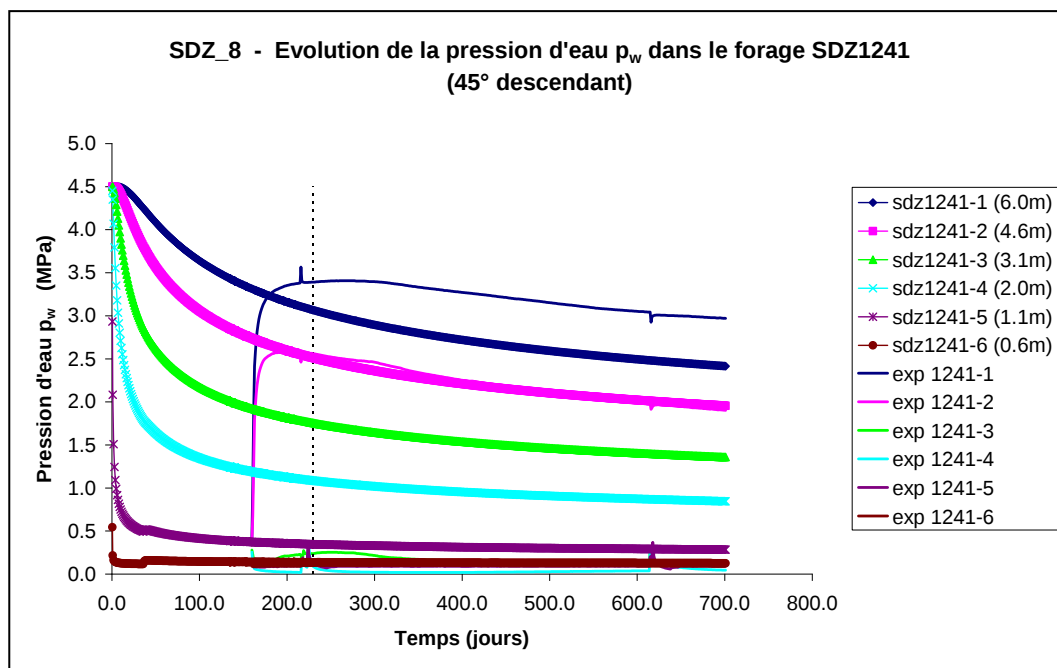


Figure 23 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1241 descendant à 45°, cas 2, 2D écoulement pur.

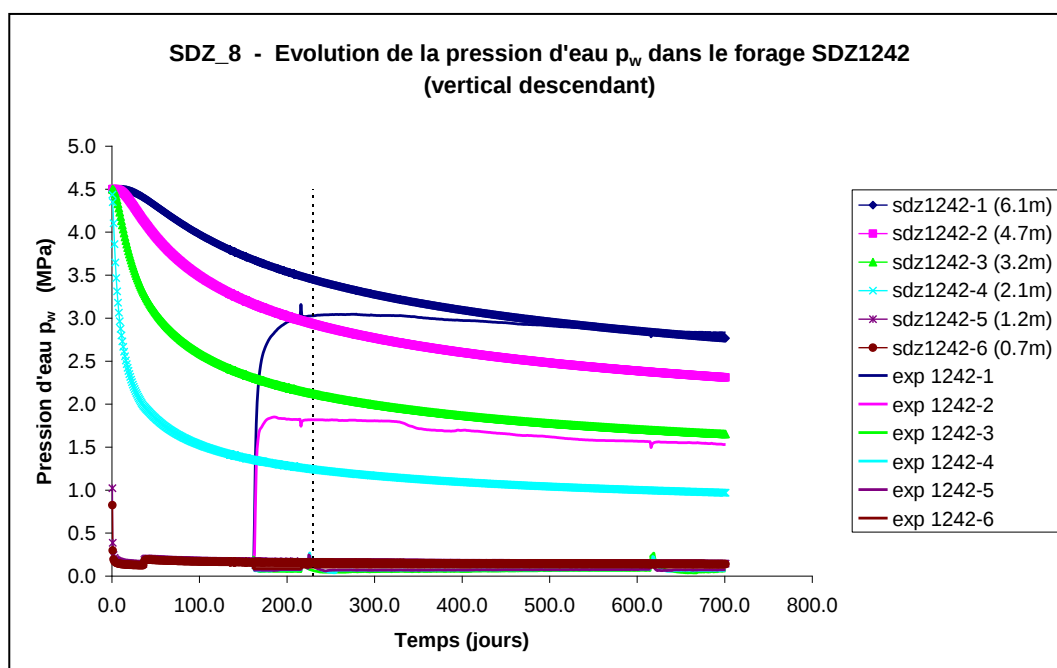


Figure 24 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1242 vertical descendant, cas 2, 2D écoulement pur.

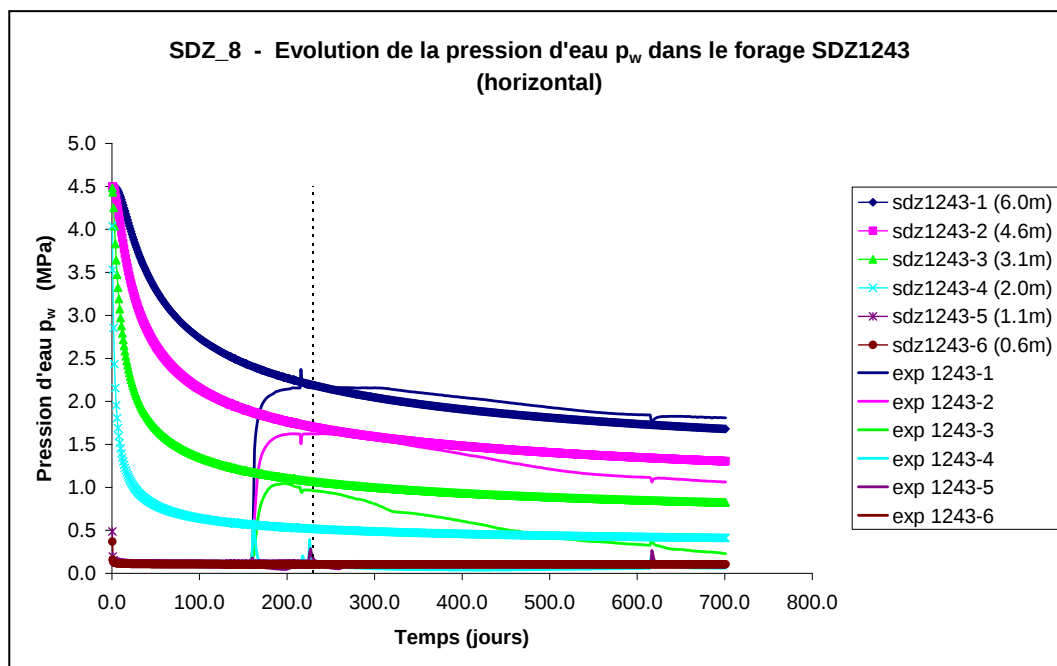


Figure 25 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1243 horizontal, cas 2, 2D écoulement pur.

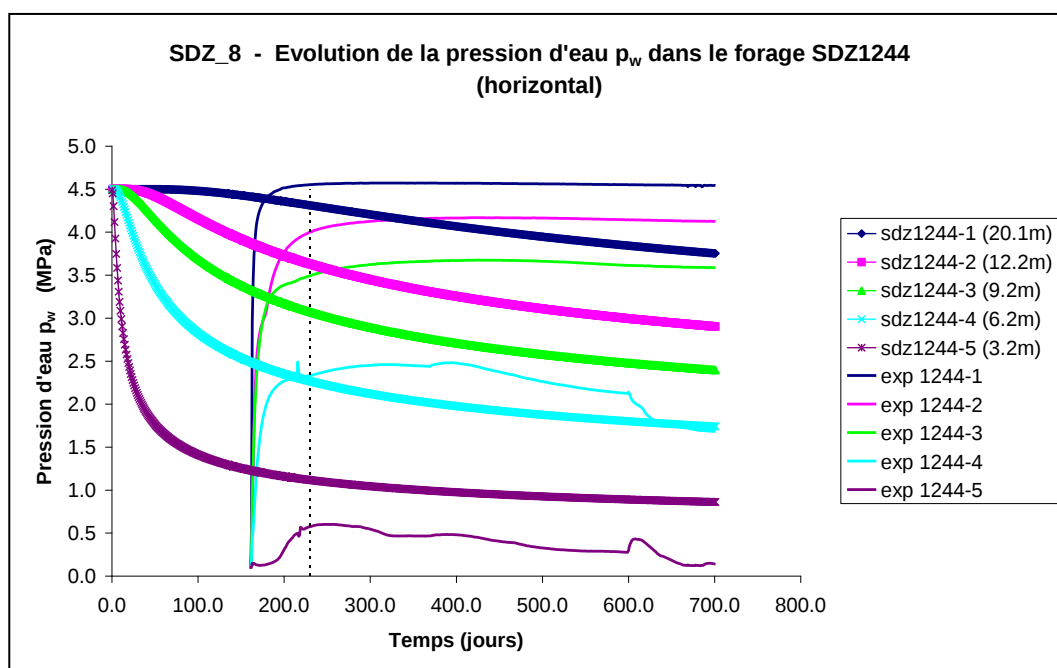


Figure 26 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1244 horizontal « lointain », cas 2, 2D écoulement pur.

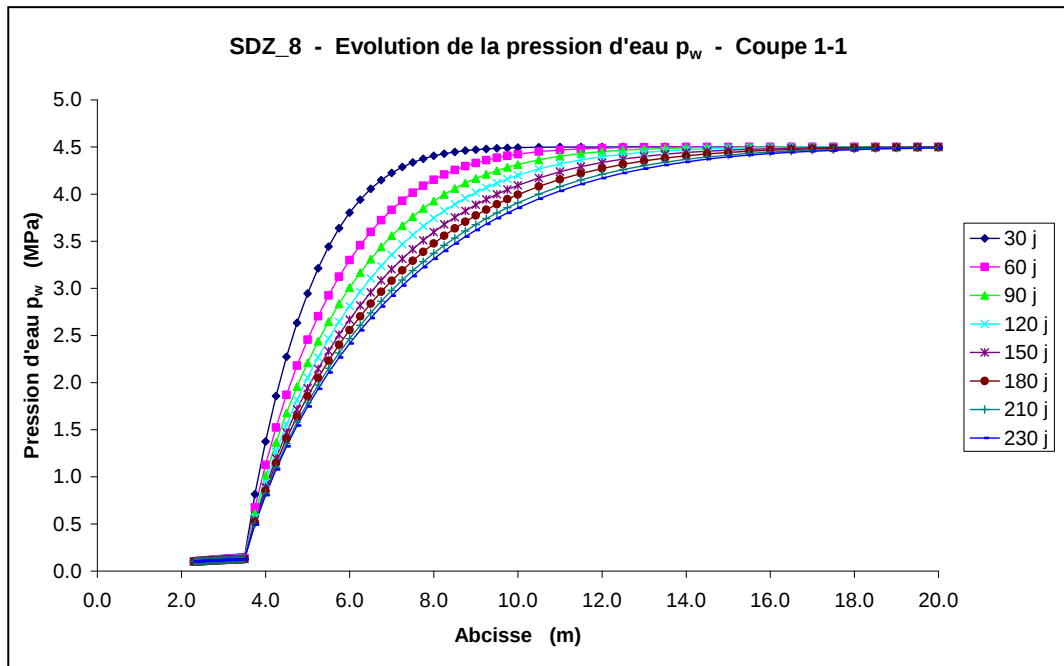


Figure 27 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 1-1 verticale montante, cas 2, 2D écoulement pur.

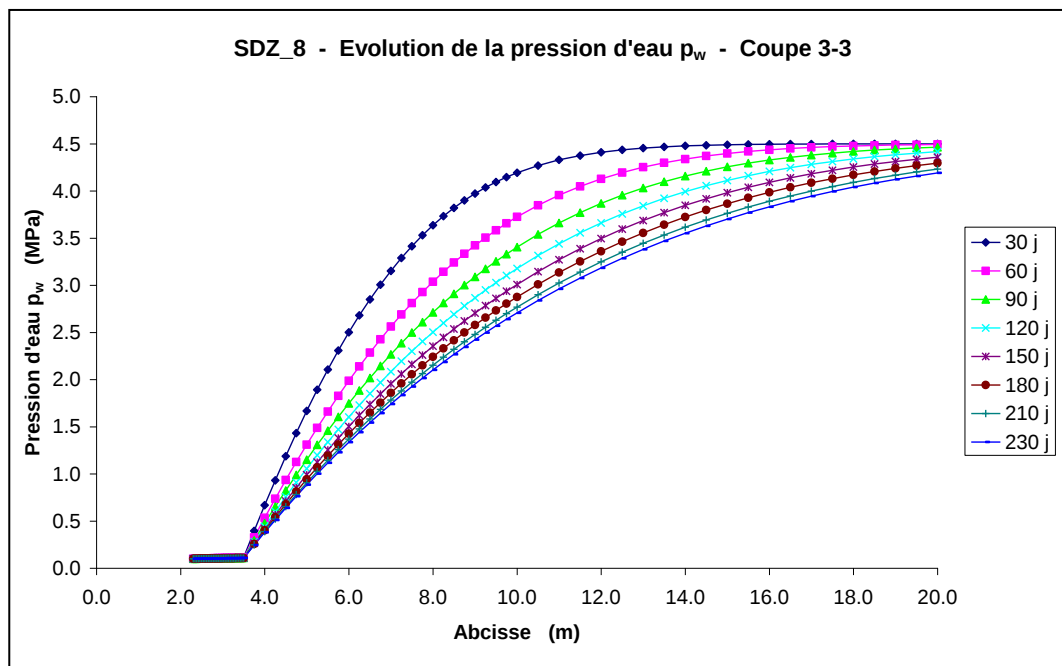


Figure 28 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 3-3 horizontale, cas 2, 2D écoulement pur.

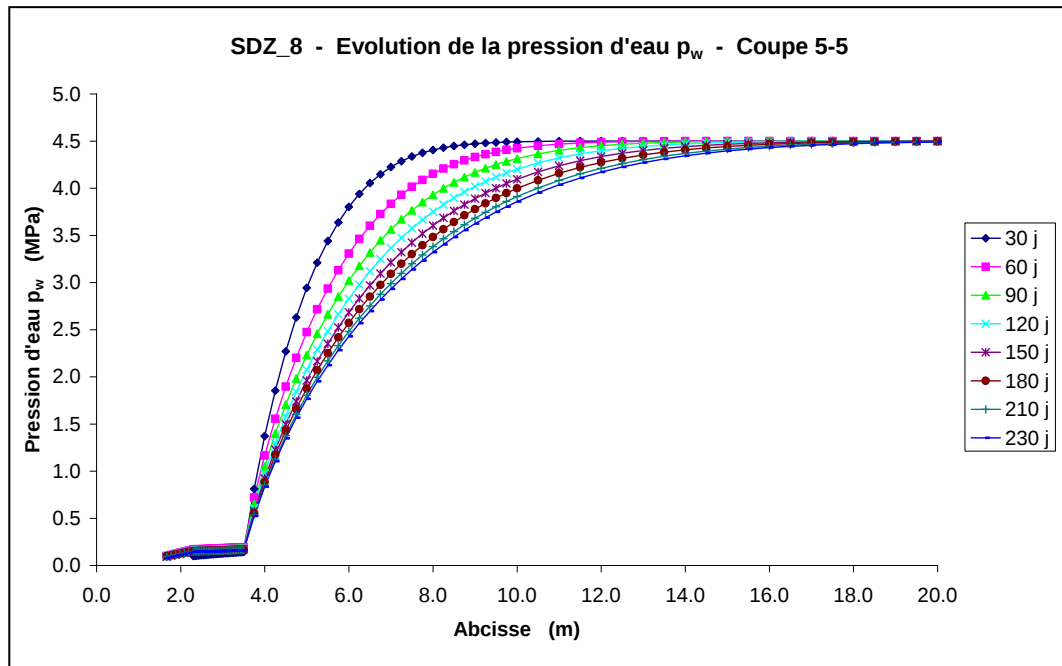


Figure 29 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 5-5 verticale descendante, cas 2, 2D écoulement pur.

Cas 3 :

Pour ce cas et par rapport au cas précédent, une augmentation de l'épaisseur de la zone EDZ et une diminution de la perméabilité de l'argilite saine sont envisagées :

- Suintement : $K = 10^{-10} \text{ s}^3.\text{kg}^{-1}$
- Evaporation : $\alpha = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$
- EDZ circulaire de 2,7 m d'épaisseur
- Perméabilité argilite EDZ : $k_{\text{ani}} (\text{hor/vert}) = 4 / 1,33 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ de 2,3 à 5,0 m
- Perméabilité argilite saine : $k_{\text{ani}} (\text{hor/vert}) = 4 / 1,33 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ de 5,0 à 200 m

La **Figure 30** présente l'évolution de la pression en paroi qui n'est pas en équilibre avec la pression en galerie.

Les **Figure 31**, **Figure 32**, **Figure 33** et **Figure 34** présentent l'évolution de la pression en forages comparée avec les mesures expérimentales. Les pressions d'eau sont relativement correctes en zone lointaine, relativement correctes à long terme horizontalement et trop élevées verticalement. Le drainage vertical est sous-estimé et une zone EDZ plus étendue verticalement sera considérée au cas suivant.

Les **Figure 35**, **Figure 36** et **Figure 37** présentent l'évolution de la pression d'eau le long de coupes situées dans l'argilite.

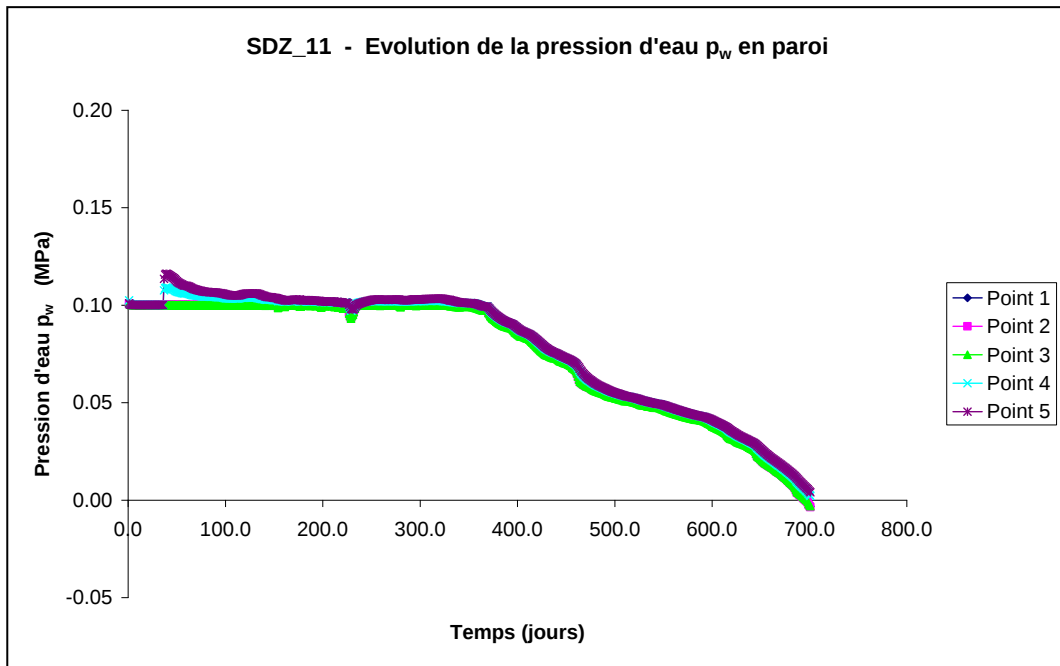


Figure 30 : Evolution de la pression d'eau en paroi, cas 3, 2D écoulement pur.

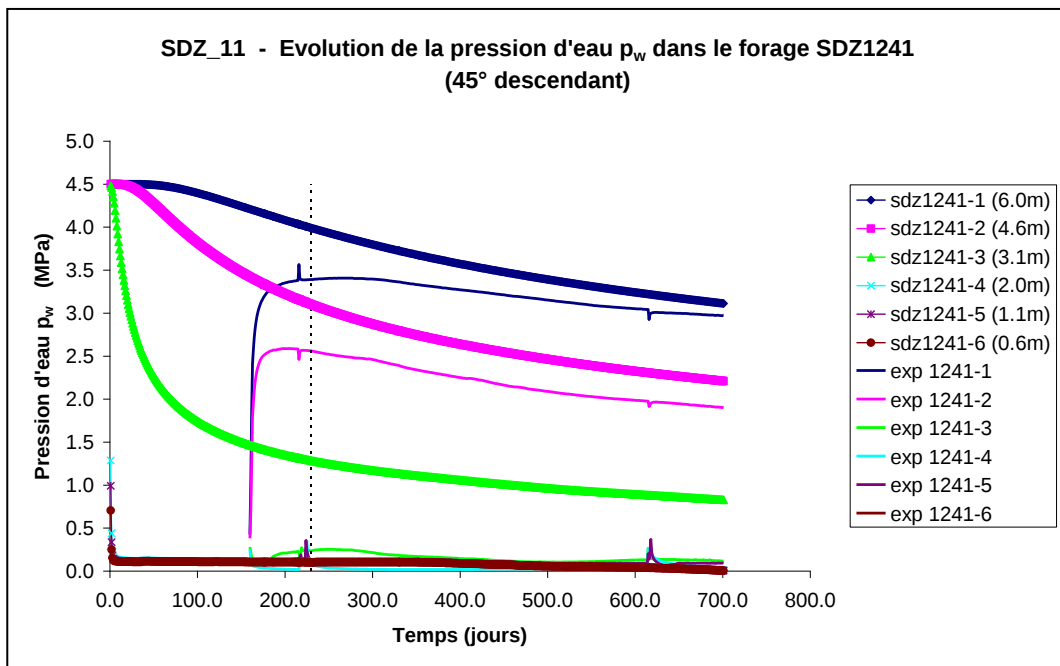


Figure 31 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1241 descendant à 45°, cas 3, 2D écoulement pur.

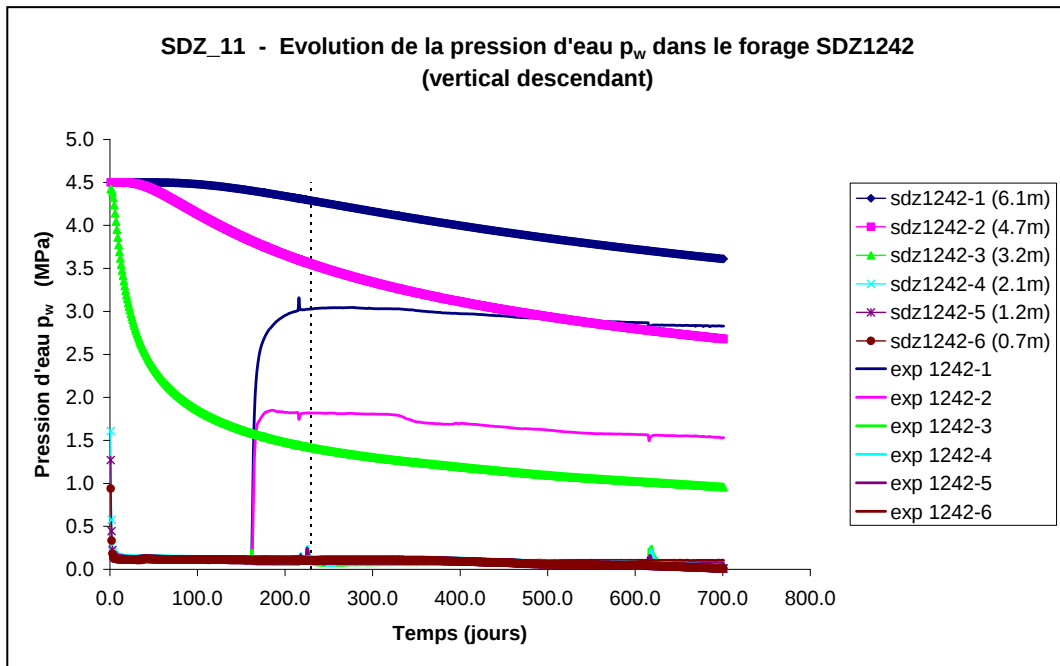


Figure 32 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1242 vertical descendant, cas 3, 2D écoulement pur.

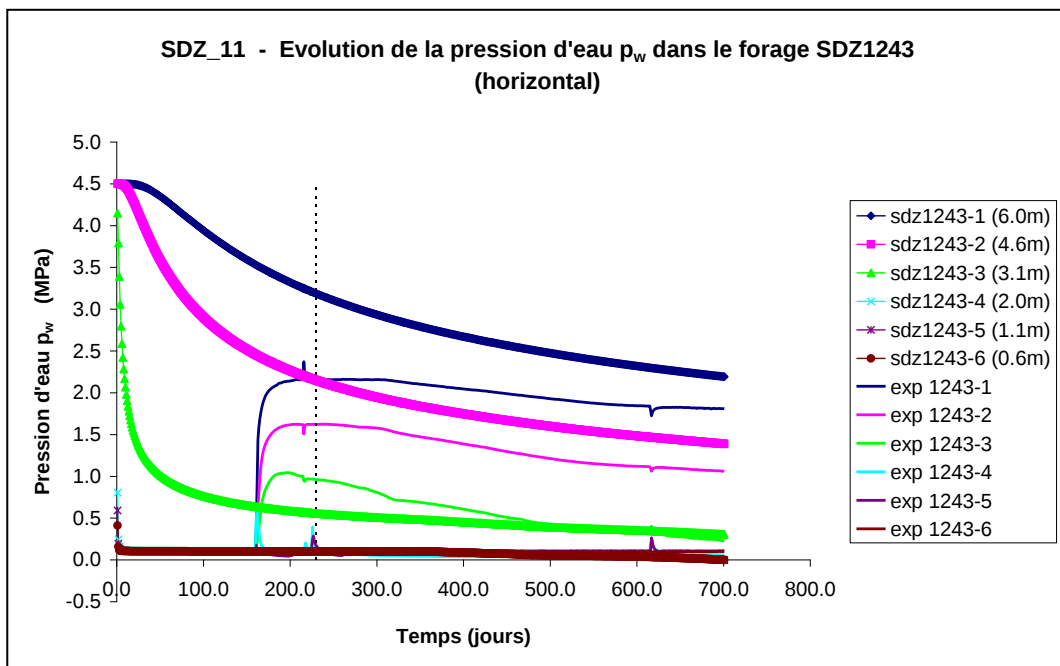


Figure 33 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1243 horizontal, cas 3, 2D écoulement pur.

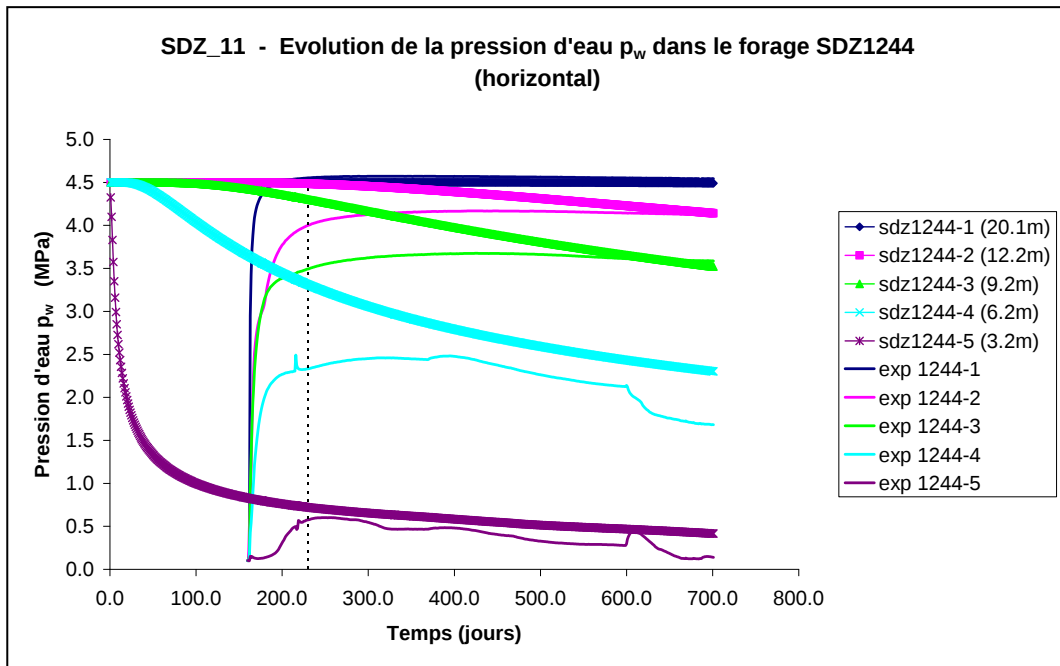


Figure 34 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1244 horizontal « lointain », cas 3, 2D écoulement pur.

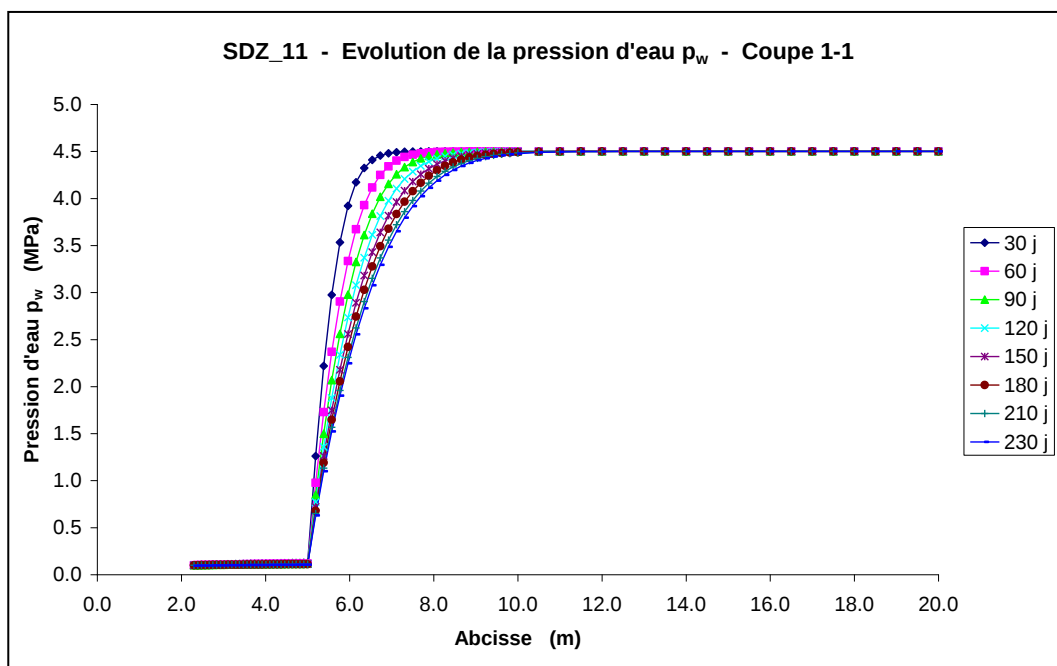


Figure 35 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 1-1 verticale montante, cas 3, 2D écoulement pur.

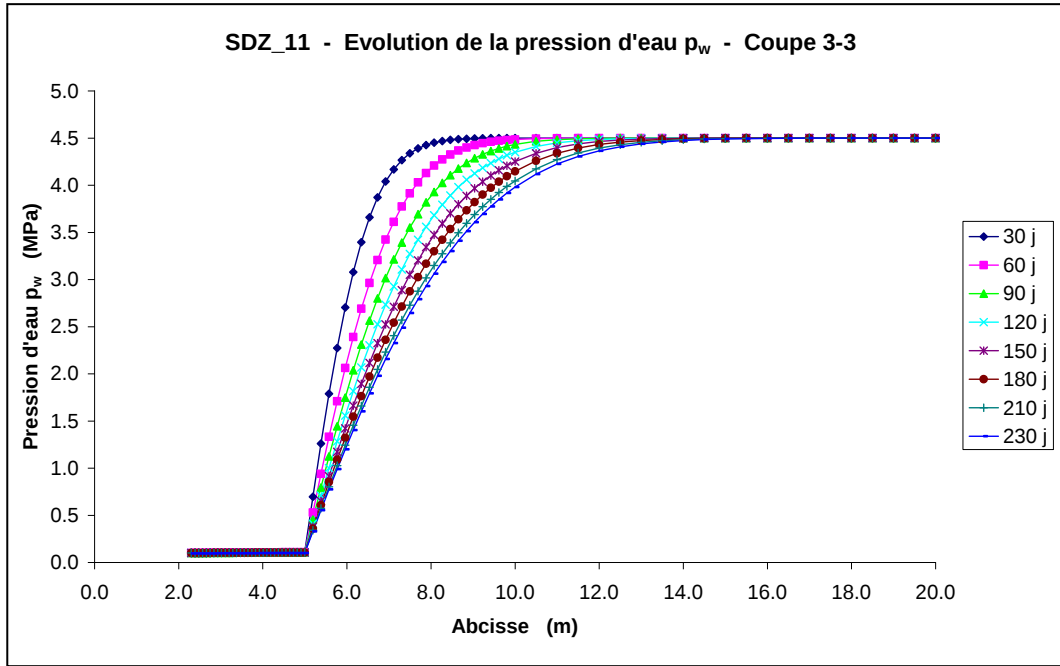


Figure 36 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 3-3 horizontale, cas 3, 2D écoulement pur.

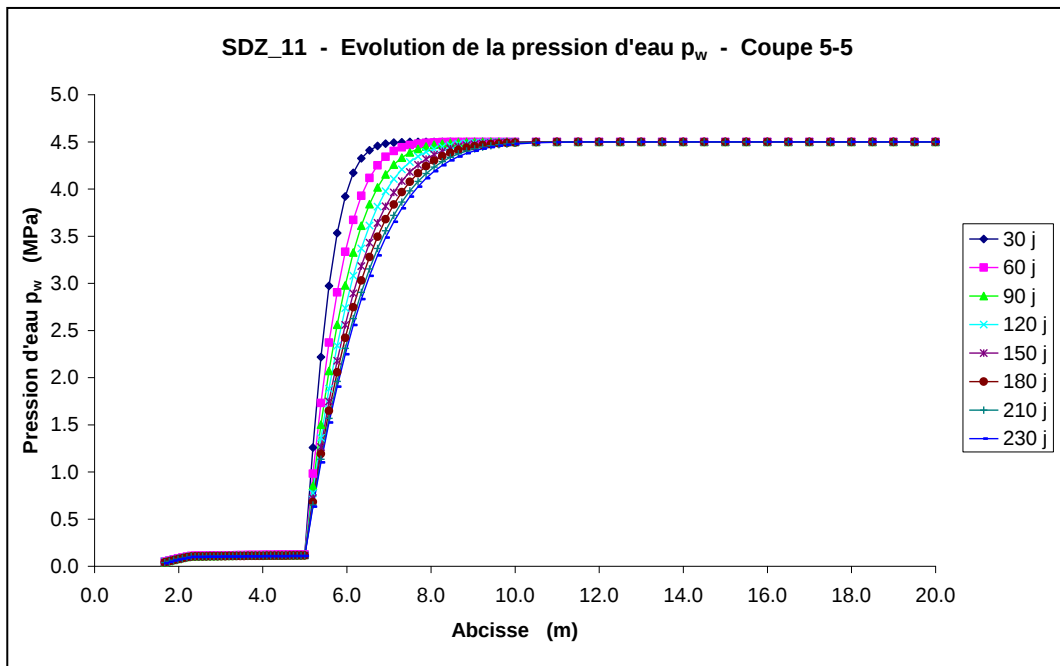


Figure 37 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 5-5 verticale descendante, cas 3, 2D écoulement pur.

Cas 4 :

Pour ce cas et par rapport au cas précédent, une zone EDZ elliptique plus étendue verticalement qu'horizontalement est envisagée :

- Suintement : $K = 10^{-10} \text{ s}^3.\text{kg}^{-1}$
- Evaporation : $\alpha = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$
- EDZ elliptique de 2,7 m d'épaisseur horizontale et 3,7 m d'épaisseur verticale
- Perméabilité argilite EDZ : $k_{\text{ani}} (\text{hor/vert}) = 4 / 1,33 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ de 2,3 à 5,0/6,0 m
- Perméabilité argilite saine : $k_{\text{ani}} (\text{hor/vert}) = 4 / 1,33 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ de 5,0/6,0 à 200 m

La **Figure 38** présente l'évolution de la pression en paroi.

Les **Figure 39**, **Figure 40**, **Figure 41** et **Figure 42** présentent l'évolution de la pression en forages comparée avec les mesures expérimentales. Les pressions d'eau sont relativement correctes en zone lointaine, à long terme horizontalement et verticalement.

Les **Figure 43**, **Figure 44** et **Figure 45** présentent l'évolution de la pression d'eau le long de coupes situées dans l'argilite.

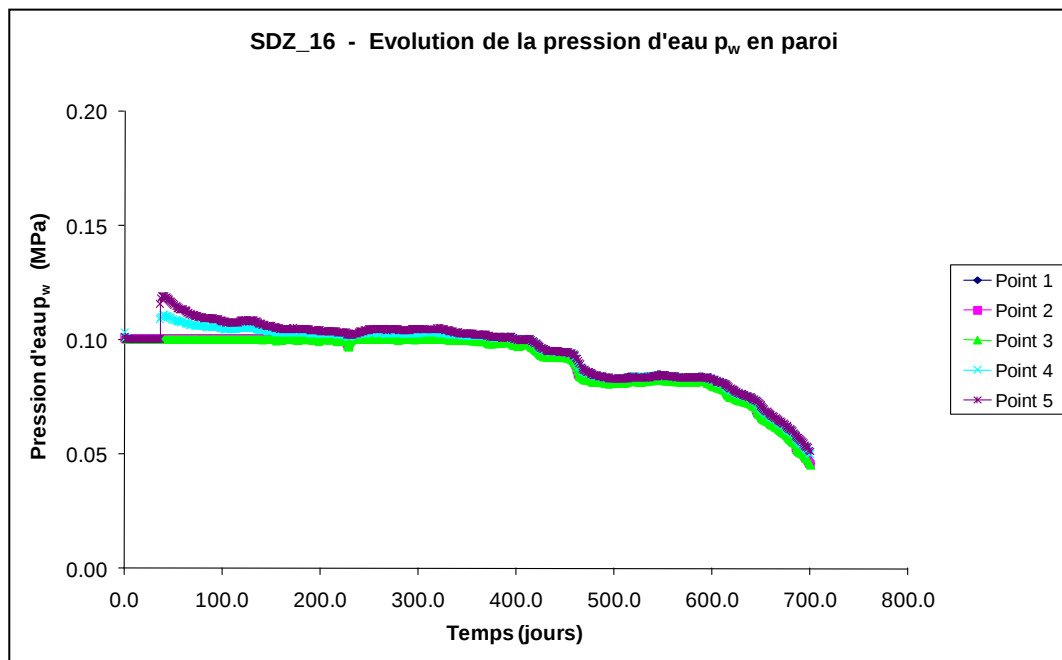


Figure 38 : Evolution de la pression d'eau en paroi, cas 4, 2D écoulement pur.

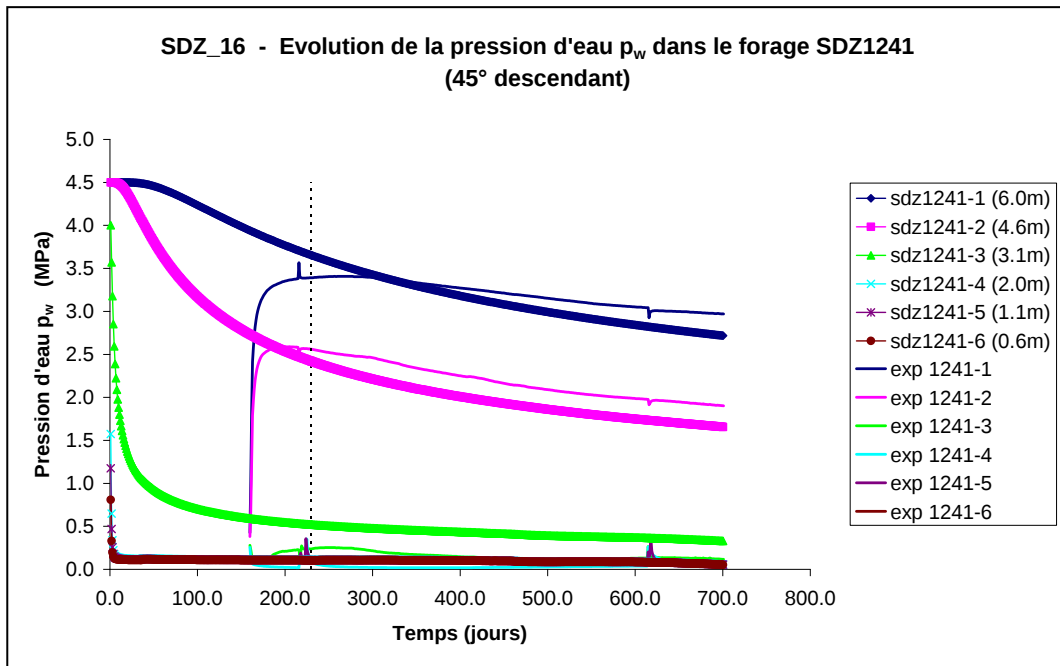


Figure 39 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1241 descendant à 45°, cas 4, 2D écoulement pur.

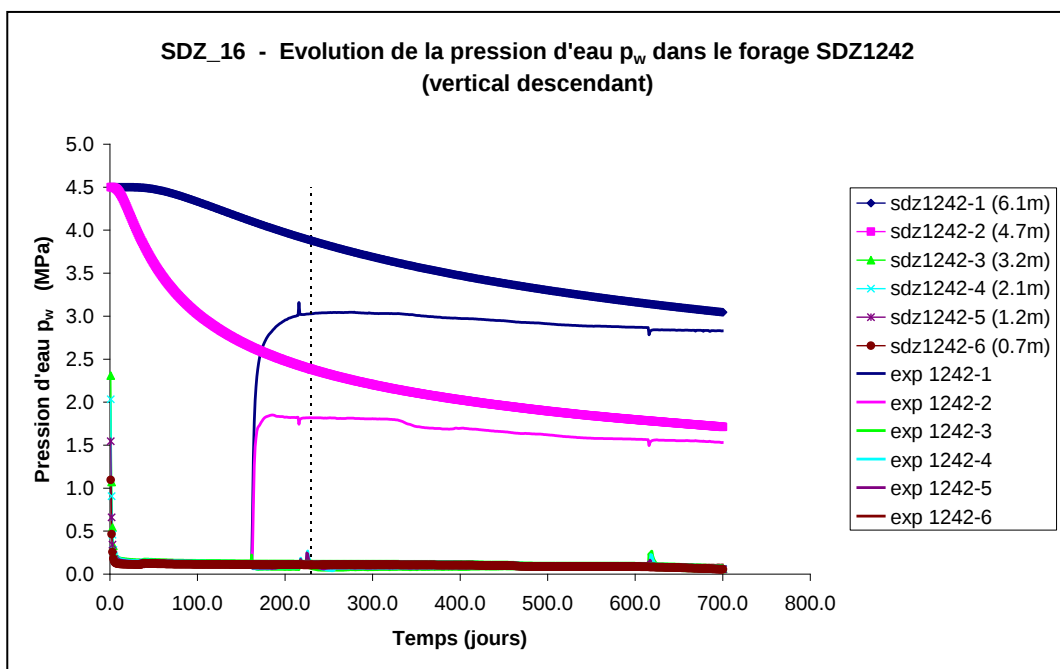


Figure 40 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1242 vertical descendant, cas 4, 2D écoulement pur.

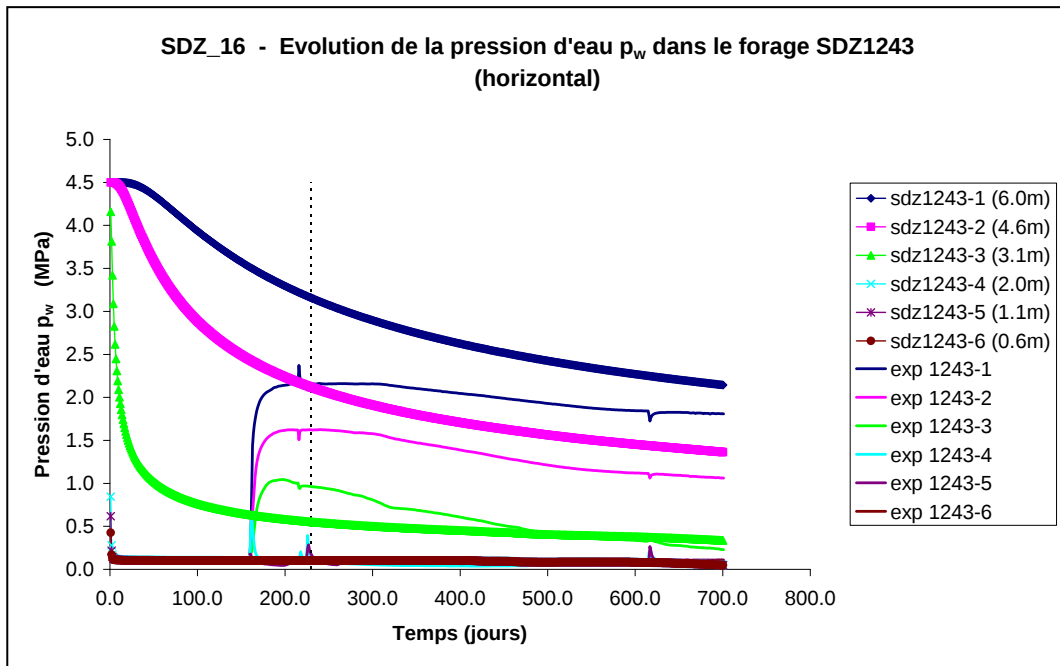


Figure 41 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1243 horizontal, cas 4, 2D écoulement pur.

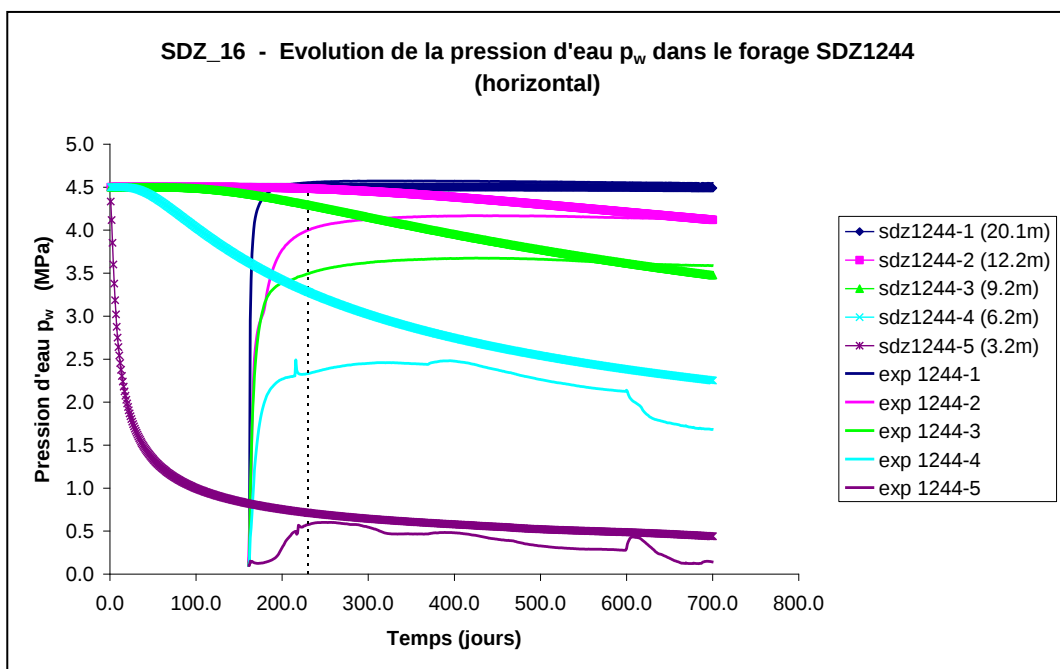


Figure 42 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1244 horizontal « lointain », cas 4, 2D écoulement pur.

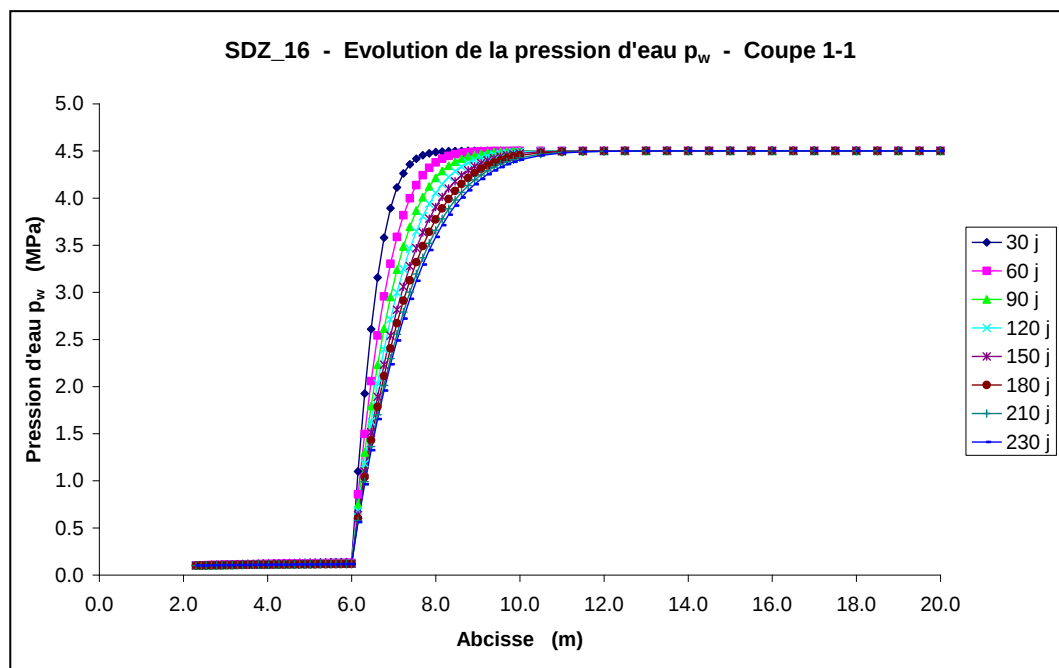


Figure 43 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 1-1 verticale montante, cas 4, 2D écoulement pur.

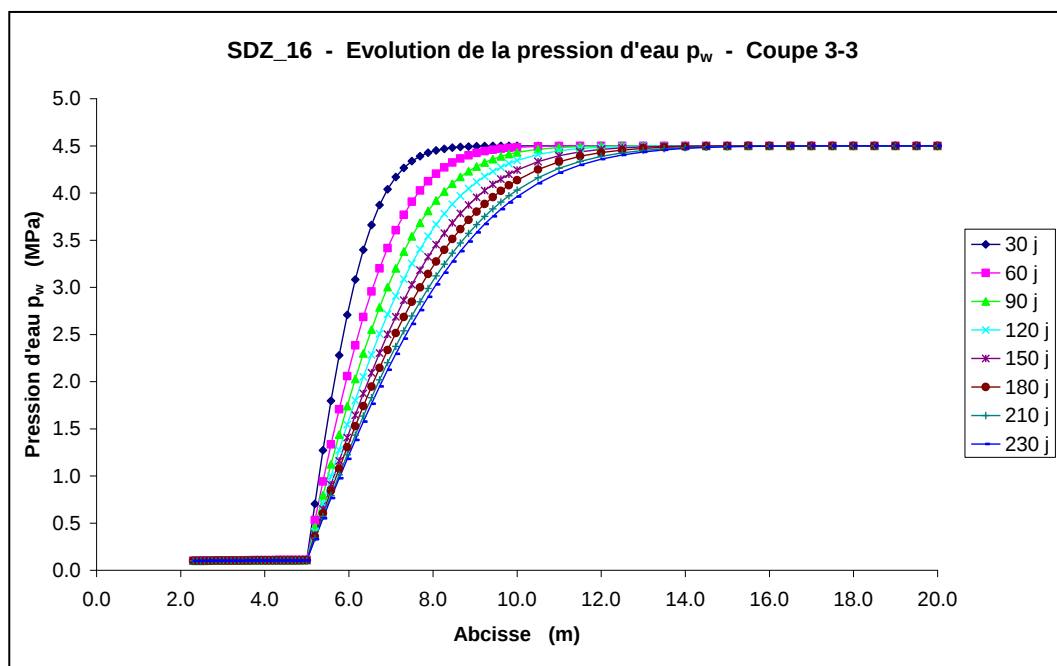


Figure 44 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 3-3 horizontale, cas 4, 2D écoulement pur.

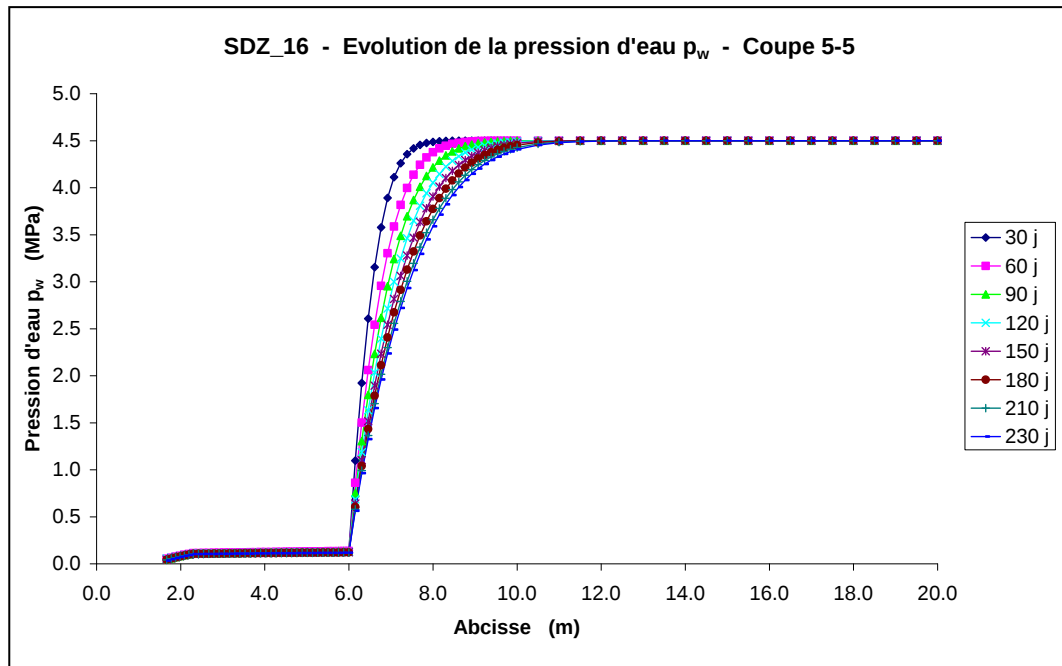


Figure 45 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 5-5 verticale descendante, cas 4, 2D écoulement pur.

Cas 5 :

Pour ce cas et par rapport au cas précédent, une augmentation de l'évaporation est envisagée :

- Suintement : $K = 10^{-10} \text{ s}^3.\text{kg}^{-1}$
- Evaporation : $\alpha = 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$
- EDZ elliptique de 2,7 m d'épaisseur horizontale et 3,7 m d'épaisseur verticale
- Perméabilité argilite EDZ : $k_{\text{ani}} (\text{hor/vert}) = 4 / 1,33 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ de 2,3 à 5,0/6,0 m
- Perméabilité argilite saine : $k_{\text{ani}} (\text{hor/vert}) = 4 / 1,33 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ de 5,0/6,0 à 200 m

La **Figure 46** présente l'évolution de la pression en paroi. La pression en paroi correspond mieux à la pression en galerie qu'au cas précédent.

Les **Figure 47**, **Figure 48**, **Figure 49** et **Figure 50** présentent l'évolution de la pression en forages comparée avec les mesures expérimentales. Les pressions d'eau sont globalement trop faibles et les pentes ne sont pas respectées, le drainage est trop important.

Les **Figure 51**, **Figure 52** et **Figure 53** présentent l'évolution de la pression d'eau le long de coupes situées dans l'argilite. Les pressions d'eau sont fortement rabattues dans la zone EDZ, le drainage est trop important suite au coefficient α trop élevé.

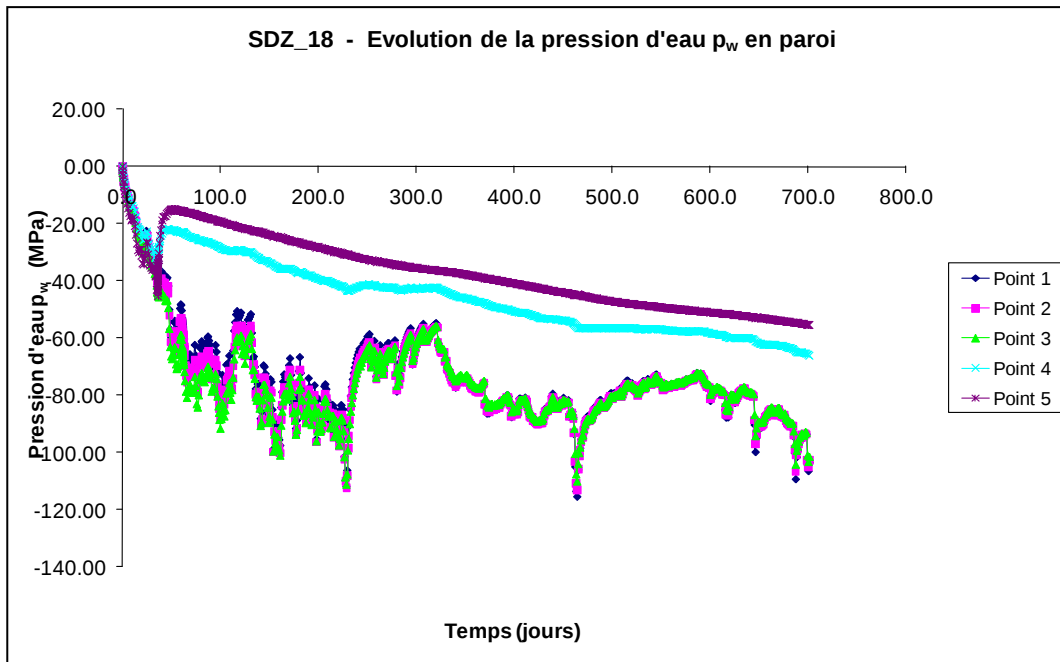


Figure 46 : Evolution de la pression d'eau en paroi, cas 5, 2D écoulement pur.

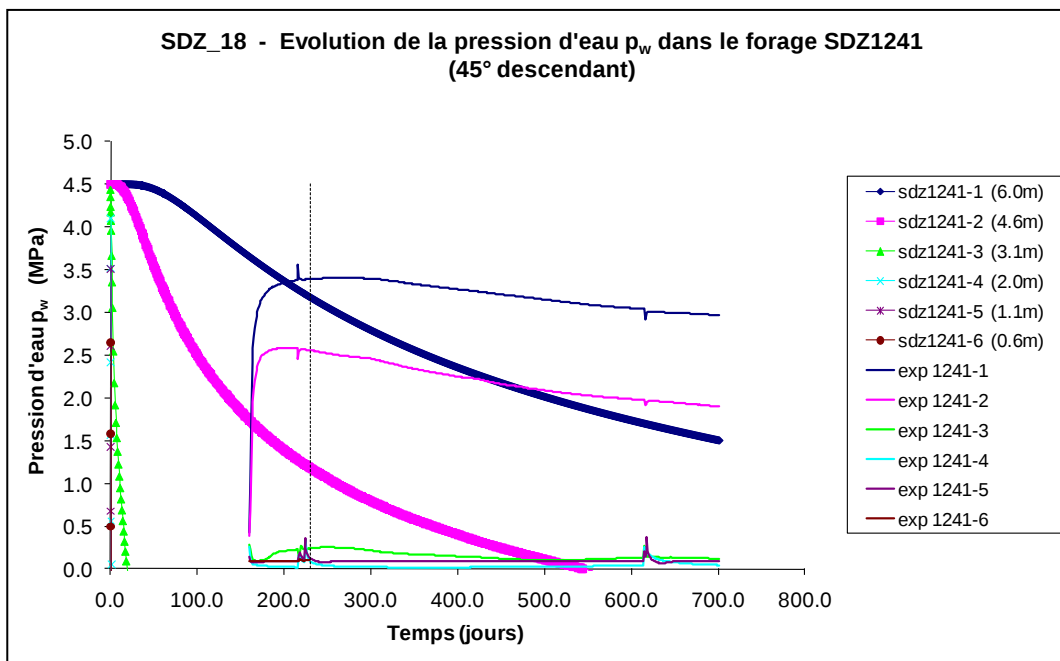


Figure 47 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1241 descendant à 45°, cas 5, 2D écoulement pur.

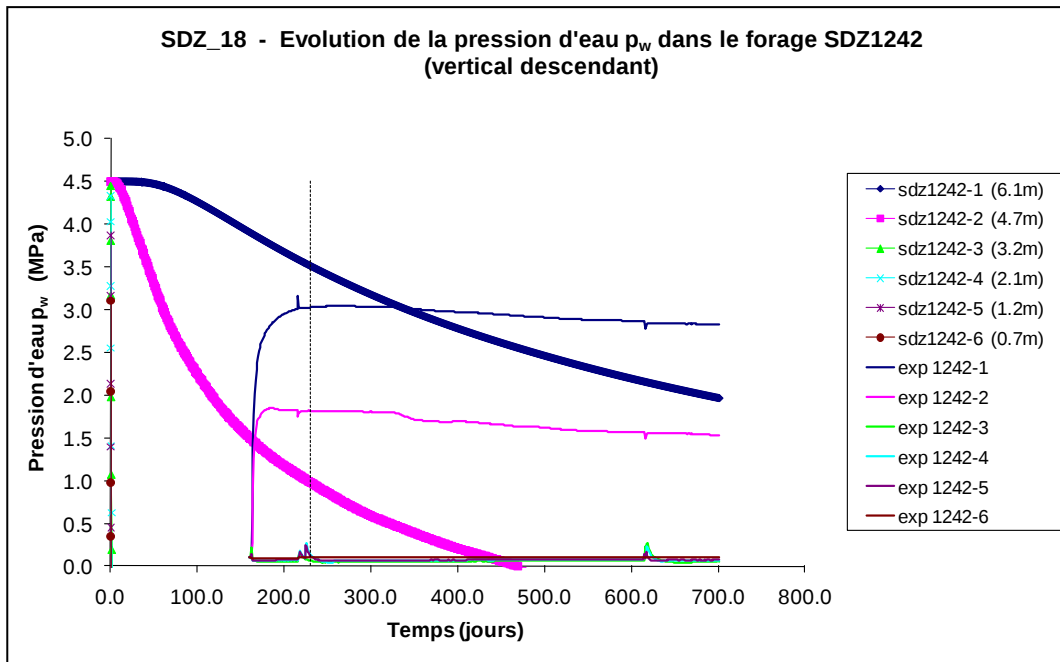


Figure 48 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1242 vertical descendant, cas 5, 2D écoulement pur.

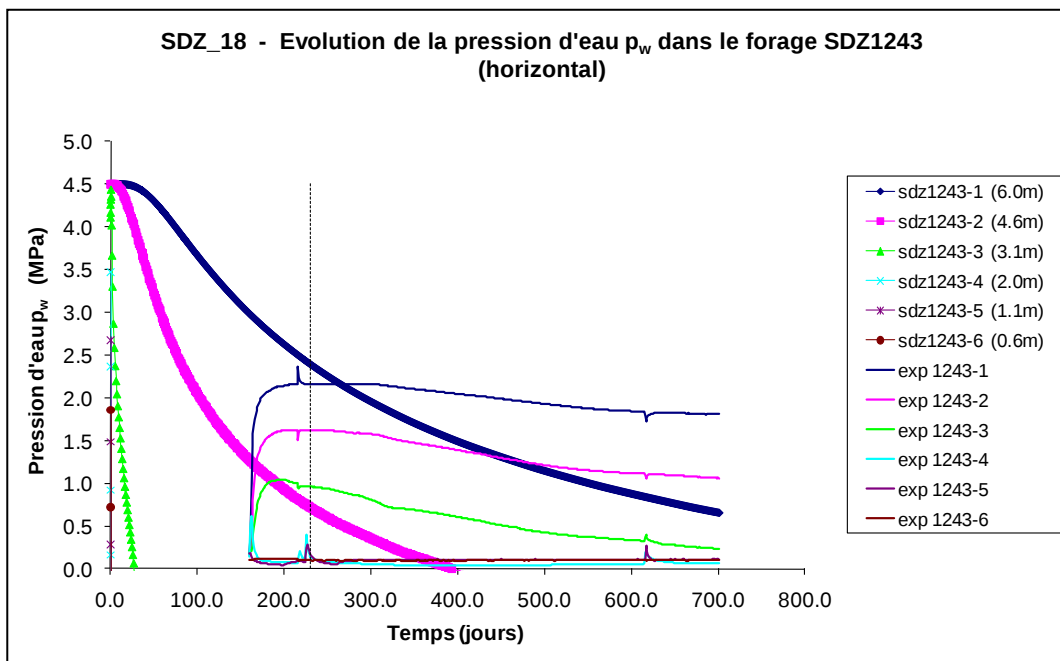


Figure 49 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1243 horizontal, cas 5, 2D écoulement pur.

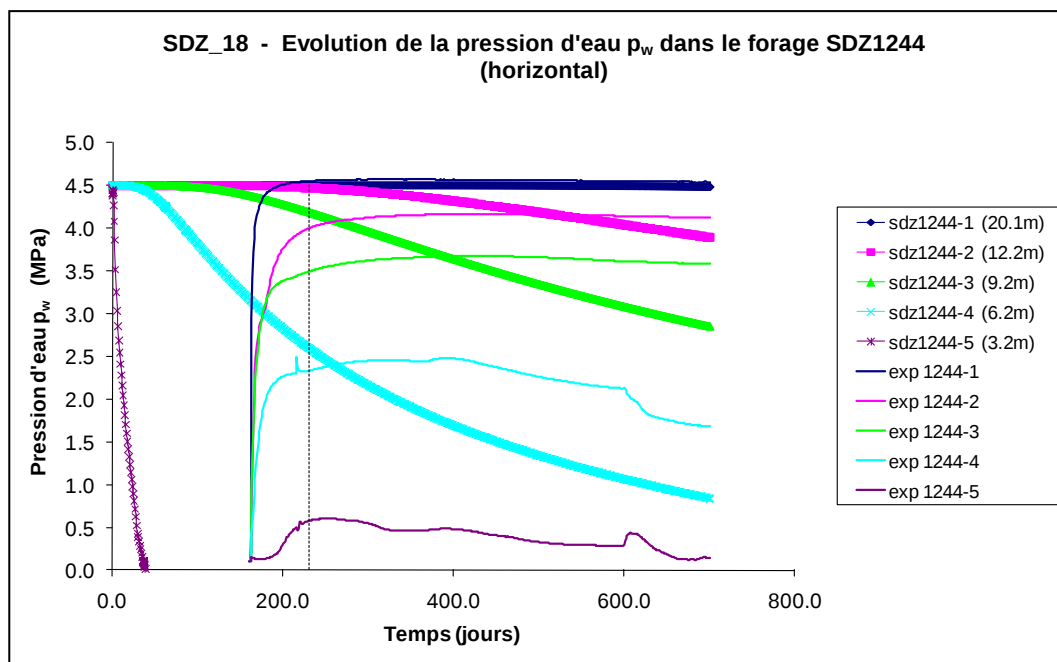


Figure 50 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1244 horizontal « lointain », cas 5, 2D écoulement pur.

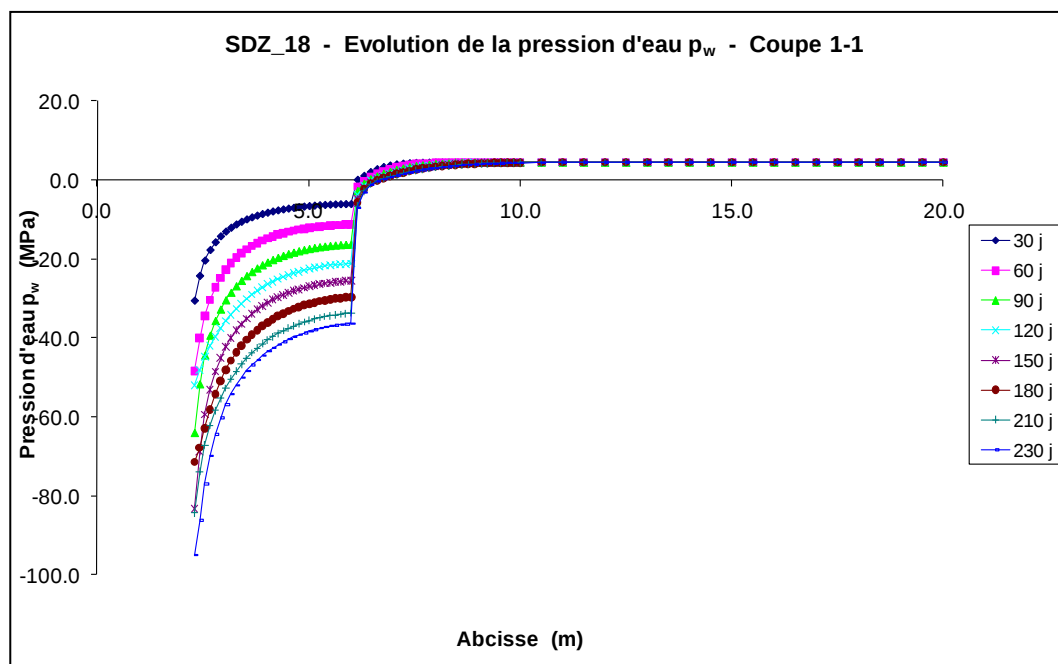


Figure 51 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 1-1 verticale montante, cas 5, 2D écoulement pur.

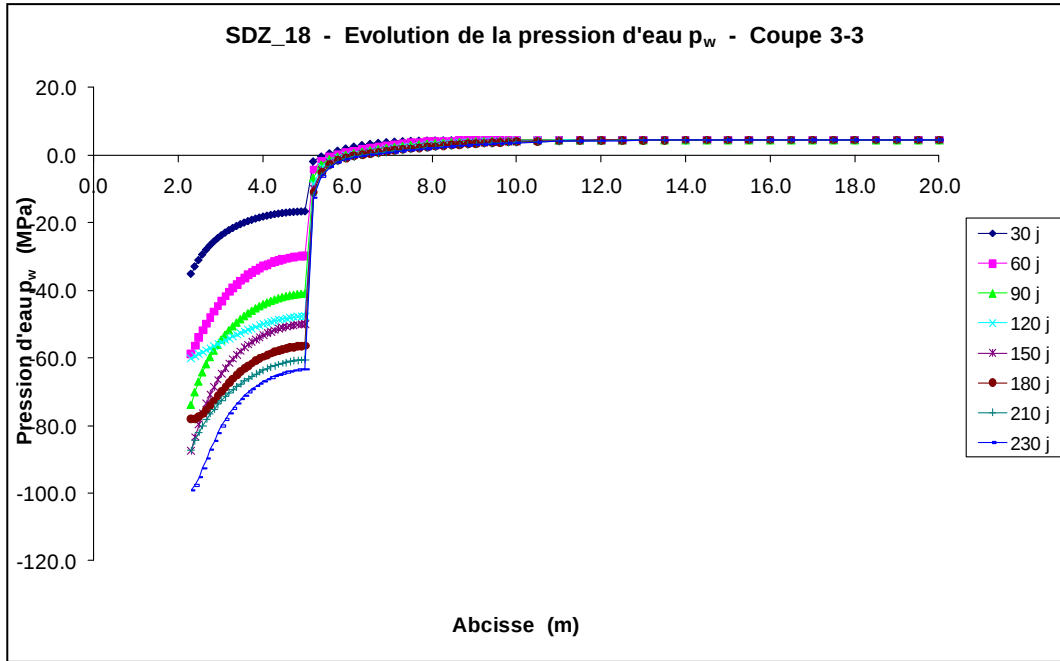


Figure 52 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 3-3 horizontale, cas 5, 2D écoulement pur.

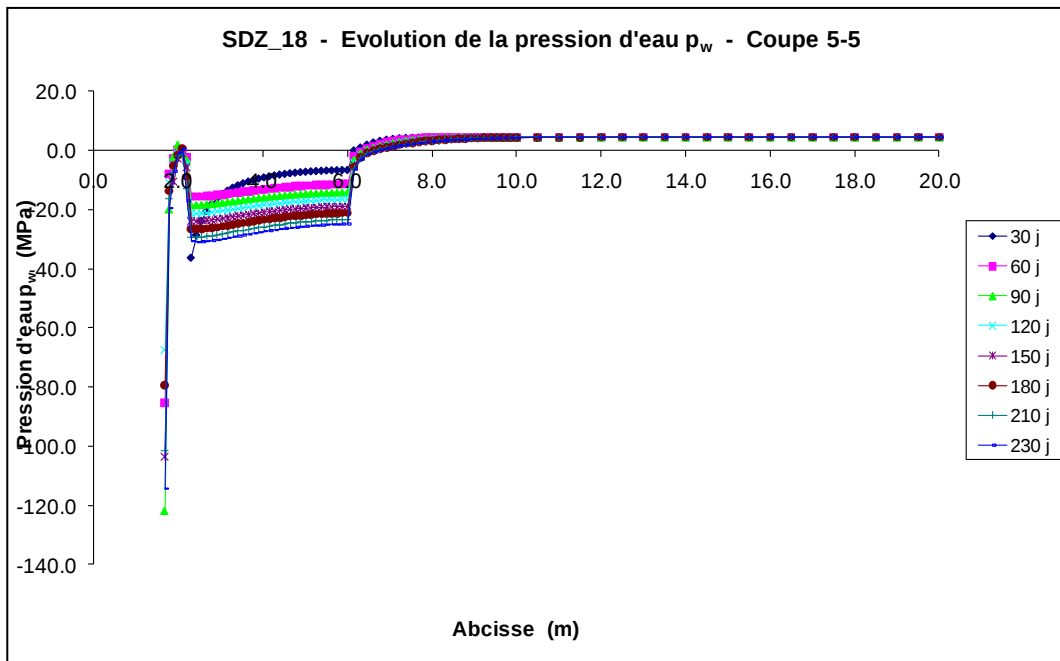


Figure 53 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 5-5 verticale descendante, cas 5, 2D écoulement pur.

6.2 2D état plan de déformation couplage hydromécanique

Dans ce calcul 2D état plan de déformation, la pression de gaz p_g est maintenue constante et les conditions sont isothermes dans tout le modèle.

6.2.1 Géométrie

La géométrie est identique à celle utilisée en 2D état plan de déformation écoulement pur (paragraphe 6.1.1).

6.2.2 Conditions initiales

Aux conditions initiales détaillées au paragraphe 6.1.2 il faut ajouter les contraintes initiales présentes au niveau de la galerie GED, à savoir :

$$\sigma_{h,0} = \sigma_{v,0} = 12.0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{H,0} = 1.3 \sigma_{v,0} = 15.6 \text{ MPa}$$

avec $\sigma_{v,0}$ la contrainte principale verticale, $\sigma_{h,0}$ la contrainte principale horizontale mineure, $\sigma_{H,0}$ la contrainte principale horizontale majeure.

La galerie GED est orientée dans la direction de la contrainte principale horizontale mineure. L'effet de la gravité n'est pas pris en considération.

6.2.3 Conditions aux limites

Imposition aux limites lointaines :

Les déplacements sont bloqués conformément à la **Figure 54**. Les contraintes et la pression d'eau initiales (p_w de 4.5 MPa) sont imposées aux limites lointaines, à 200 m de la galerie.

Modélisation du creusement :

Le creusement de la galerie est modélisé de -10 jours à 0 jours. Les **Figure 55** et **Figure 56** représentent l'imposition des contraintes et des pressions d'eau en paroi de galerie. Les différentes étapes sont :

- les contraintes et la pression d'eau initiales sont d'abord imposées en paroi,
- entre -10 jours et -5 jours les contraintes et la pression d'eau sont rabattues à la pression atmosphérique de 0.1 MPa,
- de -5 jours à -2 jours la pression d'eau est maintenue à 0.1 MPa,
- de -2 jours à 0 jours la pression d'eau est rabattue aux valeurs mesurées (mise en route de la ventilation),
- ensuite, la pression d'eau est imposée en galerie comme en 2D état plan de déformation écoulement pur.

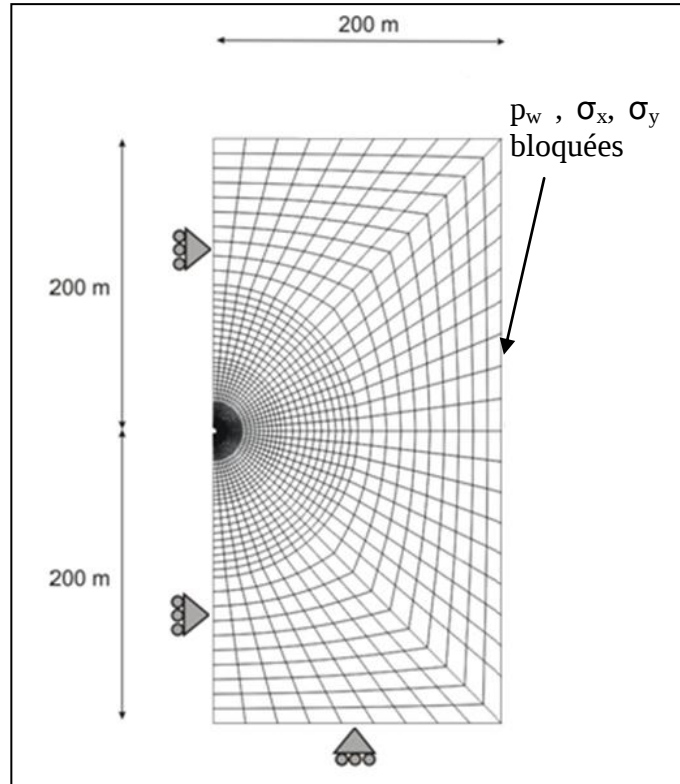


Figure 54 : Conditions aux limites, 2D couplage hydromécanique.

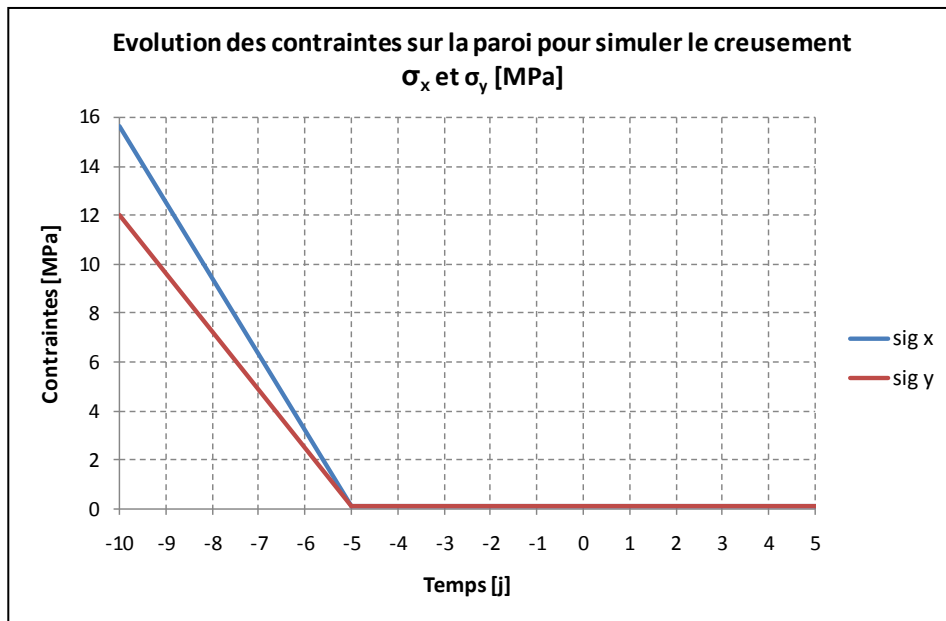


Figure 55 : Imposition des contraintes en paroi pour modéliser le creusement de la galerie.

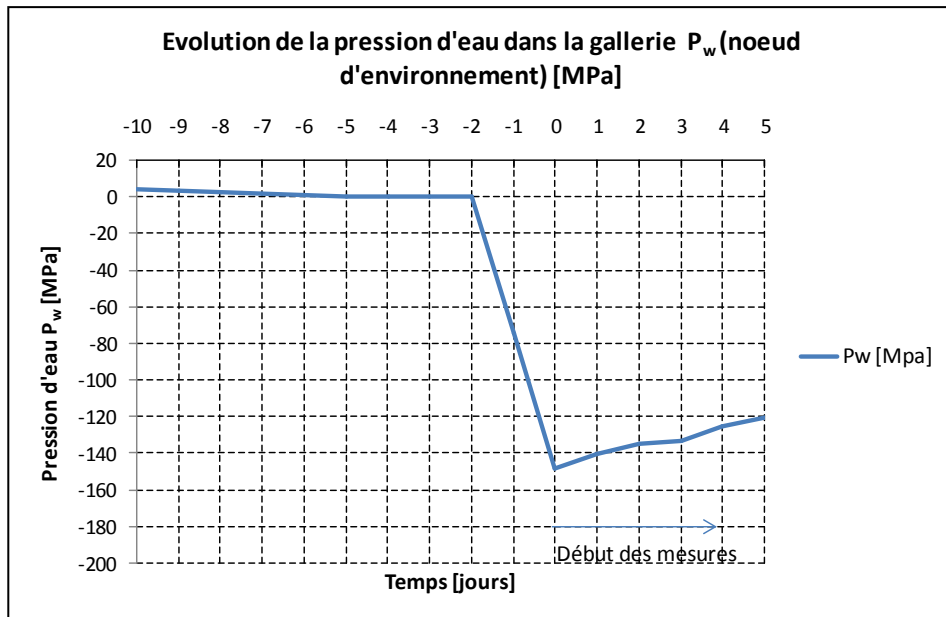


Figure 56 : Imposition des pressions d'eau en paroi pour modéliser le creusement de la galerie.

6.2.4 Chronologie

Les étapes du creusement sont rajoutées à la chronologie du paragraphe 6.1.4. Le reste de la chronologie est inchangé.

Jour -10	Début du creusement de SDZ.
Jour -5	Fin du creusement de SDZ.
Jour -2	Mise en route de la ventilation.
Jour 0	Début d'imposition des valeurs de pression d'eau mesurées (15/01/2009).

6.2.5 Résultats numériques

La combinaison des paramètres retenue est celle du cas 4 développé précédemment en 2D écoulement pur. Seule cette combinaison de paramètre est analysée en couplage hydromécanique. Pour rappel :

- Suintement : $K = 10^{-10} \text{ s}^3.\text{kg}^{-1}$
- Evaporation : $\alpha = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$
- EDZ elliptique de 2,7 m d'épaisseur horizontale et 3,7 m d'épaisseur verticale
- Perméabilité argilite EDZ : $k_{\text{ani}} (\text{hor/vert}) = 4 / 1,33 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ de 2,3 à 5,0/6,0 m
- Perméabilité argilite saine : $k_{\text{ani}} (\text{hor/vert}) = 4 / 1,33 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ de 5,0/6,0 à 200 m

Pression d'eau :

La **Figure 57** présente l'évolution de la pression en paroi. Le drainage est moins important qu'en écoulement pur (**Figure 38**) à partir de 400 jours.

Les **Figure 58**, **Figure 59**, **Figure 60** et **Figure 61** présentent l'évolution de la pression en forages comparée avec les mesures expérimentales et les résultats numériques en écoulement pur. Par rapport à ceux-ci, nous observons dans la direction verticale une surpression engendrant un décalage des courbes à court et long terme. Dans la direction horizontale, nous observons une baisse de pression à court terme jusqu'à une profondeur d'environ 10 m dans l'argilite. Par rapport aux mesures expérimentales, les pressions d'eau sont relativement correctes en zone lointaine, à long terme horizontalement et verticalement. Les résultats, bien que similaires à ceux des simulations en écoulement pur, sont cependant légèrement moins bons. Un ajustement du choix des paramètres pourrait être envisagé.

Les **Figure 62**, **Figure 63** et **Figure 64** présentent l'évolution de la pression d'eau le long de coupes situées dans l'argilite comparée avec les résultats numériques en écoulement pur. Nous observons une surpression dans la direction verticale et une baisse de pression dans la direction horizontale jusqu'à une distance d'environ 20 m dans l'argilite.

Les différences observées avec les résultats en écoulement pur sont principalement liées à l'anisotropie des contraintes.

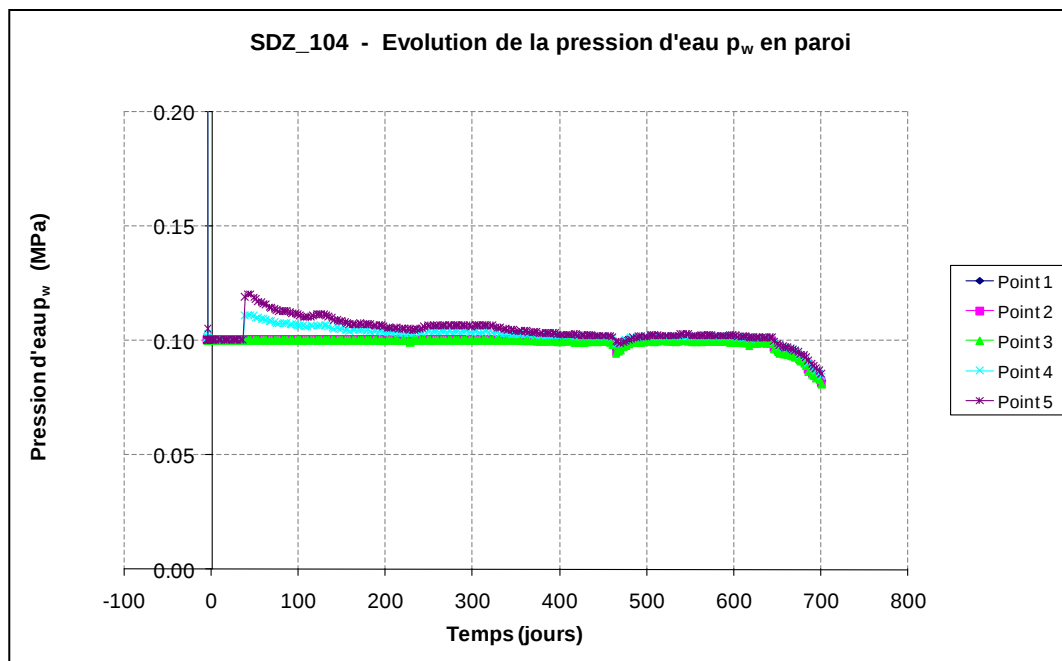


Figure 57 : Evolution de la pression d'eau en paroi, cas 4, 2D couplage hydromécanique.

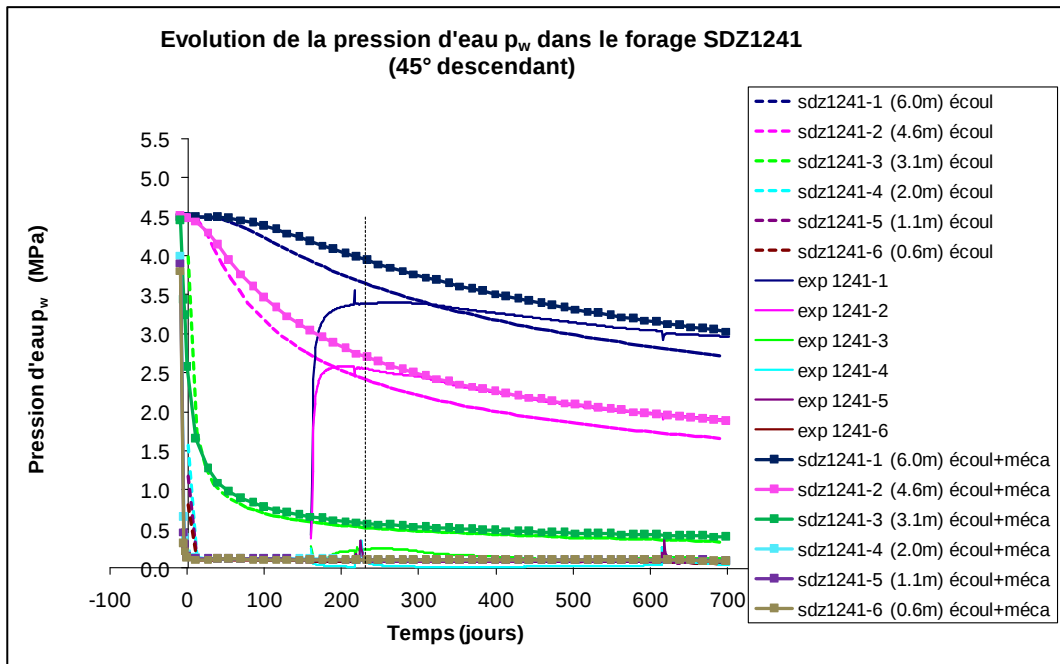


Figure 58 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1241 descendant à 45°, cas 4, 2D couplage hydromécanique et écoulement pur.

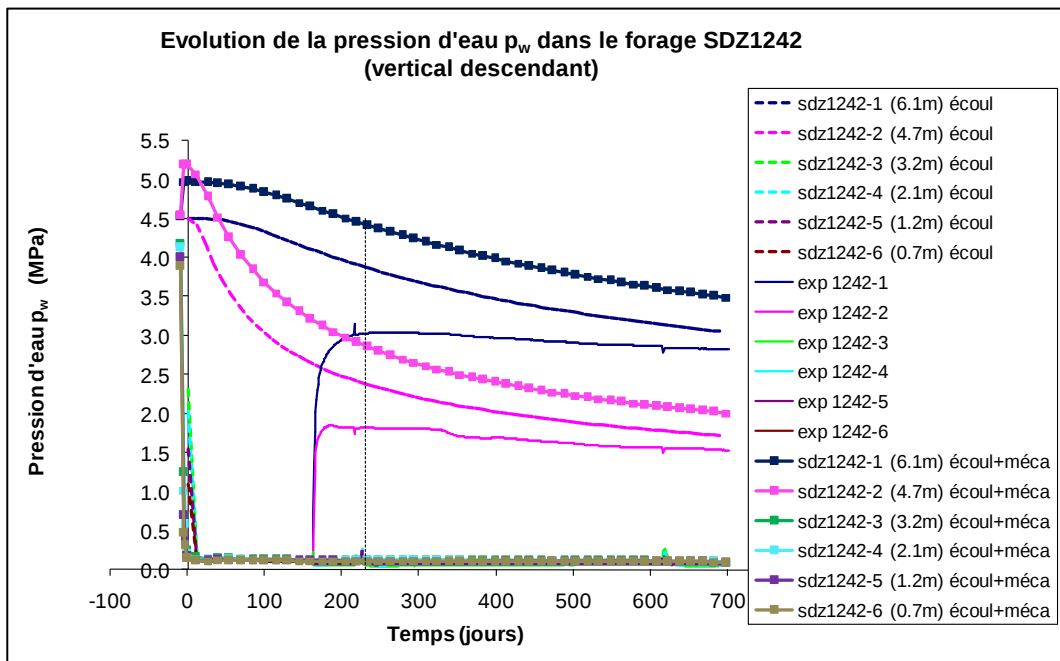


Figure 59 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1242 vertical descendant, cas 4, 2D couplage hydromécanique et écoulement pur.

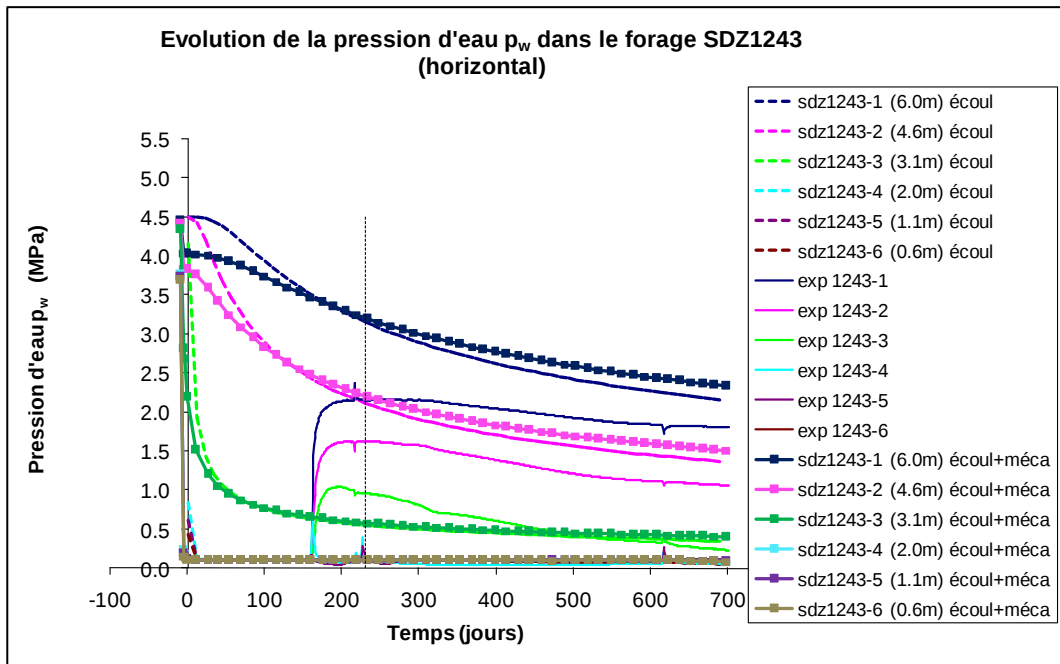


Figure 60 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1243 horizontal, cas 4, 2D couplage hydromécanique et écoulement pur.

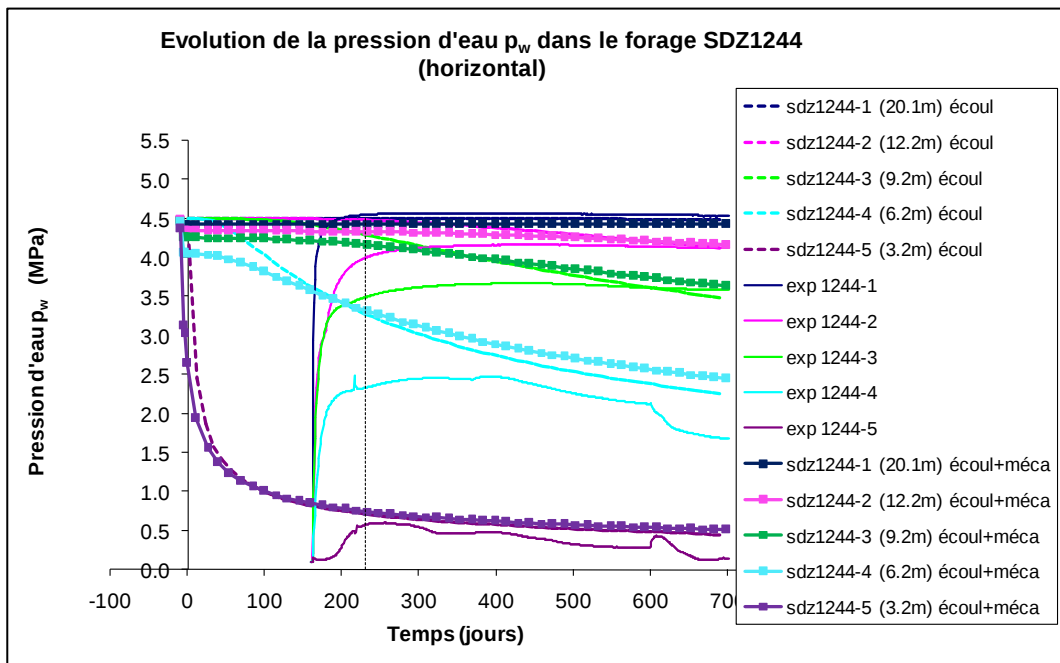


Figure 61 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1244 horizontal « lointain », cas 4, 2D couplage hydromécanique et écoulement pur.

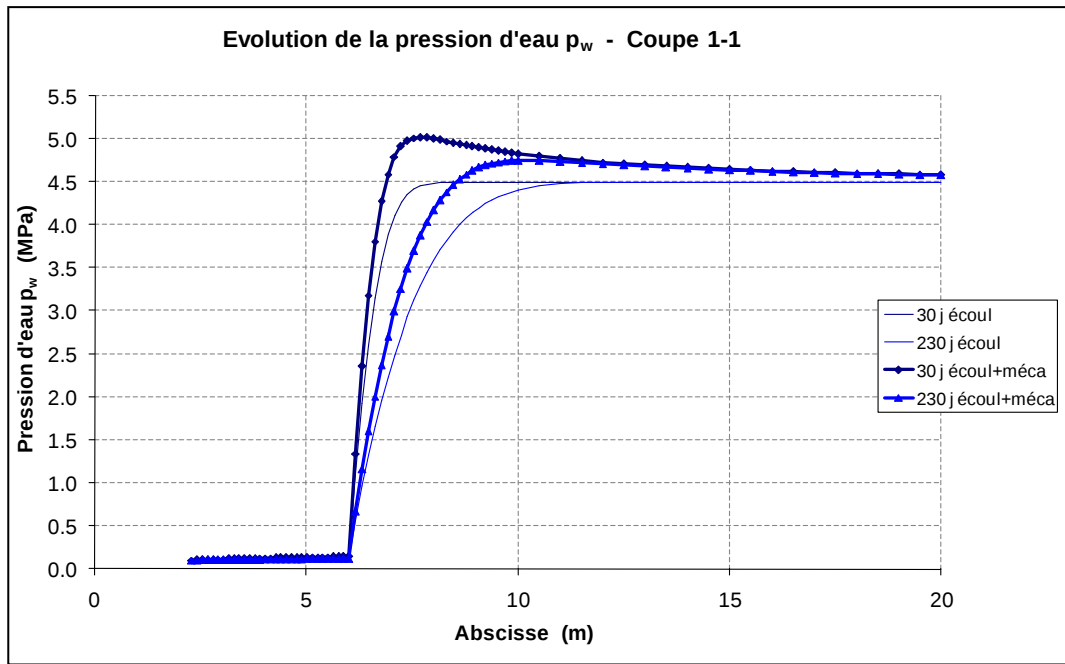


Figure 62 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 1-1 verticale montante, cas 4, 2D couplage hydromécanique et écoulement pur.

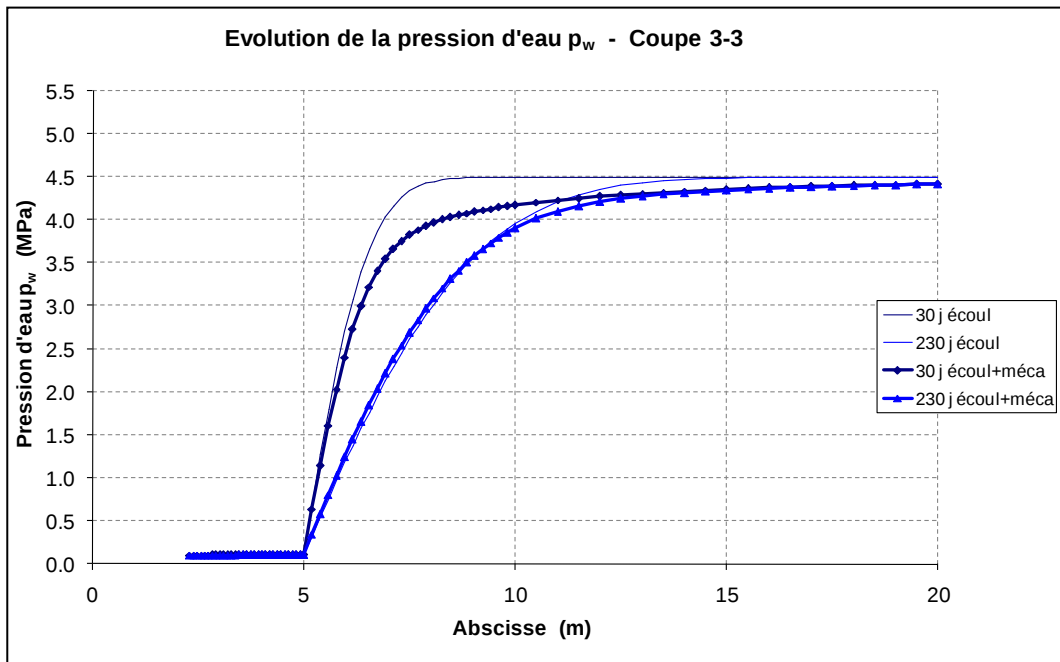


Figure 63 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 3-3 horizontale, cas 4, 2D couplage hydromécanique et écoulement pur.

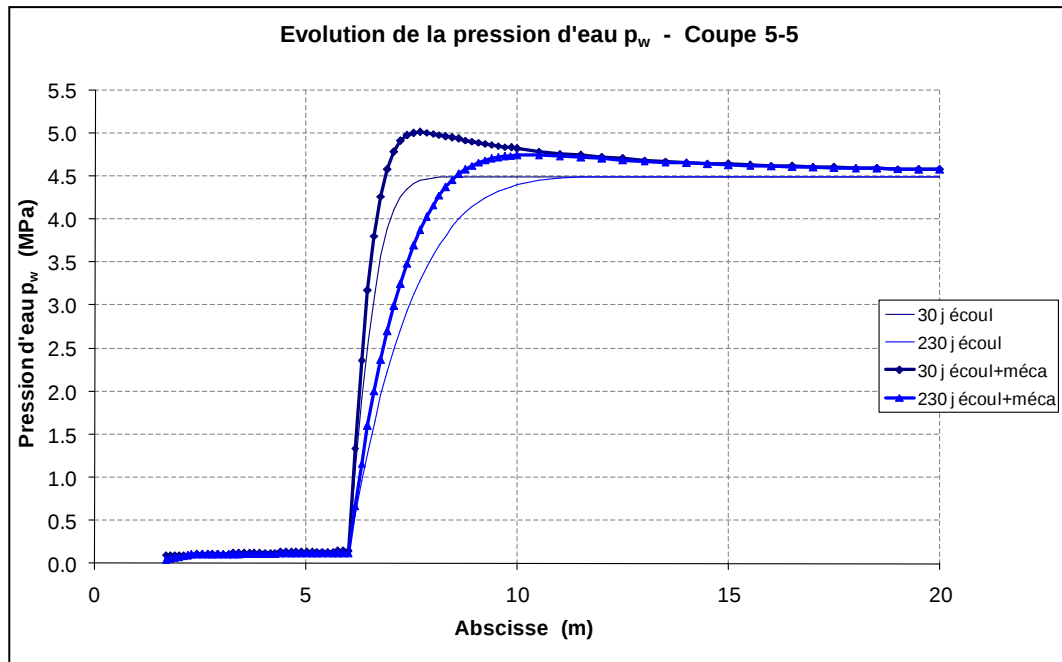


Figure 64 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe 5-5 verticale descendante, cas 4, 2D couplage hydromécanique et écoulement pur.

Zone plastifiée :

La Figure 65 présente l'évolution de l'indicateur de plasticité au cours du temps. Il y a plasticité lorsque l'indicateur vaut 1. Nous constatons que l'évolution de la zone plastifiée est concentrée pendant la phase de creusement (-10 à -5 jours) et qu'une légère évolution apparaît lors de la mise en place du radier (36 jours).

Les Figure 66 et Figure 67 présentent l'évolution de l'indicateur de plasticité dans les directions horizontale et verticales. L'extension de la zone plastique est 0,4 m horizontalement (de 2,3 à 2,7 m), 1,3 m verticalement vers le haut (de 2,3 à 3,6 m) et 1,7 m verticalement vers le bas (de 2,3 à 4,0 m).

L'extension de la zone EDZ sur base de mesures de fracturation est 0,5 m horizontalement, 1,7 m verticalement vers le haut et 2,0 m verticalement vers le bas. Il s'agit de la zone de fractures mixtes (traction et cisaillement). Des fractures en cisaillement sont observées plus en profondeur dans l'argilite jusqu'à 0,5-0,8 m horizontalement, 3,9 m verticalement vers le haut et 5,1 m verticalement vers le bas. L'extension de la zone EDZ sur base de mesures de perméabilité est 0,5 m horizontalement, 1,1 m verticalement vers le haut et vers le bas. Il s'agit de la zone à perméabilité très perturbée ($K > 10^{-10}$ m/s). Une zone à perméabilité légèrement perturbée ($10^{-12} < K < 10^{-10}$ m/s) est observée plus en profondeur dans l'argilite jusqu'à 1,1 m horizontalement, 3,1 m verticalement vers le haut et vers le bas. Ces données proviennent du rapport de l'Andra D.RP.AMFS.11.0016.

La zone plastique observée numériquement correspond relativement bien aux mesures d'extension de la zone EDZ à perméabilité très perturbée ou à fractures mixtes.

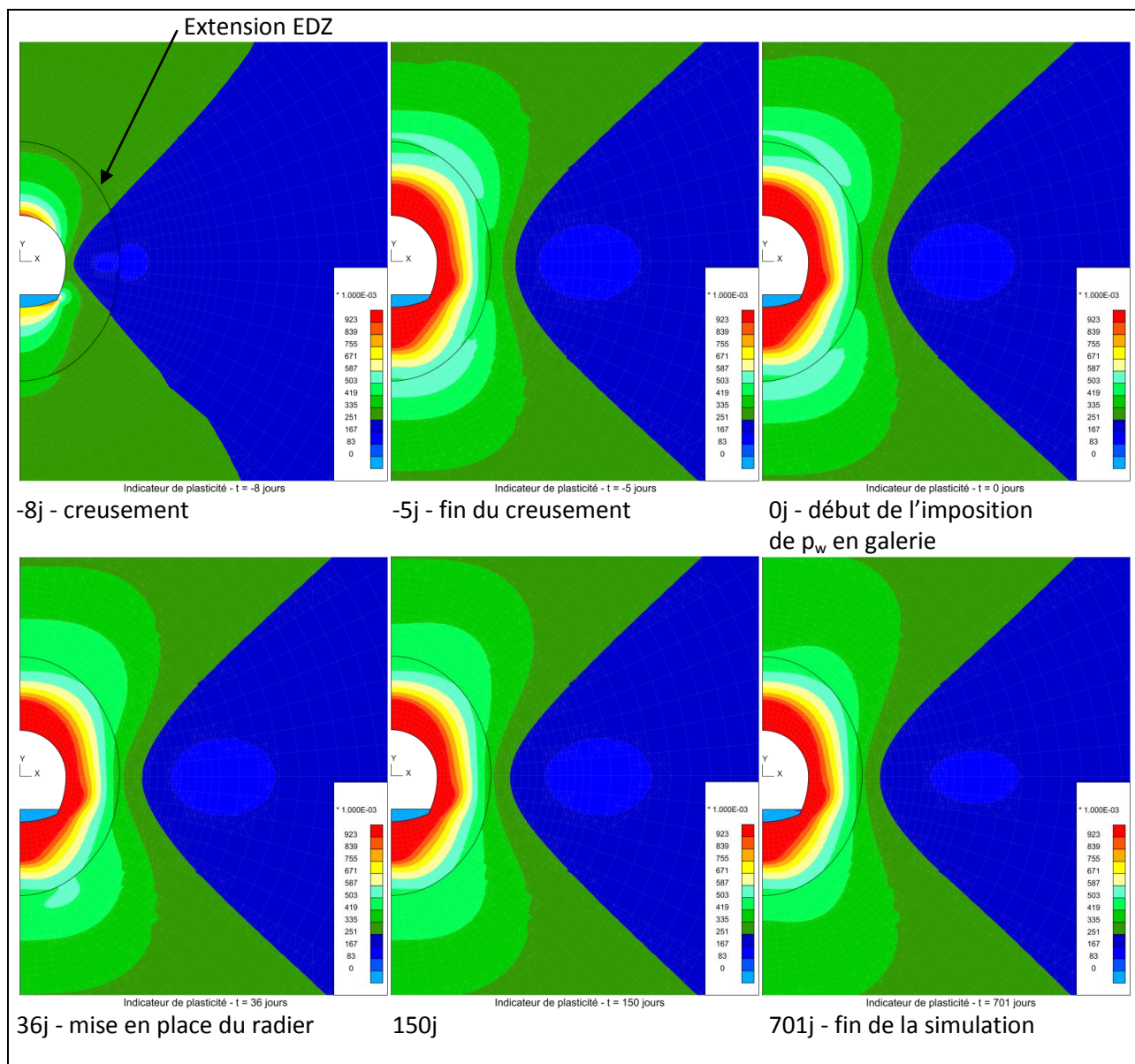


Figure 65 : Evolution de l'indicateur de plasticité et de la zone plastifiée, cas 4, 2D couplage hydromécanique.

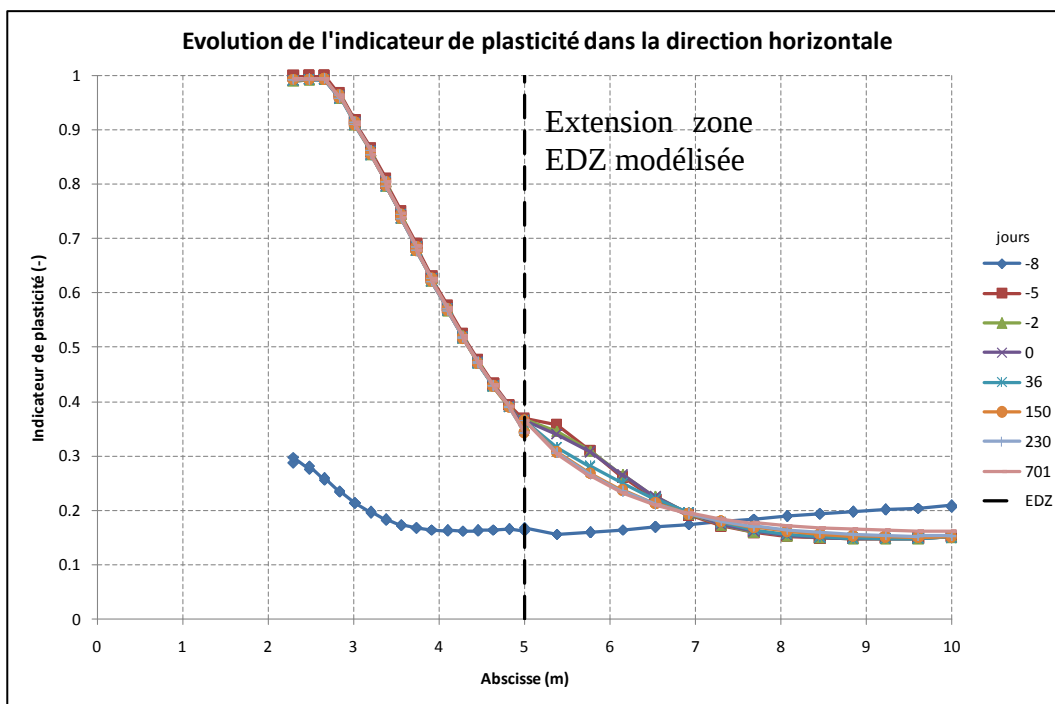


Figure 66 : Evolution de l'indicateur de plasticité dans la direction horizontale, cas 4, 2D couplage hydromécanique.

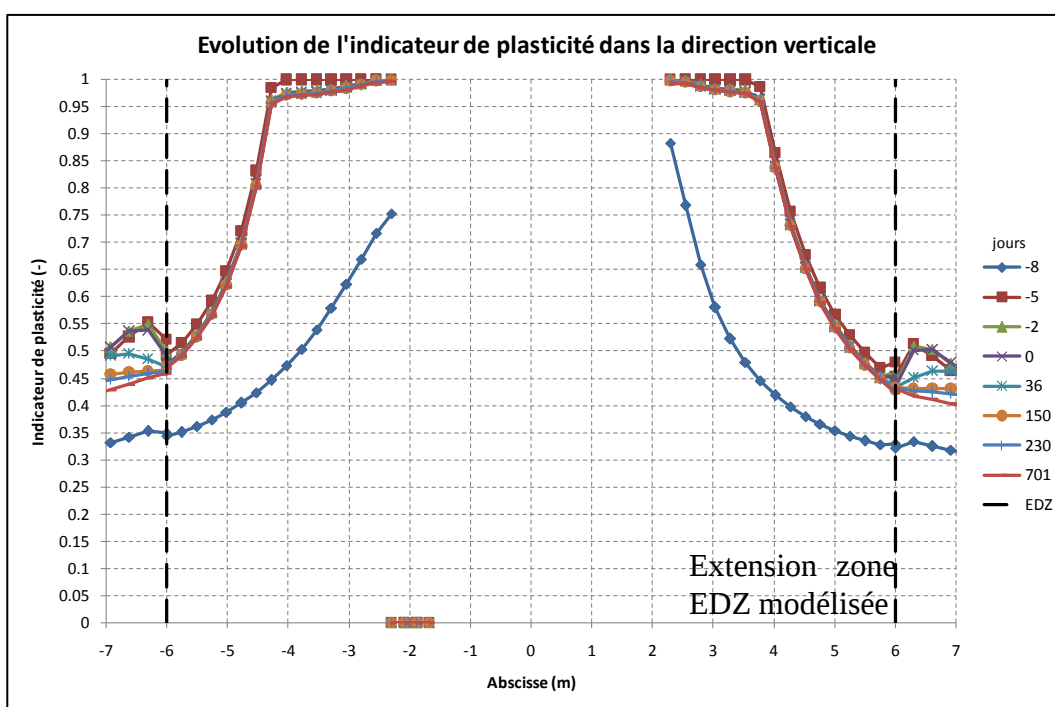


Figure 67 : Evolution de l'indicateur de plasticité dans la direction verticale, cas 4, 2D couplage hydromécanique.

6.3 Axisymétrique écoulement pur

Un modèle axisymétrique est réalisé avec l'axe de la galerie pour axe de symétrie. Dans ce calcul axisymétrique, la pression de gaz p_g est maintenue constante et les conditions sont isothermes dans tout le modèle.

6.3.1 Géométrie

La géométrie du maillage axisymétrique est détaillée sur les figures ci-dessous (*Figure 68* et *Figure 69*). L'étendue du maillage sera prise égale à 200 m radialement et 100 m axialement de part et d'autre de la zone dédiée à l'expérimentation SDZ. La discrétisation est réalisée avec un total de 15008 nœuds et 5111 éléments. On notera évidemment une discrétisation plus raffinée autour de la galerie.

La zone endommagée EDZ, le vide de la zone SDZ en aval du sas, le revêtement en béton et la membrane étanche de la zone située en extrémité de galerie sont représentés. Une épaisseur constante de 2,7 m est considérée pour l'EDZ. Le radier et le revêtement en béton de la galerie en amont du sas ne sont pas représentés.

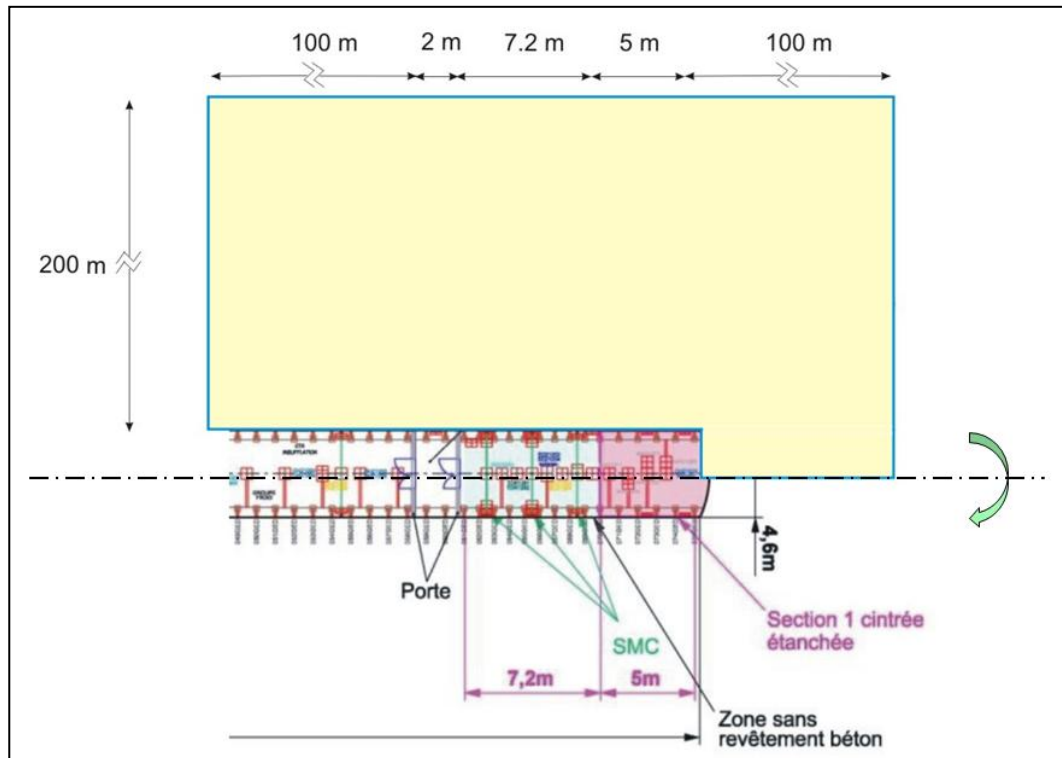


Figure 68 : Vue globale du modèle axisymétrique autour de l'axe de la galerie GED.

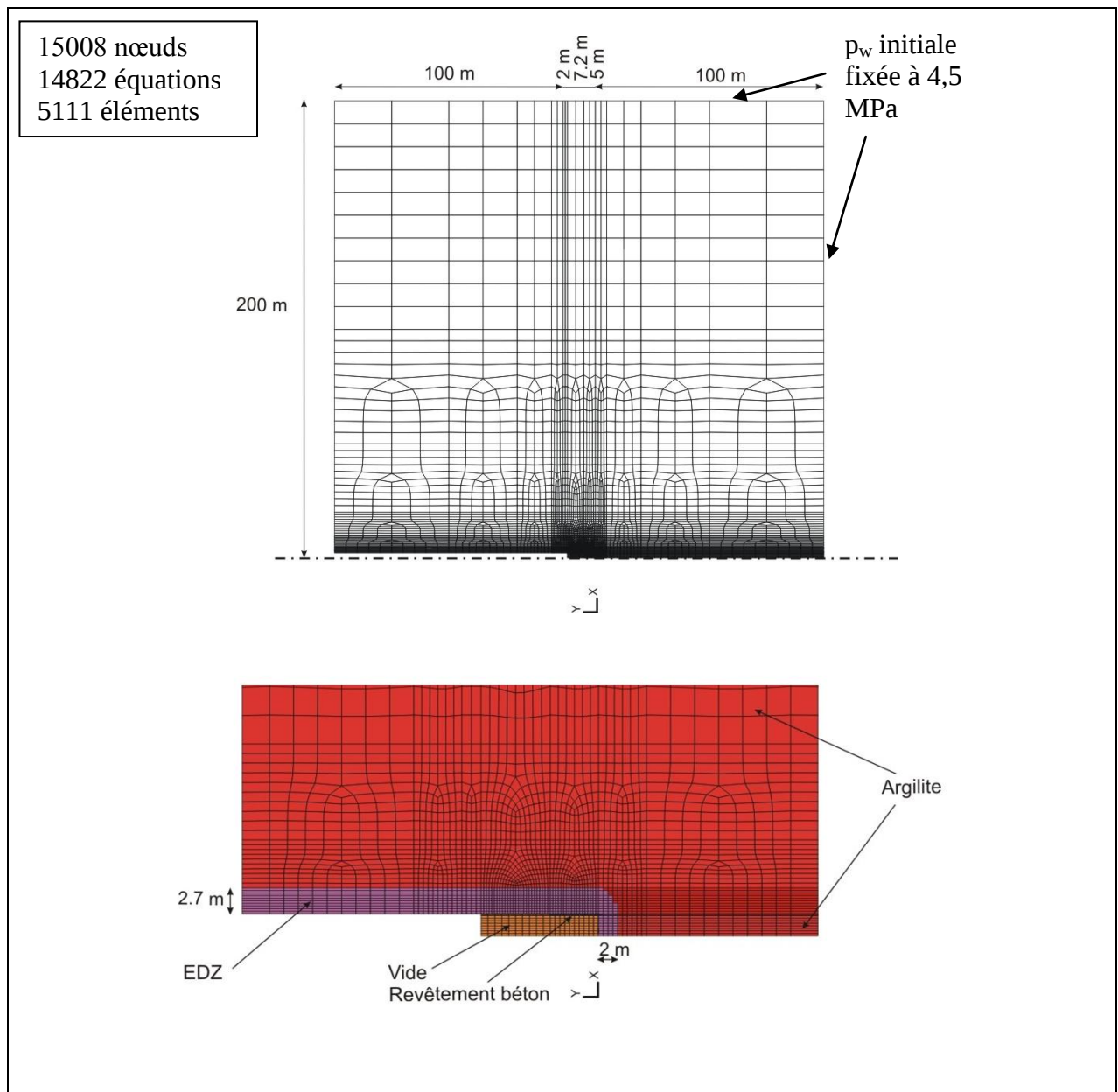


Figure 69 : Géométrie et détail du maillage axisymétrique.

6.3.2 Conditions initiales

Les conditions initiales de pression d'eau, de pression de gaz et de températures sont conservées. Le vide est mis en place à $p_w = -110$ MPa ($H_r \approx 45\%$).

6.3.3 Chronologie

La chronologie est similaire à celle détaillée au paragraphe 6.1.4. Les étapes majeures sont modélisées (Figure 70). Initialement, des éléments FMIVP (échanges d'eau et de vapeur) sont disposés sur la paroi et au front de la galerie. Lors de la mise en place du revêtement, les éléments FMIVP de la partie étanche sont remplacés par des éléments en béton avec une étanchéification entre le vide et le béton (intérieur de la paroi). A la fermeture du sas, les éléments de vide de la

zone SDZ sont activés et les éléments FMIVP situés au droit du sas sont désactivés. La pression reste imposée en galerie GED, la pression dans la zone SDZ résultera des échanges par le sas et la zone EDZ. Le creusement n'est pas modélisé.

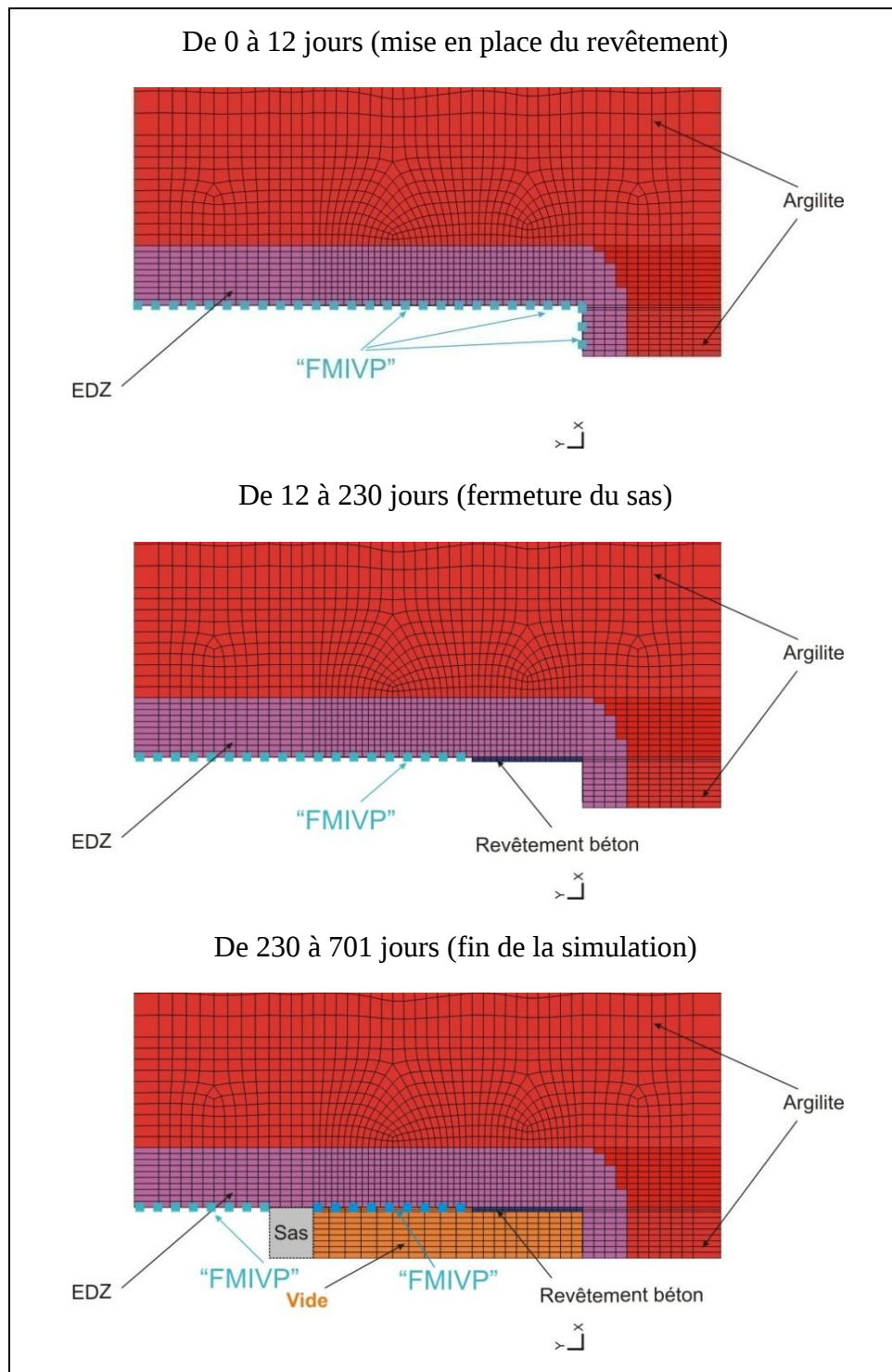


Figure 70 : Phasage de la modélisation axisymétrique.

6.3.4 Conditions aux limites

Imposition aux limites lointaines :

Les déplacements sont bloqués dans l'ensemble du modèle. La pression d'eau initiale (p_w de 4.5 MPa) est fixée aux limites lointaines.

Imposition de l'humidité relative H_r dans la galerie :

Pour imposer l'évolution de l'humidité relative, la pression d'eau est fixée au nœud d'environnement dans la galerie GED en amont du sas dès le début de la simulation (0 jour). Ensuite, le sas est fermé et la ventilation est stoppée dans la zone SDZ.

Dans un premier temps, ne disposant pas de mesures de la température et d'hygrométrie dans la galerie GED, la pression d'eau imposée correspond à la pression d'eau en zone SDZ (*Figure 12*) avec reproduction de l'évolution avant la fermeture du sas (*Figure 71*).

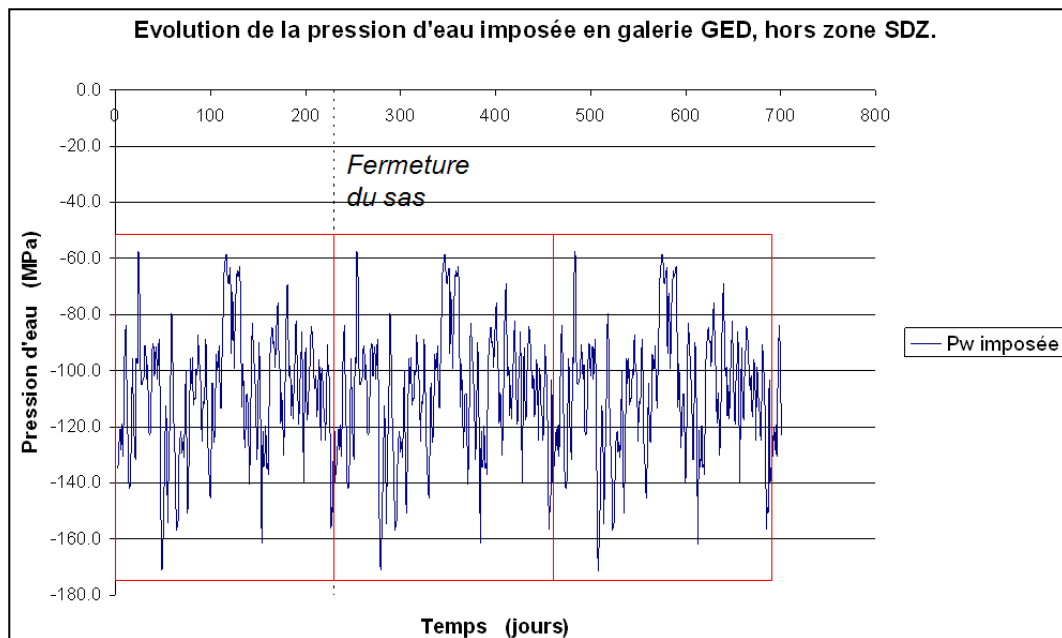


Figure 71 : Evolution de la pression d'eau imposée en galerie GED à partir des mesures en zone SDZ avant fermeture du sas (reproduction).

Ensuite, la pression en galerie GED a été imposée à partir des mesures de température et d'hygrométrie effectuées en galerie en dehors de la zone dédiée à l'expérience SDZ. La *Figure 72* présente l'évolution des valeurs mesurées, la *Figure 73* présente l'évolution de la pression d'eau imposée.

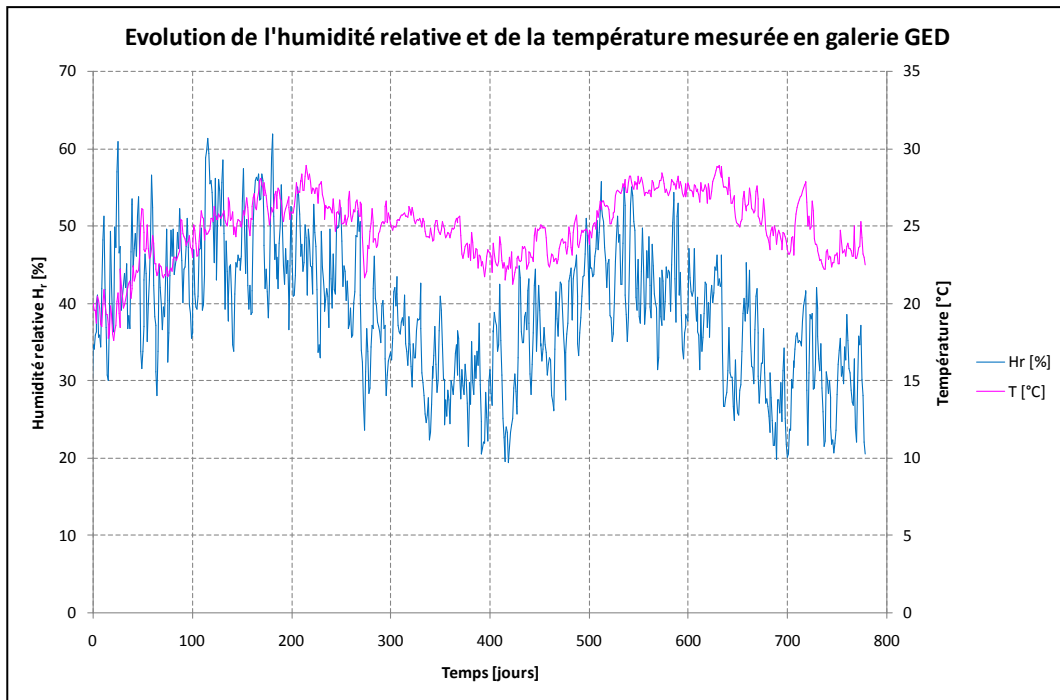


Figure 72 : Evolution de l'humidité relative et de la température dans la galerie GED.

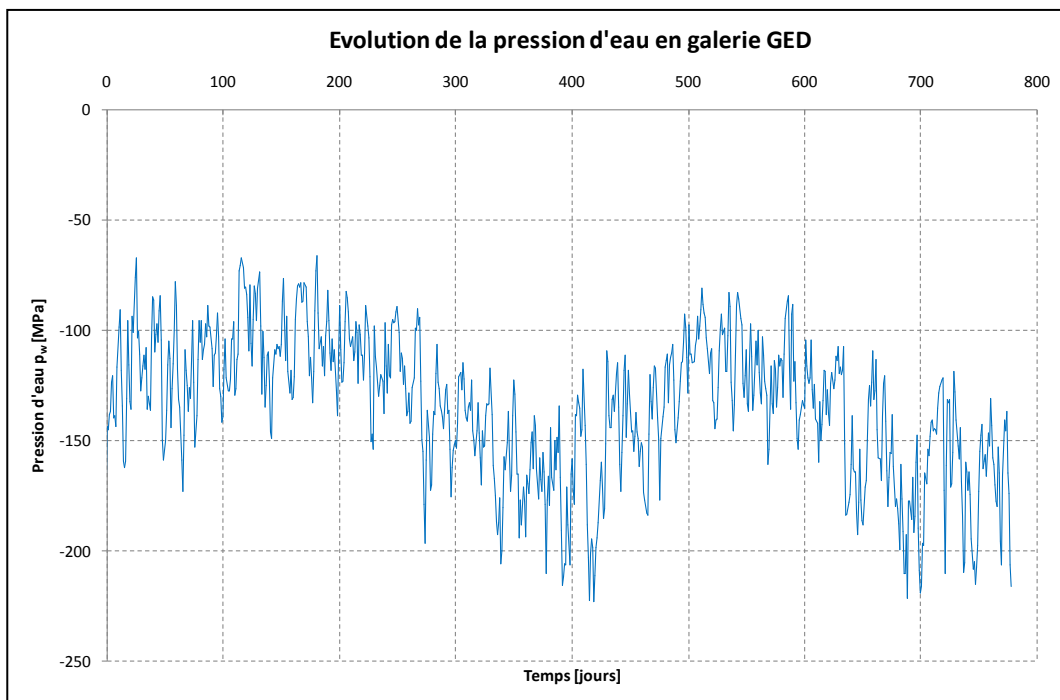


Figure 73 : Evolution de la pression d'eau imposée en galerie GED.

6.3.5 Mesures expérimentales

Des mesures de pression ont été effectuées dans les forages (rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B et D.RP.AMFS.11.0016) :

- situés dans la zone de galerie non revêtue dédiée à l'expérience SDZ : forages SDZ1241 à 1244,

- situé au front de la galerie GED : forage SDZ1245,
- situés dans la zone de galerie revêtue dédiée à l'expérience SDZ : forages OHZ1221 à 1223.

Les résultats numériques seront comparés à ces mesures. Les annexes 8.2 et 8.3 détaillent la position des forages, la position des capteurs de mesures de pression et l'évolution des mesures au cours du temps.

6.3.6 Résultats numériques – Calibrage du coefficient de transfert de masse

Sauf indication contraire, les résultats présentés ci-dessous ont été obtenus avec la pression imposée par reproduction des mesures en zone SDZ avant fermeture du sas (*Figure 71*).

Différents cas sont envisagés en vue de déterminer une valeur adéquate du coefficient de transfert de masse pour l'évaporation en zone SDZ, α_{sdz} , fournissant des résultats proches des mesures expérimentales effectuées.

Sont fixés :

- le coefficient de pénalisation pour le suintement, $K = 10^{-10} \text{ s}^3.\text{kg}^{-1}$
- le coefficient de transfert de masse pour l'évaporation en galerie GED, $\alpha_{ged} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$
- la perméabilité de l'argilite saine, $k_{iso} \text{ argilite} = 4 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ (isotrope en axisymétrique)
- la perméabilité de l'argilite EDZ, $k_{iso} \text{ EDZ} = 4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ (isotrope en axisymétrique)
- la perméabilité du béton, $k_{iso} \text{ béton} = 1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$

Les résultats présentés sont l'évolution des flux d'eau axiaux et radiaux le long des sections FF', GG' et HH' (*Figure 74*) situées dans l'EDZ en zone non étanchée ainsi que de la pression d'eau :

- au centre du vide, en zone non étanche (au droit de la section comprenant les forages SDZ1241 à 1244, entre les cintres 63 et 64),
- axialement, dans le forage SDZ1245 horizontal au front de la galerie à 5,9 m, 4,5 m, 3,0 m, 1,9 m, 1,0 m et 0,5 m de la paroi,
- radialement, en zone non étanche à 20,1 m, 12,2 m, 9,2 m, 6,1 m, 4,65 m et 3,15 m de la paroi,
- radialement, en zone étanche à 6,18 m, 3,78 m, 1,28 m de la paroi (seulement pour le cas 1 détaillé ci-après),
- le long des coupes radiales AA' en GED et CC' en zone étanche (*Figure 74*)
- le long des coupes axiales DD' et EE' (*Figure 74*).

Les distances sont choisies afin de pouvoir comparer les résultats numériques avec les mesures de pression en forage.

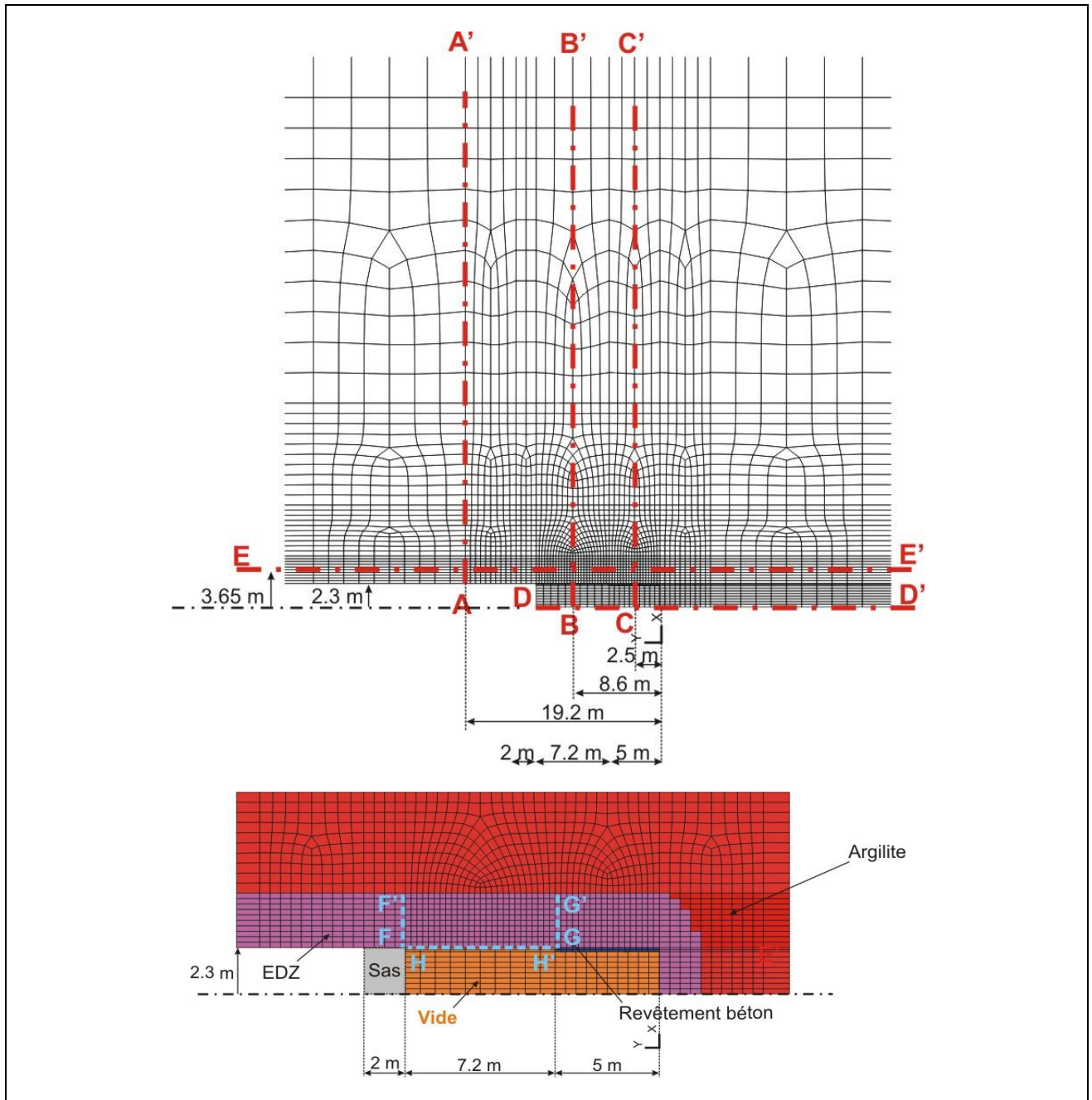


Figure 74 : Localisation des coupes de sorties de résultats, modélisation axisymétrique.

Cas 1 :

Pour ce premier cas on envisage $\alpha_{sdz} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$.

Puisqu'on ne modélise pas le creusement, il n'y a pas de surpression dès lors p_w initiale est sous estimée à la Figure 76. Aux Figure 77, Figure 78, Figure 79 et Figure 80 on observe une faible connexion avec le vide impliquant une remontée des courbes de p_w .

Aux Figure 81, Figure 82 et Figure 83 la pression d'eau est sous estimée. Signalons qu'au bout de la galerie, l'épaisseur verticale de l'EDZ diminue sur base des mesures de fracturation et de perméabilité (voir rapport Andra D.RP.AMFS.11.0016) or cette diminution n'est pas

représentée dans le modèle axisymétrique. Les résultats en zone étanche ne sont présentés que pour ce cas.

Aux *Figure 84*, *Figure 85*, *Figure 86* et *Figure 87* on n'observe pas d'effet du vide sur les courbes de p_w dans la zone GED. L'EDZ ne se désature pas car α_{sdz} est faible. L'écart entre la pression d'eau du vide et de l'EDZ est important.

La *Figure 88* présente l'évolution des flux axiaux et radiaux à travers les sections HH', FF' et GG'. A long terme, les échanges en terme d'évaporation deviennent dominants. On constate que les flux radiaux sont négatifs et donc dirigés vers la galerie SDZ. Les flux axiaux sont positifs et donc dirigés vers la galerie GED. La galerie GED « aspire » l'eau et les transferts se font via l'EDZ. La *Figure 89* présente les flux d'eau de Darcy.

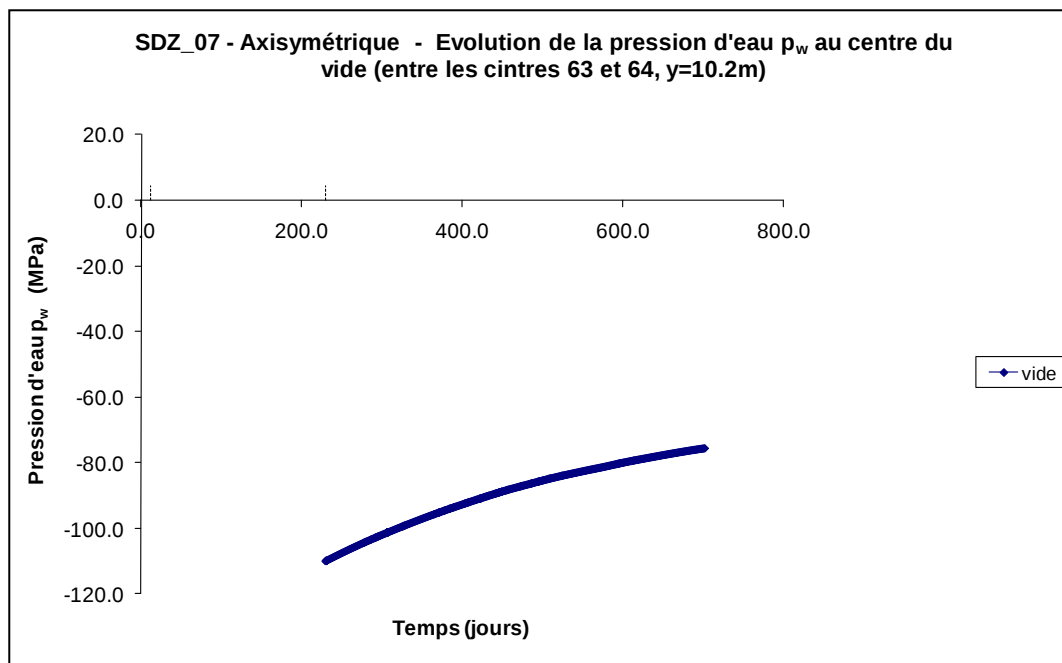


Figure 75 : Evolution de la pression d'eau au centre du vide en zone SDZ non étanche, cas 1, axisymétrique écoulement pur.

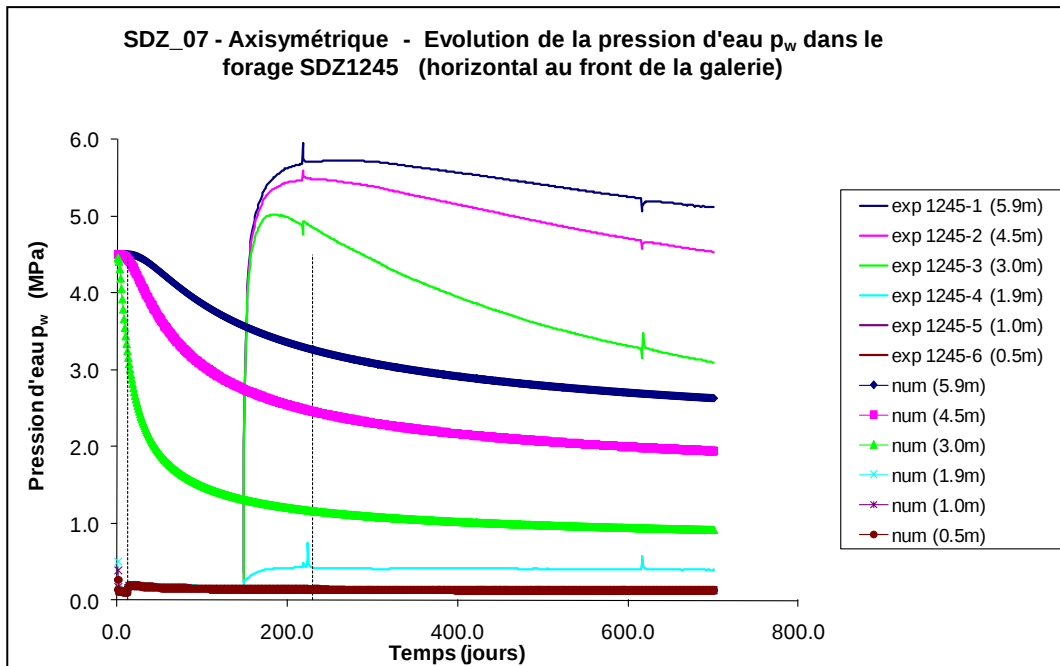


Figure 76 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1245 horizontal au front de la galerie, cas 1, axisymétrique écoulement pur.

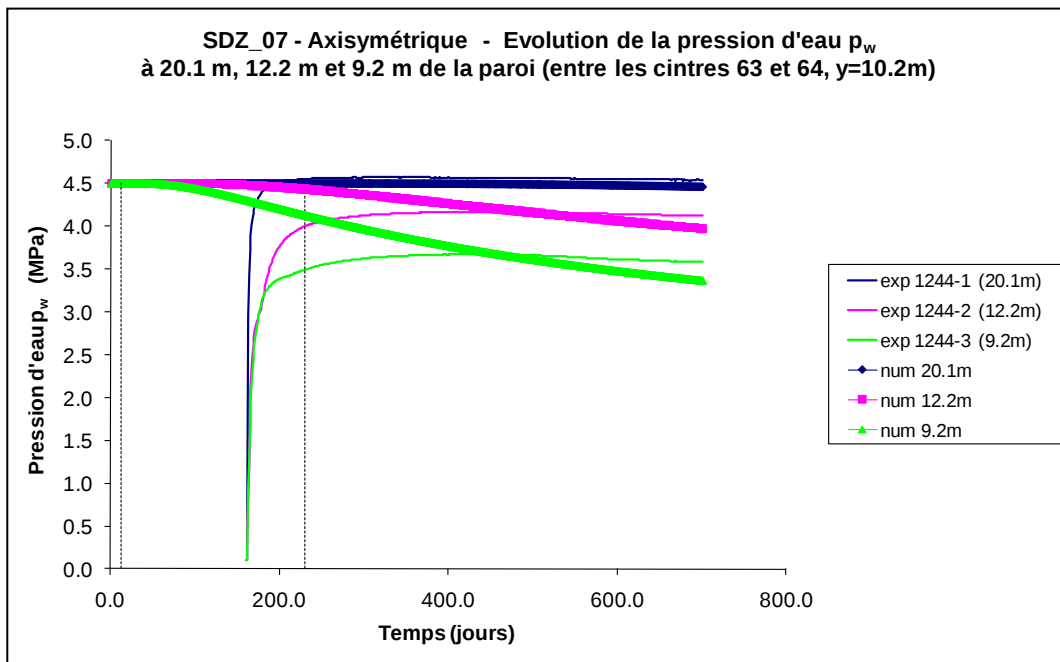


Figure 77 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 20,1 m, 12,2 m et 9,2 m de la paroi, cas 1, axisymétrique écoulement pur.

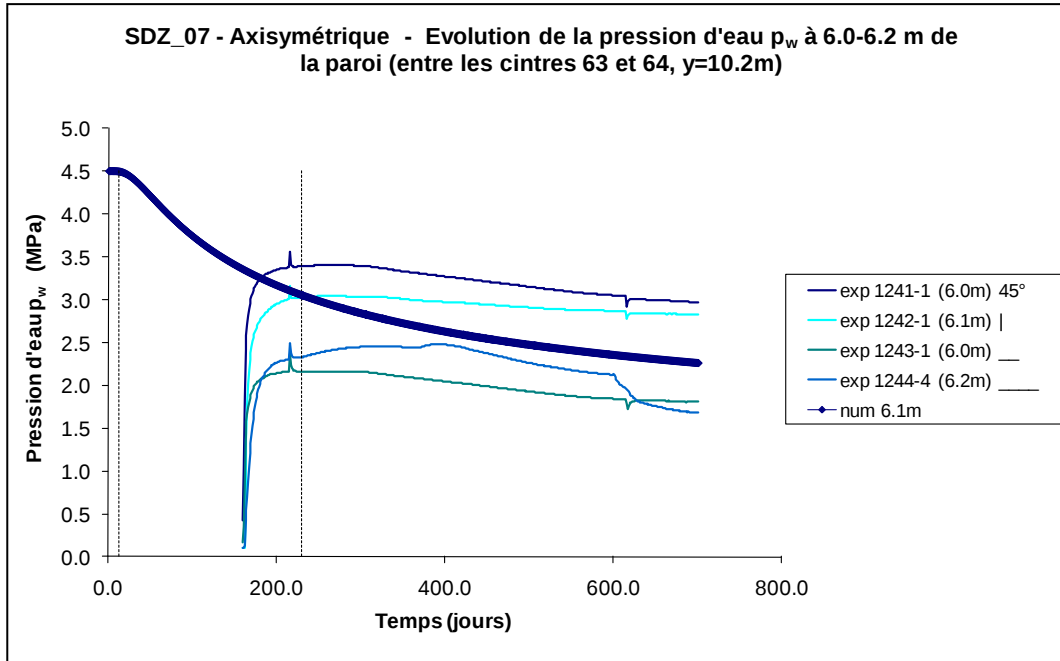


Figure 78 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 6,1 m de la paroi, cas 1, axisymétrique écoulement pur.

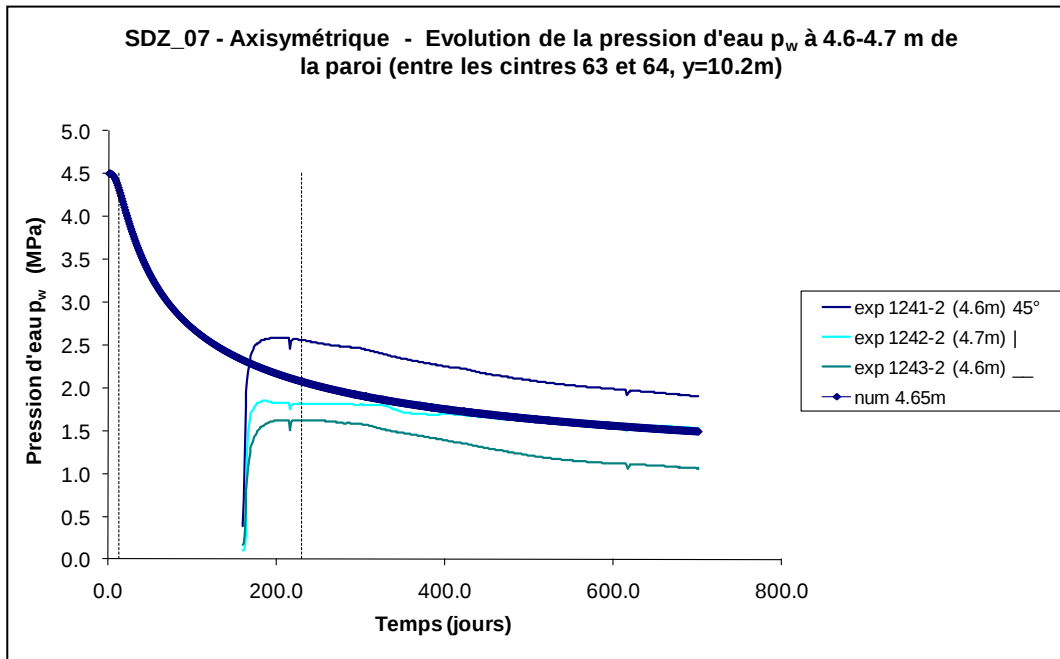


Figure 79 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 4,65 m de la paroi, cas 1, axisymétrique écoulement pur.

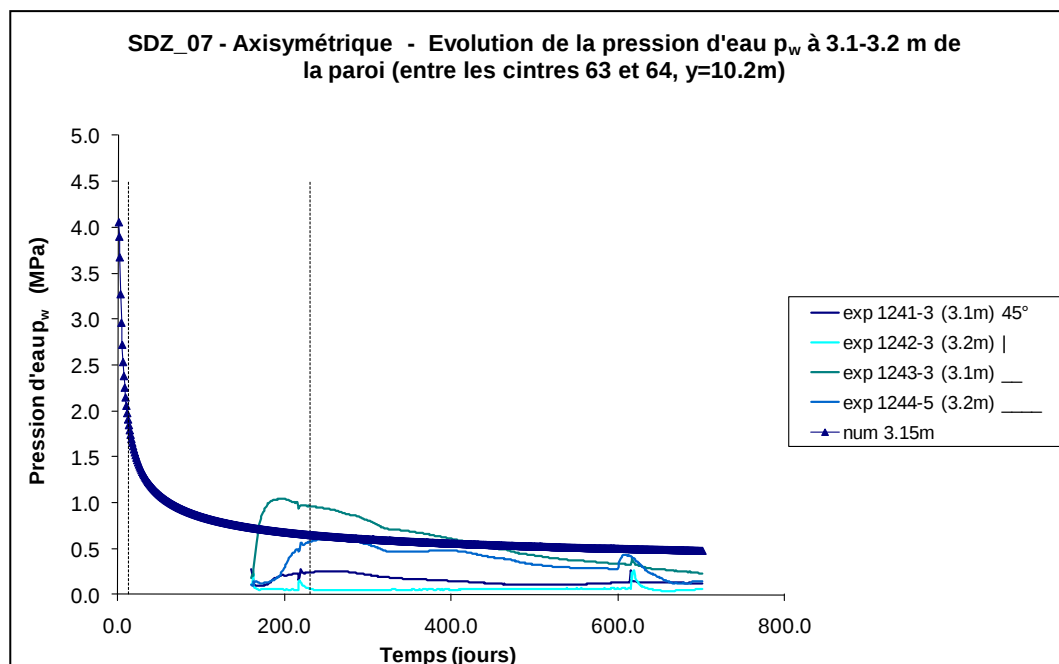


Figure 80 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 3,15 m de la paroi, cas 1, axisymétrique écoulement pur.

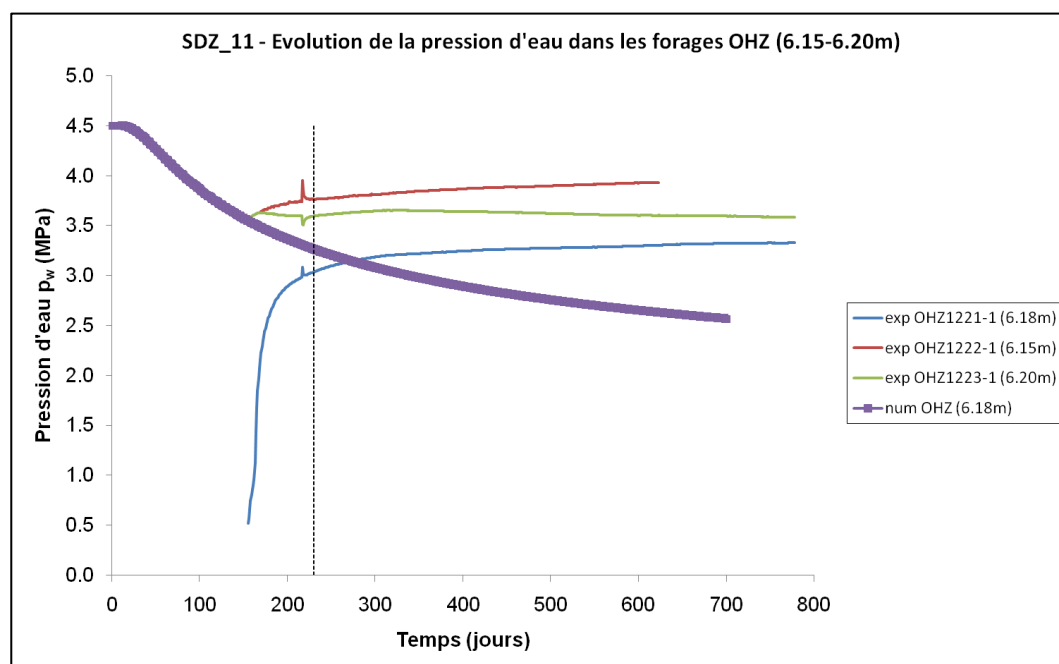


Figure 81 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone étanche à 6,18 m de la paroi, cas 1, axisymétrique écoulement pur.

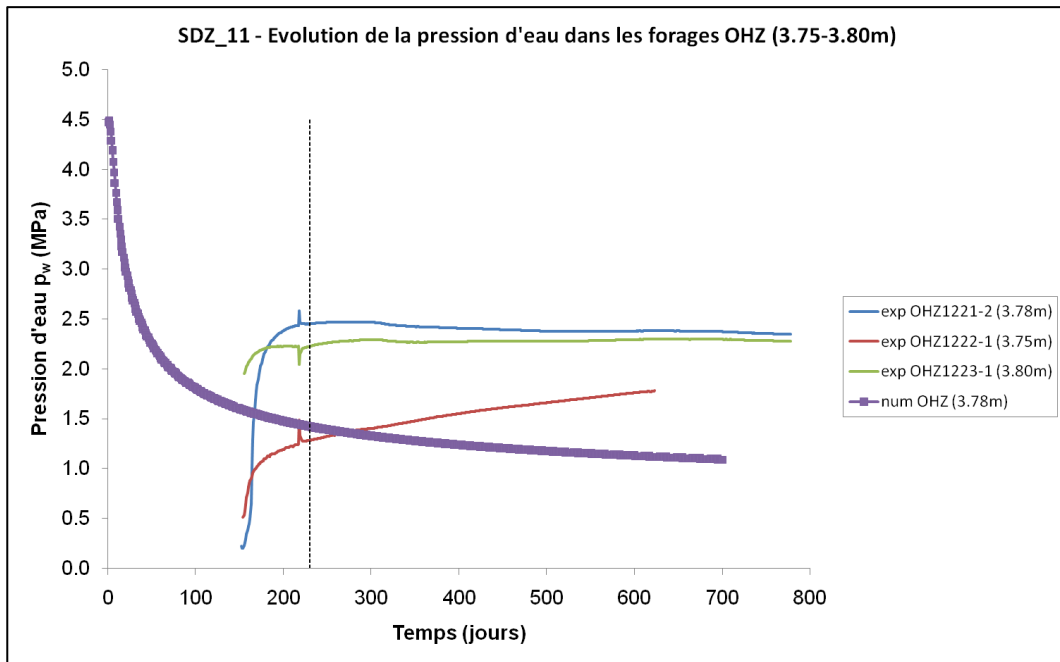


Figure 82 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone étanche à 3,78 m de la paroi, cas 1, axisymétrique écoulement pur.

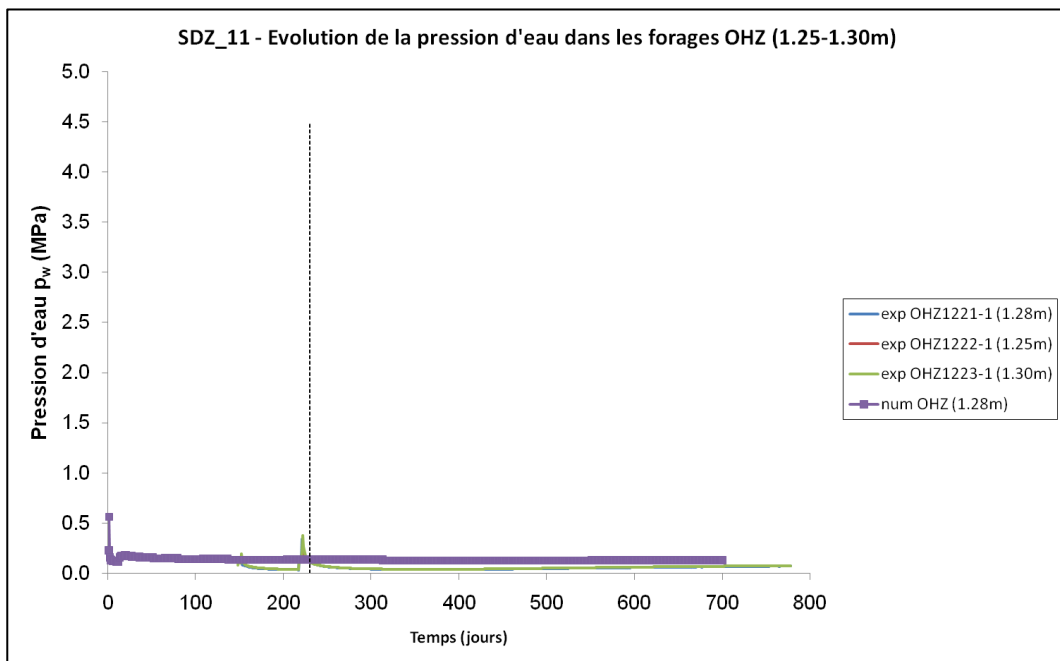


Figure 83 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone étanche à 1,28 m de la paroi, cas 1, axisymétrique écoulement pur.

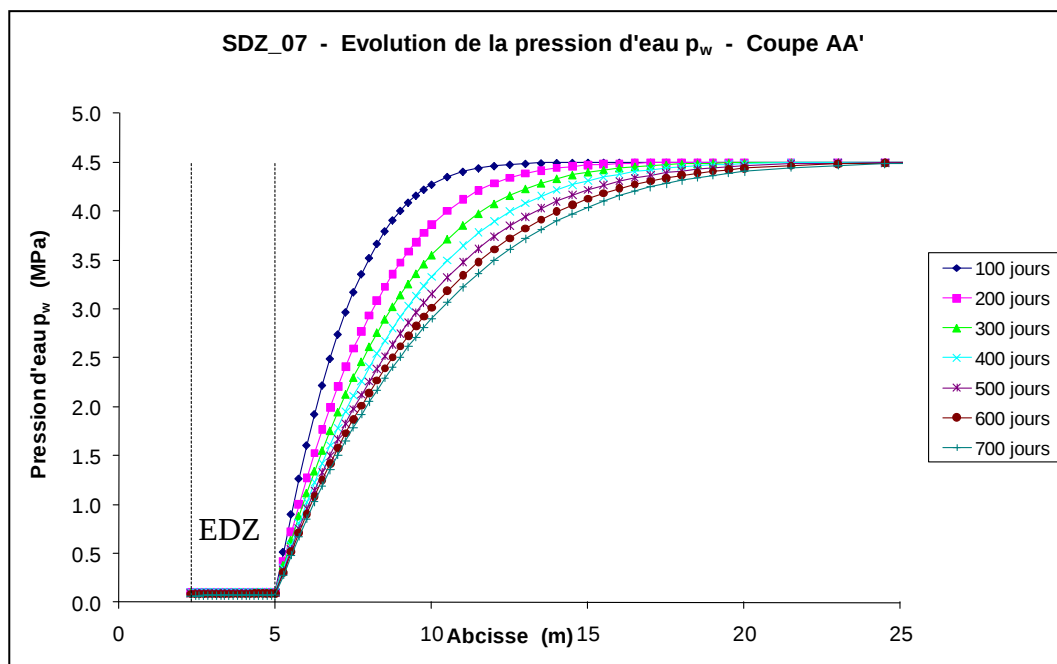


Figure 84 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe radiale AA', cas 1, axisymétrique écoulement pur.

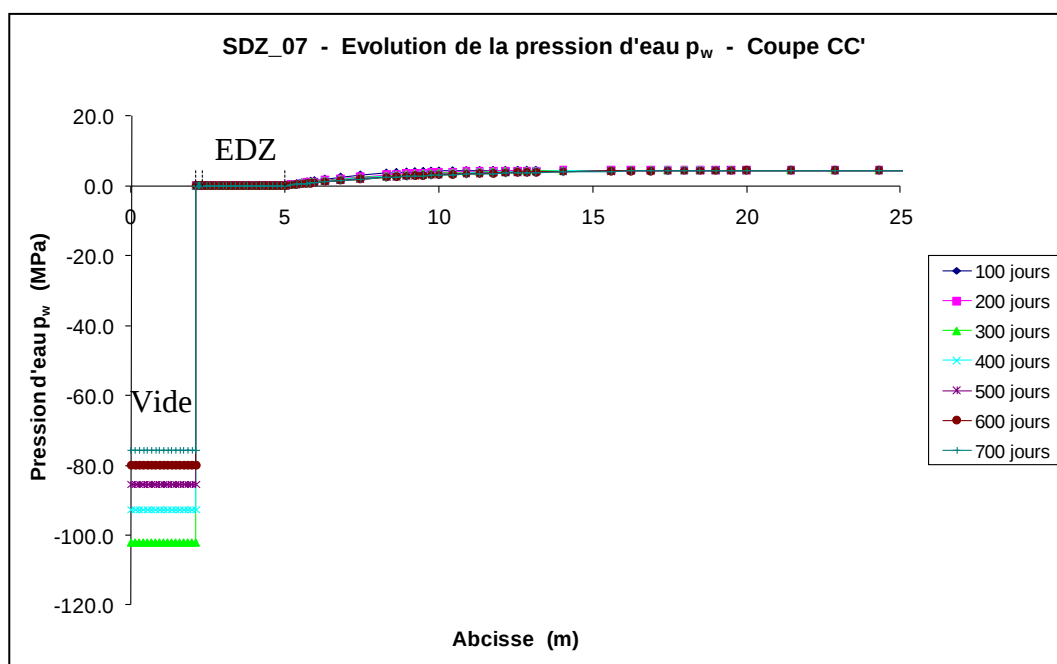


Figure 85 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe radiale CC', cas 1, axisymétrique écoulement pur.

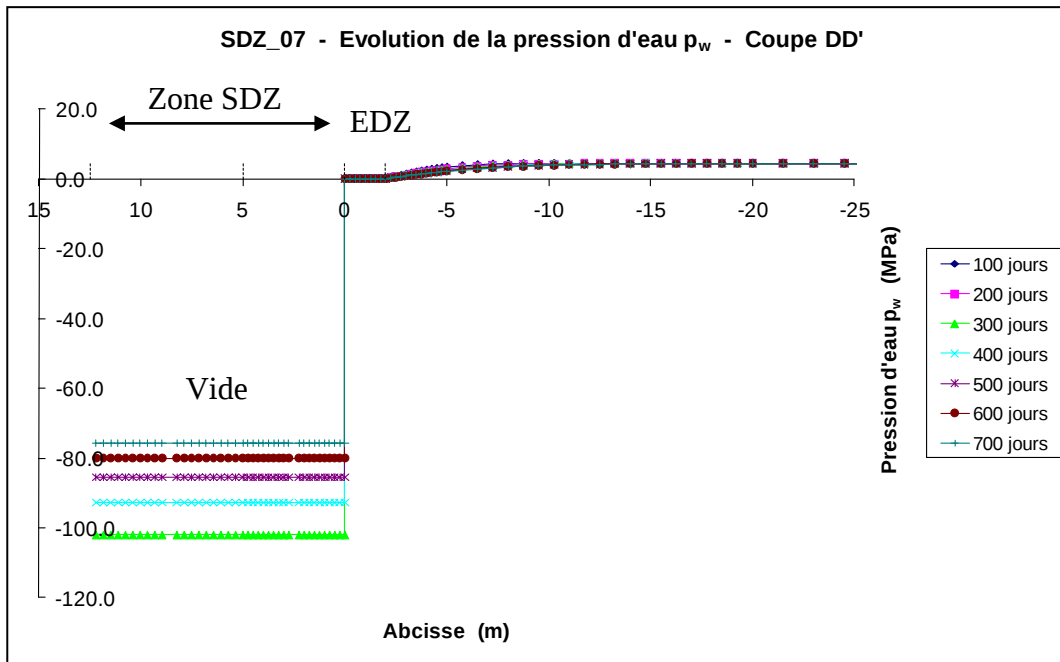


Figure 86 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale DD', cas 1, axisymétrique écoulement pur.

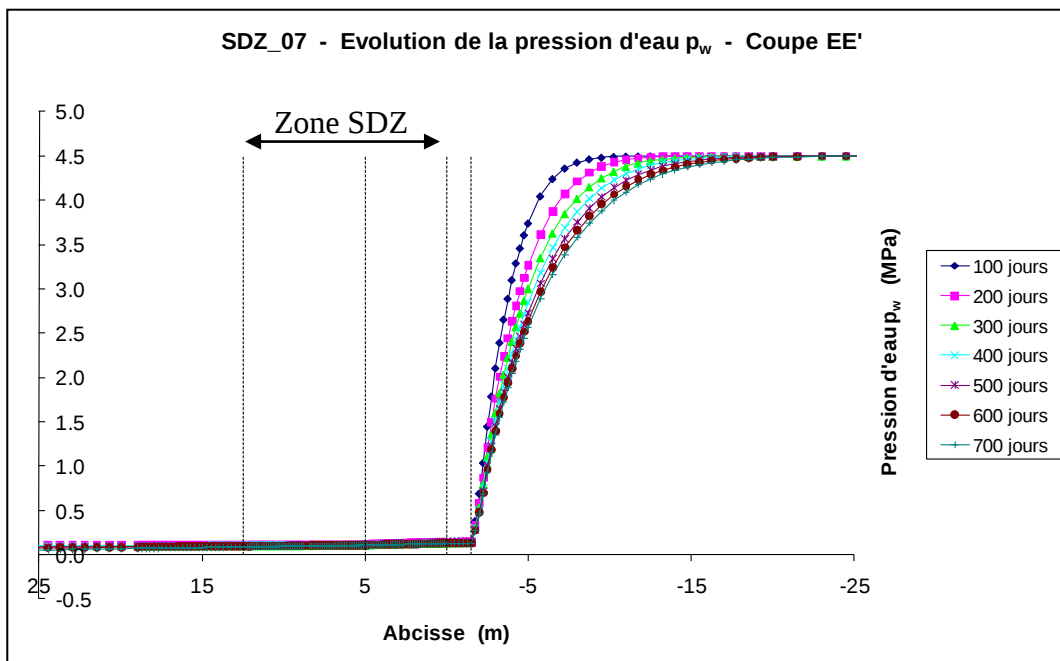


Figure 87 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale EE', cas 1, axisymétrique écoulement pur.

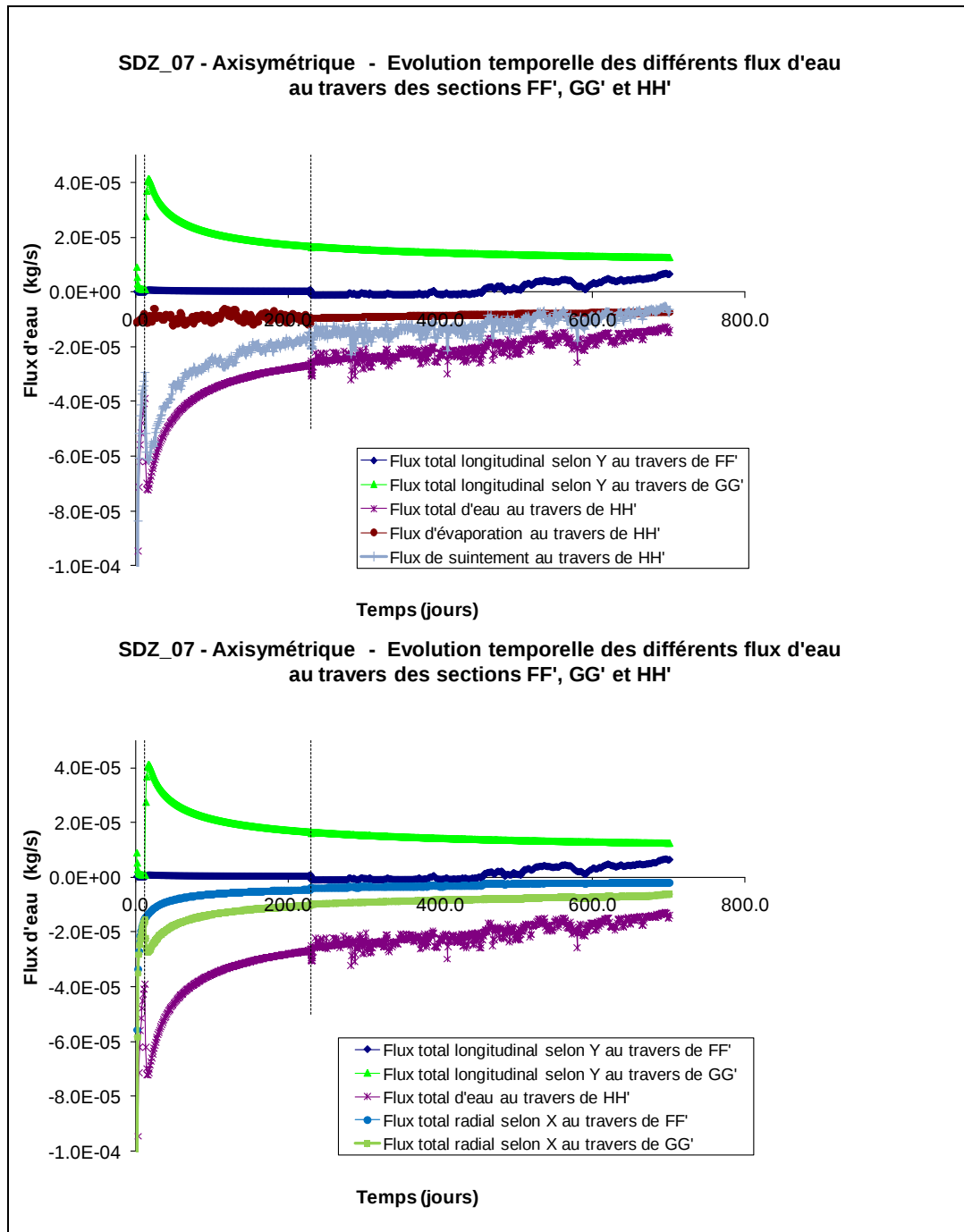


Figure 88 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', cas 1, axisymétrique écoulement pur.

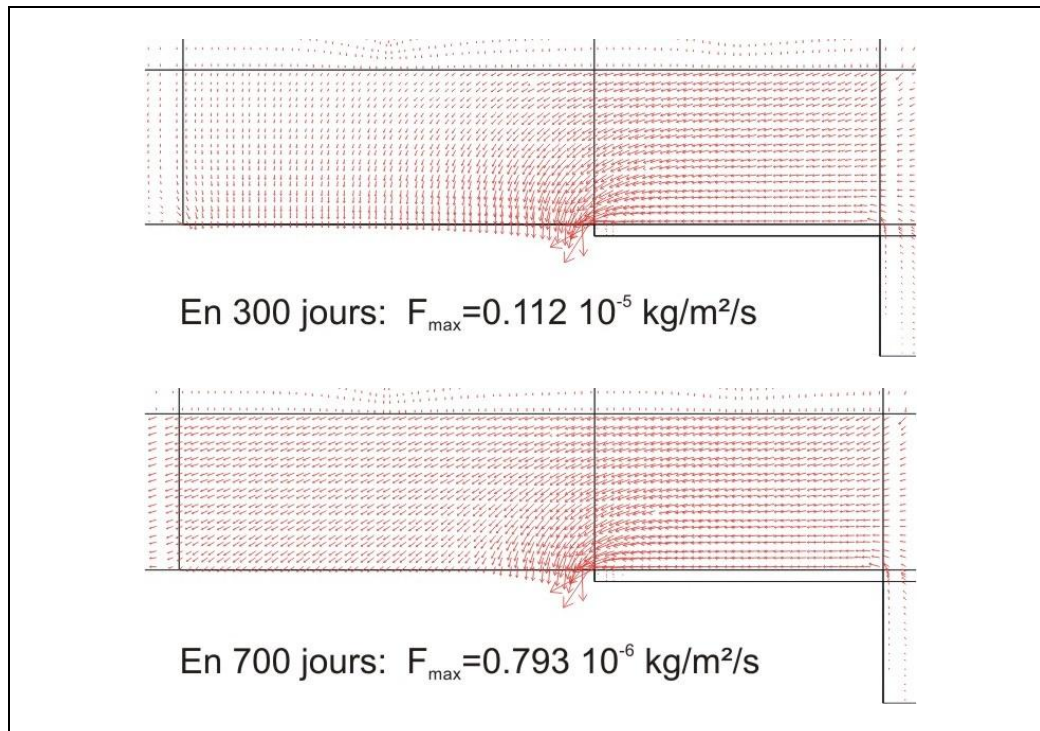


Figure 89 : Evolution des flux d'eau de Darcy au niveau de la zone SDZ, cas 1, axisymétrique écoulement pur.

Cas 2 :

Pour ce deuxième cas on envisage une augmentation de l'évaporation, $\alpha_{sdz} = 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$.

Aux *Figure 92*, *Figure 93*, *Figure 94* et *Figure 95* on observe une forte connexion avec le vide impliquant des courbes de p_w tirées vers le bas.

Aux *Figure 96*, *Figure 97*, *Figure 98* et *Figure 99* on observe un effet du vide sur le rabattement des courbes de p_w dans la zone GED. L'EDZ se désature après un certain temps à cause du vide et l'écart entre la pression d'eau du vide et de l'EDZ diminue par rapport au cas précédent.

A la *Figure 100* on observe que les flux d'évaporation et totaux sont superposés, les flux de suintement sont négligeables. On constate que les flux radiaux sont négatifs et donc dirigés vers la galerie SDZ. Les flux axiaux sont positifs le long de GG' et négatifs le long de FF'. Ils sont donc dirigés vers la zone SDZ qui « aspire » l'eau. La *Figure 101* présente les flux d'eau de Darcy.

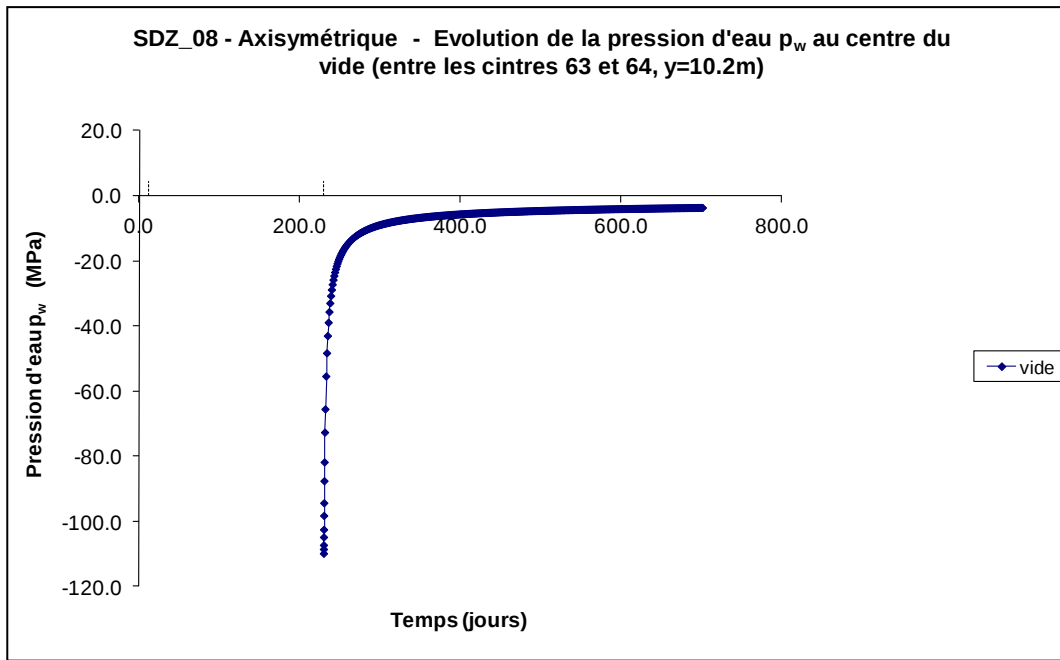


Figure 90 : Evolution de la pression d'eau au centre du vide en zone SDZ non étanche, cas 2, axisymétrique écoulement pur.

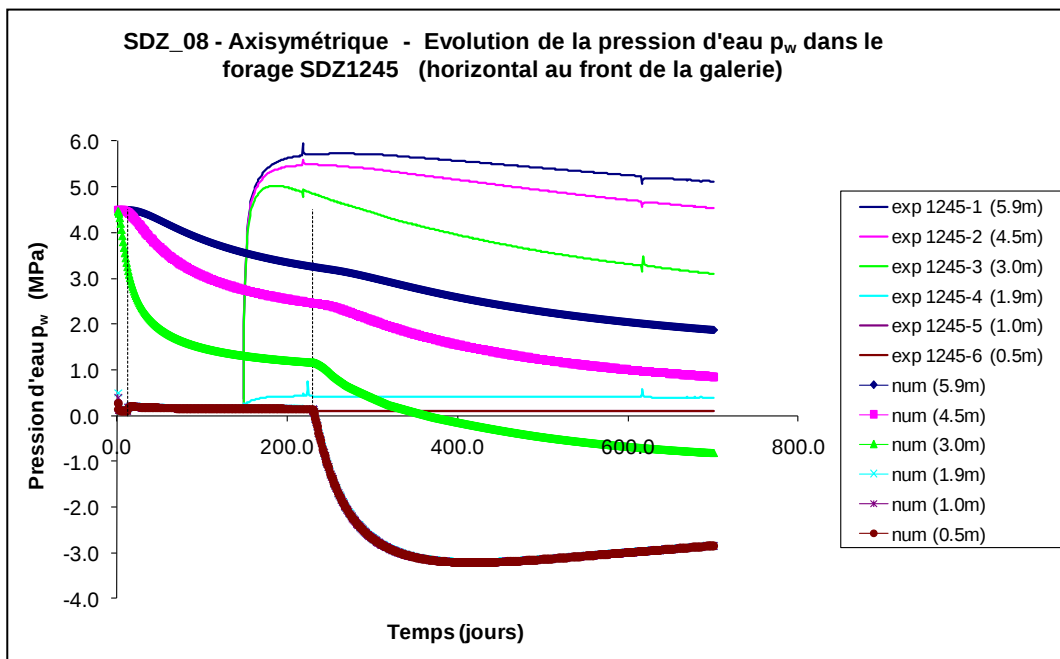


Figure 91 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1245 horizontal au front de la galerie, cas 2, axisymétrique écoulement pur.

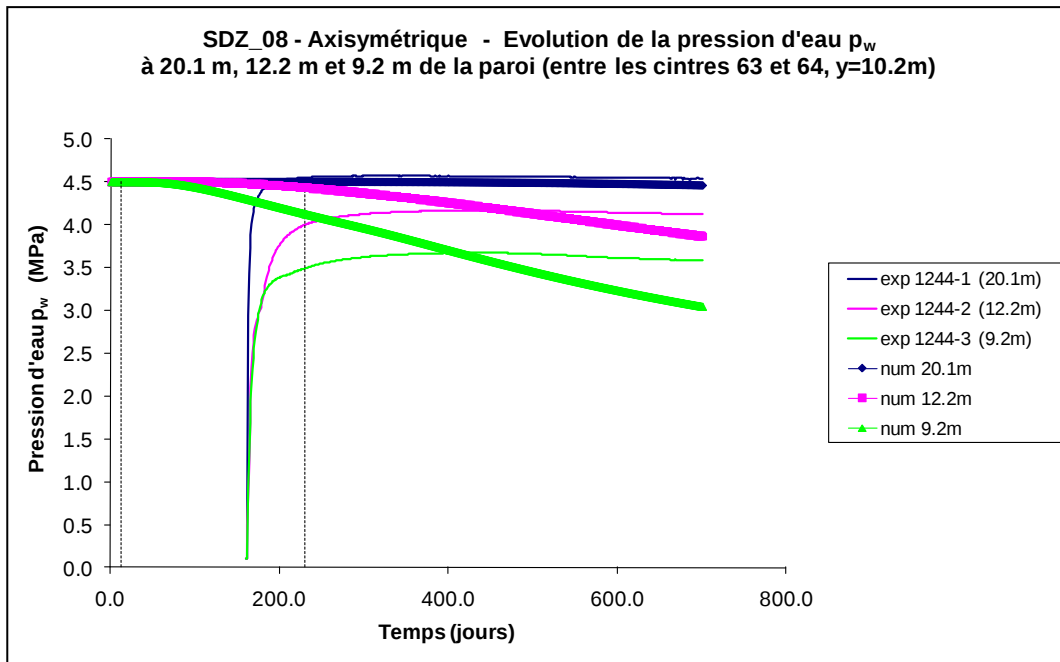


Figure 92 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 20,1 m, 12,2 m et 9,2 m de la paroi, cas 2, axisymétrique écoulement pur.

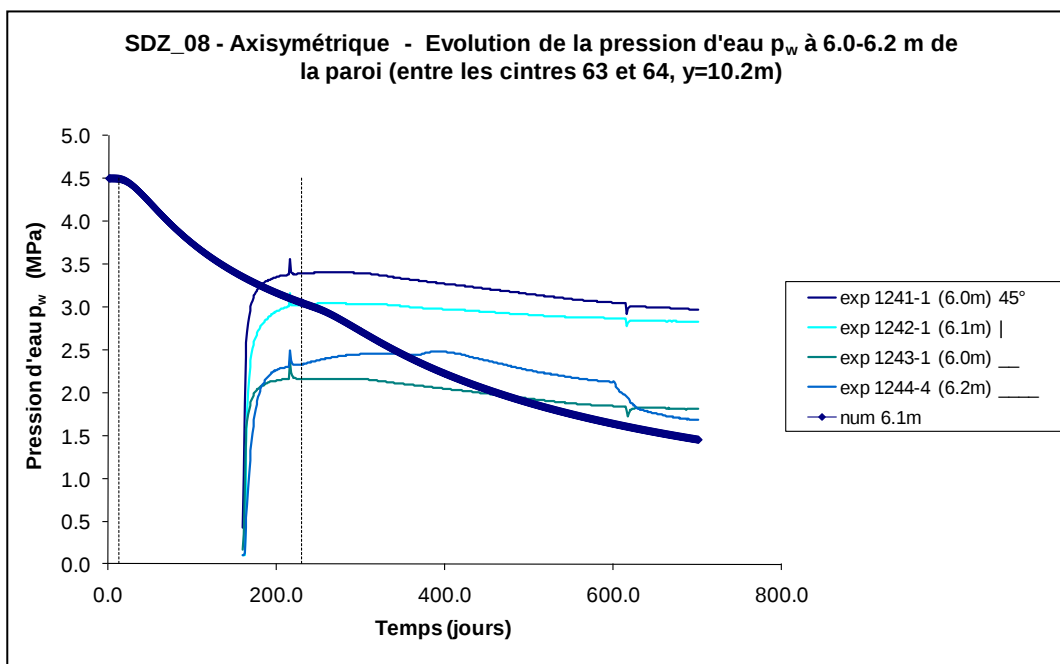


Figure 93 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 6,1 m de la paroi, cas 2, axisymétrique écoulement pur.

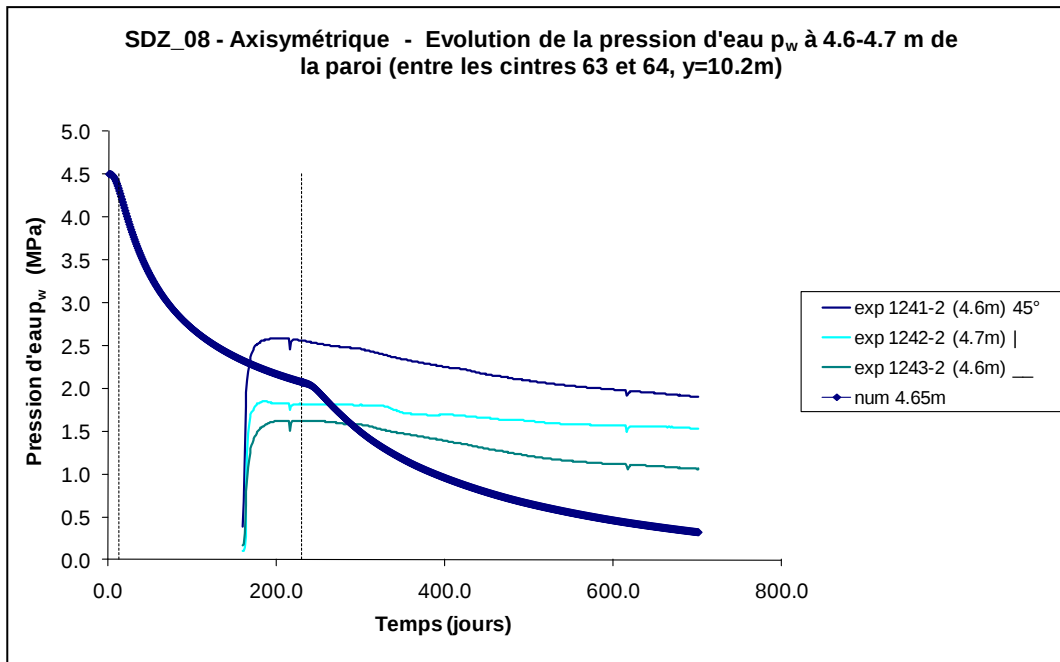


Figure 94 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 4,65 m de la paroi, cas 2, axisymétrique écoulement pur.

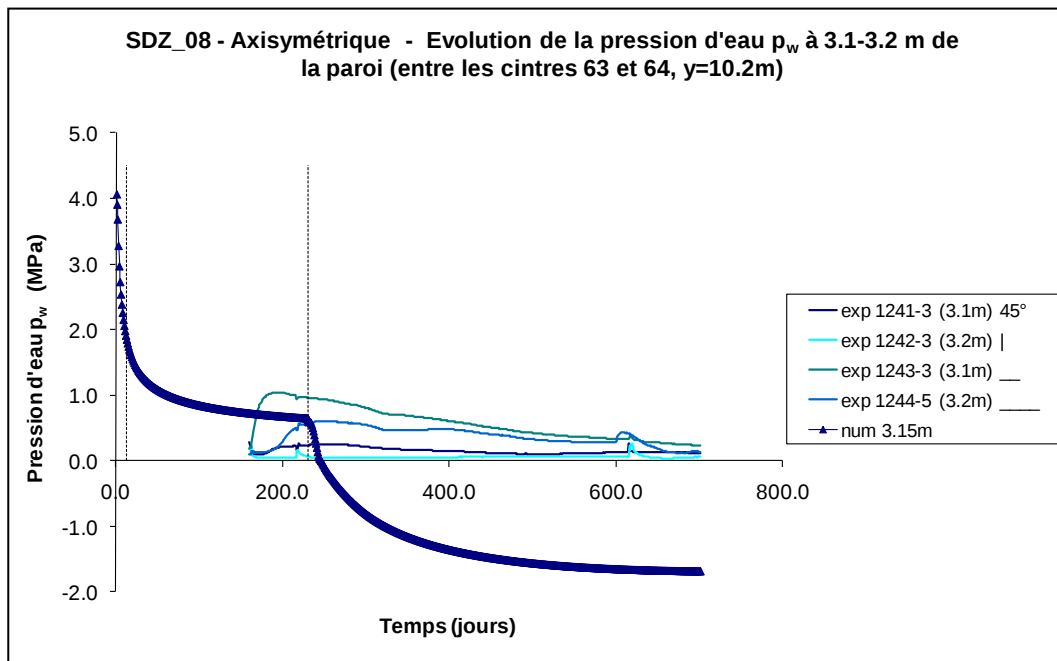


Figure 95 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 3,15 m de la paroi, cas 2, axisymétrique écoulement pur.

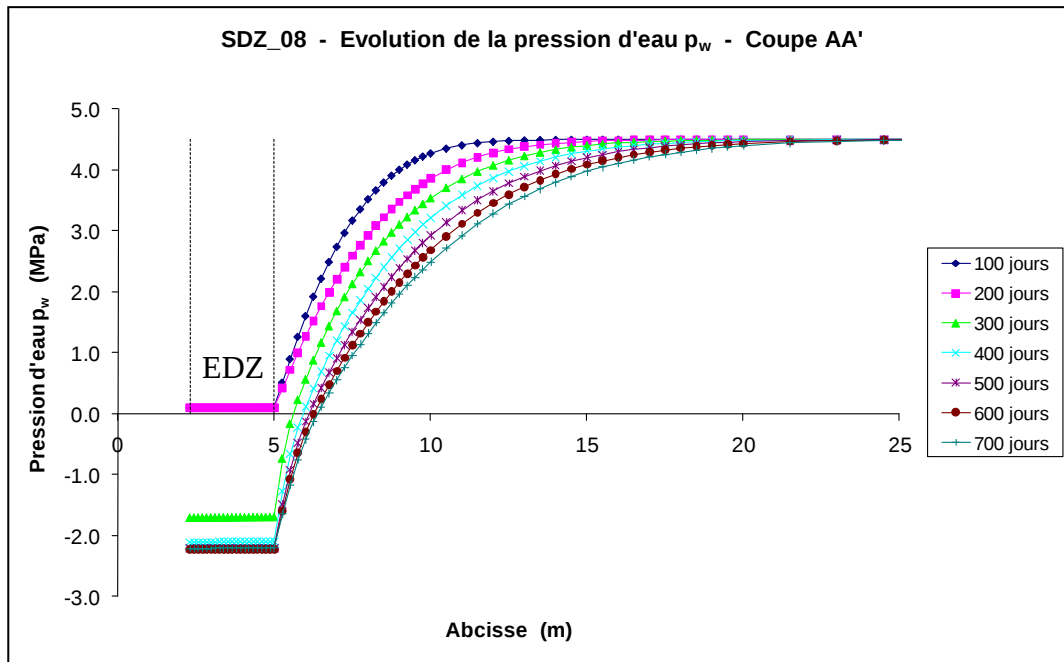


Figure 96 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe radiale AA', cas 2, axisymétrique écoulement pur.

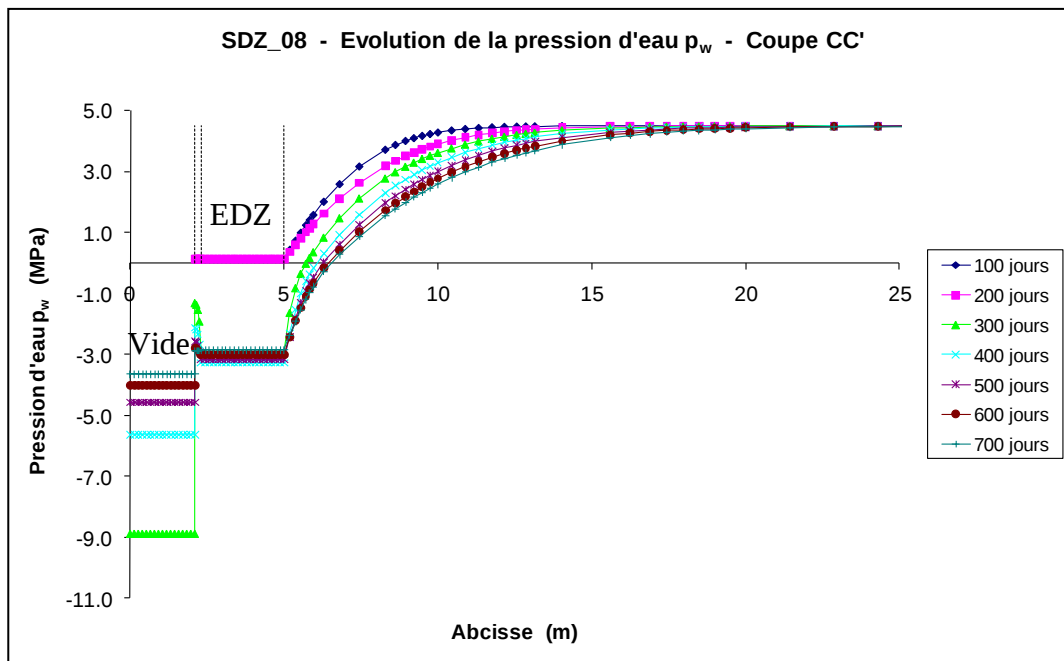


Figure 97 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe radiale CC', cas 2, axisymétrique écoulement pur.

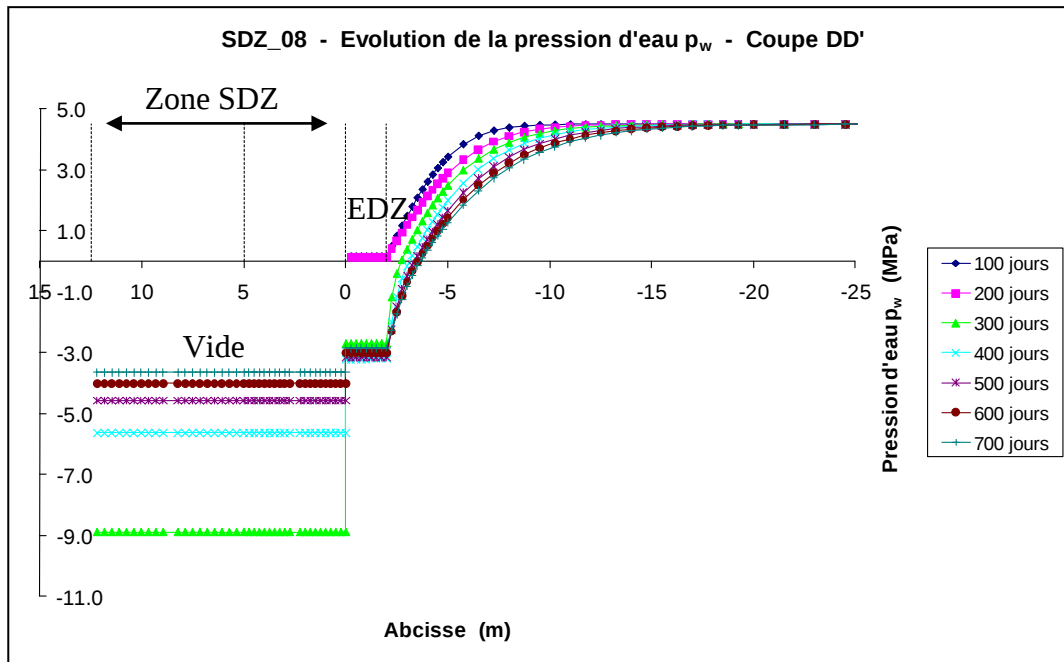


Figure 98 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale DD', cas 2, axisymétrique écoulement pur.

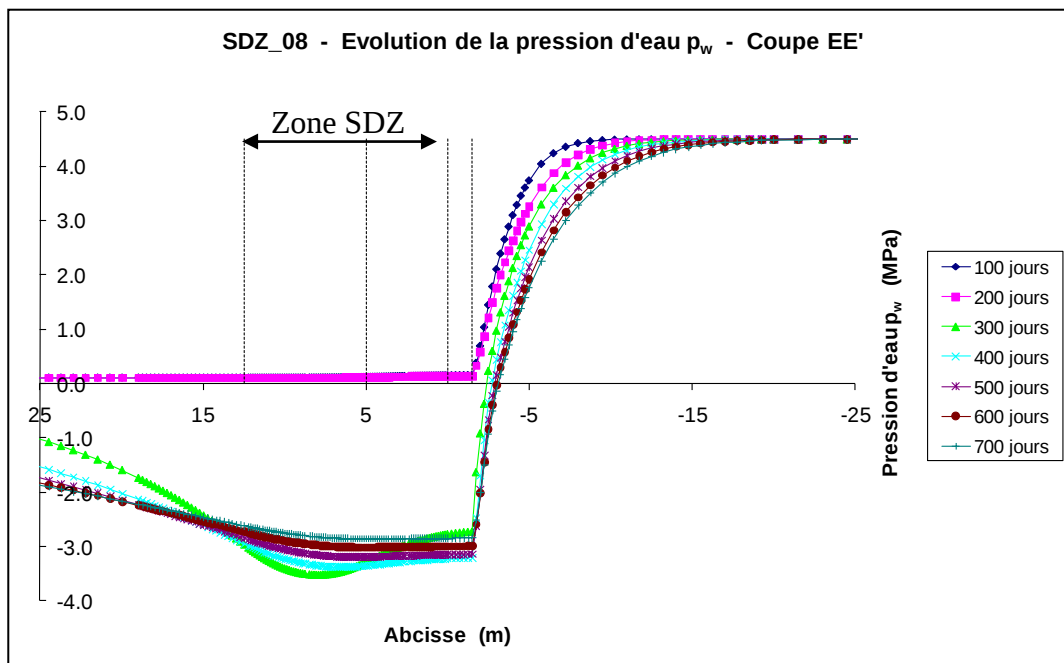


Figure 99 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale EE', cas 2, axisymétrique écoulement pur.

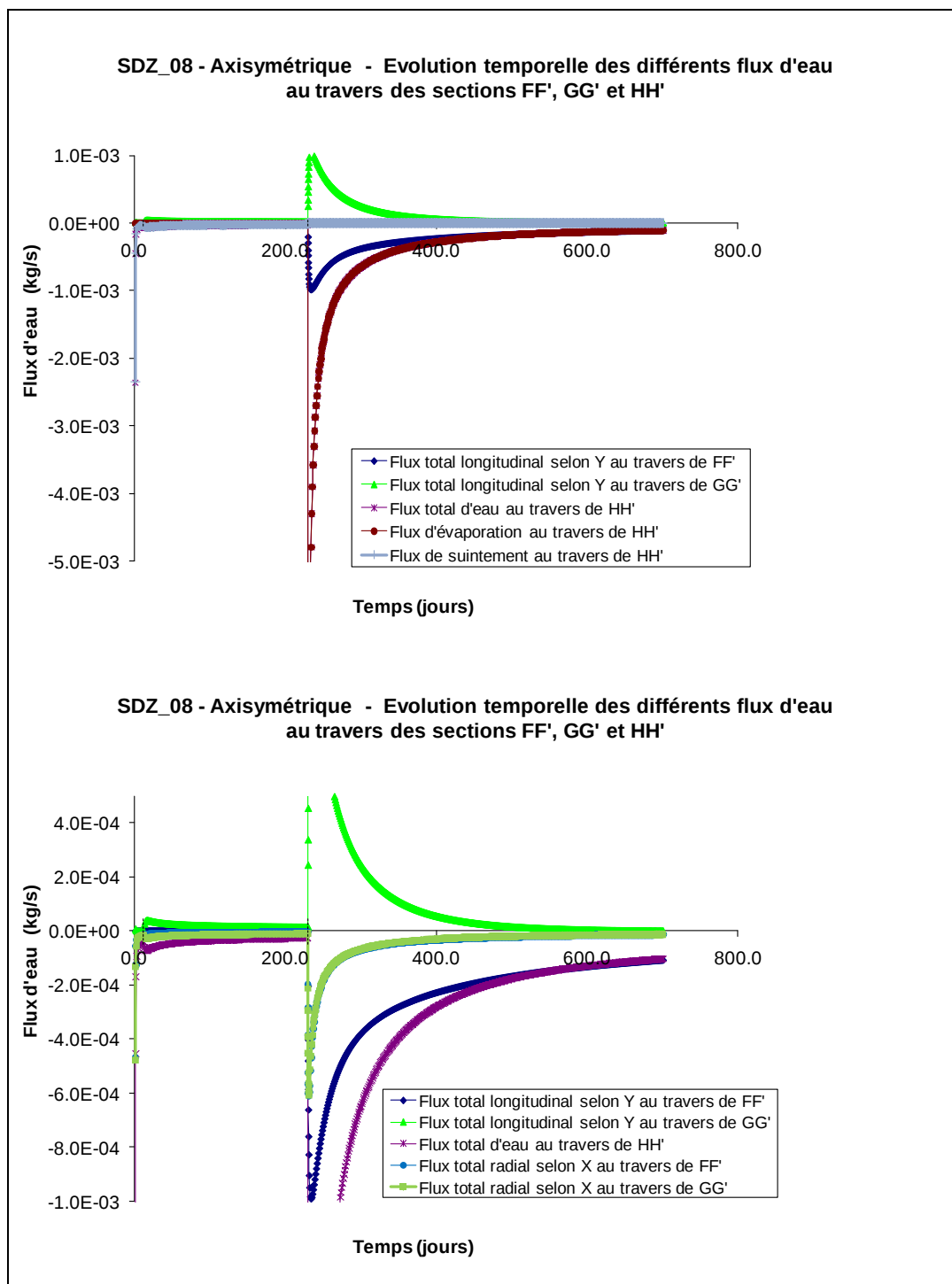


Figure 100 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', cas 2, axisymétrique écoulement pur.

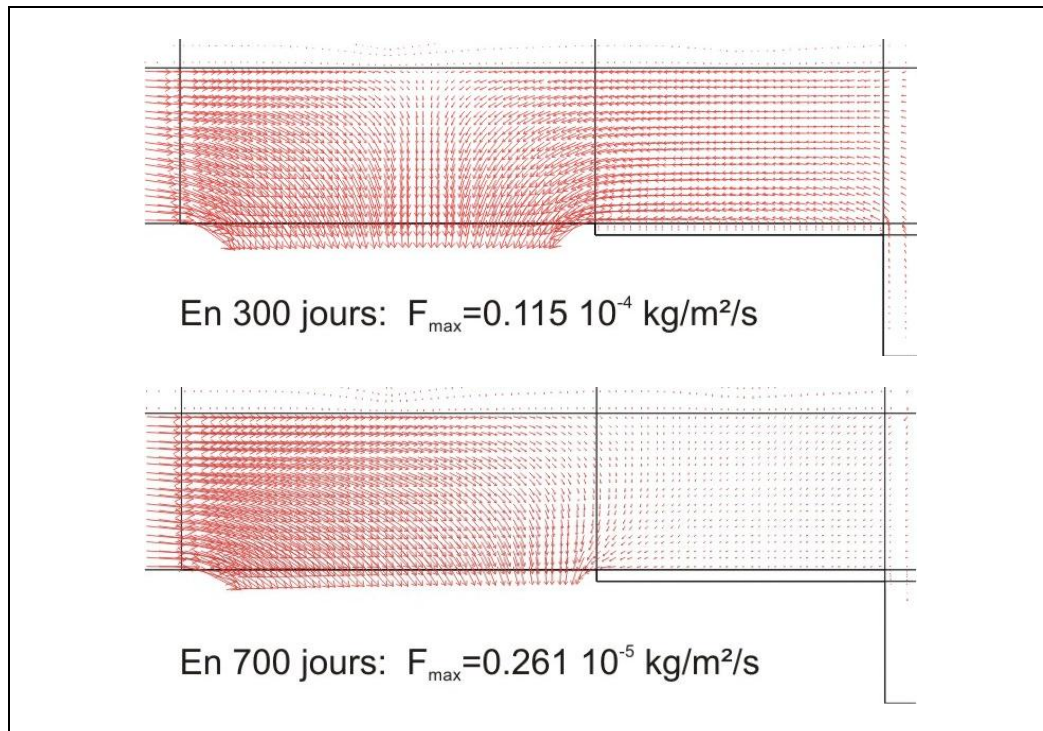


Figure 101 : Evolution des flux d'eau de Darcy au niveau de la zone SDZ, cas 2, axisymétrique écoulement pur.

Cas 3 :

Pour ce troisième cas on envisage une évaporation intermédiaire aux deux cas précédents, $\alpha_{\text{sdz}} = 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$.

Les observations sont similaires au cas 2 : effet du vide sur le rabattement des courbes de p_w dans la zone GED, désaturation de l'EDZ moins marquée et flux convergents vers la zone SDZ.

La **Figure 114** présente l'évolution de la pression d'eau au cours du temps au niveau de la zone SDZ. La pression d'eau diminue dans l'EDZ au cours du temps (désaturation).

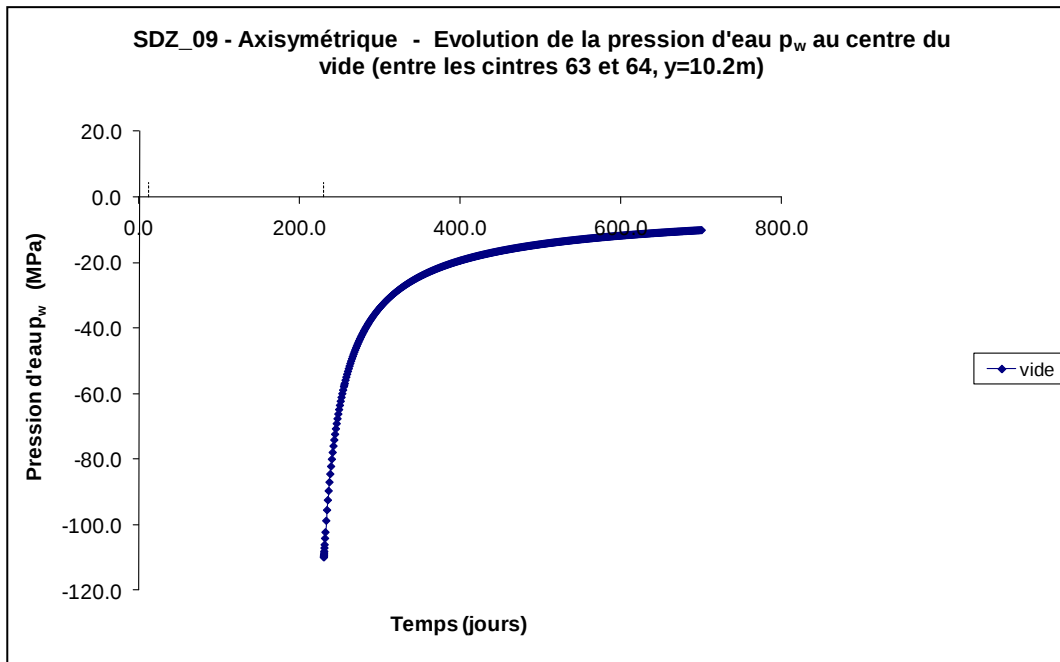


Figure 102 : Evolution de la pression d'eau au centre du vide en zone SDZ non étanche, cas 3, axisymétrique écoulement pur.

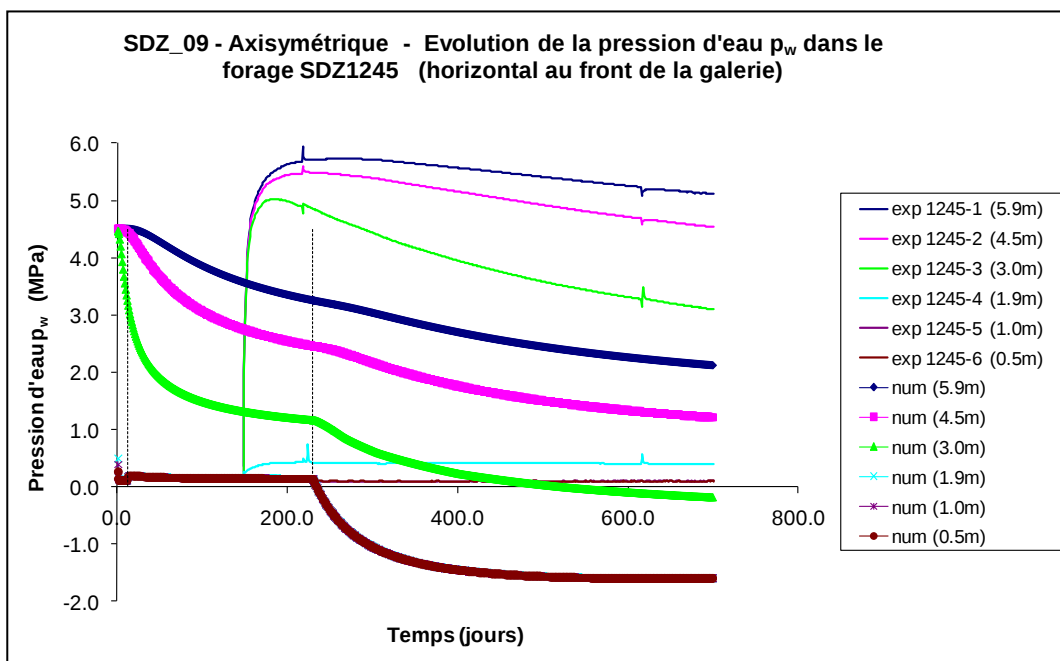


Figure 103 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1245 horizontal au front de la galerie, cas 3, axisymétrique écoulement pur.

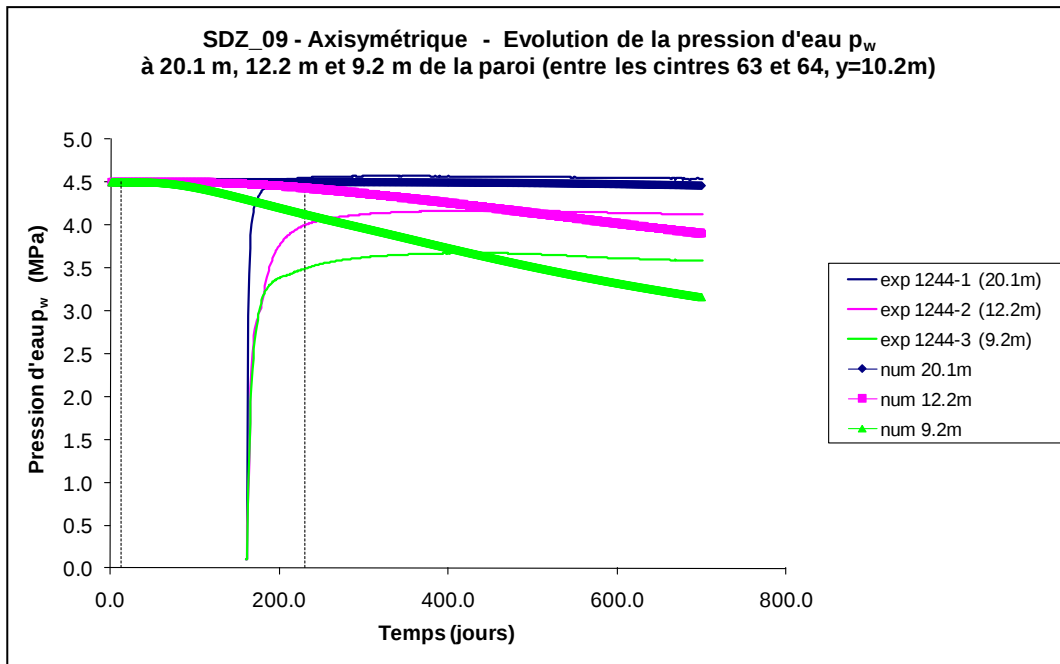


Figure 104 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 20,1 m, 12,2 m et 9,2 m de la paroi, cas 3, axisymétrique écoulement pur.

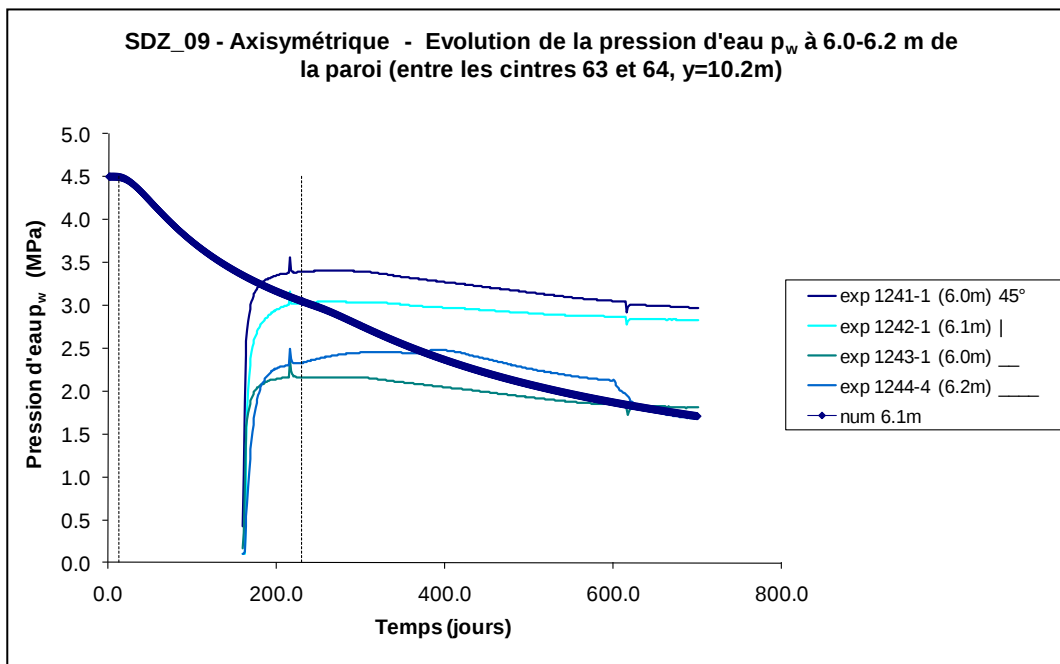


Figure 105 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 6,1 m de la paroi, cas 3, axisymétrique écoulement pur.

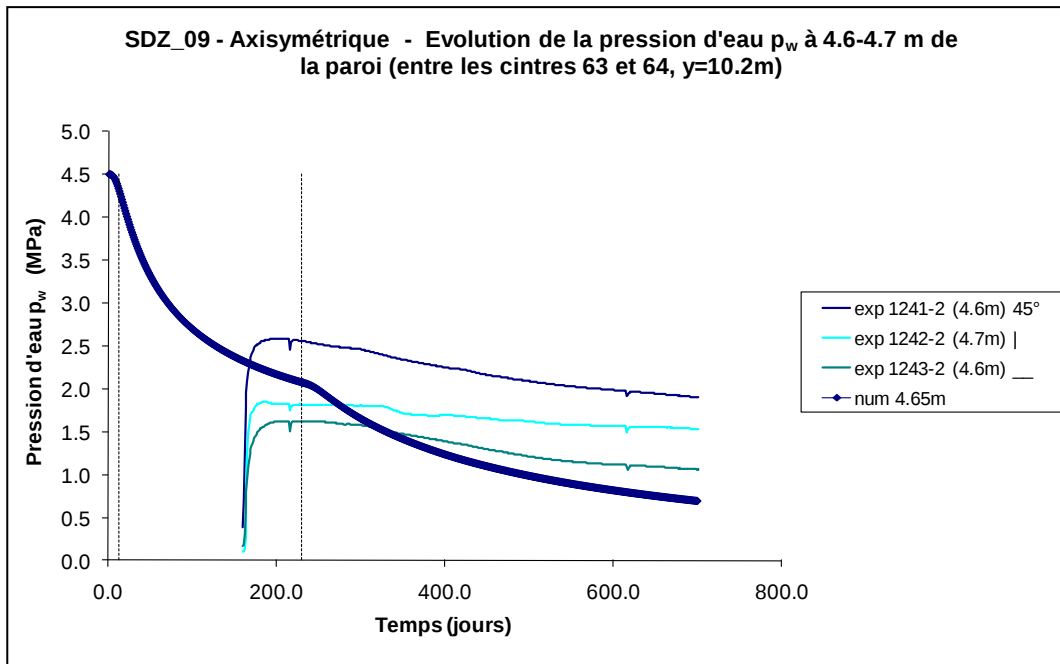


Figure 106 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 4,65 m de la paroi, cas 3, axisymétrique écoulement pur.

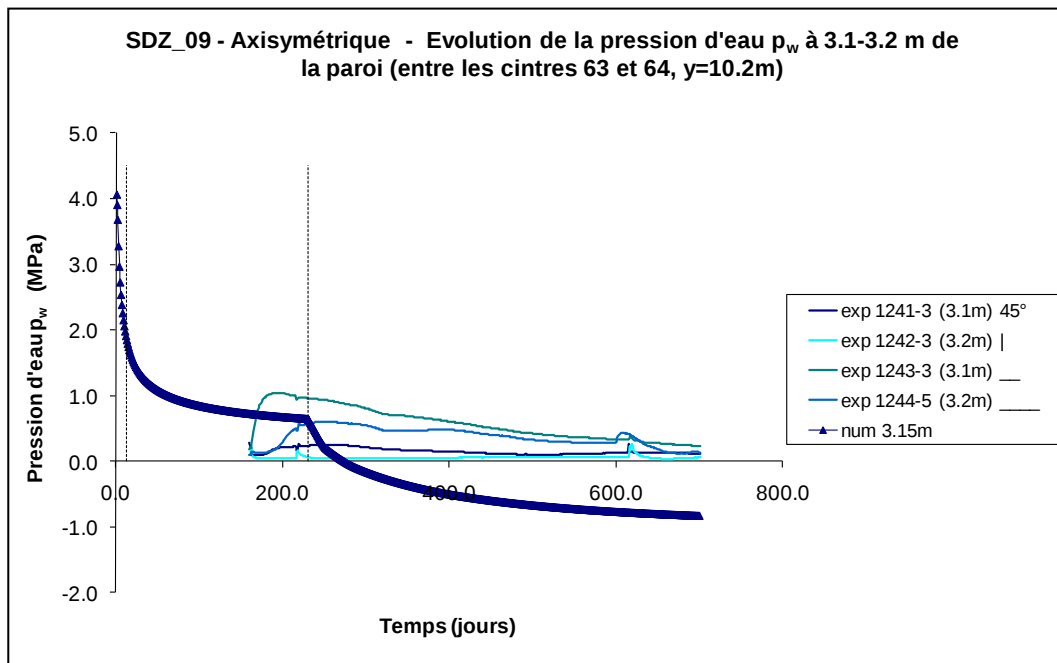


Figure 107 : Evolution de la pression d'eau radialement en zone non étanche à 3,15 m de la paroi, cas 3, axisymétrique écoulement pur.

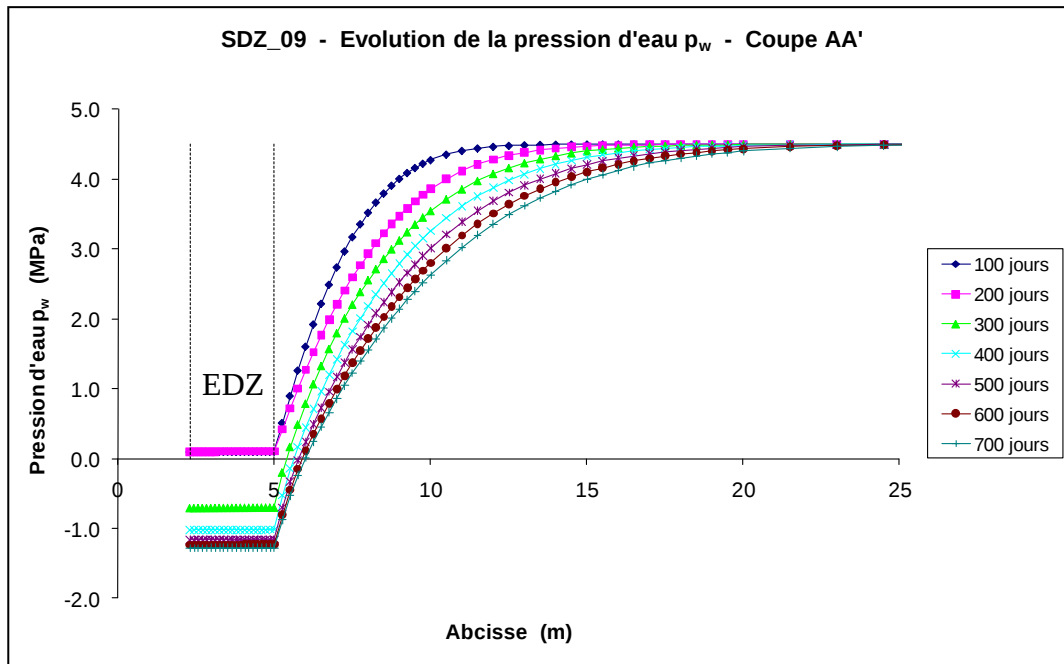


Figure 108 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe radiale AA', cas 3, axisymétrique écoulement pur.

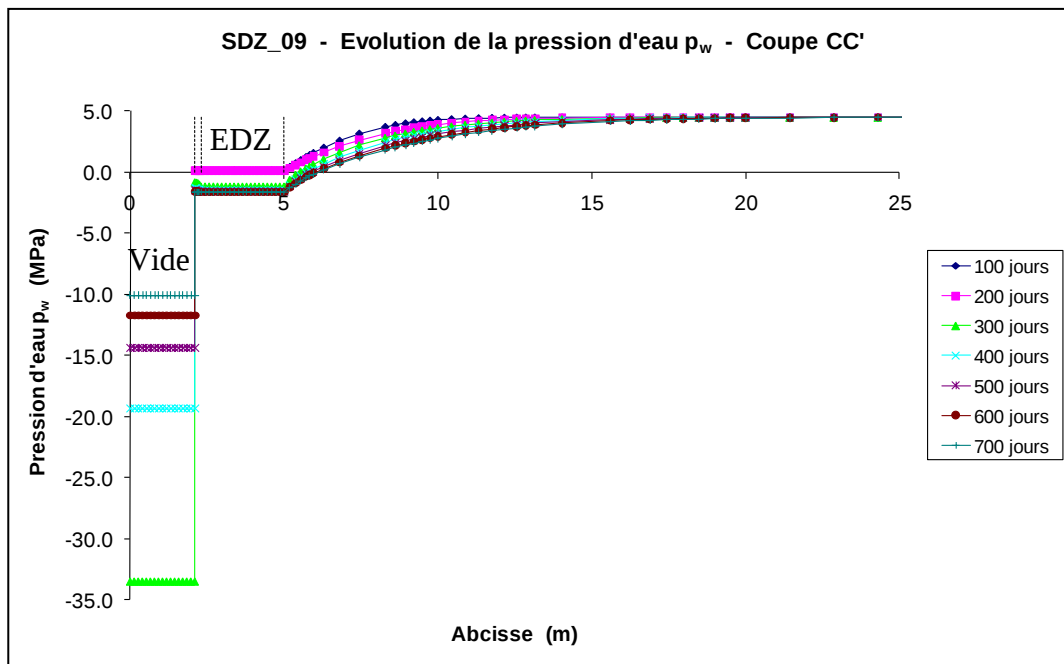


Figure 109 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe radiale CC', cas 3, axisymétrique écoulement pur.

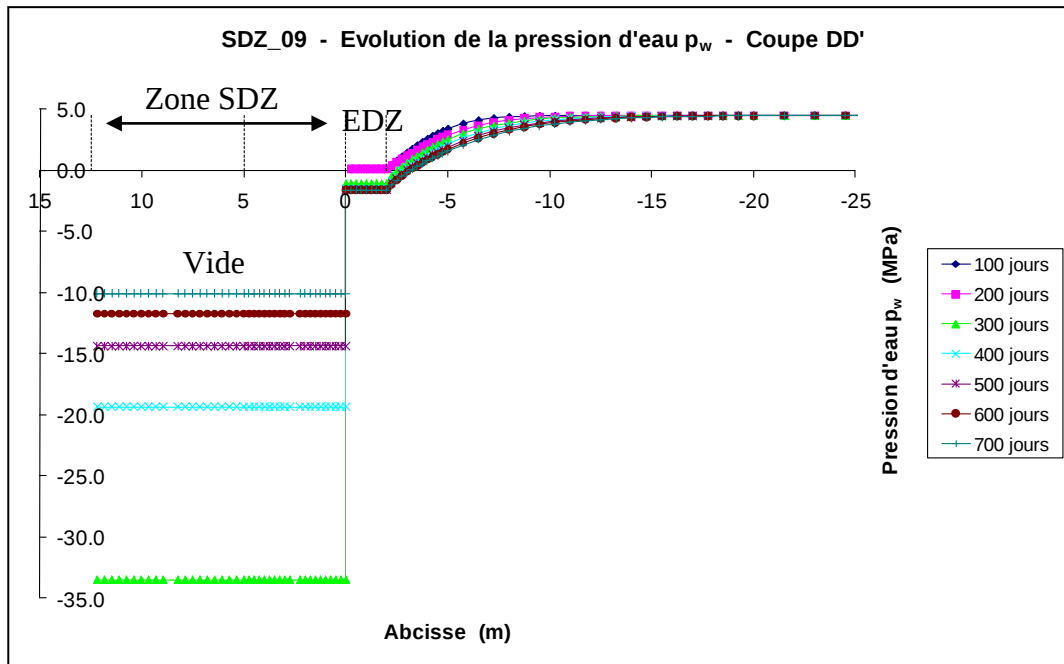


Figure 110 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale DD', cas 3, axisymétrique écoulement pur.

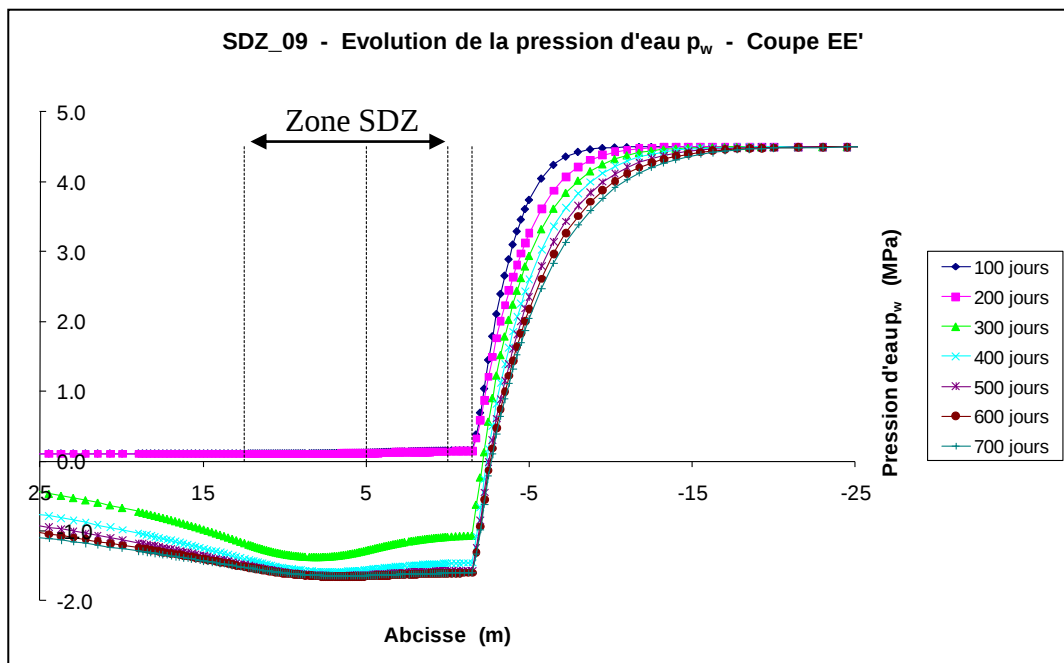


Figure 111 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale EE', cas 3, axisymétrique écoulement pur.

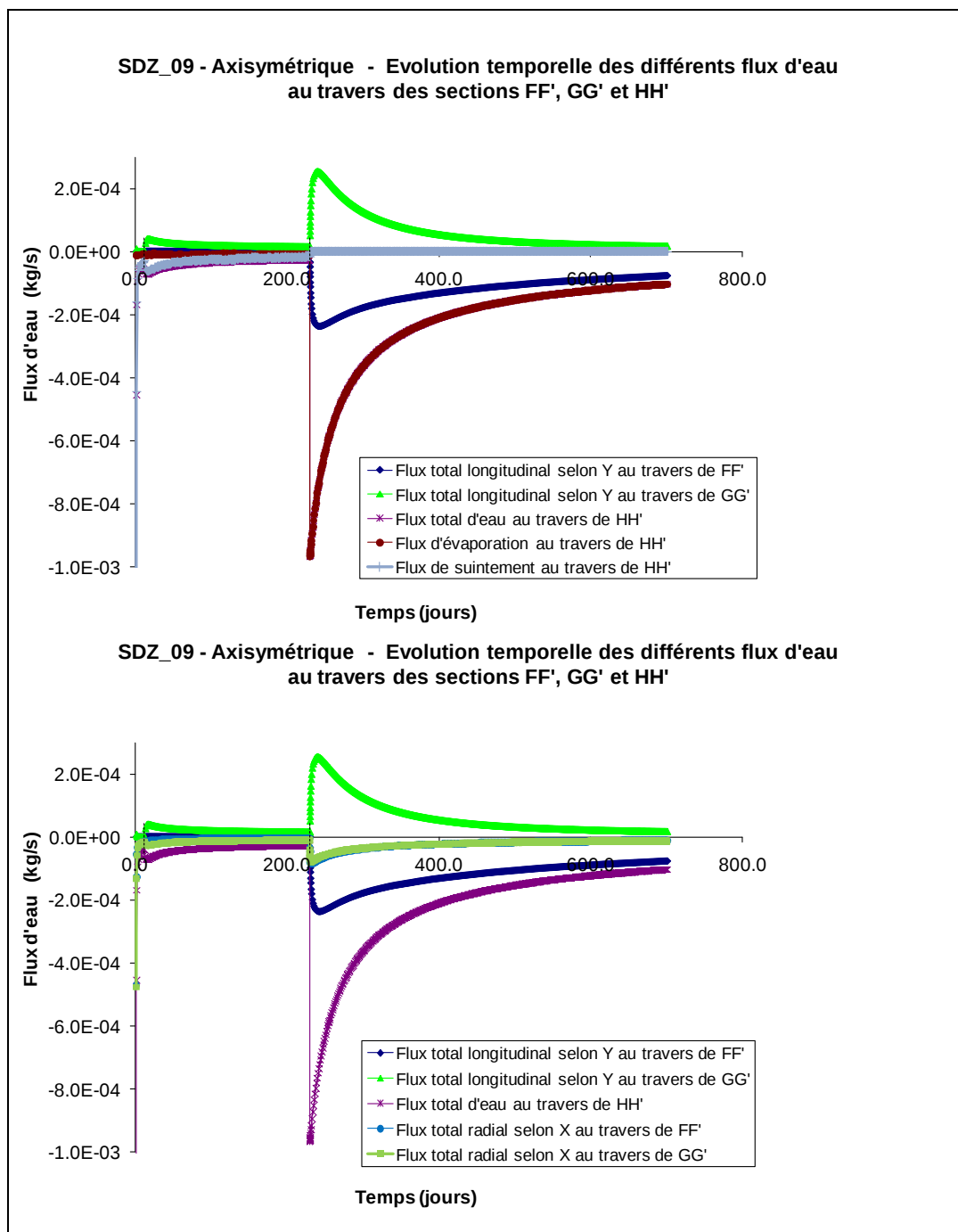


Figure 112 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', cas 3, axisymétrique écoulement pur.

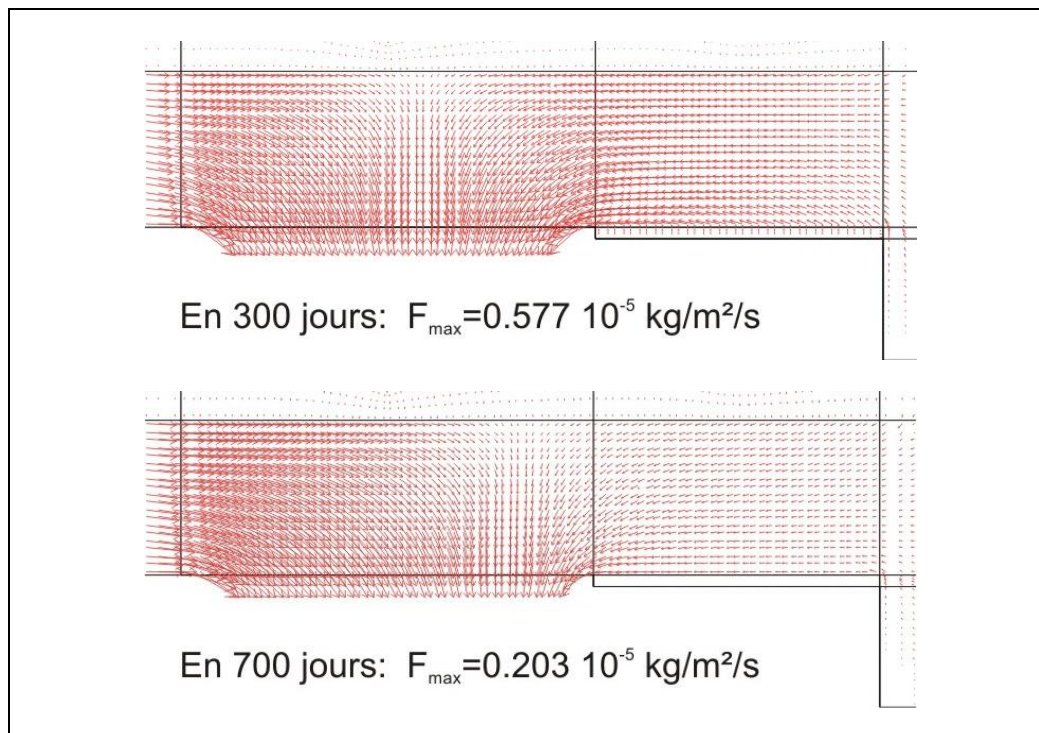


Figure 113 : Evolution des flux d'eau de Darcy au niveau de la zone SDZ, cas 3, axisymétrique écoulement pur.

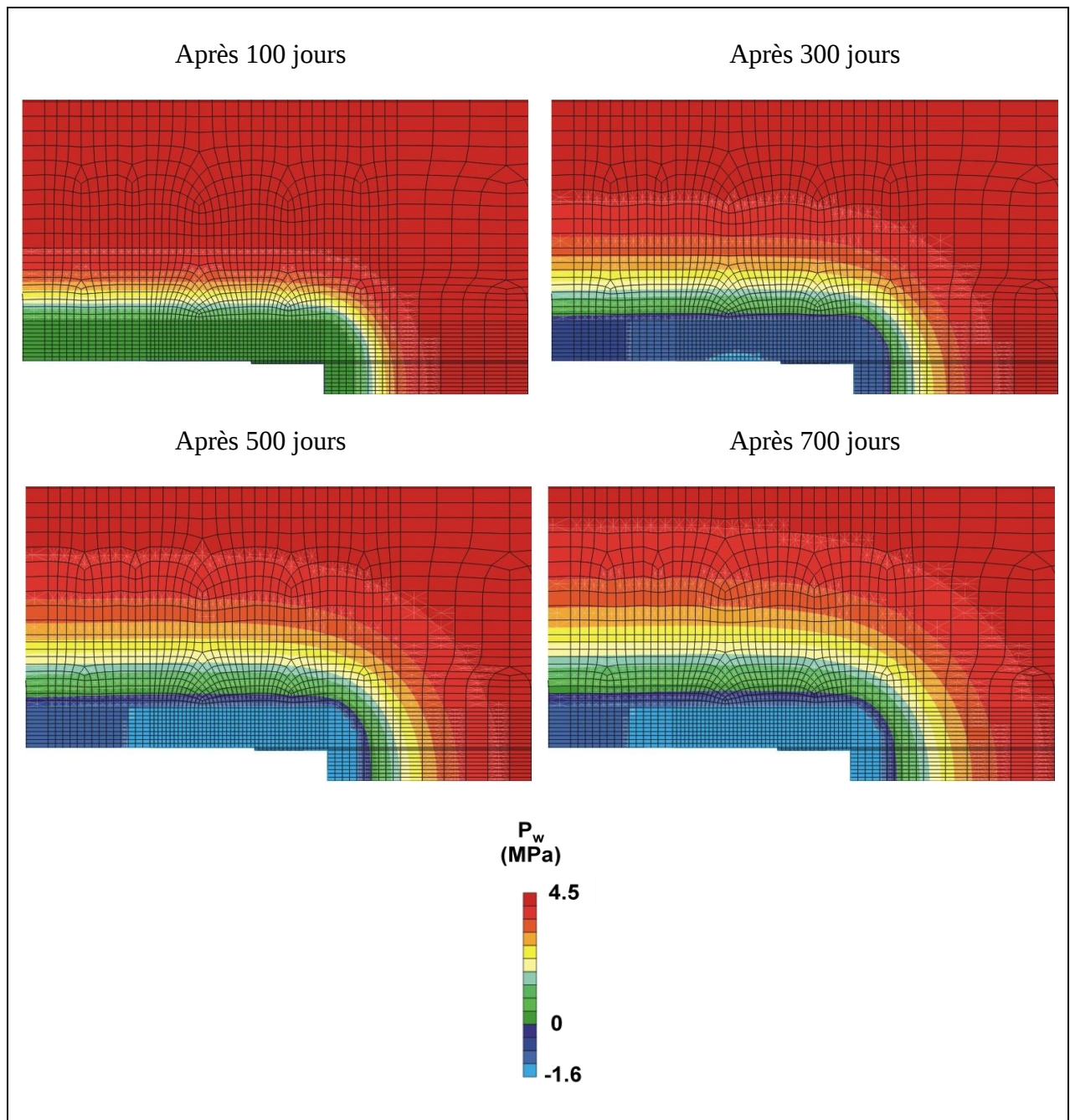


Figure 114 : Evolution de la pression d'eau au niveau de la zone SDZ, cas 3, axisymétrique écoulement pur.

Comparaisons :

Pour les trois cas envisagés :

- la **Figure 115** présente la comparaison de la pression d'eau après 700 jours : plus α_{sdz} est important, plus on désature l'EDZ (diminution de la pression d'eau),
- la **Figure 116** présente la comparaison des flux axiaux le long des sections FF' et GG' : plus α_{sdz} est important, plus les flux vers la zone SDZ sont importants,
- la **Figure 117** présente la comparaison des flux radiaux le long des sections FF', GG' et HH' : plus α_{sdz} est important, plus les flux vers la zone SDZ sont importants,
- la **Figure 118** présente la comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale et numériques dans la zone SDZ (vide) : plus α_{sdz} est important, plus l'humidité relative numérique est importante, le cas 3 correspond relativement bien à l'humidité mesurée à court terme après la fermeture du sas, à long terme c'est le cas 1 (α_{sdz} faible) qui correspond le mieux.

Sur cette dernière figure sont également représentés les résultats du cas 1 avec la pression imposée soit par reproduction des mesures en zone SDZ avant fermeture du sas (**Figure 71**), soit à partir des mesures en galerie GED (**Figure 73**). Les flux dans la zone EDZ obtenus pour cette dernière imposition de la pression d'eau sont détaillés à la **Figure 119** et sont à comparer avec la **Figure 88**. On constate un faible écart à long terme entre les résultats numériques.

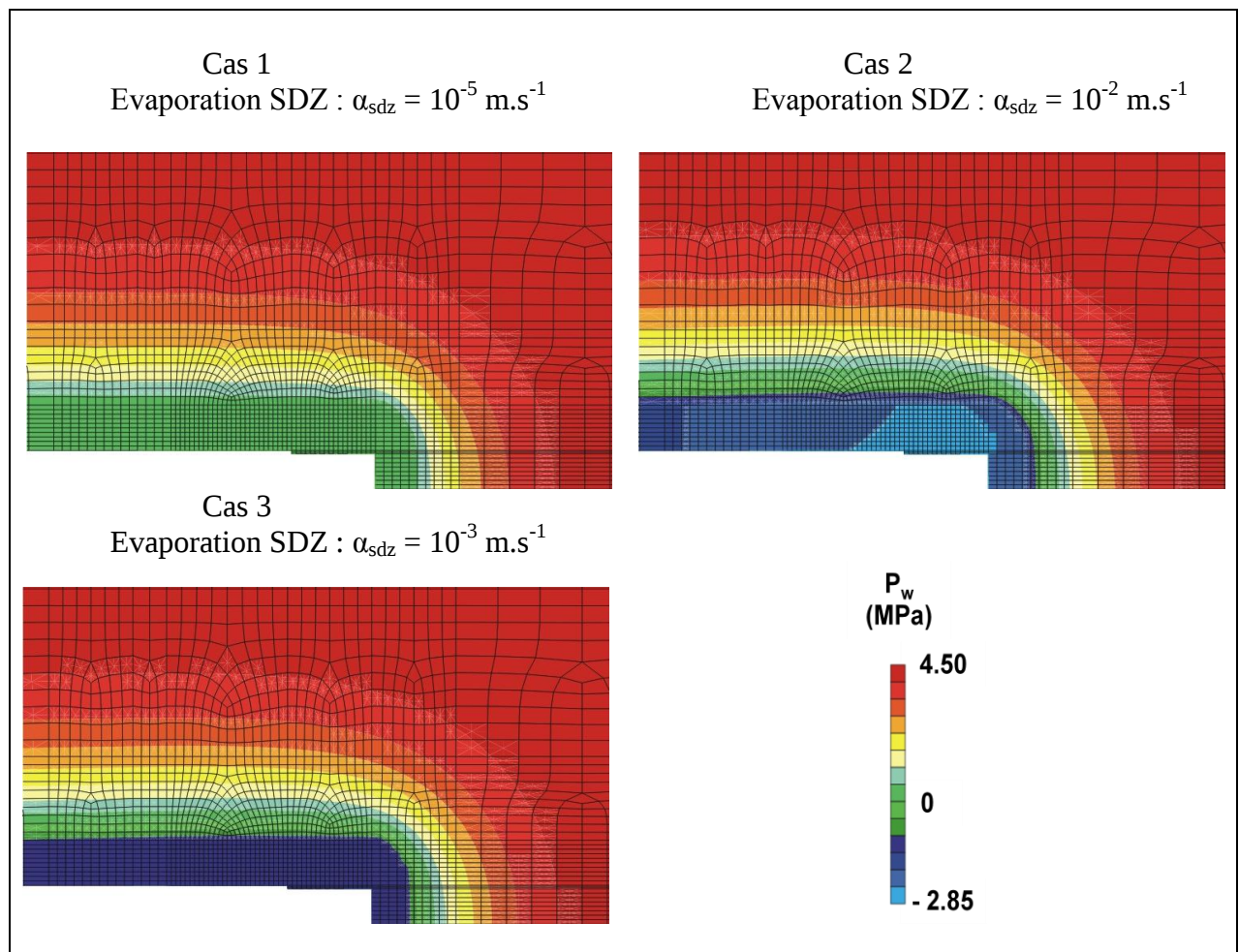


Figure 115 : Comparaison de la pression d'eau après 700 jours au niveau de la zone SDZ, cas 1-2-3, axisymétrique écoulement pur.

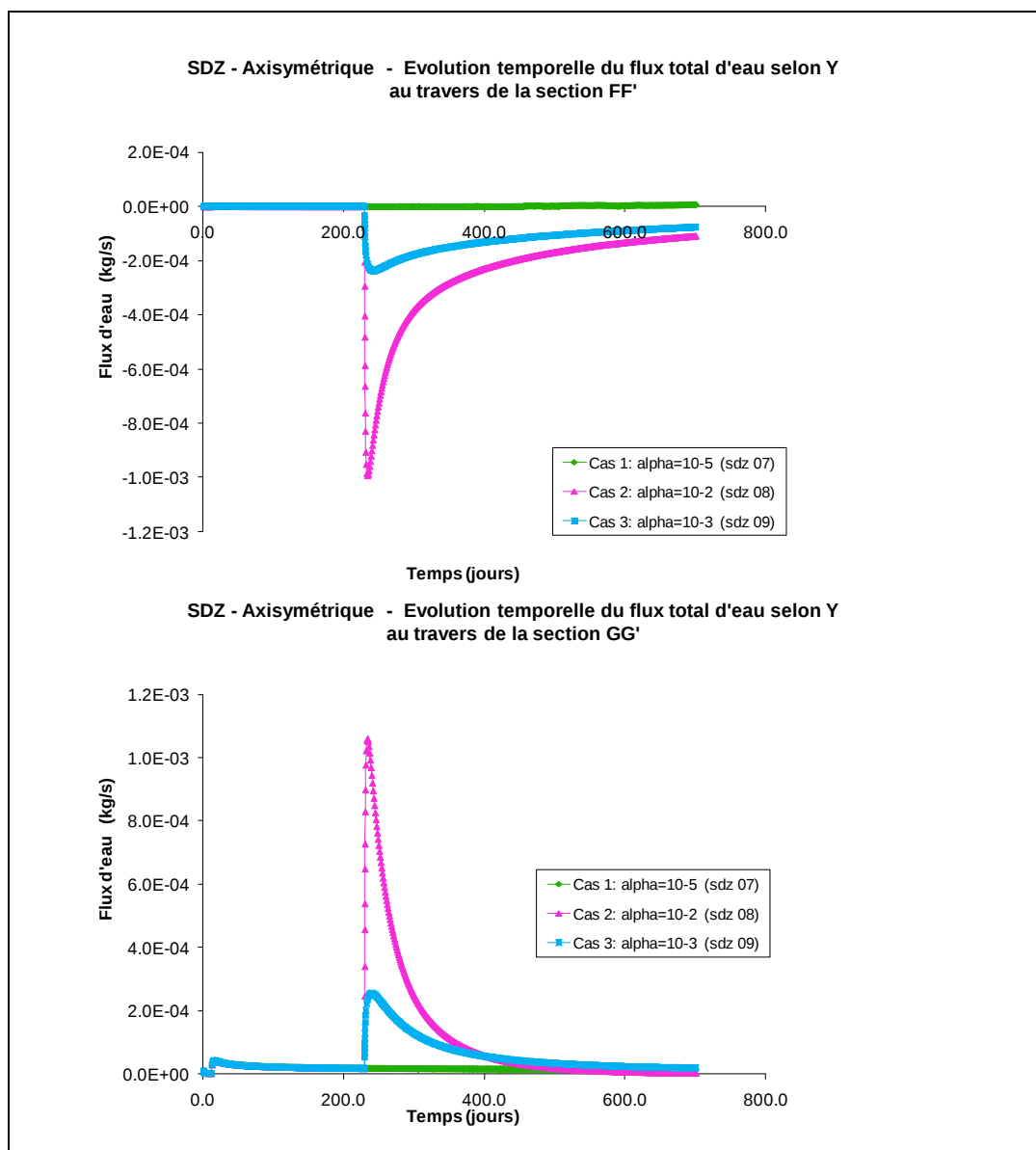


Figure 116 : Comparaison des flux axiaux le long des sections FF' et GG', cas 1-2-3, axisymétrique écoulement pur.

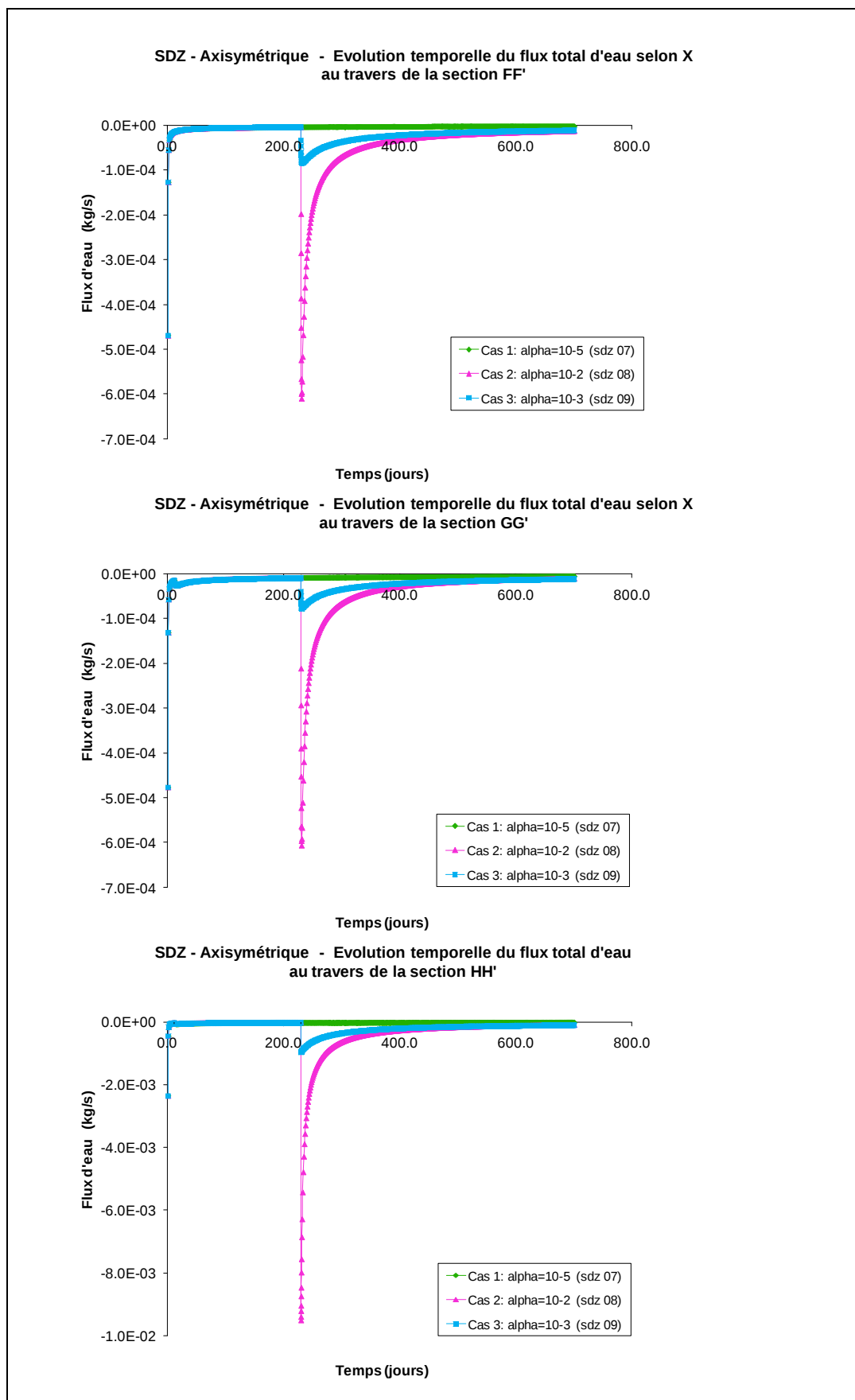


Figure 117 : Comparaison des flux radiaux le long des sections FF', GG' et HH', cas 1-2-3, axisymétrique écoulement pur.

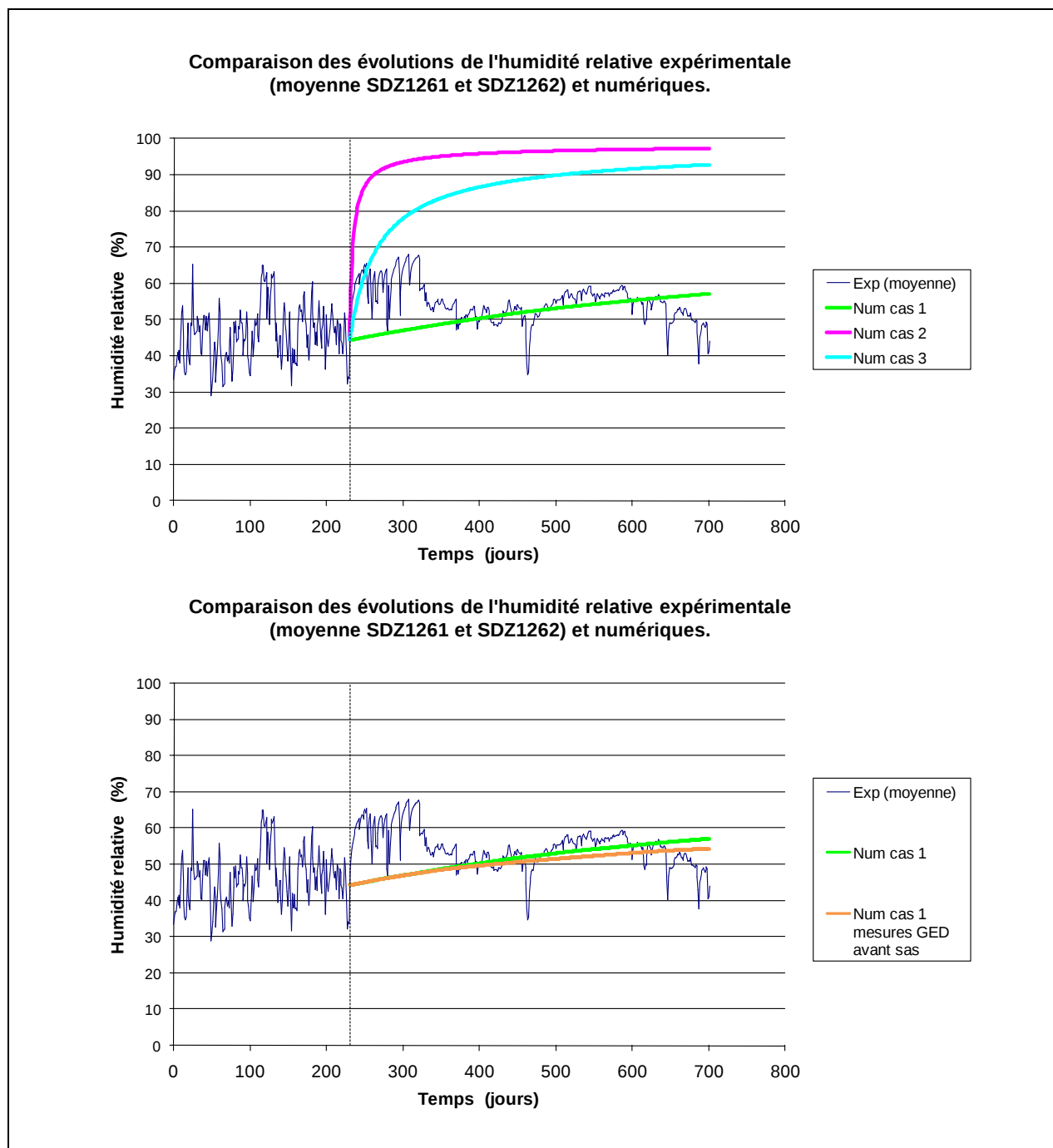


Figure 118 : Comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale et numériques dans la zone SDZ (vide), cas 1-2-3, axisymétrique écoulement pur.

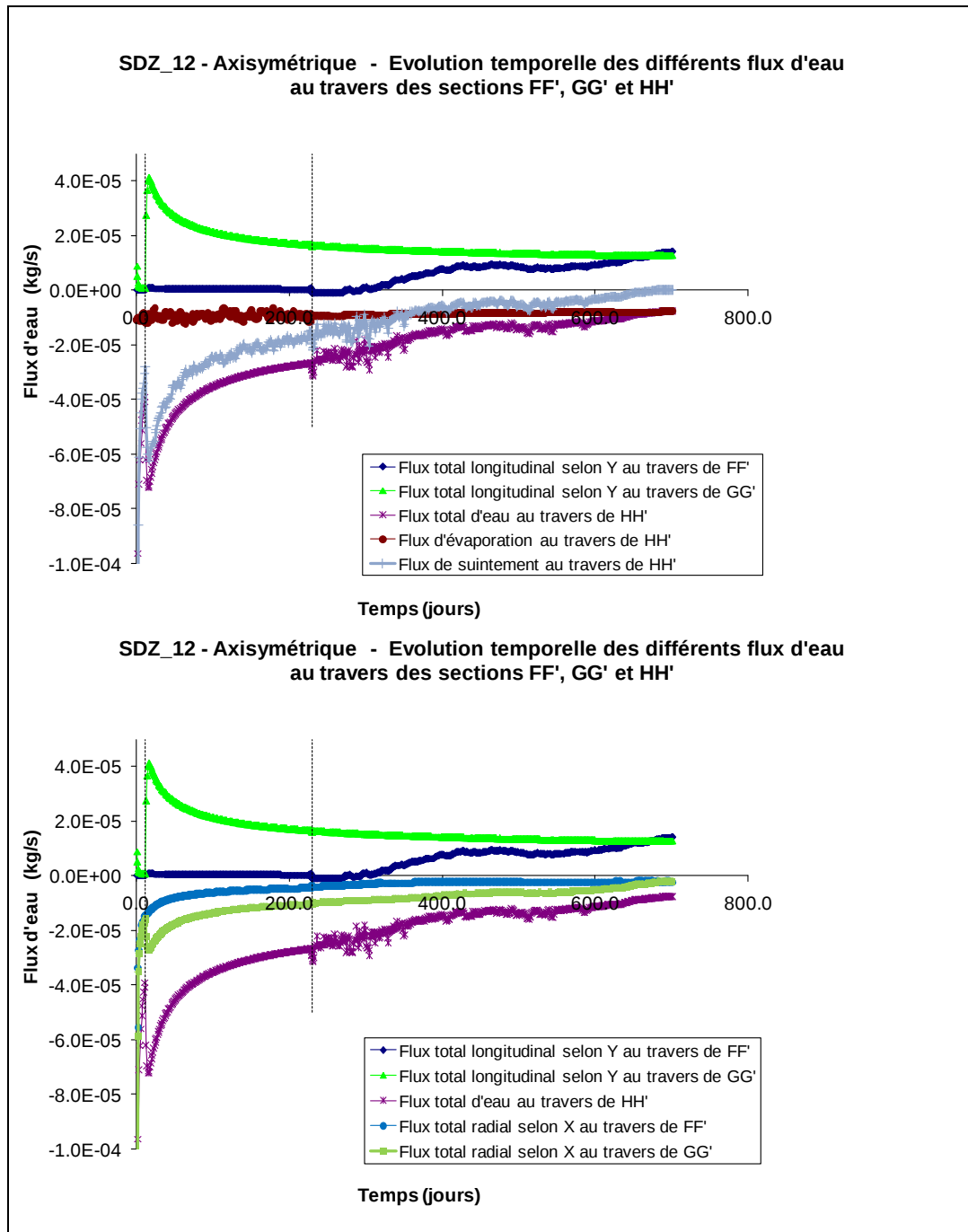


Figure 119 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', cas 1, axisymétrique écoulement pur, imposition de la pression d'eau mesurée en galerie GED.

6.3.7 Résultats numériques – Influence du revêtement en galerie GED

Les résultats numériques présentés au paragraphe 6.3.6 ont été obtenus à partir d'un modèle ne comportant pas de béton en paroi de la galerie GED, or du béton projeté de 20 cm d'épaisseur y est présent. Afin de déterminer l'influence de ce revêtement sur les résultats obtenus, deux cas sont envisagés : tout d'abord la galerie GED est rendue totalement étanche, ensuite un modèle avec du béton en paroi est développé.

Afin de rendre la galerie GED étanche, les éléments d'échange d'eau et de vapeur situés sur la paroi de la galerie GED en amont du sas ont été supprimés du modèle. De cette manière, le drainage est également bloqué, ce qui correspond à une imposition relativement forte. Dans le modèle avec un revêtement en béton, un béton de 20 cm d'épaisseur a été rajouté depuis le début de la simulation entre les éléments d'échange et la paroi de la zone EDZ. Les propriétés de ce béton sont identiques à celles du béton en zone SDZ revêtue située en bout de galerie. Les propriétés qui sont fixées sont les mêmes que celles détaillées au début du paragraphe 6.3.6. Pour rappel :

- le coefficient de pénalisation pour le suintement, $K = 10^{-10} \text{ s}^3.\text{kg}^{-1}$
- le coefficient de transfert de masse pour l'évaporation en galerie GED, $\alpha_{\text{ged}} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, pas utilisé lorsque la galerie GED est rendue totalement étanche.
- la perméabilité de l'argilite saine, $k_{\text{iso argilite}} = 4 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ (isotrope en axisymétrique)
- la perméabilité de l'argilite EDZ, $k_{\text{iso EDZ}} = 4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ (isotrope en axisymétrique)
- la perméabilité du béton, $k_{\text{iso béton}} = 1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$

Les résultats seront comparés selon trois aspects : les flux d'eau dans l'EDZ au niveau de la zone SDZ, la pression d'eau dans l'EDZ autour de la galerie GED et la pression d'eau dans l'air en zone SDZ.

Dès à présent et pour le reste des résultats numériques exposés ci-après, la pression d'eau est imposée à partir des mesures en galerie GED (*Figure 73*).

Les flux d'eau en EDZ :

Intéressons nous à l'évolution des flux d'eau en zone EDZ pour le cas où la galerie GED est étanche. Différentes valeurs du coefficient de transfert de masse pour l'évaporation α_{sdz} ont été envisagées.

Pour une valeur importante, $\alpha_{\text{sdz}}=10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$, il n'y a pas de différence avec les résultats de la *Figure 112* obtenus sans étanchéification de la galerie GED. Isoler la galerie GED n'a donc pas d'influence sur les flux d'échange. Pour cette valeur de α_{sdz} le suintement est nul après la fermeture du sas entre la zone EDZ et la cavité SDZ (pression en paroi négative), les échanges en terme d'évaporation dominant.

Pour une valeur faible, $\alpha_{\text{sdz}}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, il y a une variation importante dans les courbes de flux, les flux sont plus importants et toujours dirigés vers la cavité (valeur négative). Les résultats de la *Figure 120* sont à comparer avec ceux de la *Figure 119* obtenus sans étanchéification de GED.

Isoler la galerie GED a donc une influence sur les flux d'échange. Pour cette valeur de α_{sdz} l'évaporation est quasi nulle entre la zone EDZ et la cavité SDZ, les échanges en terme de suintement dominant. Les flux d'eau de Darcy sont représentés à la **Figure 121**.

Les flux pour le cas avec un revêtement en béton en galerie GED de perméabilité intrinsèque 10^{-18} m^2 sont similaires à ceux de la **Figure 119** sans revêtement et sont détaillés à la **Figure 122**. Une légère différence est remarquée juste après la fermeture du sas.

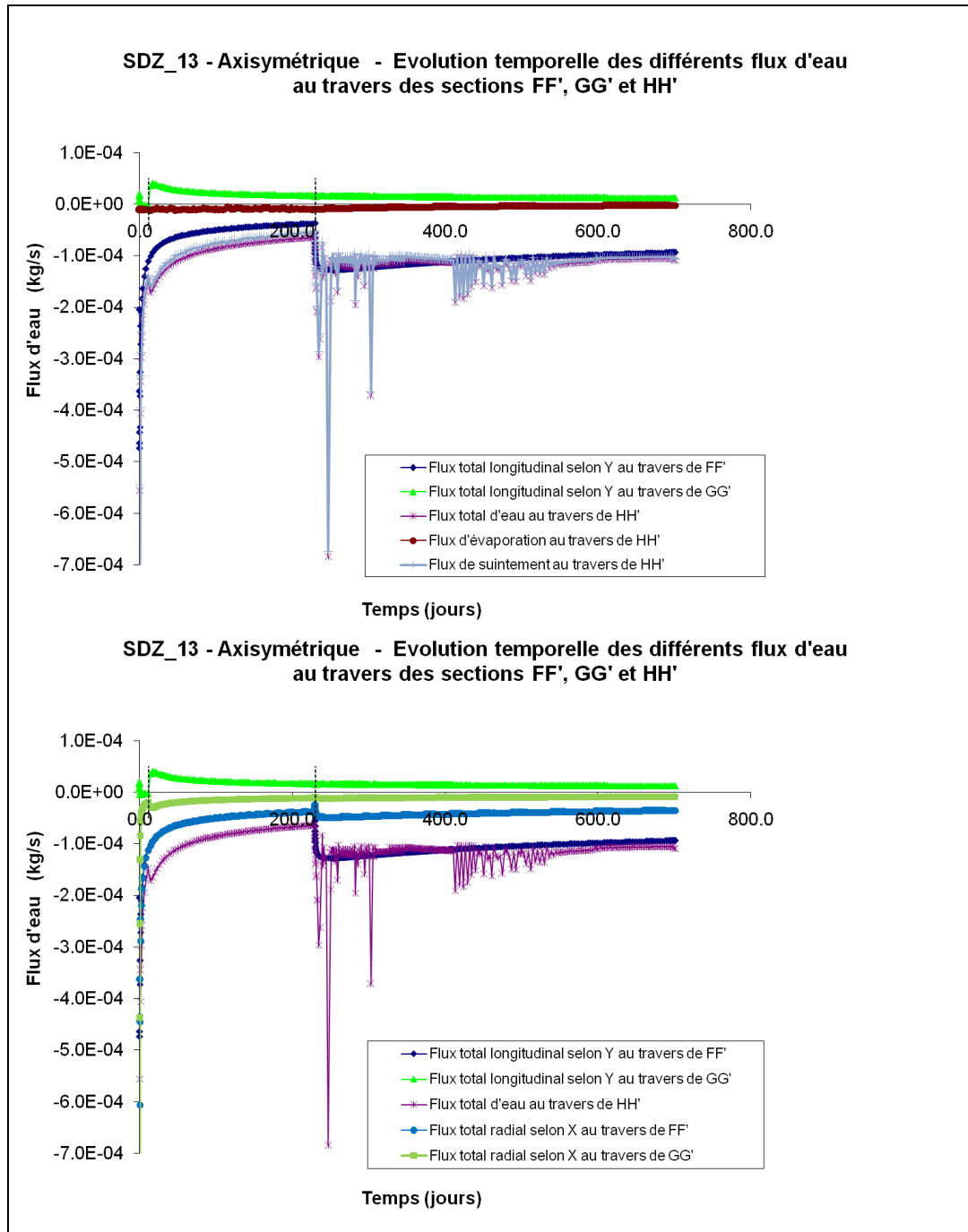


Figure 120 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED étanche, axisymétrique écoulement pur.

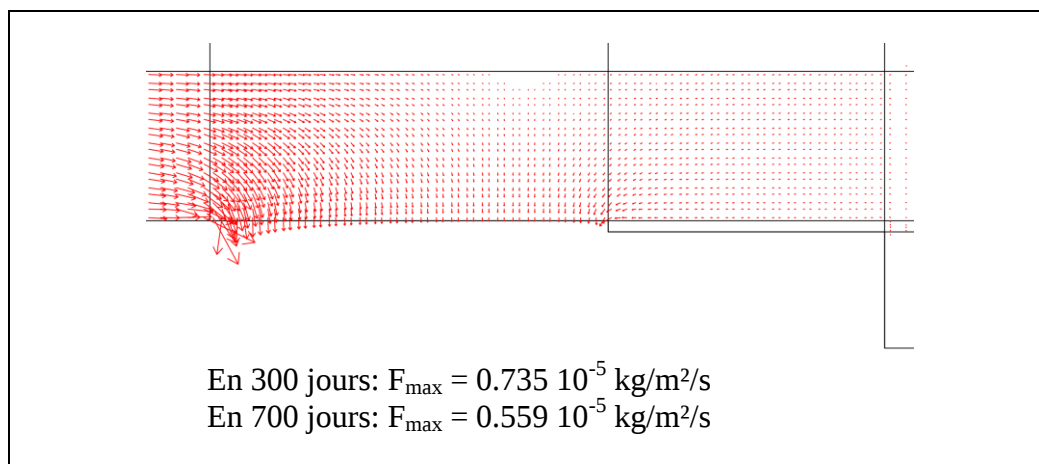


Figure 121 : Evolution des flux d'eau de Darcy au niveau de la zone SDZ, $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED étanche, axisymétrique écoulement pur.

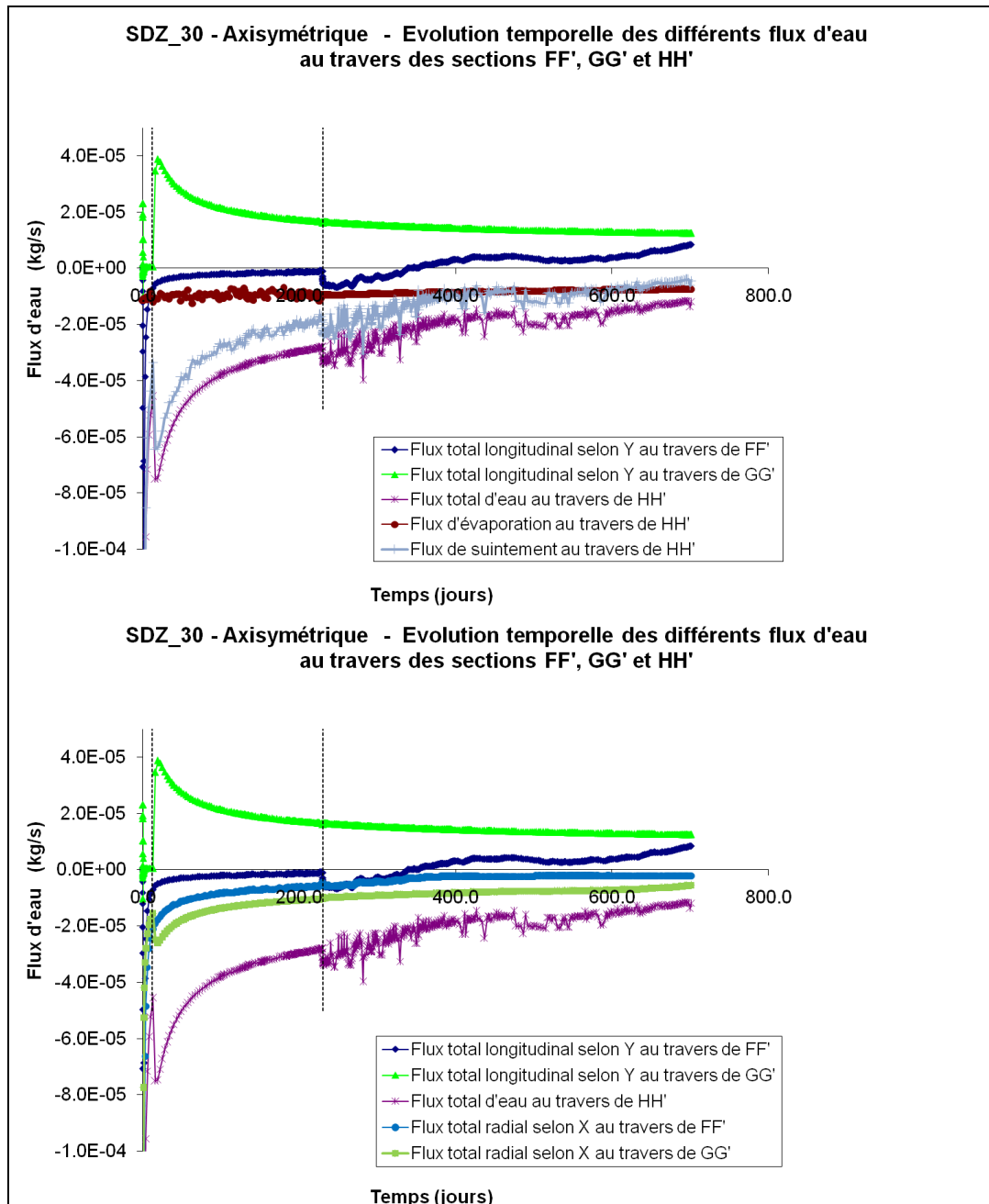


Figure 122 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED avec revêtement en béton de perméabilité intrinsèque 10^{-18} m^2 , axisymétrique écoulement pur.

Les profils de pression d'eau en EDZ autour de la galerie GED :

Nous allons analyser les profils de pression d'eau dans la zone EDZ, autour de la galerie GED, afin d'analyser l'influence du revêtement. La perméabilité intrinsèque du béton de revêtement étant plus faible que celle de l'argilite en EDZ, le béton sera « isolant » hydrauliquement. Les résultats sont obtenus le long de la coupe EE' (Figure 74) pour $\alpha_{sdz} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ et sont présentés aux Figure 123, Figure 124, Figure 125 et Figure 126.

Nous envisageons 4 cas pour le revêtement en galerie GED : sans béton, avec un béton de perméabilité intrinsèque de 10^{-18} m^2 , avec un béton de perméabilité intrinsèque de 10^{-19} m^2 et totalement isolé.

On observe :

- Sans béton : On observe une désaturation de l'EDZ au cours du temps. Les gradients sont dirigés de SDZ vers GED.
- Béton $k_{\text{intr}}=10^{-18} \text{ m}^2$: Les profils sont similaires à ceux sans béton mais avec une légère remontée des valeurs. Cette remontée est due au béton qui joue un rôle isolant et le drainage en EDZ autour de GED est moins rapide. Jusqu'à environ 300 jours de simulation, la pression autour de SDZ est légèrement plus faible qu'autour de GED, les gradients sont donc dirigés de GED vers SDZ qui « pompe » légèrement l'eau. A long terme, cette tendance s'inverse à cause de l'augmentation du drainage en GED suite à l'imposition de la pression d'eau en galerie et la fermeture du sas qui bloque la ventilation en zone SDZ.
- Béton $k_{\text{intr}}=10^{-19} \text{ m}^2$: On isole encore plus dès lors on assiste à une remontée encore plus importante des valeurs de pression d'eau. Les gradients sont dirigés vers la zone SDZ jusqu'à environ 600 jours de simulation. Il y a une légère alimentation de SDZ par GED.
- Totalement isolé : La pression d'eau remonte de façon très importante ce qui correspond à une absence de drainage. On observe des gradients importants dirigés de GED vers SDZ, le massif autour de GED alimente donc la zone non revêtue SDZ. Cette observation avait déjà été réalisée au niveau des flux (voir ci-dessus).

Afin de déterminer avec précision quelle valeur de perméabilité intrinsèque utiliser pour le béton nous aurions besoin de mesures expérimentales dans des forages situés en galerie GED.

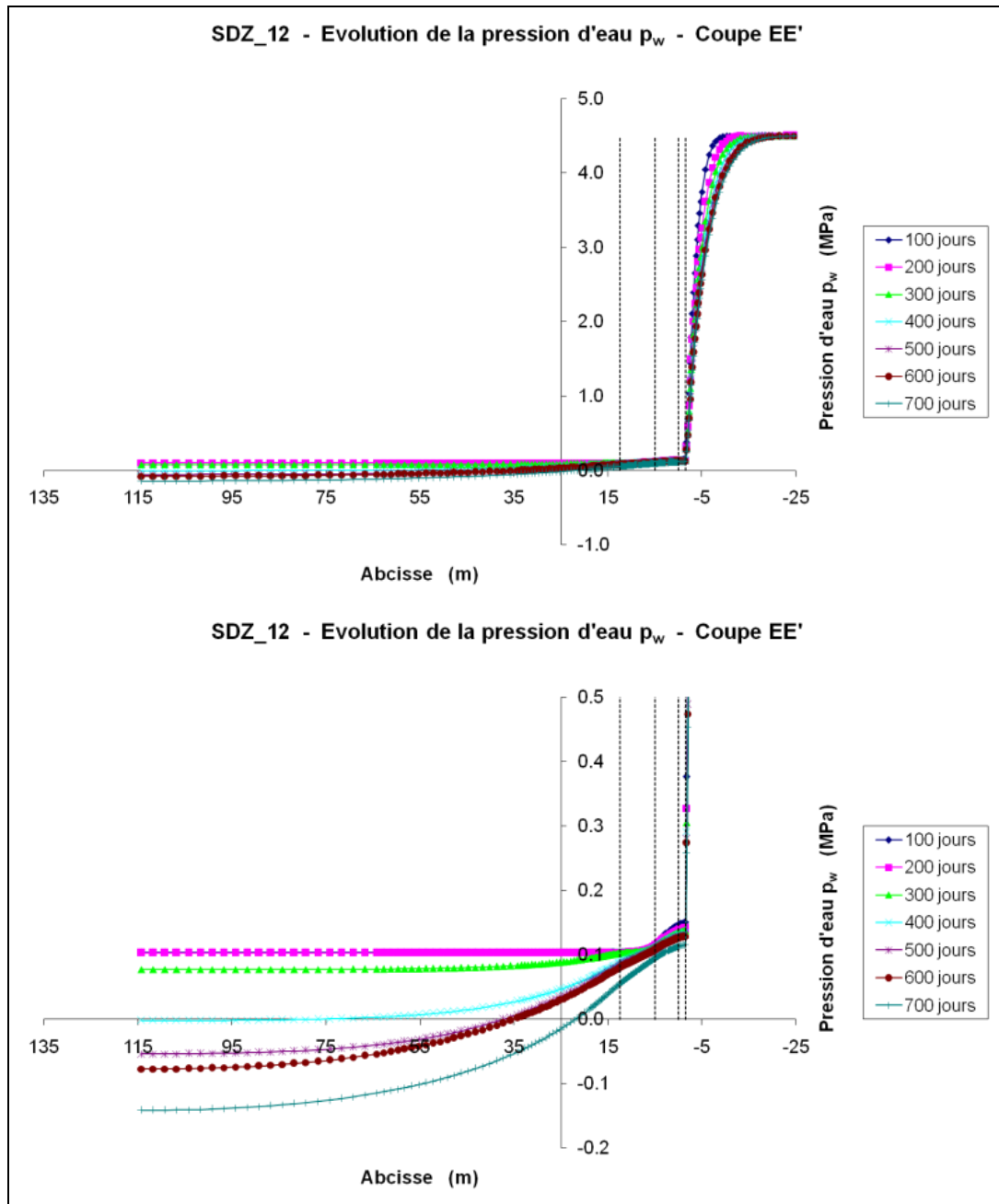


Figure 123 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale EE', $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED sans revêtement, axisymétrique écoulement pur.

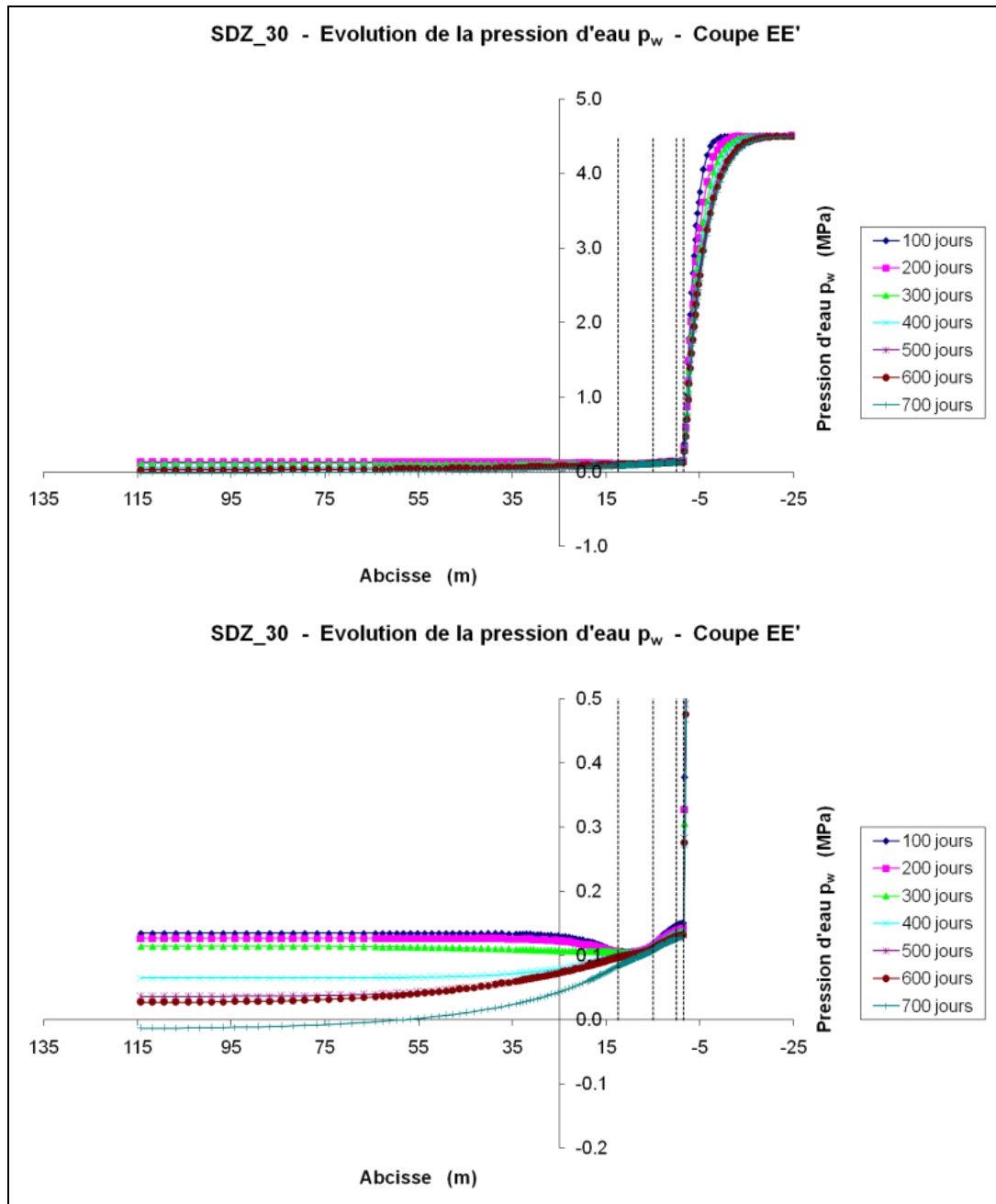


Figure 124 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale EE', $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED avec revêtement en béton de perméabilité intrinsèque 10^{-18} m^2 , axisymétrique écoulement pur.

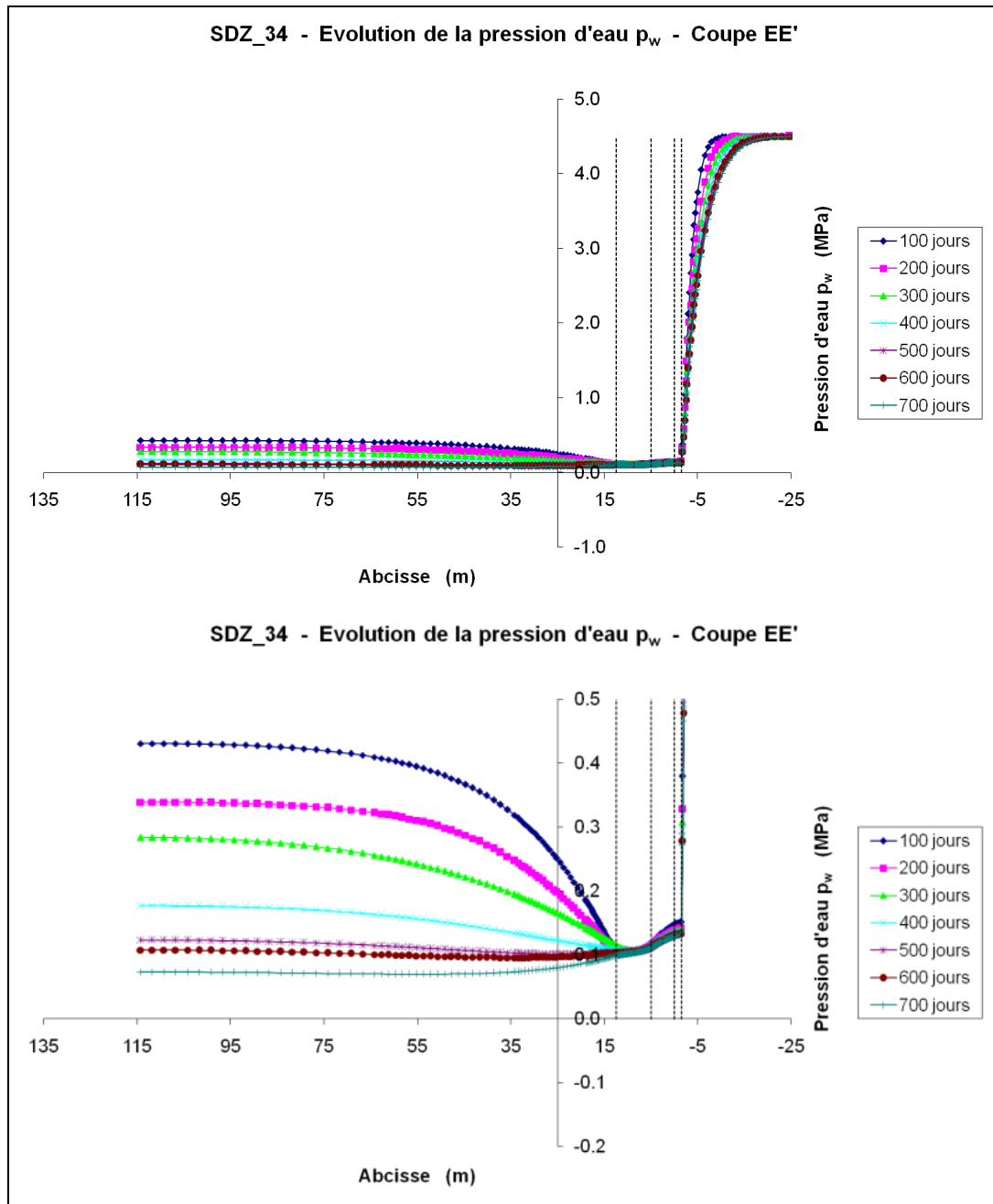


Figure 125 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale EE', $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED avec revêtement en béton de perméabilité intrinsèque 10^{-19} m^2 , axisymétrique écoulement pur.

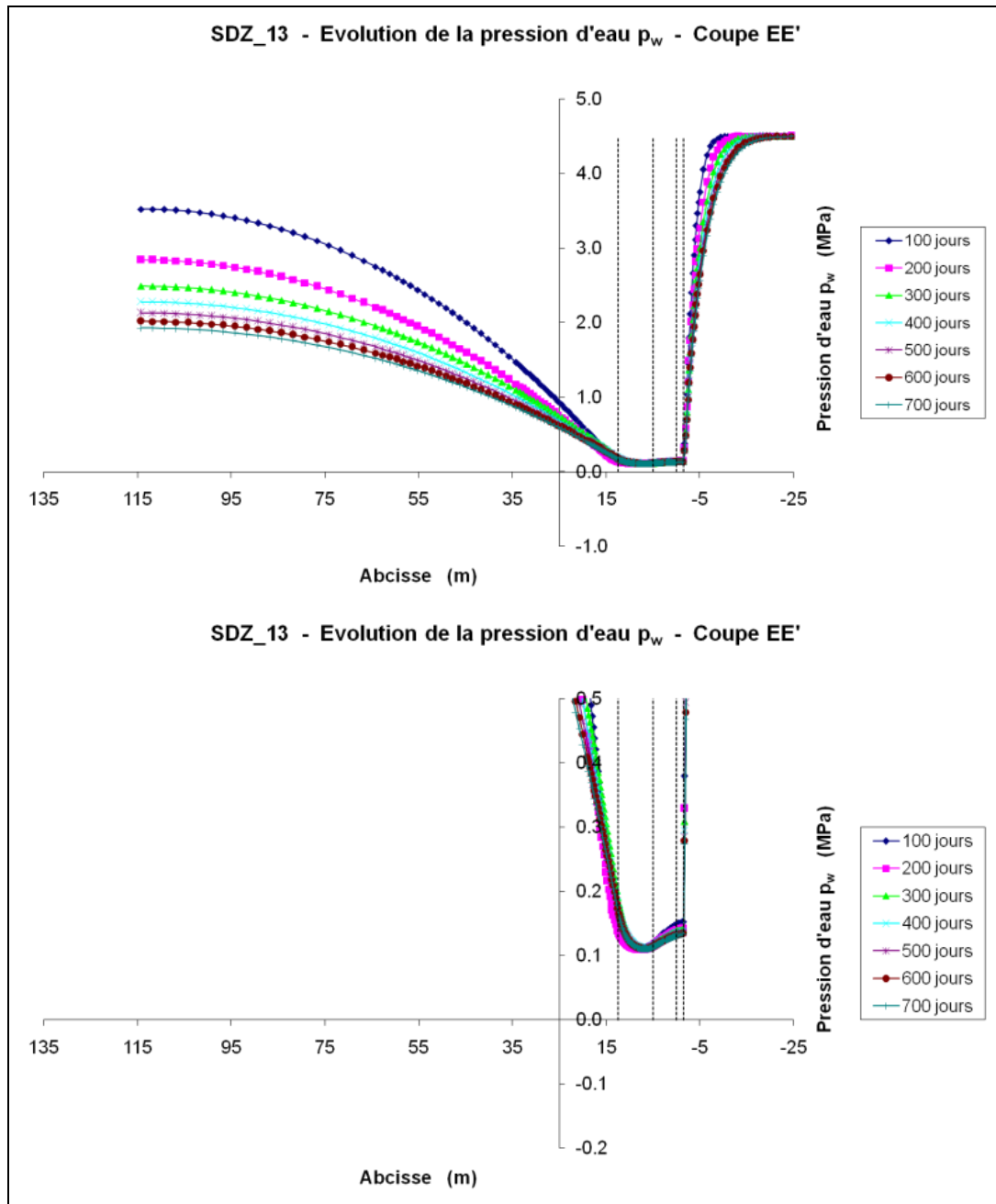


Figure 126 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale EE', $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED étanche, axisymétrique écoulement pur.

6.3.8 Résultats numériques – Humidité relative dans le vide

L'objectif est d'observer, dans le vide en zone SDZ, la remontée des courbes d'humidité relative (jusqu'à $H_r=100\%$) après fermeture du sas et de reproduire au mieux les mesures d'humidité relative réalisées dans cette même zone. Nous allons nous intéresser à l'influence de paramètres liés au revêtement et à l'air.

Influence du coefficient de transfert de masse pour l'évaporation en paroi de la zone SDZ non revêtue, α_{sdz} :

Considérons dans un premier temps le cas où les parois de la galerie GED sont étanches, cas pour lequel l'augmentation de l'humidité relative dans le vide devrait être la plus marquée.

On observe à la **Figure 127** l'évolution de l'humidité relative. La seule différence observée par rapport aux courbes de la **Figure 118** où GED n'est pas revêtue concerne $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ avec une augmentation des valeurs de pression. Les courbes $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ et 10^{-4} m.s^{-1} sont identiques et il n'y a donc pas d'influence du passage de 10^{-5} à 10^{-4} m.s^{-1} . Une valeur de 10^{-5} m.s^{-1} est conservée.

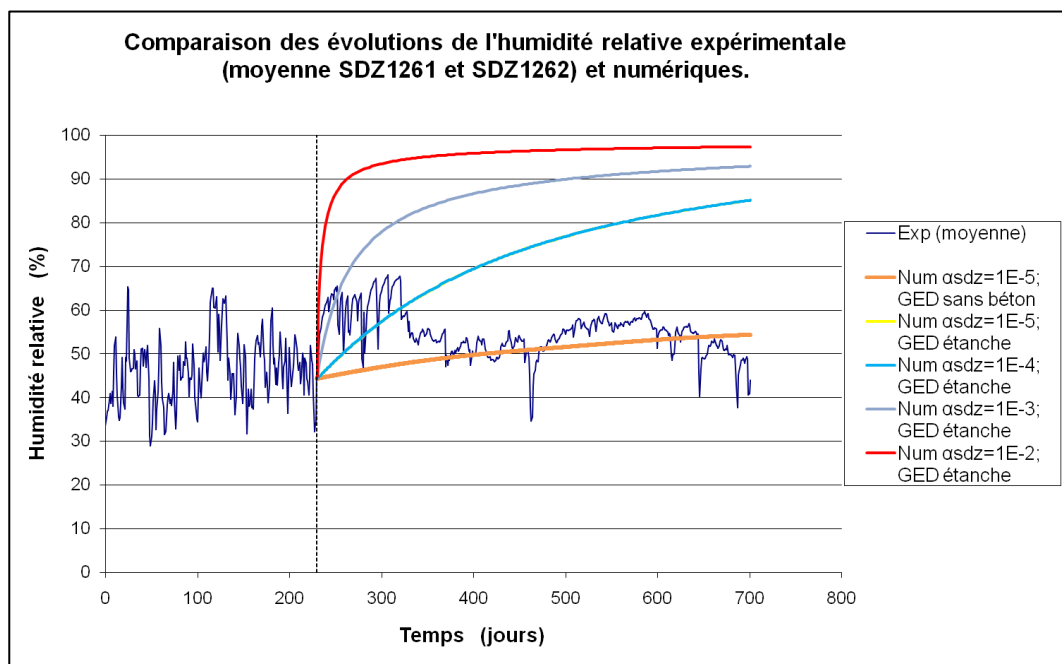


Figure 127 : Comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale et numériques dans la zone SDZ (vide) en fonction de α_{sdz} , galerie GED étanche, axisymétrique écoulement pur.

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

Nous nous intéressons ici à un autre paramètre : la courbe de rétention du vide de van Genuchten, exprimant la saturation en fonction de la pression capillaire, et plus particulièrement la valeur de la pression d'entrée d'air Pr_{vide} . Les cas précédents ont été réalisés avec $Pr_{vide}=0.05\text{MPa}$. La **Figure 128** détaille l'évolution de la courbe de rétention en fonction de Pr_{vide} .

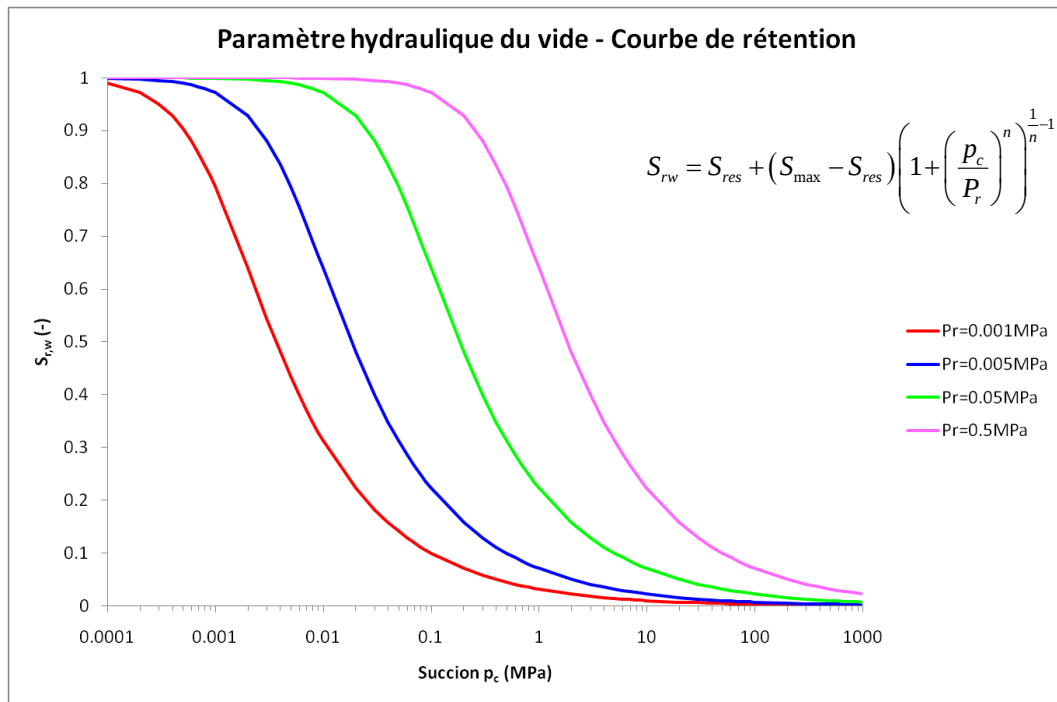


Figure 128 : Evolution de la saturation en eau $S_{r,w}$ avec la pression capillaire p_c (suction) pour le vide, influence de la pression d'entrée d'air Pr .

La **Figure 129** détaille les résultats réalisés en conservant $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, en considérant différentes valeurs de Pr_{vide} et soit sans revêtement en paroi de galerie, soit avec un béton dont la perméabilité intrinsèque est de 10^{-18} m^2 . On y observe une remontée des courbes avec la baisse de Pr_{vide} et l'étanchéification. L'influence du revêtement de la galerie GED est faible en revanche l'influence de Pr_{vide} est plus significative. Utiliser une valeur de 10^{-19} m^2 pour la perméabilité intrinsèque du béton ne modifie pas beaucoup les résultats. On remarque que la meilleure correspondance avec le début de la courbe de pression d'eau après fermeture du sas (pente et courbure) se fait pour $Pr_{vide} = 50 \text{ Pa}$ et avec du béton à $k_{intr} = 10^{-18} \text{ m}^2$.

Une autre possibilité pour coller encore mieux aux mesures expérimentales est d'augmenter la pression d'eau initiale dans le vide avant la fermeture du sas. Dans les calculs précédents $p_{w,vide} = -110 \text{ MPa}$ ($H_r = \text{env.}45\%$ pour $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$). Afin de mieux correspondre à la valeur de H_r mesurée expérimentalement lors de la fermeture du sas on peut prendre $p_{w,vide} = -100 \text{ MPa}$ ($H_r = 47.7 \%$ pour $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$). Dans ce cas là nous obtenons une courbe satisfaisante et nous retiendrons finalement $\alpha_{sdz} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, $Pr_{vide} = 50 \text{ Pa}$, $k_{intr,bet} = 10^{-18} \text{ m}^2$ et $p_{w,vide} = -100 \text{ MPa}$ (**Figure 130**).

Le fait de ne pas modifier le coefficient de transfert de masse pour l'évaporation α permet de ne pas altérer les correspondances de pression d'eau numériques et expérimentales dans le massif observées pour cette valeur.

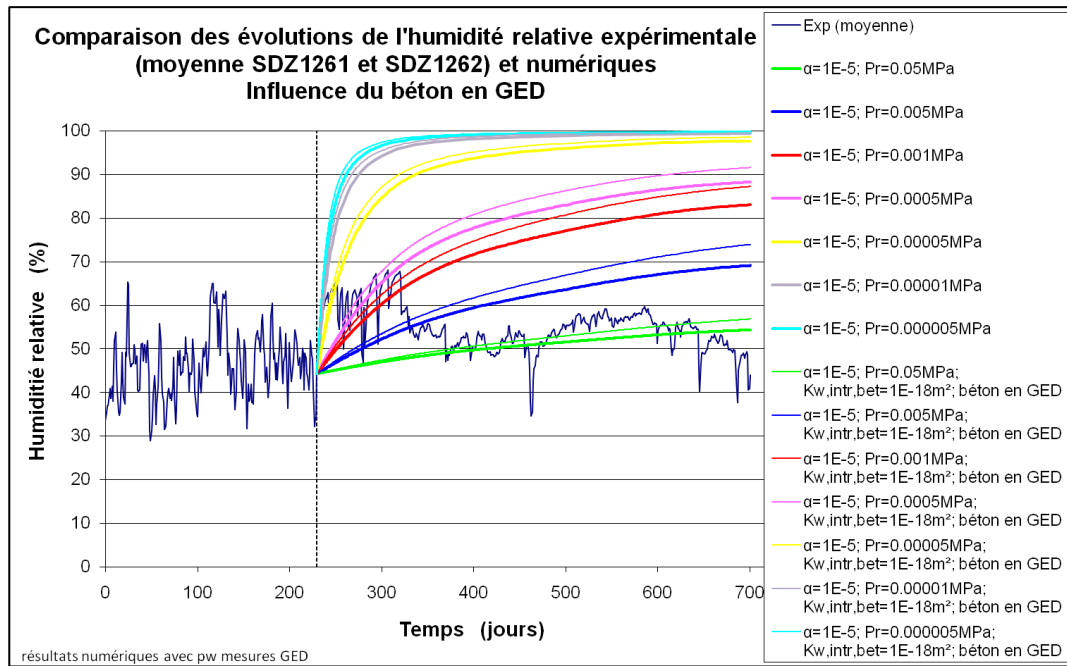


Figure 129 : Comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale et numériques dans la zone SDZ (vide) en fonction de Pr_{vide} et du revêtement, axisymétrique écoulement pur.

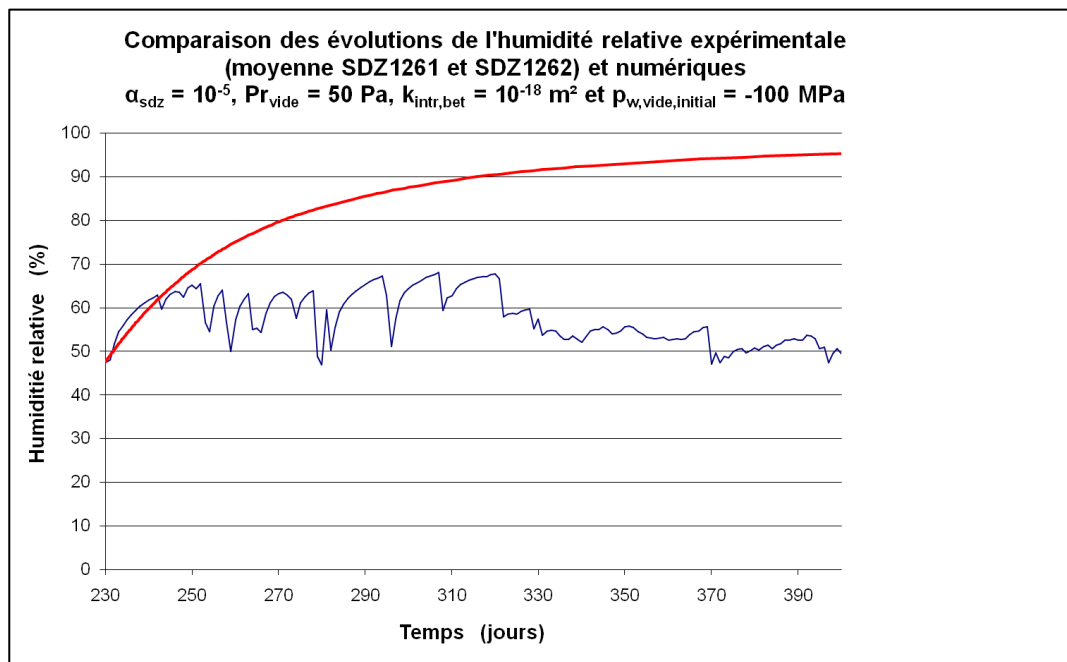


Figure 130 : Comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale et numériques dans la zone SDZ (vide) pour les paramètres retenus, axisymétrique écoulement pur.

Modélisation d'une fuite à travers le sas :

En s'intéressant de plus près aux mesures expérimentales de l'humidité relative dans le vide de la zone SDZ, on constate qu'elles ne remontent pas vers $H_r=100\%$. Différentes ouvertures et fermetures du sas ont été réalisées entre le 02/09/2009 et le 01/12/2009 (230 et 320 jours). Ensuite, la courbe n'observe pas la remontée attendue et fluctue en fonction de l'humidité mesurée en galerie GED (*Figure 131*). Cette influence entre les mesures en galerie GED et en zone SDZ est probablement causée par une fuite au travers du sas.

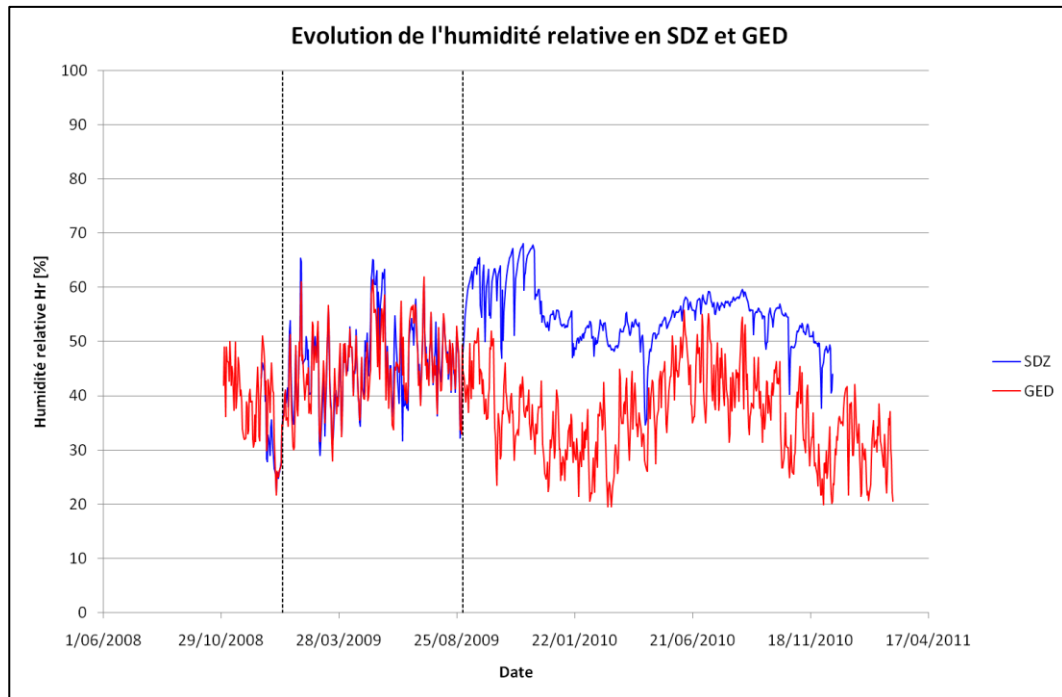


Figure 131 : Comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale en zone SDZ et en galerie GED.

Au vu de la *Figure 130*, une fuite est modélisée à partir de 250 jours de simulation. L'importance de cette fuite peut être modifiée via un paramètre numérique. Les trois cas représentant au mieux les mesures expérimentales sont développés à la *Figure 132*, la courbe au centre représente le mieux l'évolution globale. Pour ce cas, le flux passant à travers la fuite est détaillé à la *Figure 133*. Ce flux est globalement négatif et correspond à une pression d'eau plus faible en galerie GED qu'en zone SDZ, le flux est donc dirigé de la zone SDZ vers la galerie GED. L'intégrale de cette courbe donne le flux total entre 250 et 700 jours qui est de 138.29 litres (moyenne = env. 0.3 l/j).

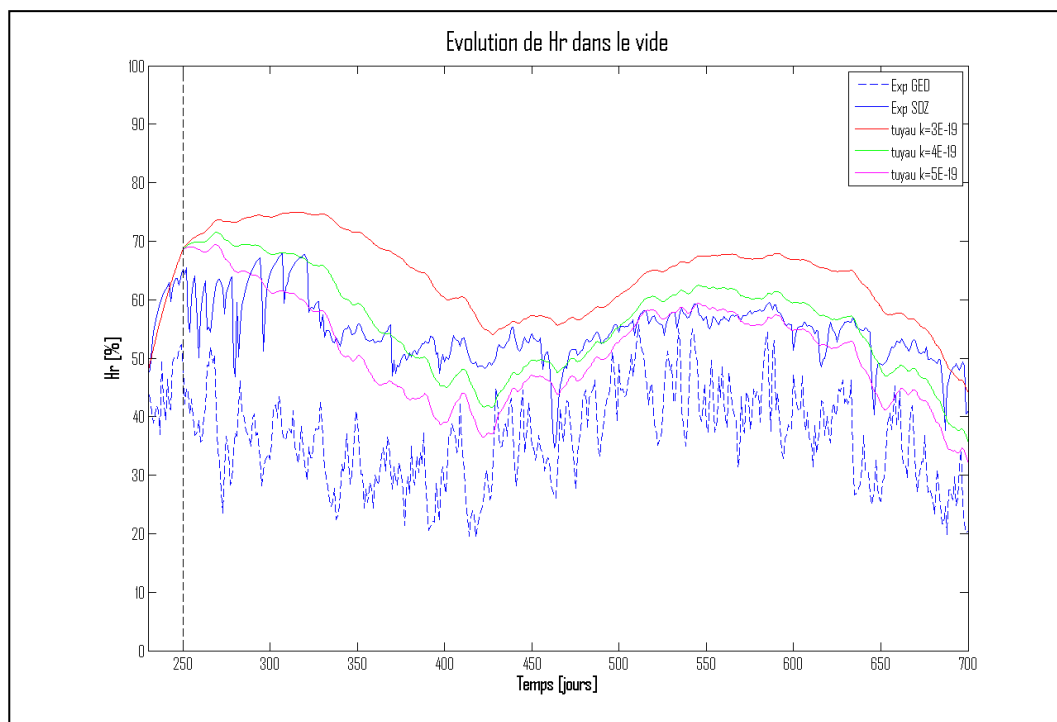


Figure 132 : Modélisation d'une fuite à travers le sas pour modéliser au mieux l'humidité relative expérimentale en zone SDZ.

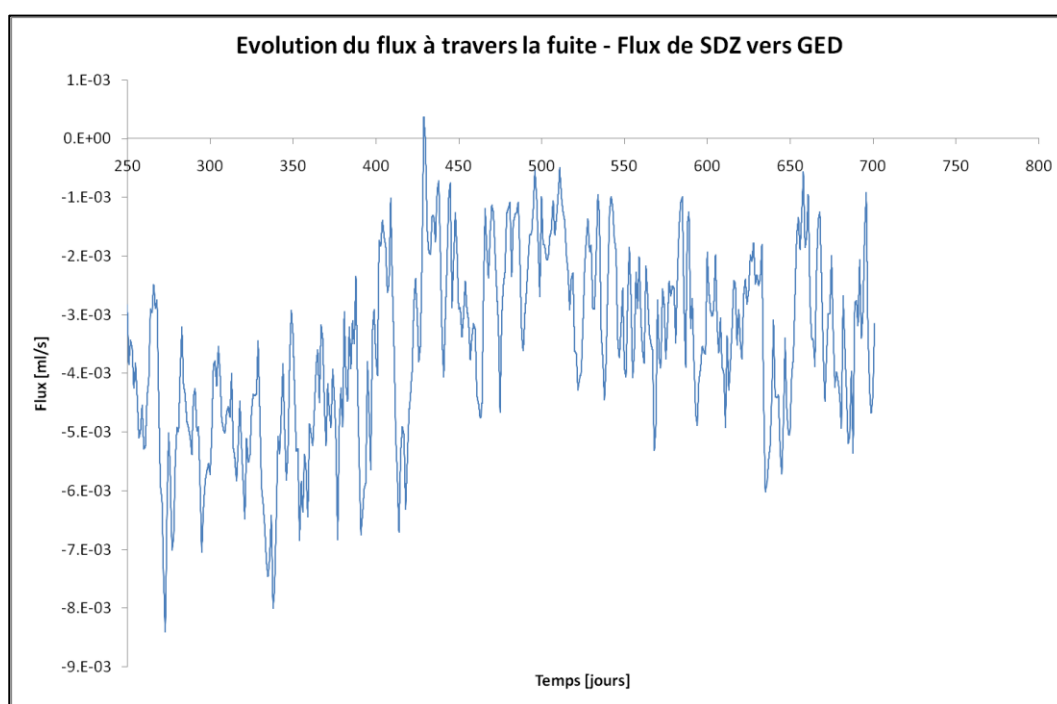


Figure 133 : Flux d'eau à travers la fuite.

6.3.9 Résultats numériques – Cycle de saturation/désaturation

L'expérience SDZ consiste à soumettre une portion de galerie isolée du reste du laboratoire à des paliers de ventilation à température T et humidité relative H_r constantes (désaturation puis resaturation). Nous allons réaliser des simulations dans cette direction.

Dans la galerie GED, la pression d'eau imposée est la même que précédemment (*Figure 134*). Les mesures expérimentales dont nous disposons sont répétées afin de pouvoir réaliser une simulation sur un intervalle de temps plus important. Dans la zone SDZ, nous envisageons deux cas d'imposition de paliers à T et H_r constant après la fermeture du sas : des paliers de 6 mois et des paliers de durée plus importante (18 mois). La température est prise constante et vaut 20°C . Ces paliers sont détaillés au Tableau 7 et aux *Figure 135* et *Figure 136*. Les pressions d'eau sont déterminées par la loi de Kelvin.

Les résultats présentés ci-dessous correspondent au modèle avec un revêtement en béton en galerie GED avec $\alpha = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, $k_{\text{intr,bet}} = 10^{-18} \text{ m}^2$, $K = 10^{-12} \text{ s}^3.\text{kg}^{-1}$.

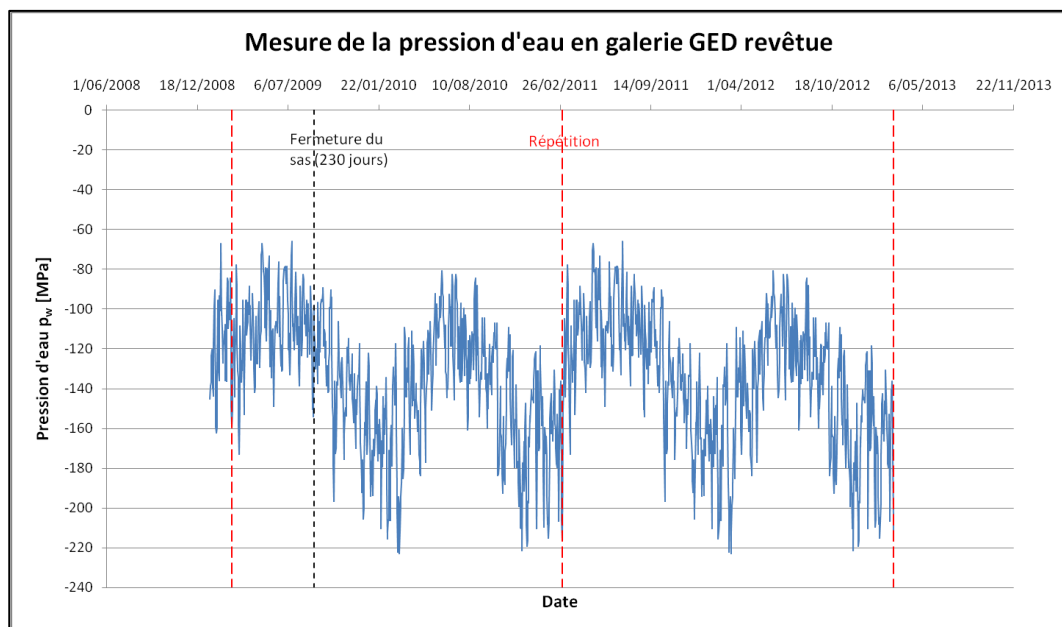


Figure 134 : Evolution de la pression d'eau imposée en galerie GED avec répétition des mesures expérimentales.

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

Tableau 7 : Cycles de saturation/désaturation imposés en zone SDZ après fermeture du sas.

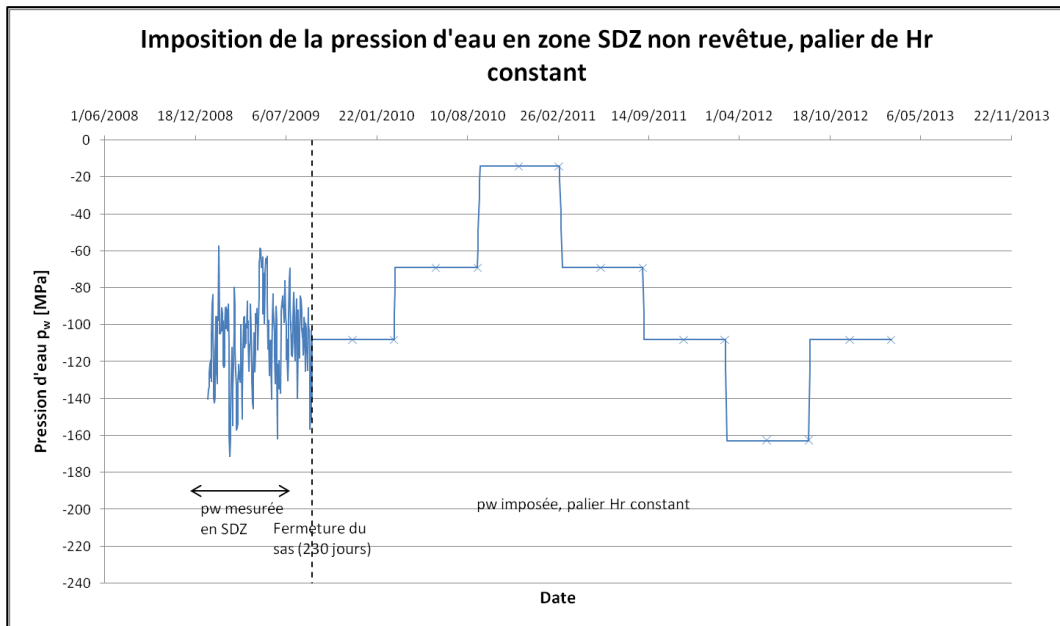


Figure 135 : Evolution de la pression d'eau imposée en zone SDZ, paliers de 6 mois.

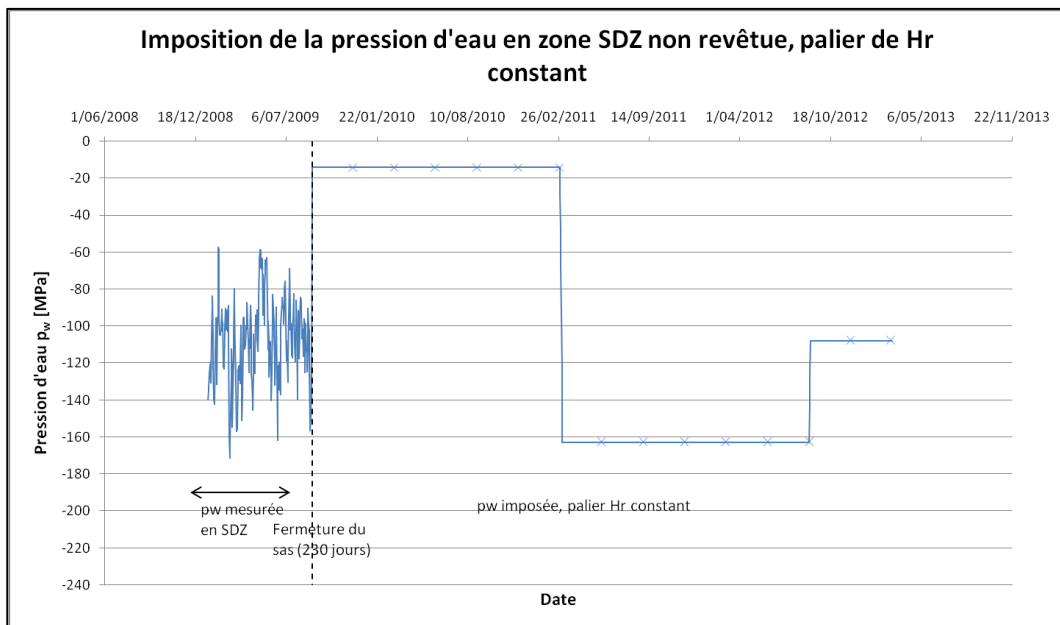


Figure 136 : Evolution de la pression d'eau imposée en zone SDZ, paliers de 18 mois.

Un exemple de l'évolution des flux d'eau à long terme sans imposition de paliers et sans fuite à travers le sas est disponible à la **Figure 137** ($p_{r, \text{vide}} = 10 \text{ Pa}$ et $p_{w, \text{vide}} = -110 \text{ MPa}$, imposition en GED de la pression d'eau de la **Figure 134**).

Les **Figure 138** et **Figure 139** détaillent les résultats pour les deux types d'impositions de la pression d'eau en zone SDZ. On remarque une influence assez limitée des paliers de ventilation sur les flux totaux avant 800 jours de simulation. Les flux au travers de FF' à long terme et les flux d'évaporation sont quant à eux influencés par les paliers de ventilation constants.

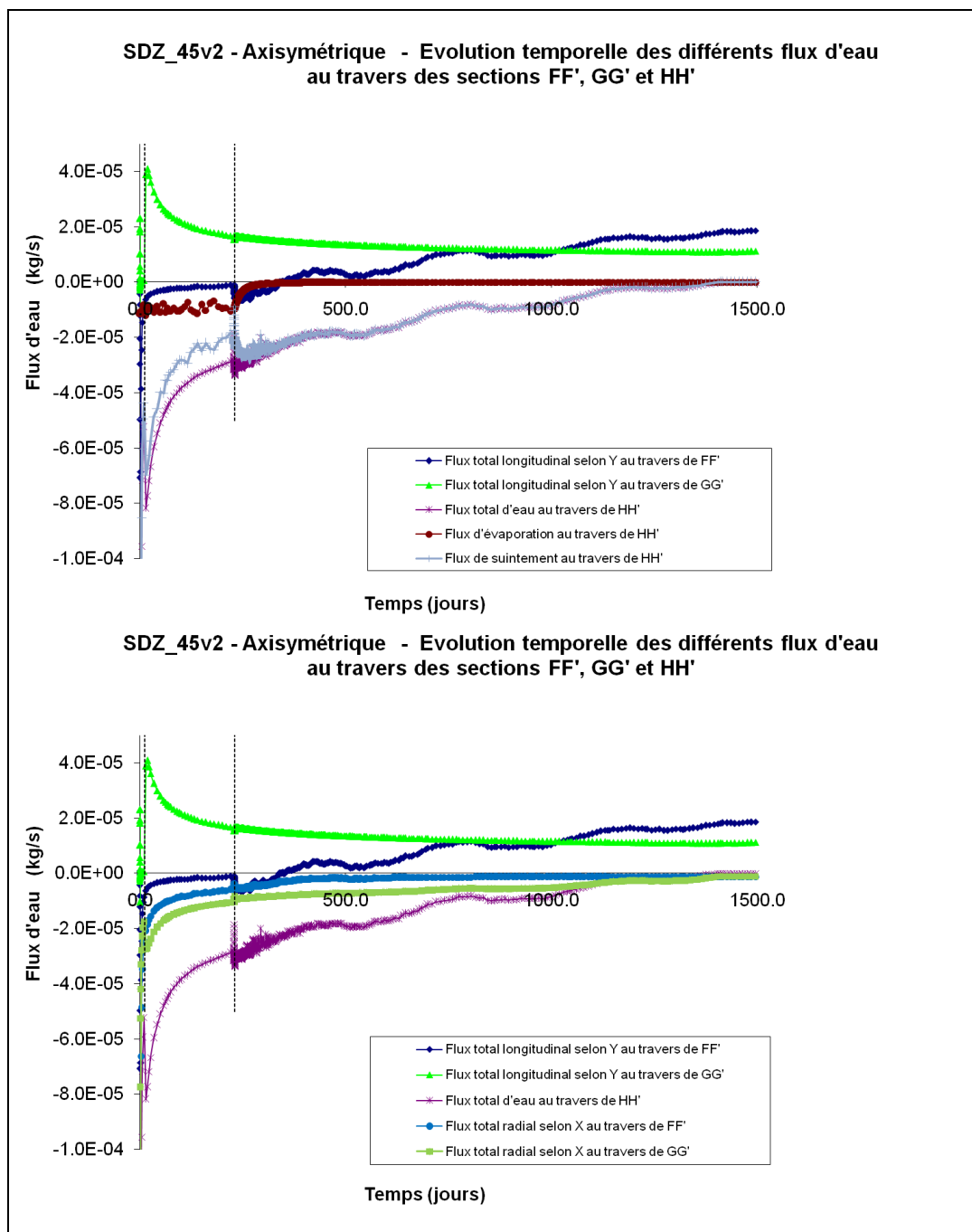


Figure 137 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', $\alpha_{sdz} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED avec revêtement en béton de perméabilité intrinsèque 10^{-18} m^2 , sans fuite à travers le sas, axisymétrique écoulement pur.

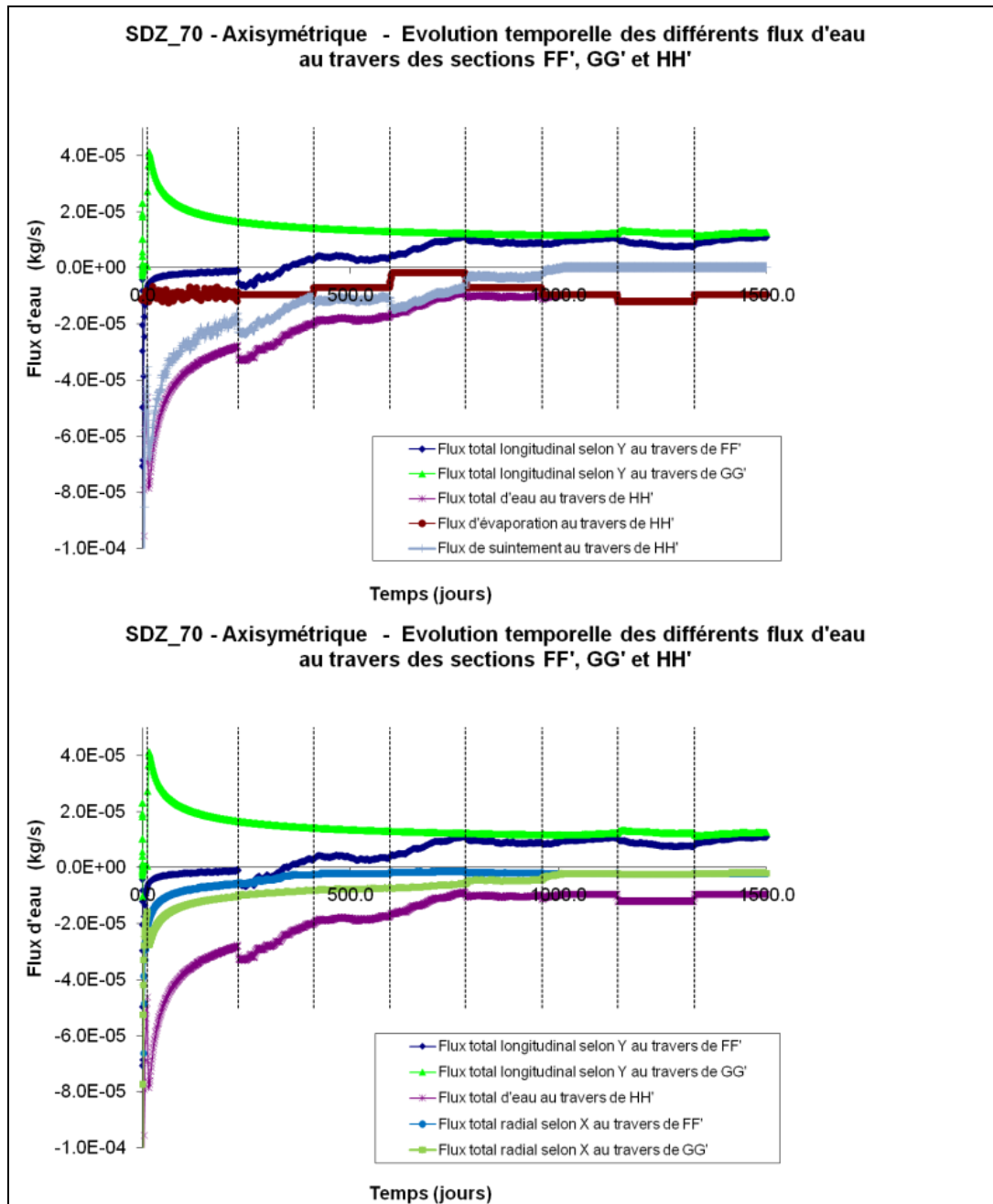


Figure 138 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', paliers de 6 mois à H_r constant, $\alpha_{sdz} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED avec revêtement en béton de perméabilité intrinsèque 10^{-18} m^2 , axisymétrique écoulement pur.

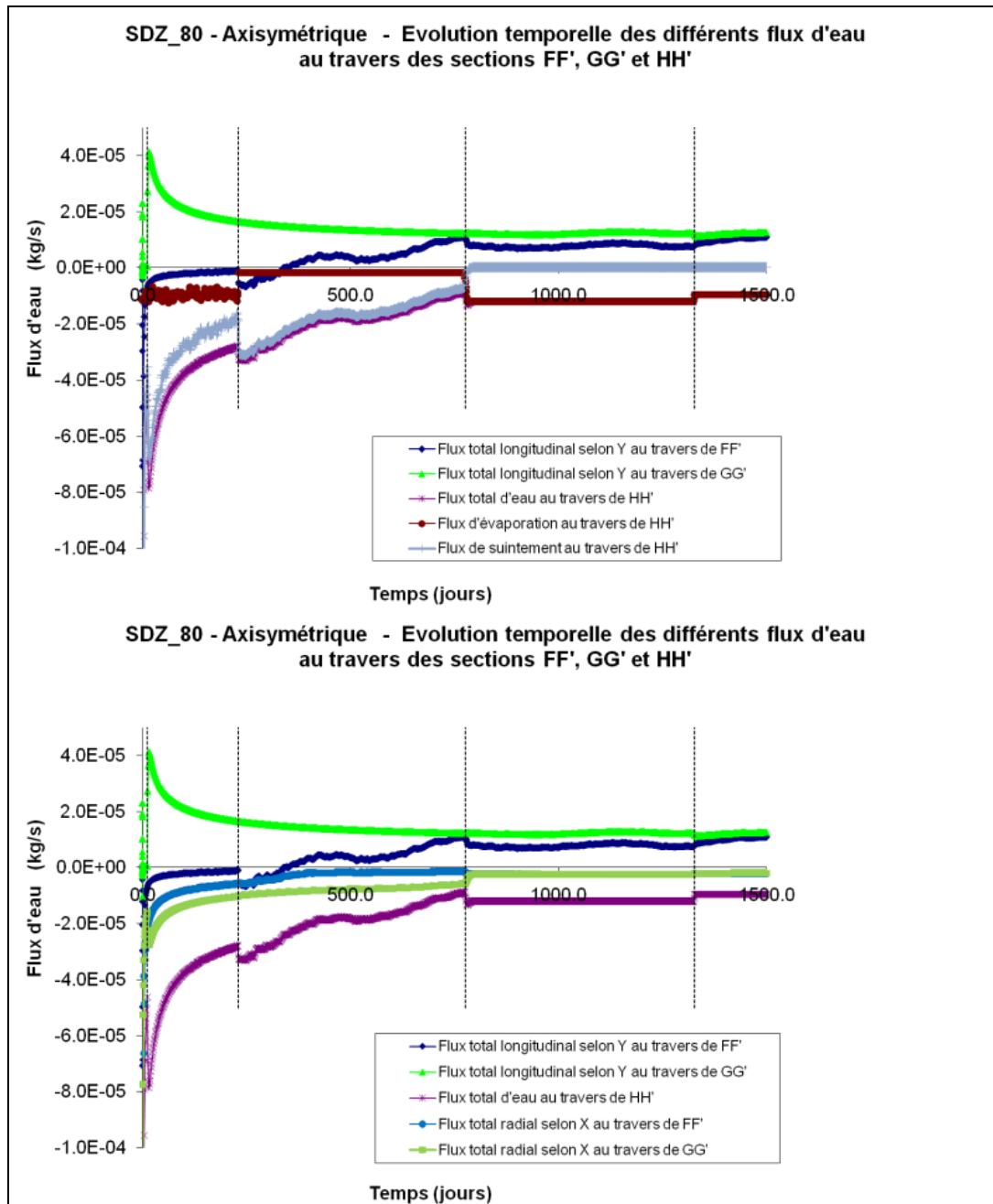


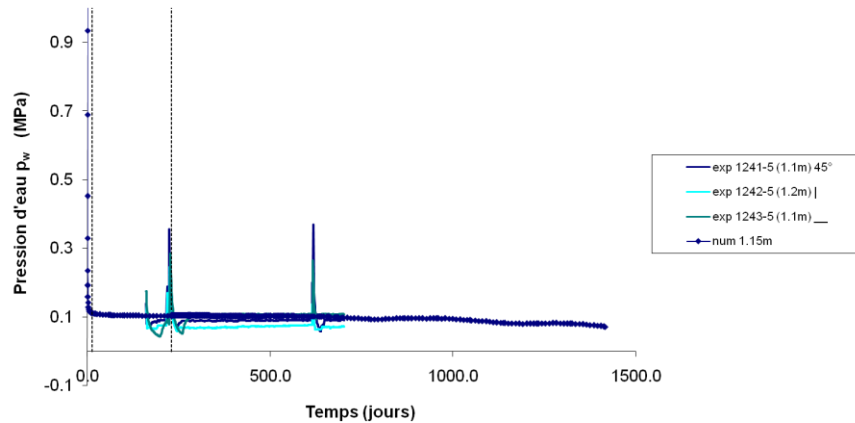
Figure 139 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', paliers de 18 mois à H_r constant, $\alpha_{sdz}=10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED avec revêtement en béton de perméabilité intrinsèque 10^{-18} m^2 , axisymétrique écoulement pur.

Les pressions d'eau dans le massif loin de la galerie ne sont pas modifiées suite aux paliers de ventilation constants imposés. A long terme et proche de la paroi on observe une diminution de la pression d'eau (Figure 140 et Figure 141) liée à l'imposition des paliers de ventilation. Cette diminution est visible principalement dans la zone EDZ (2.7 m d'épaisseur) jusqu'à environ 3 m autour de la galerie. Cette diminution est également visible sur les coupes radiale BB' et axiale EE' (Figure 142 et Figure 143). La diminution de la pression d'eau en EDZ est localisée autour de la zone SDZ non revêtue.

Après un certain temps, environ 800 à 1000 jours, l'évaporation est dominante dans les échanges en parois, le suintement est quant à lui quasi nul (équilibre entre la pression d'eau dans le massif et dans la cavité). La pression d'eau dans le massif proche de la paroi et dans l'EDZ diminue et devient négative. A court terme on observe de fortes pentes dans les courbes de pression d'eau (*Figure 142*), ces gradients de pression entre le massif et la cavité diminuent à long terme, les venues d'eau diminuent et il y a annulation du suintement à la paroi lorsque la pression devient inférieure à la pression atmosphérique.

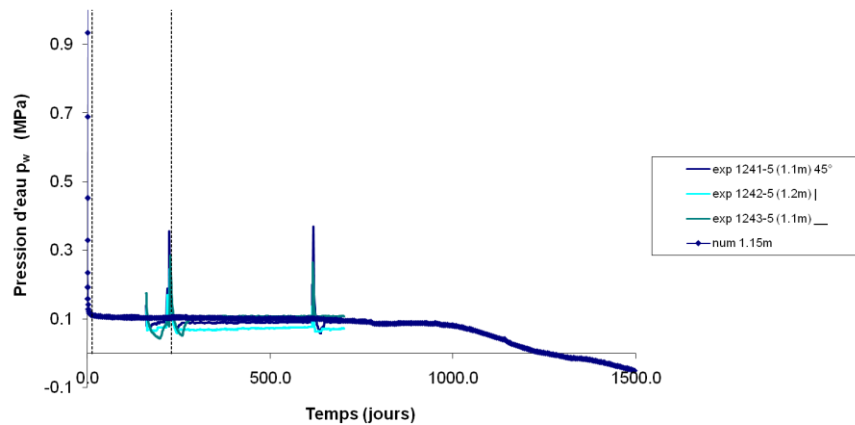
Pas de paliers de ventilation en SDZ :

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 ventilation de 6 mois en SDZ :

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 ventilation de 18 mois en SDZ :

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, $y=10.2m$)

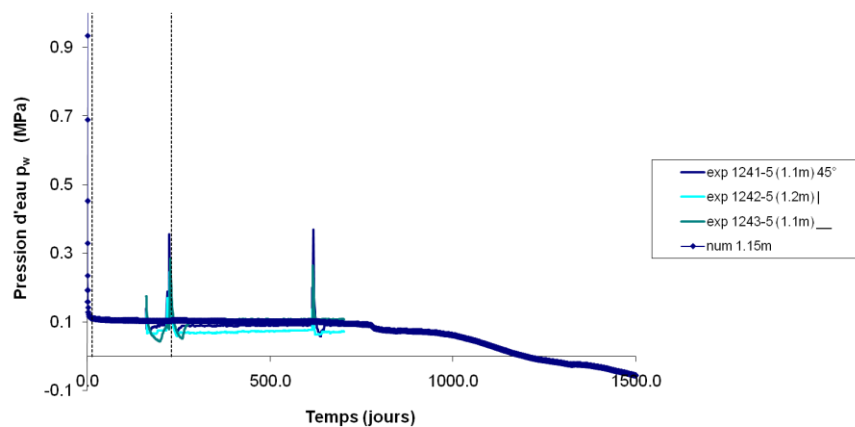
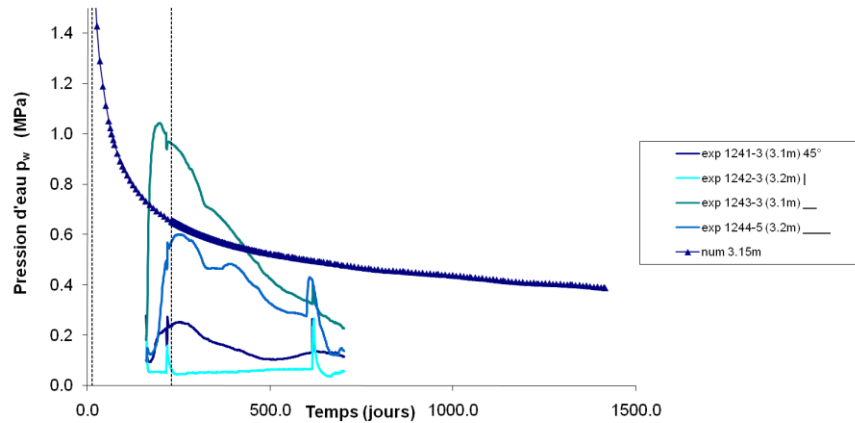
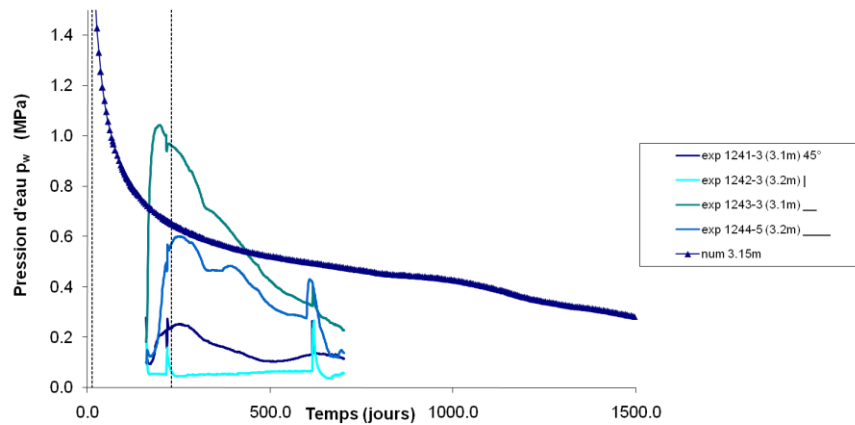


Figure 140 : Evolution de la pression d'eau à 1.1-1.2m de la paroi de la galerie en zone SDZ, paliers de ventilation constants, $\alpha_{sdz}=10^{-5} m.s^{-1}$, axisymétrique écoulement pur.

Pas de paliers de ventilation en SDZ :

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 ventilation de 6 mois en SDZ :

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 ventilation de 18 mois en SDZ :

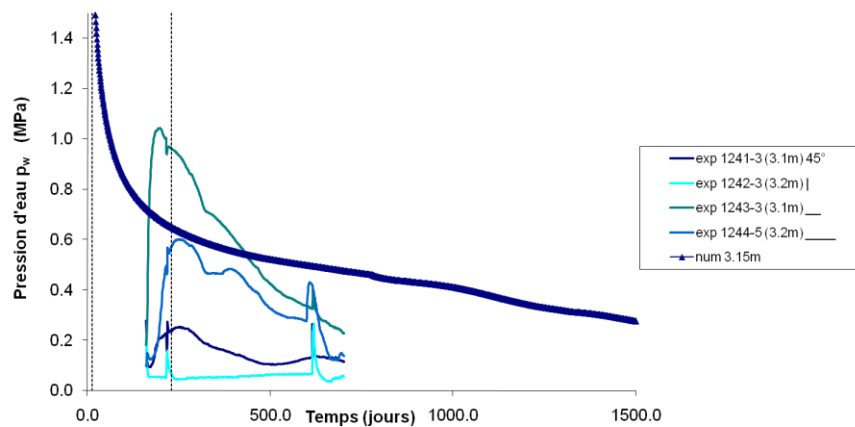
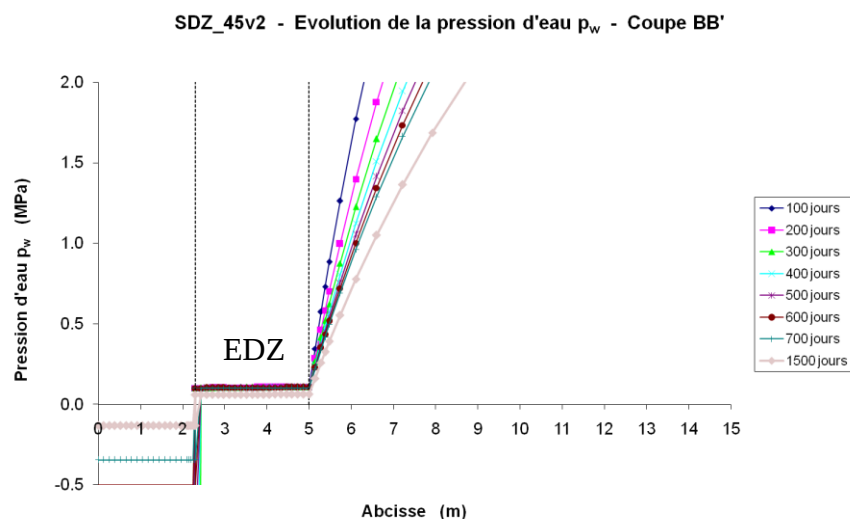
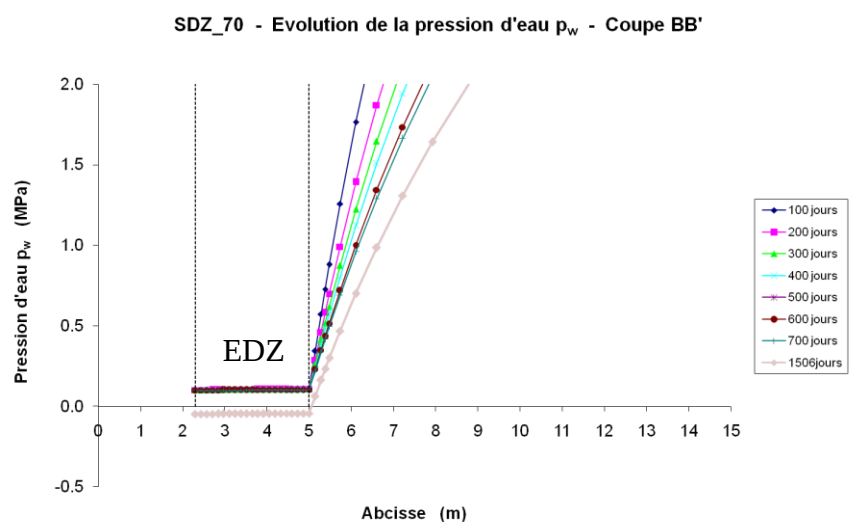
SDZ_80 - Axisymétrique - Evolution de la pression d'eau p_w à 3.1-3.2 m de la paroi (entre les cintres 63 et 64, $y=10.2m$)

Figure 141 : Evolution de la pression d'eau à 3.1-3.2m de la paroi de la galerie en zone SDZ, paliers de ventilation constants, $\alpha_{sdz}=10^{-5} m.s^{-1}$, axisymétrique écoulement pur.

Pas de paliers de ventilation en SDZ :



Paliers de ventilation de 6 mois en SDZ :



Paliers de ventilation de 18 mois en SDZ :

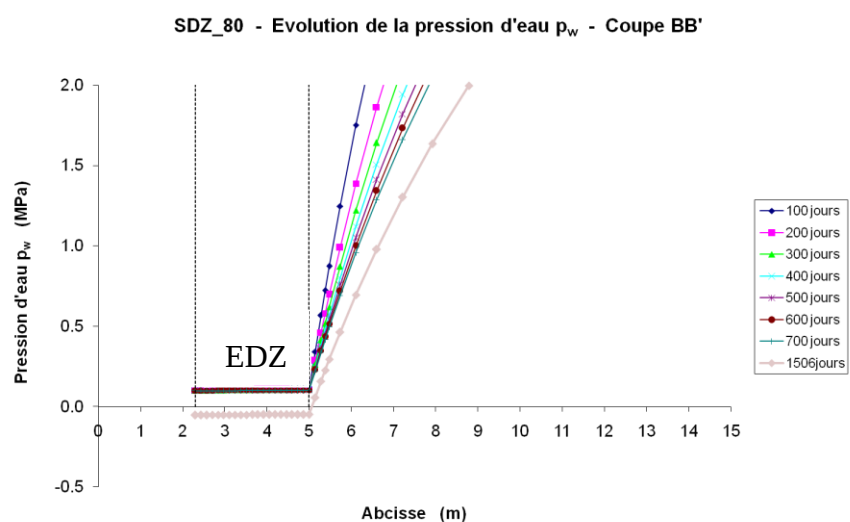
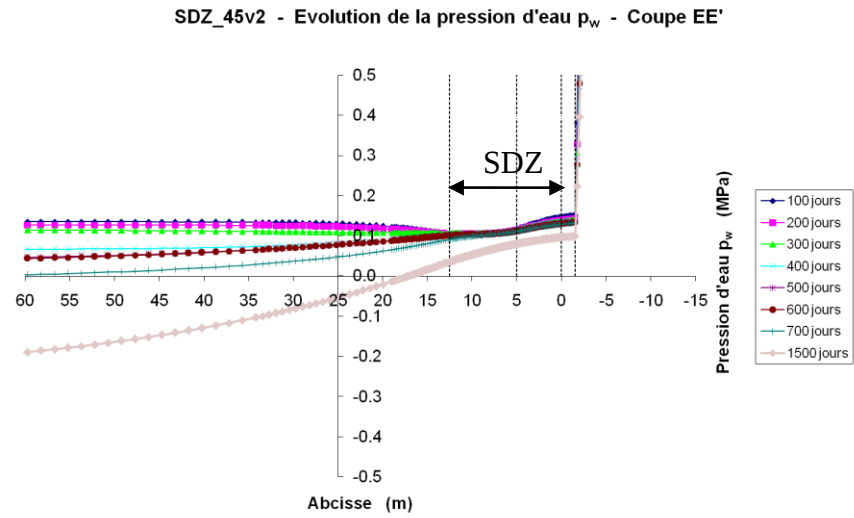
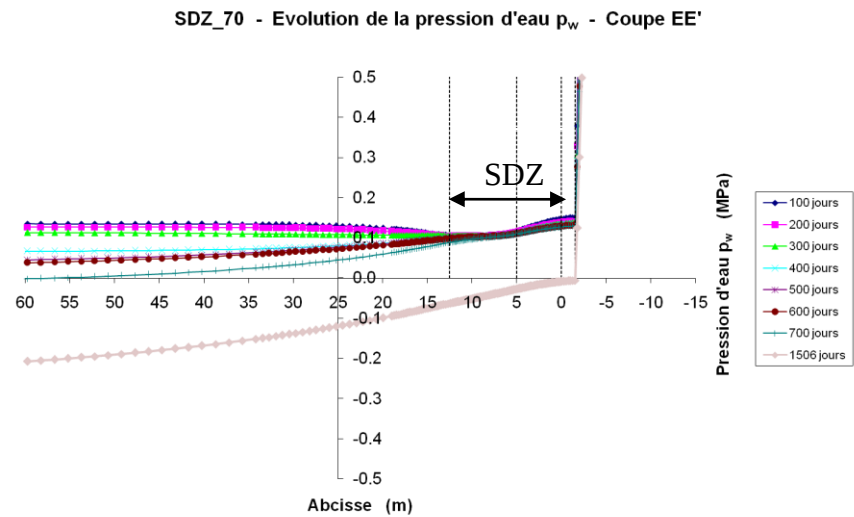


Figure 142 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe radiale BB', paliers de ventilation constants, $\alpha_{sdz} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, axisymétrique écoulement pur.

Pas de paliers de ventilation en SDZ :



Paliers de ventilation de 6 mois en SDZ :



Paliers de ventilation de 18 mois en SDZ :

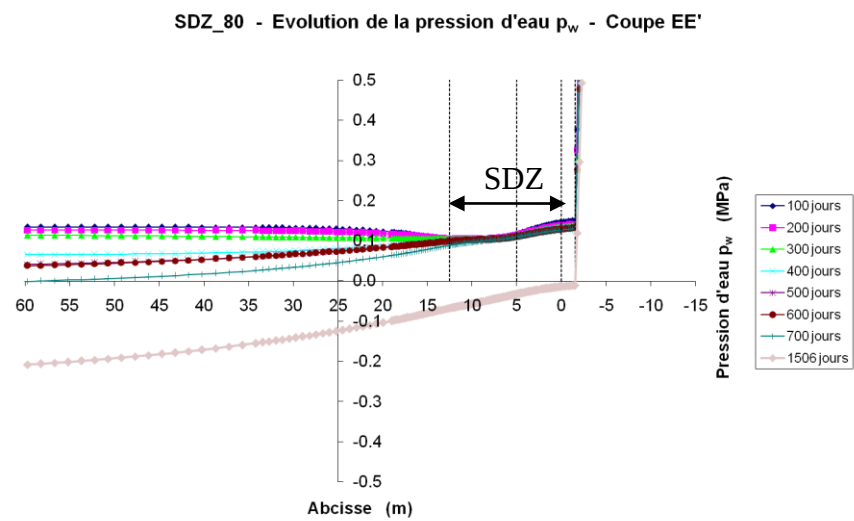


Figure 143 : Evolution de la pression d'eau le long de la coupe axiale EE', paliers de ventilation constants, $\alpha_{sdz} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, axisymétrique écoulement pur.

Au paragraphe 6.3.8, la fuite modélisée correspond à une imposition de la pression d'eau en zone SDZ. Il ne s'agit cependant pas de paliers de ventilation contrôlée à T et H_r constants. Les flux d'eau en EDZ pour le cas sans imposition de paliers et avec fuite à travers le sas ($k_{\text{tuyau}} = 4 \cdot 10^{-19}$, $P_{r,\text{vide}} = 50 \text{ Pa}$ et $p_{w,\text{vide}} = -100 \text{ MPa}$) sont détaillés à la **Figure 144**. On remarque que ces flux sont similaires à ceux obtenus lors de l'imposition de paliers constants en zone SDZ (**Figure 138** et **Figure 139**). Les observations faites ci-dessus concernant la diminution de la pression d'eau proche de la paroi et en zone EDZ sont également valables pour le cas avec fuite sans imposition de paliers de ventilation. Les différentes observations faites relèvent donc d'une ventilation à long terme en zone SDZ, pas d'une ventilation contrôlée par paliers.

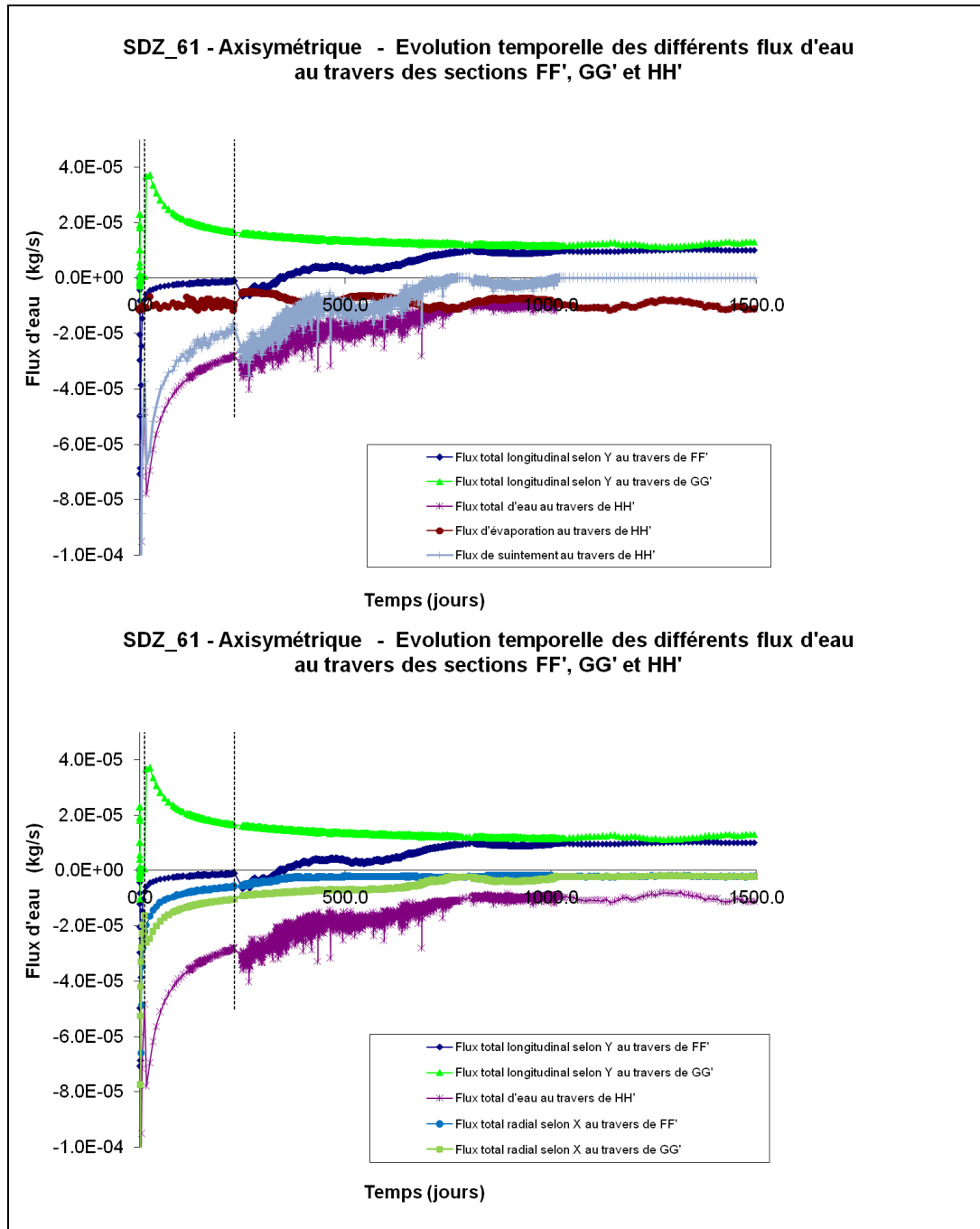


Figure 144 : Evolution des flux d'eau le long des sections FF', GG' et HH', $\alpha_{sdz} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, galerie GED avec revêtement en béton de perméabilité intrinsèque 10^{-18} m^2 , avec fuite à travers le sas, axisymétrique écoulement pur.

6.4 3D écoulement pur

Différentes limitations existent concernant les modèles 2D et axisymétrique. En 2D, l'EDZ est bien représentée mais les échanges d'eau et de température sont biaisés par l'absence de flux longitudinal. La modélisation axisymétrique permet de représenter correctement les échanges d'eau dans le sens longitudinal (axial), en revanche elle ne permet pas de représenter correctement l'EDZ car les dimensions ne peuvent pas dépendre de l'orientation. L'anisotropie des contraintes et de la perméabilité ne peuvent pas être prises en compte en axisymétrique. Suite à ces limitations, un calcul 3D en écoulement pur s'impose. Ce modèle permettra de mieux représenter les échanges. Dans ce calcul 3D, la pression de gaz p_g est maintenue constante et les conditions sont isothermes dans tout le modèle.

6.4.1 Géométrie

Le maillage 3D réalisé est détaillé à la *Figure 145*. L'étendue du maillage est prise égale à 50 m horizontalement, verticalement et de part et d'autre de la zone dédiée à l'expérimentation SDZ. Il est composé de 93229 nœuds et 84380 éléments avec une discrétisation plus raffinée autour de la galerie.

La zone endommagée EDZ, le vide de la zone SDZ en aval du sas, le radier en béton (pas le revêtement) et la membrane étanche de la zone située en extrémité de galerie sont représentés. Une épaisseur verticale de 3,7 m et horizontale de 2,7 m sont considérées pour l'EDZ.

6.4.2 Conditions initiales

Les conditions initiales de pression d'eau, de pression de gaz et de températures sont conservées. Pour rappel, les conditions initiales dans l'argilite (saine et EDZ) correspondent à celles au niveau de la galerie GED, à savoir : $p_w=4.5\text{MPa}$, $p_g=0.1\text{MPa}$ et $T=293\text{K}$.

La pression de gaz est prise égale à la pression atmosphérique. Le radier en béton est mis en place à la pression d'eau $p_w = 0.1 \text{ MPa}$. Le vide est mis en place à $p_w = -110 \text{ MPa}$ ($H_r \approx 45\%$).

6.4.3 Chronologie

La chronologie est similaire à celle détaillée au paragraphe 6.3.3. Les étapes majeures sont modélisées (*Figure 146*). Initialement, des éléments d'échange (échanges d'eau et de vapeur) sont disposés sur la paroi et au front de la galerie. Lors de la mise en place du revêtement, les éléments d'échange de la partie étanche sont retirés (étanchéification). Lors de la mise en place du radier les éléments d'échange sous celui-ci sont retirés et d'autres sont ajoutés au dessus. A la fermeture du sas, les éléments de vide de la zone SDZ sont activés et les éléments d'échange situés au droit du sas sont désactivés. Le front de la galerie est également imperméable. Après la fermeture du sas, la pression reste imposée en galerie GED et la pression dans la zone SDZ résultera des échanges par le sas et la zone EDZ. Le creusement n'est pas modélisé.

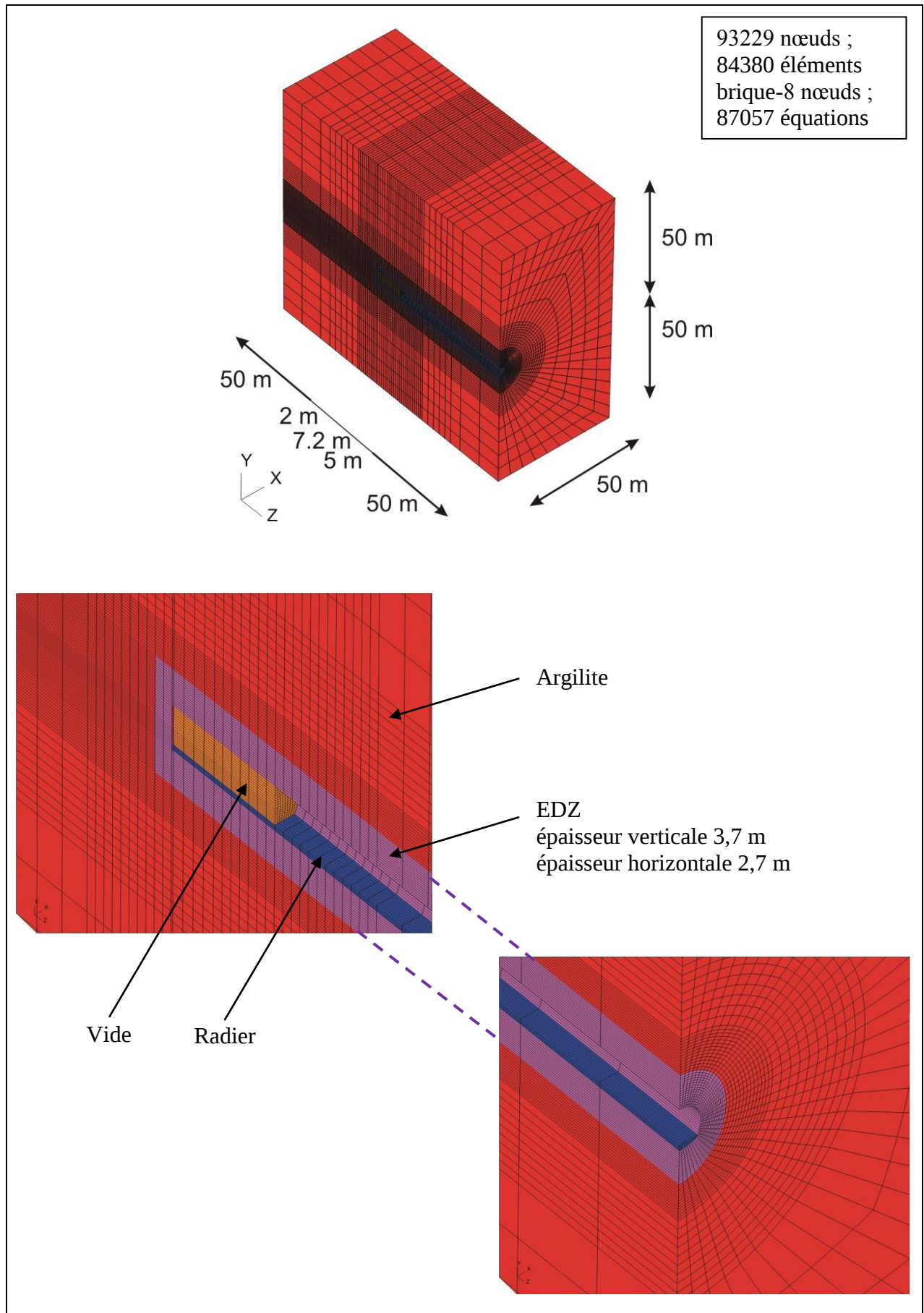


Figure 145 : Vue globale du modèle 3D.

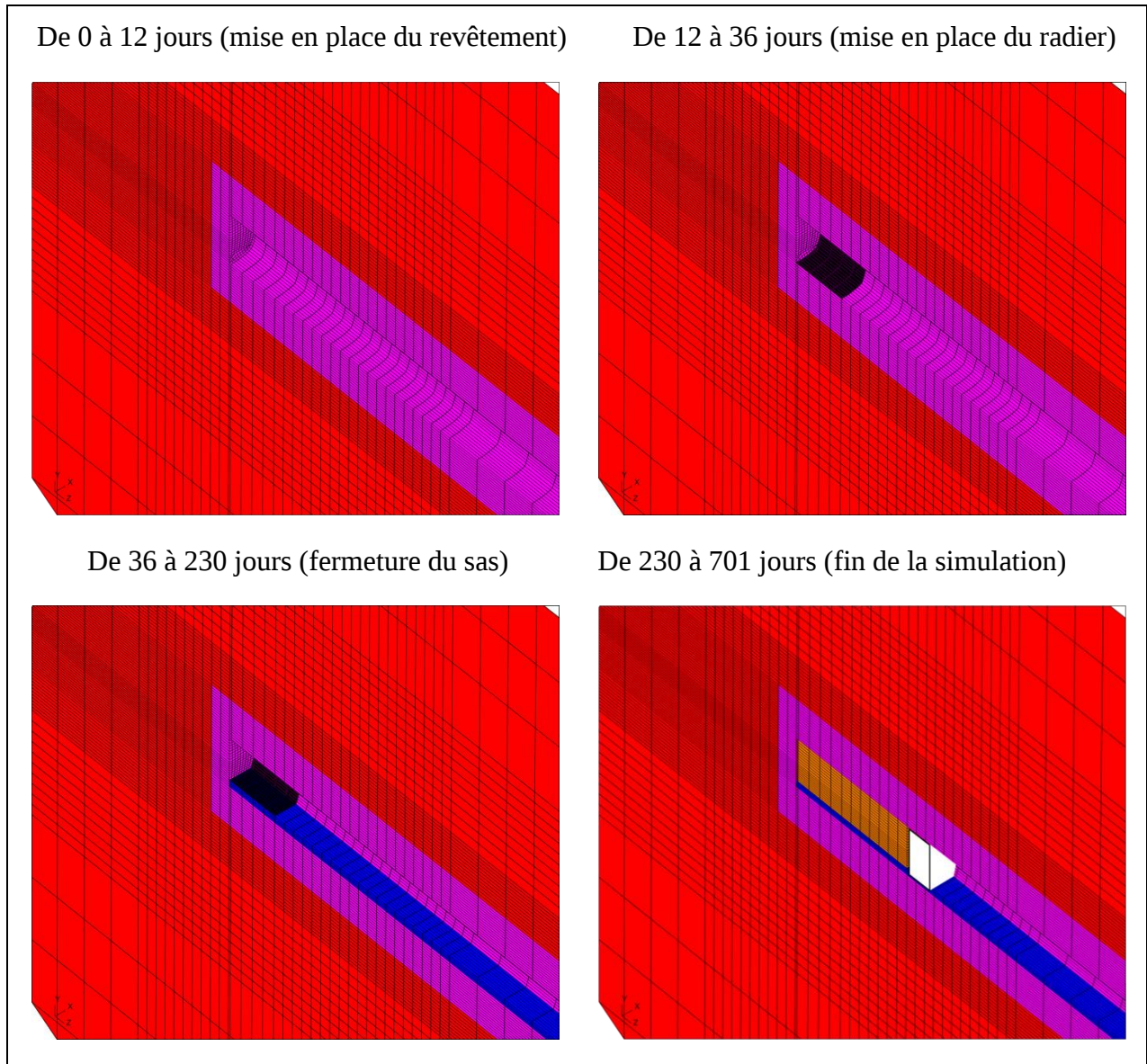


Figure 146 : Phasage de la modélisation 3D.

6.4.4 Conditions aux limites

Les déplacements sont bloqués dans l'ensemble du modèle. La pression d'eau initiale (p_w de 4.5 MPa) est fixée aux limites lointaines.

L'évolution de l'humidité relative est imposée en fixant la pression d'eau (au nœud d'environnement des éléments d'échange) dans la galerie GED en amont du sas dès le début de la simulation (0 jour). La **Figure 73** présente l'évolution de la pression d'eau imposée. Ensuite, le sas est fermé (230 jours) et la ventilation est stoppée dans la zone SDZ.

6.4.5 Mesures expérimentales

Les résultats numériques seront comparés aux mesures expérimentales de pression d'eau détaillées précédemment et réalisées dans les forages : forages SDZ1241 à 1244 situés dans la zone de galerie non revêtue dédiée à l'expérience SDZ, forage SDZ1245 situé au front de la

galerie GED, forages OHZ1221 à 1223 situés dans la zone de galerie revêtue dédiée à l'expérience SDZ.

6.4.6 Résultats numériques

Sont fixés :

- le coefficient de pénalisation pour le suintement, $K = 10^{-13} \text{ s}^3.\text{kg}^{-1}$
- le coefficient de transfert de masse pour l'évaporation en galerie GED et en zone SDZ, $\alpha_{\text{ged}} = \alpha_{\text{sdz}} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$
- la perméabilité de l'argilite saine, $k_{\text{ani}} \text{ argilite (hor/vert)} = 4 / 1,33 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$
- la perméabilité de l'argilite EDZ, $k_{\text{ani}} \text{ EDZ (hor/vert)} = 4 / 1,33 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$
- la perméabilité du béton, $k_{\text{iso}} \text{ béton} = 1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$

La correspondance entre résultats numérique et expérimentaux pour les forages SDZ1241 à 1244 situés dans la zone SDZ non revêtue est bonne (Figure 158, Figure 159, Figure 160 et Figure 161). Cette correspondance est moins correcte pour les forages OHZ1221 à 1223, situés dans la zone de galerie revêtue dédiée à l'expérience SDZ, et pour le forage SDZ1245 situé au front de la galerie (Figure 152, Figure 153, Figure 154 et Figure 155).

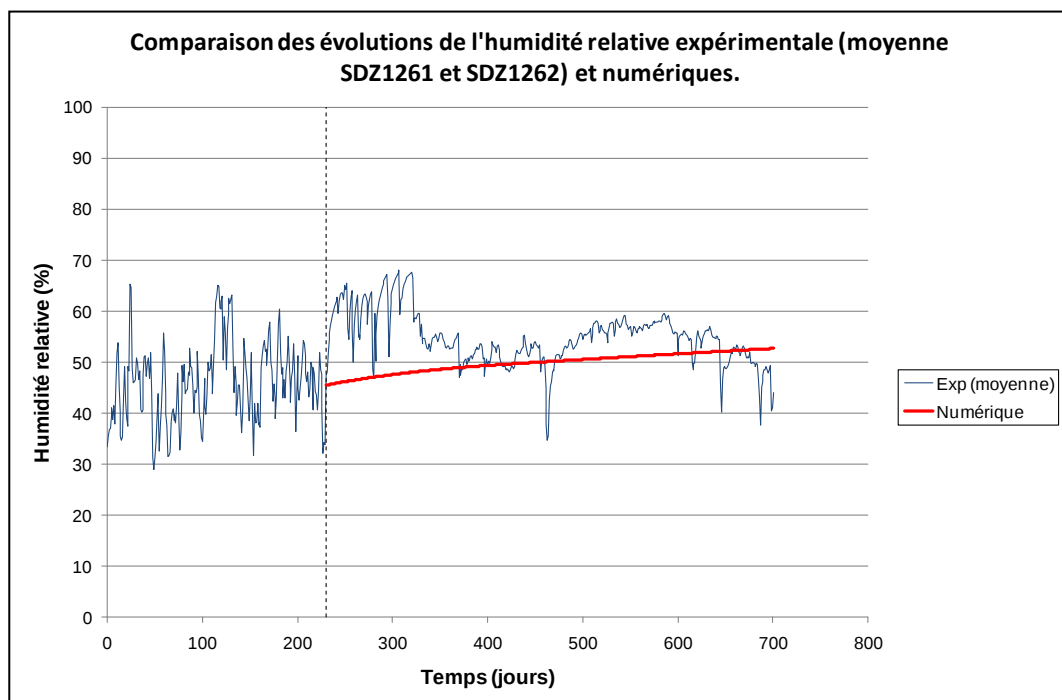


Figure 147 : Comparaison des évolutions de l'humidité relative expérimentale et numériques dans la zone SDZ non étanche (vide), 3D écoulement pur.

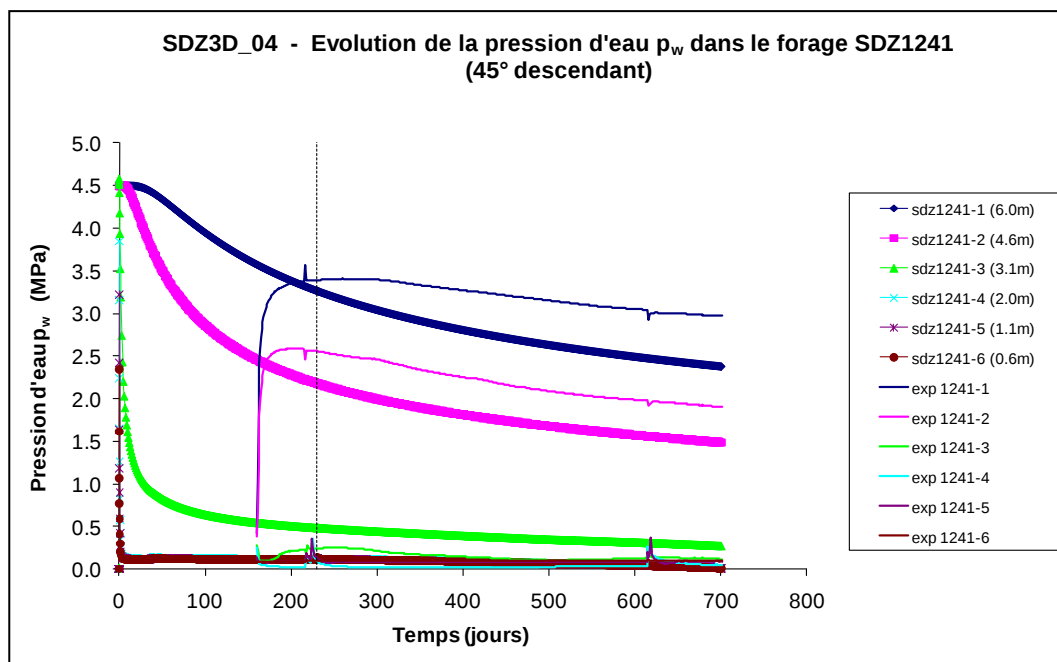


Figure 148 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1241 descendant à 45°, 3D écoulement pur.

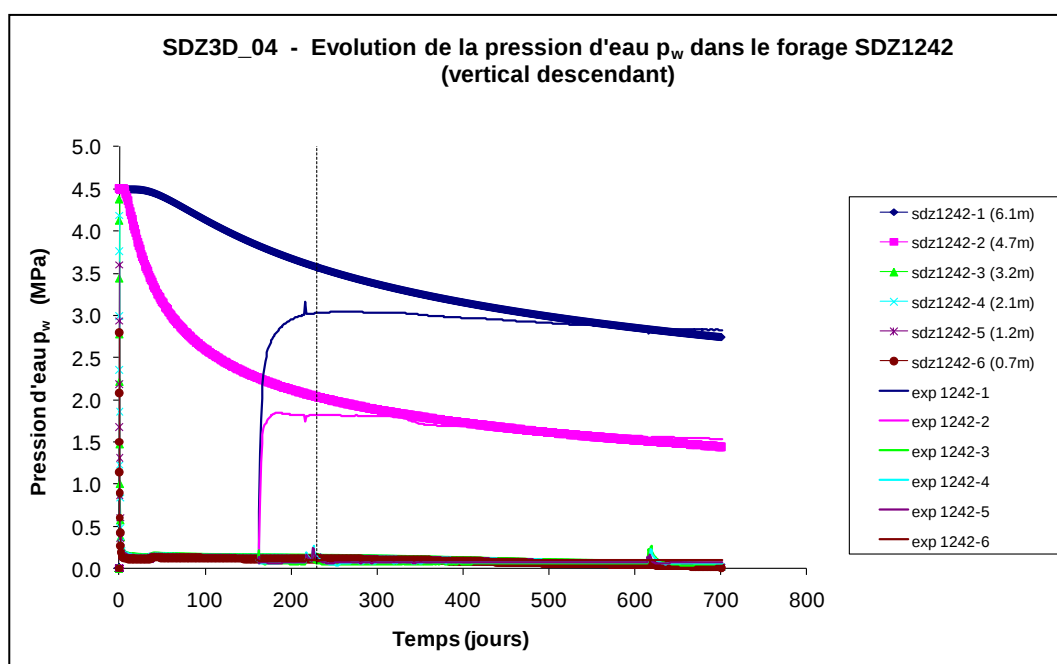


Figure 149 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1242 vertical descendant, 3D écoulement pur.

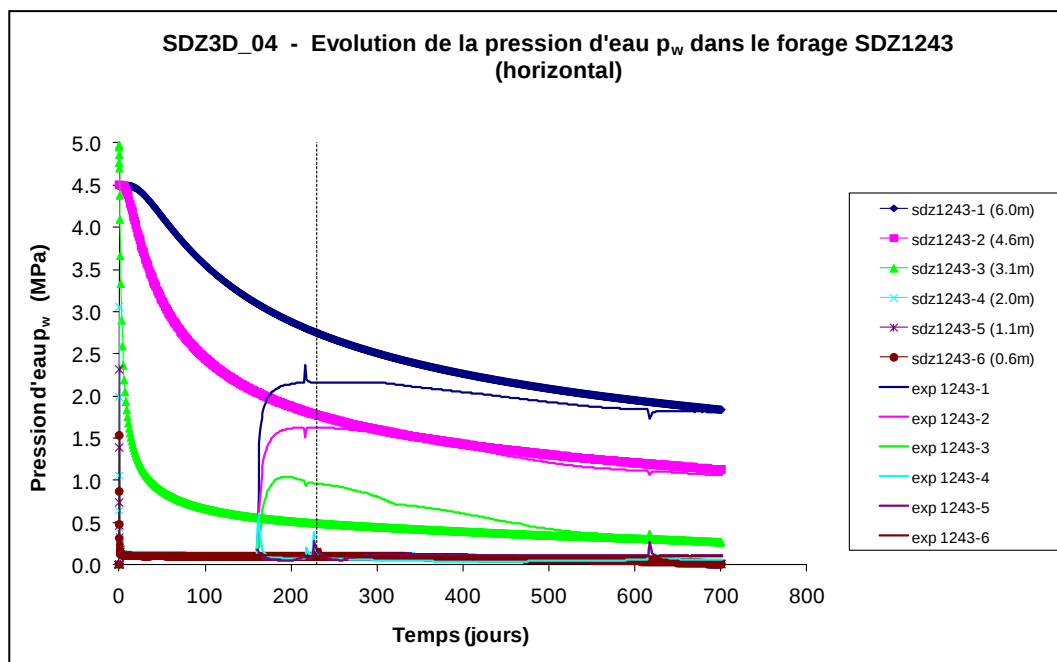


Figure 150 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1243 horizontal, 3D écoulement pur.

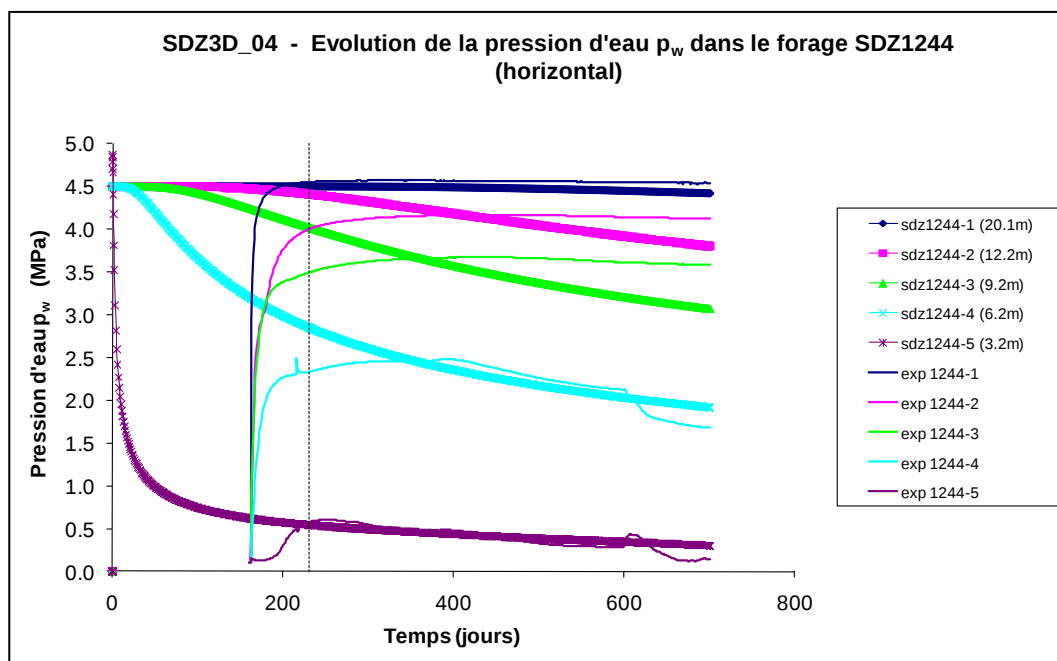


Figure 151 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1244 horizontal « lointain », 3D écoulement pur.

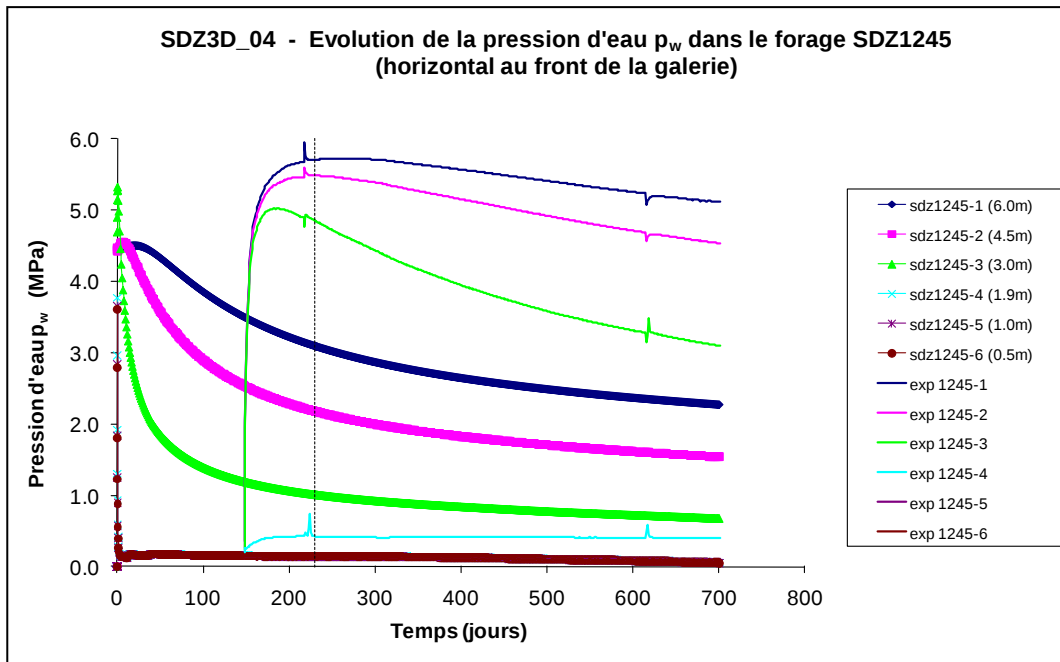


Figure 152 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1245 horizontal au front de la galerie, 3D écoulement pur.

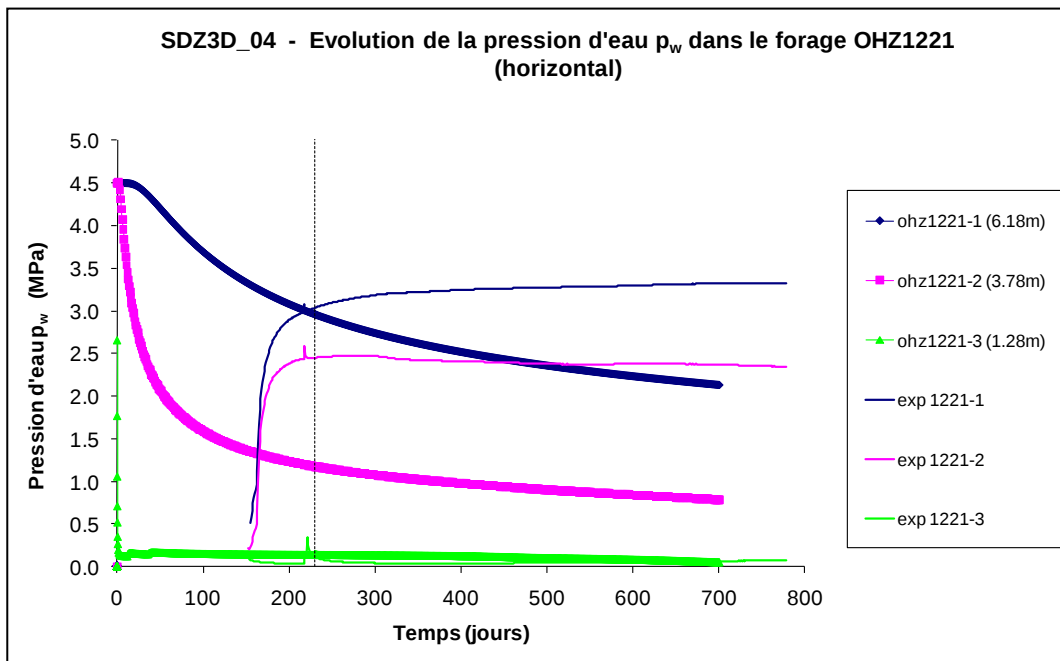


Figure 153 : Evolution de la pression d'eau dans le forage OHZ1221 horizontal, 3D écoulement pur.

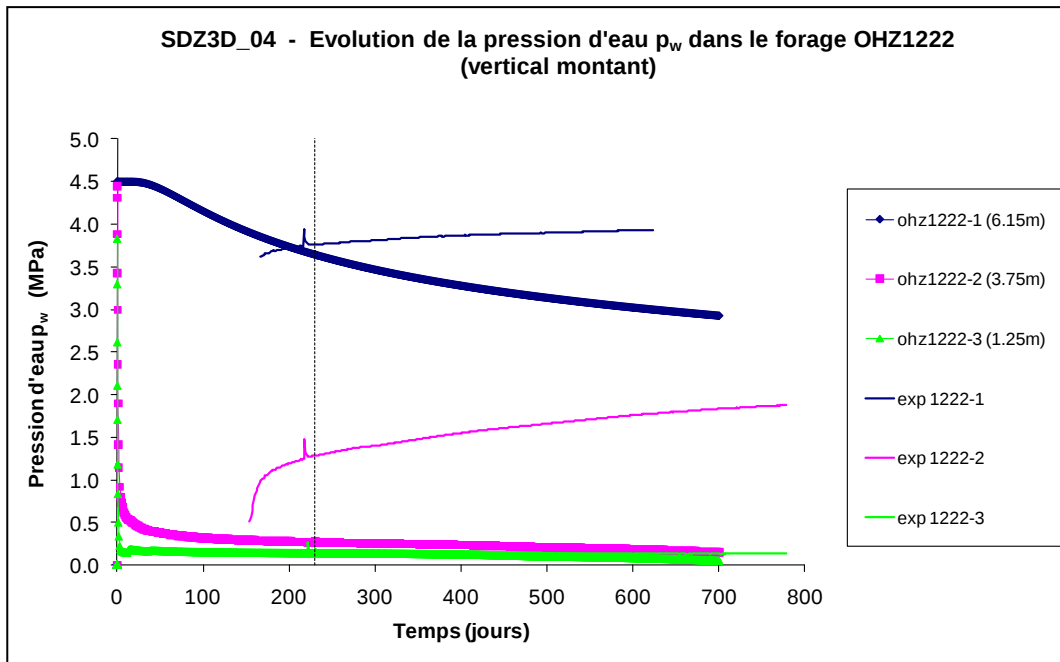


Figure 154 : Evolution de la pression d'eau dans le forage OHZ1222 vertical montant, 3D écoulement pur.

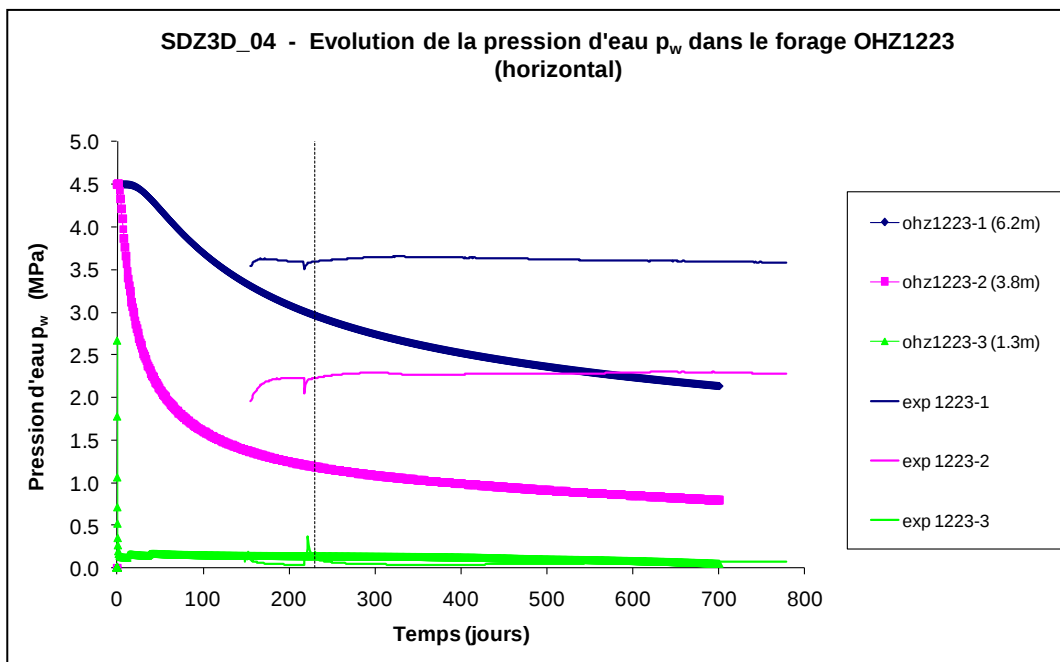


Figure 155 : Evolution de la pression d'eau dans le forage OHZ1223 horizontal, 3D écoulement pur.

7 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans les différentes simulations numériques, il s'avère difficile de trouver une calibration +/- correcte des paramètres à la fois sur l'ensemble des capteurs (vertical descendant, incliné à 45°, horizontal et horizontal lointain), sur le « court terme » après la fermeture du sas et sur le « long terme ».

En 2D état plan de déformation écoulement pur, la combinaison de paramètres du cas 4 est satisfaisante bien que plusieurs combinaisons de paramètres différents peuvent sans doute fournir une réponse assez similaire. La zone endommagée est représentée avec une extension verticale plus importante que l'extension horizontale et l'anisotropie de la perméabilité est prise en considération. Le coefficient de transfert de masse pour l'évaporation a une influence importante sur les résultats obtenus ; une faible valeur de 10^{-5} m.s^{-1} est retenue.

La modélisation en 2D état plan de déformation couplage hydromécanique réalisée avec la même combinaison de paramètres (cas 4) a permis de prendre en compte l'influence des contraintes et de leurs anisotropie. Bien que nous observions des variations de pression d'eau au sein de l'argilite dans les directions verticale et horizontale, les résultats sont similaires à ceux des simulations en écoulement pur. La zone plastique observée numériquement correspond relativement bien aux mesures d'extension verticale et horizontale de la zone EDZ (mesures de fracturation et de perméabilité). L'extension de la zone EDZ dans les modèles numériques pourrait être améliorée.

En axisymétrique, la simulation du cas 1 où le vide est « isolé » de l'EDZ, c'est-à-dire avec un coefficient de transfert de masse pour l'évaporation en zone SDZ faible de 10^{-5} m.s^{-1} , donne un comportement physique à long terme relativement proche des mesures expérimentales. A long terme, on constate que dans l'EDZ les flux radiaux sont dirigés vers la galerie SDZ et que les flux axiaux sont dirigés vers la galerie GED. La galerie GED « aspire » l'eau et les transferts se font via l'EDZ. Différentes variantes ont été envisagées, nous retiendront que la modélisation d'une fuite à travers le sas permet d'expliquer l'allure des valeurs d'humidité relative mesurées dans la zone SDZ et qu'imposer des paliers de ventilation constants a une faible influence sur les flux et les pression d'eau dans la zone EDZ autour de la zone SDZ.

Le calcul 3D en écoulement pur permet de représenter correctement l'EDZ, les échanges d'eau dans le sens longitudinal (axial) et de prendre en compte l'anisotropie de perméabilité. La simulation pour un coefficient transfert de masse α faible de 10^{-5} m.s^{-1} 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 et au front de la galerie.

Signalons que la valeur retenue du coefficient de transfert de masse pour l'évaporation en paroi de la zone SDZ non revêtue est la même en 2D état plan de déformation, en axisymétrique et en 3D. Cette valeur est faible et le vide est « isolé » de l'EDZ (Ceci remet en question l'imposition précédente de l'humidité relative directement en paroi et sans éléments d'échange. Lors d'une telle imposition, on a une transmission brutale de l'humidité au massif impliquant un coefficient de transfert de masse pour l'évaporation élevé).

Pour la suite, il serait possible d'envisager différentes variantes en 2D état plan de déformation et/ou 3D, en écoulement pur et/ou en couplage hydromécanique. Ces variantes pourraient être :

- une amélioration de la forme de la zone endommagée sur base des mesures de fracturation et de perméabilité dans l'argilite,
- un modèle de perméabilité dépendante de la déformation plus élaboré,
- une structure en bandes de cisaillement de la zone endommagée,
- des adaptations en fonction du suivi de l'expérience dans le temps,
- un calcul 3D couplé,
- ...

8 ANNEXES

8.1 Annexe 1 : Mesures de température et d'hygrométrie en SDZ

Des mesures de température et d'hygrométrie ont été effectuées dans les sections SDZ1261 et SDZ1262 (rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B) situées dans la zone de galerie non revêtue dédiée à l'expérience SDZ.

Les *Figure 156* et *Figure 157* détaillent les positions des sections et des capteurs de température (TEM) et d'hygrométrie (HUM). Les *Figure 158*, *Figure 159*, *Figure 160* et *Figure 161* représentent l'évolution des mesures au cours du temps.

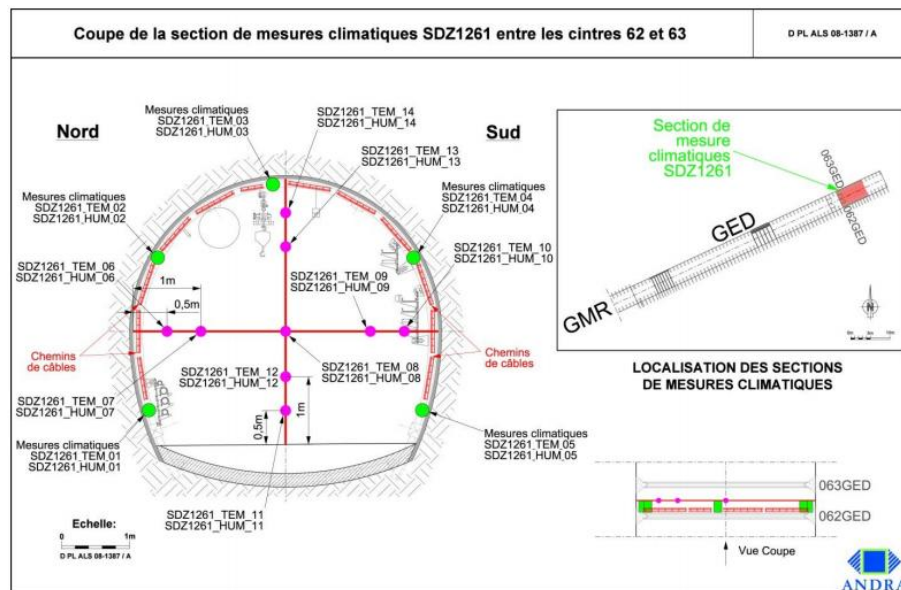


Figure 156 : Coupe de la section de mesures climatiques SDZ1261 (rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B) et position des capteurs.

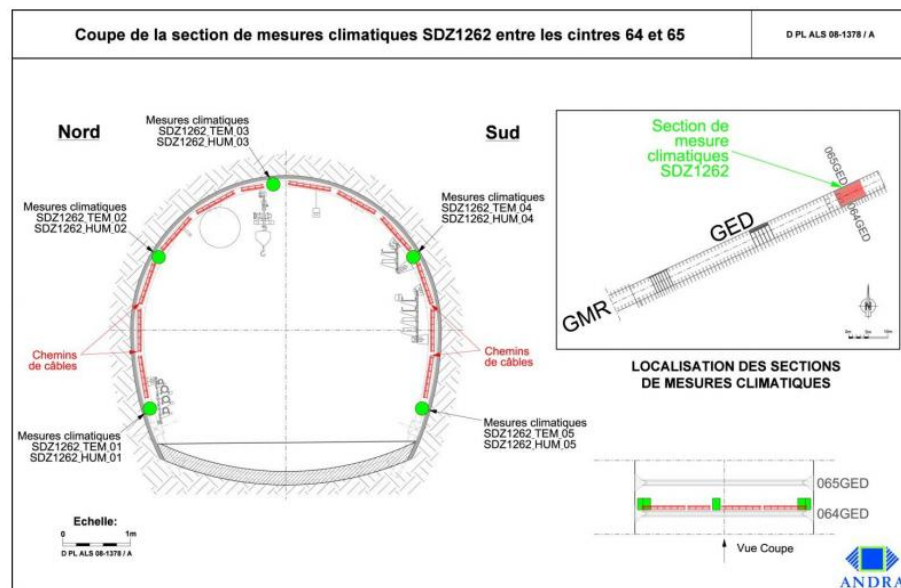


Figure 157 : Coupe de la section de mesures climatiques SDZ1262 (rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B) et position des capteurs.

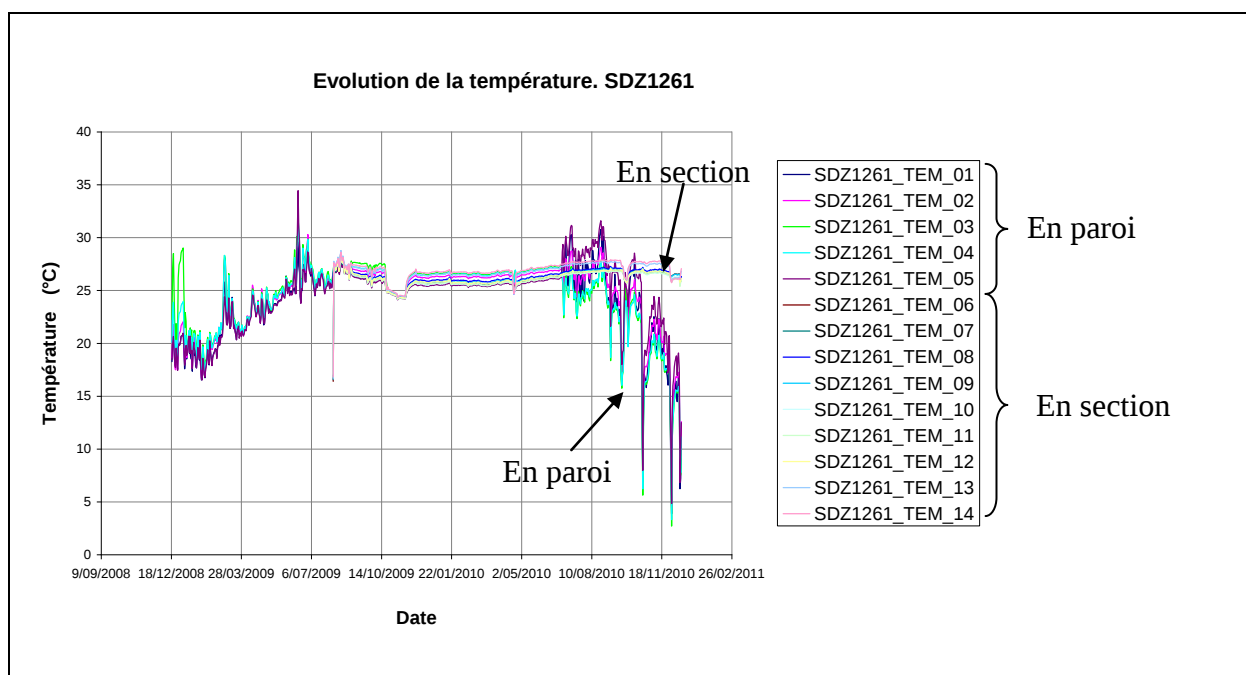


Figure 158 : Evolution de la température dans la section de mesures climatiques SDZ1261 (rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B).

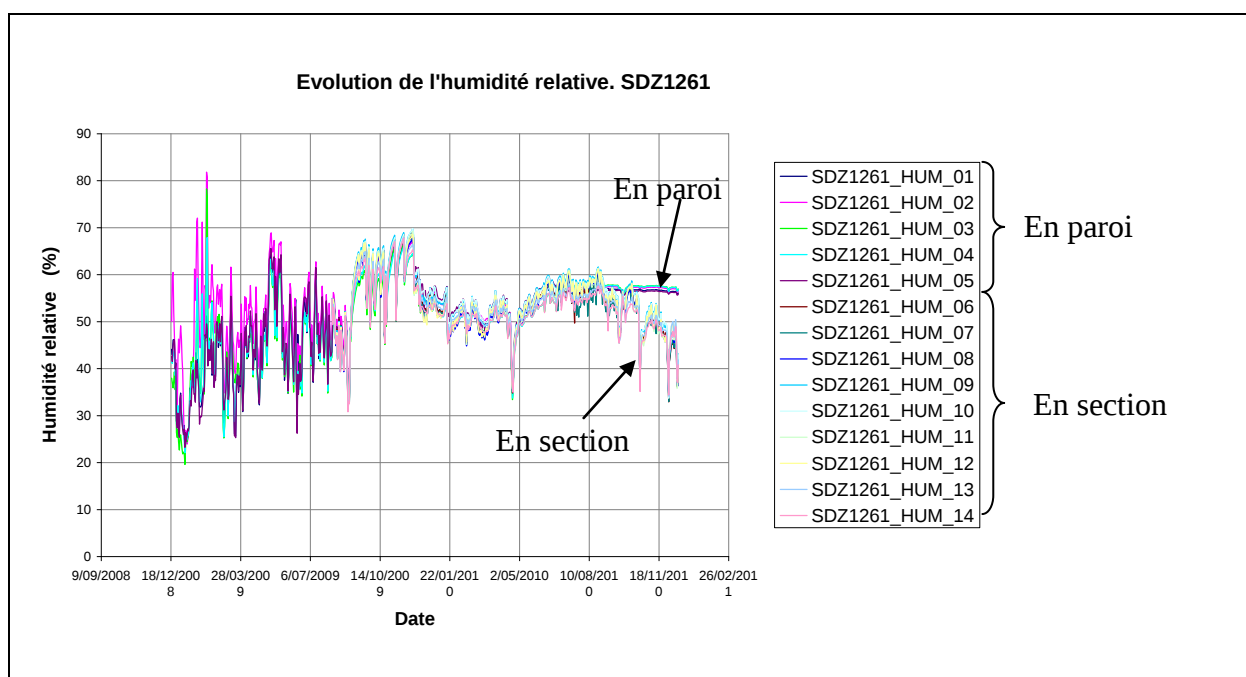


Figure 159 : Evolution de l'humidité relative dans la section de mesures climatiques SDZ1261 (rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B).

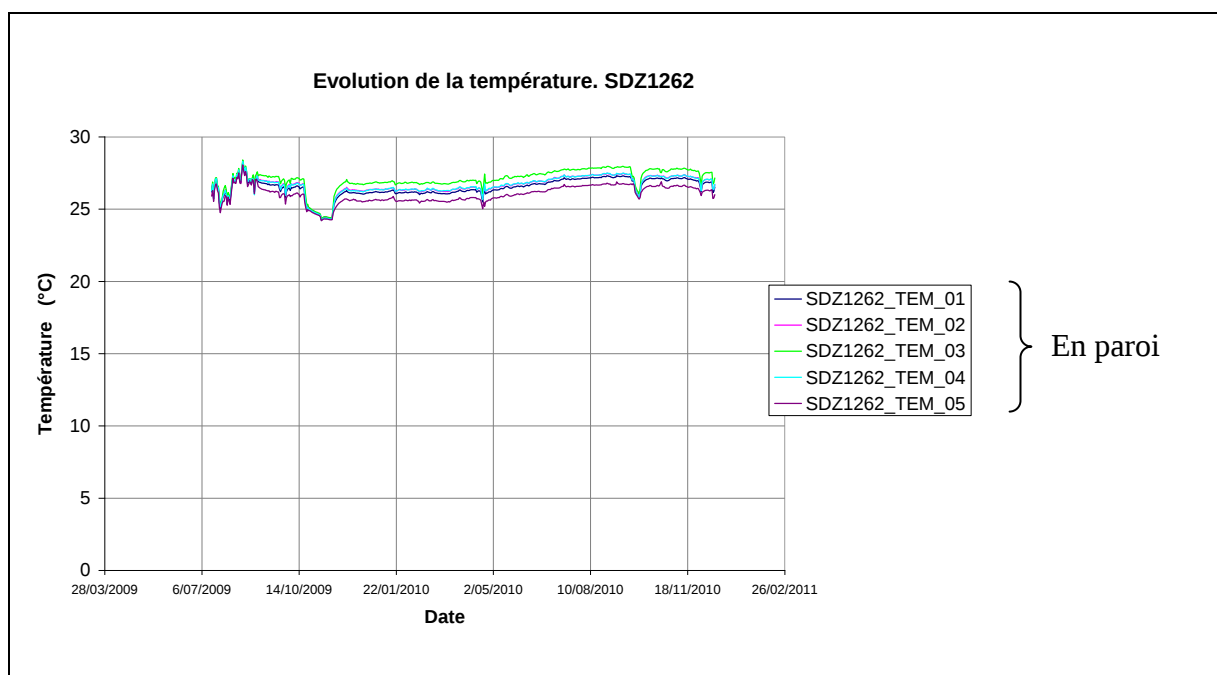


Figure 160 : Evolution de la température dans la section de mesures climatiques SDZ1262 (rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B).

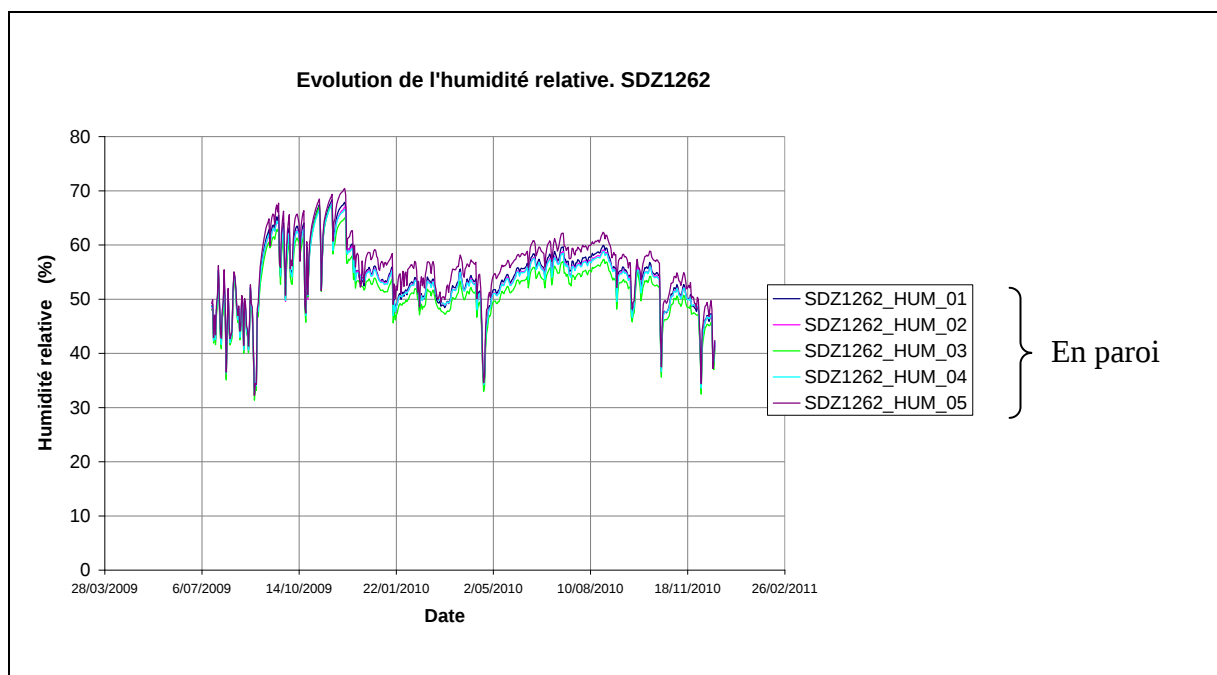


Figure 161 : Evolution de l'humidité relative dans la section de mesures climatiques SDZ1262 (rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B).

8.2 Annexe 2 : Mesures de pression dans les forages SDZ

Des mesures de pression ont été effectuées dans les forages situés dans la zone de galerie non revêtue dédiée à l'expérience SDZ : forages SDZ1241 à 1245 (rapport Andra D.RP.AMFS.09.0087.B).

La **Figure 162** détaille la position des forages et des capteurs de mesures de pression (PRE). Les **Figure 163**, **Figure 164**, **Figure 165**, **Figure 166** et **Figure 167** représentent l'évolution des mesures au cours du temps. L'acquisition a débuté le 23/25 juin 2009.

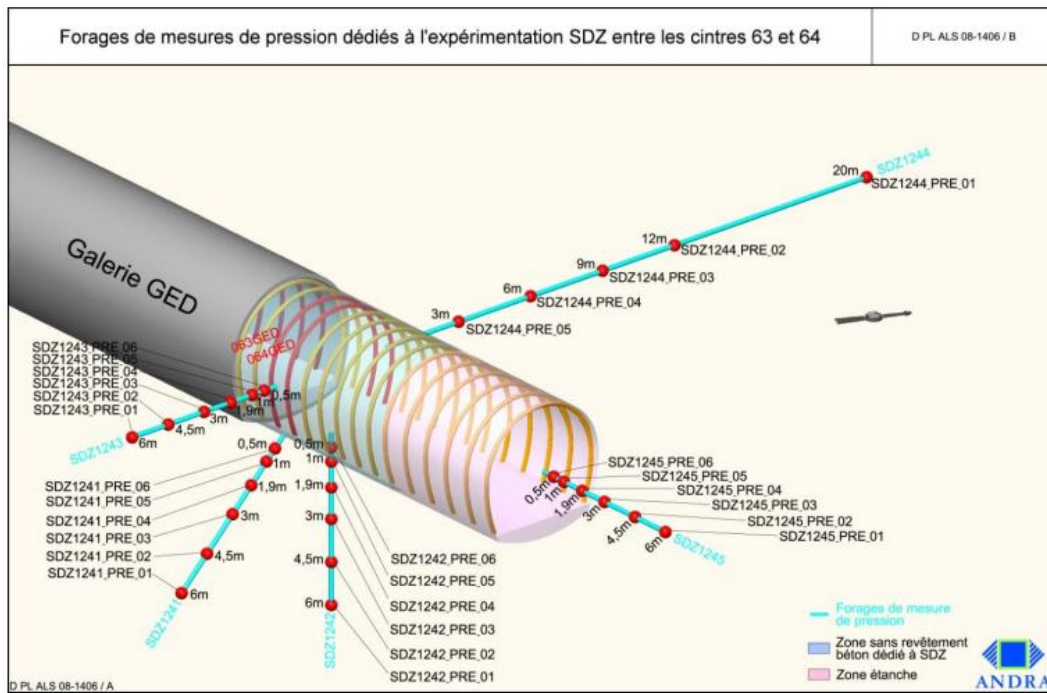


Figure 162 : Localisation des forages de mesures de pression SDZ.

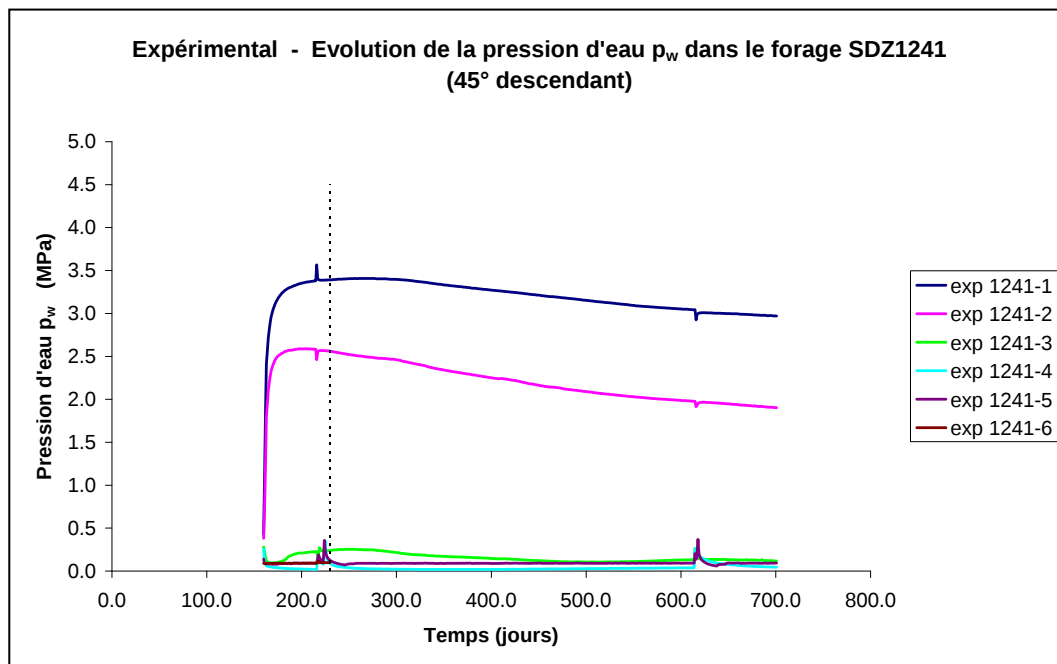


Figure 163 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1241 descendant à 45°.

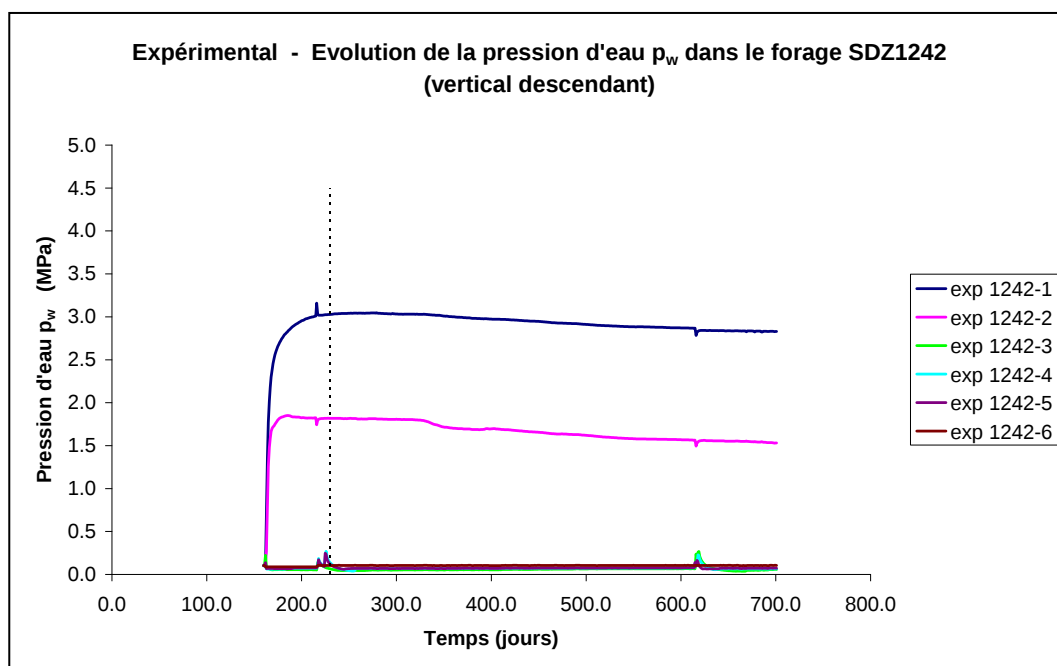


Figure 164 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1242 descendant verticalement.

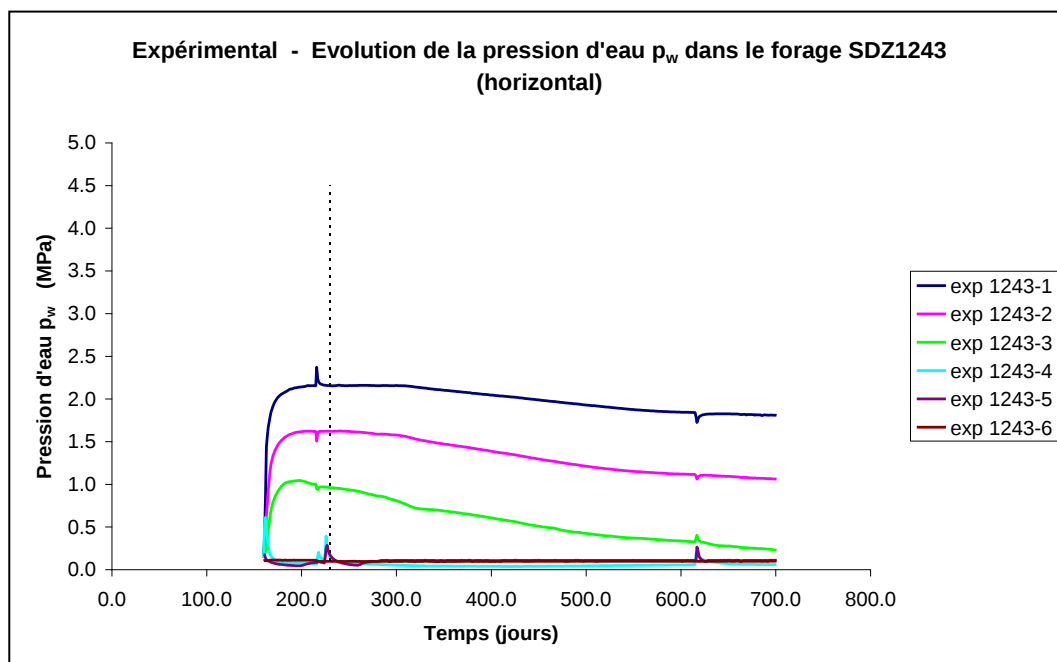


Figure 165 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1243 horizontal.

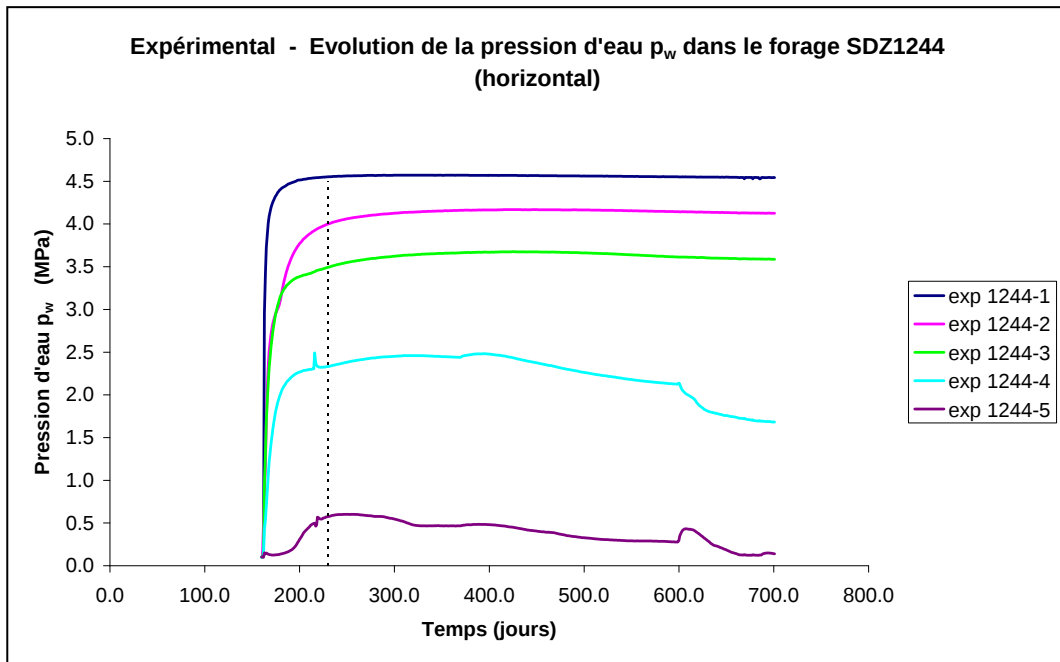


Figure 166 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1244 horizontal « lointain ».

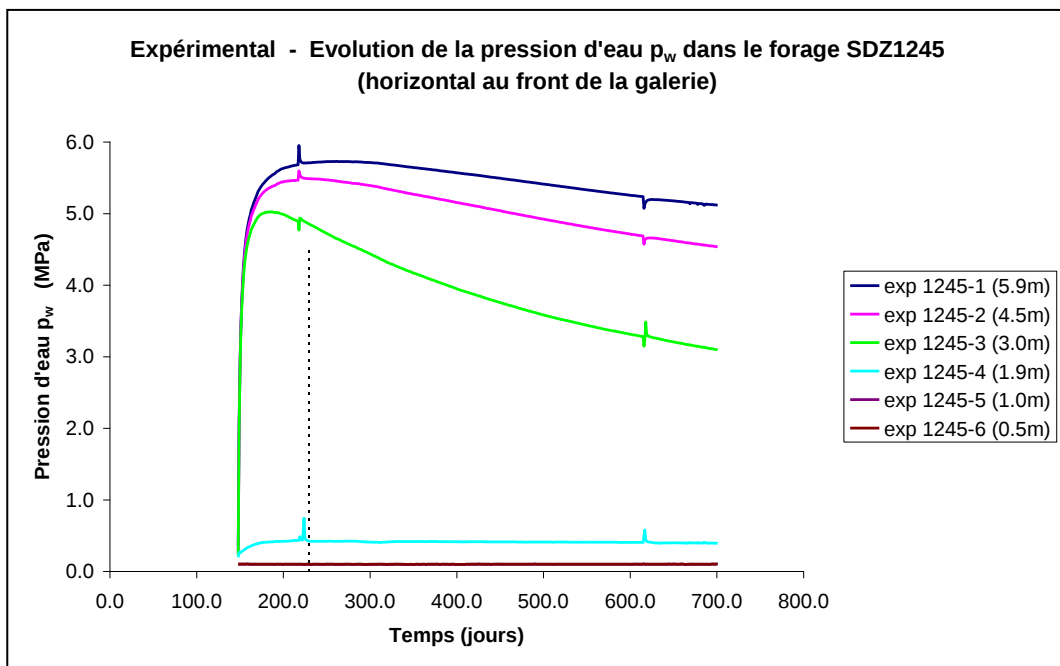


Figure 167 : Evolution de la pression d'eau dans le forage SDZ1245 horizontal au front de la galerie.

8.3 Annexe 3 : Mesures de pression dans les forages OHZ

Des mesures de pression ont été effectuées dans les forages situés dans la zone de galerie revêtue dédiée à l'expérience SDZ : forages OHZ 1221 à 1223 (rapport Andra D.RP.AMFS.11.0016).

La **Figure 168** détaille la position des forages de mesures de pression (PRE). Les **Figure 169**, **Figure 170** et **Figure 171** représentent l'évolution des mesures au cours du temps. L'acquisition a débuté le 12 juin 2009.

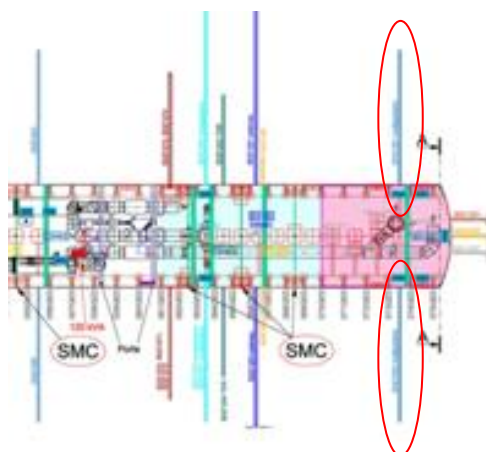


Figure 168 : Localisation des forages de mesures de pression OHZ.

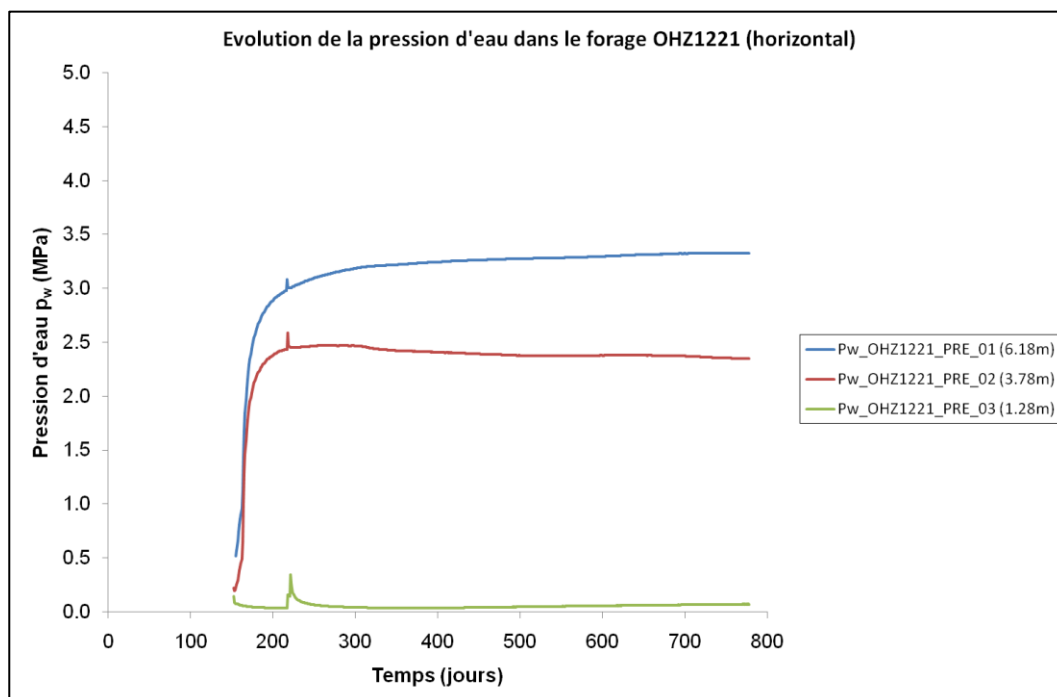


Figure 169 : Evolution de la pression d'eau dans le forage OHZ1221 horizontal.

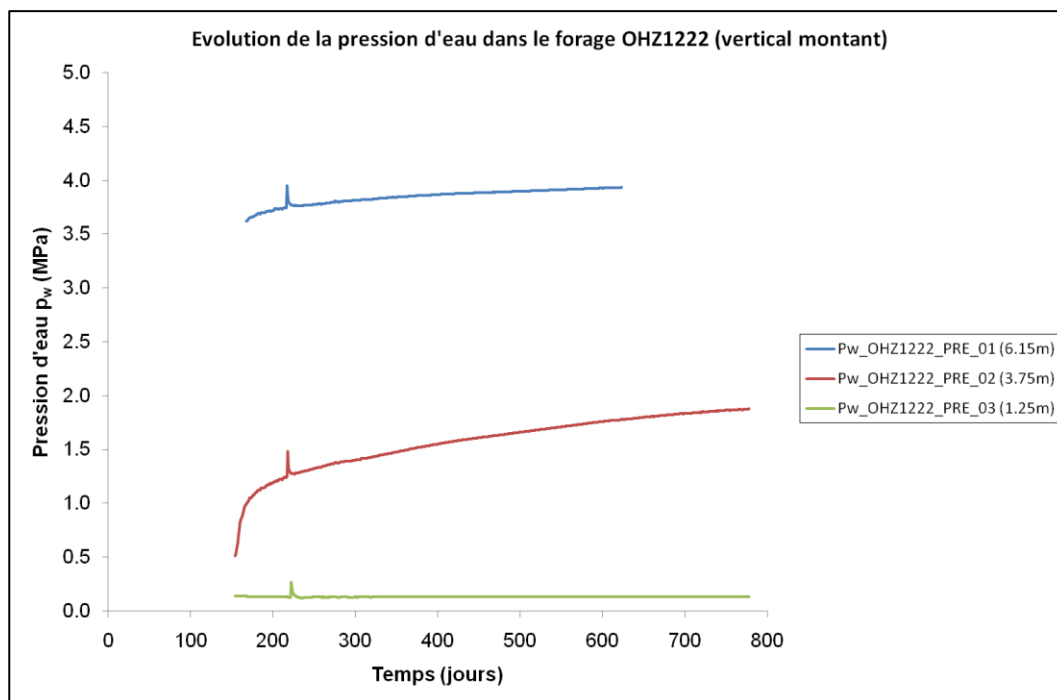


Figure 170 : Evolution de la pression d'eau dans le forage OHZ1222 vertical montant.

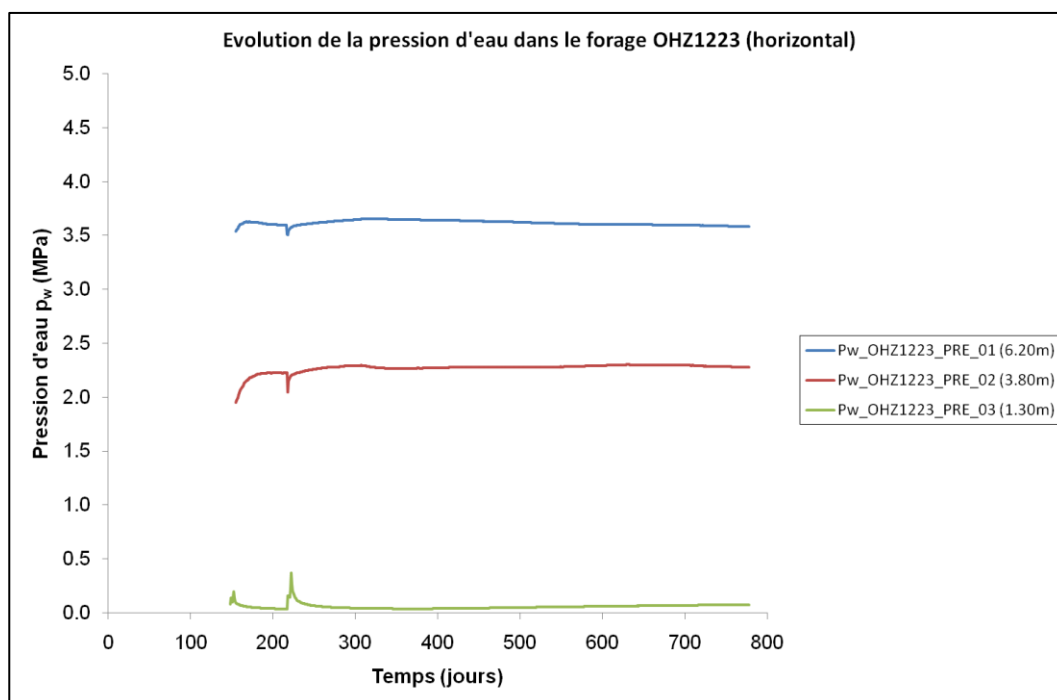


Figure 171 : Evolution de la pression d'eau dans le forage OHZ1223 horizontal.