

CONSULTING

Recharge maîtrisée de la nappe du Bas-
Gapeau sur la commune de Hyères

Modélisation hydrogéologique de la nappe du Bas-Gapeau

Sommaire

1.....	Préambule.....	5
2.....	Synthèse bibliographique – Vallée du Gapeau	6
2.1	Géologie	6
2.2	Hydrogéologie	10
2.2.1	Piézométrie.....	10
2.2.2	Variations piézométriques	13
2.2.3	Paramètres hydrodynamiques	17
2.2.4	Prélèvements.....	18
2.2.5	Salinité	20
2.2.6	Réalimentation de nappe	21
2.3	Hydrologie	22
2.3.1	Le Gapeau	22
2.3.2	Le Roubaud	26
3.....	Objectifs de la modélisation.....	27
3.1	Objectifs	27
3.2	Logiciel utilisé	27
4.....	Modèle conceptuel	28
4.1	Géométrie du modèle	28
4.1.1	Extensions et limites du modèle.....	28
4.1.2	Structure du modèle – discrétisation	30
4.2	Limites hydrogéologiques	31
4.3	Flux entrants et sortants	32
4.3.1	Recharge	32
4.3.2	Mer Méditerranée	33
4.3.3	Prélèvements.....	34
4.3.4	Rivière du Gapeau.....	35
4.3.5	Vallée du Roubaud	36
5.....	Calage.....	37
5.1	Régime permanent	37
5.1.1	Calage	37
5.1.2	Restitution de la piézométrie	38
5.2	Régime transitoire	38

5.2.1	Calage	39
5.2.2	Restitution de la piézométrie	40
5.2.3	Conclusion	45

6..... Simulations – Définition des scénarios 46

6.1	Projet de réalimentation – AquaRenova 2.....	46
6.2	Définition des scénarios	46
6.2.1	Scénarios.....	46
6.2.2	Prise en compte du changement climatique	47
6.2.3	Traitement et analyse des données climatiques futures	53
6.2.4	Synthèse – chronique hydro-climatique retenue pour les scénarios futurs	56

7..... Simulations – Résultats 57

7.1	Scénarios rétrospectifs S0, S1, S2.....	57
7.1.1	Impact sur la piézométrie	57
7.1.2	Bilan des flux	64
7.1.3	Synthèse.....	65
7.2	Scénarios futurs 3 et 4	65
7.2.1	Impact sur la piézométrie	65
7.2.2	Bilan des flux	69
7.2.3	Synthèse.....	71
7.3	Scénarios futurs 3bis et 4bis	71
7.3.1	Impact sur la piézométrie	71
7.3.2	Bilan des flux	75
7.3.3	Synthèse.....	77
7.4	Scénario de pollution	77
7.4.1	Description du scénario	77
7.4.2	Résultats.....	80

8..... Conclusion 89

Annexe 1 Calage – piézométrie simulée / piézométrie observée... 90

Table des illustrations

Figure 1 : Carte géologique au 1/50 000 de la basse plaine du Gapeau.....	6
Figure 2 : Interprétation des sondages électriques réalisés dans la basse plaine du Gapeau – BRGM 1967	7
Figure 3 : Toit du substratum	8
Figure 4 : Epaisseur des alluvions.....	9
Figure 5 : Ouvrages de suivi de la nappe du Gapeau.....	10
Figure 6 : Carte piézométrique Basses eaux - Octobre 1966 - BRGM.....	11
Figure 7 : Carte piézométrique Hautes eaux – Avril Mai 1967 - BRGM	12
Figure 8 : Carte piézométrique des 25 et 26 janvier 2012	13
Figure 9 : Variations piézométriques des ouvrages suivis entre janvier 2000 et août 2025.....	14
Figure 10 : Variations piézométriques de l'ouvrage P134B et pluviométrie à la station d'Hyères	15
Figure 11 : Variations piézométriques et pluviométrie lors de l'année 2018.....	15
Figure 12 : Variations piézométriques de l'ouvrage P134B et débit mesuré à la station de Ste-Eulalie.....	16
Figure 13 : Variations piézométriques et débit mesuré à la station de Ste-Eulalie lors de l'année 2018.....	16
Figure 14 : Forages exploités du Bas-Gapeau	18
Figure 15 : Débits journaliers moyens mensuels prélevés à l'échelle des deux champs captant	19
Figure 16 : Débits totaux prélevés par l'agriculture dans la nappe du Gapeau entre 2000 et 2010	19
Figure 17 : Evolution des conductivités à 8 m de profondeur depuis 2010 (Sondalp) pour le Pz4, Pz5, P11 et Pz14 ...	20
Figure 18 : Localisation du bassin d'infiltration AquaRenova 1	21
Figure 19 : Volume d'eau brute réalimentée par année depuis la mise en place du site 1	22
Figure 20 : Moyennes interannuelles calculées à partir des 746 QmM (débits moyens mensuels) les plus valides du 01/02/1961 au 01/10/2025 (Hydroportail)	23
Figure 21 : Le Gapeau	23
Figure 22 : Courbe de tarage à la station Ste-Eulalie (2023-2025)	24
Figure 23 : Tendance du débit journalier moyen annuel (QA) (non significative)	25
Figure 24 : Tendance hautes eaux du débit journalier maximal annuel (QJXA) (non significative).....	25
Figure 25 : Tendance basses eaux du débit journalier minimal annuel (QMNA) (significative)	26
Figure 26 : Extension du modèle.....	28
Figure 27 : Toit du substratum	29
Figure 28 : Structure du modèle (exagération verticale x25).....	30
Figure 29 : Conditions aux limites du modèle	31
Figure 30 : Evolution de la pluie efficace entre 2000 et 2025.....	32
Figure 31 : Volume d'eau brute réalimentée par année	33
Figure 32 : Variations journalières de la mer (m NGF) mesurées à la station de Toulon entre janvier 2000 et décembre 2024.....	34
Figure 33 : Volumes moyens prélevés entre le 25 et le 26 janvier 2012	34
Figure 34 : Profil en long du Gapeau – Octobre 2010 et entrée modèle	35
Figure 35 : Champs de perméabilité du modèle	37
Figure 36 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime permanent	38
Figure 37 : Ouvrages utilisés pour le calage en régime transitoire.....	39
Figure 38 : Champ de coefficient d'emménagement du modèle.....	40
Figure 39 : Restitution de la piézométrie – localisation des ouvrages	41
Figure 40 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – P134B.....	42
Figure 41 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – Pz2	43
Figure 42 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – Pz5	44
Figure 43 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – Pz15	45
Figure 44 : Cascade d'incertitudes (Simonet, 2005 d'après Viner, 2001).....	48
Figure 45 : Trajectoires d'émissions des scénarios RCP du GIEC à l'échelle planétaire.....	48
Figure 46 : Changements projetés : moyenne d'ensemble et d'incertitudes	50
Figure 47 : Pourcentage de l'incertitude totale expliquée par chaque source d'incertitude.....	50
Figure 48 : Réponses individuelles des modèles : Effets principaux.....	51
Figure 49 : Particularités régionales sous scénario de fortes émissions en fin de siècle pour le climat et l'hydrologie ..	52

Figure 50 : Corrélation entre les débits journaliers mensuels moyens calculés sur la période 1976/2005 et ceux mesurés sur la même période à la station	53
Figure 51 : Débits calculés non influencés et débits corrélés influencés à la station Ste Eulalie – H2/RCP8.5/Narratif Orange.....	54
Figure 52 : Débits moyens inter mensuels sur les périodes 2000-2009, 2000-2024 et 2041-2066.....	55
Figure 53 : Ouvrages de la nappe du Gapeau.....	57
Figure 54 : Niveaux piézométriques du Pz5 pour le scénario S1 et S2 et comparaison au scénario S0	58
Figure 55 : Niveaux piézométriques du Pz5 pour le scénario S1 et S2 et comparaison au scénario S0 entre 2016 et 2024.....	59
Figure 56 : Niveaux piézométriques du Pz4 pour le scénario S1 et S2 et comparaison au scénario S0	60
Figure 57 : Niveaux piézométriques du Pz4 pour le scénario S1 et S2 et comparaison au scénario S0 entre 2016 et 2024.....	60
Figure 58 : Niveaux piézométriques du Pz14 pour le scénario S1 et S2 et comparaison au scénario S0	61
Figure 59 : Niveaux piézométriques du Pz14 pour le scénario S1 et S2 et comparaison au scénario S0 entre 2016 et 2024.....	62
Figure 60 : Niveaux piézométriques du Pz11 pour le scénario S1 et S2 et comparaison au scénario S0	63
Figure 61 : Niveaux piézométriques du Pz11 pour le scénario S1 et S2 et comparaison au scénario S0	63
Figure 62 : Bilan des échanges entre la nappe et la Méditerranée – scénarios rétrospectifs	64
Figure 63 : Bilan des échanges entre la nappe et la rivière– scénarios rétrospectifs	64
Figure 64 : Niveaux piézométriques du Pz5 pour le scénario 3 et 4	66
Figure 65 : Niveaux piézométriques du Pz4 pour le scénario 3 et 4	67
Figure 66 : Niveaux piézométriques du Pz14 pour le scénario 3 et 4	68
Figure 67 : Niveaux piézométriques du Pz11 pour le scénario 3 et 4	69
Figure 68 : Bilan des échanges entre la nappe et la Méditerranée – scénarios climat futur	70
Figure 69 : Bilan des échanges entre la nappe et la rivière– scénarios climat futur	70
Figure 70 : Niveaux piézométriques du Pz5 pour le scénario 3bis et 4bis	72
Figure 71 : Niveaux piézométriques du Pz4 pour le scénario 3bis et 4bis	73
Figure 72 : Niveaux piézométriques du Pz14 pour le scénario 3bis et 4bis.....	74
Figure 73 : Niveaux piézométriques du Pz11 pour le scénario 3bis et 4bis.....	75
Figure 74 : Bilan des échanges entre la nappe et la Méditerranée – scénarios climat futur bis.....	76
Figure 75 : Bilan des échanges entre la nappe et la rivière– scénarios climat futur bis.....	76
Figure 76 : Scénario de pollution.....	77
Figure 77 : Chronogramme du scénario de pollution	79
Figure 78 : Pollutogramme observé au Père Eternel, G1, G7 et au Pz7	80
Figure 79 : Protocole lors de la détection d'une pollution.....	81
Figure 80 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – Pz6	91
Figure 81 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – Pz10	91
Figure 82 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – Pz14	92
Figure 83 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – Pz19	92
Figure 84 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – Pz20	93

Liste des tableaux

Tableau 1 : Données disponibles sur les niveaux piézométriques de la nappe.....	13
Tableau 2 : Paramètres calculés lors du pompage d'essai sur le Père Eternel.....	17
Tableau 3 : Scénarios simulés dans le modèle	46
Tableau 4 : Narratifs du projet Explore2	49
Tableau 5 : Comparaison des débits caractéristiques calculés pour les périodes 2000-2009, 2000-2025 et 2041-2066.....	54
Tableau 6 : Recharge moyenne annuelle.....	55
Tableau 7 : Evolution des concentrations en polluant après la pollution	82

1. PREAMBULE

La nappe alluviale du Bas Gapeau constitue la principale ressource en eau potable de Toulon Provence Méditerranée (TPM). Entre 2003 et 2011, de forts déficits hydriques couplés à l'exploitation de deux champs captant ont menés à l'intrusion du biseau salé jusqu'aux forages du Père Eternel.

Un dispositif de recharge maîtrisée de l'aquifère AquaRenova1 a été mis en place en 2015 pour compenser en partie le déficit de recharge hivernale de la nappe du Bas Gapeau.

Un projet d'extension du dispositif est en cours, consistant à augmenter la capacité instantanée de recharge actuelle de 50 l/s, pour passer à 150 l/s. Un nouveau bassin de réalimentation sera créé à moins de 150 m du site déjà existant. L'exploitation du dispositif est effectuée par Suez Eau France.

Ce nouveau bassin de réalimentation vise également à sécuriser la distribution d'eau sur la commune d'un point de vue quantitatif et qualitatif, en renforçant la recharge hivernale de la nappe et ainsi mieux maîtriser le biseau salé sur la nappe du Gapeau.

Suez Consulting a été missionné pour l'actualisation du modèle hydrogéologique de la nappe du Gapeau. Ce modèle permet de reconstituer les écoulements actuels et d'évaluer l'intérêt et l'impact du projet de réalimentation sur l'aquifère, en prenant en compte l'impact du changement climatique sur la ressource.

2. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE – VALLEE DU GAPEAU

2.1 Géologie

Le secteur étudié ici correspond à la basse plaine du Gapeau. La carte géologique est présentée Figure 1. Cette plaine deltaïque, dans laquelle débouche également le Roubaud, est limitée par les reliefs cristallins suivants :

- À l'est et au nord, le massif des Maures, en rive gauche du Gapeau ;
- Au nord-ouest le massif des Maurettes ;
- A l'ouest, le Mont des Oiseaux.

La basse plaine du Gapeau est limitée au sud-est par la mer Méditerranée.

La plaine alluviale est composée d'un épandage d'alluvions würmiennes caractérisées par des dépôts fluviaux du Gapeau, constituées d'horizons très perméables de graviers, sables, sables argileux et argiles, dont la position et l'épaisseur sont variables. La puissance des alluvions peut atteindre environ 25 m.

Ces dépôts présentent une géométrie complexe liée en grande partie à la présence de sillons correspondant à d'anciens cours du Gapeau.

La présence de ces sillons engendre un modelé du substratum géologique très variable.

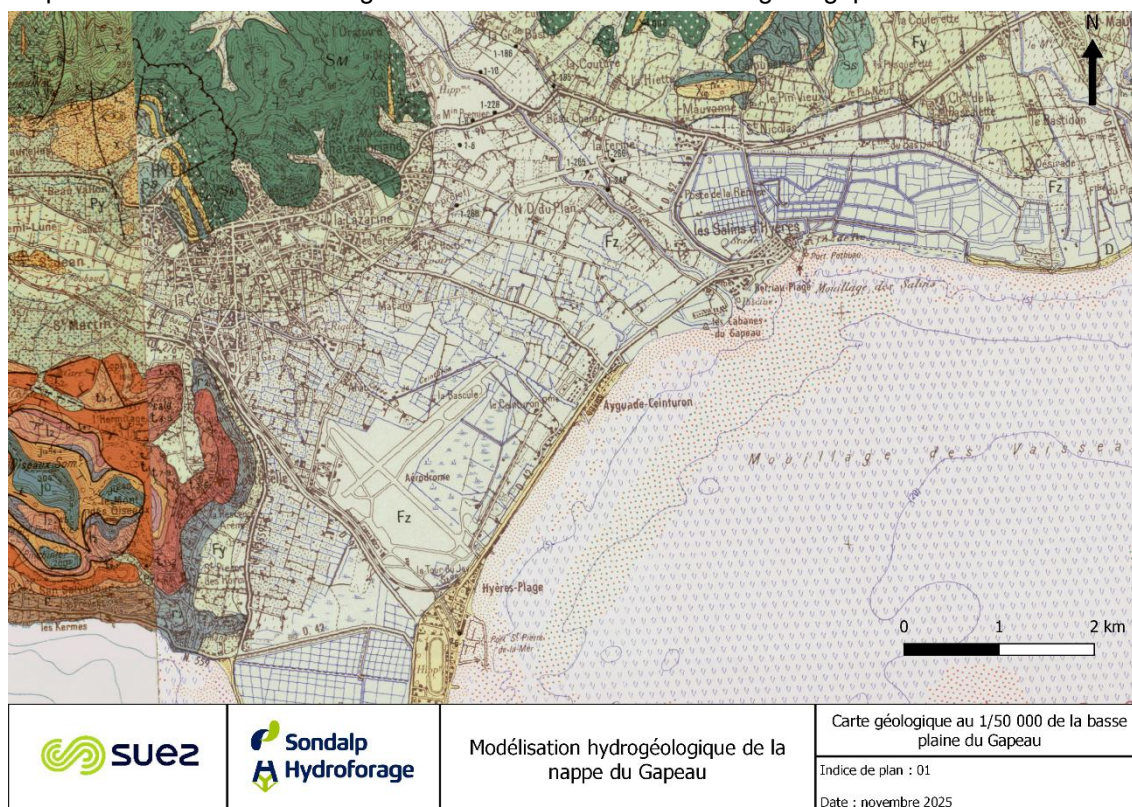


Figure 1 : Carte géologique au 1/50 000 de la basse plaine du Gapeau

Des sondages électriques ont été réalisés par le BRGM dans les années 1960. Ces sondages ont permis d'identifier les horizons suivants :

- Un horizon de surface, de résistivité faible, correspondant à une couverture à la perméabilité réduite. Cet horizon, à l'épaisseur variable peut-être absent ;
- Un horizon intermédiaire, plus résistant, correspondant aux alluvions aquifères ;
- Un substratum plutôt conducteur, alluvionnaire ou cristallin.

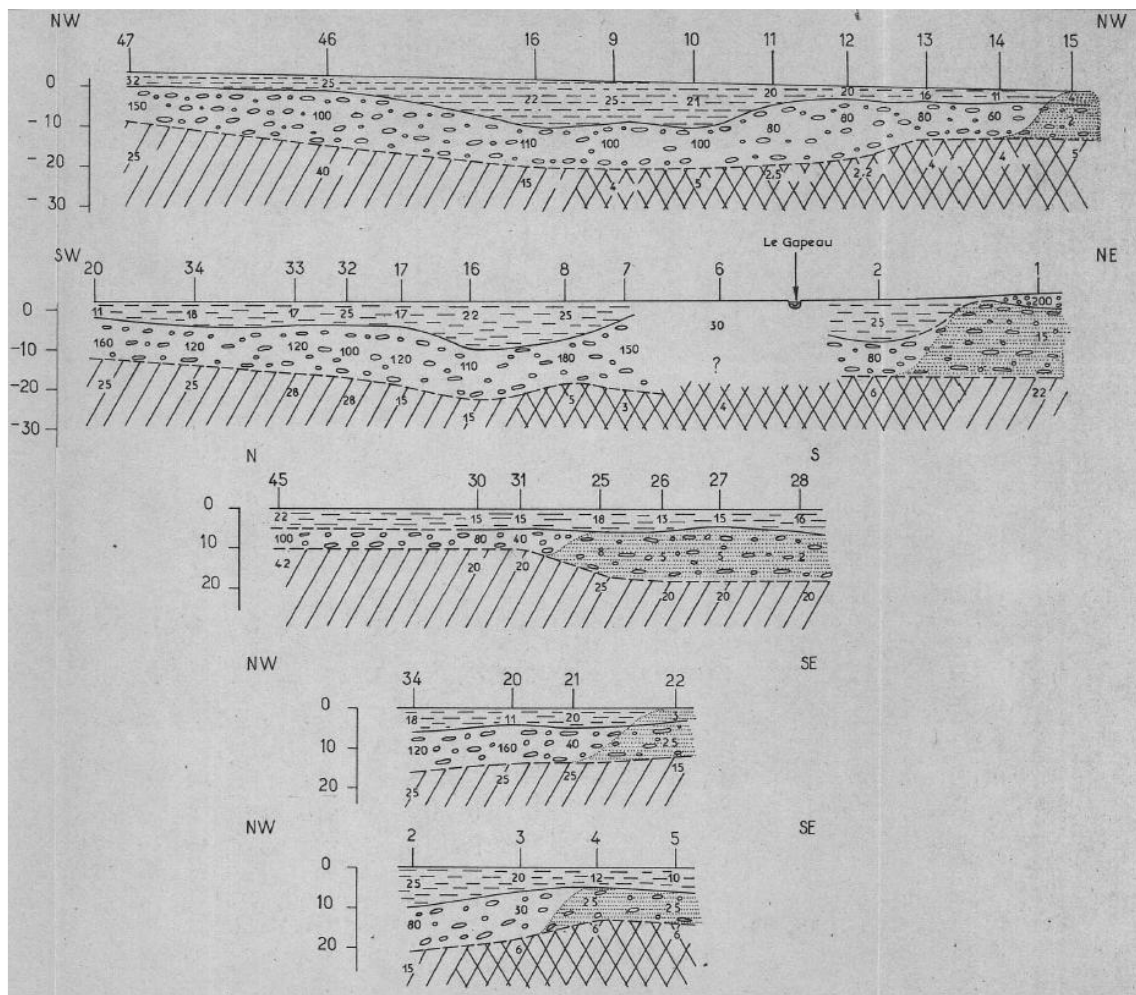


Figure 2 : Interprétation des sondages électriques réalisés dans la basse plaine du Gapeau – BRGM 1967

La nature du substratum est variable d'un point de vue lithologique. On rencontre sur la zone d'étude (Figure 3) :

- Des phyllades ;
- Des grès permien ;
- Des argiles.

Le substratum de l'aquifère s'approfondit vers la mer.

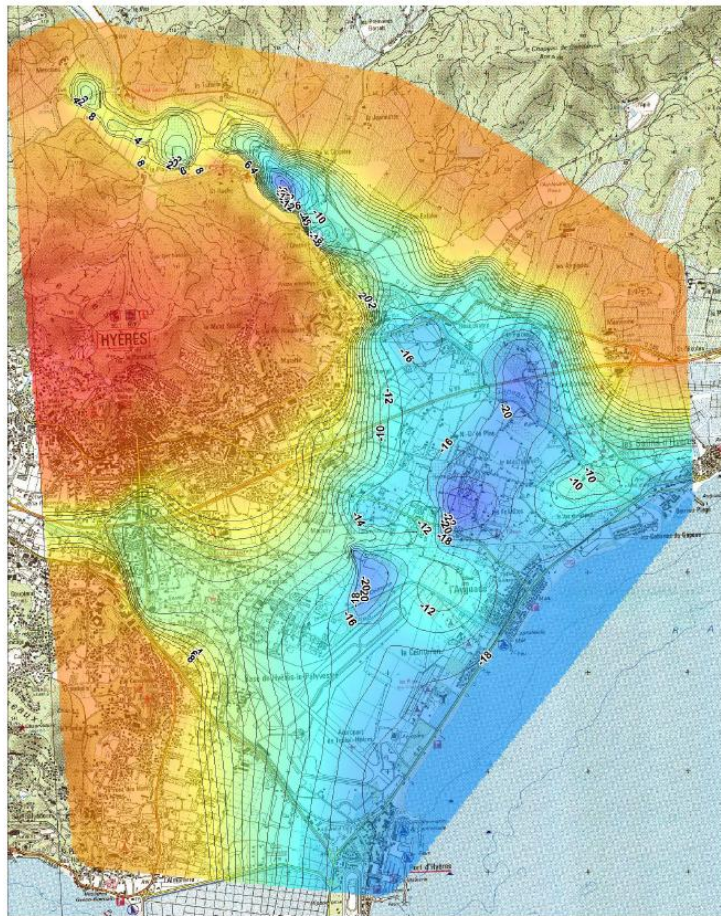


Figure 3 : Toit du substratum

Concernant les alluvions du Gapeau, elles sont épaisses, notamment dans le chenal où s'écoule actuellement la rivière, où les profondeurs peuvent atteindre environ 35 m dans le secteur de Plan du Pont, et jusqu'à 25 m en aval, dans le delta.

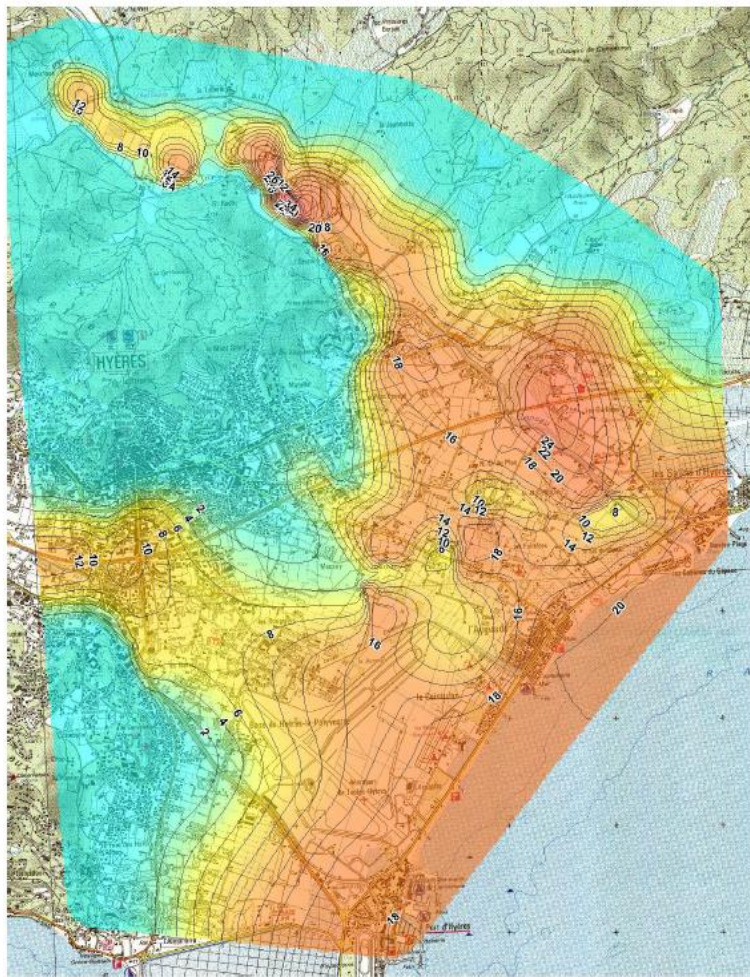


Figure 4 : Epaisseur des alluvions

Les coupes géologiques des sondages disponibles sur la BSS dans la plaine d'Hyères et dans le secteur amont de Plan du Pont ont également permis de caractériser :

- Une couverture à dominante argileuse dans la zone deltaïque, pouvant être localement absente ;
- En Amont de la RN98, dans le secteur des champs-captant, la couverture est de nature plus limoneuse.

L'épaisseur de la couverture est assez variable, mais elle a globalement tendance à augmenter vers l'aval, où elle peut atteindre une dizaine de mètres. Elle est absente dans certains secteurs, notamment en bordure du Gapeau. D'une manière générale, dans le delta, la couverture est importante et sa nature, argileuse, ne permet pas un transfert d'eau rapide.

2.2 Hydrogéologie

2.2.1 Piézométrie

Il existe sur la basse-plaine du Gapeau un réseau piézométrique d'une vingtaine d'ouvrage, dont il est possible d'avoir les niveaux piézométriques. Le réseau AEP est composé de deux champs captant :

- Le champ captant du Golf Hôtel, composé de 7 ouvrages (GOLFF1, GOLFF2, GOLFF3, GOLFF4, GOLFF5, GOLFF7 et GOLFF1) ;
- Le champ captant du Père Eternel, composé de deux puits (Pe2haut et Pe2bas).

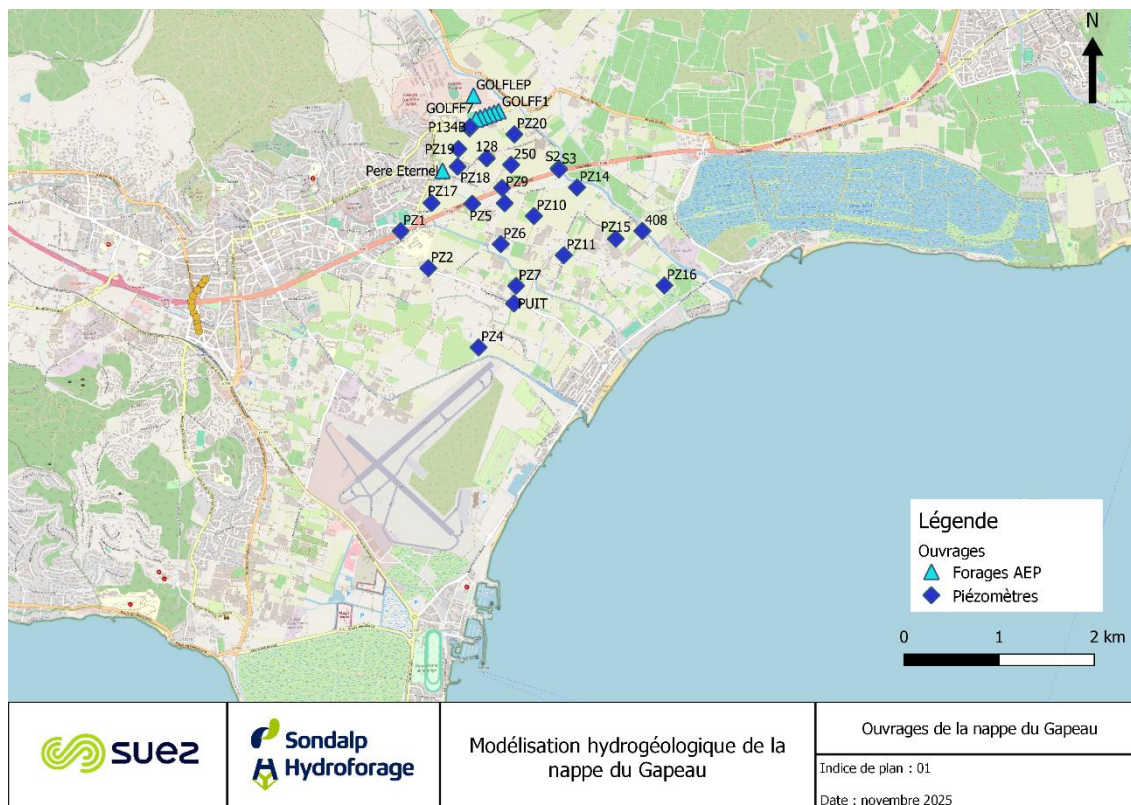


Figure 5 : Ouvrages de suivi de la nappe du Gapeau

De nombreuses cartes piézométriques du secteur existent, les plus anciennes remontant à 1966, tracées en hautes et basses eaux (Figure 6, Figure 7). Ces cartes mettent en évidence :

- Une allure très plate de la nappe dans la plaine d'Hyères ;
- Une alimentation de la plaine par :
 - Le secteur de Plan du Pont ;
 - La vallée du Roubaud, entre les Maurettes et le Mont des Oiseaux.

Les courbes piézométriques indiquent également une alimentation par les zones de piedmont. Le ruissellement sur ces massifs est prépondérant eu égard à la nature des formations, peu perméables. Néanmoins une partie de l'eau peut s'infiltrer dans les secteurs altérés et s'écouler vers la plaine. Toutefois le gradient devient très important et traduit une alimentation réduite, liée à :

- Une perméabilité faible des formations concernées ;
- La remontée du substratum ;
- L'altitude plus importante du sol.

On observe de plus peu de différence entre les deux états hydrologiques (hautes et basses eaux), ce qui confirme la faible quantité d'eau en jeu. Ainsi ces zones ne constituent pas une nappe à proprement parler, mais pourraient être assimilées à un ruissellement de sub-surface en moyenne peu contributif. Néanmoins, il est possible que cette alimentation contribue de manière plus importante lors d'événements pluvieux.

Il est important de noter que ces cartes sont représentatives d'un état hydrogéologique ancien et distinct de l'actuel, avec des pressions de prélèvements sur la nappe réduites depuis, liés au développement du réseau de la Société du Canal de Provence depuis 1993.

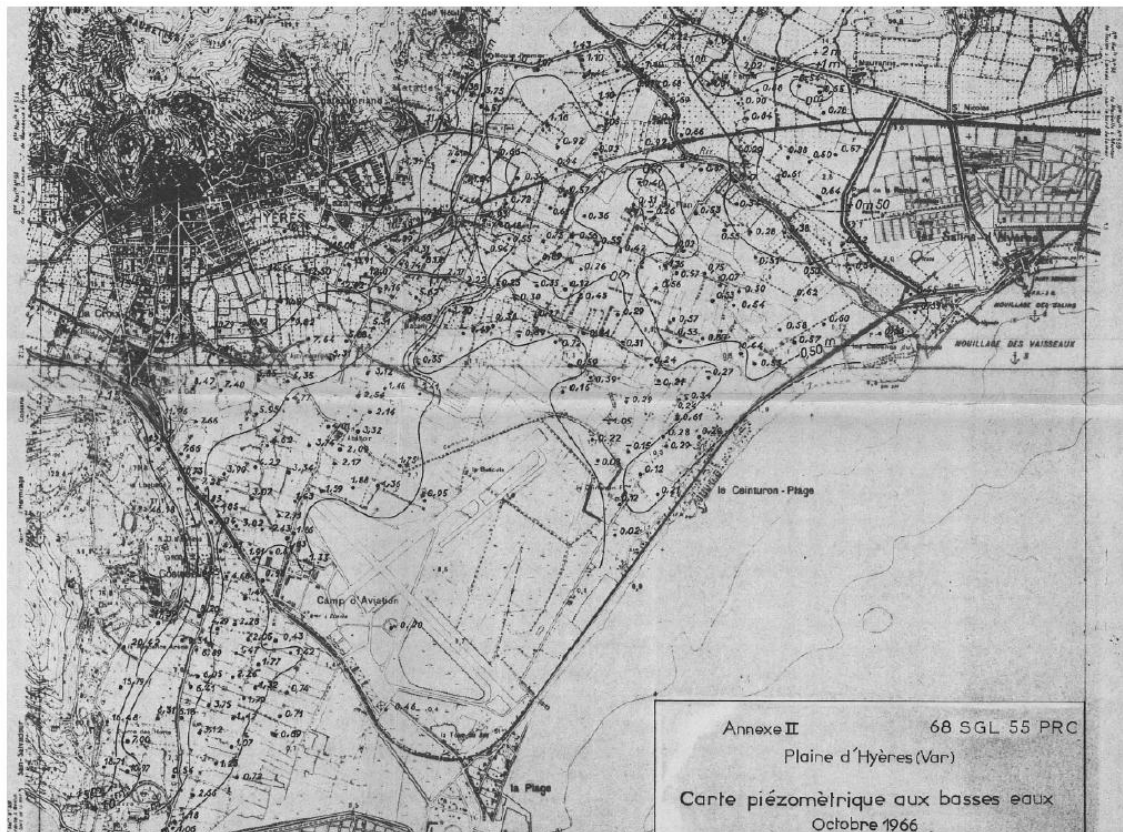


Figure 6 : Carte piézométrique Basses eaux - Octobre 1966 - BRGM

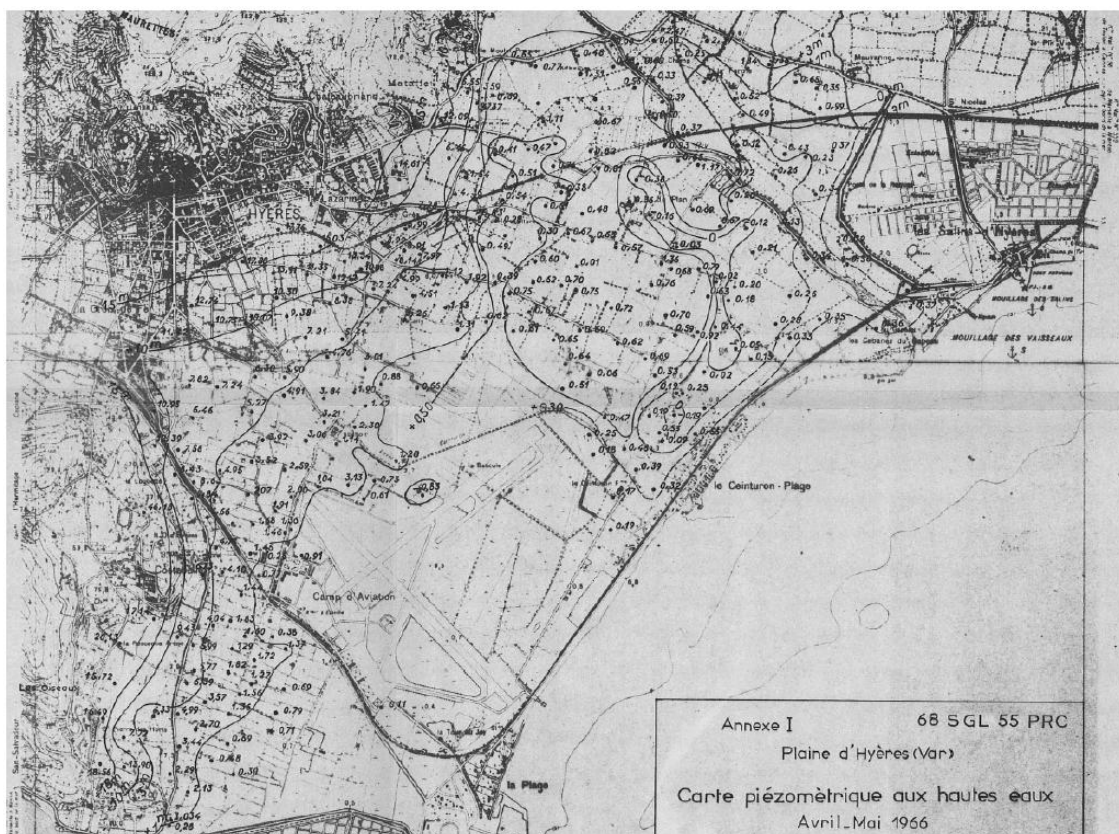


Figure 7 : Carte piézométrique Hautes eaux – Avril Mai 1967 - BRGM

Une campagne piézométrique a été réalisée par SAFEGE les 25 et 26 janvier 2012 (Figure 8). Les mesures ont porté sur le réseau de piézomètres existant, complétées par des mesures sur quelques ouvrages alentours sur les eaux superficielles. Ces points ont fait l'objet d'un nivellement précis.

Cette carte met en évidence :

- Le très faible gradient de la nappe aux alentours de la RD98 ;
- Une forte augmentation du gradient de la nappe dans le quartier des Fontêtes, qui se réduit plus à l'aval, probablement liée au barrage anti-sel sur le Gapeau ;
- L'influence des captages AEP du Père Eternel et du Golf Hôtel ;
- Une zone d'alimentation de la nappe par le Gapeau au niveau du pont de la RD98 ;
- Une déconnexion des niveaux relevés dans le Roubaud et dans la nappe, la piézométrie étant plus élevée dans cette dernière.

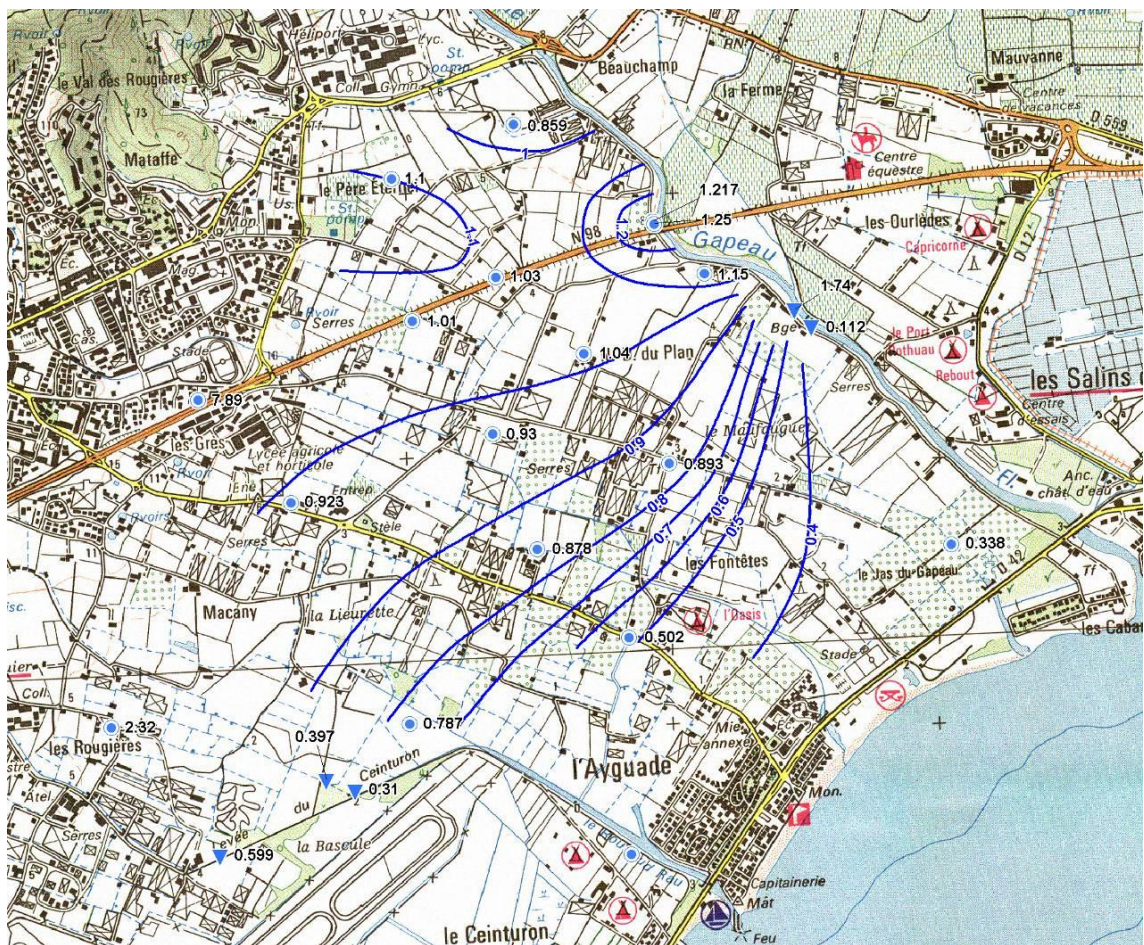


Figure 8 : Carte piézométrique des 25 et 26 janvier 2012

2.2.2 Variations piézométriques

Les études existantes et les données disponibles sur la nappe du bas-Gapeau ont permis d'identifier une période de hautes eaux, pour les mois de janvier, février et mars et une période de basses eaux qui correspond à la période de juillet, août, septembre et octobre. Ce comportement se rapproche des conditions pluviométriques du secteur où la période pluvieuse a lieu d'octobre à février environ.

Les données disponibles sur les variations piézométriques de la nappe sont les suivantes (seules les données en mNGF sont présentées) :

Tableau 1 : Données disponibles sur les niveaux piézométriques de la nappe

Nom	Début des mesures	Dernière donnée utilisée	Pas de mesure
Pz134B (donnée Adès)	le 01/01/2000	21/09/2025	Journalier
Pz2	27/08/2011	02/12/2025	Horaire
Pz5	22/11/2011	02/12/2025	Horaire
Pz6	28/09/2011	29/10/2024	Horaire
Pz7	15/09/2011	02/12/2025	Horaire
Pz9	16/11/2009	01/01/2011	Journalier
Pz10	16/11/2009	02/12/2025	Horaire
Pz14	16/11/2009	02/12/2025	Horaire

Pz15	11/10/2012	03/12/2025	Horaire
Pz19	16/11/2009	02/12/2025	Horaire
Pz20	16/11/2009	02/12/2025	Horaire

Les variations piézométriques de tous ces piézomètres sont présentées sur la Figure 9. Seul le piézomètre P134B présente des valeurs sur la période janvier 2000/août 2025.

A partir de 2001 jusqu'en 2007, les niveaux piézométriques mettent en évidence une diminution de la hauteur d'eau dans la nappe, dû à une combinaison entre la baisse des précipitations sur la période, et à des prélèvements agricoles importants (Figure 10). Cette période correspond à l'intrusion du biseau salé. A partir de 2007, l'augmentation des précipitations et une exploitation réduite du champ captant du père éternel entraînent une remontée de la nappe.

On note que fin 2009 un curage / décolmatage du lit du Gapeau a été réalisé par la ville d'Hyères. Ces travaux ont pu améliorer la connexion entre nappe et rivière et contribuer à la rehausse de niveaux constatée après cette date.

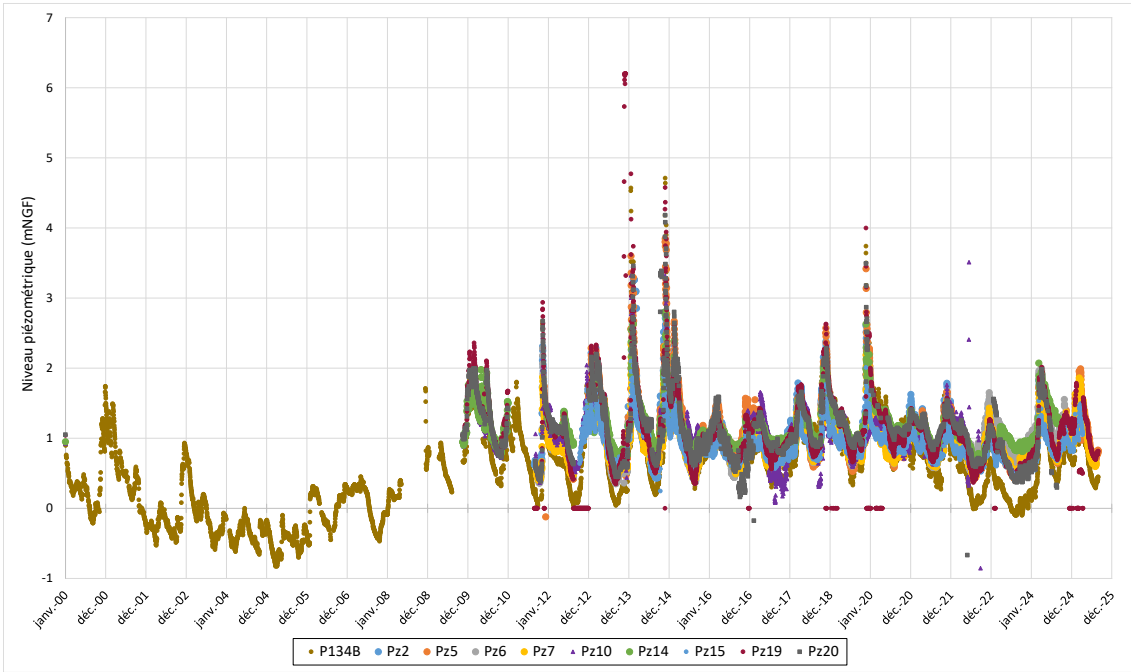


Figure 9 : Variations piézométriques des ouvrages suivis entre janvier 2000 et août 2025

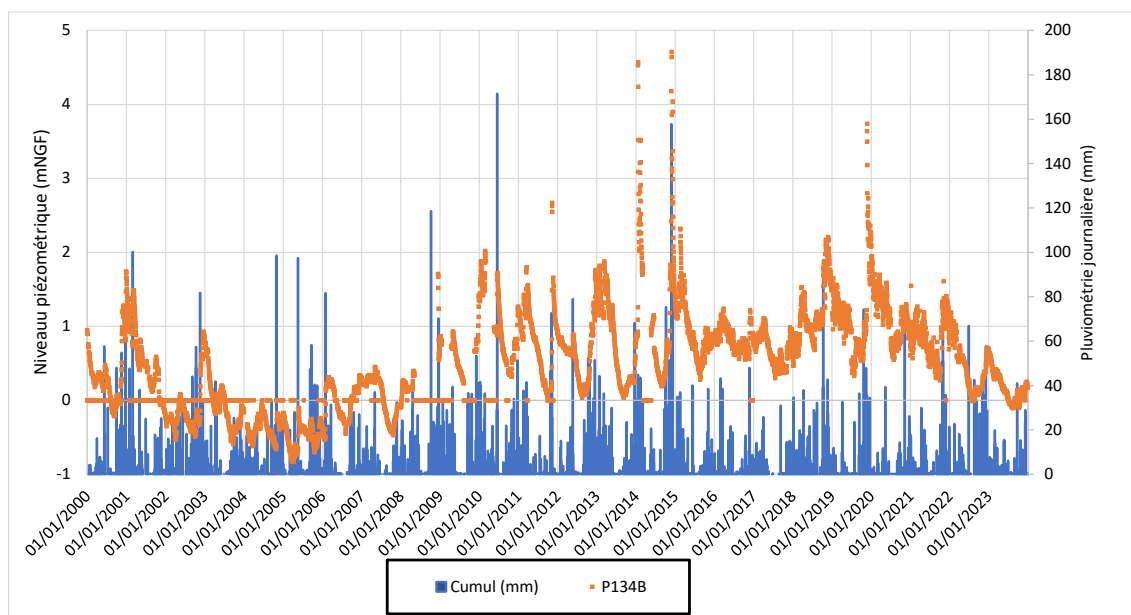


Figure 10 : Variations piézométriques de l'ouvrage P134B et pluviométrie à la station d'Hyères

La Figure 11 se concentre sur l'évolution de la piézométrie en 2018, pour comparer les réactions des piézomètres aux événements pluvieux.

La nappe réagit assez rapidement à l'événement pluvieux, qui se traduit par une remontée du niveau piézométrique.

Le piézomètre Pz2 présente quant-à-lui une réactivité plus rapide, du fait de sa proximité avec les apports de la vallée du Roubaud.

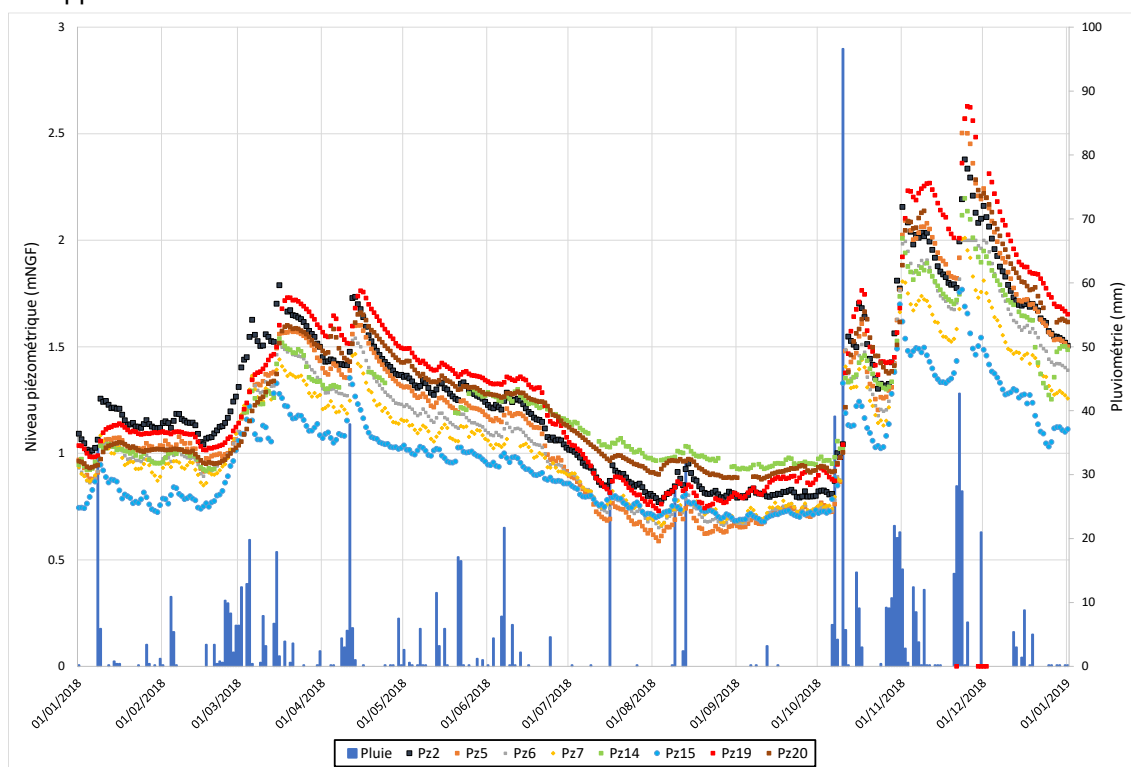


Figure 11 : Variations piézométriques et pluviométrie lors de l'année 2018

La Figure 12 permet de visualiser l'évolution de la piézométrie du Pz134B en fonction du débit du Gapeau entre 2000 et 2024 tandis que la Figure 13 se concentre sur l'évolution de la piézométrie et du débit à la station de Ste-Eulalie en 2018. L'hydrologie du Gapeau semble avoir un fort impact sur la piézométrie de la nappe, avec des pics piézométriques observés au P134B lors des crues du Gapeau. Sur l'année 2018, les variations des niveaux piézométriques suivent celles du Gapeau : les pics de crues entraînent une remontée rapide des niveaux, et la baisse des débits entre mai et octobre concorde avec la baisse des niveaux piézométriques.

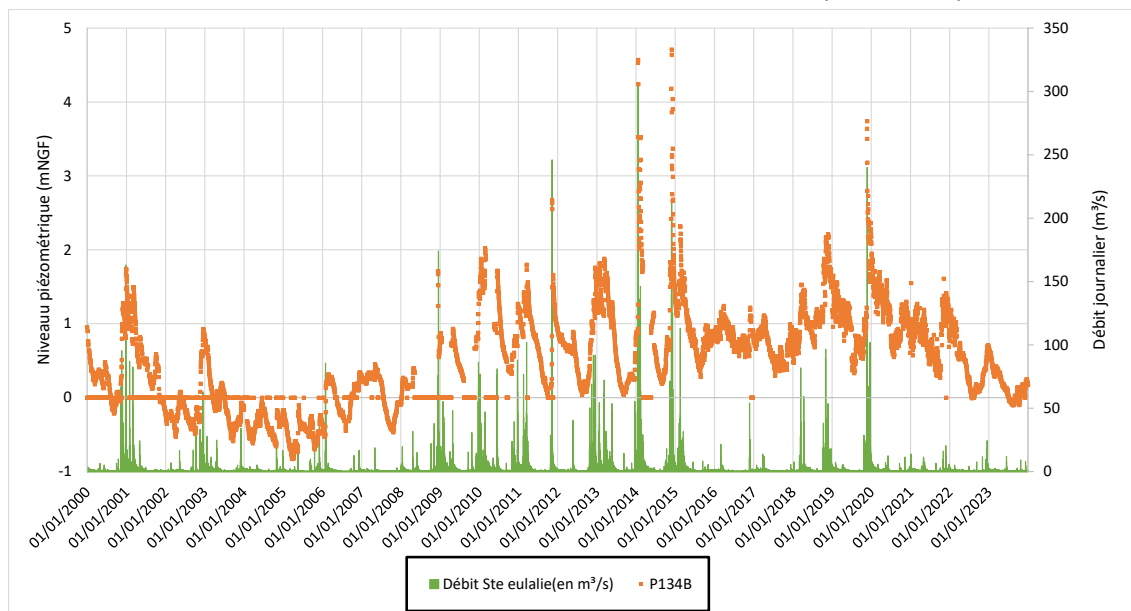


Figure 12 : Variations piézométriques de l'ouvrage P134B et débit mesuré à la station de Ste-Eulalie

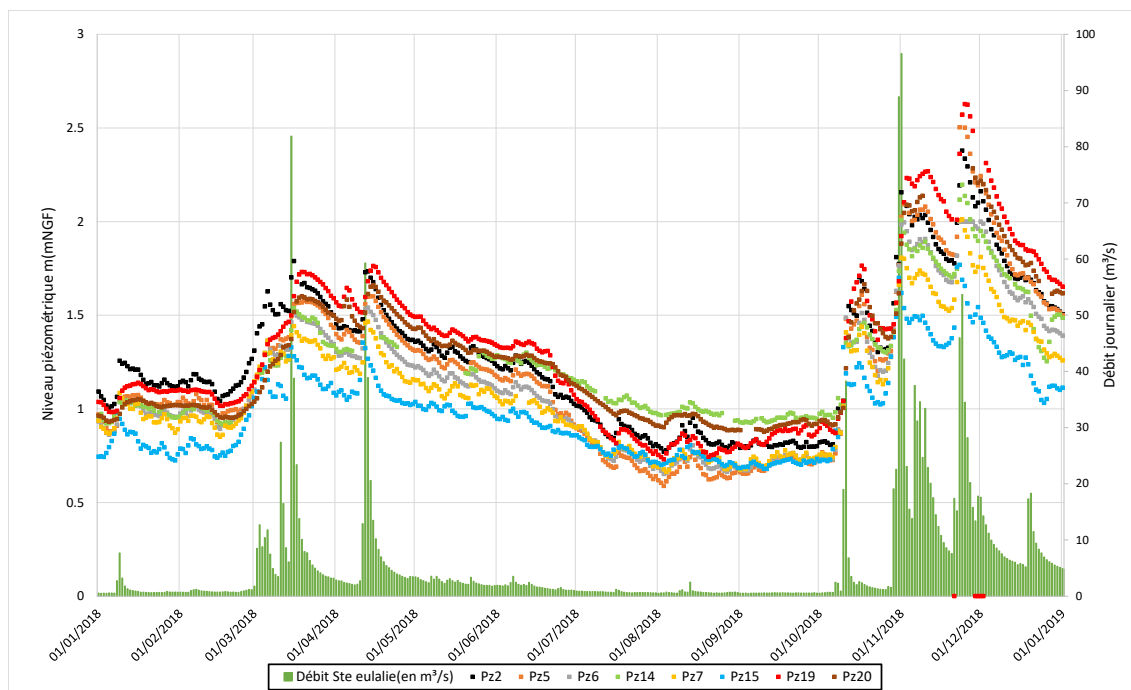


Figure 13 : Variations piézométriques et débit mesuré à la station de Ste-Eulalie lors de l'année 2018

2.2.3 Paramètres hydrodynamiques

2.2.3.1 Transmissivité

Le BRGM a réalisé plusieurs mesures de transmissivité dans la plaine du Gapeau. Ces mesures ont été réalisées lors de courts essais de pompage.

Il ressort de ces mesures :

- Un secteur très transmissif qui correspond au Plan du Pont jusqu'au Golf Hôtel, vallée alluviale encaissée entre les Maures et les Maurettes. Dans ce secteur l'épaisseur d'alluvions aquifère est importante d'après les mesures géophysiques. Les transmissivités dans ce secteur sont comprises entre $4,5$ et $9,10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$;
- La plaine d'Hyères a une transmissivité plus faible, de l'ordre de $5,10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, avec localement des valeurs plus fortes, principalement en bordure du Gapeau (rive droite), ou plus faibles, plutôt dans le milieu ou à l'ouest de la plaine.

2.2.3.2 Perméabilité

Peu de données de perméabilité sont disponibles dans la bibliographie. Elles concernent principalement la zone du Golf Hôtel. On retiendra ainsi :

- Puits n°10651X0143 - $K = 1,10^{-2} \text{ m/s}$;
- Puits n°10651X0183 - $K = 1,3,10^{-2} \text{ m/s}$.

Des pompages d'essai ont été réalisés en 2012 sur le champ captant du Père Eternel et suivis sur plusieurs piézomètres.

Les résultats de l'interprétation sont donnés dans le tableau suivant.

Tableau 2 : Paramètres calculés lors du pompage d'essai sur le Père Eternel

	1ère remontée		Descente			2ème remontée			
Piezomètres	Pz17	Pz18	Pz17	Pz18	Pz19	Pz17	Pz18	Pz19	Pz5
T (m^2/s)	$2,3,10^{-1}$	$7,3,10^{-2}$	$2,3,10^{-1}$	$1,2,10^{-1}$	$1,2,10^{-1}$	$1,6,10^{-1}$	$9,7,10^{-2}$	$1,6,10^{-1}$	$1,6,10^{-1}$
K (m/s)	$2,8,10^{-2}$	$5,2,10^{-3}$	$2,8,10^{-2}$	$8,4,10^{-3}$	$9,10^{-3}$	$2,10^{-2}$	$6,9,10^{-3}$	$1,2,10^{-2}$	$1,10^{-2}$
Emmagasinement (%)			9,6 %	2,2 %	2,7 %				

2.2.3.3 Emmagasinement

La bibliographie donne un coefficient d'emmagasinement compris entre 5 et 10 % près du champ captant du Golf Hôtel. Les résultats du pompage d'essai conduit sur le Père Eternel viennent confirmer l'ordre de grandeur de ce paramètre.

Ce coefficient traduit un comportement libre. Néanmoins à l'aval, où la nappe est captive, celui-ci est beaucoup plus réduit.

2.2.4 Prélèvements

2.2.4.1 Prélèvements AEP

Les prélèvements de la nappe du Gapeau sont effectués au droit de deux champs captant (Figure 14) :

- Le champ captant du Golf Eternel, comprenant 7 forages (G1 à G5, LEP et G7) ;
- Le champ captant de père Eternel, constitué de deux puits (un seul en fonctionnement – Pe2bas).

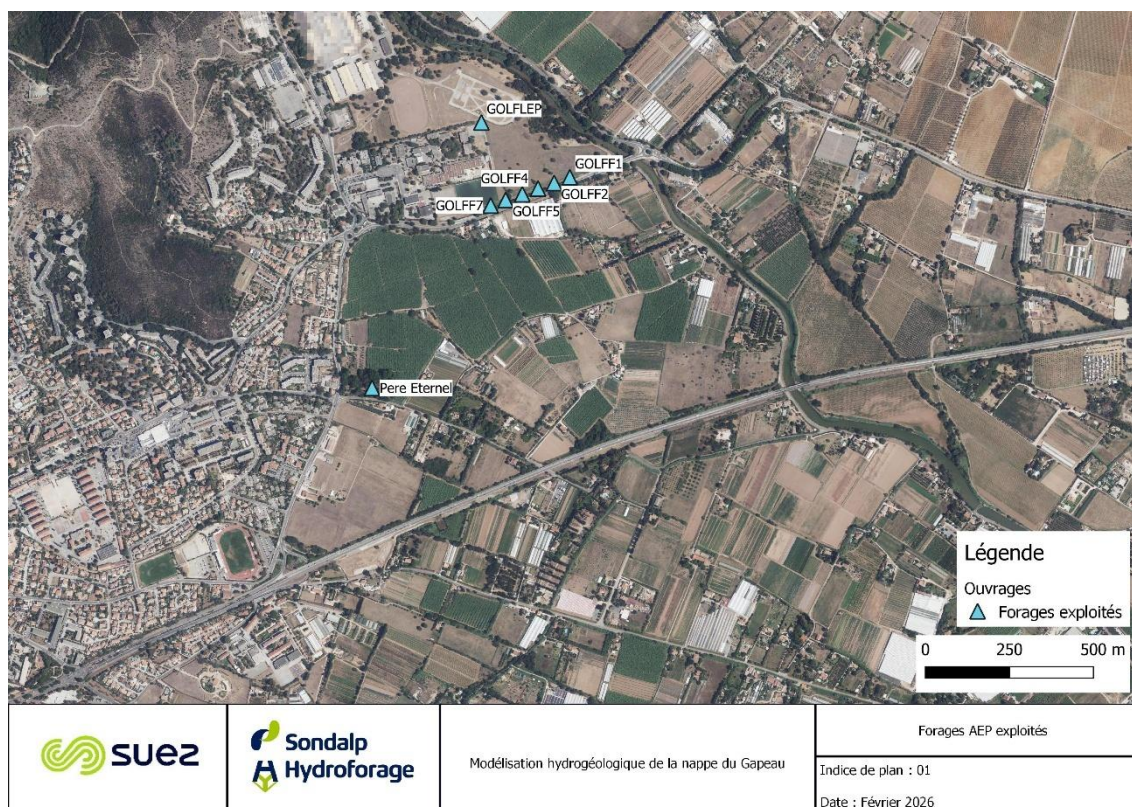


Figure 14 : Forages exploités du Bas-Gapeau

Les données disponibles concernant les prélèvements de la nappe à partir de 2000 sont les suivantes :

- Des relevés d'exploitation entre 2006 et 2010 à l'échelle des champs captant et des relevés journaliers d'exploitations entre octobre 2011 et octobre 2025 pour chaque ouvrage ;
- Des volumes annuels prélevés sur les deux champs captant extraits du SIE PACA entre 2010 et 2024 ;
- Des données fournies dans les rapports du bureau d'études HGM entre 2003 et 2005 ;
- D'un rattachement aux données postérieures pour les années 2000 à 2002, sur la base de correspondance climatiques entre années :
 - Les volumes sur l'année 2000 ont été considérés identiques à ceux de 2004 ;
 - Les volumes sur les années 2001 et 2002 ont été considérés identiques à ceux de 2003.

La Figure 15 indique les débits journaliers moyens mensuels retenus au niveau des deux champs captant. On y observe la diminution des prélèvements entre 2007 et 2011 au niveau du Père Eternel.

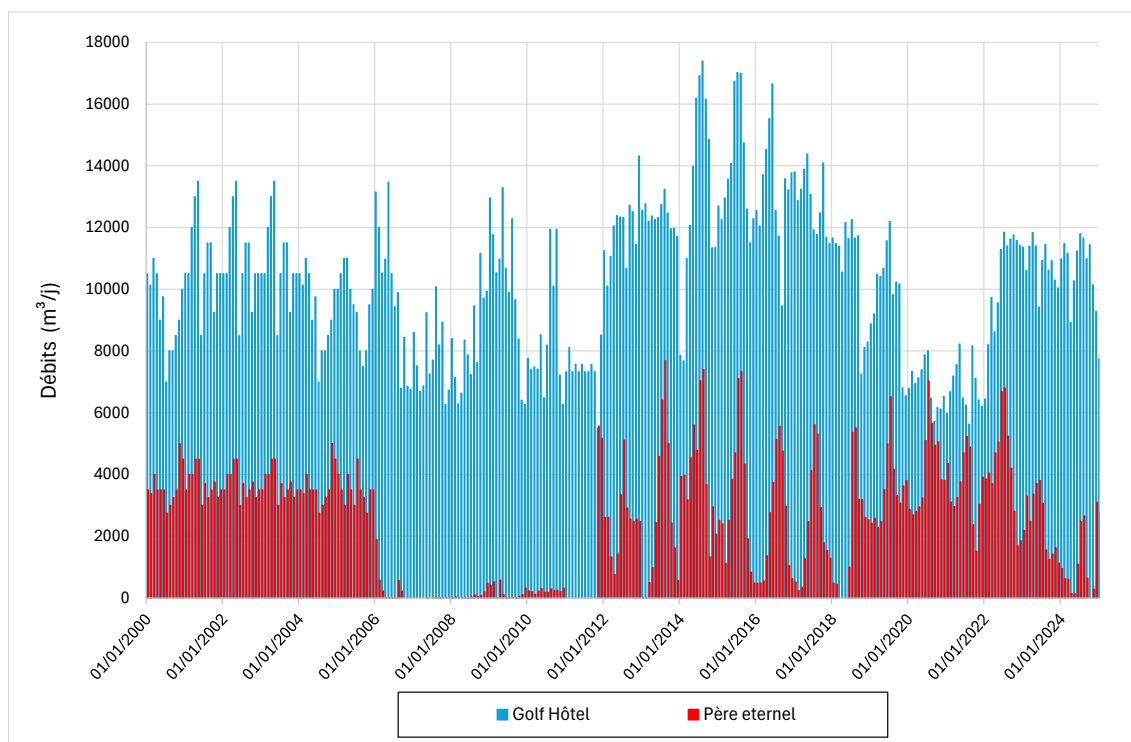


Figure 15 : Débits journaliers moyens mensuels prélevés à l'échelle des deux champs captant

2.2.4.2 Autres prélèvements

Historiquement, les prélèvements agricoles ont été fortement réduits depuis le développement du réseau d'irrigation du Canal de Provence à partir de 1993. Ces prélèvements agricoles et domestiques sur la nappe du Gapeau ont continué jusqu'en 2007, date à laquelle la contamination de la nappe ne permettait plus leur usage.

D'après la DDTM du Var, aucun dossier de forage agricole n'a été déposé auprès de leur service depuis 2006.

Les hypothèses suivantes ont donc été prises :

- Entre 2000 et 2010, des prélèvements agricoles ont été rentrés dans le modèle, en prenant en compte les prélèvements calculés pour le modèle de 2011 (Figure 16) ;
- A partir de 2010, aucun prélèvement agricole n'a été considéré.

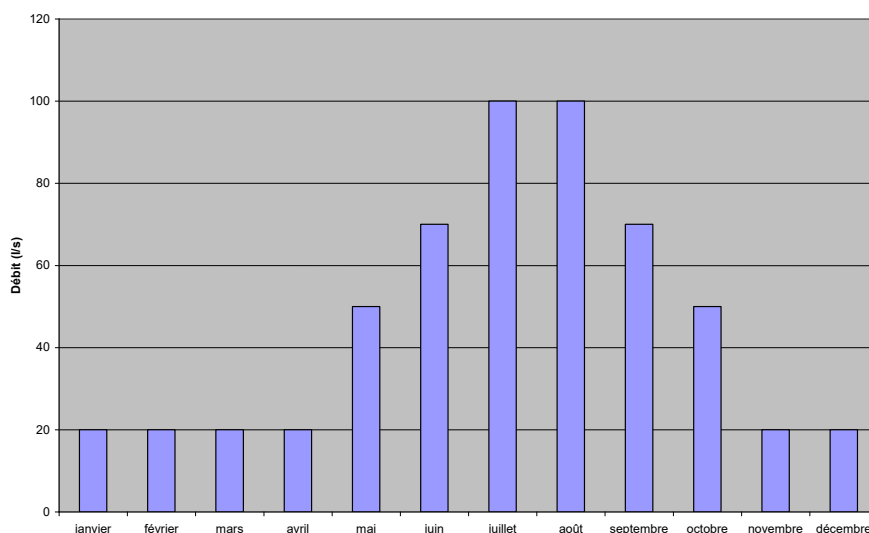


Figure 16 : Débits totaux prélevés par l'agriculture dans la nappe du Gapeau entre 2000 et 2010

2.2.5 Salinité

La nappe est soumise à une intrusion d'eau salée, ayant pu entraîner des dépassements des seuils de potabilité. D'après l'historique de l'exploitation de la nappe depuis 2006, de forts déficits hydriques entre 2003 et 2011 dans le Var ont entraîné l'intrusion du biseau salé jusqu'au forage du Père Eternel. A partir de 2006, ce phénomène a été observé jusqu'à 2 km de la côte.

Un suivi de la salinité via la conductivité a donc été mis en place à l'aide de piézomètres de contrôles. Des profils de conductivités au droit du réseau piézométrique sont réalisés mensuellement et/ou trimestriellement et des sondes de conductivité automatiques sont également placées dans certains piézomètres.

Le biseau salé a nettement reculé depuis 2010, surtout sur le Pz4 et le Pz5 où la conductivité a respectivement diminué de 2 000 et 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre janvier 2010 et janvier 2024 (Figure 17). Depuis 2018, la conductivité est globalement stable pour Pz4, Pz5 et Pz14. Sur Pz11, elle a fortement diminué en 2020 puis est remontée jusqu'à se stabiliser depuis 2021 (Sondalp, Rapport d'exploitation).

En 2024, le biseau salé est considéré comme contrôlé au vu des mesures réalisées.

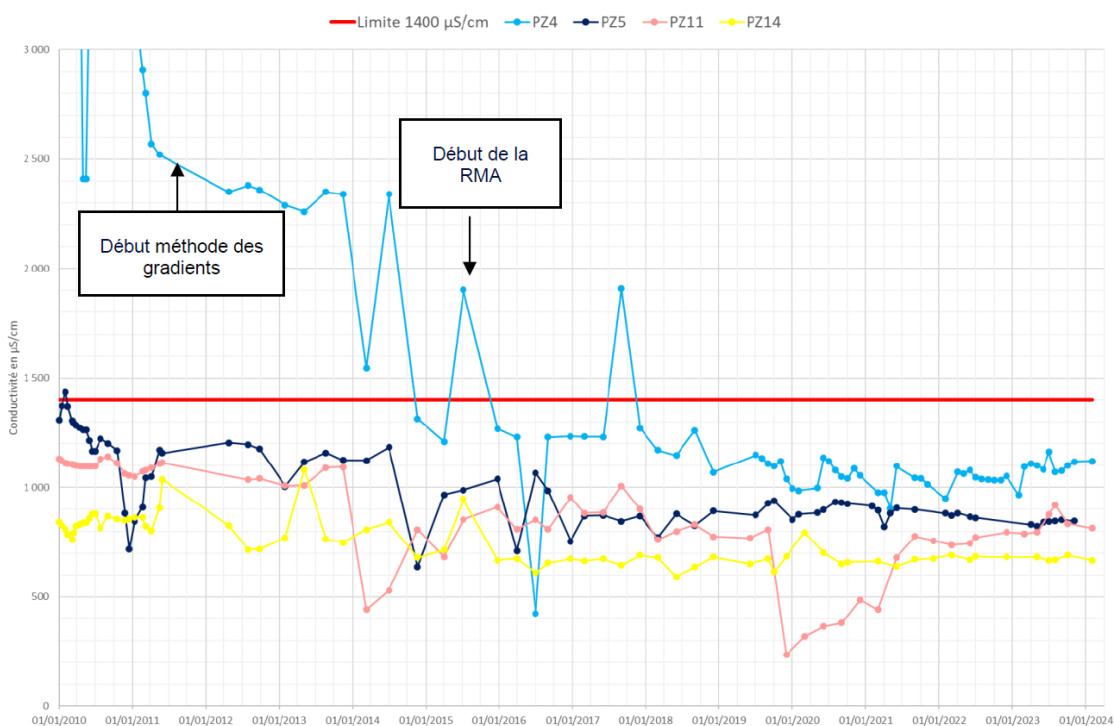


Figure 17 : Evolution des conductivités à 8 m de profondeur depuis 2010 (Sondalp) pour le Pz4, Pz5, Pz11 et Pz14

2.2.6 Réalimentation de nappe

A partir de 2015, un dispositif de réalimentation de la nappe du Gapeau a été mis en place, avec pour objectif de compenser tout ou une partie de déficit de la recharge hivernale. Une zone d'infiltration constituée de deux bassins a été mise en place, d'une surface totale de 2 000 m² environ. L'eau infiltrée provient d'une prise d'eau située dans le Roubaud.

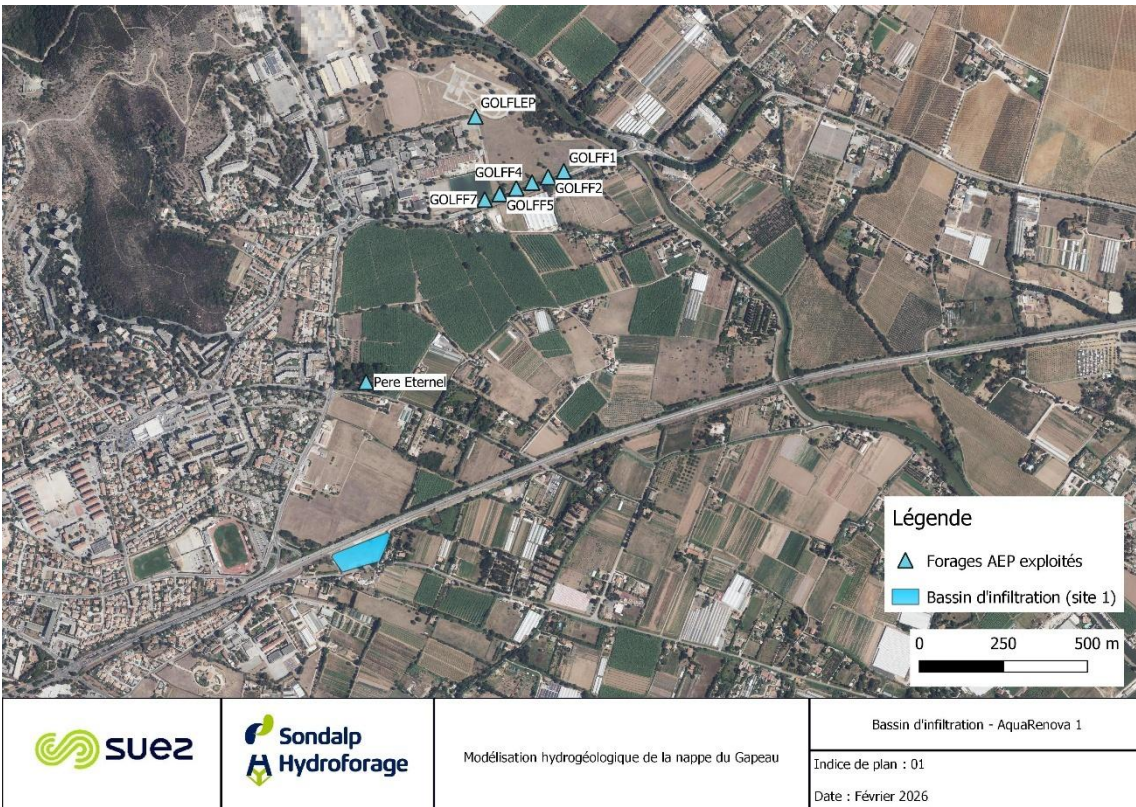


Figure 18 : Localisation du bassin d'infiltration AquaRenova 1

Les données disponibles concernant la réalimentation sont les volumes annuels réalimentés entre 2015 et 2017 et les volumes mensuels réalimentés entre 2018 et 2025. La répartition des volumes d'eau brutes annuels entre 2015 et 2025 est visible Figure 19. Il n'y a pas eu de réalimentation entre 2024 et 2025.

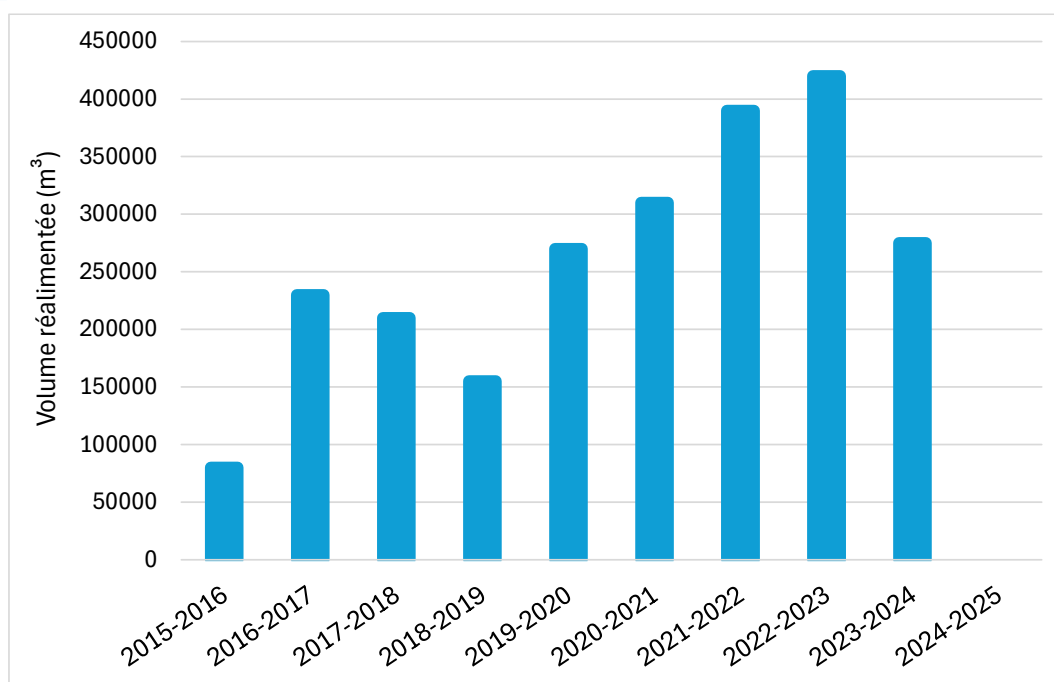


Figure 19 : Volume d'eau brute réalimentée par année depuis la mise en place du site 1

2.3 Hydrologie

La basse plaine du Gapeau est parcourue par le Gapeau et le Roubaud.

2.3.1 Le Gapeau

2.3.1.1 Régime hydrologique

Le Gapeau est un petit cours d'eau qui prend sa source à Signes. Il parcourt 47,5 km puis se jette à Hyères dans la mer Méditerranée. La surface de son bassin versant topographique est de 534,32 km². Son régime hydrologique est de type méditerranéen non influencé.

Sur le secteur d'étude, une station hydrométrique est présente (Y462401001 – Ste Eulalie). Le module calculé à cette station est 3,88 m³/s. Les données hydrologiques de synthèse sont présentées sur la Figure 20. Les débits extrêmes connus sont 0,005 m³/s pour le minimum et 583 m³/s pour le maximum.

Le débit moyen journalier dépassé en moyenne 10j/an (Qj10j/an) est égal à 23,8 m³/s.

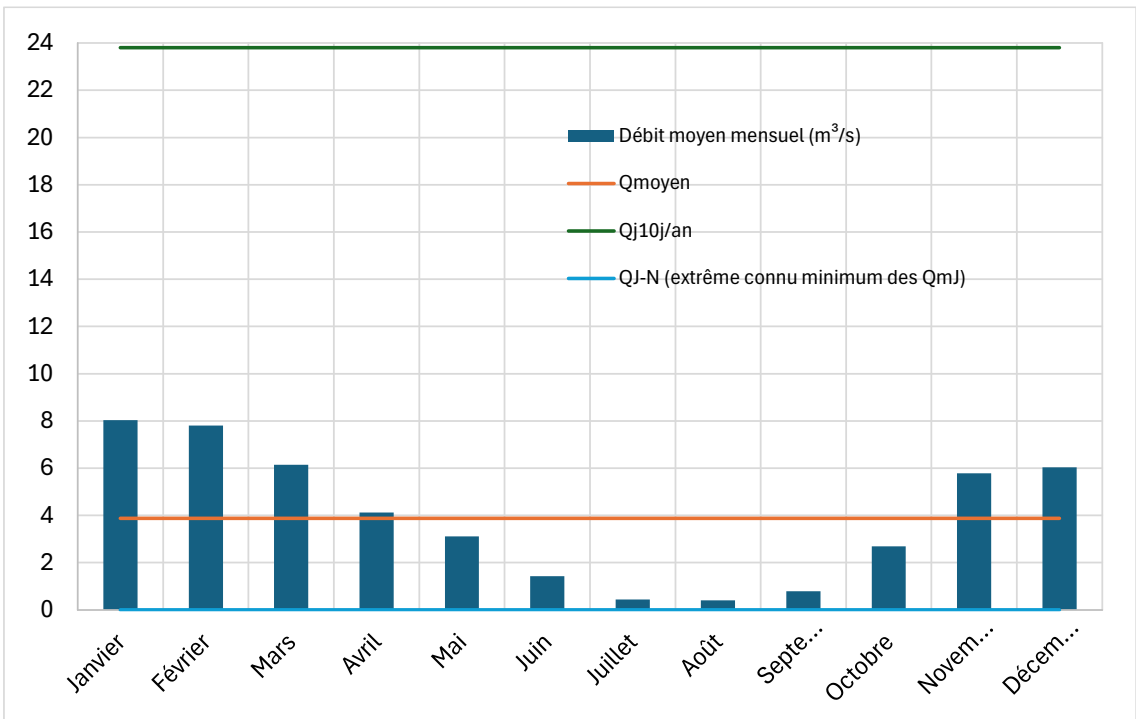


Figure 20 : Moyennes interannuelles calculées à partir des 746 QmM (débits moyens mensuels) les plus valides du 01/02/1961 au 01/10/2025 (Hydroportail)

D'après la bibliographie existante, la rivière est en forte interaction avec la nappe du Gapeau (BRL Ingénierie, 2016). A environ 1,5 km en amont de l'exutoire du Gapeau dans la mer, se trouve un barrage anti-sel (Figure 21).

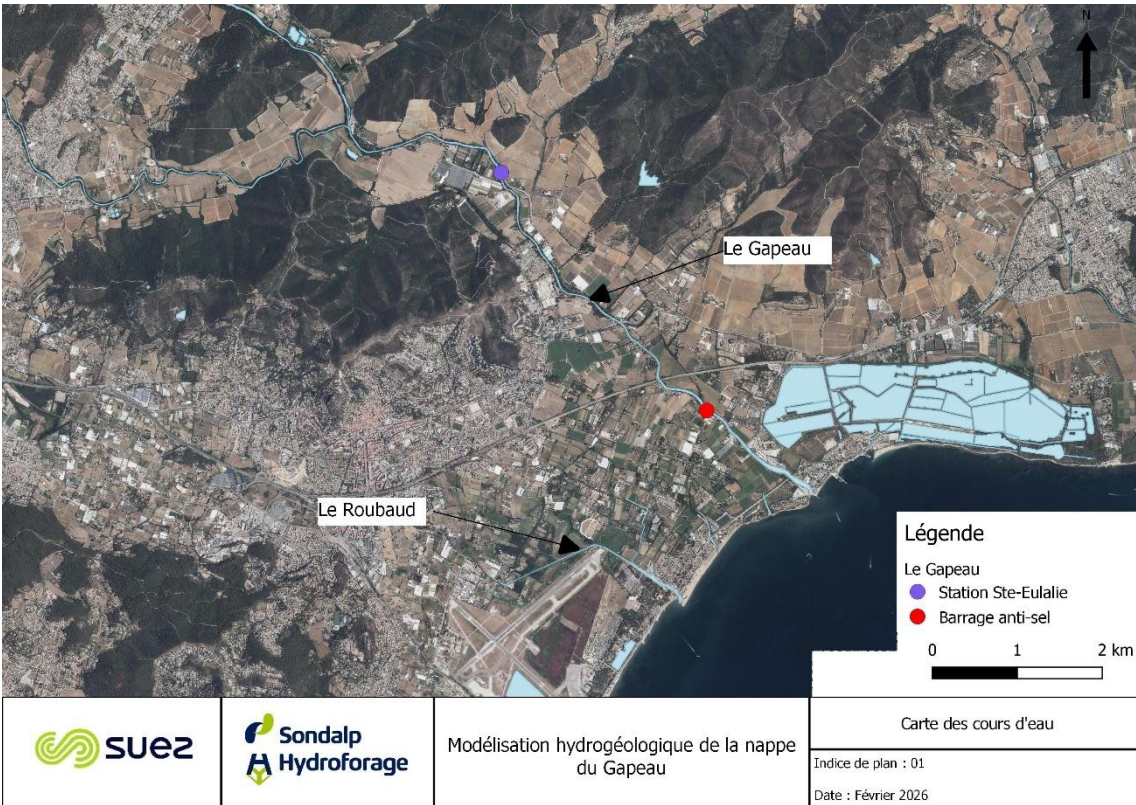


Figure 21 : Le Gapeau

2.3.1.2 Courbes de tarage disponibles

La courbe de tarage n'étant pas disponible sur le site Hydroportail, la DREAL a transmis des données de mesures de Q et H à plusieurs dates depuis 2023. Une courbe de tarage a été construite à partir de ces mesures, et une corrélation de type polynomiale de degrés 3 a été appliquée (Figure 22).

Il est important de souligner que d'ici l'horizon 2050, des travaux d'aménagements et des crues potentiels auront un impact sur la relation hauteur débit établie, qui sera très probablement modifiée.

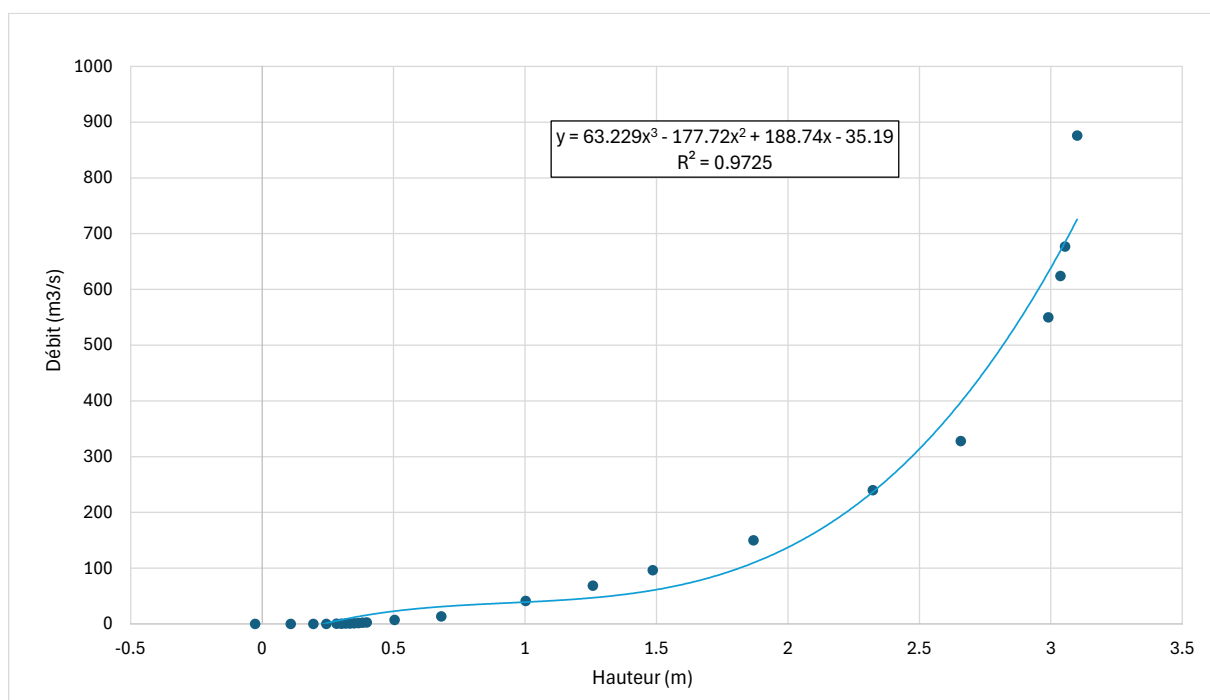


Figure 22 : Courbe de tarage à la station Ste-Eulalie (2023-2025)

2.3.1.3 Tendances du cours d'eau

Il est possible d'étudier la tendance de ce cours d'eau depuis 1970 avec MAKACHO (Mann-Kendall Analysis of Hydrogeological Observations). C'est un système de visualisation cartographique permettant de calculer les tendances présentes dans les données des stations hydrométriques aux débits peu influencés par les actions humaines. La station Gapeau à Ste-Eulalie fait partie de ces dernières, et la tendance a été observée entre 1968 et 2024 sur le débit journalier moyen annuel (Figure 23), sur le débit journalier maximal annuel moyen (Figure 24) et le débit journalier minimal annuel moyen (Figure 25).

Les tendances apparaissent à la baisse pour le débit journalier moyen annuel et sur le débit journalier maximal annuel entre 1968 et 2024. Elles sont cependant considérées comme non significatives. En période de basses eaux, le débit journalier minimal moyen possède une tendance significative à la hausse.

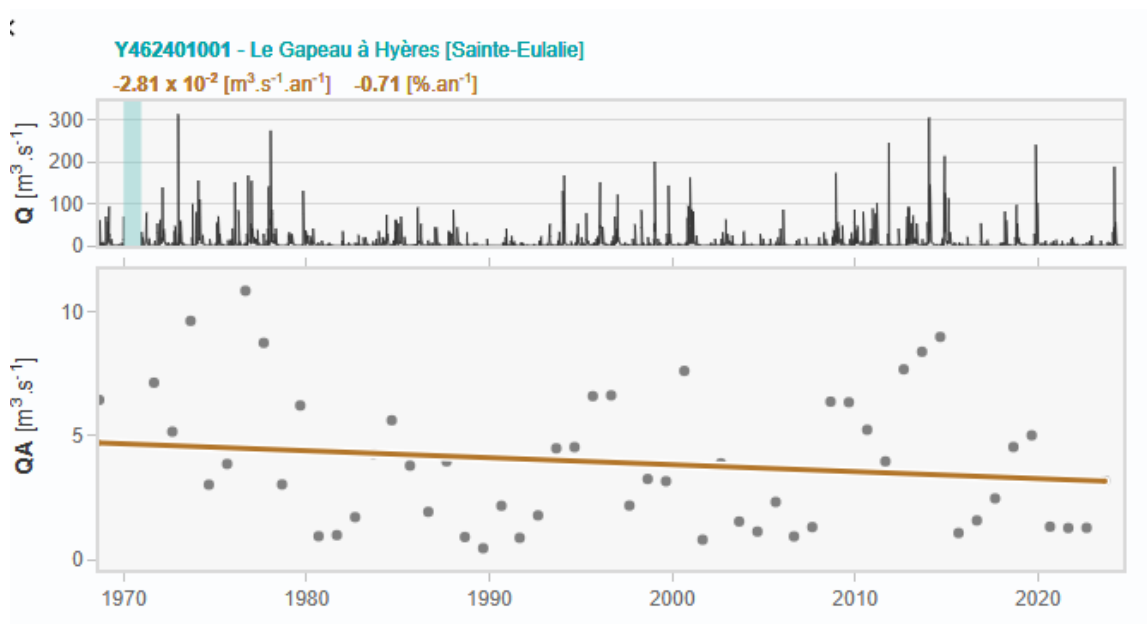


Figure 23 : Tendance du débit journalier moyen annuel (QA) (non significative)

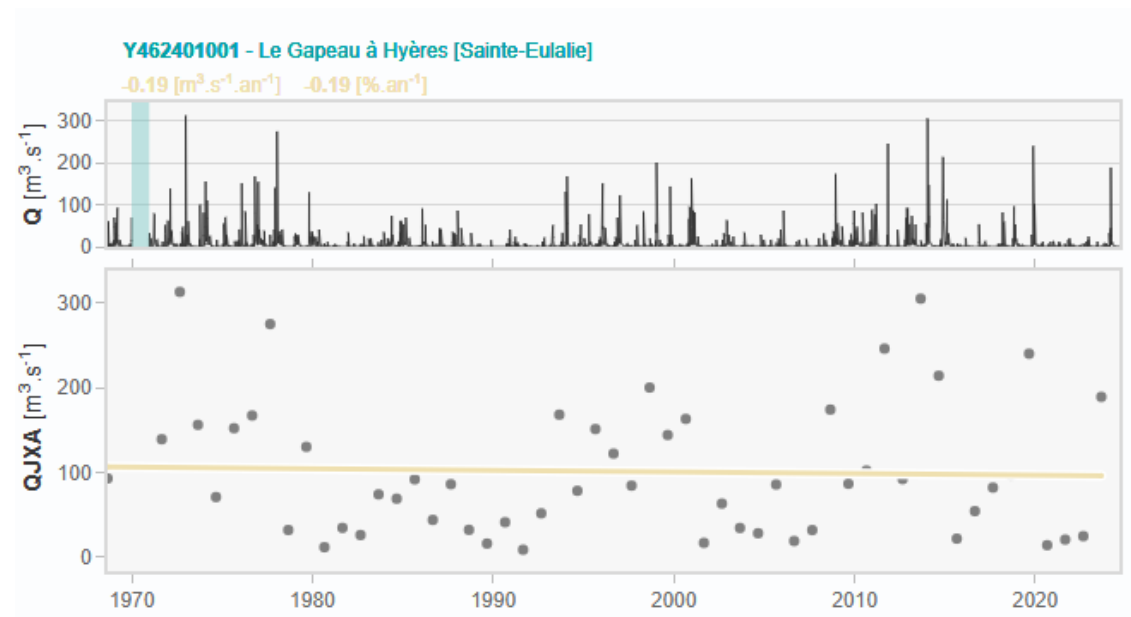


Figure 24 : Tendance hautes eaux du débit journalier maximal annuel (QJXA) (non significative)

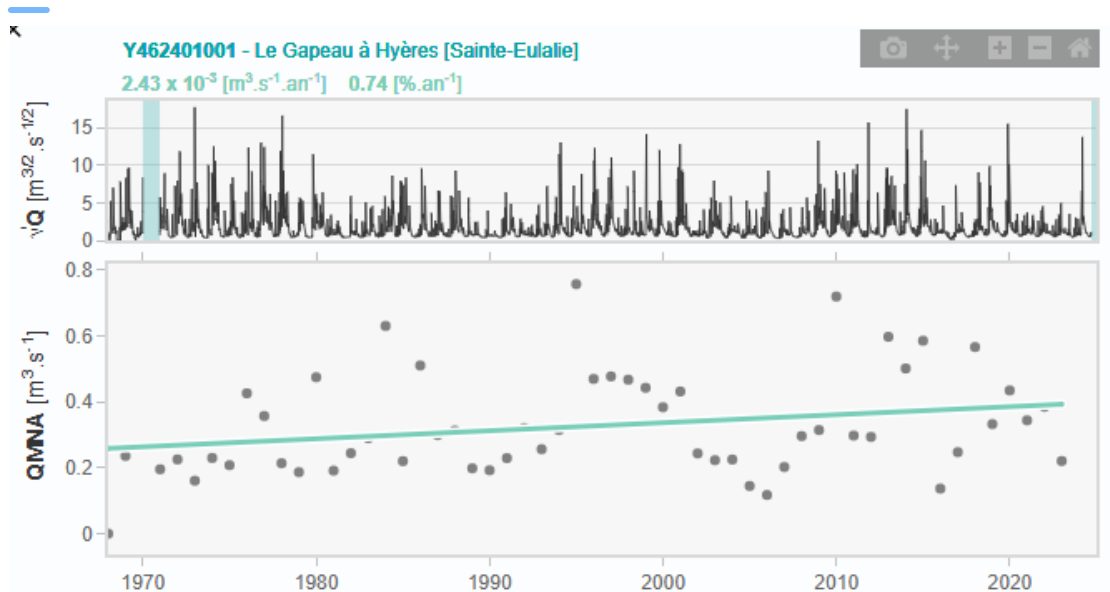


Figure 25 : Tendence basses eaux du débit journalier minimal annuel (QMNA) (significative)

2.3.2 Le Roubaud

Le Roubaud est un petit cours d'eau qui prend sa source dans une ville à côté d'Hyères. Il est principalement alimenté par les eaux du canal Jean-Natte. Il coule du nord-ouest au sud-est et se jette à Hyères dans la méditerranée.

3. OBJECTIFS DE LA MODELISATION

3.1 Objectifs

Les objectifs de la modélisation de la nappe du Bas-Gapeau sont les suivants :

- Etudier le fonctionnement de la nappe du Gapeau dans les conditions hydrogéologiques et d'exploitations actuelles, en vue de caractériser les écoulements de la nappe et l'intrusion du biseau salé ;
- Simuler le comportement de la nappe en cas de réalimentation grâce à un deuxième bassin d'infiltration ;
- Comparer le fonctionnement hydrogéologique actuel de la nappe du Gapeau et son comportement lors de la réalimentation pour évaluer l'intérêt du projet, en prenant en compte le changement climatique.

3.2 Logiciel utilisé

La modélisation de la nappe alluviale du Bas-Gapeau a été réalisée avec le logiciel Visual Modflow Flex 11.0 développé par Waterloo Hydrogeologic.

Le module utilisé est le programme Modflow 2005.

La représentation par un modèle mathématique d'un système aquifère n'est autre que l'intégration numérique des équations de base de l'écoulement sur un ensemble de petits volumes représentés sur le domaine modélisé : les mailles.

Le modèle a été mis en œuvre en régime permanent, ne dépendant pas des variations temporelles. Un calage en régime transitoire a été réalisé en préalable à la modélisation de scénarios.

4. MODELE CONCEPTUEL

4.1 Géométrie du modèle

4.1.1 Extensions et limites du modèle

L'aquifère étudié ici est celui de la plaine du bas-Gapeau, principale nappe de la commune de Hyères. Cette plaine deltaïque, dans laquelle débouche également le Roubaud, est limitée par les reliefs cristallins suivants :

- À l'est et au nord, le massif des Maures, en rive gauche du Gapeau ;
- Au nord-ouest le massif des Maurettes ;
- A l'ouest, le Mont des Oiseaux.

La basse plaine du Gapeau est limitée au sud-est par la mer Méditerranée.

La zone modélisée correspond ainsi à l'emprise des alluvions de la basse plaine du Gapeau, encadrée par les massifs à l'est, au nord et à l'ouest, constituant une limite à flux nul, et à la mer Méditerranée au sud, constituant une limite à potentiel imposé.

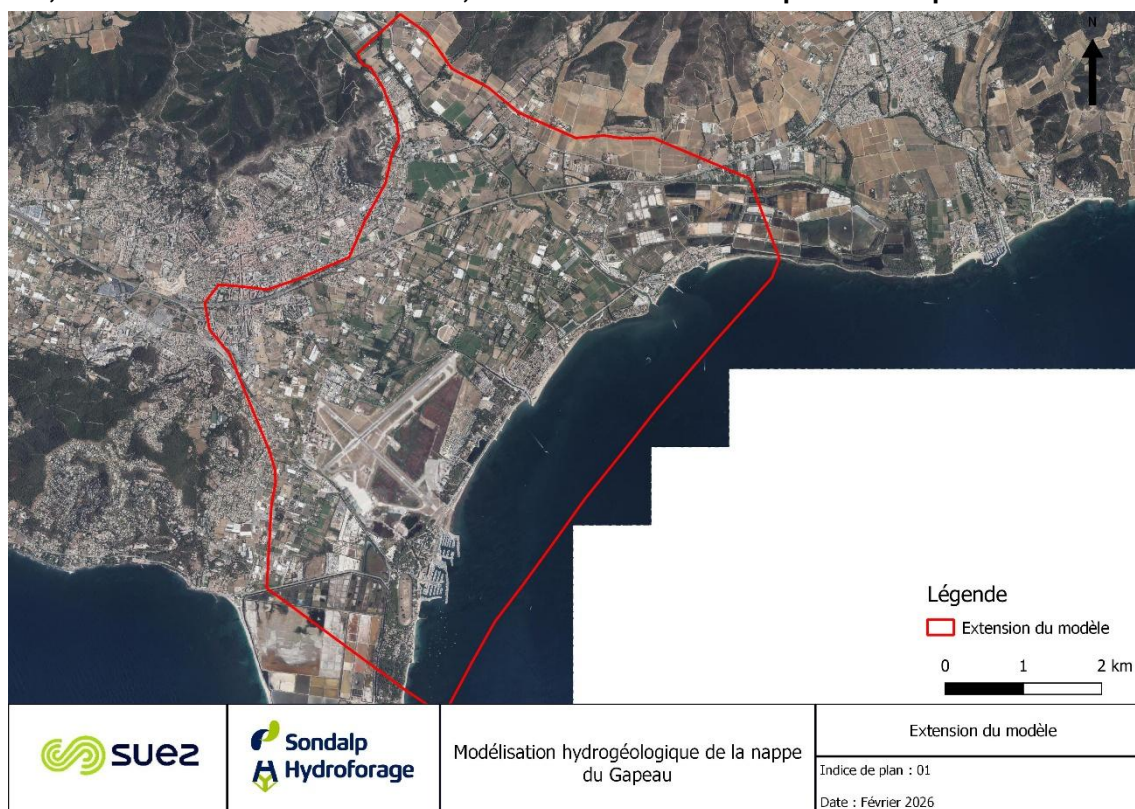


Figure 26 : Extension du modèle

La plaine alluviale est composée d'un épandage d'alluvions würmiennes caractérisées par des dépôts fluviaux du Gapeau, constituées d'horizons très perméables de graviers, sables, sables argileux et argiles, dont la position et l'épaisseur sont variables. La puissance des alluvions peut atteindre environ 25 m.

Ces dépôts présentent une géométrie complexe liée en grande partie à la présence de sillons correspondant à d'anciens cours du Gapeau.

La présence de ces sillons engendre un modelé du substratum géologique très variable. La couverture d'argile, présente sur presque toute la surface du modèle au-dessus de la nappe alluviale, n'a pas été modélisée explicitement. Cette couche d'argile rend captive la nappe, sauf au niveau de la partie nord-est du modèle.

Le toit du modèle correspond à la topographie dans la partie libre de la nappe, et au toit des alluvions dans la partie captive.

Le substratum du modèle a été établi à partir des données de sondages existants et mesures géophysiques disponibles (Figure 27). D'une manière générale le substratum de l'aquifère s'approfondit vers la mer.

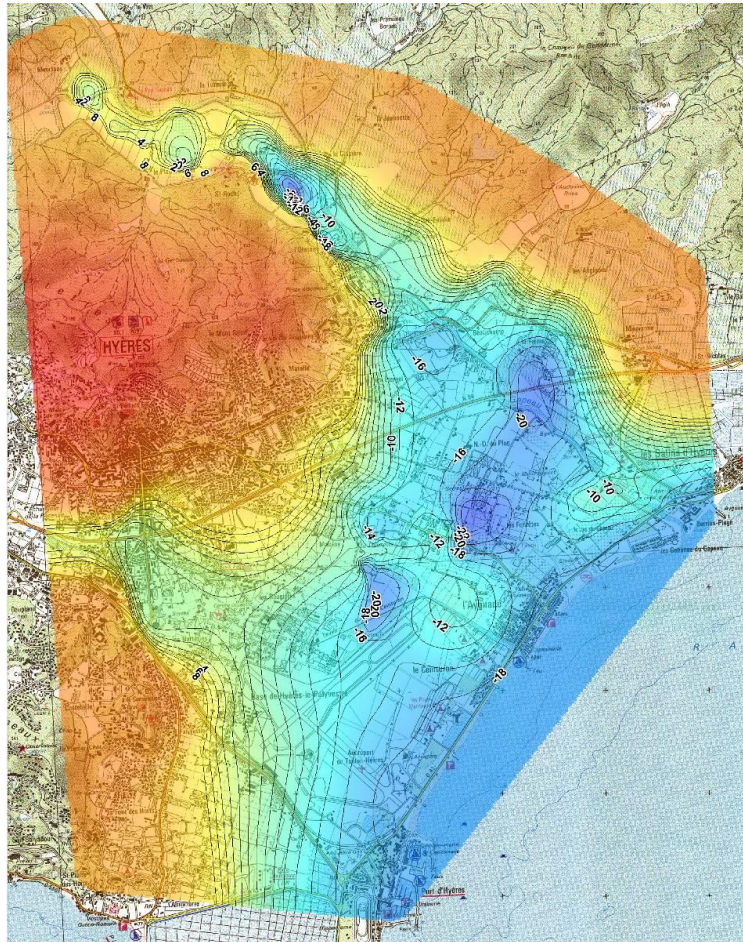


Figure 27 : Toit du substratum

4.1.2 Structure du modèle – discrétisation

4.1.2.1 Discrétisation spatiale

Le substratum du modèle correspond au substratum de l'aquifère de la plaine du Gapeau.

Le toit du modèle est différent selon la localisation. Dans la partie libre de la nappe, il correspond à la topographie. Dans la partie captive, il correspond au mur de la couverture argileuse.

Le maillage choisi pour ce modèle est composé de cellules de 50 m de côté. Ce choix est adapté à la densité d'information disponible.

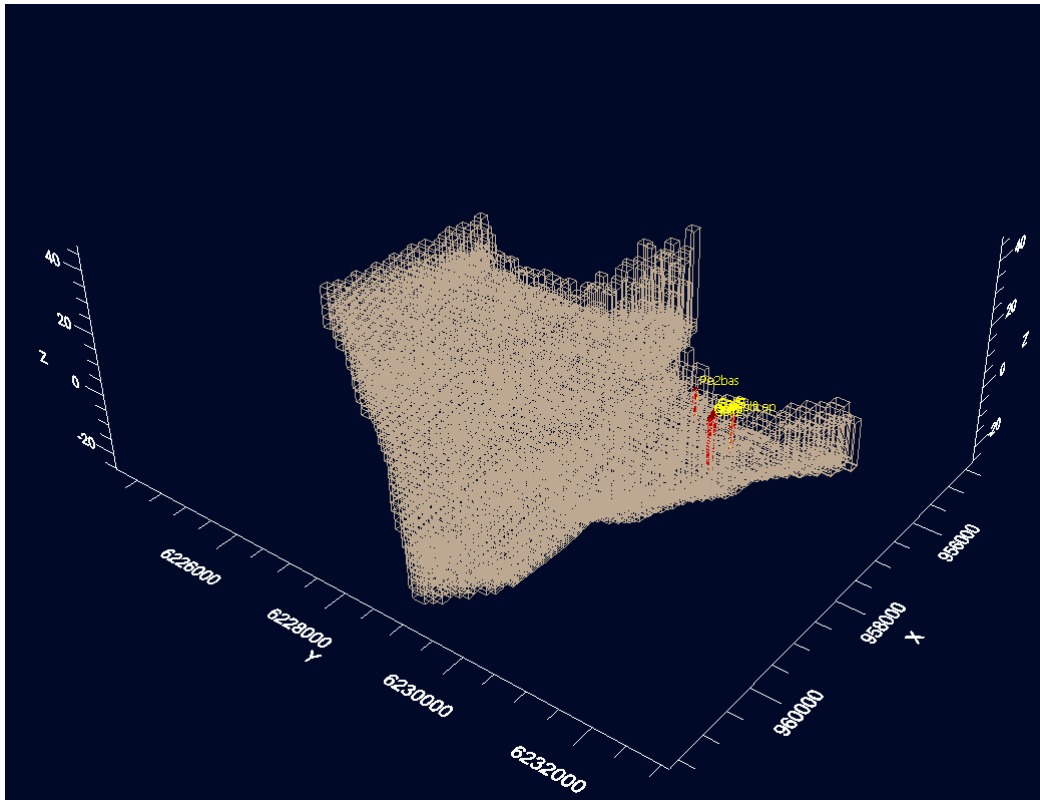


Figure 28 : Structure du modèle (exagération verticale x25)

4.1.2.2 Discrétisation temporelle

Le modèle hydrogéologique a tout d'abord été calé en régime permanent, puis en régime transitoire.

Le calage en régime permanent a été effectué sur la situation piézométrique du 25 et 26 janvier 2012.

Le calage en régime transitoire a été effectué au pas de temps mensuel, affiné pour prendre en compte l'hydrologie du Gapeau et notamment ses crues. Le calage couvre la période janvier 2000 – décembre 2025 pour laquelle un jeu de données complet est disponible :

- Pompages sur les deux champs captant ;
- Piézométrie sur une dizaine de piézomètres ;
- Variations du niveau de la mer ;
- Précipitations et ETP ;
- Réalimentation.

4.2 Limites hydrogéologiques

Les conditions aux limites suivantes ont été définies :

Flux nul :

- Le modèle est limité au Nord, à l'est et à l'ouest par les massifs cristallins. Ces limites sont considérées comme des limites à flux nul.

Charge imposée :

- Le modèle est limité au sud par la mer Méditerranée, qui est l'exutoire naturel de la nappe. Cette limite aval du modèle est considérée comme une limite à potentiel imposé.

Flux imposés :

- Les prélèvements effectués en nappe, pour l'alimentation en eau potable ;
- Les flux en provenance de la vallée du Roubaud, modélisés par des puits infiltrants ;
- La recharge par les précipitations ;
- La recharge par la réalimentation du bassin d'infiltration (entre 2015 et 2025).

Maille rivière :

- La rivière du Gapeau, divisée en trois tronçons, a été modélisée sous forme de mailles rivières. Ce type de mailles permet de représenter les échanges (alimentation et drainage) entre la nappe et la rivière.

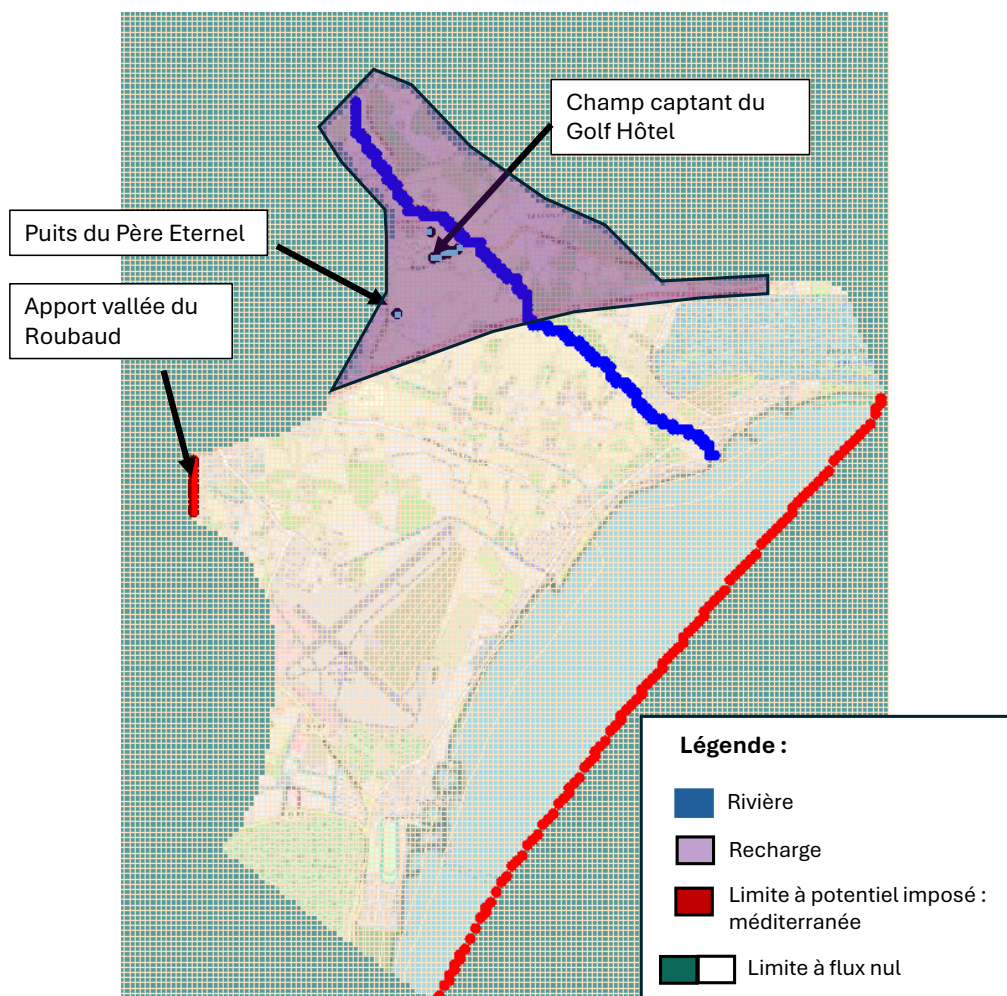


Figure 29 : Conditions aux limites du modèle

4.3 Flux entrants et sortants

4.3.1 Recharge

4.3.1.1 Recharge liée à la pluviométrie

Pour calculer la pluie efficace, un bilan hydrologique a été établi à partir des données suivantes :

- Les précipitations décadaires en mm entre 2000 et mai 2025 sur la station Hyères (83069001) – Données MétéoFrance ;
- L'évapotranspiration en mm spatialisée (Longitude = 6,125, Latitude = 43,125) – Données MétéoFrance entre 2000 et 2025.

Le calcul est effectué à l'aide de la méthode de Turc, en utilisant la formule suivante :

$$PE = (1 - \alpha) \cdot P - ETR - \Delta RFU$$

Avec PE, les pluies efficaces en mm ; P, les précipitations en mm ; α , le coefficient de ruissellement ; ETR, l'évapotranspiration réelle et ΔRFU , la variation de réserve facilement utilisable entre la décade D et la décade D - 1.

L'ETR a été calculée par application d'un coefficient cultural de 0,7 à l'ETP.

La valeur de RFU (Réserve Facilement Utilisable) choisie correspond à la RFU d'un sol alluvial peu caillouteux de 1,20 m d'épaisseur pour la plaine : 150 mm.

Le coefficient de ruissellement est pris à 20%

Les flux annuels calculés sont présentés sur la Figure 30.

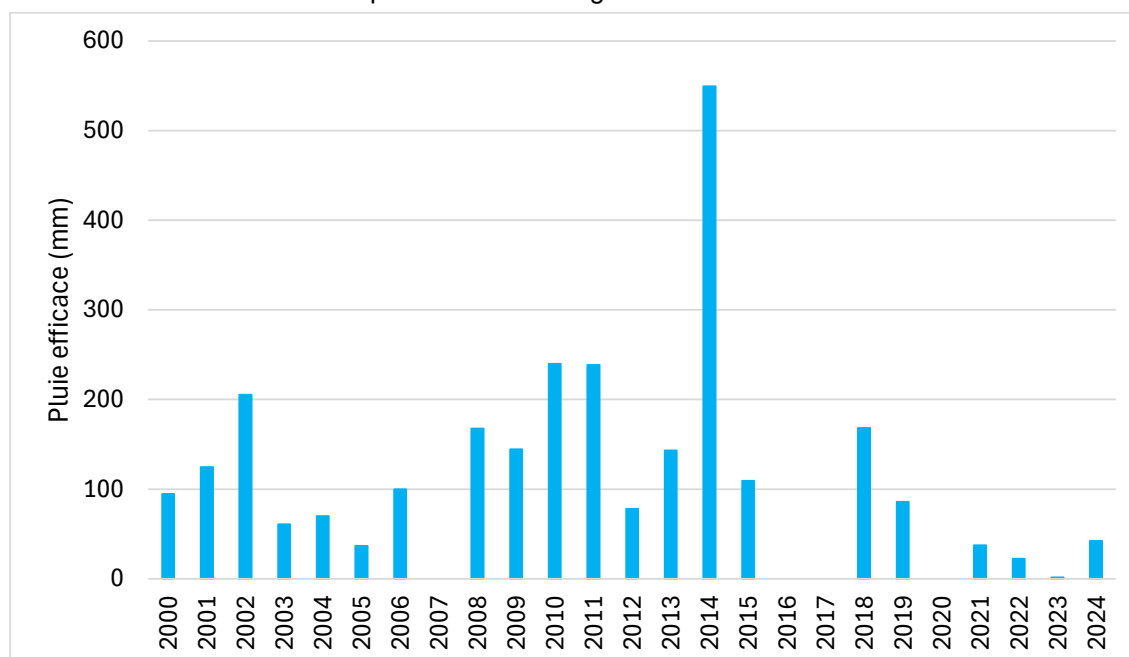


Figure 30 : Evolution de la pluie efficace entre 2000 et 2025

4.3.1.2 Recharge liée au bassin d'infiltration

A partir de 2015, un bassin d'alimentation a été mis en place, permettant l'infiltration des volumes suivants (Figure 31).

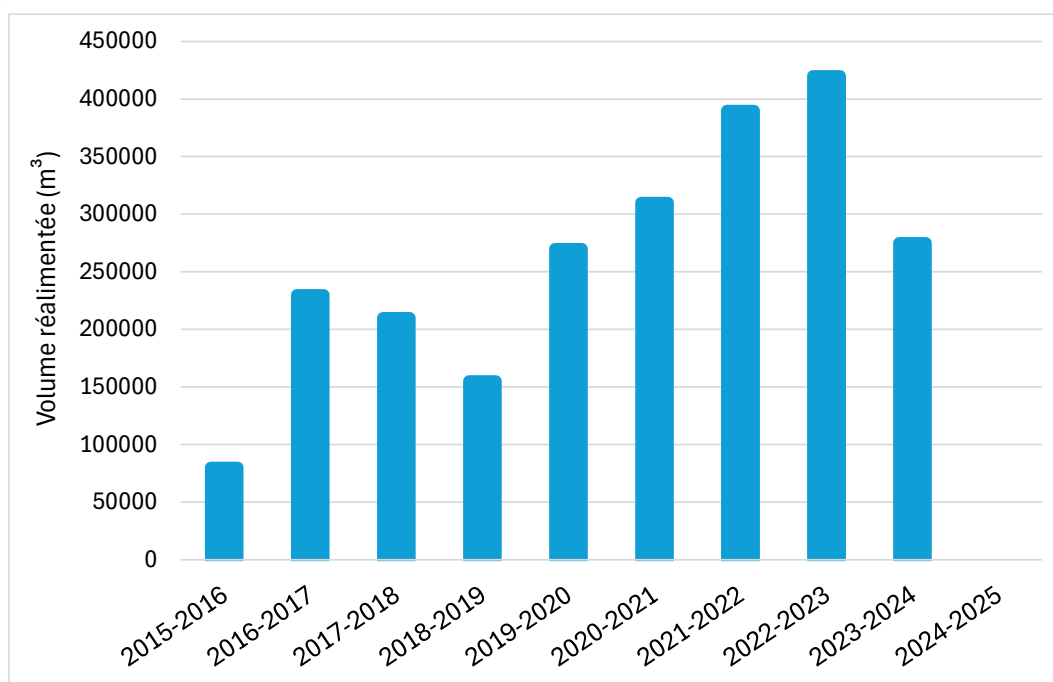


Figure 31 : Volume d'eau brute réalimentée par année

4.3.2 Mer Méditerranée

Un des exutoires de la nappe correspond à la mer Méditerranée, située en aval hydrogéologique. Les données de niveau de la mer ont été extraites du SHOM, au niveau de la station hydrométrique de Toulon.

En régime permanent, la valeur retenue pour le niveau de la mer correspond à la moyenne des données de niveau de la marée acquises au pas de temps horaire le 25 janvier 2012. La valeur est égale à 0,11 m NGF. Elle correspond également à la valeur de niveau d'eau mesurée en aval du barrage anti-sel lors de la campagne piézométrique (Figure 8).

En régime transitoire, les valeurs moyennes mensuelles entre janvier 2000 et décembre 2024 ont été exploitées (Figure 32).

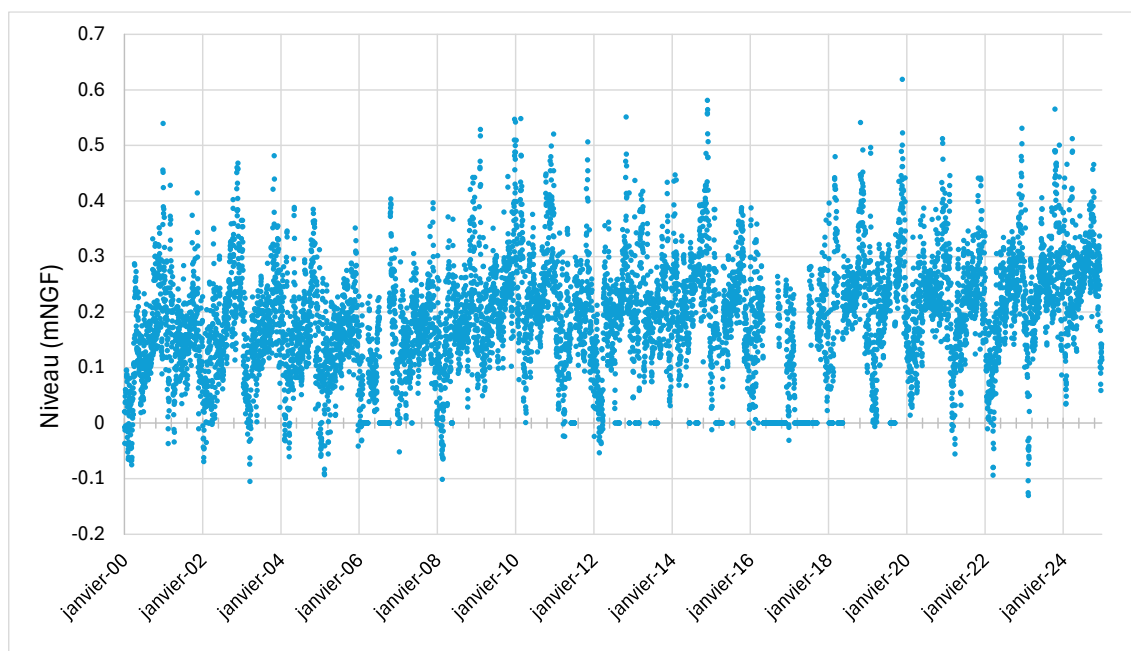


Figure 32 : Variations journalières de la mer (m NGF) mesurées à la station de Toulon entre janvier 2000 et décembre 2024

4.3.3 Prélèvements

4.3.3.1 Prélèvements AEP

4.3.3.1.1 Régime permanent

Les prélèvements en régime permanent rentrés dans le modèle sont les suivants (moyenne 25/26 janvier 2012) (Figure 33).

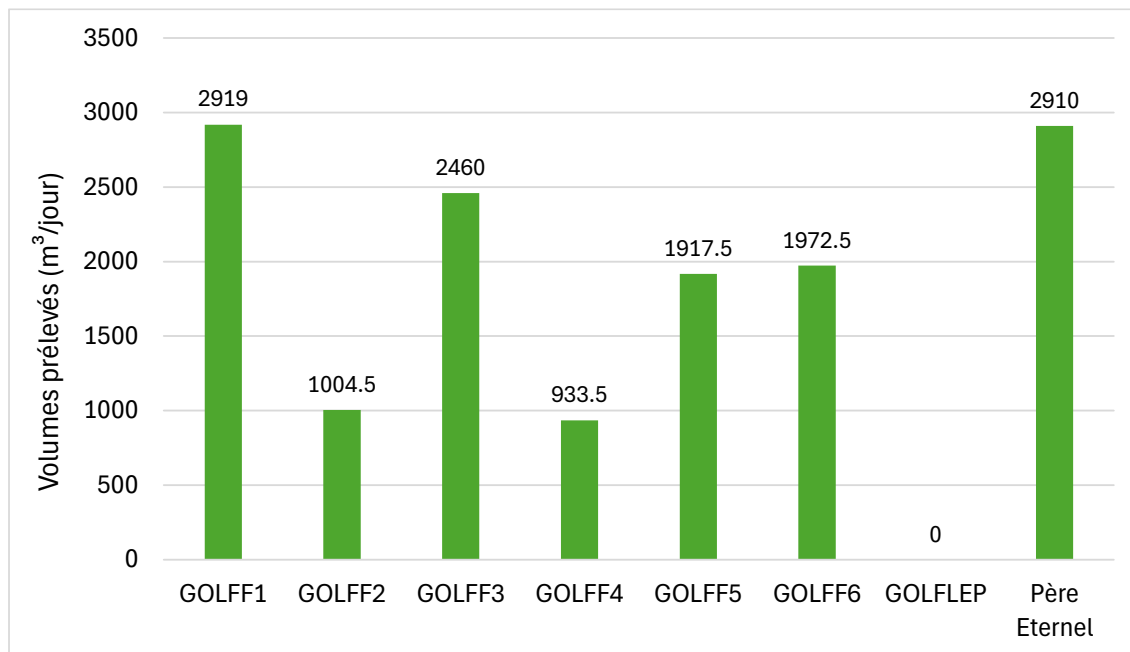


Figure 33 : Volumes moyens prélevés entre le 25 et le 26 janvier 2012

4.3.3.1.2 Régime transitoire

Les prélèvements en régime transitoire sont des moyennes journalières mensuelles entre janvier 2000 et décembre 2024.

4.3.3.2 Prélèvements agricoles

Les prélèvements agricoles pris en compte dans le modèle sont présentés Chapitre 2.2.4.2.

4.3.4 Rivière du Gapeau

Les données disponibles concernant les débits et hauteurs d'eau du Gapeau sont les suivantes :

- Hauteur journalière et débit instantané mesurés à la station Ste-Eulalie entre janvier 2000 et août 2025 ;
- Hauteur journalière moyenne, maximale et minimale en mNGF mesurée en amont du barrage anti-sel entre janvier 2009 et décembre 2011 ;
- Profil en long du fond du lit et du fil d'eau du Gapeau réalisé en octobre 2010.

4.3.4.1 Profil en long

La rivière du Gapeau a été modélisée à partir d'un profil en long réalisé en octobre 2010. Les données et leur transcription dans le modèle sont présentées Figure 34. Trois secteurs ont été définis, homogène en termes de profil de fond de lit et de largeur de rivière.

Toute la modélisation s'est basée sur le seul profil en long disponible. Il faut noter que le lit d'un cours d'eau est sujet à de nombreuses variations physiques et hydrologiques. Par exemple, la courbe de tarage d'un cours d'eau est temporaire, et doit être recrée à la suite de chaque crue. La prise en compte d'un seul profil sur une période de 25 ans peut être sujette à de fortes incertitudes.

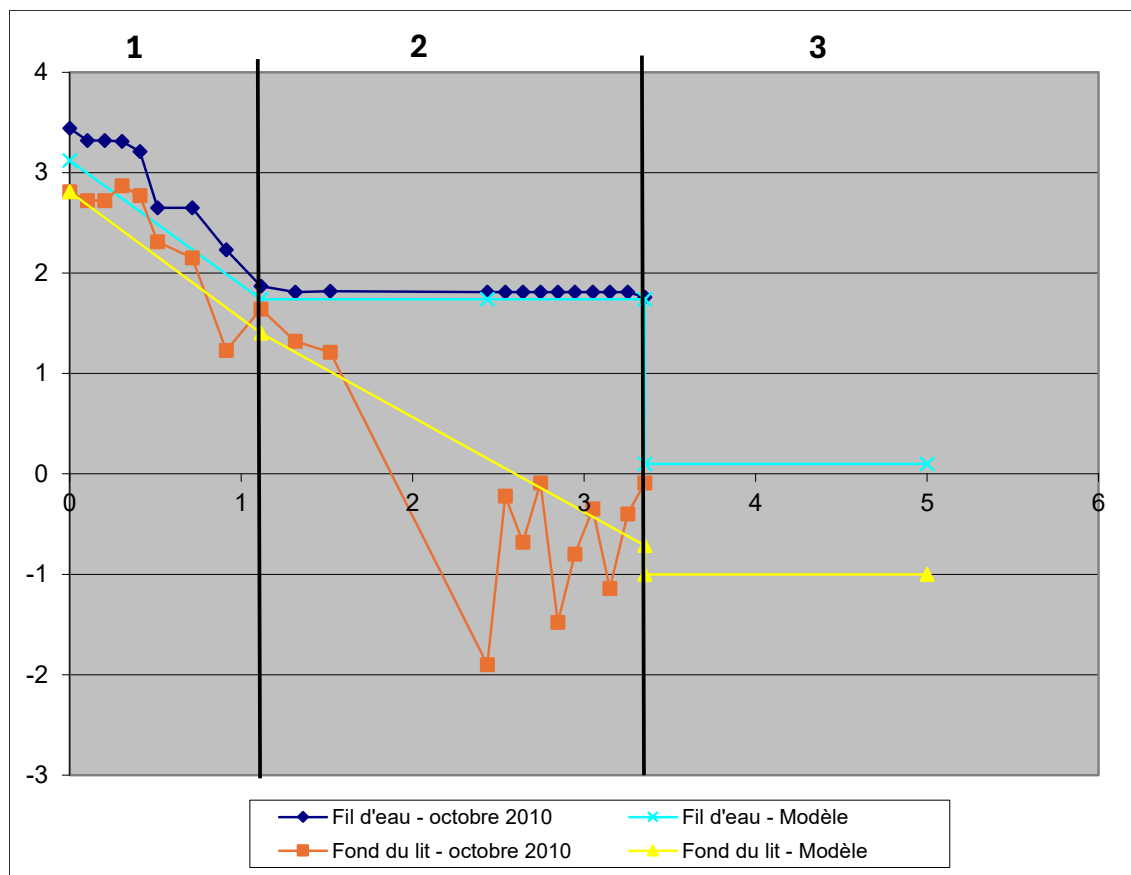


Figure 34 : Profil en long du Gapeau – Octobre 2010 et entrée modèle

4.3.4.1.1 Tronçon amont (1)

Le niveau d'eau en amont du profil amont est déterminé grâce à la station de Ste-Eulalie. Le niveau d'eau aval correspond au niveau d'eau du tronçon intermédiaire.

4.3.4.1.2 Tronçon intermédiaire (2)

Le niveau d'eau est constant sur tout le tronçon. En régime permanent, le niveau d'eau a été mesuré lors de la campagne du 25/26 janvier 2012 (1,74 m NGF).

Les niveaux d'eau du tronçon intermédiaire en régime transitoire ont été construits à l'aide des données disponibles en amont du barrage anti-sel sur la période 2009-2011.

A noter que sur la période 2009-2011, les conditions hydrologiques étaient moyennes, et il n'y a pas eu d'étiages importants observés sur la période. L'interpolation des niveaux d'eaux sur le reste de la période de calage, notamment celle de 2000-2009 où les étiages étaient sévères et fréquents, est source d'incertitudes.

4.3.4.1.3 Tronçon aval (3)

Le tronçon aval commence après le barrage anti-sel. Les fluctuations et niveaux de ce tronçon sont considérés comme égales à celles de la mer.

4.3.4.2 Etiages et crues

La relation entre la nappe et le Gapeau est étroite. Il est donc nécessaire pour modéliser la nappe de bien prendre en compte les étiage et les crues du fleuve. La rivière a été modélisée au pas de temps mensuel, resserré en crue lorsque les débits sont supérieurs au débit moyen journalier dépassé en moyenne 10j/an ($Q_{j10j/an}$), qui est égal à 23,8 m³/s et resserré en étiage, lorsque les débits sont inférieurs au QMNA5 (égal à 0,19 m³/s).

4.3.5 Vallée du Roubaud

Les cartes piézométriques existantes mettent en évidence une alimentation de la nappe du Gapeau par des apports issus de la vallée du Roubaud, bien que cette zone ne soit pas très perméable.

Cette alimentation a été évaluée à environ 30 l/s à partir d'un calcul basé sur la loi de Darcy, pour l'année 2010.

Il a été considéré que ce flux variait suivant les conditions climatiques. Aussi, il a été calé sur les variations observées pour la recharge de la nappe.

5. CALAGE

5.1 Régime permanent

5.1.1 Calage

Le calage en régime permanent a été effectué à l'état du 25/26 janvier 2012. Le remplissage de la plaine du Gapeau présente une forte variabilité de faciès, sans stratification apparente d'après les coupes de sondages disponibles. Ceci se traduit par l'affectation de perméabilités identiques sur une même verticale.

Le modèle a été découpé en cinq zones, de perméabilité horizontale oscillant entre 5.10^{-4} m/s et 5.10^{-3} m/s (Figure 35).



Figure 35 : Champs de perméabilité du modèle

Légende	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)
	0,0016	0,0016	0,00016
	0,005	0,005	0,0005
	0,0035	0,0035	0,00035
	0,0005	0,0005	0,00005
	0,0008	0,0008	0,0008

5.1.2 Restitution de la piézométrie

La corrélation entre les niveaux piézométriques observés et simulés est présentée sur la Figure 36.

Le modèle restitue globalement la piézométrie observée, l'écart moyen est égal à 0,05 m. L'écart maximal entre la piézométrie observée et la piézométrie calculée est de 34 cm, observé au Pz20.

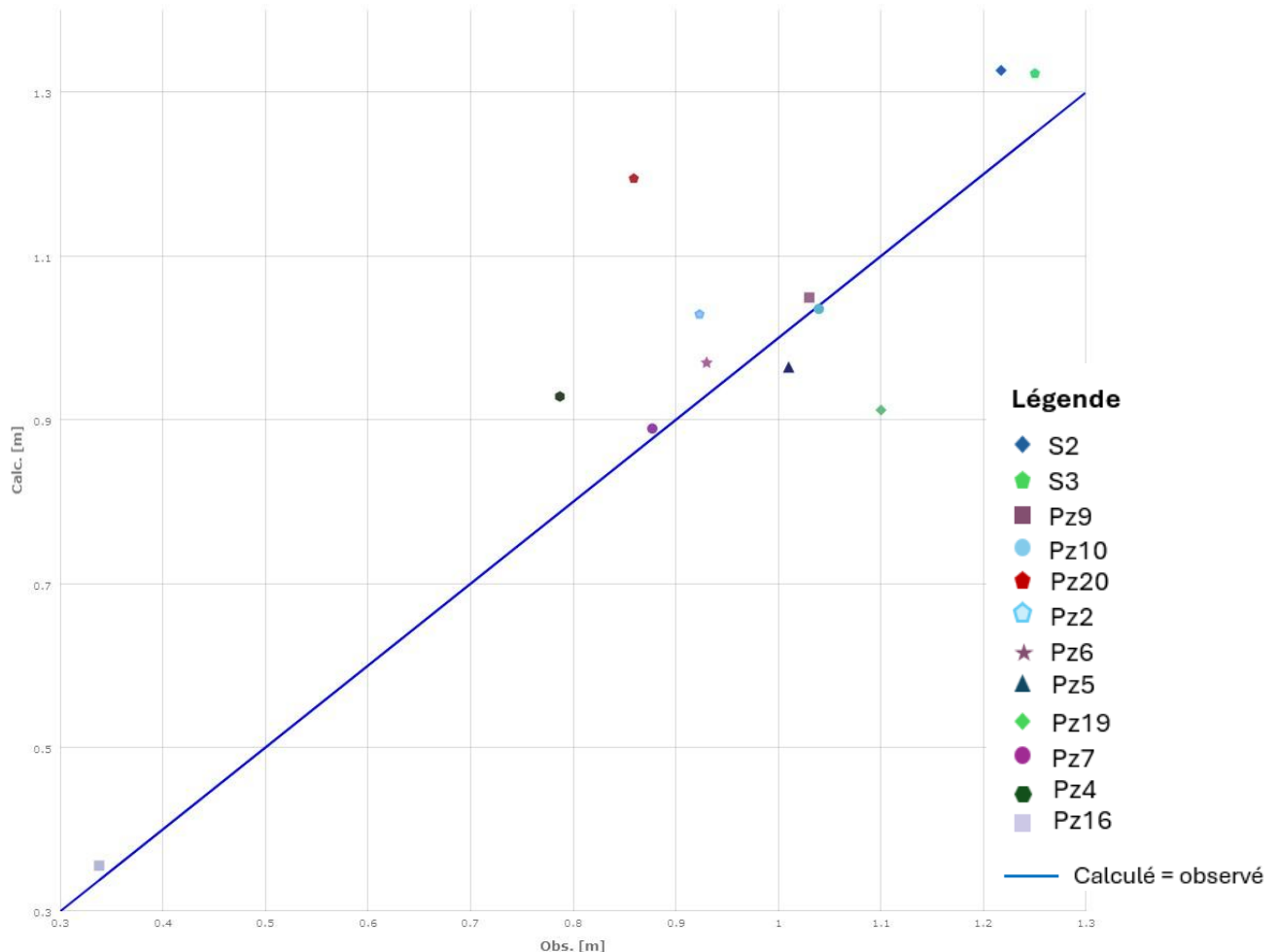


Figure 36 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime permanent

5.2 Régime transitoire

Le calage en régime transitoire a été réalisé à l'aide des piézomètres d'observations Pz2, Pz5, Pz6, Pz9, Pz10, Pz14, Pz15, Pz19, Pz20 et P134B (localisés en rouge sur la Figure 37).

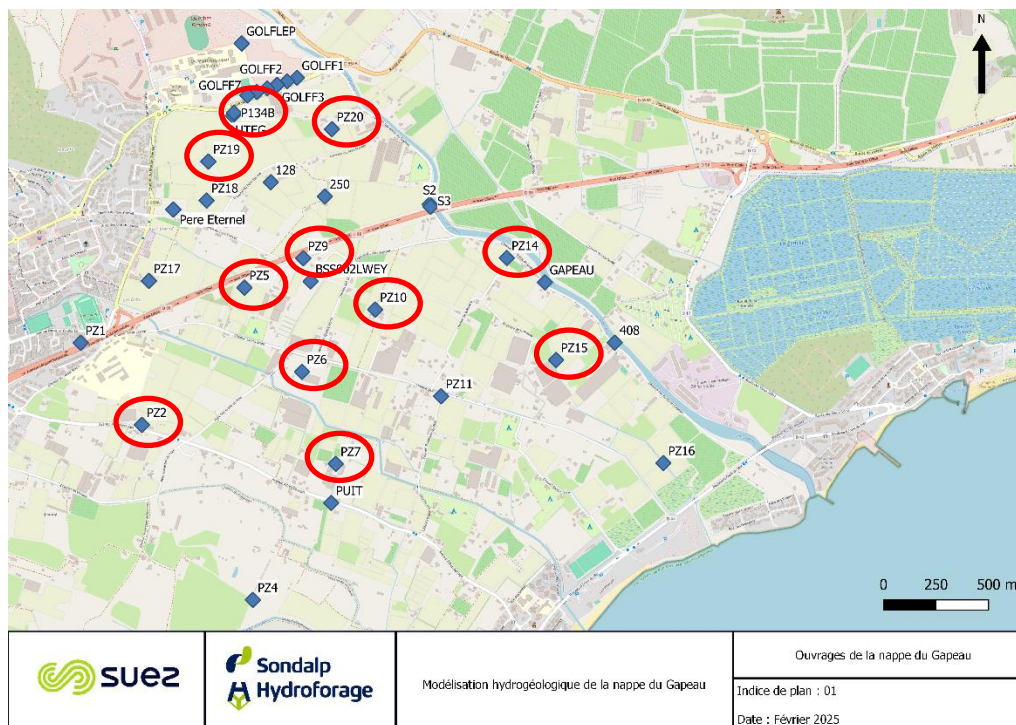


Figure 37 : Ouvrages utilisés pour le calage en régime transitoire

5.2.1 Calage

Les champs de perméabilité définis en régime permanent ont été conservés.

Le paramètre de calage en régime transitoire est le coefficient d'emmagasinement. Il correspond au rapport du volume d'eau libérée par unité de surface sur la différence de charge hydraulique. En nappe libre, il correspond à la porosité efficace.

Le remplissage de la nappe alluviale du Gapeau présentant une forte variabilité de faciès, sans stratification apparente, le coefficient d'emmagasinement est identique d'une couche à l'autre sur une même verticale.

Le modèle a été découpé en deux secteurs, correspondant aux deux fonctionnements de la nappe (Figure 38) :

- Zone blanche - Amont de la RD98, nappe libre : le coefficient d'emmagasinement est égal à 0,01 ;
- Zone bleue – Aval de la RD98, nappe captive sous la couverture argileuse : le coefficient d'emmagasinement est égal à 1.10^{-7} ;

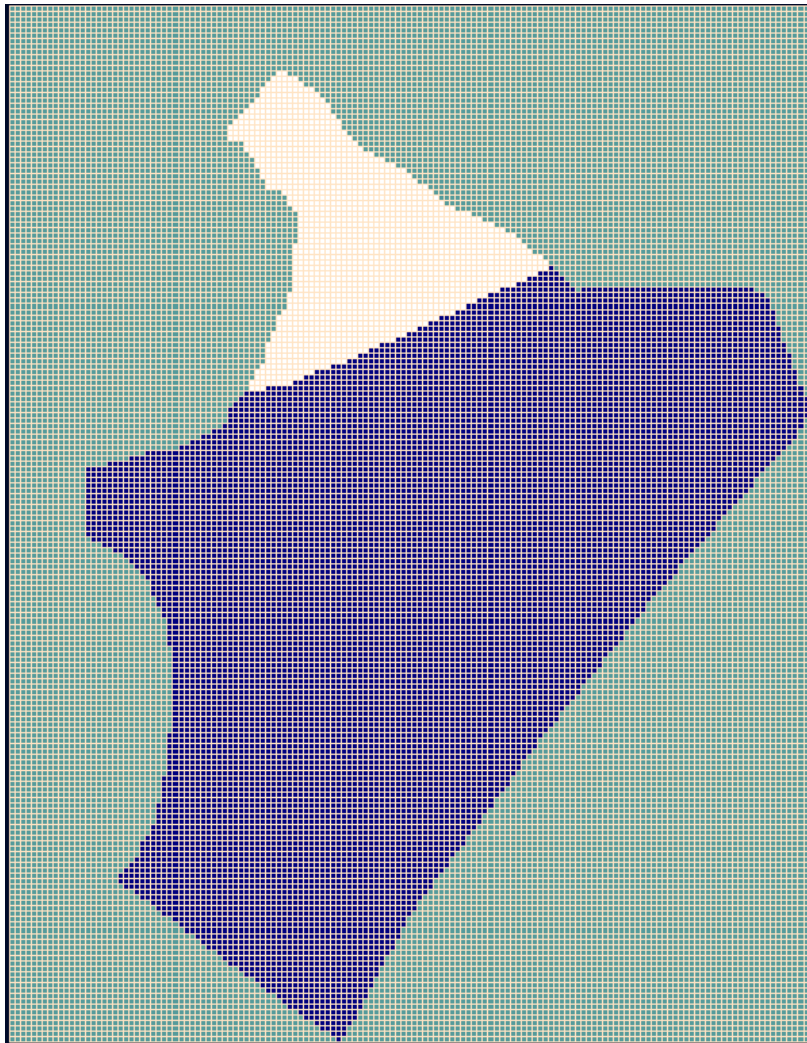


Figure 38 : Champ de coefficient d'emmagasinement du modèle

5.2.2 Restitution de la piézométrie

La restitution de la piézométrie calculée par le modèle est présentée ci-dessous pour 4 piézomètres situés en différents points de la nappe, permettant d'évaluer le calage en différents points de la nappe (Figure 39). Les chroniques simulées sur les autres points sont présentées en annexe.

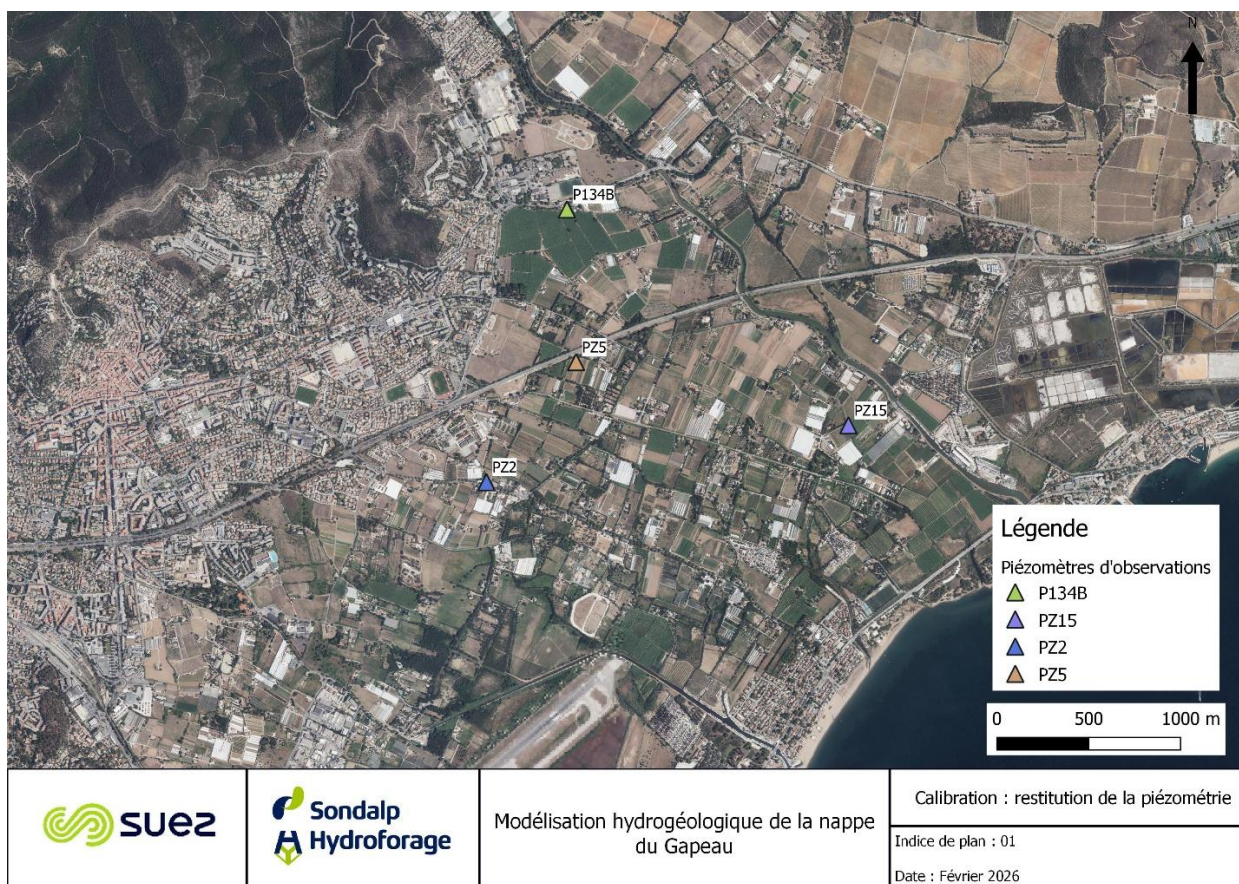


Figure 39 : Restitution de la piézométrie – localisation des ouvrages

5.2.2.1 P134B

Le piézomètre P134B est le seul piézomètre dont la période d'observation couvre toute la durée de la modélisation (2000-2024). Il est localisé à proximité immédiate du champ captant du Golf Hôtel, à l'ouest. La comparaison entre les niveaux piézométriques observés et simulés est présentée Figure 40.

Le modèle restitue correctement la piézométrie observée : la dynamique des variations est bien restituée. Il a cependant tendance à sous-estimer les périodes de basses eaux, particulièrement sur la période 2004-2008.

Entre 2023 et 2024, le modèle a tendance à surestimer les niveaux piézométriques calculés, avec une différence importante entre les niveaux observés et les niveaux calculés. Cette différence est également visualisée sur tous les autres piézomètres d'observations. Ce piézomètre étant localisé à proximité immédiate du champ captant du Golf Hôtel, ces variations sont soumises aux cycles de pompages des forages, et sont donc très sensibles aux incertitudes liées aux pompages, en particulier sur la période 2000-2010, où les volumes prélevés sont mal connus, en particulier la distribution par ouvrage.

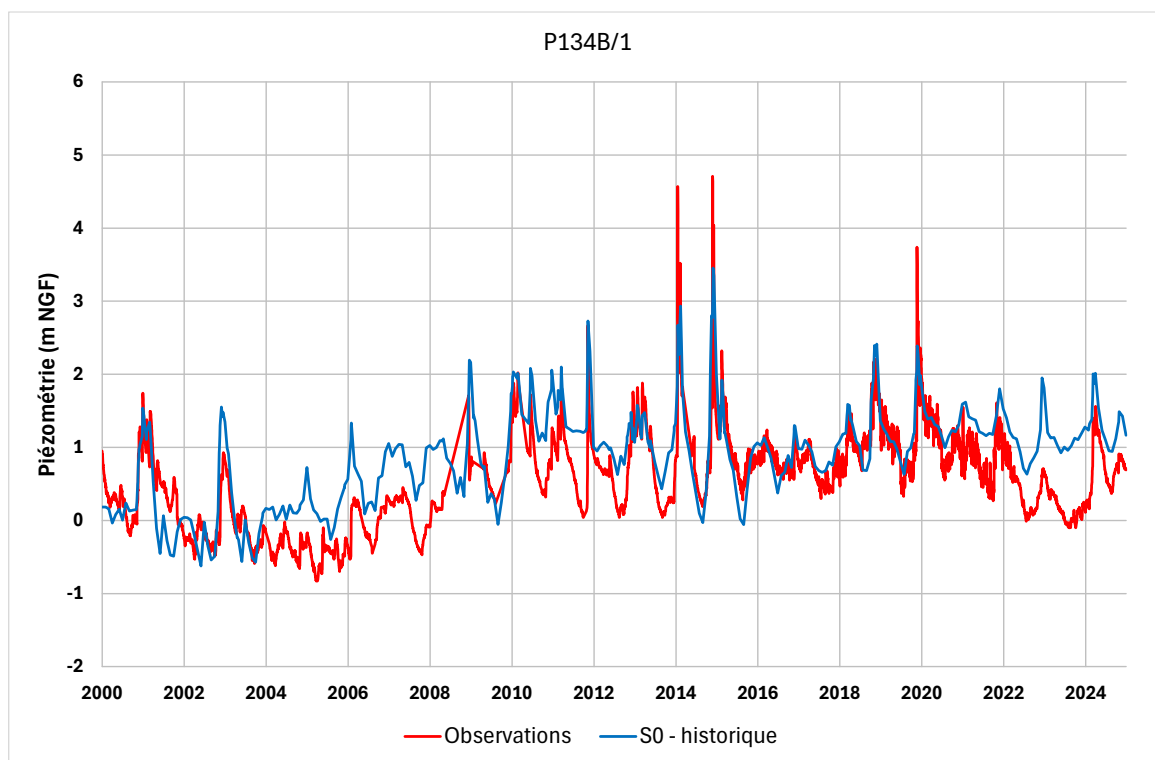


Figure 40 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – P134B

5.2.2.2 Pz2

Le piézomètre Pz2 est le piézomètre d'observation situé le plus à l'ouest de la zone d'étude. La comparaison entre les niveaux piézométriques observés et simulés est présentée Figure 41.

Le modèle restitue bien la piézométrie observée : la dynamique des variations est très bien restituée. L'amplitude des variations piézométriques simulée est cependant beaucoup plus importante que l'amplitude observée lors des périodes de fortes pluies.

Ceci est lié aux apports de la vallée du Roubaud, dont le fonctionnement est mal connu lors des épisodes de fortes précipitations et qui sont probablement surestimés lors de ces événements. Entre 2023 et 2024, le modèle a tendance à surestimer les niveaux piézométriques calculés, avec une différence de l'ordre de 50 cm entre les niveaux observés et les niveaux calculés, après la période de réalimentation.

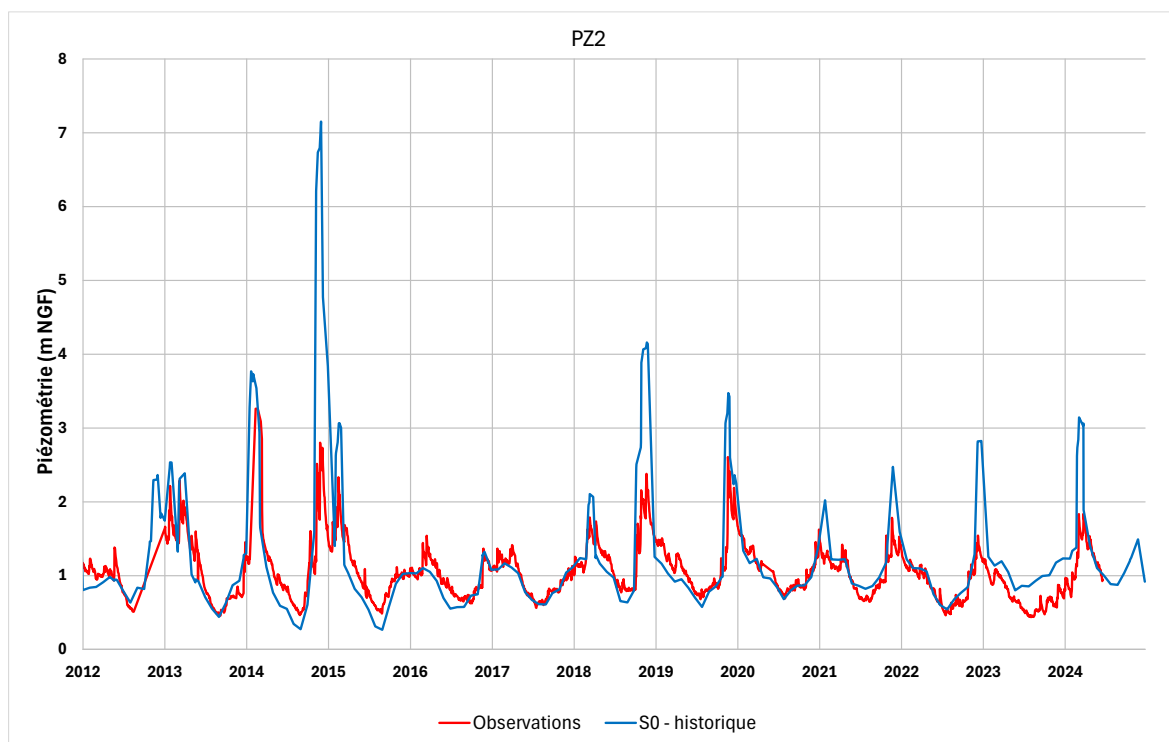


Figure 41 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – Pz2

5.2.2.3 Pz5

Le piézomètre Pz5 est localisé légèrement à l'aval de la RD98, à environ 300 m à l'est du site de réalimentation existant (site 1) et environ 100 m à l'est du futur site de réalimentation (site 2).

La comparaison entre les niveaux piézométriques observés et simulés est présentée Figure 42. Le modèle restitue bien la piézométrie observée. L'amplitude des variations piézométriques simulées est légèrement plus importante que l'amplitude observée sur la période 2012-2017, mais ceci a tendance à s'inverser à partir de 2021. L'écart reste cependant faible. La dynamique des variations est bien restituée. Le modèle a tendance à surestimer les étiages en 2014 et 2015, et à surestimer les périodes de hautes eaux en 2023 et 2024. La surestimation des niveaux piézométriques calculés entre 2023 et 2024, observée sur les autres piézomètres, est également visible sur cet ouvrage.

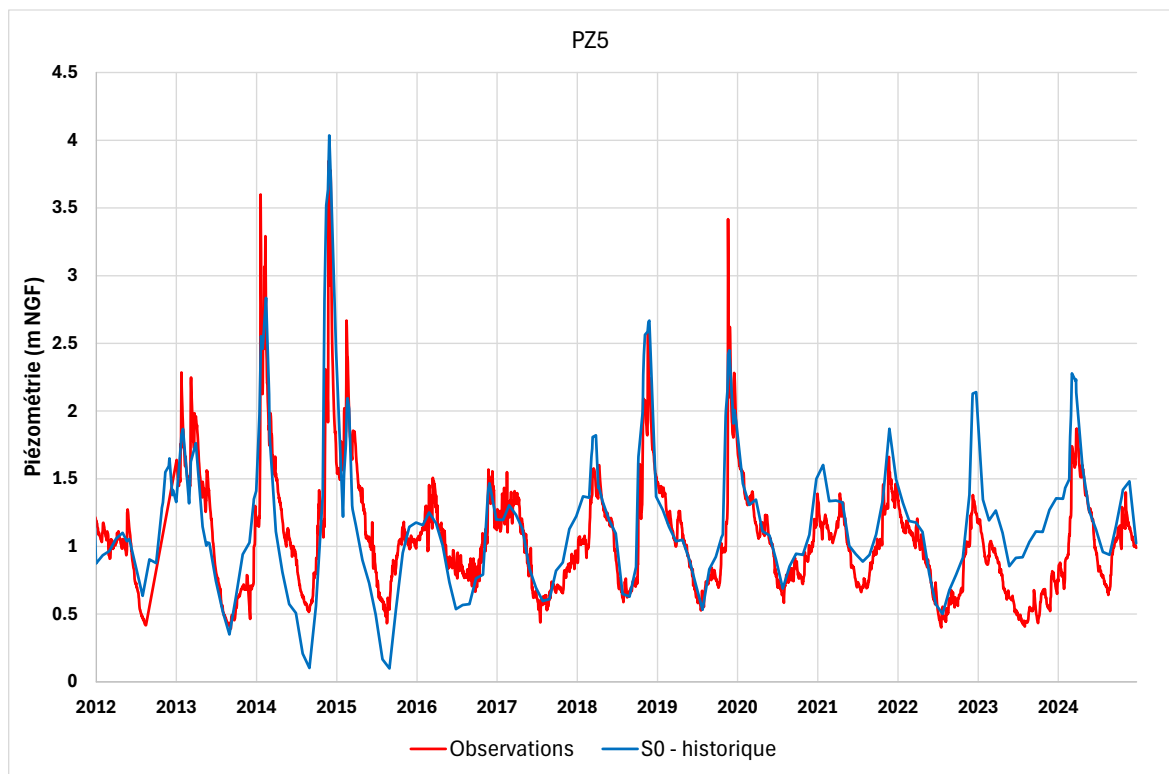


Figure 42 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – Pz5

5.2.2.4 Pz15

Le Pz15 est le piézomètre ayant des données d'observations localisé le plus en aval du modèle, près de la rive droite du Gapeau, tronçon aval.

La comparaison entre les niveaux piézométriques observés et simulés est présentée Figure 43.

La dynamique des variations est bien représentée. Le modèle surestime dans l'ensemble les niveaux piézométriques en étiage. Bien que localisé en aval du barrage anti-sel, les variations piézométriques liées aux variations de débit du Gapeau sont visibles.

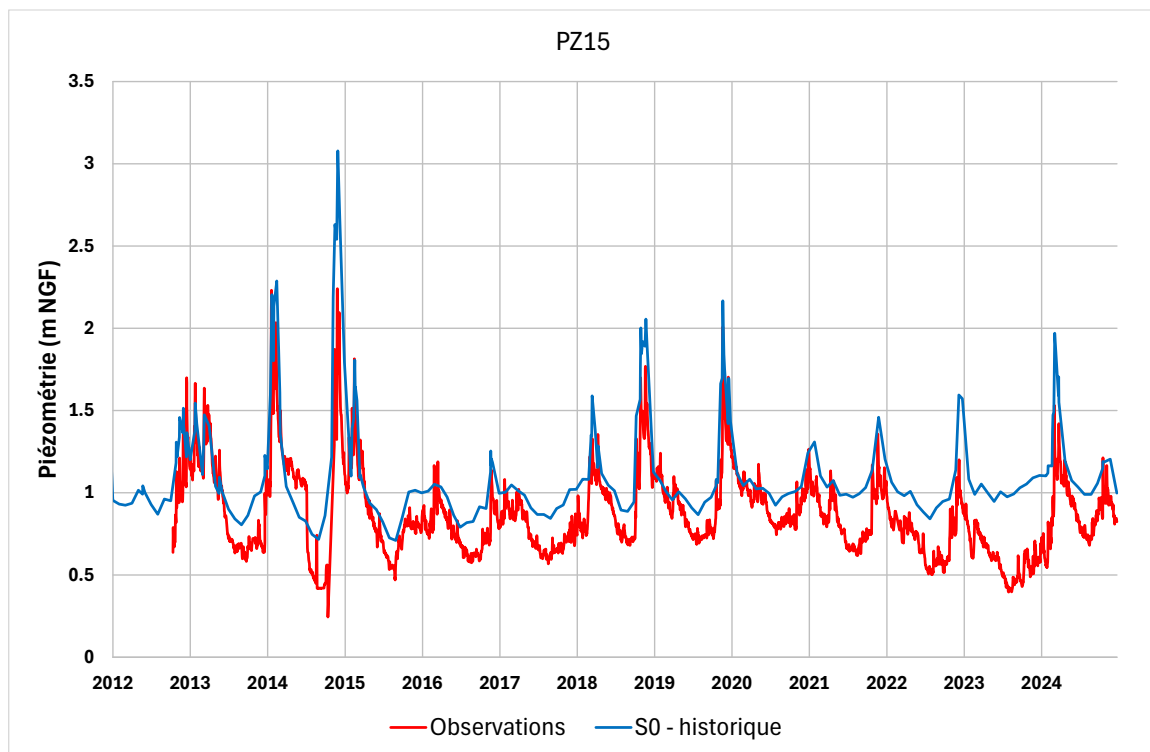


Figure 43 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – Pz15

5.2.3 Conclusion

Les paramètres de calage : conductivité hydraulique, coefficient d'emmagasinement sont représentatifs des données acquises lors des essais de pompages réalisés et des caractéristiques connues de la nappe (libre en amont de la RD98 et captive sur le reste du domaine d'étude).

La calibration permet de bien restituer les variations piézométriques observées. La dynamique des variations de la nappe est bien restituée, en étiage et en hautes eaux et en différents points de la nappe.

6. SIMULATIONS – DEFINITION DES SCENARIOS

6.1 Projet de réalimentation – AquaRenova 2

Le projet d'extension du dispositif Aquarenova consiste à augmenter la capacité instantanée de recharge de 100 l/s pour passer de 50 l/s actuellement à 150 l/s dans la configuration finale.

Cette augmentation de capacité instantanée a pour objectif de permettre la réalimentation dans la nappe jusqu'à 1,2 Mm³/an pour les années les plus critiques en termes de recharge tout en tenant compte des contraintes de disponibilité de la ressource en eau de surface durant l'hiver liées aux phénomènes suivants :

- Pics de turbidité dans le Roubaud (arrêt automatique de la station de pompage) ;
- Pollution ponctuelle dans le Roubaud (arrêt automatique de la station de pompage) ;
- Épisode exceptionnel ponctuel de sécheresse hivernale comme observé en novembre 2022 pouvant provoquer la fermeture de la prise d'eau de la Castille et donc limiter l'apport d'eau dans le fleuve Roubaud.

Le dispositif de réalimentation de nappe n'est en fonctionnement qu'entre les mois de novembre et d'avril.

6.2 Définition des scénarios

6.2.1 Scénarios

Les simulations ont pour objectif de tester différentes configurations d'alimentation de la nappe du Gapeau.

Huit simulations ont été réalisées au total, dont une correspondant à la situation historique (calage en régime transitoire).

Deux simulations prenant en compte l'impact du changement climatique sur les débits, la recharge et le niveau de la mer étaient prévues. Après l'analyse des données climatiques prospectives (6.2.4), deux simulations supplémentaires S3bis et S4bis ont été réalisées.

La dernière simulation correspond à un scénario de pollution de la nappe via les sites de réalimentation (Tableau 3).

Tableau 3 : Scénarios simulés dans le modèle

Simulation	Hydrologie - Climat	Réalimentation	Exploitation des captages
0 - Calibration	Historique 2000-2025	Mise en service bassin 1 à partir de 2015	Historique 2000-2025
1	Historique 2000 – 2025	Aucune réalimentation	
2	Historique 2000 – 2025	Sites 1 et 2	
3	Situation climatique future – 2041-2066	Aucune réalimentation	
4	Situation climatique future – 2041-2066	Sites 1 et 2	
3bis	Situation climatique future – Horizon 2050	Aucune réalimentation	
4bis	Situation climatique future – Horizon 2050	Sites 1 et 2	
5 - Pollution	Historique 2018-2021	Sites 1 et 2	Besoins AEP 2035

6.2.2 Prise en compte du changement climatique

6.2.2.1 Débit et recharge

6.2.2.1.1 Données utilisées, incertitudes

Le projet Explore2 est porté par l'INRAE et l'Office International de l'eau (OiEau). Il a pour objectif, d'actualiser les connaissances sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie à partir des dernières publications du GIEC, mais aussi d'accompagner les acteurs des territoires dans la compréhension et l'utilisation de ces résultats pour adapter leurs stratégies de gestion de la ressource en eau.



Le projet Explore2 a débuté en 2021 et s'appuie sur les dernières connaissances scientifiques pour actualiser les projections pour le climat, les eaux de surface et souterraines et leurs interactions, selon une méthodologie homogène à l'échelle de la France métropolitaine.

Ce travail est réalisé par un consortium scientifique porté par l'INRAE et regroupant des organismes de recherche et centres universitaires français actifs dans le domaine du changement climatique (Météo-France, BRGM, Ecole Normale Supérieure, IRD (HSM), CNRS (IGE, IPSL, Sorbonne Université), INRAE, EDF).

Les résultats d'Explore2 visent à décrire le climat à une résolution de 8 x 8 km² et d'évaluer l'évolution de la disponibilité en eaux superficielles et souterraines et de caractériser les extrêmes sur l'ensemble du XXI^e siècle dans un contexte de changement climatique.

Les données sont produites dans le cadre d'Explore2 sur la base de trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5), et d'un ensemble de modèles climatiques et de modèles hydrologiques.

Les résultats d'Explore2, ont été publiés en été 2024. Il se concentre sur les indicateurs traitant de la ressource en eau (hydrologie, hydrogéologie). Il combine les modèles climatiques (au nombre de 17 modèles globaux, et 15 régionaux) avec des modèles hydrologiques / hydrogéologiques.

Ces données sont mises à disposition sur la plateforme DRIAS-Eau du Ministère de la Transition Ecologique.



DRIAS les **futurs** de l'eau

Les projections climatiques comportent de multiples sources d'incertitudes, qui se déclinent en différents niveaux (Figure 44). On identifie

- Les incertitudes socio-économiques, qui dépendent des futurs choix de société en matière d'émissions de gaz à effet de serre ;
- Les incertitudes scientifiques et techniques, qui sont liées à des lacunes dans la compréhension et dans la modélisation de certains phénomènes physiques, comme les interactions complexes avec le cycle du carbone ou les processus atmosphériques (nuages et convection), qui restent difficilement représentables ;
- La variabilité naturelle du climat, qui introduit une part de chaos dans le système climatique, rendant difficilement prévisibles certains phénomènes, même avec des modèles de haute précision ;
- La descente d'échelle, la régionalisation, où l'incertitude provient des méthodes utilisées pour adapter les projections climatiques à des échelles régionales, augmentant ainsi les marges d'erreur.

C'est pourquoi une approche probabiliste s'impose, présentant les prévisions sous forme d'intervalles et non de valeurs fixes, pour mieux saisir l'éventail des possibles. Les experts recommandent ainsi de se préparer en prenant en compte différents futurs possibles, notamment

en orientant les stratégies vers des solutions robustes et flexibles et apportant des co-bénéfices, en réponse à différents scénarios climatiques et socio-économiques.

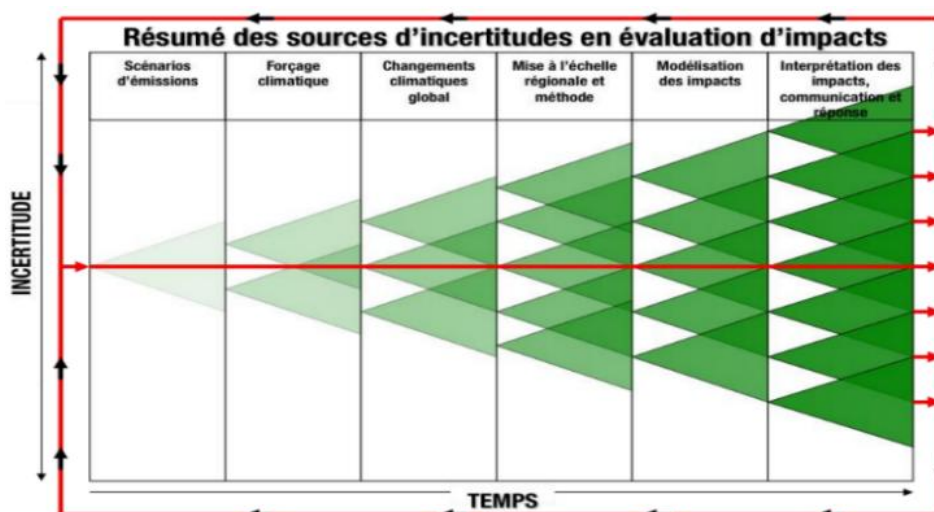
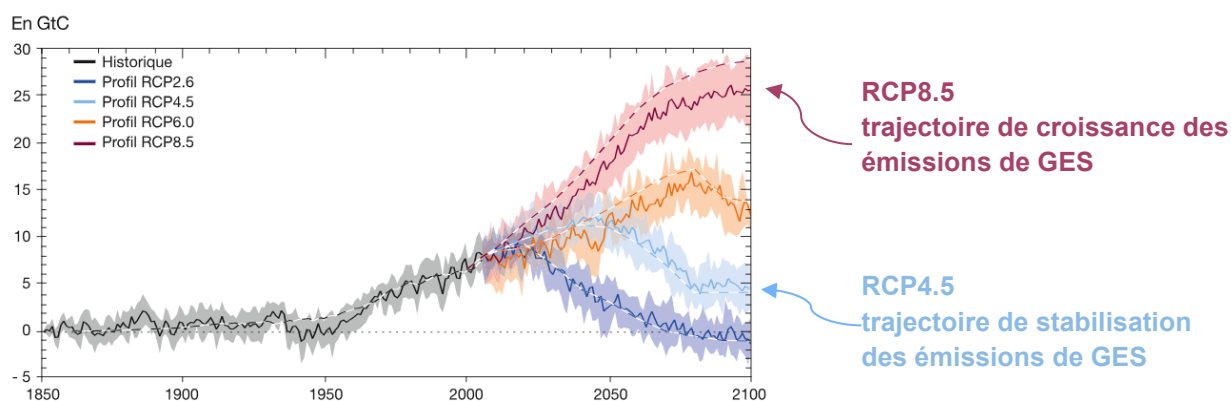


Figure 44 : Cascade d'incertitudes (Simonet, 2005 d'après Viner, 2001)

6.2.2.1.2 Scénario d'émissions et horizon temporel

6.2.2.1.2.1 Scénarios d'émission

Les scénarios de concentration représentative (RCP) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) sont des trajectoires de forçage radiatif qui décrivent les différents futurs possibles en fonction des actions humaines face aux émissions de gaz à effet de serre. Chaque scénario correspond à un niveau de forçage radiatif (en W/m^2), reflétant des hypothèses socio-économiques variées : de fortes réductions d'émissions (RCP2.6) à un scénario de croissance continue des émissions (RCP8.5). Ces scénarios permettent d'explorer les impacts climatiques selon différents choix politiques et économiques globaux (Figure 45).



Source : Giec, 1^{er} groupe de travail, 2013

Figure 45 : Trajectoires d'émissions des scénarios RCP du GIEC à l'échelle planétaire

Le RCP4.5 limite le réchauffement planétaire à 3°C d'ici la fin du siècle alors que le RCP 8.5 indique un réchauffement de plus de 4°C.

Le Plan National d'Adaptation au Changement climatique de 2024 se base sur une Trajectoire de Réchauffement de référence pour l'adaptation au Changement Climatique (TRACC) basée également sur les projections du scénario RCP 8.5 pour préparer les territoires au niveau de réchauffement de +4°C à la fin du siècle.

Le travail effectué ci-après se base sur le scénario RCP 8.5.

6.2.2.1.2.2 Horizon temporel

L'horizon temporel utilisé dans les simulations pour évaluer l'impact du changement climatique est 2050.

Les données du projet Explore2 sont mises à disposition au pas de temps journalier, annuel ou selon trois horizons :

- H1 : Début de siècle : 2021-2050 ;
- H2 : Milieu de siècle : 2041-2070 ;
- H3 : Fin de siècle : 2071-2100.

Ces données sont aussi mises à disposition pour la période de référence : 1976-2005.

Les indicateurs climatiques et hydrologiques (précipitations, températures, etc.) présentent une forte variabilité interannuelle. Le climat est une moyenne des conditions météorologiques sur une longue période, plusieurs décennies. Par convention, les climatologues utilisent des périodes de référence de 30 ans qui permet d'englober statistiquement les variabilités retrouvées au sein d'une période climatique.

Ainsi, afin de s'affranchir de cette variabilité interannuelle, et en cohérence avec les horizons climatiques, l'horizon H2 : Milieu de siècle, qui encadre l'horizon cible (2050) a été retenu.

6.2.2.1.2.3 Narratifs

Il y a autant de futurs possible que de couples GCM/RCM, qui sont au nombre de 17. Chacun de ces couples a une probabilité d'occurrence égale aux autres couples. Ces modèles ne présentent pas de probabilité supérieure les uns par rapport aux autres. Ils illustrent des trajectoires d'évolution distinctes, reflétant les spécificités, les avantages et les limites propres à chaque modèle. Plusieurs approches existent pour choisir la trajectoire d'évolution du climat.

L'approche la plus recommandée est l'approche narrative, qui vise à se baser sur un nombre réduit de simulations. Quatre narratifs ont été identifiés dans le cadre d'Explore2. Ils sont des **visions contrastées** des futurs sous le **scénario de fortes émissions en fin de siècle**. Ils illustrent la **diversité des futurs possibles**. Mais ce **ne sont pas des prévisions**.

Tableau 4 : Narratifs du projet Explore2

Narratif vert	Narratif jaune	Narratif violet	Narratif orange
Réchauffement marqué et augmentation des précipitations	Changements futurs relativement peu marqués	Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations	Fort réchauffement et fort assèchement en été (et en annuel)

Les bonnes pratiques pour le choix du narratif sont de ne pas se limiter (si possible) à un seul narratif et de sélectionner des narratifs contrastés en lien avec les enjeux (sécheresse, crues...).

Dans le cadre de la modélisation de la nappe du Gapeau, un seul narratif est choisi. Il est alors recommandé dans ce cas de chercher une simulation modèle proche de la moyenne des résultats.

Avec l'ensemble des projections hydro climatiques, des fiches incertitudes ont été produites à chacune des stations hydrologiques. Ces fiches sont disponibles pour trois indicateurs hydrologiques pour la station de Ste-Eulalie :

- QA : débit journalier moyen annuel ;
- QJXA : Débit journalier maximal annuel ;
- QMNA : Débit (Q) mensuel minimal de chaque année civile.

La Figure 46 présente différentes dispersions des changements relatifs projetés par des différents modèles de climat (GCMs, RCMs) et les différents modèles hydrologiques (HMs).

La bande colorée centrale (très foncée) représente la dispersion des réponses climatiques moyennes projetées par les différents modèles hydrologiques, qu'ils soient disponibles ou reconstitués. La plage colorée foncée représente la bande d'incertitude « Modèle », représentant la dispersion entre les réponses climatiques des différentes chaînes de simulation de l'ensemble. La plage colorée claire représente la courbe enveloppe des projections brutes, illustrant les variations interannuelles possibles de la variable considérée dues à la variabilité interne du climat.

L'accord sur le signe de changement est représenté par les ronds ou les triangles sous les graphiques. Les triangles orientés vers le bas indiquent que 80% des modèles sont en accord sur un changement négatif au niveau de la station Ste-Eulalie entre 2060 et 2010 pour le Qa et tout le 21^{ème} siècle pour le QMNA.

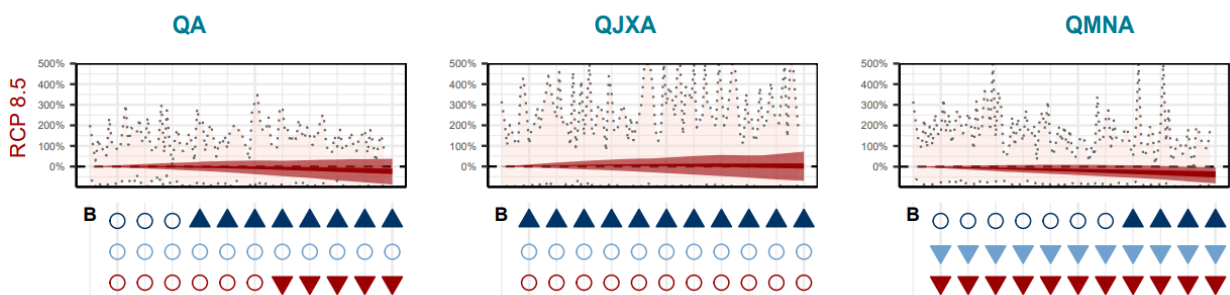
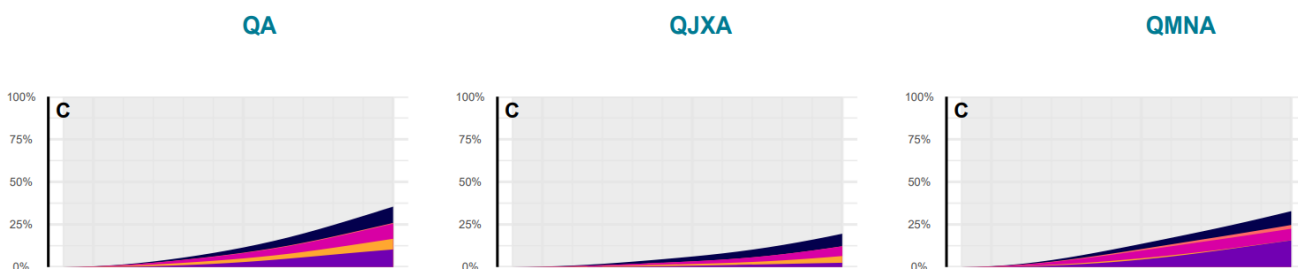


Figure 46 : Changements projetés : moyenne d'ensemble et d'incertitudes

La Figure 47 présente la partition de variance, c'est-à-dire la contribution relative des différentes sources d'incertitudes à l'incertitude totale (y compris la variabilité interne, en % de la variance totale). Ici, le GCM exprime moins de variance que le RCM.



- (gris) : incertitude associée à la variabilité interne du climat ;
- (bleu foncé) : incertitude liée à la variabilité résiduelle ;
- (saumon) : incertitude HM (variance des effets principaux des différents HMs) ;
- (fuchsia) : incertitude RCM (variance des effets principaux des différents RCMs) ;
- (orange) : incertitude GCM (variance des effets principaux des différents GCMs) ;
- (violet) : incertitude RCP (variance des effets principaux des différents scénarios RCPs).

Figure 47 : Pourcentage de l'incertitude totale expliquée par chaque source d'incertitude

Les effets principaux des différents GCMs (modèles climatiques globaux) (ligne D) et RCMs (modèles climatiques régionaux) (ligne E) sont présentés sur la Figure 48.

L'effet principal d'un modèle donné est la différence entre la réponse climatique moyenne en changement obtenue pour ce modèle par rapport à la réponse climatique moyenne en changement obtenue pour tout l'ensemble. La somme des effets principaux pour les différents modèles d'un type donné est donc toujours nulle.

Le modèle GCM le plus proche de la moyenne d'ensemble sur l'horizon milieu de siècle est le Ec-Earth pour le QA, et pour le RCM il s'agit de HadRem3-GA7.

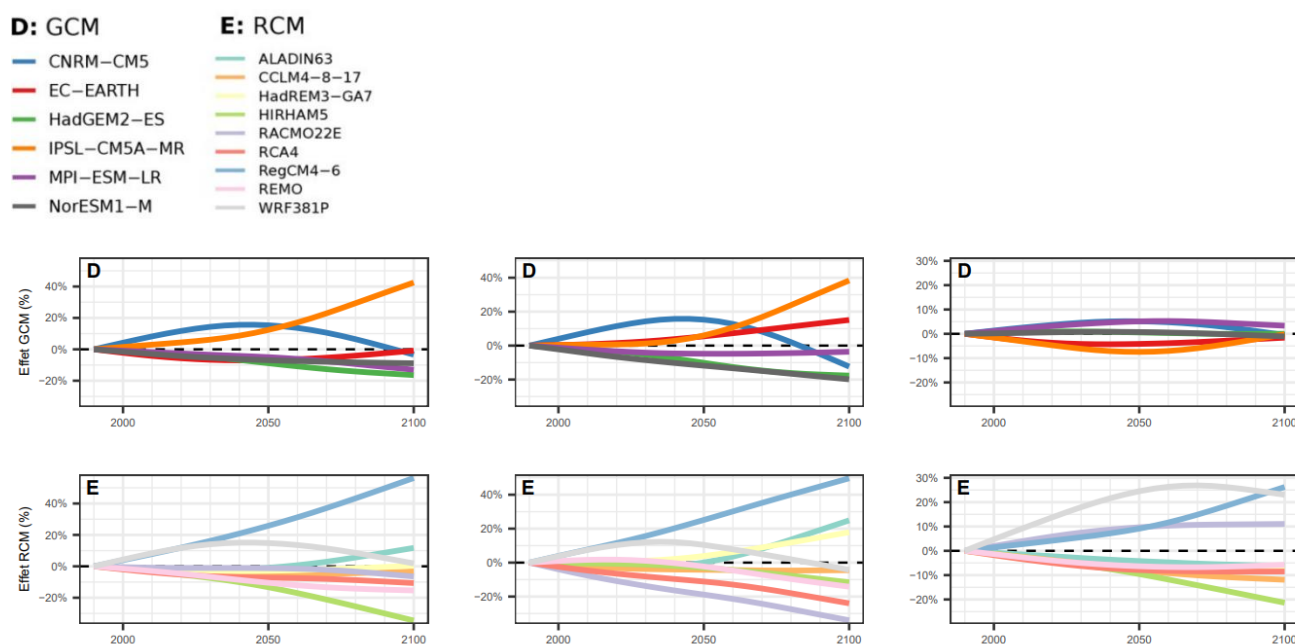


Figure 48 : Réponses individuelles des modèles : Effets principaux

Le narratif correspondant est le narratif orange (EC-Earth/HadREM3-GA7), correspondant à un fort réchauffement et fort assèchement en été (et en annuel).

Ce résultat peut être croisé avec les messages et enseignements du projet Explore 2, qui tendent à montrer que sous RCP8.5 en fin de siècle, une baisse des précipitations annuelles est attendue dans la zone d'étude (Figure 49).

Des « hot-spots » sous RCP8.5 en fin de siècle

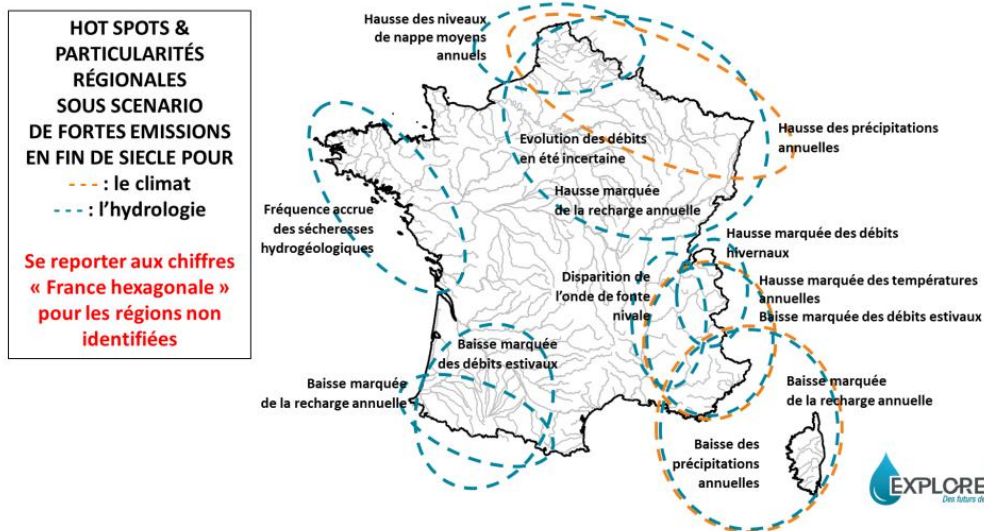


Figure 49 : Particularités régionales sous scénario de fortes émissions en fin de siècle pour le climat et l'hydrologie

6.2.2.2 Niveau de la mer

Le service Copernicus sur le changement climatique (C3S) est l'un des six services d'information thématiques fournis par le programme d'observation de la Terre Copernicus de l'Union européenne.

La mission du C3S est de soutenir les politiques d'adaptation et d'atténuation de l'Union européenne en fournissant des informations cohérentes et fiables sur le changement climatique. Les jeux de données disponibles comprennent notamment des indicateurs d'évolution du niveau de l'eau (niveau de la mer, niveaux extrêmes côtiers...) sur la période 1950-2050 dérivés d'une reconstitution historique et de projections climatiques hautes résolutions issues de CMIP6.

Le CMIP6 (coupled model Intercomparison project phase 6) est un ensemble coordonné d'expériences de modélisations climatique. Il fournit des sorties standardisées de modèles couplés océan-atmosphère-glace-terre pour des périodes historiques et futures sous différents scénarios d'émissions.

Les données sont disponibles au pas de temps annuel entre 2015 et 2050.

La station la plus proche du modèle est localisée à 9 km au sud de la côte de Hyères environ (Longitude X = 6,292, Latitude Y = 43,074).

A l'horizon 2050, le niveau de la mer Méditerranée moyen calculé à proximité d'Hyères est environ 20 cm plus élevé que le niveau moyen observé sur la période 2000-2025.

6.2.3 Traitement et analyse des données climatiques futures

6.2.3.1 Hydrologie – Narratif Orange

6.2.3.1.1 Traitement des données

Les données hydrologiques futures sont des débits non influencés. Le Gapeau est soumis à des pressions importantes. Des démarches de maîtrise des prélèvements dans le Gapeau sont réalisées, mais l'hydrologie future du Gapeau restera influencée par ces usages.

Il est donc nécessaire de réinfluencer les débits du fleuve avant toute modélisation.

Pour ce faire, deux corrélations ont été réalisées entre les débits recalculés dans le cadre du projet Explore2 sur la période de référence H0 et ceux mesurés à la station de Sainte Eulalie sur la même période (1976-2005) (Figure 50) :

- Une corrélation entre les débits journaliers mensuels moyens à l'échelle annuelle ;
- Une corrélation entre les débits journaliers mensuels moyens en période estivale (juin, juillet, août et septembre), du fait du décalage de ces débits par rapport aux débits plus importants ;

Les corrélations sont bonnes, et elles ont donc été appliquées aux débits calculés sur la période H2 au pas de temps mensuel.

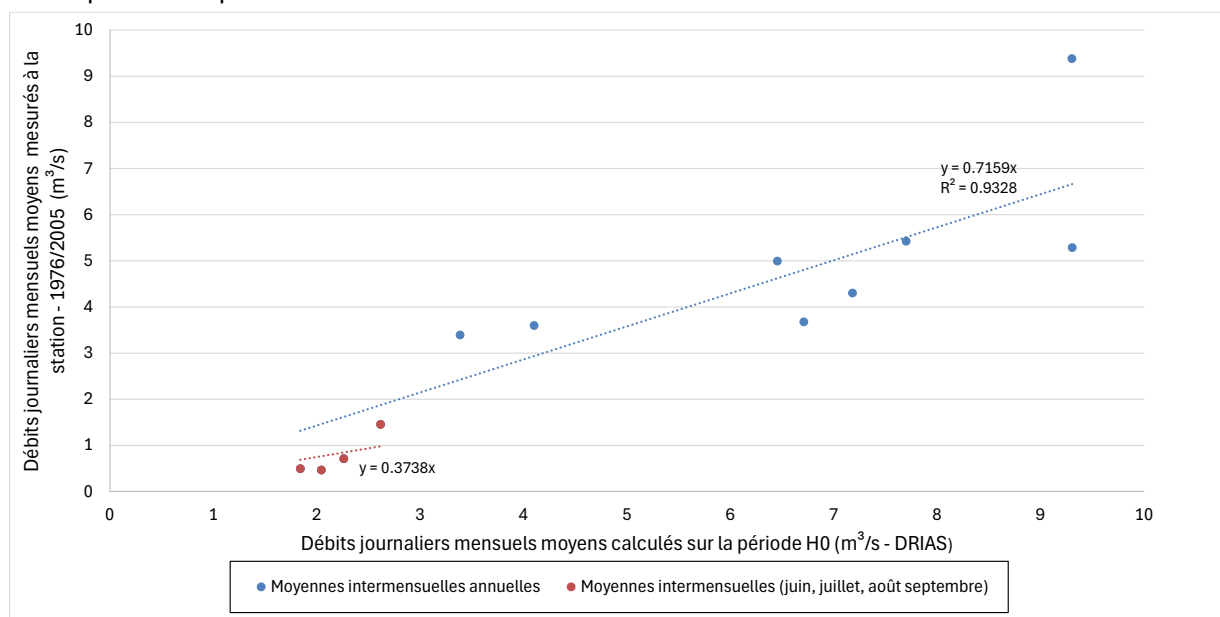


Figure 50 : Corrélation entre les débits journaliers mensuels moyens calculés sur la période 1976/2005 et ceux mesurés sur la même période à la station

Les débits moyens inter-mensuels calculés dans le cadre du projet Explore 2 à la station Ste-Eulalie sur la période 2041-2070 et ceux recalculés pour obtenir des débits influencés par les actions humaines sont présentés sur la Figure 51.

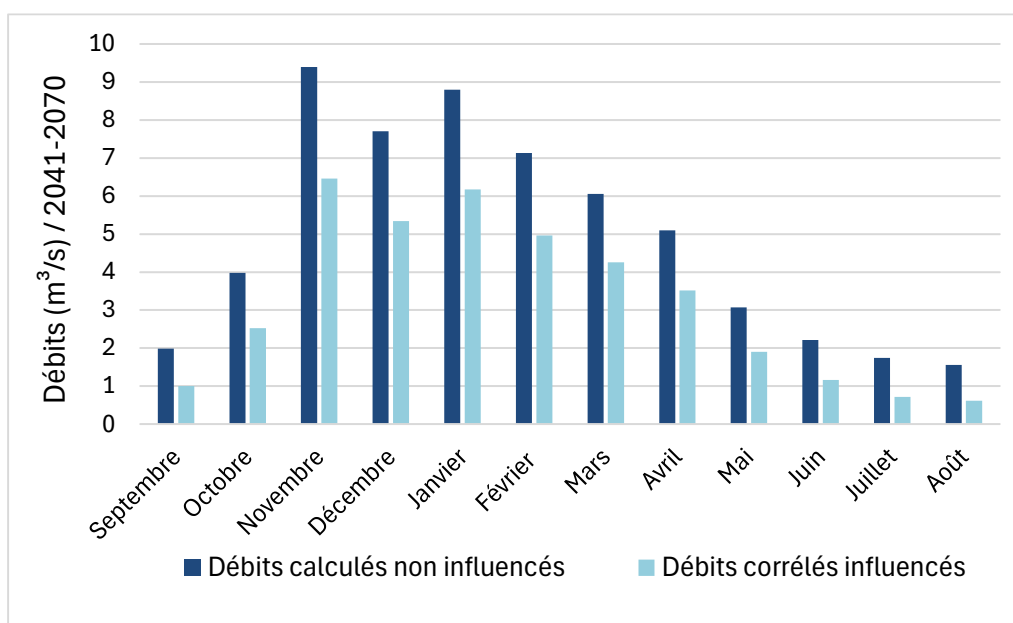


Figure 51 : Débits calculés non influencés et débits corrélés influencés à la station Ste Eulalie – H2/RCP8.5/Narratif Orange

6.2.3.1.2 Comparaison avec les débits caractéristiques actuels

Les débits caractéristiques sont disponibles sur le site Hydroportail, calculés à partir des débits moyens journaliers (plus de 20 000) les plus valides entre 1961 et 2026. Une analyse a été réalisée en comparant les périodes 2000-2009, 2000-2025 et 2041-2066 (

Tableau 5 et Figure 52).

Sur la période future, cette analyse indique que les débits maximaux et moyens sont moins élevés que sur la période historique, mais que les étiages sont moins sévères.

La période 2000-2009 apparaît plus critique que les autres, tous les indicateurs hydrologiques sont plus faibles que sur les autres périodes ; maximum, moyenne et débits d'étiage. Seul le débit minimum est plus élevé, mais il s'agit d'une mesure ponctuelle qui ne traduit pas la sévérité de l'étiage sur la durée.

Tableau 5 : Comparaison des débits caractéristiques calculés pour les périodes 2000-2009, 2000-2025 et 2041-2066

Débits caractéristiques (m³/s)	2000-2009	2000-2025	2041-2066
Débit maximum	174	305,00	240,34
Débit moyen	2,823	3,589	3,210
Débit minimum	0,112	0,017	0,069
QMNA2	0,240	0,308	0,500
QMNA5	0,171	0,207	0,321

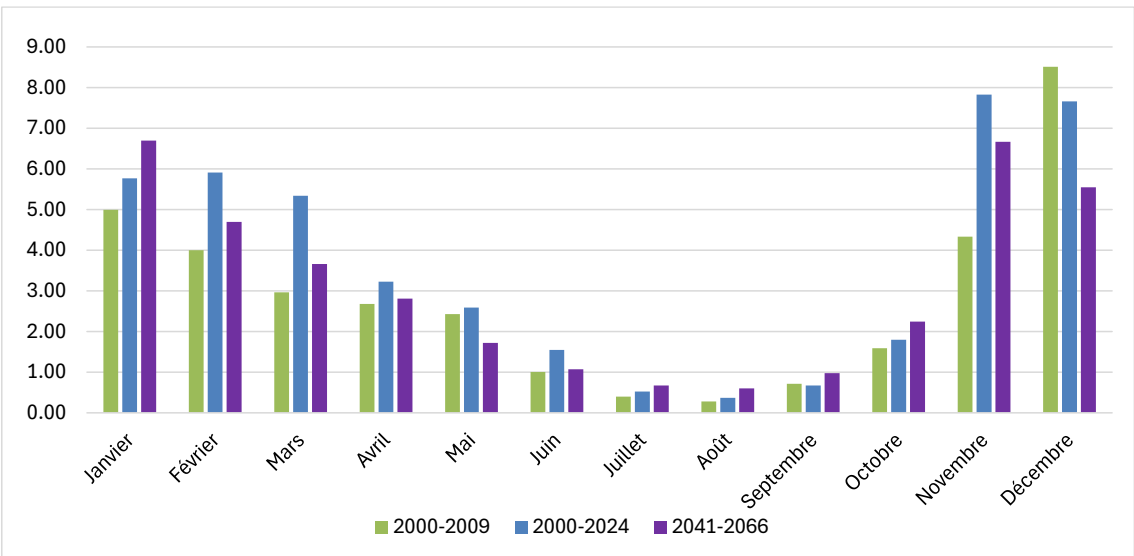


Figure 52 : Débits moyens inter mensuels sur les périodes 2000-2009, 2000-2024 et 2041-2066

6.2.3.2 Recharge – Narratif Orange

Les données concernant la recharge à l'horizon H2 – Narratif Orange sont disponibles au pas de mensuelle et trimestrielle pour chaque année de l'horizon H2.

Après un traitement des données, la recharge moyenne annuelle sur les périodes 2000-2009, 2000-2025 et 2041-2066 ont été comparées (Tableau 6). La recharge calculée à l'horizon H2 apparaît plus élevée que sur la période historique, en particulier que la période 2000-2009.

Comme pour le débit, une corrélation entre la recharge calculée dans le cadre du projet Explore2 sur la période de référence H0 et celle calculée à l'aide d'un bilan hydrique sur la même période (1976-2005) doit être réalisée, pour obtenir des conditions pénalisantes.

Tableau 6 : Recharge moyenne annuelle

	2000-2009	2000-2025	2041-2066
Recharge moyenne annuelle (mm)	100,3	108,8	130,2

6.2.4 Synthèse – chronique hydro-climatique retenue pour les scénarios futurs

La comparaison des données hydro-climatiques futures (narratif orange, période 2041-2065) montre que ces dernières, bien que pénalisantes pour l'hydrologie du Gapeau, ne le sont pas autant que celles de l'épisode 2000-2009.

L'épisode de sécheresse du début des années 2000 apparaît avoir été d'une forte intensité, plus importante que ce que les projections hydro-climatiques tendent à indiquer pour l'horizon H2, pour l'hydrologie du Gapeau, ainsi que pour la recharge de la nappe.

En conséquence, et afin de vérifier l'intérêt dans des conditions plus pénalisantes que celles qui sont modélisées dans les scénarios rétrospectifs S0 à S2, il a été décidé de simuler deux scénarios supplémentaires (S3bis et S4bis) correspondant aux conditions suivantes :

- chroniques hydrologiques et de recharge de la période 2000-2025, incluant l'épisode sévère de 2000-2009 ;
- élévation du niveau de la mer de + 0,2 m par rapport au niveau moyen observé 2000-2015.

Ces conditions permettent de placer le projet dans des conditions sévères combinant les conditions hydro-climatiques à l'origine de la crise de salinité de la nappe des années 2000 et une hausse du niveau de la mer à horizon 2050.

Les résultats des scénarios S3 et S4, prenant en compte les conditions hydro-climatiques calculées du projet Explore2, seront tout de même présentées dans ce rapport, bien que moins sévères que celles observées historiquement.

7. SIMULATIONS – RESULTATS

Pour chacun des scénarios traités sont présentés dans les paragraphes suivants :

- La piézométrie ;
- Les bilans de flux : échanges nappe / Méditerranée ; échanges nappe / Gapeau.

Les piézomètres analysés pour étudier l'impact des scénarios seront ceux suivis actuellement par Sondalp dans le cadre de l'exploitation du système de réalimentation de la nappe du Bas Gapeau, à savoir le Pz4, le Pz5, le Pz11 et le Pz14, localisés sur la Figure 53.

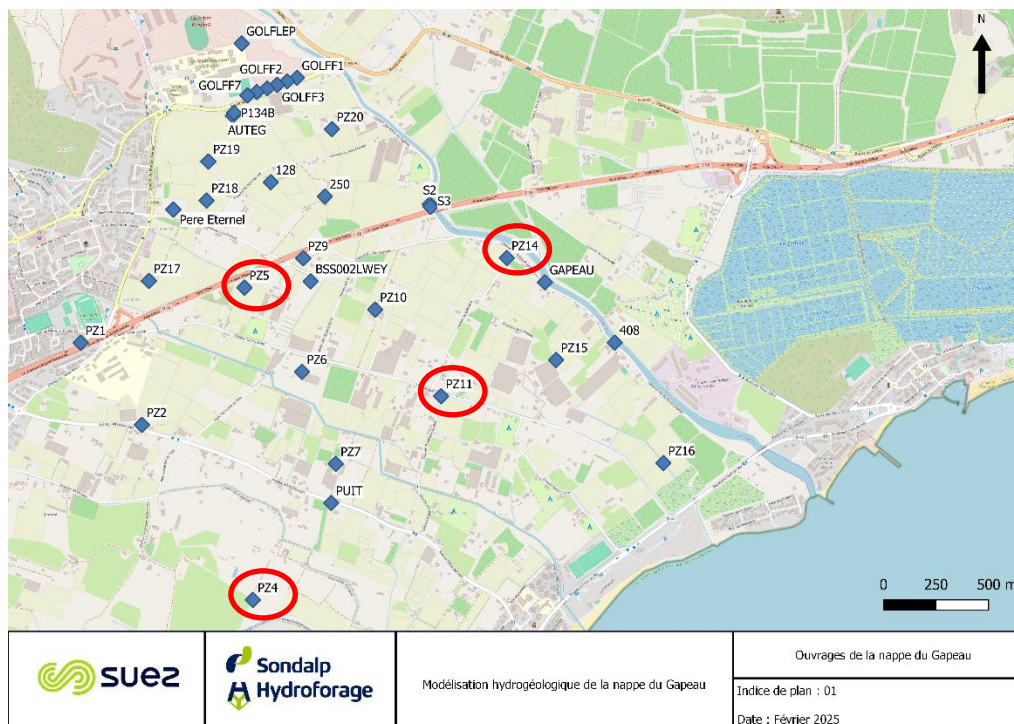


Figure 53 : Ouvrages de la nappe du Gapeau

7.1 Scénarios rétrospectifs S0, S1, S2

Pour rappel, les trois scénarios simulent les conditions hydro-climatiques et de prélèvement constatées sur la période 2000-2025 et diffèrent par la mise en service de la réalimentation de nappe :

- S0 : mise en service d'AquaRenova1 à partir de 2015 (situation réelle)
- S1 : aucune réalimentation ;
- S2 : mise en service d'AquaRenova 1 et 2 de 2000 à 2025.

7.1.1 Impact sur la piézométrie

7.1.1.1 Pz5

Le Pz5 est localisé à proximité des bassins de réalimentation, à l'est. Les niveaux piézométriques calculés du scénario 1 et du scénario 2 pour le piézomètre Pz5 sont présentés Figure 54.

La réalimentation au niveau du site 1 (Aquarenova 1) n'étant en opération qu'à partir de 2015, les niveaux piézométriques du S0 et du S1 sont égaux entre 2000 et 2015. A partir de 2015, la réalimentation en S0 a un impact léger mais positif, avec une augmentation maximale des niveaux observés de 30 cm en 2023 (Figure 55). A noter que le débit mensuel maximum

réalimenté depuis la mise en place de cette réalimentation est de 29 l/s, largement inférieur aux 50 l/s autorisés depuis 2015.

Les niveaux piézométriques calculés en S2 sont nettement plus élevés que ceux de S0/S1 lors de la période de fonctionnement des bassins, avec des différences de niveaux entre le S1 et le S2 pouvant atteindre plus de 2 mètres.

Si la réalimentation ne semble avoir aucun impact sur l'intensité des étiages, ceux-ci interviennent plus tardivement, sous l'effet de la décrue qui suit l'arrêt de la réalimentation.

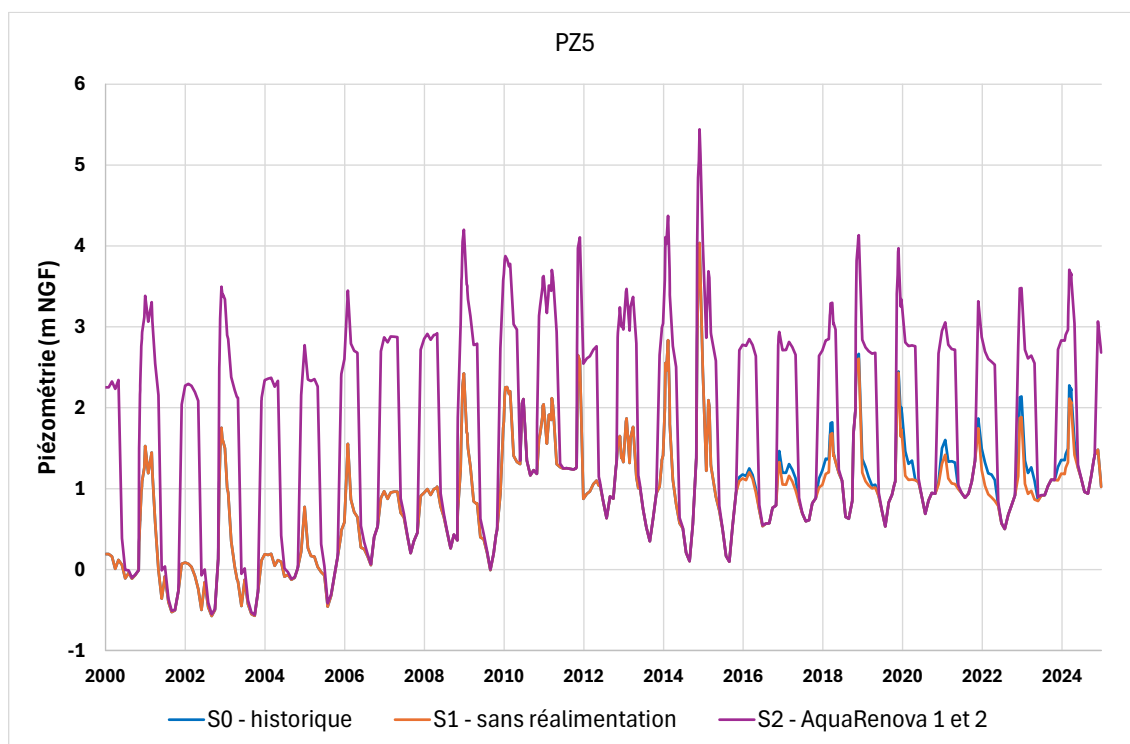


Figure 54 : Niveaux piézométriques du Pz5 pour le scénario S1 et S2 et comparaison au scénario S0

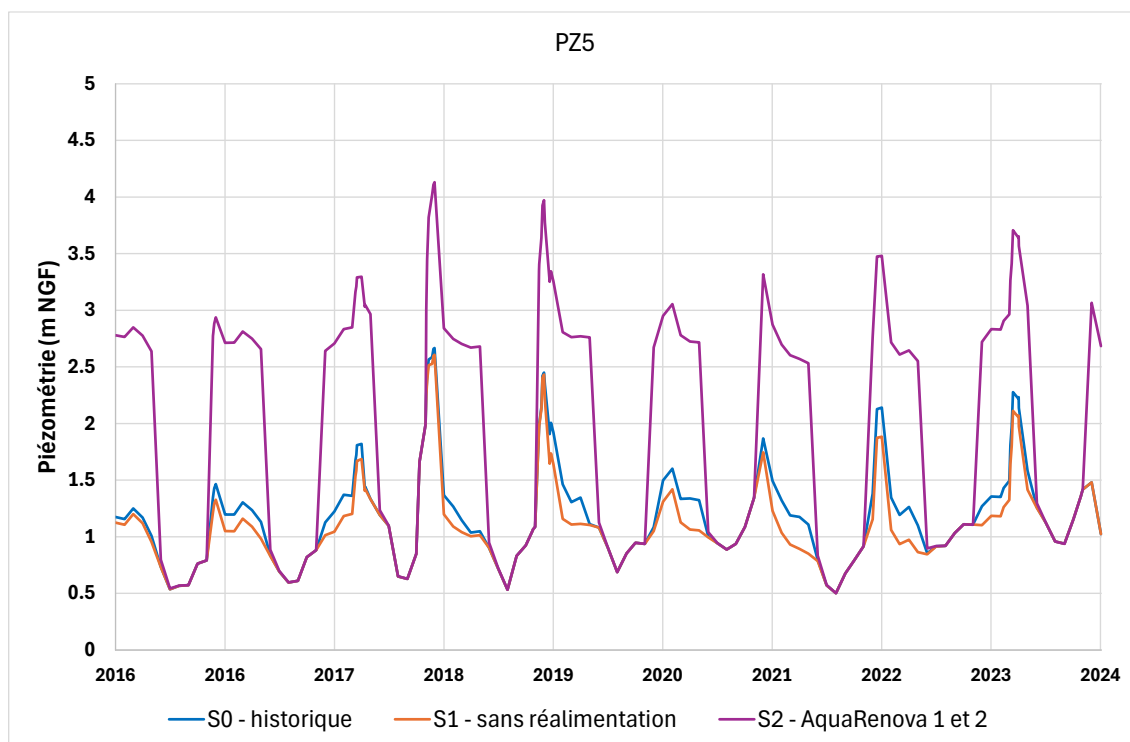


Figure 55 : Niveaux piézométriques du Pz5 pour le scénario S1 et S2 et comparaison au scénario S0 entre 2016 et 2024

7.1.1.2 Pz4

Le Pz4 est localisé dans la partie aval du modèle, à 1200 mètres environ de la mer Méditerranée. Les niveaux piézométriques calculés du scénario 1 et du scénario 2 pour le piézomètre Pz4 sont présentés Figure 56.

A partir de 2015, l'impact de réalimentation (scénario 0) sur les niveaux est visible, par comparaison avec les niveaux observés en S1 (sans réalimentation) (Figure 57). Les niveaux calculés en S0 sont plus élevés qu'en S1, avec des différences pouvant atteindre 20 cm maximum.

L'impact de la réalimentation avec un débit nominal à 150 l/s est toujours visible, avec des différences de niveaux entre le S1 et le S2 pouvant atteindre 1 m en période très sèche. Ces différences sont moins élevées qu'observées au Pz5, du fait de l'éloignement du Pz4 avec les sites d'infiltration. L'intensité des étiages n'est pas modifiée, mais ils apparaissent un peu plus tardivement, du fait du tarissement suite à l'arrêt de la réalimentation.

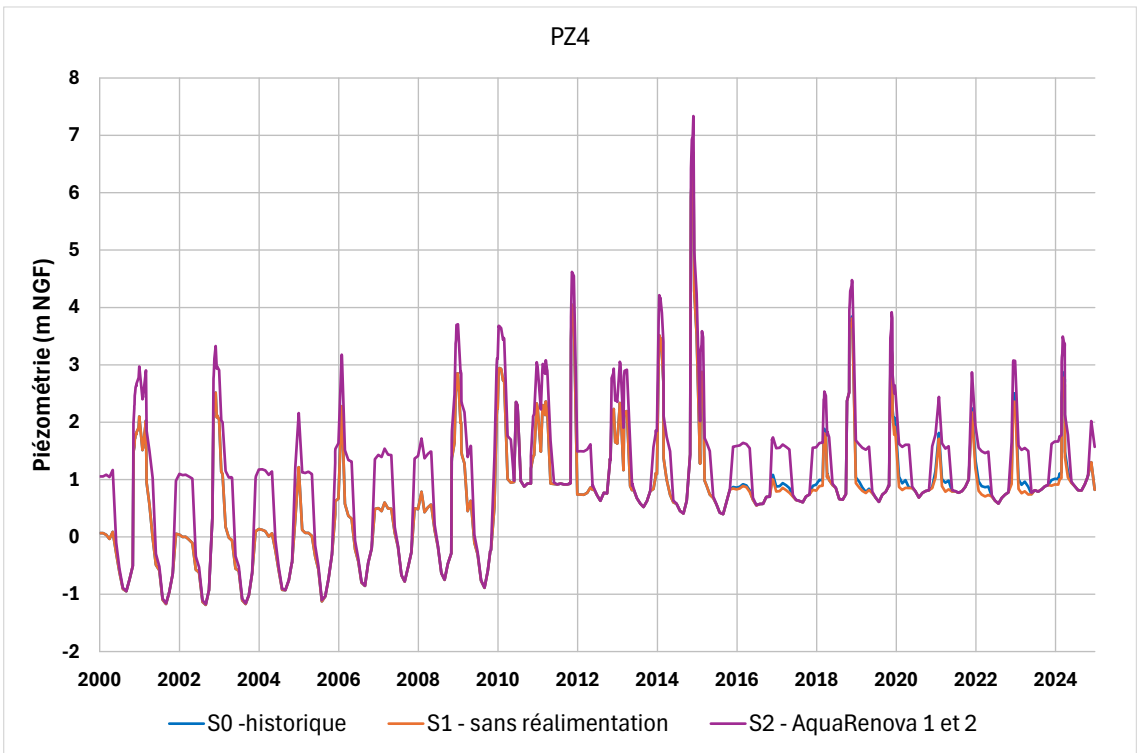


Figure 56 : Niveaux piézométriques du Pz4 pour le scénario S1 et S2 et comparaison au scénario S0

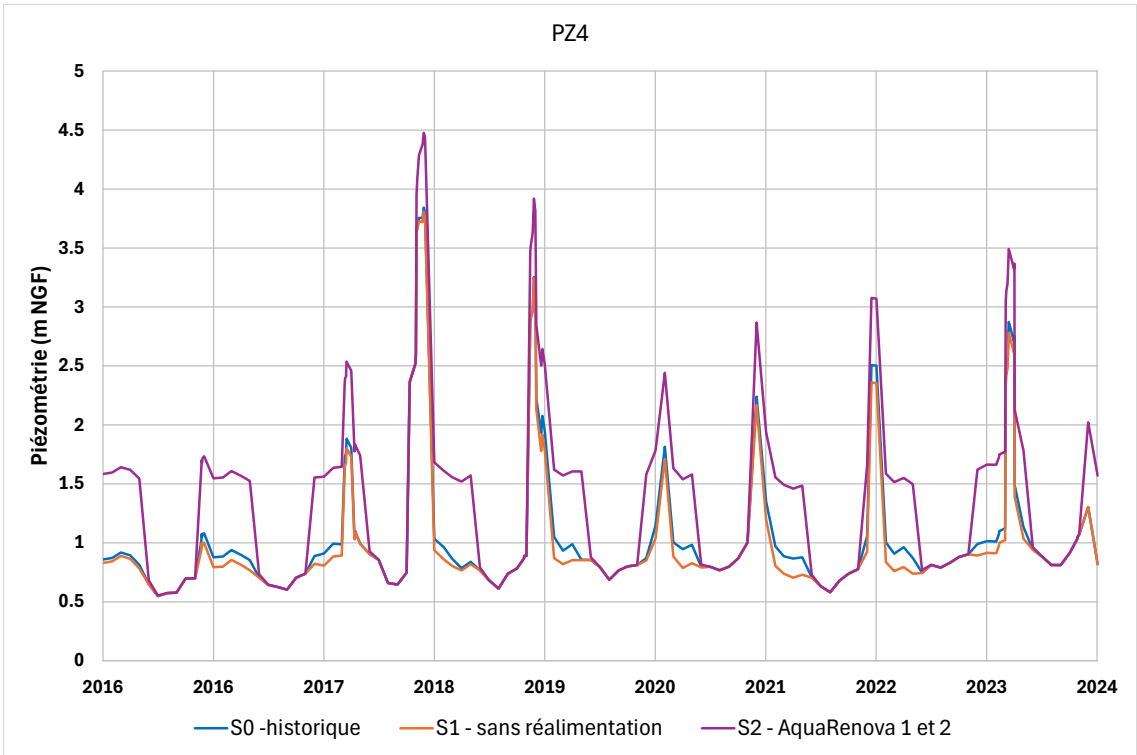


Figure 57 : Niveaux piézométriques du Pz4 pour le scénario S1 et S2 et comparaison au scénario S0 entre 2016 et 2024

7.1.1.3 Pz14

Le Pz14 est localisé en rive droite du Gapeau, en amont du barrage anti-sel. Les niveaux piézométriques calculés du scénario 1 et du scénario 2 sont présentés Figure 58 et Figure 59.

Entre 2016 et 2024, l'impact de la réalimentation mise en place et simulée dans le scénario S0 est plus faible que sur les piézomètres précédents. Les différences de niveaux ne dépassent pas 10 cm. Ceci est lié à la localisation du Pz14, qui est proche du Gapeau, bien connecté à la rivière. Les variations sont atténuées. (Figure 8).

L'impact de la réalimentation du scénario S2 sur les niveaux est visible, avec des différences de niveaux entre le S1 et le S2 pouvant atteindre 70 cm, et même dépasser le mètre en 2002 (année sèche). En période moins sèche, l'impact de la réalimentation est plus faible, même si les niveaux sont toutefois largement supérieurs à ceux calculés sans réalimentation.

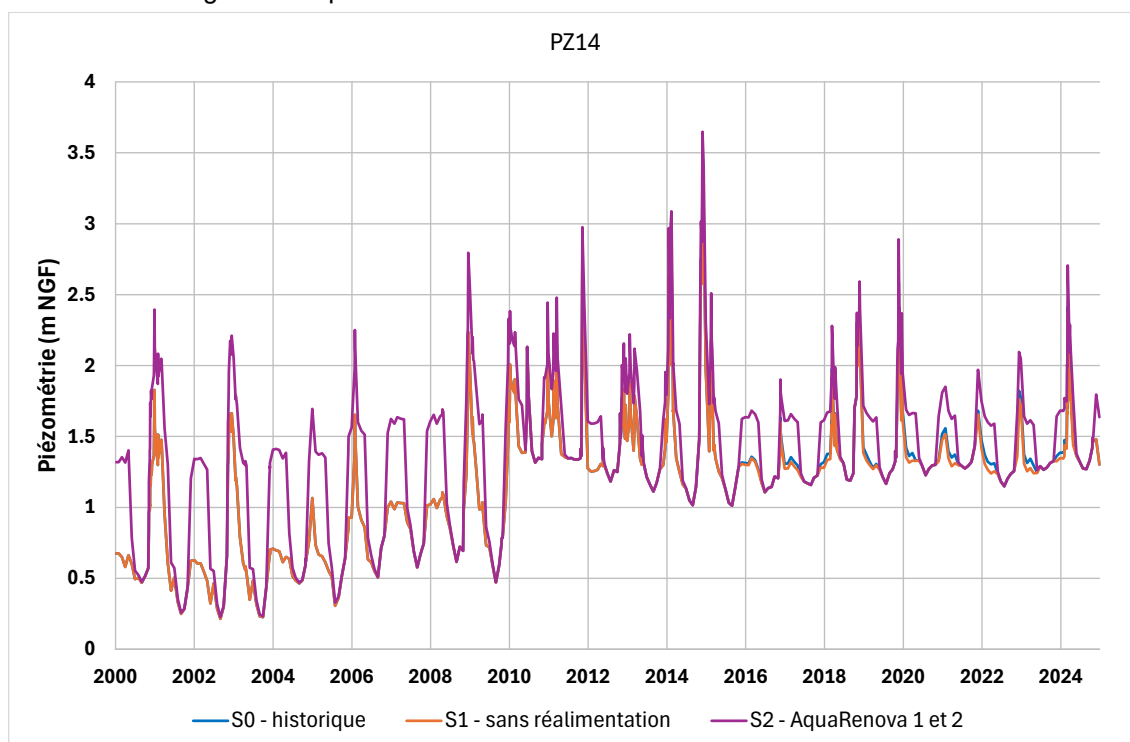


Figure 58 : Niveaux piézométriques du Pz14 pour le scénario S1 et S2 et comparaison au scénario S0

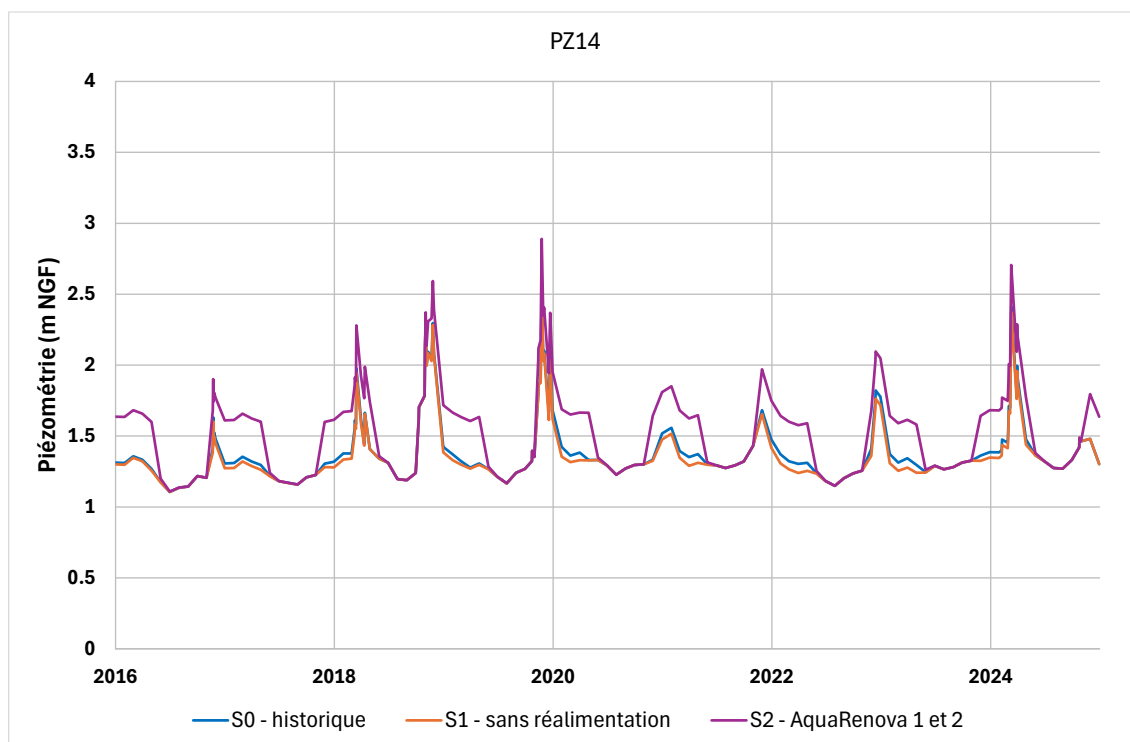


Figure 59 : Niveaux piézométriques du Pz14 pour le scénario S1 et S2 et comparaison au scénario S0 entre 2016 et 2024

7.1.1.4 Pz11

Le Pz11 est localisé dans la partie aval du modèle, à 1200 mètres environ de la Méditerranée. Les niveaux piézométriques calculés du scénario 1 et du scénario 2 sont présentés Figure 60 et Figure 61.

Comme sur les autres piézomètres, l'impact de la réalimentation du scénario S2 sur les niveaux est visible, avec un impact beaucoup plus important sur les années sèches. Les différences de niveaux calculés entre le S1 et le S2 peuvent atteindre 1,30 mètres.

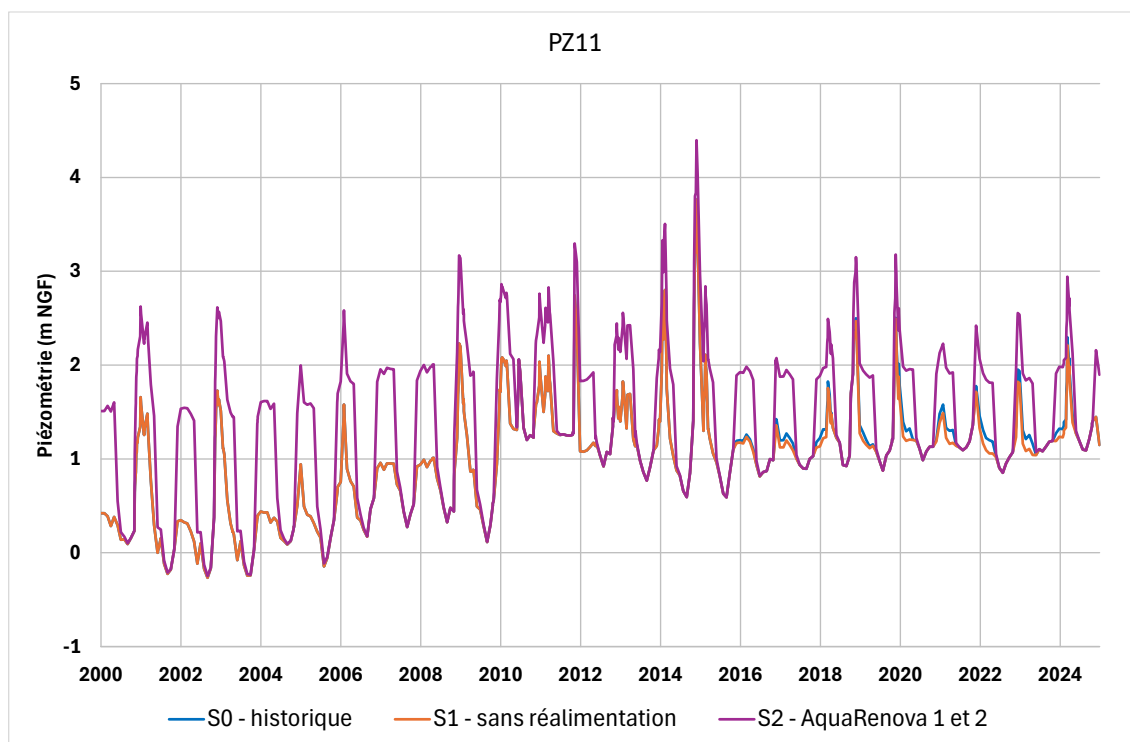


Figure 60 : Niveaux piézométriques du Pz11 pour le scénario S1 et S2 et comparaison au scénario S0

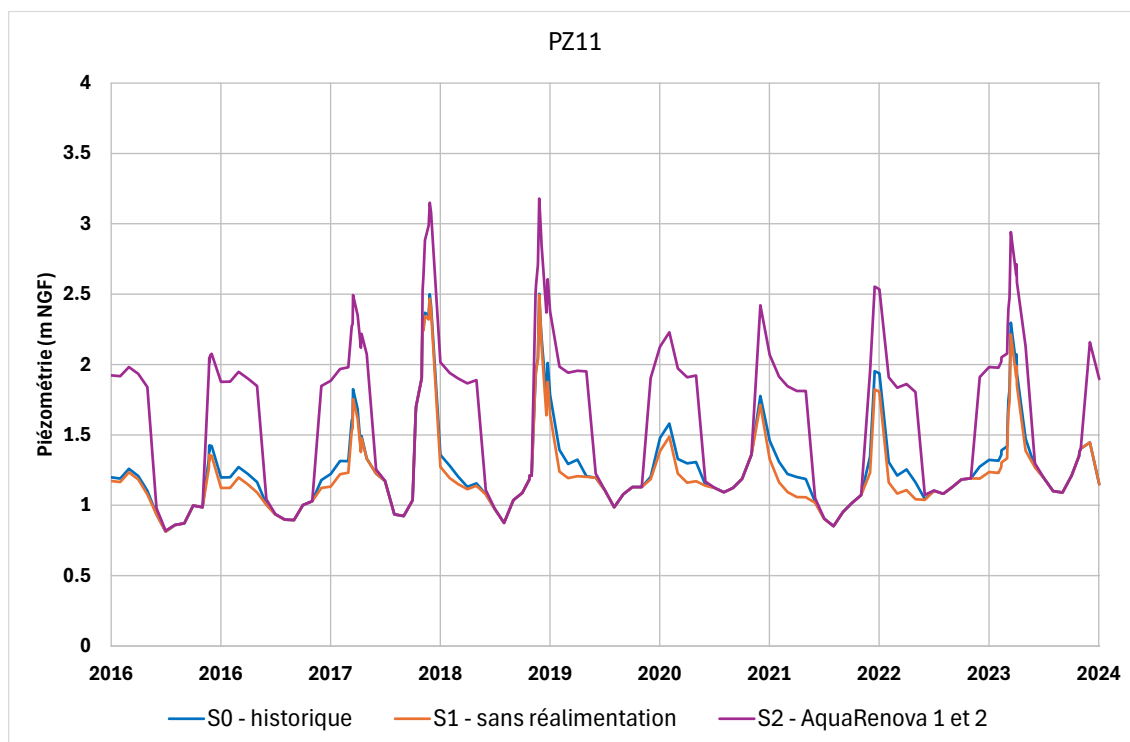


Figure 61 : Niveaux piézométriques du Pz11 pour le scénario S1 et S2 et comparaison au scénario S0

7.1.2 Bilan des flux

7.1.2.1 Echanges nappe-Méditerranée

Le bilan des échanges entre la nappe et la Méditerranée pour les 3 scénarios est visible Figure 62.

Entre 2000 et 2005, la nappe est en situation déficitaire pour les scénarios S0 et S1 : le bilan est négatif.

Les flux se dirigent de la mer Méditerranée vers la nappe, permettant l'entrée du biseau salé. La réalimentation à partir de 2015 permet d'augmenter les flux de la nappe vers la Méditerranée. La réalimentation du scénario S2 augmente drastiquement ces flux, permettant à la nappe de devenir excédentaire sur la période 2000-2005.

Rétrospectivement, les résultats du scénario 2 permettent d'affirmer qu'une réalimentation à l'aide de la mise en service d'AquaRenova 1 et 2 aurait permis d'éviter la crise de 2000-2006.

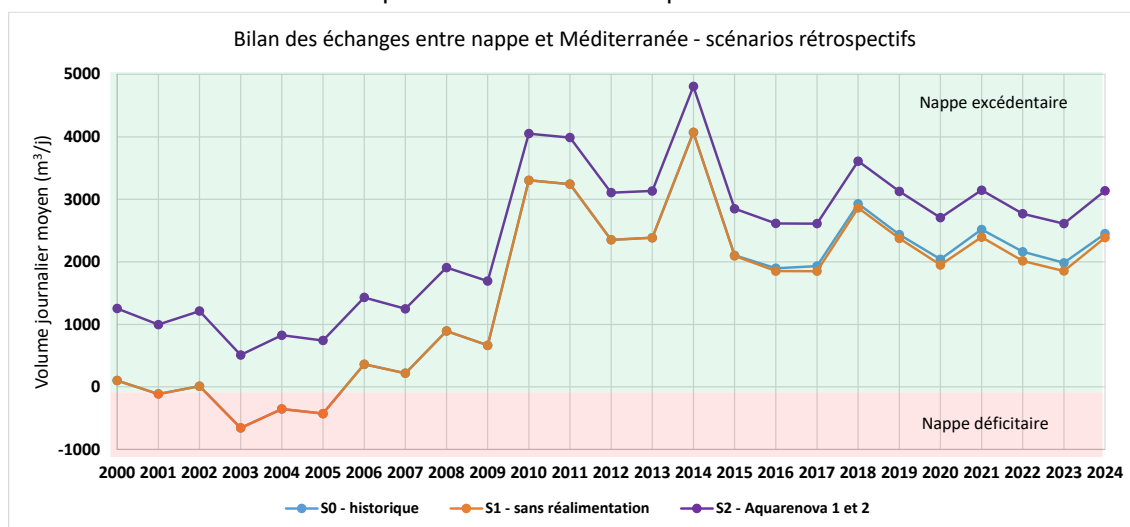


Figure 62 : Bilan des échanges entre la nappe et la Méditerranée – scénarios rétrospectifs

7.1.2.2 Echange nappe-rivière

Le bilan des échanges entre la nappe et la rivière est visible Figure 63.

La réalimentation accroît le bilan des flux de la nappe vers le Gapeau au profit de la rivière. L'effet est visible dès la mise en place d'AquaRenova 1 à partir de 2015, et est très significatif avec une réalimentation des deux sites (débit nominal = 150 l/s).

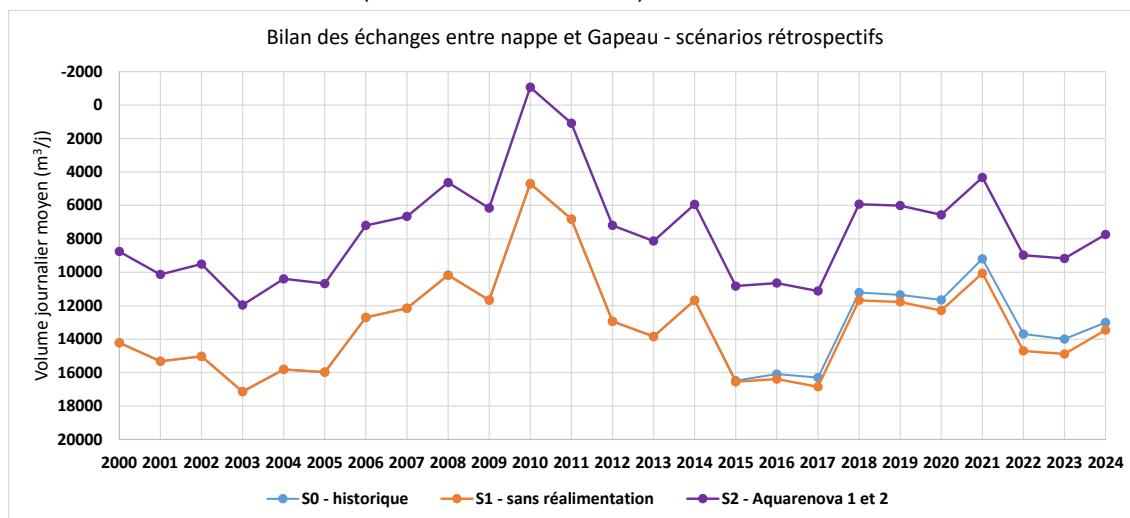


Figure 63 : Bilan des échanges entre la nappe et la rivière – scénarios rétrospectifs

7.1.3 Synthèse

Les scénarios 1 et 2 ont simulé la période historique 2000-2025 dans les mêmes conditions hydrologiques et climatiques, sans réalimentation pour le scénario 1 et avec réalimentation au débit nominal de 150 l/s pour le scénario 2.

La piézométrie observée au droit des 4 piézomètres suivis dans le cadre du contrôle de la nappe indique une remontée significative des niveaux de nappe pendant la période de fonctionnement. Cette remontée avait déjà été observée lors de la mise en place de la réalimentation en 2015. La comparaison avec la simulation S1 – sans réalimentation permet d'apprécier l'ampleur relativement réduite de la réhausse induite.

La mise en service d'une réalimentation au débit de 150 l/s montre un effet rapide et important sur la piézométrie de la nappe. Une réhausse de niveau importante est constatée pendant la période de fonctionnement. La nappe est réactive, ce qui fait que l'effet de la réalimentation est nul au maximum de l'étiage, toutefois, le tarissement de la nappe après arrêt de la réalimentation permet de retarder l'apparition des étiages, avec un effet bénéfique sur la nappe. Les bilans de flux montrent qu'avec la réalimentation, les flux de la nappe vers le Gapeau sont accentués, avec un effet bénéfique pour le fleuve. Il en est de même avec la Méditerranée, et le scénario S2 permet d'affirmer que **rétrospectivement le dispositif aurait permis de protéger la nappe pendant la crise de salinité 2000-2006.**

7.2 Scénarios futurs S3 et S4

Pour rappel, les deux scénarios S3 et S4 simulent les conditions hydro-climatiques futures issues des données du projet Explore2 sur la période 2041-2066 (Cf. Chapitre 6.2.3) dans des conditions d'exploitation de la nappe identiques à celles de la période 2000-2025.

Ces deux scénarios diffèrent par la mise en service de la réalimentation de nappe :

- S3 : aucune réalimentation ;
- S4 : mise en service d'AquaRenova 1 et 2 de 2041 à 2066.

7.2.1 Impact sur la piézométrie

7.2.1.1 Pz5

Les niveaux piézométriques calculés du scénario 3 et du scénario 4 pour le piézomètre Pz5 sont présentés sur la Figure 64.

Les niveaux piézométriques calculés en S4 sont nettement plus élevés que ceux de S3 lors de la période de fonctionnement des bassins.

Si la réalimentation ne semble avoir aucun impact sur l'intensité des étiages, ceux-ci interviennent plus tardivement, sous l'effet de la décrue qui suit l'arrêt de la réalimentation.

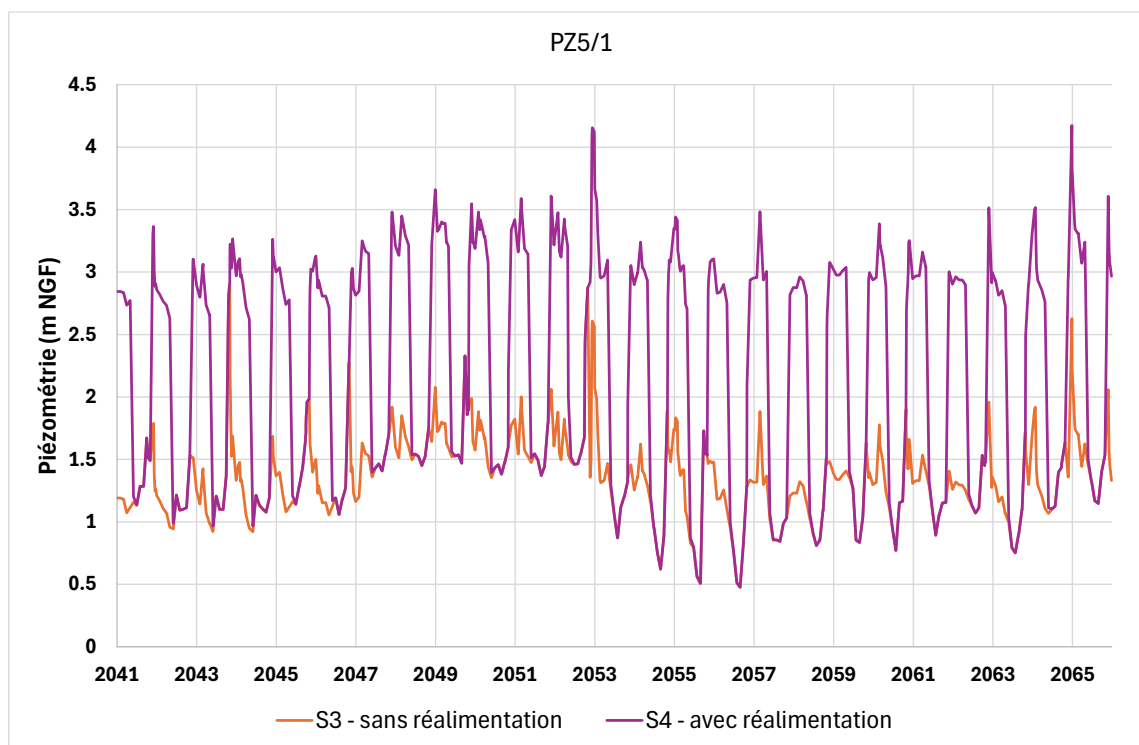


Figure 64 : Niveaux piézométriques du Pz5 pour le scénario 3 et 4

7.2.1.2 Pz4

Les niveaux piézométriques calculés du scénario 3 et du scénario 4 pour le piézomètre Pz4 sont présentés sur la Figure 65.

Lors de la réalimentation, les niveaux de nappes observent une remontée importante pendant la période de fonctionnement.

La différence de niveaux observée entre le S3 et S4 est plus faible que celle observée au Pz5, du fait de l'éloignement du pz4 avec les bassins d'alimentation, mais cette différence peut atteindre 0,75 m, surtout en période sèche.

Les étiages du S4 ne sont pas modifiés par rapport au scénario sans réalimentation, même s'ils apparaissent plus tardivement.

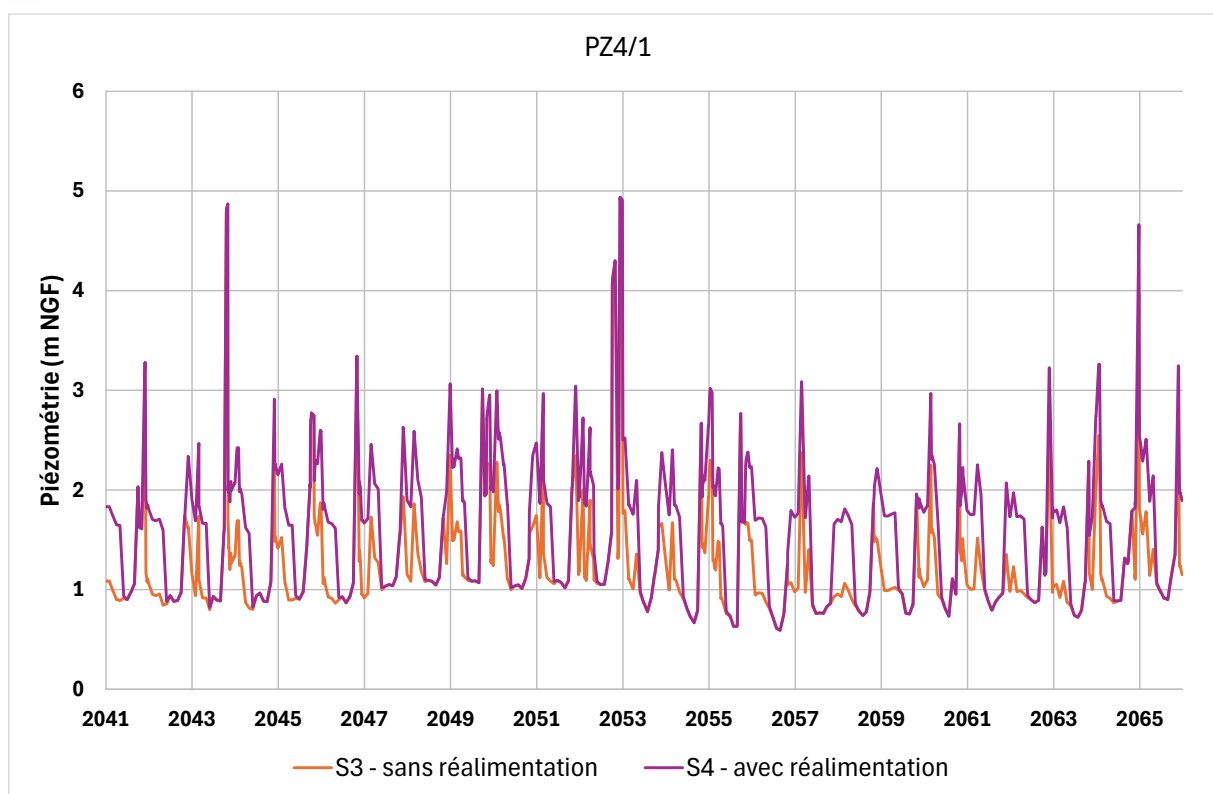


Figure 65 : Niveaux piézométriques du Pz4 pour le scénario 3 et 4

7.2.1.3 Pz14

Les niveaux piézométriques calculés du scénario 3 et du scénario 4 pour le piézomètre Pz14 sont présentés sur la Figure 66.

Les différences de niveaux entre les deux scénarios sont importantes, avec des différences d'environ 30 cm en période les plus sèches. Comme observé au Pz4 et Pz5, les étiages en S4b ne sont pas modifiés par rapport au scénario sans réalimentation, même s'ils apparaissent plus tardivement.

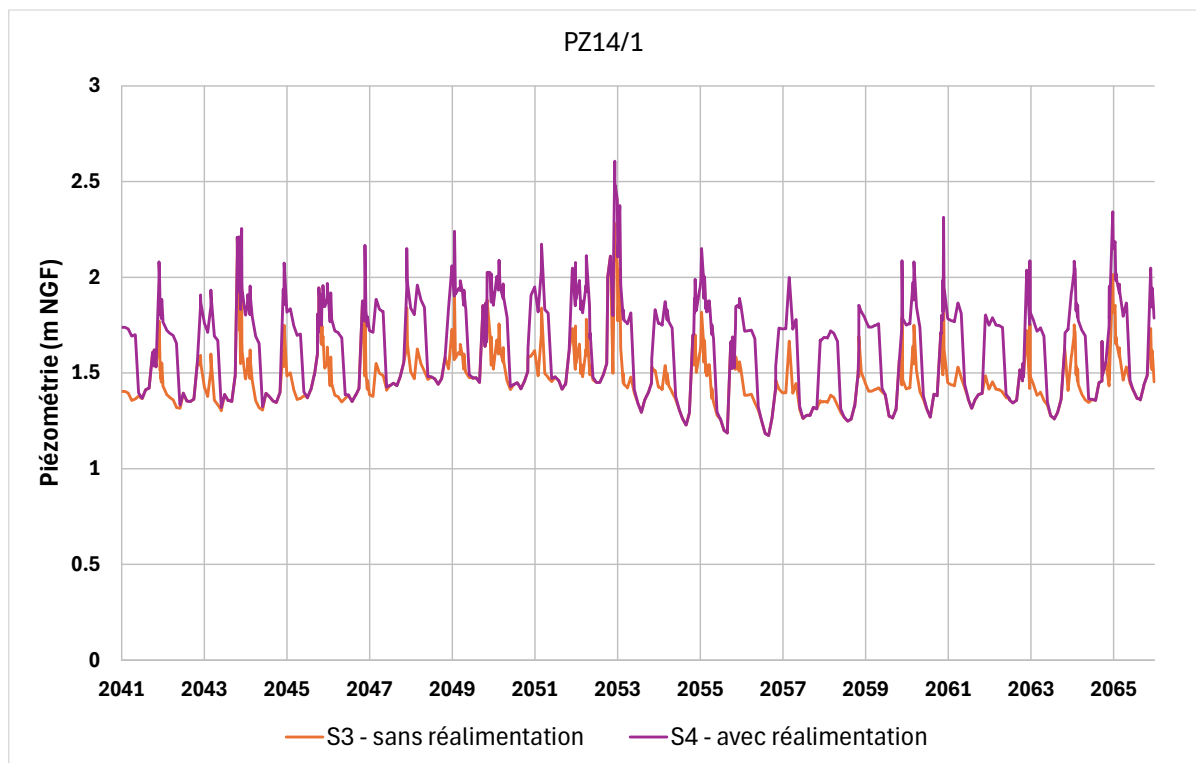


Figure 66 : Niveaux piézométriques du Pz14 pour le scénario 3 et 4

7.2.1.4 Pz11

Les niveaux piézométriques calculés du scénario 3 et du scénario 4 pour le piézomètre Pz4 sont présentés sur la Figure 67.

Comme observés sur les autres piézomètres, lors de la réalimentation, les niveaux de nappes observent une remontée significative pendant la période de fonctionnement. Les étiages ne sont pas modifiés par rapport à un scénario sans réalimentation, mais ils apparaissent plus tardivement.

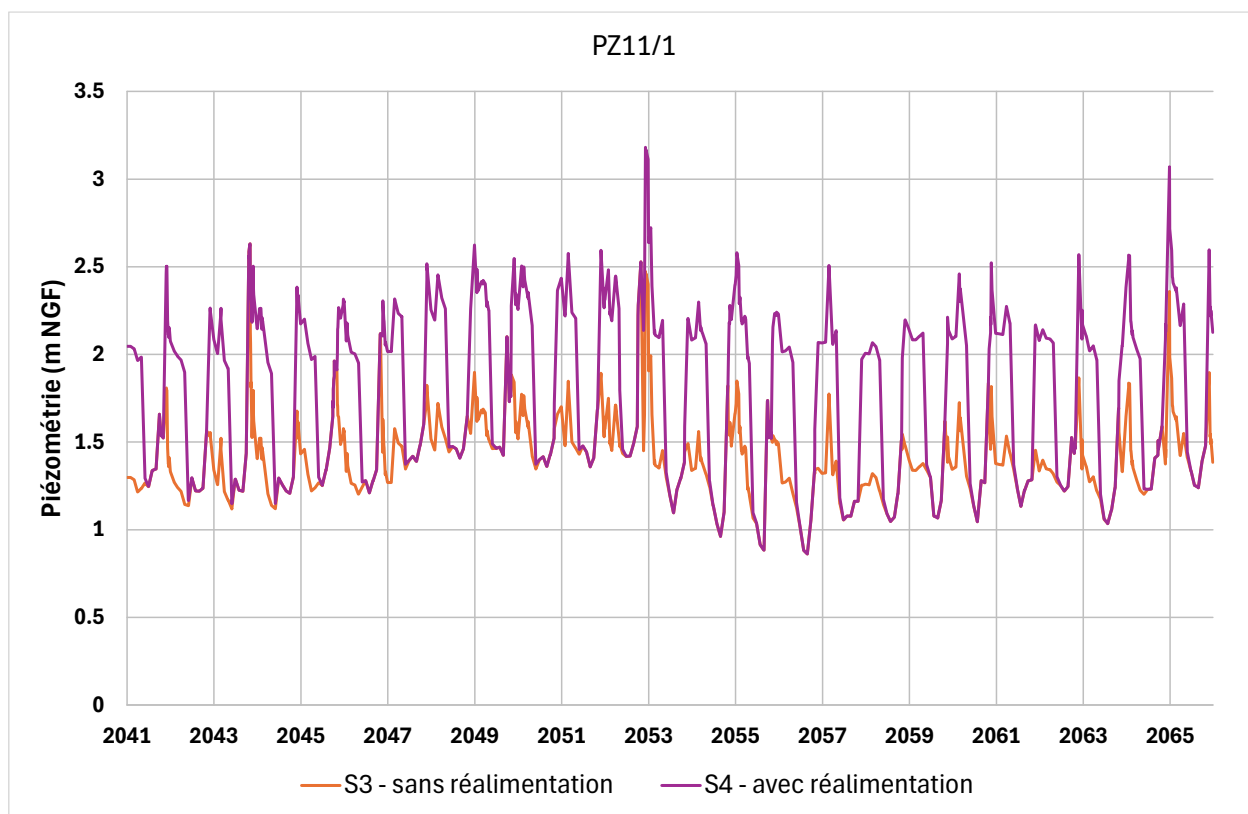


Figure 67 : Niveaux piézométriques du Pz11 pour le scénario 3 et 4

7.2.2 Bilan des flux

7.2.2.1 Echange nappe-Méditerranée

Le bilan des échanges entre la nappe et la Méditerranée pour les scénarios S3 et S4 est visible Figure 74.

Entre 2041 et 2066, la nappe est en situation excédentaire pour les scénarios S3 et S4. Les flux se dirigent de la nappe vers la mer. La réalimentation du scénario S4 augmente drastiquement ces flux.

Ces résultats permettent d'affirmer qu'une réalimentation à l'aide de la mise en service d'AquaRenova 1 et 2 permet de contribuer à la protection de l'aquifère.

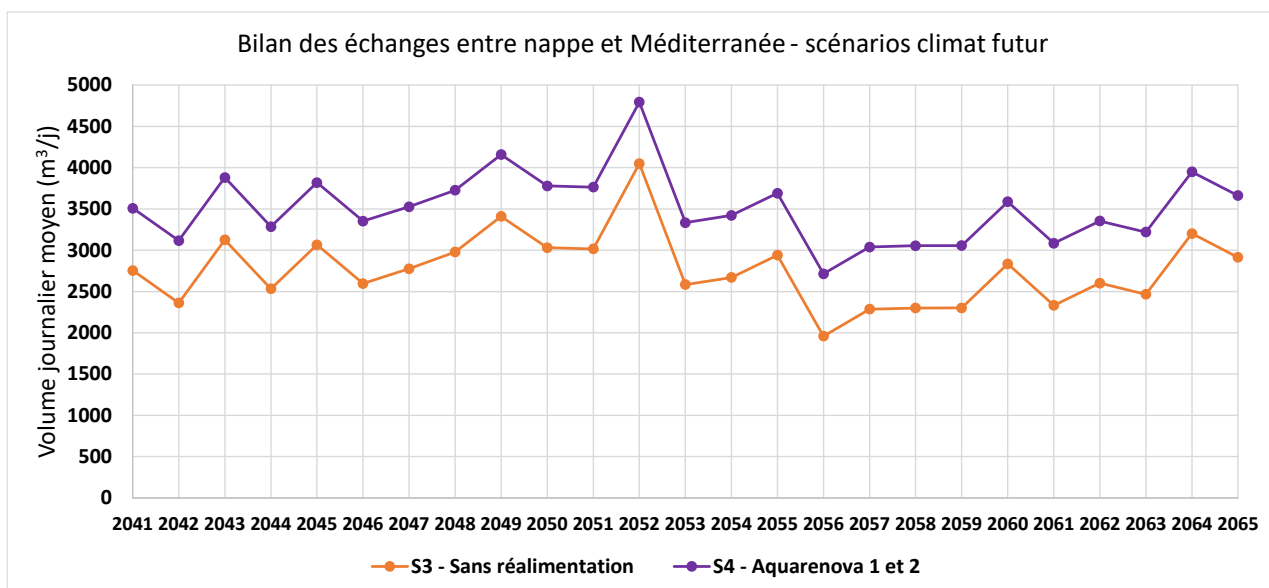


Figure 68 : Bilan des échanges entre la nappe et la Méditerranée – scénarios climat futur

7.2.2.2 Echange nappe rivière

Le bilan des échanges entre la nappe et la rivière pour les scénarios S3 et S4 est visible Figure 69.

La réalimentation du scénario S4 accroît le bilan des flux de la nappe vers le Gapeau au profit de la rivière. L'effet est très significatif avec une réalimentation des deux sites (débit nominal = 150 l/s).

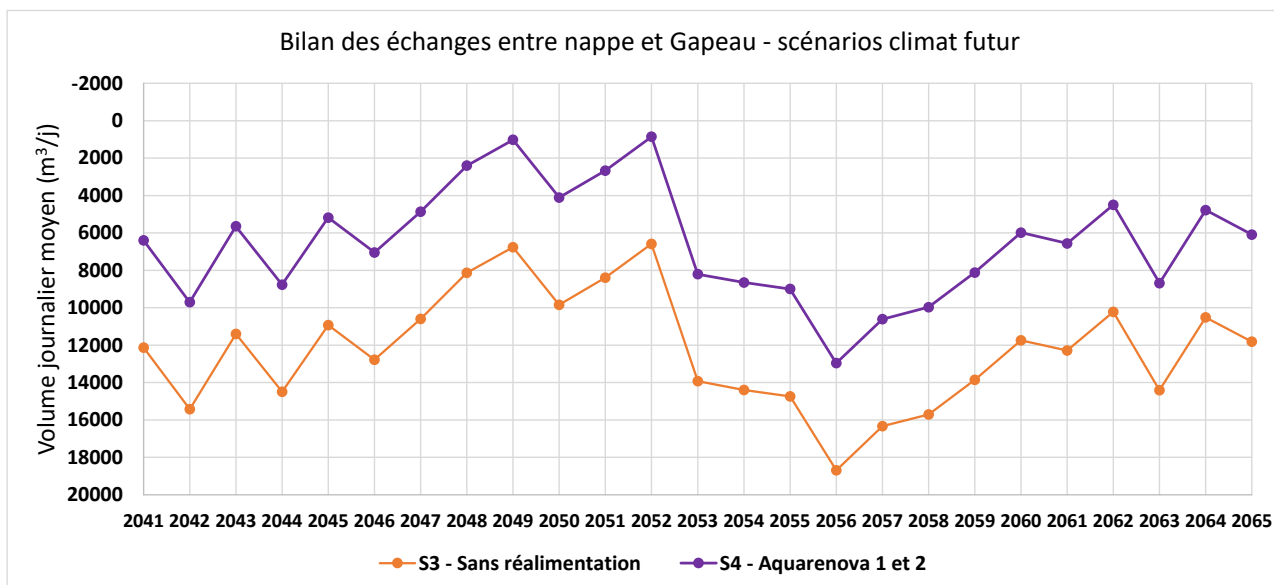


Figure 69 : Bilan des échanges entre la nappe et la rivière – scénarios climat futur

7.2.3 Synthèse

Les scénarios 3 et 4 ont simulés la période climatique future 2041-2066 sans réalimentation pour le scénario S3 et avec réalimentation au débit nominal de 150 l/s pour le scénario S4.

Comme pour les scénarios modélisés sur la période historique 2000-2025, on constate une remontée significative des niveaux de nappe pendant la période de fonctionnement.

Le bilan des flux entre la nappe et la rivière est accentué au profit de la rivière, et celui entre la nappe et la Méditerranée est accentué en direction de la mer.

Les conditions hydro climatiques ne sont cependant pas aussi pénalisantes que l'épisode 2000-2006. Les scénarios futurs 3bis et 4 bis, présentés dans la partie suivante, permettront donc d'étudier l'intérêt de la réalimentation dans des conditions hydro climatiques plus pénalisantes.

7.3 Scénarios futurs S3bis et S4bis

Pour rappel (Cf. chapitre 6.2.4), les deux scénarios simulent les conditions hydro-climatiques et de prélèvements constatées sur la période 2000-2025 en prenant un compte une élévation du niveau de la mer de 20 cm environ, et différent par la mise en service de la réalimentation de nappe :

- S3bis : aucune réalimentation ;
- S4bis : mise en service d'AquaRenova 1 et 2 de 2000 à 2025.

7.3.1 Impact sur la piézométrie

7.3.1.1 Pz5

Les niveaux piézométriques calculés du scénario 3bis et du scénario 4bis pour le piézomètre Pz5 sont présentés sur la Figure 70.

Les niveaux piézométriques calculés en S4bis sont nettement plus élevés que ceux de S3bis lors de la période de fonctionnement des bassins.

Si la réalimentation ne semble avoir aucun impact sur l'intensité des étiages, ceux-ci interviennent plus tardivement, sous l'effet de la décrue qui suit l'arrêt de la réalimentation.

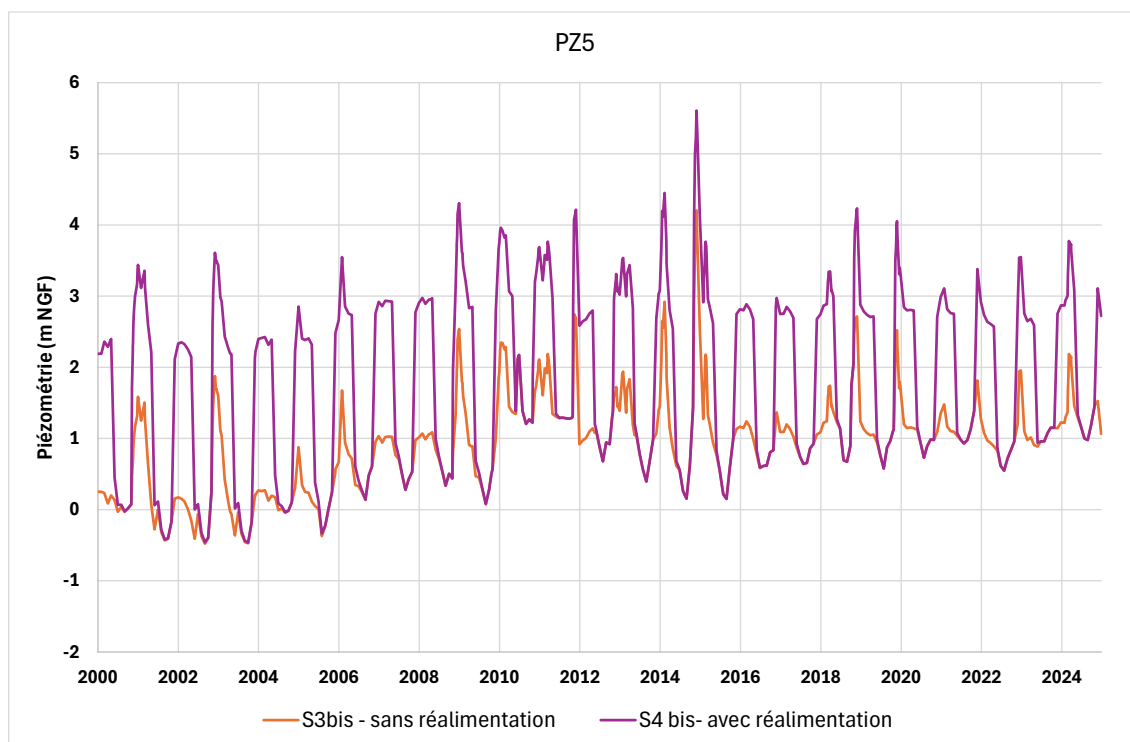


Figure 70 : Niveaux piézométriques du Pz5 pour le scénario 3bis et 4bis

7.3.1.2 Pz4

Les niveaux piézométriques calculés du scénario 3 et du scénario 4 pour le piézomètre Pz4 sont présentés sur la Figure 71.

Lors de la réalimentation, les niveaux de nappes observent une remontée importante pendant la période de fonctionnement.

La différence de niveaux observée entre le S3bis et S4bis est plus faible que celle observée au Pz5, du fait de l'éloignement du pz4 avec les bassins d'alimentation, mais cette différence peut atteindre 1 m, surtout en période sèche.

Les étiages du S4bis ne sont pas modifiés par rapport au scénario sans réalimentation, même s'ils apparaissent plus tardivement, comme au Pz5.

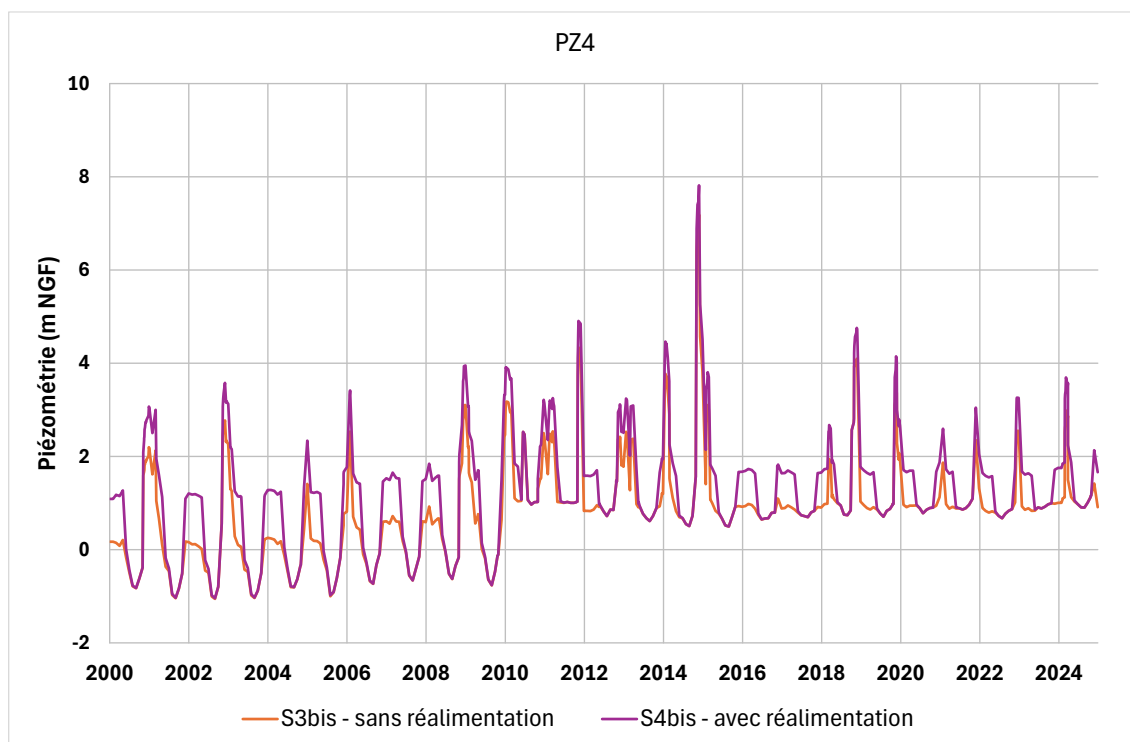
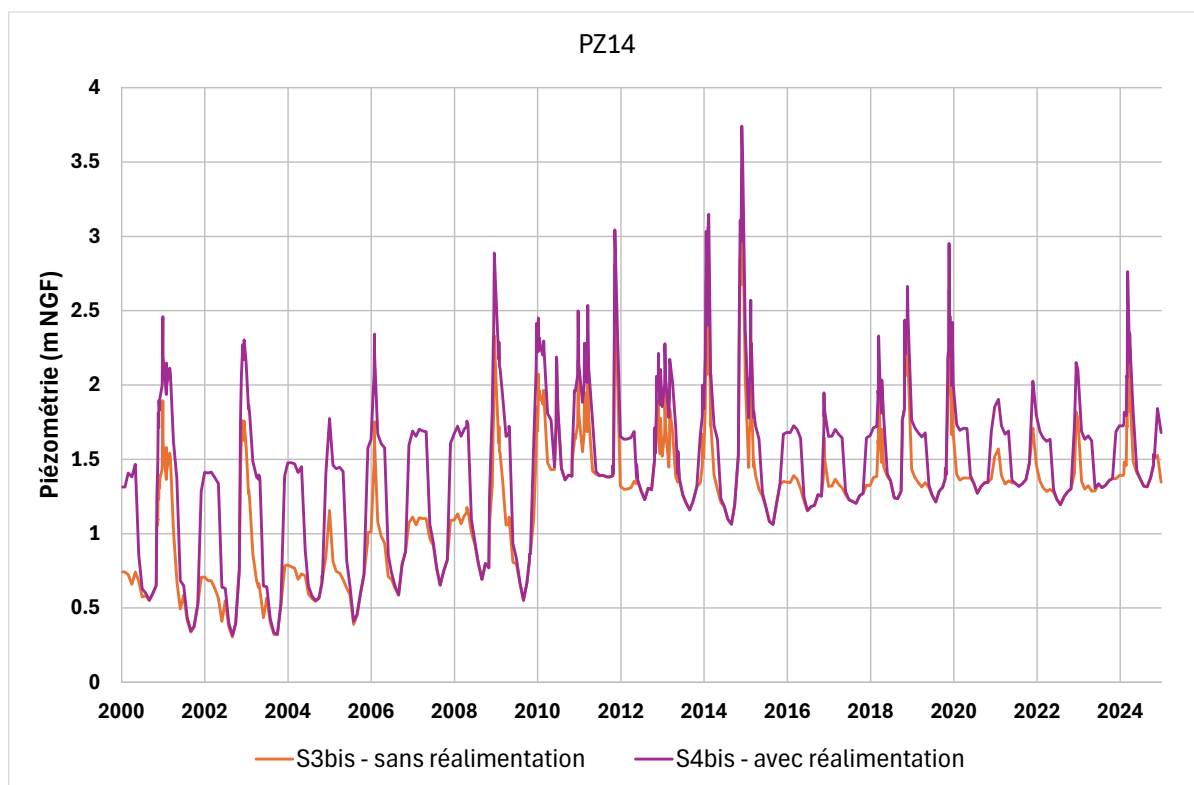


Figure 71 : Niveaux piézométriques du Pz4 pour le scénario 3bis et 4bis

7.3.1.3 Pz14

Les niveaux piézométriques calculés du scénario 3 et du scénario 4 pour le piézomètre Pz14 sont présentés sur la Figure 72.

Les différences de niveaux entre les deux scénarios sont conséquentes, pouvant dépasser le mètre en période très sèche. Comme observé au Pz4 et Pz5, les étiages en S4bis ne sont pas modifiés par rapport au scénario sans réalimentation, même s'ils apparaissent plus tardivement.



7.3.1.4 Pz11

Les niveaux piézométriques calculés du scénario 3 et du scénario 4 pour le piézomètre Pz11 sont présentés sur la Figure 73.

Comme observés sur les autres piézomètres, lors de la réalimentation, les niveaux de nappes observent une remontée significative pendant la période de fonctionnement. Les étiages ne sont pas modifiés par rapport à un scénario sans réalimentation, mais ils apparaissent plus tardivement.

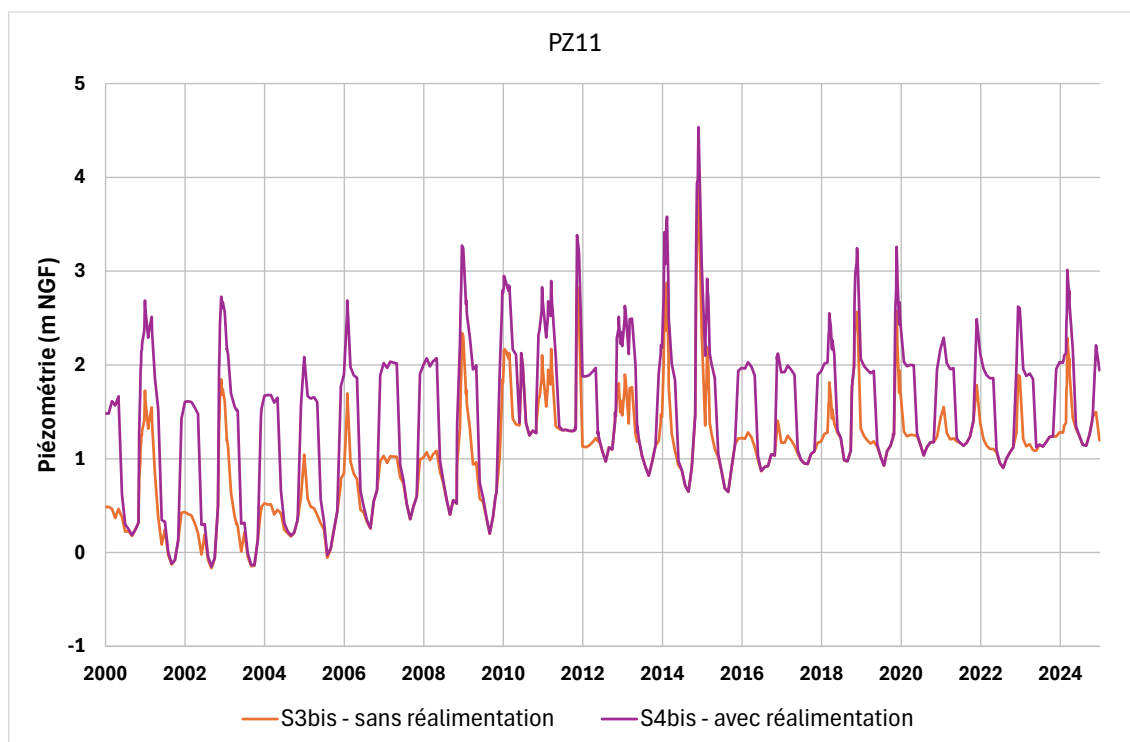


Figure 73 : Niveaux piézométriques du Pz11 pour le scénario 3bis et 4bis

7.3.2 Bilan des flux

7.3.2.1 Echange nappe-Méditerranée

Le bilan des échanges entre la nappe et la Méditerranée pour les scénarios S1, S3bis et S4bis est visible Figure 74.

Entre 2000 et 2005, la nappe est en situation déficitaire pour les scénarios S1 et S3bis : le bilan est négatif. Les flux se dirigent de la mer Méditerranée vers la nappe, permettant l'entrée du biseau salé. La comparaison du scénario S1 et S3bis indique que la hausse du niveau de la mer à l'horizon 2050 a un impact négatif sur les échanges nappes-mer, en accentuant les flux de la mer vers la nappe.

La réalimentation du scénario S4bis augmente drastiquement ces flux, permettant à la nappe de devenir excédentaire sur la période 2000-2005.

Ces résultats permettent d'affirmer qu'une réalimentation à l'aide de la mise en service d'AquaRenova 1 et 2 permet d'éviter une crise.

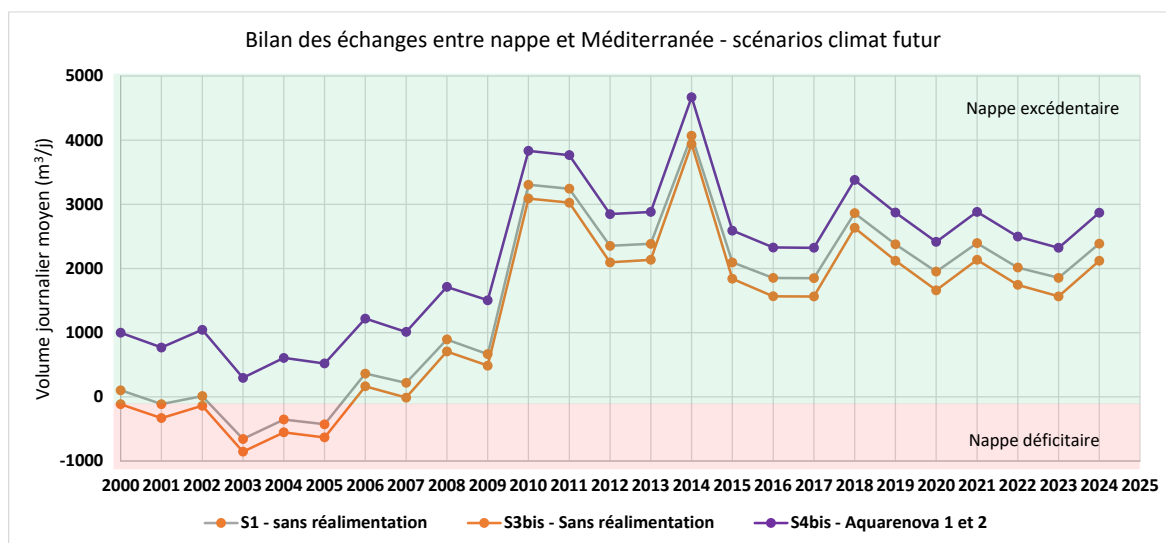


Figure 74 : Bilan des échanges entre la nappe et la Méditerranée – scénarios climat futur bis

7.3.2.2 Echange nappe rivière

Le bilan des échanges entre la nappe et la rivière pour les scénarios S1, S3bis et S4bis est visible Figure 75.

La comparaison des scénarios S1 et S3bis indique que la montée du niveau de la mer à l'horizon 2050 entraîne une légère augmentation des flux de la nappe vers la rivière.

La réalimentation du scénario S4 accroît le bilan des flux de la nappe vers le Gapeau au profit de la rivière. L'effet est très significatif avec une réalimentation des deux sites (débit nominal = 150 l/s).

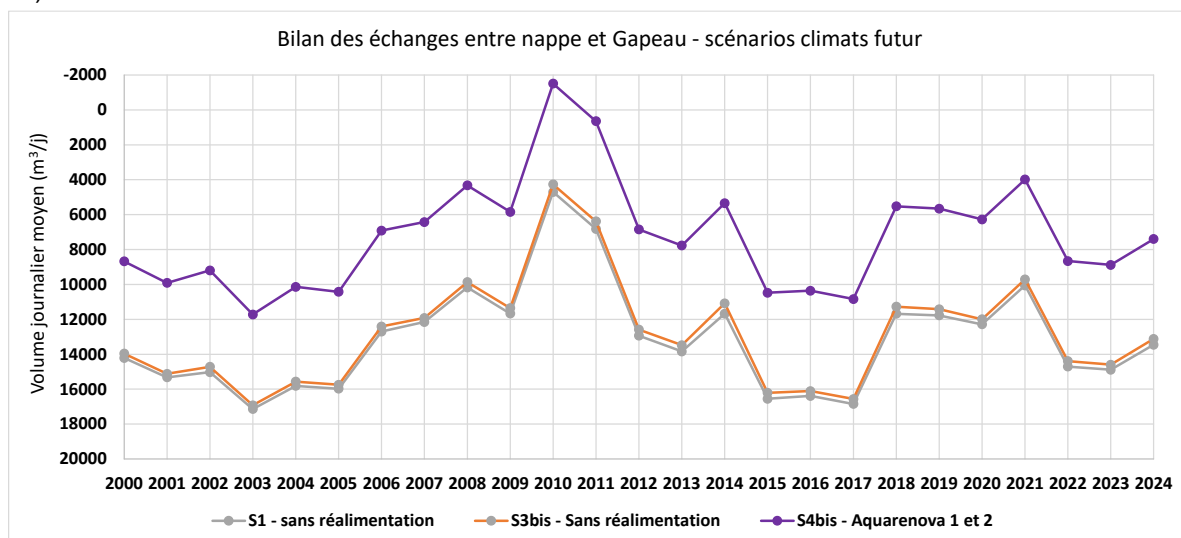


Figure 75 : Bilan des échanges entre la nappe et la rivière – scénarios climats futur bis

7.3.3 Synthèse

Les scénarios 3bis et 4bis ont simulés la période historique 2000-2025 dans les mêmes conditions hydrologiques et climatiques, en prenant en compte une élévation du niveau de la mer de + 0,2 m par rapport au niveau moyen observé 2000-2015, sans réalimentation pour le scénario S3bis et avec réalimentation au débit nominal de 150 l/s pour le scénario 4bis.

Comme pour les scénarios modélisés sur la période historique 2000-2025 et ceux sur la période futur 2041-2066, on constate une remontée significative des niveaux de nappe pendant la période de fonctionnement.

La mise en service d'une réalimentation au débit nominal de 150 l/s montre un effet rapide et important sur la piézométrie de la nappe. La nappe est réactive, ce qui fait que l'effet de la réalimentation est nul au maximum de l'étiage. Ces derniers apparaissent cependant plus tardivement, avec un effet bénéfique sur la nappe.

Les bilans de nappe montrent que la hausse du niveau de la mer entraîne une augmentation des flux de la mer vers la nappe, mais qu'avec la réalimentation, les flux sont inversés. Les flux de la nappe vers le Gapeau sont également accentués, avec un effet bénéfique pour ce dernier.

Ce dispositif permet de protéger la nappe dans des conditions hydro climatiques sévères avec une augmentation du niveau de la mer attendue à l'horizon 2050. L'intérêt de la réalimentation de la nappe pour la protection contre l'intrusion saline est avéré.

7.4 Scénario de pollution

7.4.1 Description du scénario

Une simulation de pollution de la nappe par l'intermédiaire des bassins d'infiltration a été réalisée à partir du modèle sur la période 2018-2020.

L'objectif de ce scénario est

- De caractériser la vulnérabilité des captages AEP dans le cas d'une pollution provenant du Roubaud ;
- De définir des mesures de suivi et de protection des captages AEP.

Le scénario simulé correspond à la description suivante (Figure 76).

Une pollution intervient dans le Roubaud le lendemain d'un prélèvement d'eau réalisé dans le cadre du suivi bimensuel. L'eau polluée est échantillonnée 14 jours plus tard et les résultats sont transmis par le laboratoire encore 14 jours plus tard.

Après détection, la prise d'eau dans le Roubaud est arrêtée et la réalimentation est effectuée à partir de la prise d'eau du Canal Jean Natte (mode sécurisation).

Ce mode de fonctionnement est maintenu jusqu'à ce que la qualité de l'eau dans le Roubaud redevienne conforme.

L'exploitation des captages est maintenue.

Evenement	Début	Décembre		Janvier				Février	
		S4	S1	S2	S3	S4	S5	S6	
Prélèvement n-1	t- 1 jour	▼							
Prélèvement n	t+14 jours			▼					
Réception des résultats d'analyse	t+ 28 jours					▼			
Switch vers la prise d'eau de sécurisation	t+ 28 jours						▼		
Début de la pollution	t0								
Réalimentation depuis prise d'eau Roubaud									
Réalimentation depuis prise d'eau de sécurisation	t+ 28 jours								

Figure 76 : Scénario de pollution

Les données d'entrées du scénario de pollution sont les suivants :

- Conditions hydrologiques des années 2018 à 2020 (années env. moyennes)
- Pollution des eaux brutes du bassin (janvier) pendant 28 jours. Une concentration constante en polluant de 100 ng/l est injectée pendant l'épisode.
- Fonctionnement de la réalimentation sur les deux bassins à 50 l/s et 100 l/s, soit un débit total de 150 l/s entre novembre et avril ;
- Exploitation des captages à hauteur des besoins en eau exprimés à l'horizon 2035, soit :
 - De septembre à mai : 12 000 m³/j pour le champ captant du Golf Hôtel et 2 000 m³/j pour le champ captant du Père Eternel ;
 - De juin à août : 9 000 m³/j pour le champ captant du Golf Hôtel et 6 000 m³/j pour le champ captant du Père Eternel.

Le déroulement du scénario est représenté sur le chronogramme suivant (Figure 77) :

		2018											
Evènement	Caractéristiques	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Réalimentation	Q = 150 l/s												
Pollution	C = 100 ng/l												
		2019											
Evènement	Caractéristiques	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Réalimentation	Q = 150 l/s												
Pollution	C = 100 ng/l												
		2020											
Evènement	Caractéristiques	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Réalimentation	Q = 150 l/s												
Pollution	C = 100 ng/l												

Figure 77 : Chronogramme du scénario de pollution

7.4.2 Résultats

L'évolution des concentrations a été observée sur les champs captant du Père Eternel et du Golf Hôtel (Tableau 7).

Le pollutogramme présentant l'évolution des concentrations au droit de chacun des ouvrages est visible Figure 78.

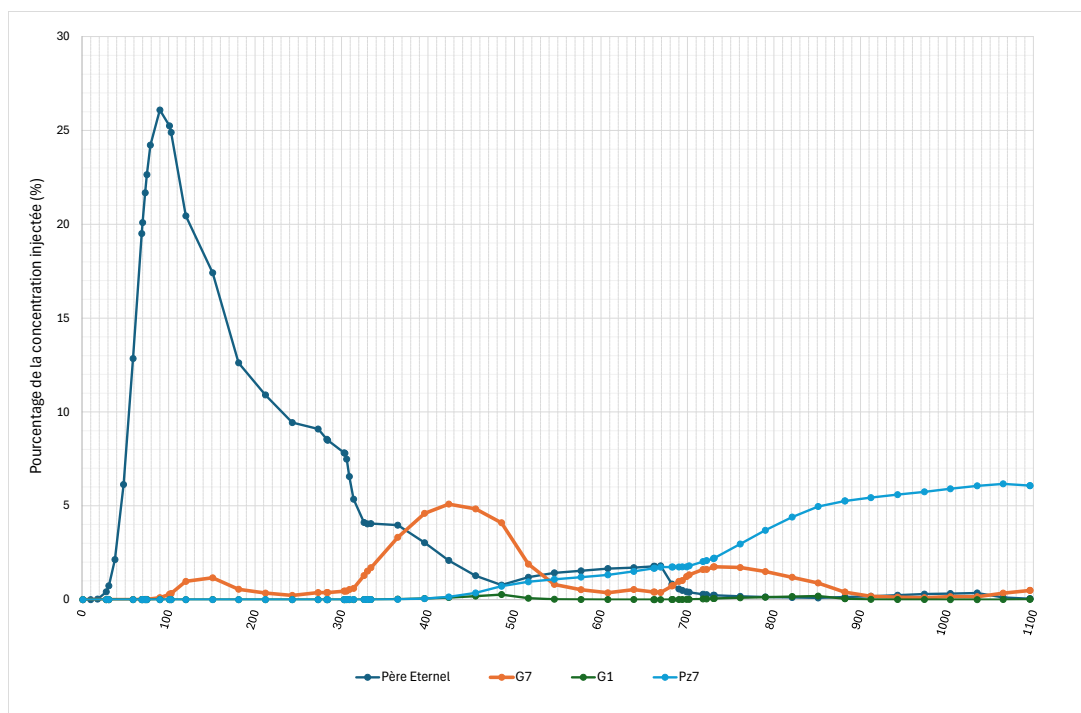


Figure 78 : Pollutogramme observé au Père Eternel, G1, G7 et au Pz7

La cartographie de la diffusion indique une distribution concentrique du polluant autour de l'origine de la pollution jusqu'à t+181 jours.

Le panache se dirige vers le Père Eternel, sous l'effet du dôme piézométrique généré par la réalimentation et par le pompage dans l'ouvrage.

Le champ captant du Golf Hôtel n'est que très peu atteint par la pollution, protégé par l'alimentation du Gapeau.

Le maintien de la réalimentation de la nappe grâce à la possibilité de transférer le prélèvement sur une prise d'eau en amont non impacté par la pollution permet de diluer la pollution dans la nappe par apport d'eau propre.

Le panache se déplace ensuite vers le sud-est. La pollution est toujours visible, bien que résiduelle au bout de trois ans.

L'analyse du pollutogramme indique :

- Au niveau du Père Eternel : la concentration maximale observée atteint 26 % de la concentration totale du polluant au bout de 90 jours ;
- A niveau du Golf Hôtel : la concentration maximale observée atteint 5 % de la concentration totale du polluant au bout de 423 jours sur le forage G7, qui est le plus proche du site de réalimentation. Le forage G1 est quant à lui bien protégé par l'alimentation du Gapeau ;
- Au niveau de la plaine (Pz7) : la concentration maximale observée atteint 6,1% de la concentration totale du polluant au bout de 1065 jours.

Ce scénario reste particulièrement pessimiste, lié à :

- la durée de l'épisode de pollution ;
- le débit maximal infiltré ;
- le pompage à hauteur des besoins exprimés à horizon 2035 ;
- le démarrage de la pollution qui intervient le jour suivant le prélèvement pour analyses bimensuel.

Il permet ainsi de définir un protocole de suivi et de contrôle de l'exploitation après que les résultats de l'analyse de qualité ont détecté une pollution de l'eau employée pour la réalimentation.

On rappelle ici qu'une station d'alerte est en place avec des sondes de mesure en continu qui permettent de détecter des variations anormales de la qualité de l'eau. De plus, une analyse de l'eau de l'eau est réalisée toutes les 2 semaines pour détecter les paramètres qui ne peuvent pas être détectés par la station d'alerte, comme les PFAS par exemple.

Pour ce paramètre, la simulation montre que la concentration maximale mesurée au niveau du père Eternel ne dépassera pas 26% de la concentration initiale en polluant.

La directive européenne relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine fixe une limite de qualité à 100 ng/l pour les 20 PFAS.

Il a donc été décidé pour l'exploitation de ces bassins de réalimentation que ;

- Si la concentration totale en polluant (PFAS) est inférieure à 400 ng/l, l'exploitant maintiendra la prise d'eau dans le Roubaud ;
- Si la concentration totale en polluant (PFAS) est supérieure à 400 ng/l, l'exploitant arrêtera la prise d'eau du Roubaud et transférera le prélèvement vers une prise d'eau située sur le Canal Jean Natte.
- Un suivi renforcé de l'analyse de la qualité d'eau du Père Eternel sera réalisé.

Le schéma suivant synthétise un exemple de protocole à suivre par l'exploitant lors de la détection de la pollution.

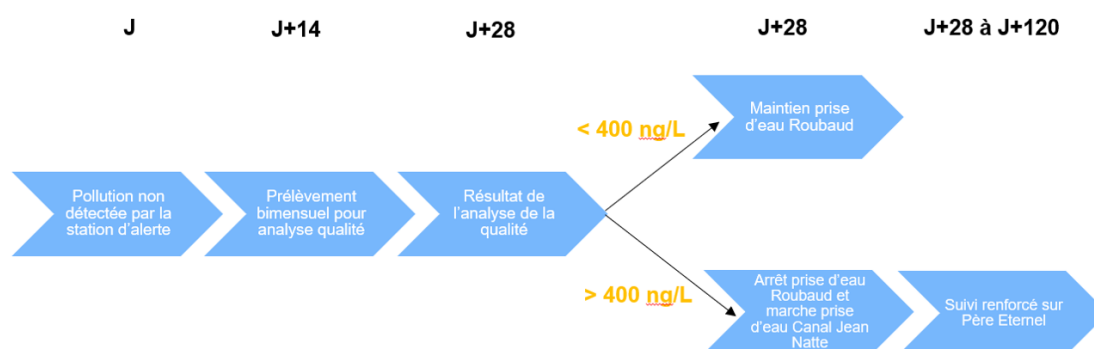
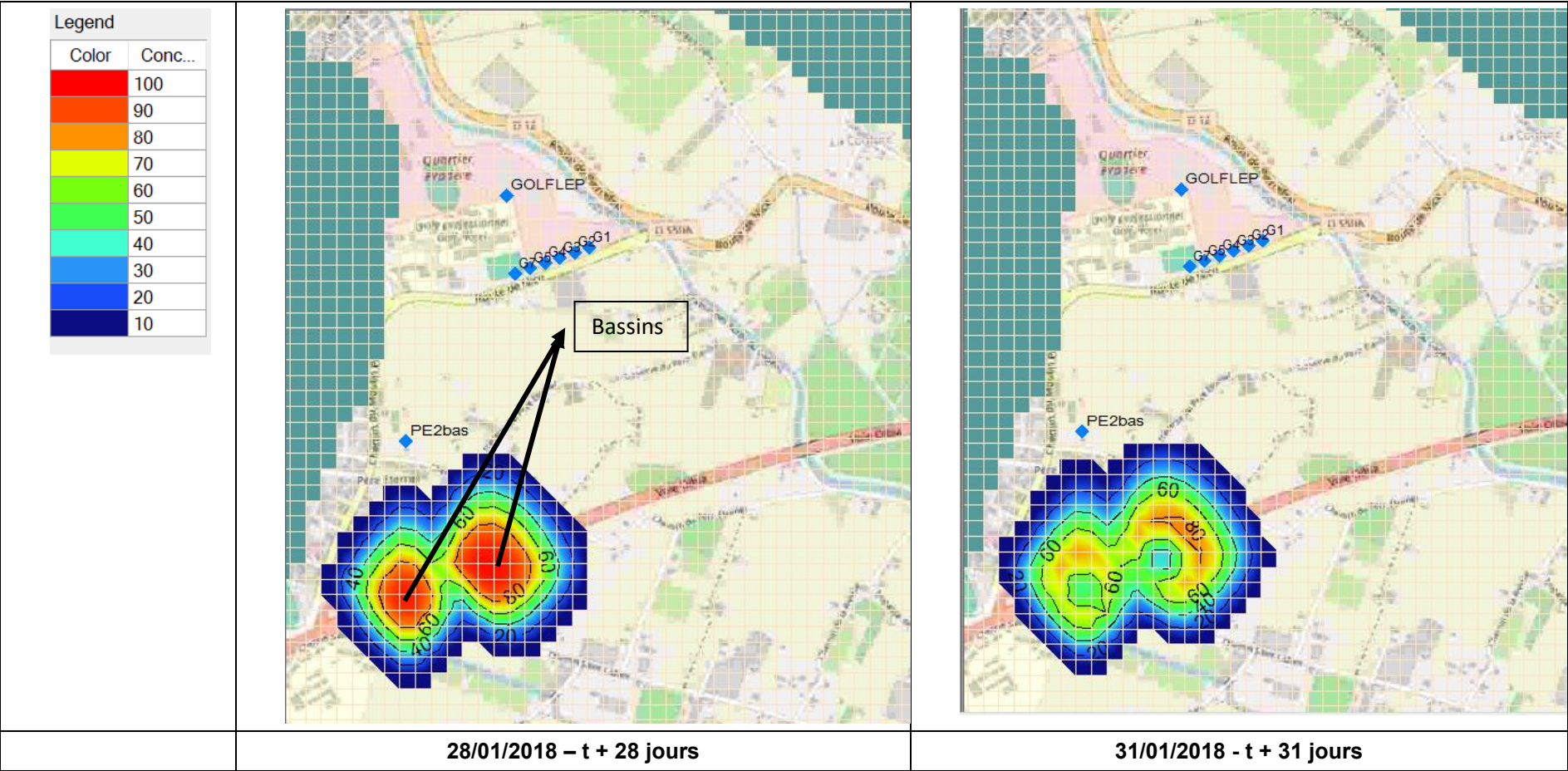
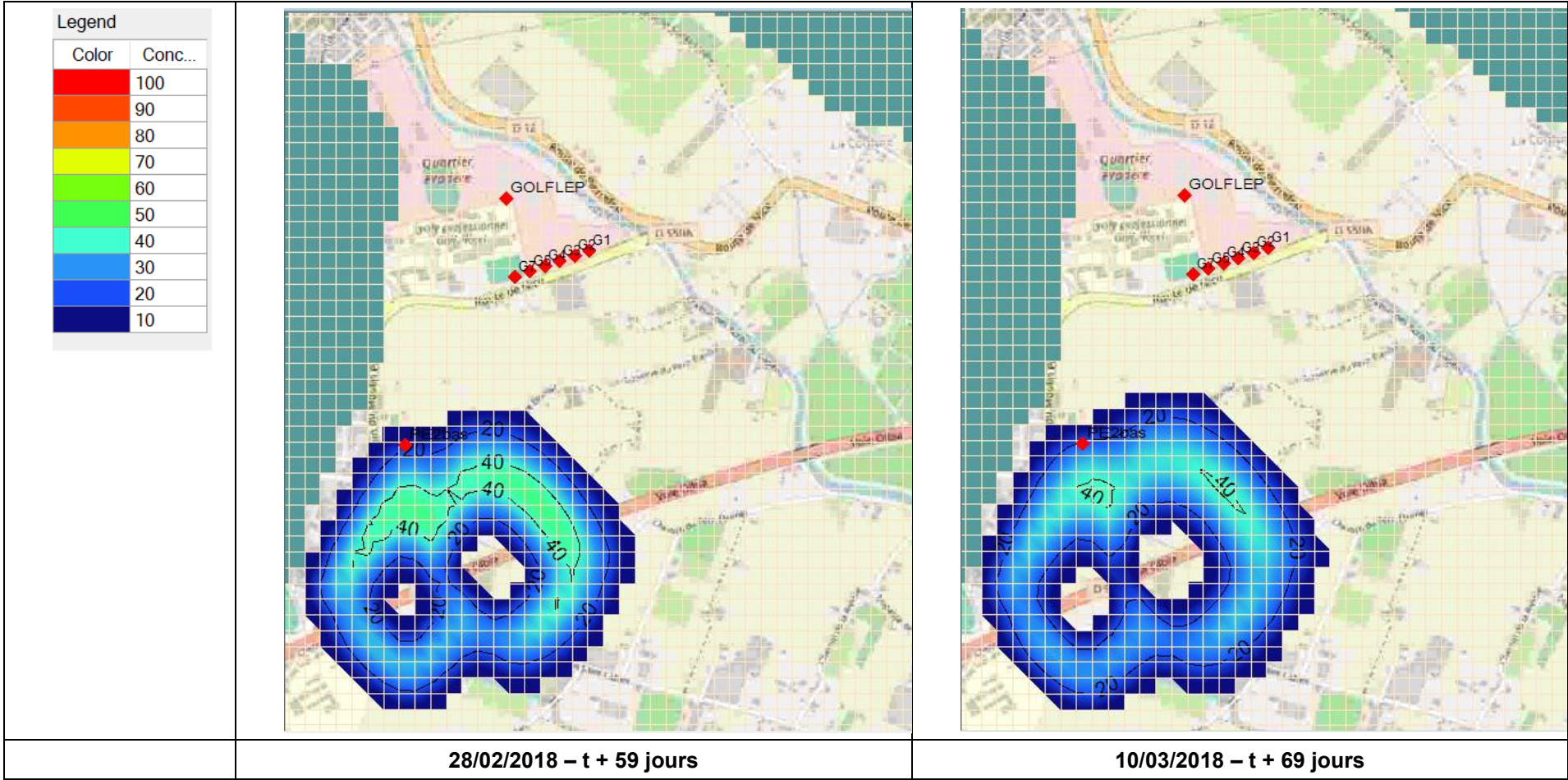


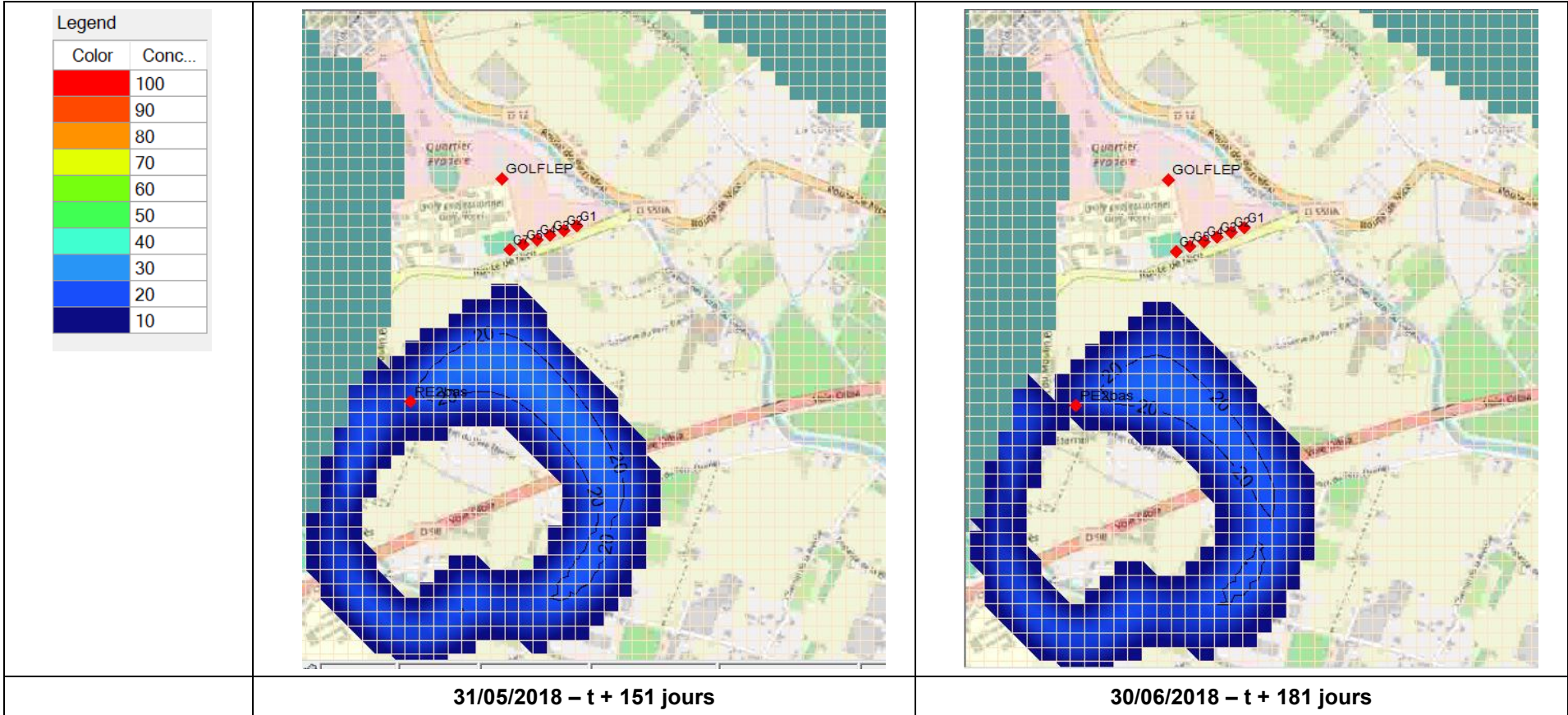
Figure 79 : Protocole lors de la détection d'une pollution

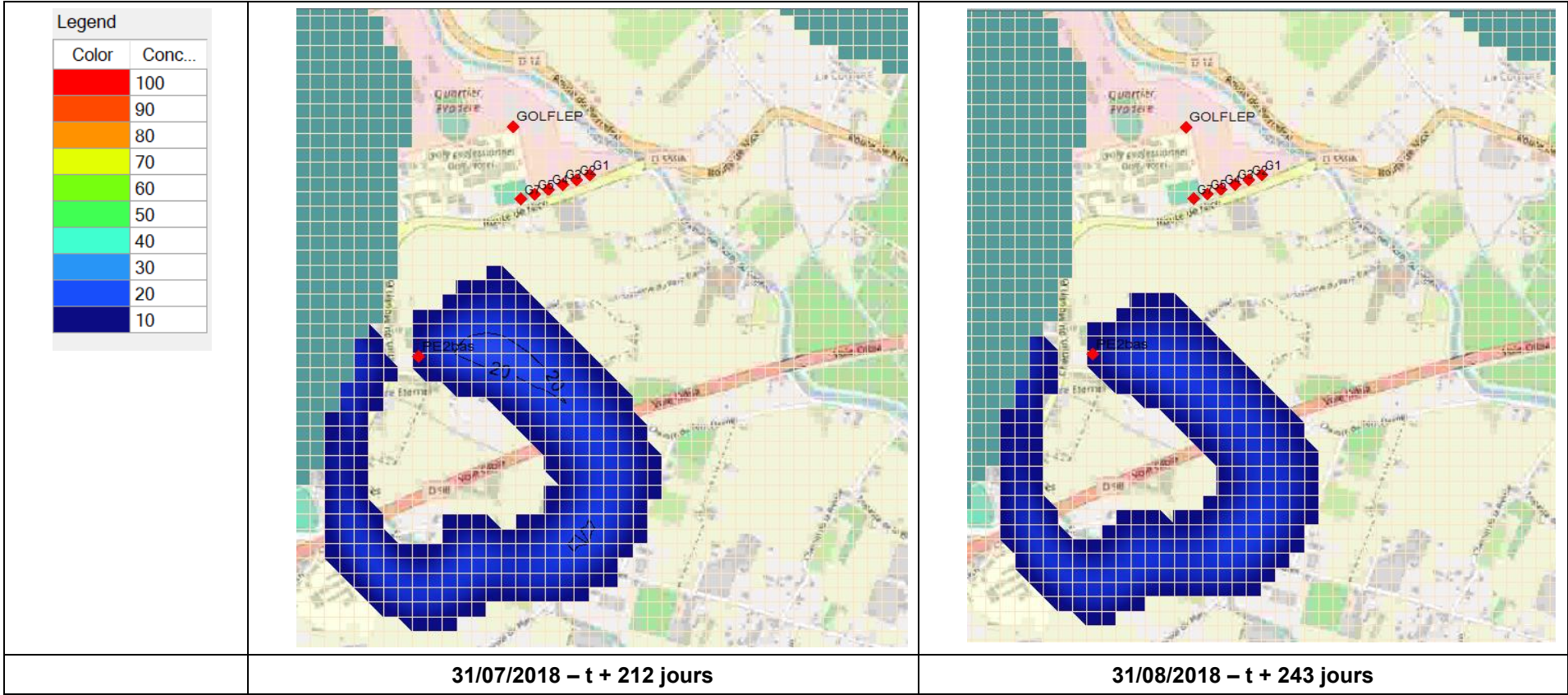
Tableau 7 : Evolution des concentrations en polluant après la pollution

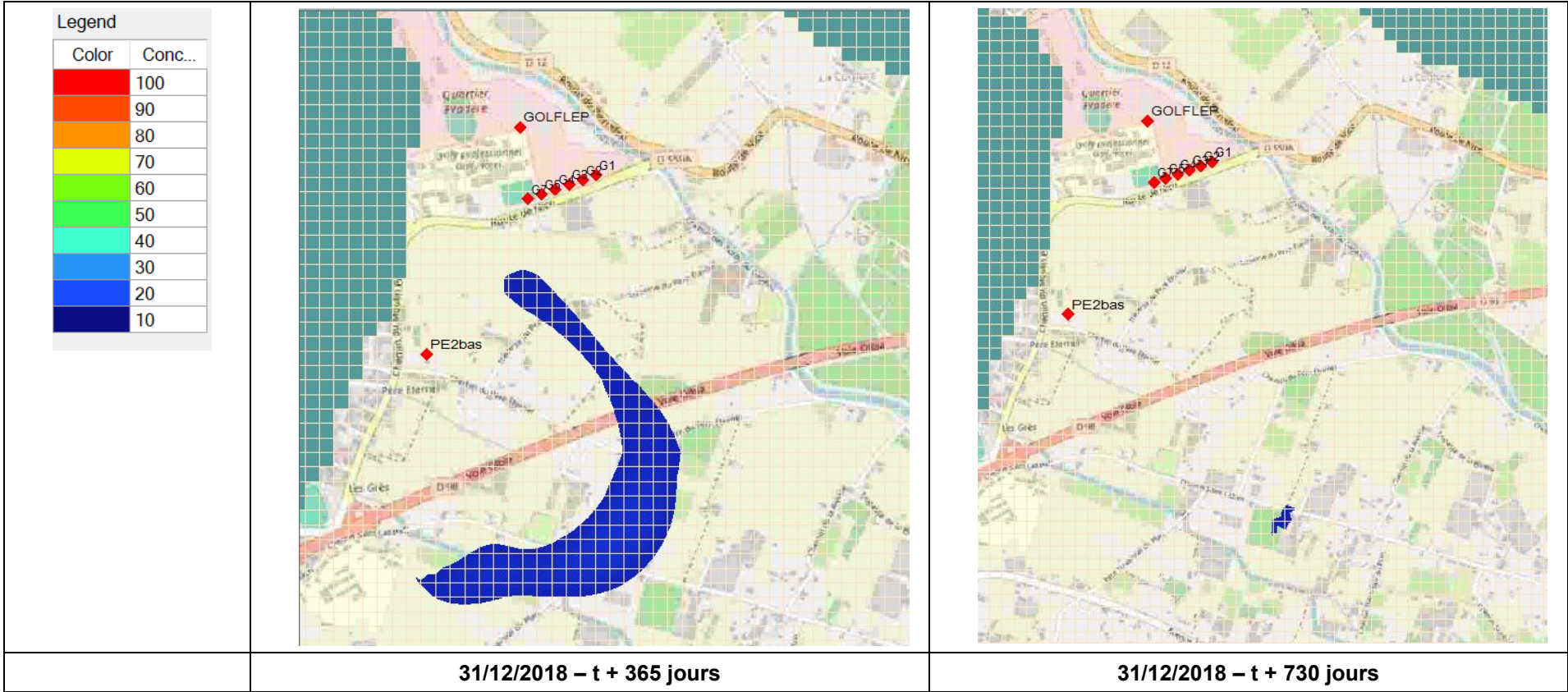


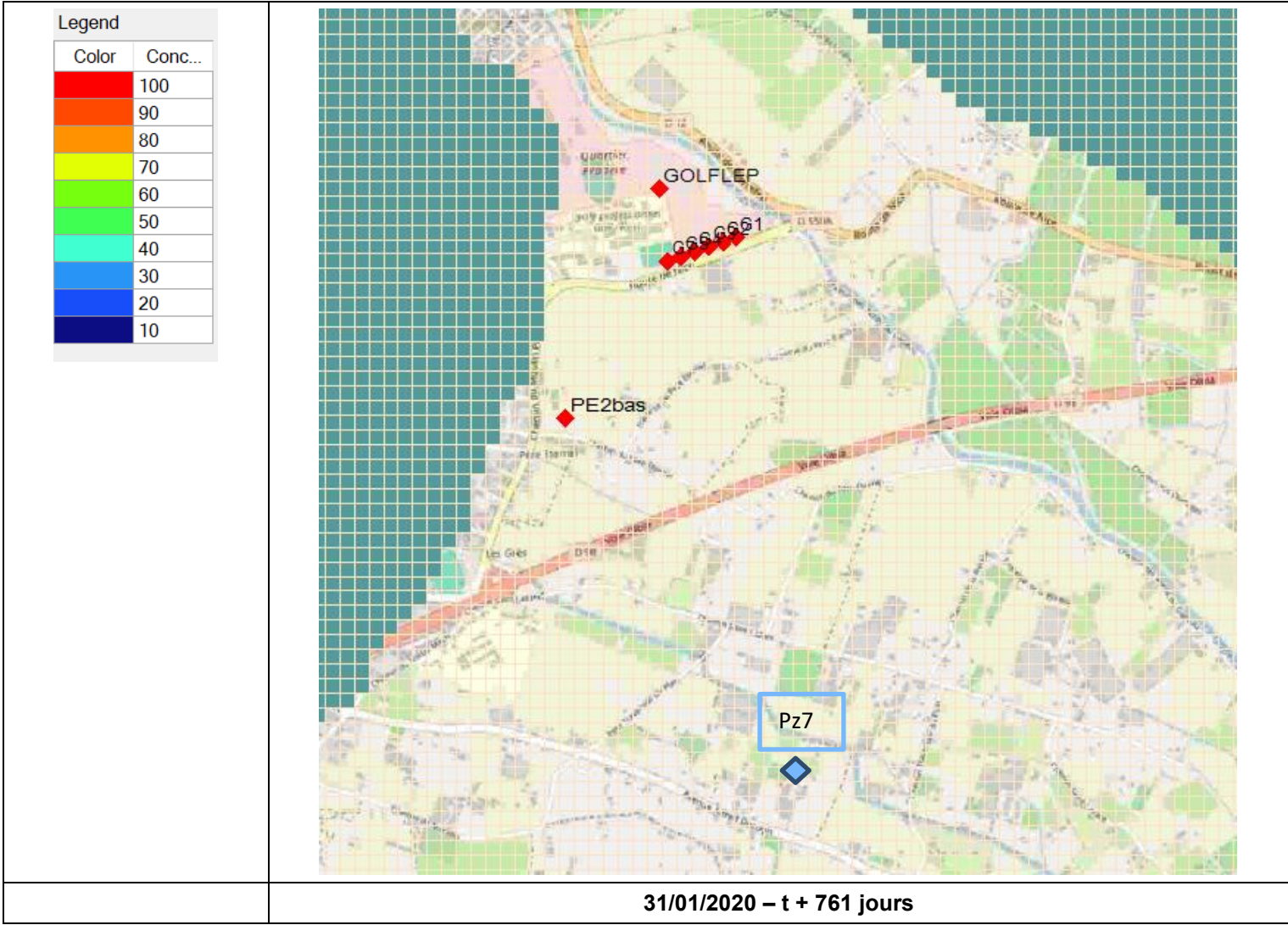












8. CONCLUSION

Les simulations réalisées attestent de l'utilité de la réalimentation hivernale de la nappe du Gapeau à l'aide des deux sites.

La réalimentation de la nappe au débit nominal de 150 l/s permet de limiter l'impact de l'exploitation sur le risque de salinisation et de le maîtriser.

En effet, les différents scénarios simulés attestent que lorsque la réalimentation est mise en œuvre, les niveaux observent une remontée significative des niveaux de nappe pendant la période de fonctionnement. L'intensité des étiages est peu modifiée, mais ils apparaissent plus tardivement, ce qui est bénéfique pour la nappe.

Le bilan des flux entre la nappe et la rivière est accentué au profit de la rivière. La réalimentation de la nappe permet par conséquent de soutenir le Gapeau.

Par ailleurs, sous l'effet de la réalimentation, les flux entre nappe et Méditerranée sont accentués en direction de la mer, permettant de protéger la nappe de l'intrusion saline.

Rétrospectivement, la mise en service du dispositif de réalimentation au débit de 150 l/s aurait permis d'éviter la crise du début des années 2000.

L'analyse des projections climatiques fournies par DRIAS a permis de montrer que les conditions hydro-climatiques de la période 2000-2006 étaient plus sévères que les projections du narratif orange à horizon 2041-2065.

Dans ces conditions hydro-climatiques comparables à celles de 2000-2025 en tenant compte de la réhausse du niveau de la mer attendue à horizon 2050, les constats réalisés sur la période 2000-2025 sont valables dans des conditions hydro-climatiques plus pénalisantes.

La réalimentation de la nappe alluviale du Gapeau présente un réel intérêt pour la protection et la préservation de cette ressource.

ANNEXE 1

CALAGE – PIEZOMETRIE SIMULEE / PIEZOMETRIE OBSERVEE

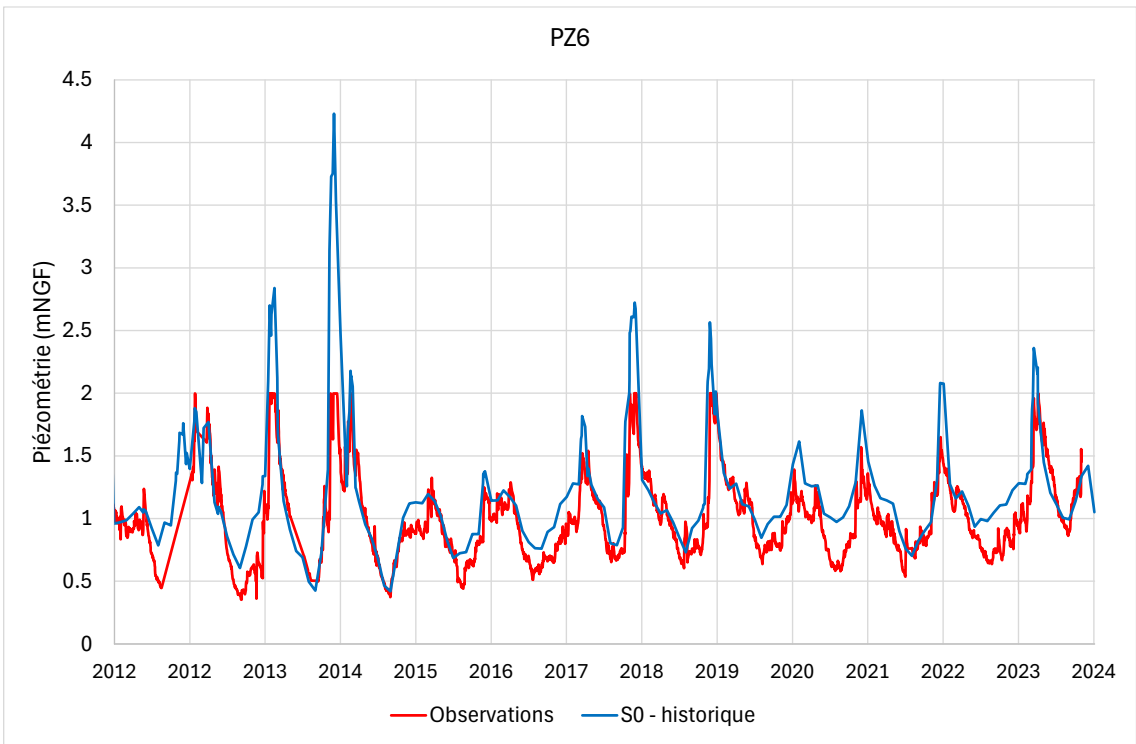


Figure 80 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – Pz6

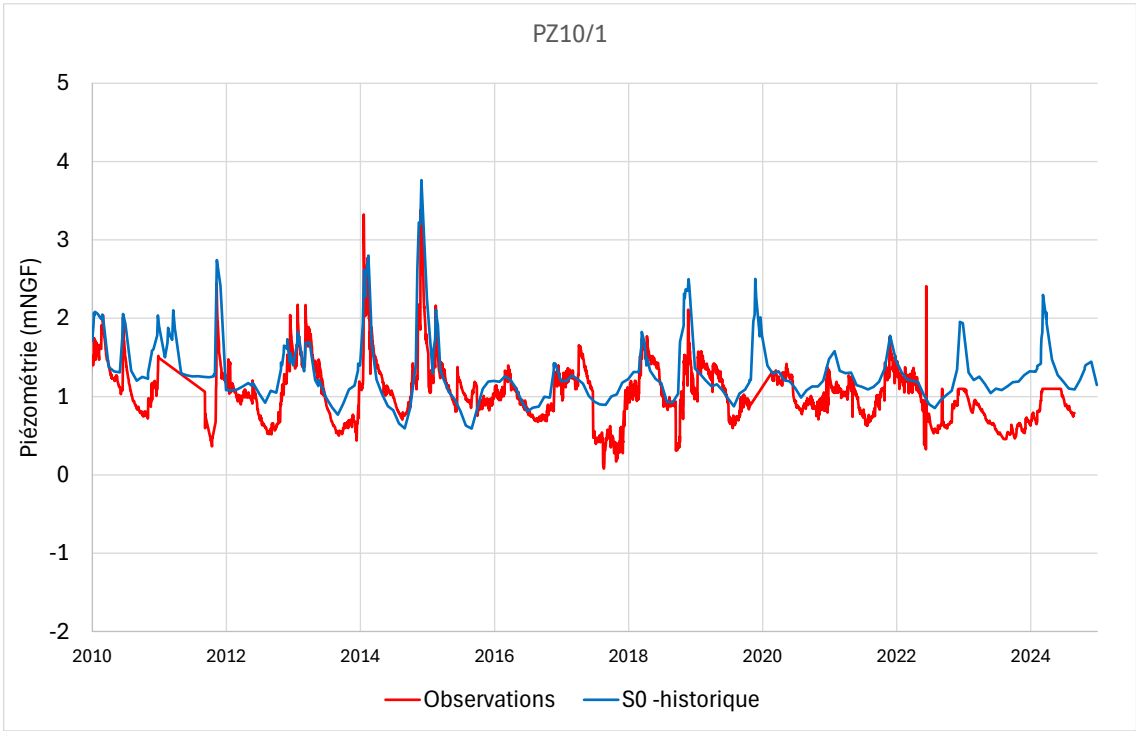


Figure 81 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – Pz10

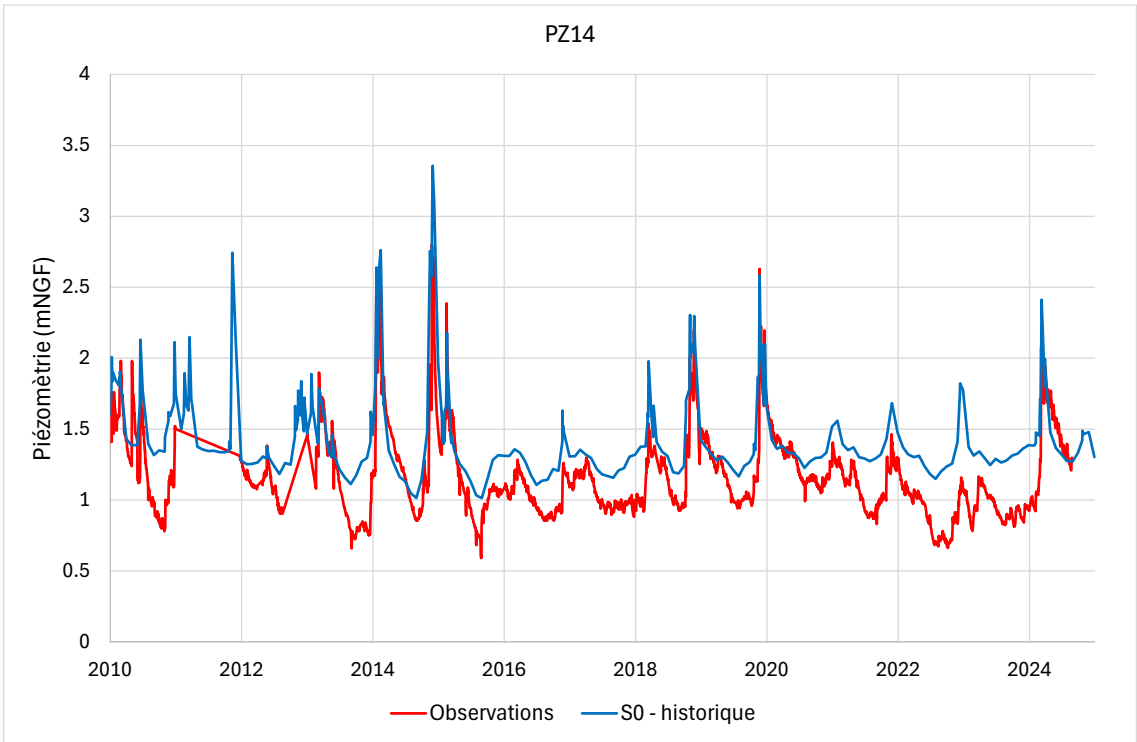


Figure 82 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – Pz14

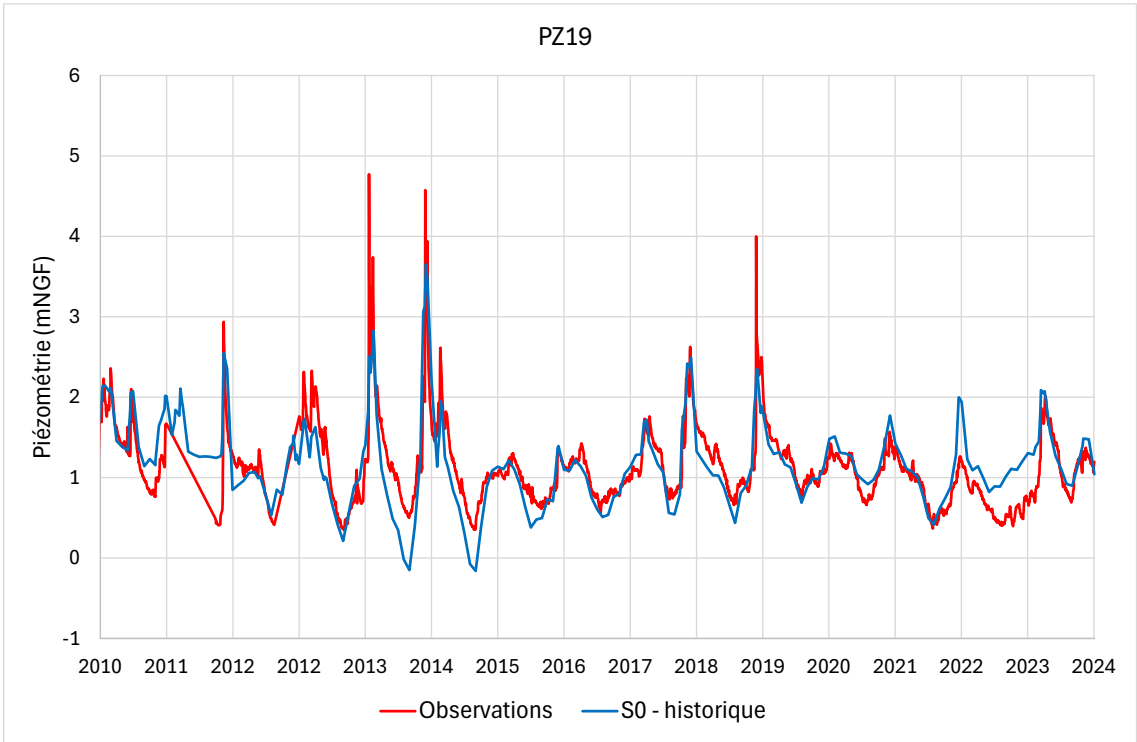


Figure 83 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – Pz19

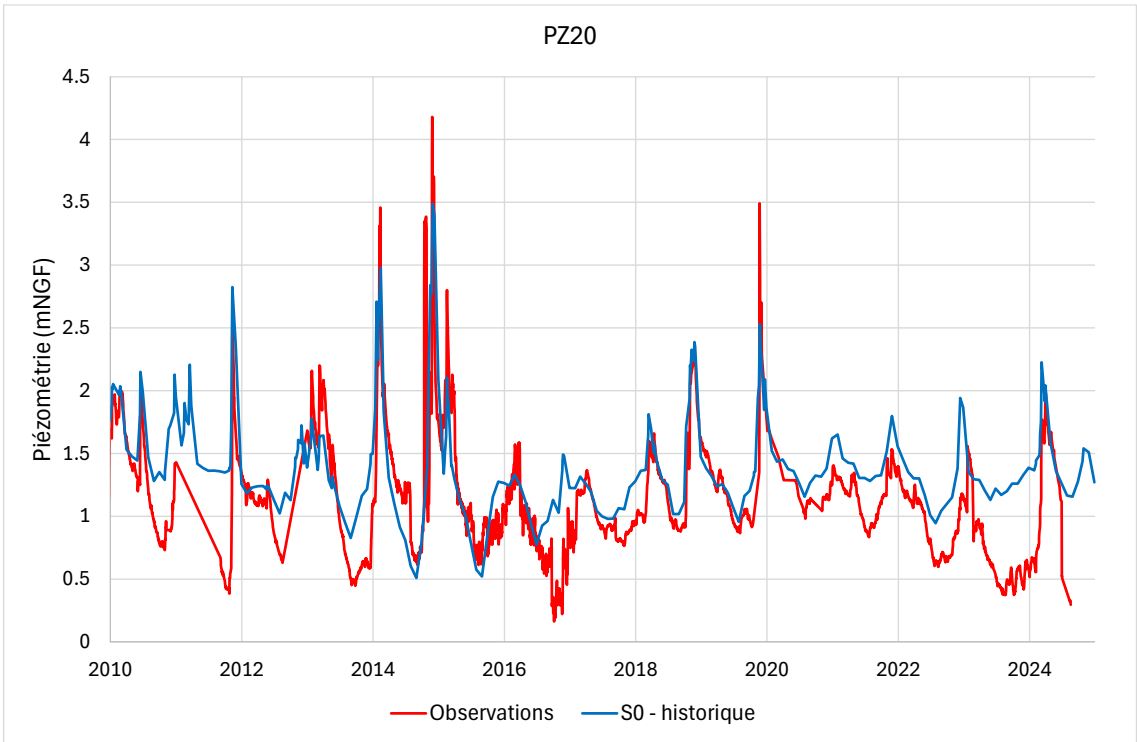


Figure 84 : Niveaux piézométriques observés vs calculés – Régime transitoire – Pz20

CONSULTING