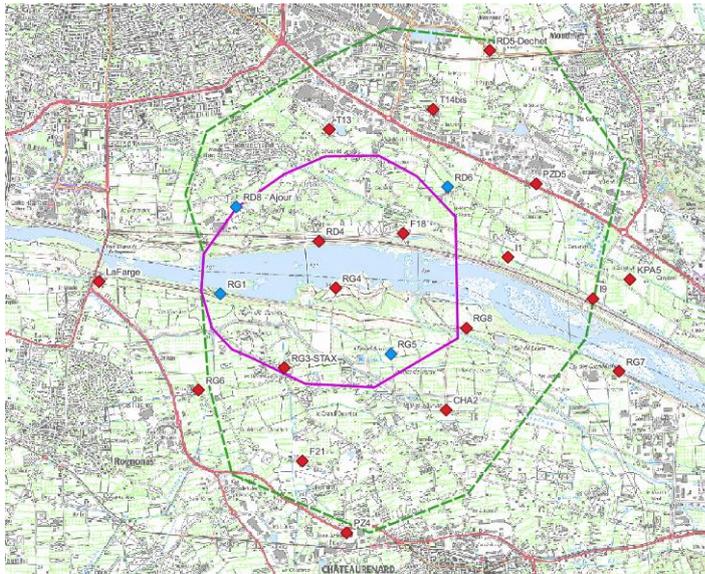




RETABLISSEMENT DE LA FRANCHISSABILITE PISCICOLE SUR LES SEUILS 68, 67 ET 66 EN AVAL DE BONPAS



RAPPORT BILAN DU COMPORTEMENT DE LA NAPPE LORS DE L'ETE 2024 ET DU CHANTIER SUR LES SEUILS

Rev	Rédigé et vérifié par	Approuvé par	Modifications	Date
D				
C				
B				
A	Pascal Fenart (HYDROFIS) Rémi Guillet (BRLi) Thomas Norotte et Johan Garrigou (SMAVD)	Pascal Fenart (HYDROFIS) Bertrand Jacopin (SMAVD)	Document initial	22/11/2024
Réf.	Rapport bilan du comportement de la nappe lors de l'été 2024 et du chantier sur les seuils		Diffusion	INTERNE

Table des matières

RESUME NON TECHNIQUE	6
1. INTRODUCTION.....	8
1.1. OBJET DU DOCUMENT	8
1.2. RAPPEL DES ETAPES ANTERIEURES AUX TRAVAUX MENEES SUR LA NAPPE	8
1.3. REDACTEURS	9
2. LES TRAVAUX DE RETABLISSEMENT DE LA FRANCHISSABILITE PISCICOLE	10
2.1. L'OBJECTIF DE L'OPERATION	10
2.2. LES AMENAGEMENTS PISCICOLES	11
2.3. QUELQUES GRANDS CHIFFRES SUR LES TRAVAUX	12
2.4. UN CHANTIER PHARAONIQUE PREVU SUR 2 ANS DE REALISATION	12
2.5. RETOUR SUR LA PREMIERE ANNEE DE CHANTIER, A L'ETE 2024	13
3. LES ENJEUX AUTOUR DE LA NAPPE	16
3.1. LE ROLE DES SEUILS ET LE CHOIX DE L'AMENAGEMENT	16
3.2. LES EFFETS ATTENDUS DE L'AMENAGEMENT SUR LA NAPPE ET SES USAGES	17
3.2.1. <i>Les effets attendus sur le niveau de la nappe</i>	17
3.2.2. <i>Les effets attendus sur les usages</i>	18
3.3. LES ENGAGEMENTS PRIS PAR LE SMAVD SUR LA NAPPE	19
4. LE SUIVI PIEZOMETRIQUE AVANT/PENDANT LES TRAVAUX	21
4.1. LE RESEAU D'OBSERVATION DU SMAVD	21
4.2. LE MODE DE COLLECTE DES DONNEES	22
4.3. PROTOCOLES D'INTERPRETATION DES NIVEAUX DE NAPPE	22
4.3.1. <i>Vigilance sur les ouvrages préleveurs</i>	22
4.3.2. <i>Caractérisation de l'impact des travaux sur la nappe</i>	23
5. L'EVOLUTION DE LA NAPPE AU COURS DE L'ETE 2024	24
5.1. UNE PREMIERE ANALYSE DES NIVEAUX D'EAU ET DEBITS EN DURANCE	24
5.2. ANALYSE DES NIVEAUX DE NAPPE AU COURS DE L'ETE	27
5.3. SUIVI D'UN EVENTUEL SOUS-PASSEMENT DES NIVEAUX DE VIGILANCE	30
5.4. BILAN DE L'IMPACT DES TRAVAUX SUR LA NAPPE LORS DE L'ETE 2024	31
5.4.1. <i>Une nécessaire évolution de la méthode de calcul</i>	31
5.4.2. <i>Des résultats conformes aux prévisions établies avant les travaux</i>	32
6. LE SUIVI DES USAGES AU COURS DE L'ETE 2024	33
6.1. LOCALISATION DES FORAGES ET EVOLUTION DES NIVEAUX DE NAPPE	33
6.2. BILAN DES USAGES AFFECTES, DEFAILLANCES SURVENUES, ACTIONS CORRECTRICES MISES EN ŒUVRE	34
6.2.1. <i>Difficultés d'amorçage sur une installation de pompage d'un forage agricole en ceinture verte d'Avignon</i> 34	
6.2.2. <i>Défaut de pression sur un forage exploité l'hiver en antigel sur la commune de Chateaurenard</i> 36	
6.2.3. <i>Défaut supposé sur un forage à Chateaurenard</i>	37

7. BILAN ET PERSPECTIVES POUR LA SUITE	39
7.1. BILAN DE L'IMPACT DES TRAVAUX SUR LA NAPPE DURANT L'ETE 2024.....	39
7.2. SAISON HIVER-PRINTEMPS 2025	40
7.2.1. <i>Le suivi de la nappe</i>	40
7.2.2. <i>Le suivi des usages</i>	41
7.3. TRAVAUX PREVUS POUR L'ETE 2025.....	42
7.3.1. <i>Le suivi de la nappe</i>	42
7.3.2. <i>Le suivi des usages</i>	42
8. ANNEXE : ELEMENTS DE METHODE POUR LE CALCUL DE L'IMPACT DES TRAVAUX.	43
8.1. PREAMBULE	43
8.2. RECHERCHE DE SITUATIONS HYDROLOGIQUES PROCHES DE CELLE OBSERVEE EN 2024.....	45
8.3. DETERMINATION DE LA PIEZOMETRIE NON-INFLUENCEE PAR LES TRAVAUX.....	57

Table des illustrations

Figure 1 : Carte de localisation des seuils 68, 67 et 66 entre Avignon et Chateaufort.....	10
Figure 2 : Panneau pédagogique expliquant le projet.....	11
Figure 3 : Schéma de <i>principe d'aménagement des seuils 68 et 67</i>	12
Figure 4 : Photo du seuil 68 au printemps 2024 avant les travaux.....	13
Figure 5 : Les temps forts du chantier 2024 en images.....	14
Figure 6 : Planning résumé de réalisation des travaux lors de l'été 2024.....	15
Figure 7 : Représentation simplifiée de l'effet de l'abaissement des seuils sur la nappe à proximité et sur les forages plus ou moins proches de la Durance.....	16
Figure 8 : Impact théorique supposé des aménagements après travaux.....	17
Figure 9 : Impact théorique supposé des aménagements pendant travaux.....	18
Figure 10 : Réseau de suivi piézométrique.....	21
Figure 12 : Chronique des débits de la Durance durant les travaux.....	24
Figure 13 : Chronique des précipitations enregistrées à Avignon durant les travaux.....	25
Figure 11 : Evolution des niveaux d'eau en Durance au cours du chantier 2024.....	26
Figure 14 : Variations des niveaux de nappe durant les travaux (champ proche).....	27
Figure 15 : Variation des niveaux de nappe durant les travaux (champ moyen).....	28
Figure 16 : Variation des niveaux de nappe durant les travaux (champ lointain).....	28
Figure 17: Carte de profondeur de la nappe post-travaux, au 20/09/2024.....	30
Figure 18 : Exemple de situations piézométriques observées durant les travaux.....	31
Figure 19 : Carte des impacts piézométriques observés au 20 septembre (fin des travaux).....	32
Figure 20 : Carte piézométrique au 19/07/2024 (avant travaux) et localisation des forages.....	33
Figure 21 : Carte piézométrique au 20/09/2024 (fin du chantier) et localisation des forages.....	34
Figure 22 : Localisation du forage concerné sur la carte piézométrique du 08/08/2024.....	35
Figure 23 : Localisation du forage concerné sur la carte piézométrique du 22/08/2024.....	36
Figure 24: Localisation du forage concerné sur la carte piézométrique du 22/08/2024.....	38
Figure 25 : Carte des impacts piézométriques observés au 20 septembre (fin des travaux).....	40
Figure 26 : Rappel des niveaux historiques de nappe au 1er mars sur les piézomètres de référence.....	41
Figure 27: Catégorisation des piézomètres du réseau de suivi (HYDROFIS & BRLI, 2024).....	44
Figure 28: Débit journalier en Durance en 2024.....	45
Figure 29: Situation piézométrique au 1 ^{er} juin de 2015 à 2024 sur les piézomètres de référence.....	46
Figure 30: Débit moyen en Durance sur des périodes variables de 2016 à 2024.....	46
Figure 31: Comparaison des variations piézométriques entre 2018 et 2024.....	47
Figure 32: Visualisation de la modélisation calibrée sur 5 jours de l'évolution du toit de nappe pour RG3.....	49
Figure 33: Résultat de la calibration sur 120 jours pour l'ensemble des piézomètres ayant de la donnée pendant l'été-automne 2018.....	50
Figure 34: Visualisation de la modélisation calibrée sur 120 jours de l'évolution du toit de nappe pour RG3.....	50
Figure 35: Situations piézométriques théoriques attendues sur un nombre limité de piézomètres par extrapolation des variations de nappe observées en 2018.....	52

Résumé non technique

Le SMAVD est porteur en maîtrise d'ouvrage d'un projet de construction de passes à poissons sur les seuils 68, 67 et de réhabilitation d'une passe existante située sur le seuil 66, tous situés en Durance entre Avignon et Chateaufort. La conception de l'aménagement optimal sur ces ouvrages résulte d'un vaste cycle d'études pluridisciplinaires, avec notamment un programme de recherche ayant analysé l'impact sur la nappe de différents scénarios d'abaissement des seuils 67 et 68 pour réaliser les passes à poissons. D'après ces études, le projet d'aménagement retenu ne devrait entraîner que des abaissement faibles et locaux du niveau piézométrique (-30 cm, sur une aire de 4 km², pouvant atteindre -60 cm en bord de Durance), sans effet sur les captages d'eau potable des deux rives, et bien supportés par les forages agricoles et domestiques existants.

Conscient de l'enjeu sur l'eau souterraine, le SMAVD s'est engagé à couvrir le risque résiduel en mettant en œuvre un suivi de la nappe par son dense réseau d'enregistrement piézométrique sur le secteur, à mener une analyse des variations des niveaux de nappe en lien avec les travaux, à communiquer sur l'état de la nappe (bulletins travaux dont 8 réalisés en 2024, bilan post-chantier), et à mettre en place pendant la période de travaux un cadre de suivi des usages préleveurs et d'intervention pour la remédiation sur les forages qui seraient affectés du fait des travaux. Le suivi de la nappe est en préparation de longue date et a fait l'objet d'études préparatoires avant chantier pour permettre la juste compréhension des phénomènes en jeu, définir la méthode d'interprétation des variations piézométriques et d'estimation en pseudo temps réel des impacts des travaux sur les niveaux de nappe.

Le chantier d'aménagement des seuils est phasé sur 2 étés successifs (2024 et 2025). Lors du chantier de l'été 2024 ont eu lieu les lourds terrassements permettant notamment d'abaisser le niveau des seuils 68 et 67 et de les restructurer, et également de réaliser les couronnements de palplanches hébergeant les futures passes à poissons de ces deux seuils. C'est lors de ce chantier qu'ont donc eu lieu les phases d'abaissement des niveaux d'eau de Durance et leurs effets sur la nappe. Lors du chantier à venir de l'été 2025, il sera réalisé les rampes à macro-rugosités à l'intérieur des rideaux de palplanches déjà constituées, travaux pour lesquels il n'est pas prévu de réaliser d'abaissement supplémentaire.

Le présent document constitue le bilan post-été 2024 de l'évolution de la nappe, c'est-à-dire lors la première année de chantier et des travaux d'abaissement des seuils. Le premier semestre 2024 a été particulièrement exceptionnel en termes de pluviométrie et de fonte du manteau neigeux, et EDF par le biais des restitutions à Mallemort a maintenu en Durance des débits importants contribuant à gonfler la nappe jusqu'à la date de démarrage des travaux au 22 juillet. Habituellement, ces restitutions de EDF sont interrompues plus tôt au printemps (fin mai à début juin). Cette simultanéité exceptionnelle du démarrage du chantier et de l'arrêt des restitutions implique que l'interprétation des mesures piézométriques a dû permettre de dissocier : l'effet des travaux, l'effet simultané de l'arrêt des restitutions, et l'effet des autres variables d'influence (hydraulicité liée aux coups d'eau, retours d'irrigation, pluviométrie, travaux, rabattement exercé par d'autres forages...). Ainsi, l'analyse croisée des niveaux de nappe 2024 et des différentes variables d'influence permet de conclure à un impact des travaux de l'ordre de 50 à 30 cm environ en champ proche et moyen. Cet impact constaté est très proche des estimations établies au cours des études préparatoires, tant dans le périmètre que dans les ordres de grandeur des baisses piézométriques. Le suivi de la nappe a également permis d'observer des niveaux piézométriques restés confortables pour les usages au cours de l'été ; des échanges avec des usagers ont eu lieu sur la période (3 sollicitations), mais aucun dysfonctionnement de forage imputable aux travaux n'a été constaté.

Le suivi de la nappe va se poursuivre lors de la période hiver printemps 2025, en anticipation notamment de la période d'antigel pour certaines exploitations en arboriculture qui correspond habituellement à une situation de nappe basse, et pour suivre l'effet du décolmatage des souilles suite aux crues hivernales. Avec la reprise du chantier à l'été 2025, le suivi nappe sera également poursuivi pendant les travaux, cependant l'absence d'abaissement supplémentaire ne devrait pas générer d'impact additionnel.

1. Introduction

1.1. OBJET DU DOCUMENT

Le document présente le bilan de l'évolution de la nappe alluviale de la Durance entre Avignon et Chateaufort, au droit des seuils 68, 67 et 66, sur la période de juin à septembre 2024. Ce bilan est établi dans le contexte du chantier de rétablissement de la franchissabilité piscicole sur les seuils, et dont le SMAVD est le maître d'ouvrage. La première phase de réalisation du chantier a été menée entre le 22 juillet et le 20 septembre 2024 et est maintenant conclue. Une seconde phase est prévue de mi-juillet à mi-septembre 2025.

Le suivi de la nappe a été mené par le SMAVD sur le vaste réseau de piézomètres qu'il entretient et gère dans le secteur depuis 2016. Tout au long de l'été 2024, la nappe a fait l'objet d'un suivi renforcé, avec la publication régulière de bulletins d'état de la nappe : au total ce sont 8 bulletins qui ont été publiés et diffusés entre le 25 juin (avant les travaux) et le 20 septembre 2024.

Un des enjeux du présent rapport est de rapporter de manière synthétique, factuelle et objective :

- **Comment la nappe a évolué au cours de l'été 2024**, en pointant : les variables et phénomènes qui expliquent les variations piézométriques ; la part jouée par les travaux d'arasement des seuils et celle liée aux autres variables influençant la nappe ; les conditions hydrologiques qui caractérisent l'été 2024, et ce qui le distingue ou le rapproche d'autres étés passés ; etc.
- **Quelles ont été les conditions de prélèvement pour les usagers de la nappe au cours de l'été** : adéquation des niveaux de nappe à satisfaire les usages, suivi des niveaux de vigilance, état des lieux des ouvrages éventuellement affectés et le cas échéant des mesures de remédiation mises en œuvre ; etc.

Ce rapport n'a pas pour objet d'explicitier de manière détaillée la méthode de suivi et d'analyse piézométrique mise en œuvre par le SMAVD, qui a fait l'objet d'autres études/rapports et de présentations. Une annexe donne quelques éléments synthétiques de méthode pour qui souhaite comprendre la démarche scientifique menée.

1.2. RAPPEL DES ETAPES ANTERIEURES AUX TRAVAUX MENEES SUR LA NAPPE

Dans le cadre des études de conception de l'aménagement piscicole sur les seuils, un programme de recherche sur le fonctionnement hydrodynamique de la nappe alluviale a été mené de 2016 à 2020 (HYDROFIS-HSM-SMAVD, 2020), consistant en la construction d'un modèle hydrogéologique de la nappe. L'objet de ce modèle numérique est de permettre d'évaluer les conséquences sur la nappe de différents scénarios possibles d'abaissement et d'arasement des seuils pour l'aménagement des passes à poissons. Pour alimenter ce modèle en données réelles, notamment du point de vue du degré de colmatage des souilles par les limons, il a été procédé à une expérimentation de vidange temporaire de la souille du seuil 68 en février 2016. Les effets sur la nappe de cette opération ponctuelle de vidange ont pu être suivis grâce au réseau piézométrique mis en place dès 2016 dans le secteur. Par la suite ce réseau a été complété et a continué à faire l'objet de suivis réguliers jusqu'avant le démarrage des travaux pour bénéficier d'une profondeur de données permettant d'apprécier les variations saisonnières de la nappe.

Ce programme de recherche a notamment permis d'estimer les impacts des différents scénarios

d'aménagement imaginés sur les seuils pour la franchissabilité piscicole, et de retenir le scénario actuel (création d'une échancrure centrale de 2m de haut sur le seuil 68 et de 1m sur le seuil 67). En effet, les études ont révélé que ce scénario n'entraîne pas d'impact sur les usages stratégiques AEP des communes des deux rives, et maintient réduits les effets potentiels sur les forages domestiques et agricoles existants. Les effets attendus de ce scénario d'aménagement sur le niveau de nappe sont :

- En phase temporaire pendant les travaux (principalement été 2024), des niveaux piézométriques abaissés de l'ordre de -100 cm, - 60cm ou -30 cm suivant la zone considérée, dans une projection très pessimiste du déroulement des travaux. Dans une vision moins pessimiste, les niveaux d'abaissement pourraient être proches de ceux de la phase post-aménagement.
- Après aménagement, en phase d'exploitation des ouvrages : un risque d'abaissement piézométrique définitif de l'ordre de 30 cm, sur une aire de 4 km², pouvant atteindre 60 cm en bord de Durance.

En 2022, sur la base de ces estimations, une étude complémentaire a été menée par HYDROFIS pour identifier et caractériser la vulnérabilité des forages agricoles en activité dans les zones d'impact supposées ; une approche indirecte a aussi été proposée pour estimer le nombre de forages domestiques. L'étude a mis en évidence qu'une majeure partie des forages est équipée de pompes de surface, pour lesquels la profondeur du toit de la nappe est un paramètre important à suivre. L'abaissement de la nappe lié aux travaux devrait en tout état de cause produire des effets réduits globalement bien supportés par ces forages.

Pour finir en 2023, HYDROFIS et BRLi ont mené une analyse détaillée des chroniques piézométriques existantes pour aider à la compréhension des phénomènes en jeu et pour définir à priori une méthode d'interprétation des variations piézométriques, avec pour objectif de pouvoir estimer en pseudo temps réel les impacts des travaux sur les niveaux de nappe.

1.3. REDACTEURS

Pour l'établissement du présent rapport post-été 2024, le SMAVD a souhaité bénéficier du regard d'experts extérieurs menant l'analyse du comportement de la nappe. Le SMAVD a ainsi pu compter sur l'expertise des bureaux d'étude HYDROFIS et BRL Ingénierie, HYDROFIS ayant déjà mené plusieurs études sur le sujet de la nappe antérieurement à la réalisation du projet de travaux.

Ainsi ce document a été rédigé conjointement par :

- **Les experts en hydrologie et hydrogéologie des bureaux d'étude HYDROFIS et BRL Ingénierie**, qui ont fait l'analyse des variations de la nappe avant/pendant/après le chantier, de l'influence des travaux, et la mise en perspective de l'été 2024 avec les chroniques antérieures disponibles. *Ces experts ont notamment rédigé les chapitres 4, 5 du rapport, ainsi que l'annexe. Ils ont également corédigé le chapitre 7 avec le SMAVD.*
- **Les agents du SMAVD impliqués dans le projet**, qui ont notamment mené le suivi piézométrique et le suivi des usages préleveurs, et ont organisé et suivi le chantier. *Ces agents du SMAVD ont notamment rédigé les chapitres 1, 2, 3 et 6, et ont corédigé le chapitre 7 avec les experts de HYDROFIS / BRLi.*

2. Les travaux de rétablissement de la franchissabilité piscicole

2.1. L'OBJECTIF DE L'OPERATION

La Durance est un axe de circulation important pour les espèces piscicoles et en particulier pour les grands migrateurs amphihalins (anguilles, aloses, lamproies). Entre le barrage de Mallemort et la confluence avec le Rhône, la continuité piscicole est contrainte par des obstacles construits historiquement dans le lit de la rivière : barrage de Bonpas (exploité et géré par EDF), seuil de Courtine (intégré à la concession CNR), seuils 68, 67 et 66 (gérés par le SMAVD, qui est gestionnaire du domaine public fluvial de Basse Durance). **Le rétablissement de la continuité piscicole sur ces ouvrages est une obligation réglementaire.**

L'objectif de l'opération menée sous maîtrise d'ouvrage du SMAVD est donc de réaliser les travaux d'aménagement des seuils 68, 67 et 66 pour rétablir leur franchissabilité piscicole en les équipant de passes à poissons. L'aménagement de ces obstacles doit permettre de rouvrir 40 km de Durance à la migration des Aloses jusqu'au barrage de Mallemort, d'améliorer la franchissabilité de l'Anguille jusqu'à Cadarache (100 km), et de faciliter la circulation d'autres migrateurs « locaux ».

Le projet du SMAVD a fait l'objet d'un long cycle d'études techniques et a été autorisé par arrêté inter-préfectoral en décembre 2023. Il s'intègre dans une démarche globale de restauration menée en basse Durance et répond à plusieurs programmes de gestion nationaux ou régionaux.

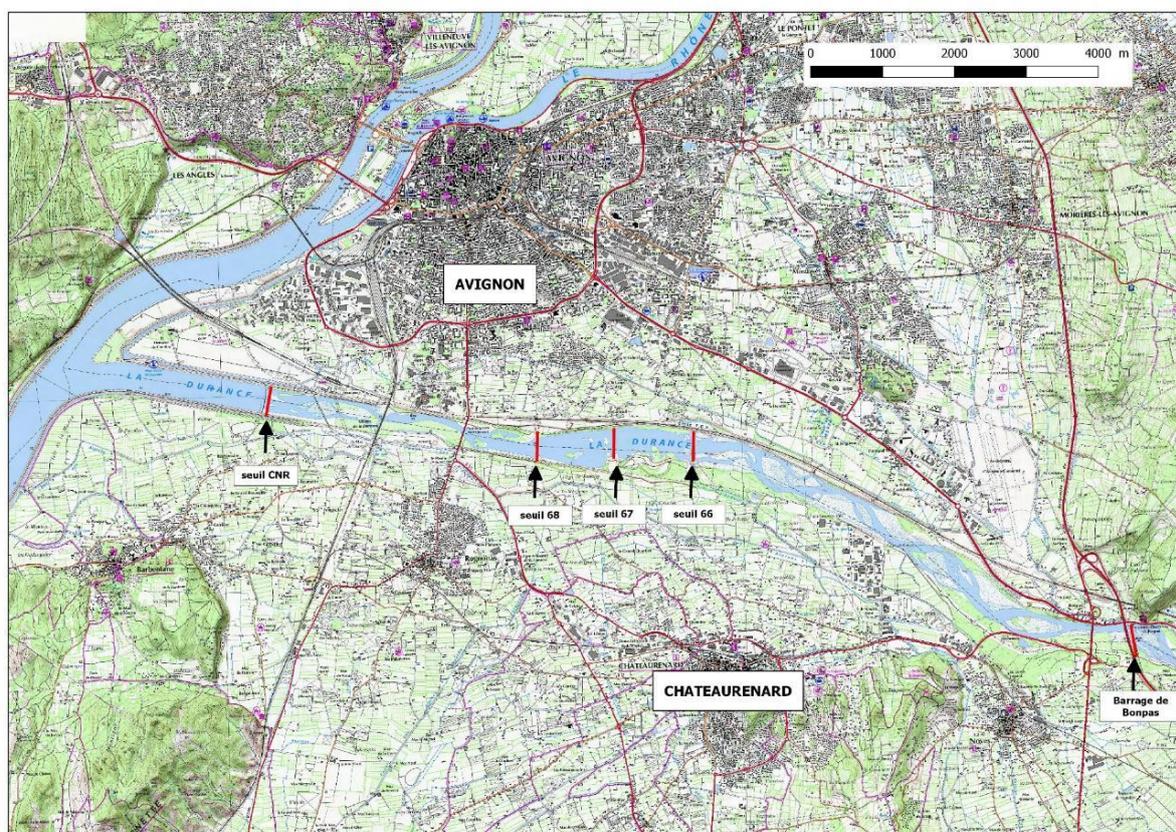


Figure 1 : Carte de localisation des seuils 68, 67 et 66 entre Avignon et Chateaurnaud

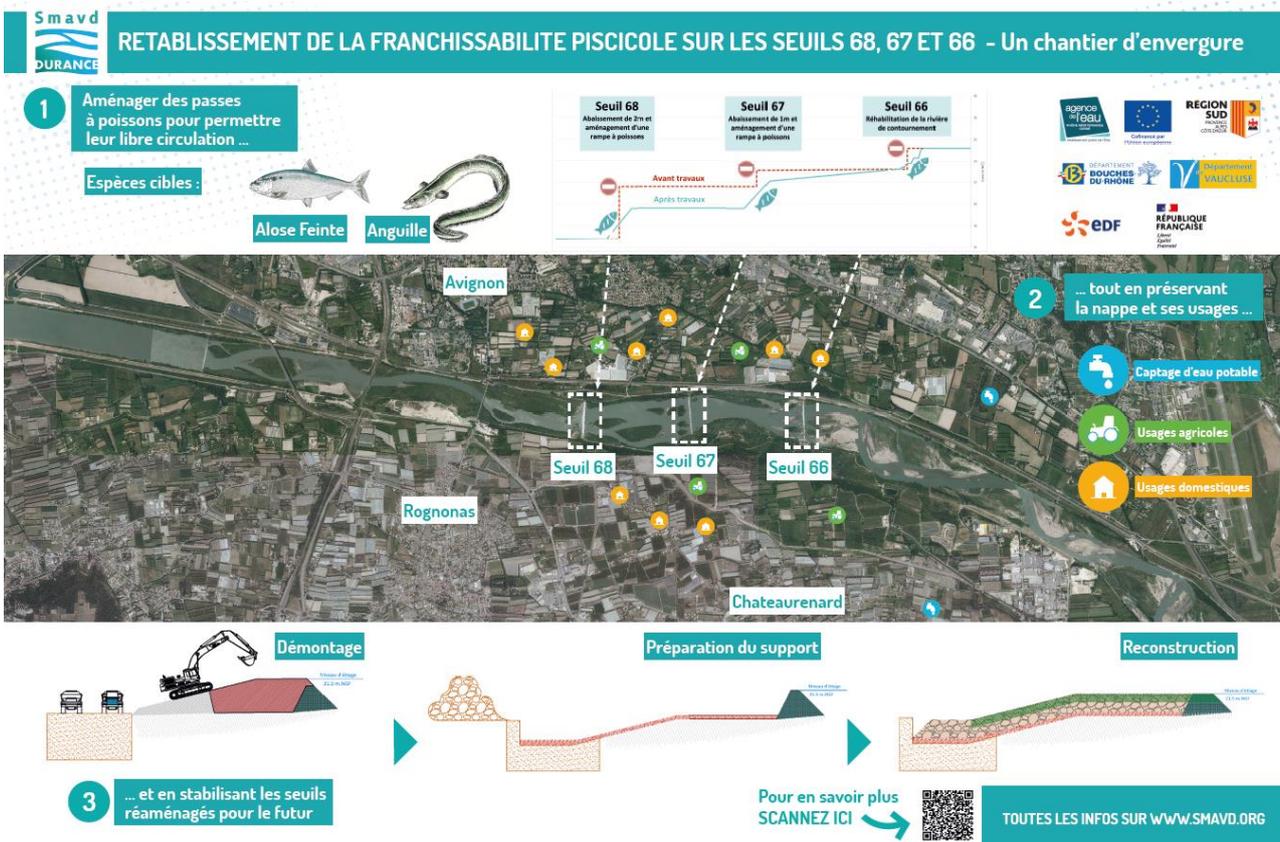


Figure 2 : Panneau pédagogique expliquant le projet

2.2. LES AMENAGEMENTS PISCICOLES

L'aménagement des seuils 68 et 67 consiste en :

- L'abaissement de ces seuils par la réalisation d'une échancrure centrale sur la moitié de leur longueur. La crête du seuil 68 est abaissée de 2m environ dans la zone de l'échancrure, par rapport à sa cote initiale avant travaux ; celle du seuil 67 de 1m. Cet abaissement permet la réalisation de rampes à poissons ;
- La construction de rampes dites à « macro-rugosités » sur chaque seuil, permettant la remontée des poissons ;
- La construction d'un sabot en enrochements en pied de seuil 68 pour fiabiliser l'aménagement.

Sur le seuil 66, les travaux vont consister en la réhabilitation de la rivière de contournement existante en rive gauche, spécialement conçue pour les poissons lors de la construction de l'ouvrage.

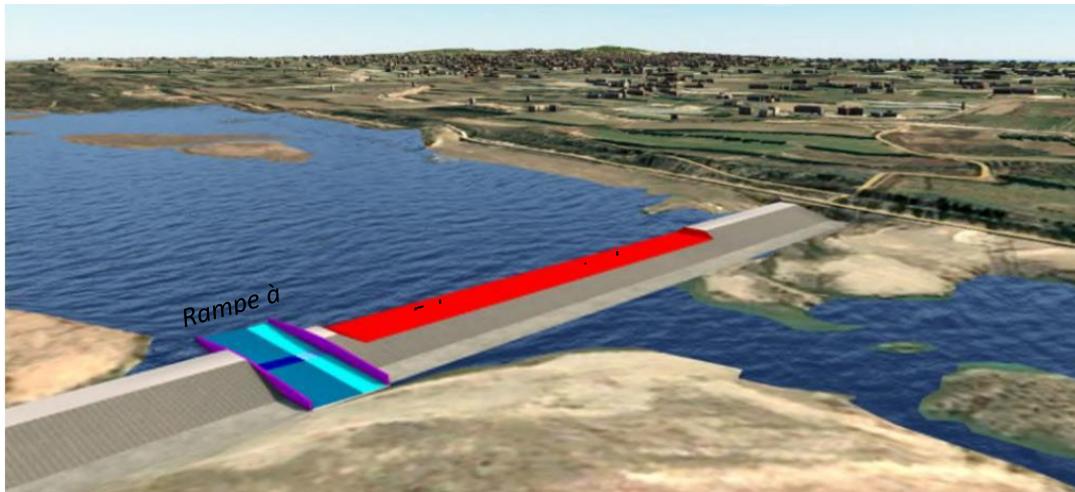


Figure 3 : Schéma de *principe d'aménagement des seuils 68 et 67*

2.3. QUELQUES GRANDS CHIFFRES SUR LES TRAVAUX

Le chantier mené sur les seuils va représenter :

- 40 000 m³ de déblais
- 23 000 m³ d'enrochements à déposer
- 40 000 m³ d'enrochements à poser
- 390 ml de palplanches (670 tonnes) à battre
- 2 rampes (21m x 60m et 21m x 76m), 1230 macro-rugosités en béton avec chemisage métallique, 2000 m³ de béton

Le montant du marché de travaux est de 6.6 millions d'euros HT. Le financement est assuré par : le fonds FEDER opéré par la région Sud (30%), l'Agence de l'eau (45%), les conseils départementaux des Bouches du Rhône (2.5%) et du Vaucluse (2.5%), le SMAVD (20%).

Le chantier a été confié au groupement d'entreprises de travaux : Spie Batignolles Valérian / Berthouly Travaux Publics / DFC Battage.

2.4. UN CHANTIER PHARAONIQUE PREVU SUR 2 ANS DE REALISATION

Ce chantier s'insère dans un champ de contraintes extrêmement dense. Alors que les débits dans la rivière comme les enjeux environnementaux interdisent tous travaux au printemps, les interventions ne peuvent débuter qu'à partir de juillet. Dès la mi-septembre, les niveaux d'eau dans la rivière peuvent brutalement augmenter du fait de la production d'hydro-électricité par EDF mais également en cas de crue. C'est ainsi que le projet ne dispose que de 2 mois par an de la mi-juillet à la mi-septembre pour se réaliser.



Figure 4 : Photo du seuil 68 au printemps 2024 avant les travaux

Le SMAVD et son maître d'œuvre ont ainsi imposé aux entreprises un calendrier très serré sur deux années consécutives.

- **Lors de la première année (été 2024)**, le chantier s'est focalisé sur :
 - Les lourds terrassements sur les seuils 68 et 67 (abaissement des seuils dans les échancrures, reprises des parties fixes des seuils, constitution du sabot en enrochements au pied du seuil 68),
 - L'installation des enceintes en palplanches des futures passes à poissons des seuils 68 et 67,
 - La réhabilitation de la rivière de contournement du seuil 66.
- **La seconde année (été 2025)** permettra de réaliser les travaux de génie civil à l'intérieur des enceintes en palplanches des seuils 68 et 67 : aménagement des rampes piscicoles, pose des rugosités de fond, travaux de finition. (*Remarque : aucun abaissement des seuils n'est prévu sur cette phase, les arasements partiels à l'intérieur des échancrures ayant été réalisés en 2024*).

2.5. RETOUR SUR LA PREMIERE ANNEE DE CHANTIER, A L'ETE 2024

Les travaux prévus pour l'été 2024 ont pu être intégralement réalisés. Le démarrage du chantier prévu initialement au 15 juillet a dû être décalé d'une semaine au lundi 22 juillet, en raison de débits encore soutenus en Durance, gonflés par les restitutions de EDF à Mallemort. La situation singulière de ce démarrage de chantier, dans un contexte de débits importants constatés durant tout le printemps, est explicitée plus en détail dans la suite du rapport.

Un résumé en images des temps fort du chantier 2024 est présenté dans la figure page suivante.

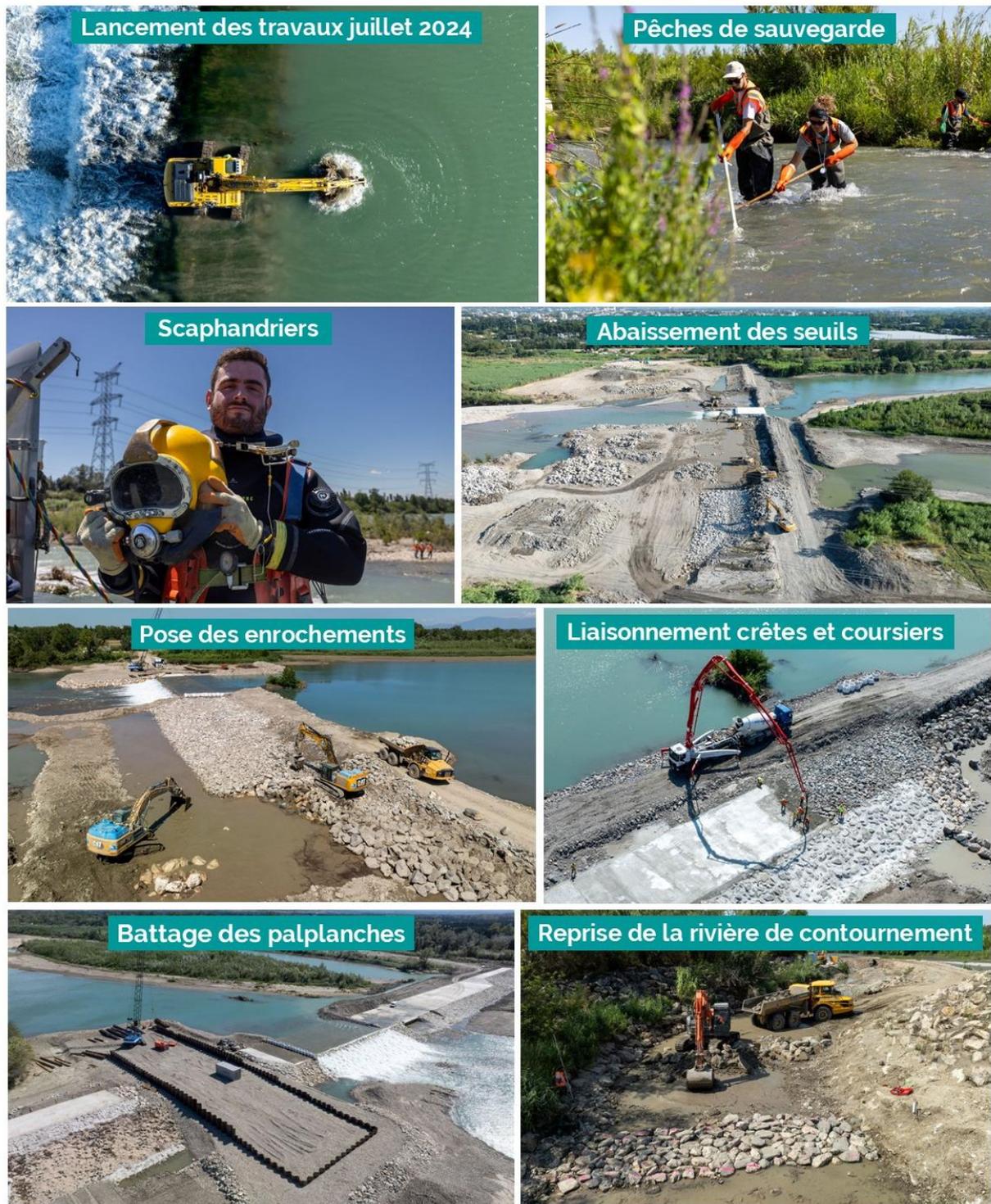


Figure 5 : Les temps forts du chantier 2024 en images

Ci-dessous est présenté le planning résumé de réalisation des travaux 2024, au réel.

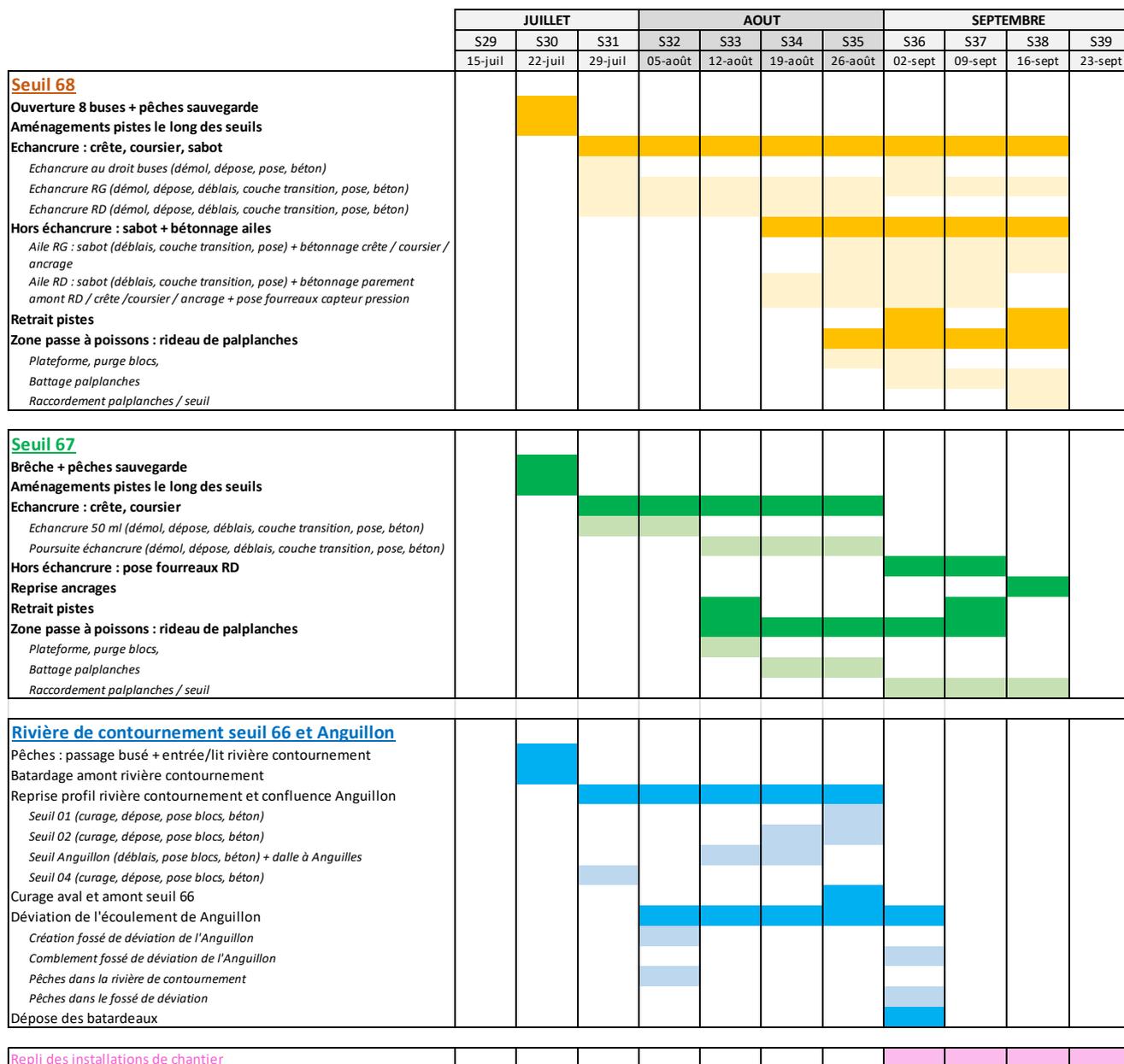


Figure 6 : Planning résumé de réalisation des travaux lors de l'été 2024

3. Les enjeux autour de la nappe

3.1. LE ROLE DES SEUILS ET LE CHOIX DE L'AMENAGEMENT

Les seuils 68 et 67 ont historiquement été réalisés dans l'objectif d'atténuer l'incidence des prélèvements de graviers du lit de la Durance sur le drainage de la nappe phréatique et la stabilité des rives (l'exploitation a eu lieu jusqu'en 1998). En effet, en tenant les lignes d'eau de la Durance, les seuils participent au maintien du niveau de la nappe. Un abaissement des seuils et donc des lignes d'eau en Durance peut avoir un effet sur la nappe qui s'atténue progressivement quand on s'éloigne de la rivière.

Le seuil 66 a lui été construit afin de soutenir la berge rive droite dans le cadre de la construction du remblai LGV. Sur ce seuil il n'est pas prévu d'abaissement dans le cadre de l'opération.

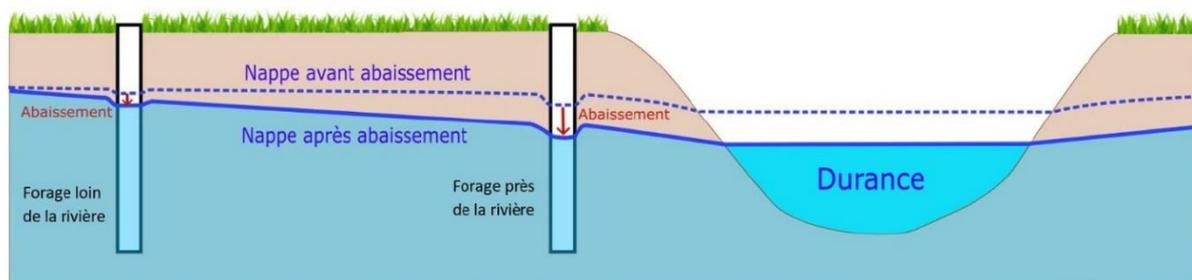


Figure 7 : Représentation simplifiée de l'effet de l'abaissement des seuils sur la nappe à proximité et sur les forages plus ou moins proches de la Durance

Ainsi l'aménagement des seuils pour les équiper de passes à poisson n'est envisageable que dans des conditions où cela ne menace pas les usages de l'eau souterraine sur les communes en bord de Durance (notamment des usages stratégiques comme l'approvisionnement en eau potable des villes d'Avignon et de Châteaurenard). La conception est donc complexe car elle touche à de nombreux sujets qui sont en interrelation : efficacité piscicole, maîtrise du risque sur la nappe et ses usages, réduction du risque de divagation de la Durance et d'érosion, maîtrise du risque d'inondation et maintien de bonnes conditions d'écoulement, prise en compte du fonctionnement morpho-sédimentaire, limitation de l'impact environnemental, recherche d'une efficacité en termes d'investissement public.

Lors des études préparatoires du projet, différentes solutions d'aménagement, impliquant potentiellement des abaissements des seuils existants ou leur arasement complet ont été étudiées et comparées. Pour évaluer leur effet sur la nappe, un projet de recherche a été mené de 2016 à 2020 par une association entre HYDROFIS, l'université de Montpellier et le SMAVD, sur le fonctionnement de la nappe et sa dynamique, ainsi que sur ses usages. Il a été identifié que le scénario d'abaissement partiel et maîtrisé des crêtes du seuil 68 de -2m et du seuil 67 de -1m était le scénario à privilégier, couplé à l'aménagement de rampes à macro-rugosités. Ce scénario d'aménagement permet à la fois de satisfaire l'objectif piscicole tout en assurant la maîtrise des autres effets de l'aménagement sur la rivière et son environnement, et sur la nappe et ses usages.

3.2. LES EFFETS ATTENDUS DE L'AMENAGEMENT SUR LA NAPPE ET SES USAGES

3.2.1. Les effets attendus sur le niveau de la nappe

Dans le scénario d'abaissement retenu pour les seuils 68 et 67, l'effet attendu des travaux sur les niveaux de nappe avait été envisagé à l'aide de modélisations hydrodynamiques. Ces modélisations avaient permis de retenir les estimations d'impacts suivants :

- **Après aménagement, en phase d'exploitation des ouvrages : un risque d'abaissement piézométrique définitif de l'ordre de 30 cm, sur une aire de 4 km² (cf. carte ci-dessous) ;**

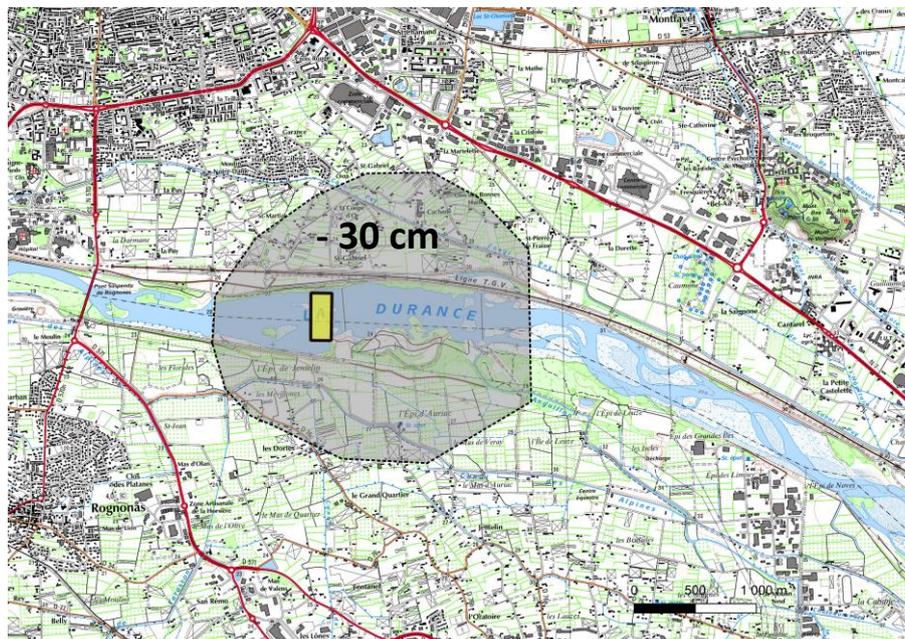


Figure 8 : Impact théorique supposé des aménagements après travaux.

- **En phase temporaire pendant les travaux d'abaissement des seuils (été 2024),**
 - Dans une projection très pessimiste du déroulement des travaux : les niveaux piézométriques pourraient être abaissés d'environ -100 cm, - 60 cm ou -30 cm suivant la zone considérée (cf. carte ci-dessous). Ces abaissements supplémentaires par rapport à la situation définitive post-travaux découlent de l'hypothèse que pendant le chantier les entreprises pourraient avoir besoin temporairement d'abaisser le niveau de la Durance plus bas que le niveau des seuils dans leur configuration définitive.

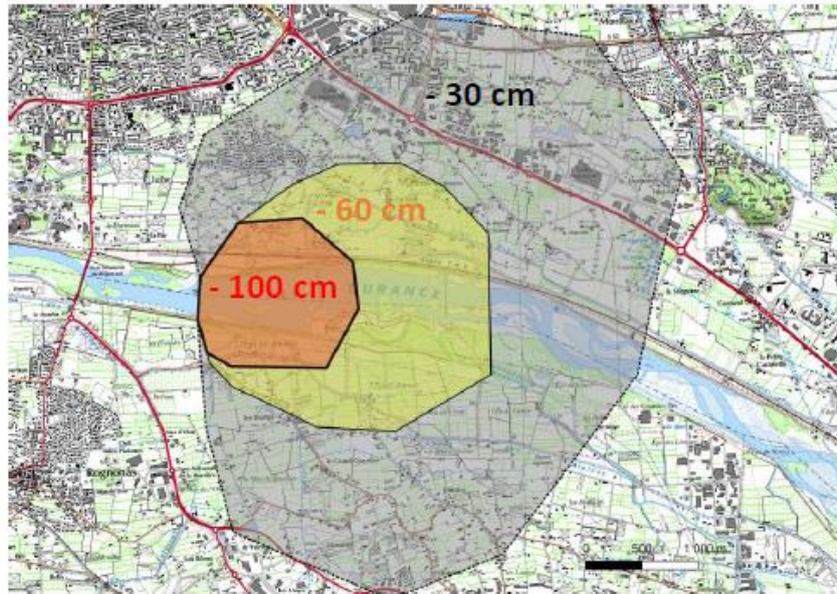


Figure 9 : Impact théorique supposé des aménagements pendant travaux.

- Dans une vision moins pessimiste, les niveaux d'abaissement pendant travaux seraient proches de ceux de la phase post-aménagement, c'est-à-dire -30 cm sur une zone d'impact réduite.

3.2.2. Les effets attendus sur les usages

- Le programme de recherche mené sur la nappe (2016-2021) a conclu que **l'aménagement des seuils serait sans impact sur les conditions d'exploitation des forages d'eau potable de la ville d'Avignon et de la communauté de commune Terres de Provence. De plus les travaux sont peu susceptibles d'affecter les forages domestiques et agricoles proches des seuils.**
- **Une étude complémentaire de la vulnérabilité de ces forages agricoles et domestiques a été menée en 2022-2023 par HYDROFIS. Elle concluait qu'en effet les niveaux projetés d'abaissement de la nappe (avant et après travaux) seront globalement bien supportés par ces forages (majoritairement équipés de pompes à aspiration), avec une vigilance sur certains ouvrages en fonction de la profondeur de nappe.** Pour les forages équipés de pompes à aspiration la profondeur du toit de la nappe est le paramètre fondamental à surveiller.

Cette étude aura par ailleurs permis au SMAVD de constituer une base de données exhaustive des forages agricoles (qui sont des ouvrages à potentiel fort enjeu économique), et d'établir un recensement indirect des forages domestiques potentiels

3.3. LES ENGAGEMENTS PRIS PAR LE SMAVD SUR LA NAPPE

Conscient de l'enjeu représenté par la nappe, le SMAVD s'est engagé à couvrir le risque résiduel par une procédure adaptée, consistant en :

- **La surveillance permanente des niveaux de nappe** sur le réseau de suivi piézométrique du SMAVD ;
- **L'analyse régulière des variations de la nappe au cours du chantier**, pour permettre : de comprendre son comportement, d'anticiper son évolution, de déterminer l'effet des travaux, de surveiller l'atteinte de niveaux de vigilance avant une éventuelle mise en tension d'usages, etc.
- **La mise en place d'une communication régulière sur l'état de la nappe au cours du chantier**, avec notamment la production de bulletins de suivi de la nappe pendant les travaux (8 réalisés en 2024), et d'un rapport bilan en fin de travaux (le présent document). Ces documents sont tous consultables sur la page internet du projet, et sont aussi transmis aux collectivités concernées via une liste de diffusion mail.
- **Le suivi des usages préleveurs avec :**
 - **La mise en place d'une procédure de remontée de témoignage ou de plainte**, avec différents canaux, notamment via un formulaire de contact mail sur la page internet du projet (avec renvoi automatique vers les intervenants SMAVD).
 - **La mise en astreinte du SMAVD, du maître d'œuvre et du groupement d'entreprises** pour répondre aux éventuelles sollicitations les week-ends, mener les diagnostics d'ouvrages nécessaires et éventuellement intervenir.
 - **La possibilité de mener des diagnostics fonctionnels sur les forages et leur installation de pompage**, soit parce que les niveaux piézométriques font entrevoir des conditions de prélèvement très dégradées, soit parce qu'un témoignage d'utilisateur fait peser un doute quant à une possible défaillance d'un forage.

Le diagnostic s'attache dans un premier temps à mettre en relation les éléments communiqués par l'utilisateur avec l'état de la nappe, et à avec l'impact estimé des travaux à date au lieu du forage. Suivant les conclusions de cette première analyse, un diagnostic sur site de l'installation et des forages peut être déclenché par le SMAVD s'il y a une probabilité que les travaux soient à l'origine du dysfonctionnement ou qu'il reste un doute à lever. Ce diagnostic de l'ouvrage est mené par des entreprises spécialisées : le bureau d'étude SRIGC (également maître d'œuvre des travaux) et l'entreprise Durance Forages active sur le secteur.

- **La possibilité de mettre en œuvre des moyens de remédiation pour intervenir sur les forages qui seraient affectés du fait des travaux sur les seuils.** Ces actions de remédiation sont alors réalisées par les entreprises des travaux, pour le compte du SMAVD dans le cadre du marché de travaux. En effet, le marché prévoit la fourniture de différentes prestations, pour des mesures de remédiation temporaire ou pérenne, avec des **délais plafonds d'intervention** courts (cf. tableau suivant) pour permettre que la mesure soit mise en œuvre aussi rapidement que possible.

N° prix BPU	Description prix	Délai plafond de réalisation après commande par le SMAVD
Mesures temporaires	Apport externe temporaire d'eau de qualité alimentaire par camion-citerne	24h
	Location et installation d'une cuve ACS de stockage d'eau alimentaire et raccordement au réseau domestique	24h
	Location et installation d'une pompe à aspiration ou immergée sur un forage (3-30-60-150 m ³ /h)	48h
	Location et installation d'un groupe électrogène sur un forage	48h
Mesures pérennes	Acquisition et installation d'une pompe immergée de 3 m ³ /h dans un forage	1 semaine
	Acquisition et installation d'une pompe immergée de 3-30-60-150 m ³ /h dans un forage	1-2 semaines suivant les pompes
	Création d'un nouveau forage	1 semaine

Il est à noter que pour garantir ces délais très contraints, le groupement d'entreprise a pré-mobilisé un certain nombre de matériels de mesures temporaires, notamment des pompes, le temps du chantier.

L'identification de ces mesures a été réalisée de manière proactive par le SMAVD, au cours de la procédure réglementaire et avant même l'obtention de l'autorisation du projet. Leur contenu a été repris dans l'arrêté inter-préfectoral d'autorisation des travaux, dans les mesures d'accompagnement et de suivi prescrites.

Ces mesures ont été présentées à l'ensemble des acteurs institutionnels et partenaires du projet lors des réunions de comité technique avant travaux. Elles ont également été présentées aux associations locales et représentants d'usagers, aux collectivités, lors de la réunion d'information avant chantier tenue en ceinture verte d'Avignon le 16 mai 2024.

4. Le suivi piézométrique avant/pendant les travaux

4.1. LE RESEAU D'OBSERVATION DU SMAVD

Afin de pouvoir suivre les variations des niveaux de nappe de façon robuste, le SMAVD a mis en place un réseau de piézomètres équipés de capteurs de niveaux d'eau qui enregistrent au pas de temps horaire les variations piézométriques.

La figure ci-dessous en présente la localisation.

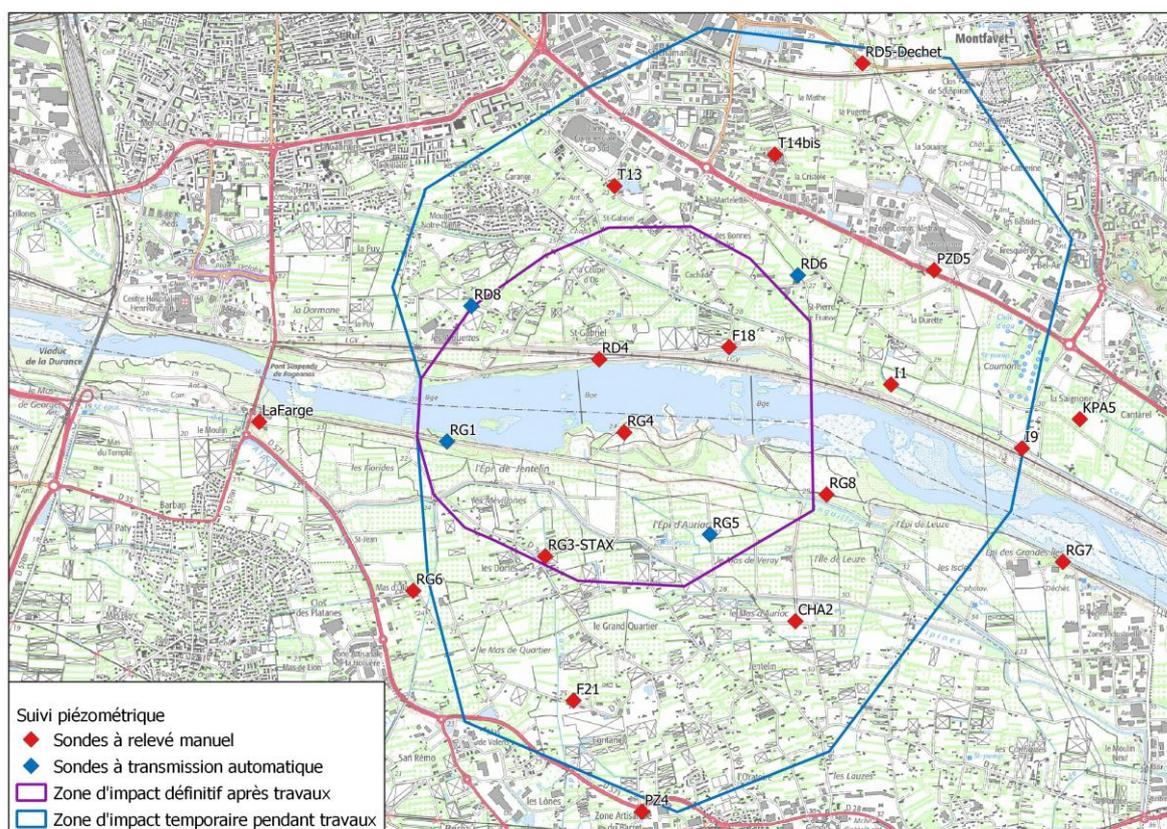


Figure 10 : Réseau de suivi piézométrique.

A noter que quatre des capteurs installés sont des sondes capables de télétransmission, ce qui a permis une surveillance de la nappe en quasi-temps réel durant la période de travaux, depuis une interface WEB. Il a été choisi de placer ces équipements sur les quatre piézomètres qui encadrent la zone travaux pour anticiper toute évolution « anormale ». Pour les autres capteurs, les données enregistrées ne peuvent être exploitées qu'après une relève sur le terrain.

Les piézomètres équipés de capteurs sont répartis sur toute la plaine alluviale, depuis la proximité de la zone travaux jusqu'au-delà des limites supposées de l'influence des travaux, déduites des travaux de modélisation.

4.2. LE MODE DE COLLECTE DES DONNEES

Afin d'optimiser le suivi de la nappe durant la période de travaux, il a été mis en place au cours de l'été 2024 une relève hebdomadaire des données acquises par le parc de capteurs.

Nous avons donc bénéficié d'un suivi en pseudo-temps réel sur quatre piézomètres sentinelles et d'une photographie hebdomadaire des variations de nappe sur l'ensemble de la zone.

A noter que les relèves des capteurs étaient systématiquement accompagnées d'une mesure à la sonde manuelle pour palier à toute défaillance potentielle du capteur (pertes de données) et pour corriger d'éventuels phénomènes de dérive.

4.3. PROTOCOLES D'INTERPRETATION DES NIVEAUX DE NAPPE

Les données collectées ont été systématiquement analysées avec deux objectifs :

- Suivre le niveau de la nappe en étant vigilant vis-à-vis des forages agricoles et domestiques, en usage en période estivale.
- Identifier l'impact des travaux sur la nappe.

Pour assurer les routines de surveillance et d'interprétation, les équipes du SMAVD mais aussi celle d'HYDROFIS/BRLI ont été mobilisées durant tout l'été avec une réunion de partage d'informations hebdomadaire, pour actualiser le protocole de caractérisation des impacts piézométriques.

4.3.1. Vigilance sur les ouvrages préleveurs

Les forages domestiques et agricoles susceptibles d'être impactés par une baisse de nappe ont été identifiés dans une étude antérieure (HYDROFIS, 2023).

Les classes de vigilance proposées lors de l'étude sur les enjeux liés à la baisse potentielle des niveaux de nappe (HYDROFIS, 2020) ont été reprises lors de l'interprétation des données ; ces classes sont exprimées en termes de profondeur du niveau de la nappe par rapport au sol :

- Prof. < -5 m : Situation idéale (fonctionnement nominal).
- 5 m < Prof. < 6 m : Vigilance (fonctionnement normalement non impacté ; impact mineur possible si systèmes mal dimensionnés).
- 6 m < Prof. < 7 m : Alerte (dysfonctionnements ponctuels possibles).
- 7 m > Prof. : Alerte renforcée (dysfonctionnements ponctuels probables).

Afin de suivre la baisse du niveau de nappe en période de travaux et de produire un avis motivé sur d'éventuels impacts piézométriques sur les forages agricoles et domestiques, plusieurs approches ont été combinées :

- Production systématique de cartes piézométriques « observées », c'est-à-dire représentation spatiale des niveaux de nappe. Cette spatialisation se fait par interpolation linéaire des niveaux mesurés dans chaque piézomètre au cours des campagnes de relevés piézométriques.
- Localisation des forages agricoles et individuels sur les cartes piézométriques, pour permettre le calcul des niveaux piézométriques supposés dans les ouvrages, puis l'estimation des profondeurs de nappe au regard des côtes sol des ouvrages.

Ces deux routines ont été appliquées durant tout l'été avec une fréquence hebdomadaire pendant la première partie du chantier, puis toutes les 2 semaines dans sa seconde partie alors que le chantier n'était plus générateur d'abaissement supplémentaire.

4.3.2. Caractérisation de l'impact des travaux sur la nappe

L'estimation de la baisse causée par les travaux a été réalisée en produisant systématiquement pour chaque chronique piézométrique une estimation de la piézométrie non influencée par les travaux, qui a été comparée avec la carte piézométrique issue des relevés. La méthode de détermination de la situation non influencée est détaillée en annexe du rapport.

La comparaison par soustraction de la situation théorique dite « sans travaux » ou « non influencée par les travaux », avec celle « réellement observée » (ou situation « influencée par les travaux »), permet de générer des cartes d'impact à l'échelle du secteur d'étude.

Le protocole de traitement des données a respecté le schéma suivant :

- Détermination de lois de décroissance piézométrique individuellement pour chaque piézomètre en régime « non influencé » ;
- Réalisation d'une campagne piézométrique : relève de chaque piézomètre, et extrapolation de la carte piézométrique « réelle » à la date D (situation « influencée par les travaux ») ;
- Comparaison des deux situations piézométriques pour générer une carte des impacts à l'échelle du périmètre d'étude.

5. L'évolution de la nappe au cours de l'été 2024

5.1. UNE PREMIERE ANALYSE DES NIVEAUX D'EAU ET DEBITS EN DURANCE

Avant de proposer une quantification des impacts piézométriques des travaux réalisés sur les seuils 68 et 67, commençons par rappeler les conditions hydrométéorologiques et hydrologiques durant l'été 2024.

A partir du 15 juillet, on peut observer sur le graphe ci-dessous que le débit de la Durance va diminuer en deux temps : passage de 150 m³/s environ à 40 m³/s la semaine du 15 au 22 juillet. Puis baisse à environ 8 m³/s entre le 20 et le 25 juillet. Le débit restera alors à peu près constant jusqu'au 24 septembre.

A noter la présence de quelques coups d'eau susceptibles d'influencer la piézométrie en champ proche de la rivière : d'abord juste avant le début des travaux (19/07 et 22/07 qui correspondent à des arrêts/reprises de restitutions par EDF), puis mi-août (16/08, événement orageux), et début septembre (05/09, événement orageux).

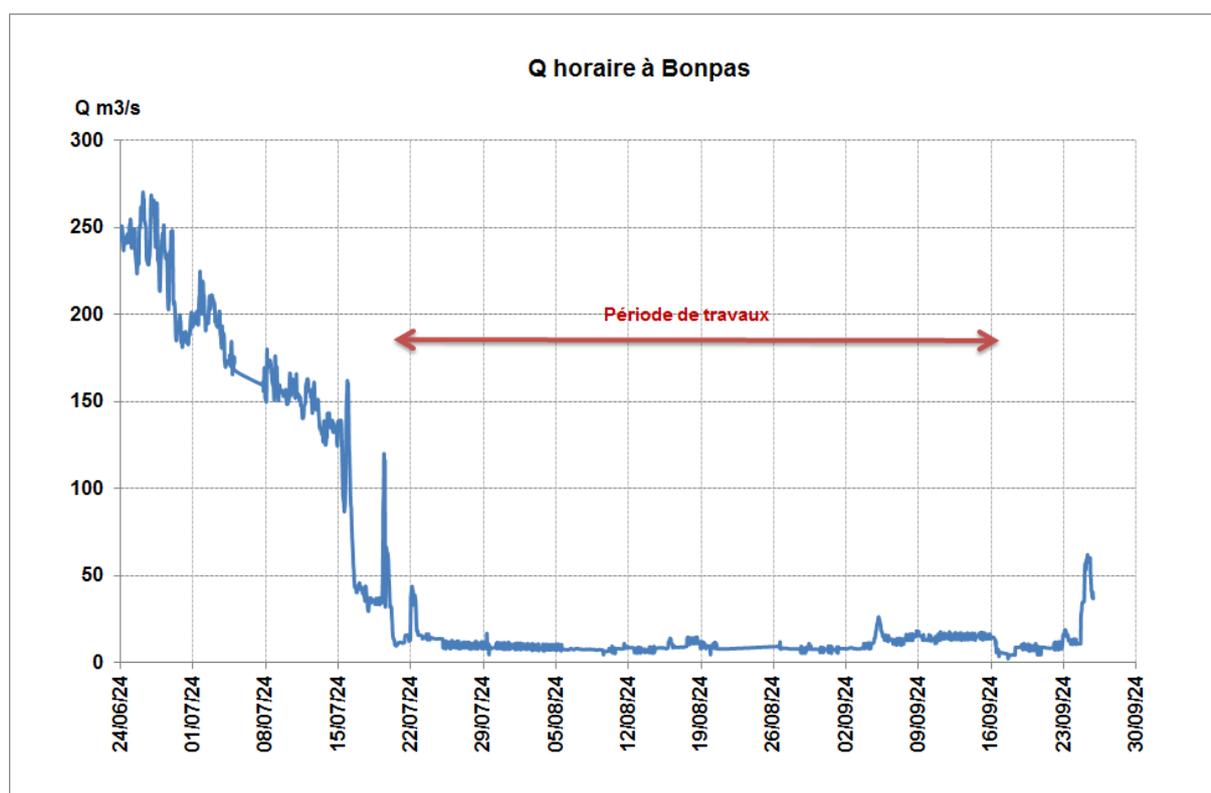


Figure 11 : Chronique des débits de la Durance durant les travaux

Durant tout l'été, les rares épisodes pluvieux sont trop faibles en cumul (< 15 mm) pour influencer la piézométrie. Il faut attendre le 23 septembre pour observer une pluie significative (37 mm).

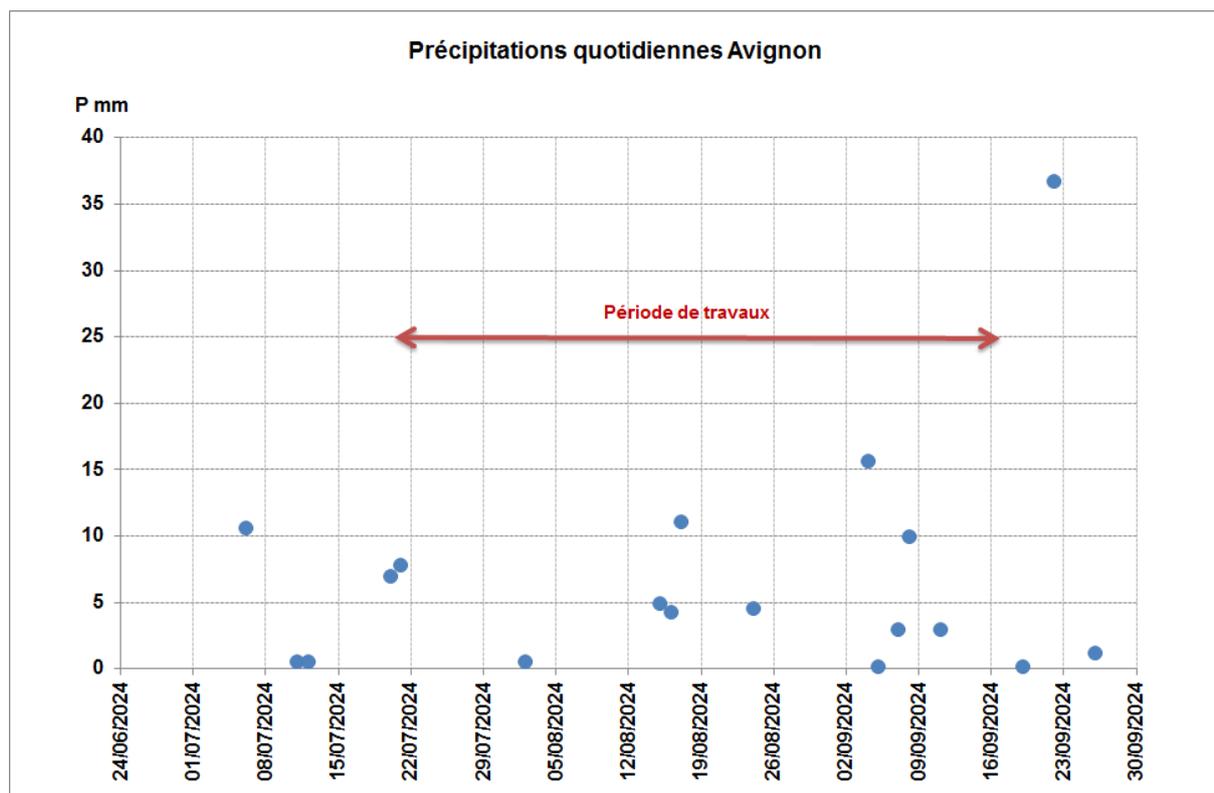


Figure 12 : Chronique des précipitations enregistrées à Avignon durant les travaux.

Ce que révèle le suivi des niveaux d'eau au droit des seuils :

Sur la période de chantier il a été demandé aux entreprises de travaux de réaliser des mesures à minima journalières des niveaux d'eau dans les souilles en amont des seuils 68 et 67, et de respecter des niveaux minimums à ne pas sous passer (22.10 mNGF en amont du seuil 67 et 19.15 m.NGF en amont du seuil 67). En effet, la conduite du chantier nécessite l'abaissement du niveau de la Durance au niveau de ces deux seuils pour réaliser les opérations de déconstruction et construction, et pour réaliser le battage des palplanches. Pour autant, il était important que l'abaissement de la Durance soit maîtrisé pour maintenir un niveau de nappe satisfaisant au cours de l'été, compte tenu des usages de l'eau souterraine. Ainsi, le phasage et la procédure de déconstruction ont été préparés de manière à limiter au maximum l'abaissement, et le suivi imposé aux entreprises a permis de vérifier régulièrement que les contraintes de niveau minimum étaient respectées.

Dans le graphique suivant, sont présentées deux chroniques de mesure des niveaux juste en amont du seuil 68 (au droit des buses centrales) et juste en amont du seuil 67 (en berge rive gauche). L'évolution des niveaux d'eau témoigne de plusieurs effets :

- Ceux de l'hydrologie de la Durance sur la période, tel que présenté précédemment, notamment des quelques coups d'eau survenus sur la période mais aussi des petites variations de débits qui peuvent sensiblement modifier les niveaux mesurés
- Ceux résultant des travaux menés.
- Ceux résultant de la qualité de la mesure réalisée. Ces chroniques ont été obtenues par mesure au niveau optique par un expert géomètre de l'entreprise, avec pour principal enjeu de surveiller l'atteinte des seuils minimum. Il ne s'agit pas d'une mesure de niveau aussi standardisée, régulière et précise que ce que fournirait une station limnimétrique. Pour autant ces données détiennent une information intéressante, et sont donc présentées ici après avoir fait l'objet d'un post-traitement (notamment un lissage des courbes).

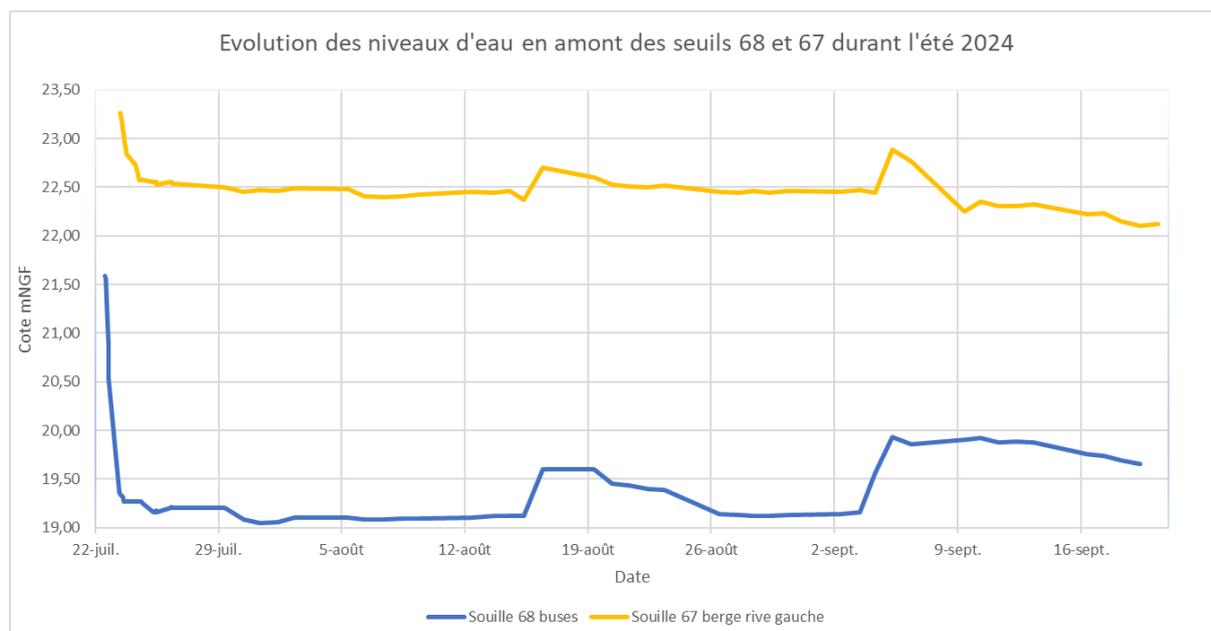


Figure 13 : Evolution des niveaux d'eau en Durance au cours du chantier 2024

Pour le seuil 68 (courbe bleue) on observe que :

- Le principal abaissement (-2.5m environ) se concentre sur la période du 22 au 30/07, avec l'essentiel de la vidange qui se déroule sur les premières 24h entre le 22 et le 23/07. Cette vidange est consécutive à l'ouverture des 8 buses centrales du seuil réalisée le lundi 22/07 entre 14h45 et 15h30, et qui marque le début du chantier.
- Le niveau d'eau apparaît réhaussé du 16 au 19/08, ce qui semble être la conséquence du petit coup d'eau en rivière intervenu en rivière le 16/08 suite un évènement orageux. Le niveau redescend ensuite avant de se stabiliser à partir du 26/08 autour de 19.2 mNGF comme avant l'épisode.
- Le niveau est à nouveau réhaussé à partir du 03 septembre. Ceci apparaît être la résultante du coup d'eau intervenu la nuit du 04 au 05 septembre, mais également de l'opération de déviation de la Durance depuis les buses du seuil (qui sont alors fermées et batardées) vers l'échancrure rive droite terminée menée entre le 03 et le 04 septembre. En effet, la fermeture des buses va permettre de travailler dans ce secteur du seuil, avec pour effet de rehausser la ligne d'eau, ce qui est constaté sur la chronique avec un niveau d'eau maintenu réhaussé après le coup d'eau passé.
- Le niveau d'eau redescend ensuite après le 16 septembre, ce qui apparaît correspondre à la remise en eau de l'intégralité de l'échancrure (après dépose de la piste batardeau en amont) à la fin du chantier.
- Entre le début et la fin des travaux, le niveau d'eau aura été abaissé environ de 2m. Sur la période l'abaissement maximum a été de 2.5m ce qui est conforme au prévisionnel.

Pour le seuil 67 (courbe orange) :

- Un premier abaissement (-60 cm environ) a lieu entre le 23 et le 24/07. Cet abaissement est consécutif à la création d'une brèche en rive gauche du seuil sur 20ml, ce qui engage le début de la vidange de la souille et le démarrage des travaux sur ce seuil.
- Le niveau d'eau apparaît réhaussé du 16 au 19/08, ce qui semble être la conséquence du petit coup d'eau en rivière intervenu en rivière le 16/08 suite un évènement orageux. Le

niveau après cet épisode se restabilise à environ 22.5 mNGF. A noter qu'avant cet épisode orageux, dans le cadre des travaux il avait été opéré le lundi 12/08 un dévoiement de la Durance depuis la brèche temporaire préalablement créée vers la première portion d'échancrure terminée sur 50 ml. Cette opération ne semble pas avoir significativement affecté les niveaux d'eau.

- Le niveau d'eau est à nouveau réhaussé entre le 04 et le 06/09, ce qui semble être la conséquence du coup d'eau en rivière dont la pointe est intervenue la nuit du 04 au 05 septembre (épisode orageux).
- Le niveau d'eau décroît à partir du 09 septembre, d'environ 40 cm supplémentaires ce qui est lié à la fin des travaux sur l'échancrure pour ce seuil. En effet, entre le lundi 09 et le mercredi 11 septembre 2024, les entreprises ont procédé à la dépose des pistes en amont de l'échancrure (qui faisaient office de batardeau) et à la mise en eau complète de l'échancrure.
- Entre le début des travaux et la fin des travaux, le niveau d'eau aura été abaissé de 1m environ. C'est également le niveau maximum d'abaissement survenu au cours de la période.

5.2. ANALYSE DES NIVEAUX DE NAPPE AU COURS DE L'ETE

Les graphes ci-dessous permettent de visualiser les variations piézométriques enregistrées durant l'été 2024 ; pour plus de lisibilité, ils sont regroupés en fonction de leur distance à la zone travaux (champ proche, champ moyen et champ lointain).

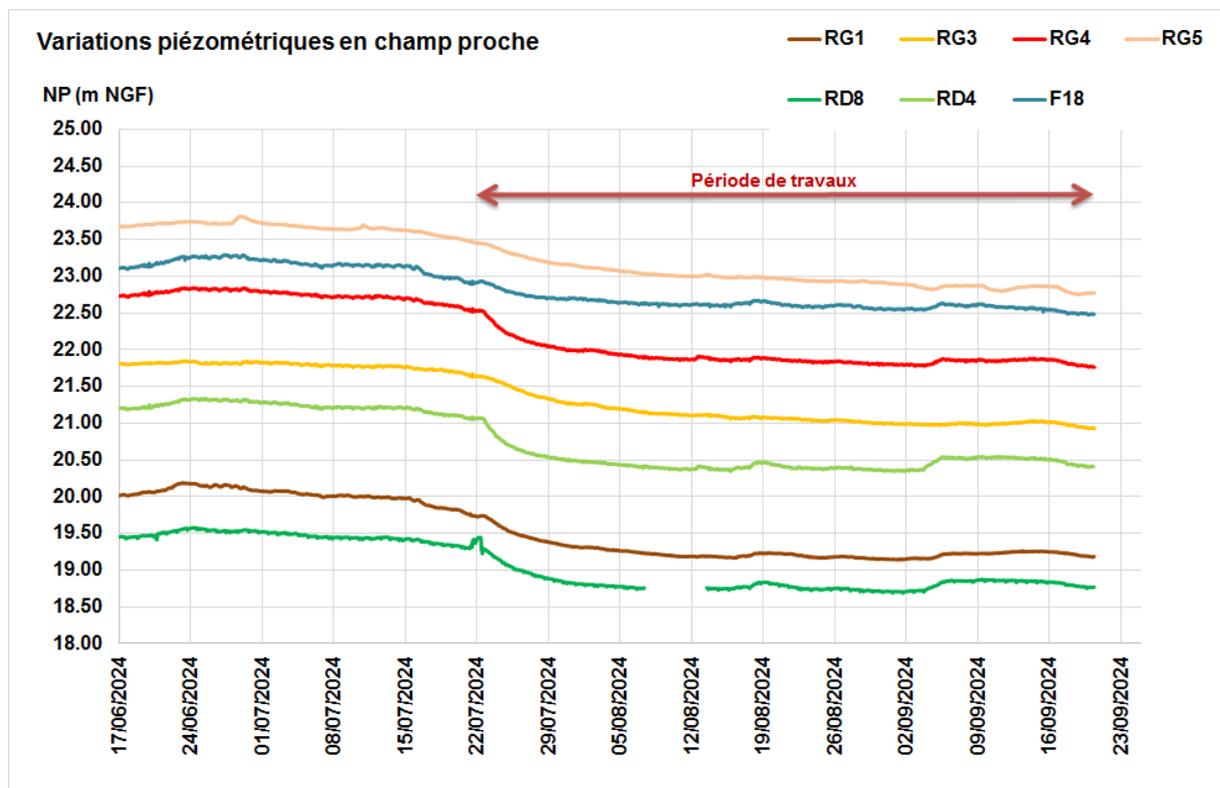


Figure 14 : Variations des niveaux de nappe durant les travaux (champ proche).

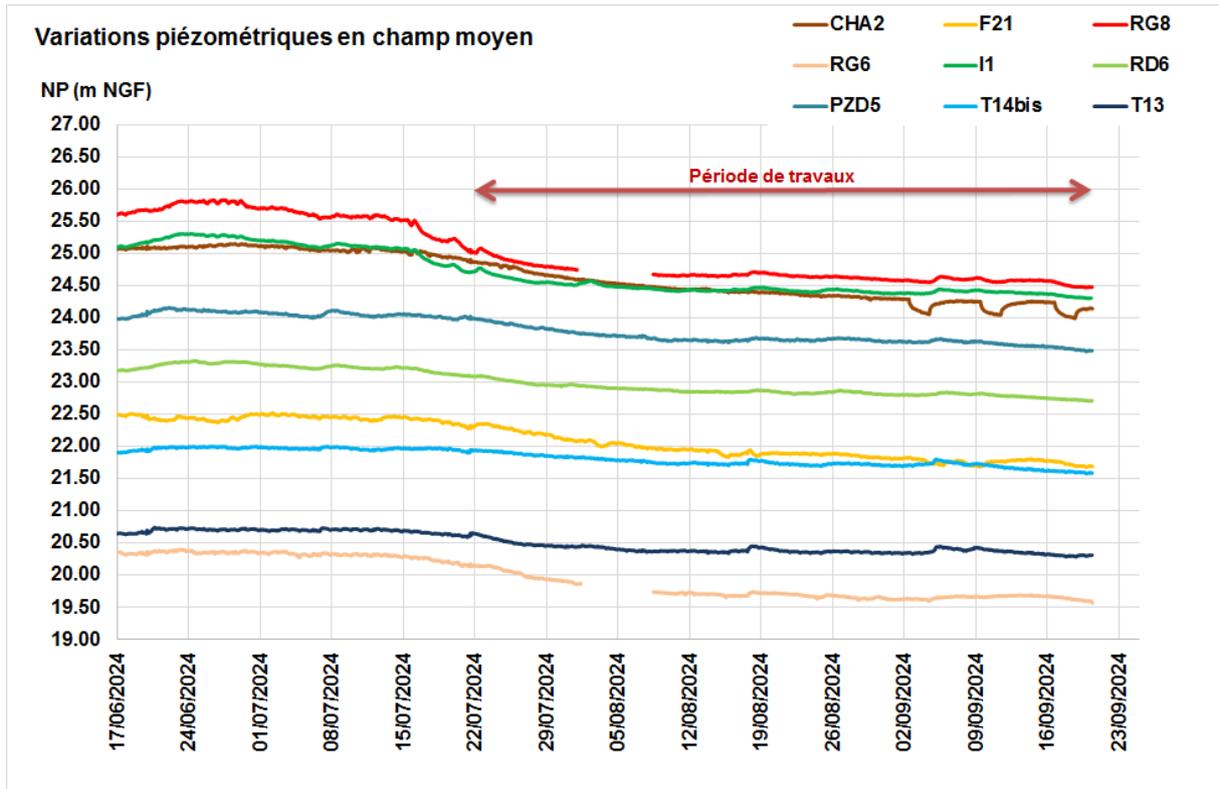


Figure 15 : Variation des niveaux de nappe durant les travaux (champ moyen).

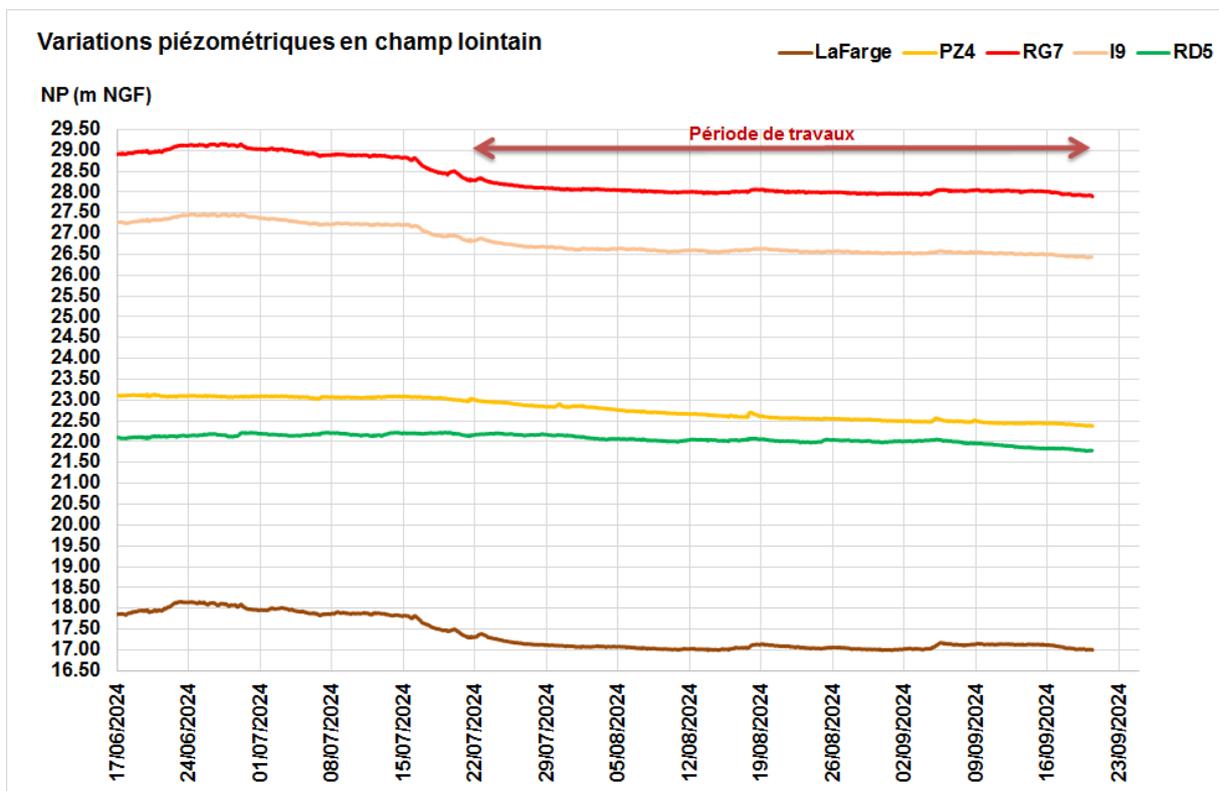


Figure 16 : Variation des niveaux de nappe durant les travaux (champ lointain).

- On peut observer sur ces chroniques de façon évidente l'influence des travaux sur les seuils sur les piézomètres en champ proche ; on observe en effet des gradients de baisse qui deviennent plus importants pendant la phase travaux, avec une rupture de pente bien observable entre le 22 et le 25 juillet. Cette influence est plus difficile à identifier sur les piézomètres en champ moyen, et est inexistante sur les piézomètres en champ lointain.

Ces considérations sont argumentées plus avant dans le rapport et une quantification des impacts est proposée.

- A noter des variations « atypiques » observées sur le CHA2. Il est situé à proximité du nouveau forage pour l'eau potable de la régie des eaux de Terre de Provence, destiné à se substituer au prélèvement du champ captant de l'Auriac-Lieuze. Ce nouveau forage a fait l'objet de manipulations variées durant tout l'été. Sur la chronique du CHA2 on observe nettement les rabattements provoqués par les essais de pompage menés sur ce forage en septembre, mais la courbe est aussi influencée en juillet et en août par les travaux de développement de l'ouvrage.

On peut également observer l'influence des tests hydrauliques réalisés sur ce nouveau forage eau potable sur les chroniques du F21, du RG5 et du RG8.

- Ces chroniques montrent aussi la forte influence du débit de la Durance sur les niveaux de nappe. L'influence est directe sur les piézomètres à proximité immédiate de la rivière en amont et en aval des souilles (Lafarge et RG7). On observe bien sur deux chroniques que toutes les variations de débit de la rivière se traduisent bien par des variations instantanées de niveau de nappe.

5.3. SUIVI D'UN EVENTUEL SOUS-PASSEMENT DES NIVEAUX DE VIGILANCE

Au regard des modalités d'exploitation de la nappe par les usages individuels et agricoles, très largement par le biais de pompes à aspiration, le niveau de vigilance (défaillance possible d'ouvrages mal dimensionnés) avait été établi pour une nappe s'abaissant à 5 m de profondeur par rapport au sol. Un niveau d'alerte (dysfonctionnements possibles) avait été établi à 6 m.

Des cartes de profondeur (cf. ci-dessous) ont été établies à chaque relève à partir des cartes piézométriques et du modèle numérique de terrain (MNT) local.

A noter que dans ces cartes, certaines zones apparaissent systématiquement en rouge/orange/jaune au droit d'infrastructures construites en surélévation par rapport au terrain naturel (ex : routes, digues). Compte tenu de la surélévation du terrain dans ces zones, la distance entre le sol et la nappe est ainsi artificiellement plus grande, mais pour autant la nappe n'est pas plus basse. Ces zones colorisées n'ont pas été corrigées dans l'image, mais il importe d'en donner la signification. Sur ces secteurs il n'y a pas de forage. Un seul forage domestique potentiel a vu un léger sous-passement du niveau de vigilance car l'habitation en question se situe sur un secteur réhaussé par rapport au terrain naturel proche.

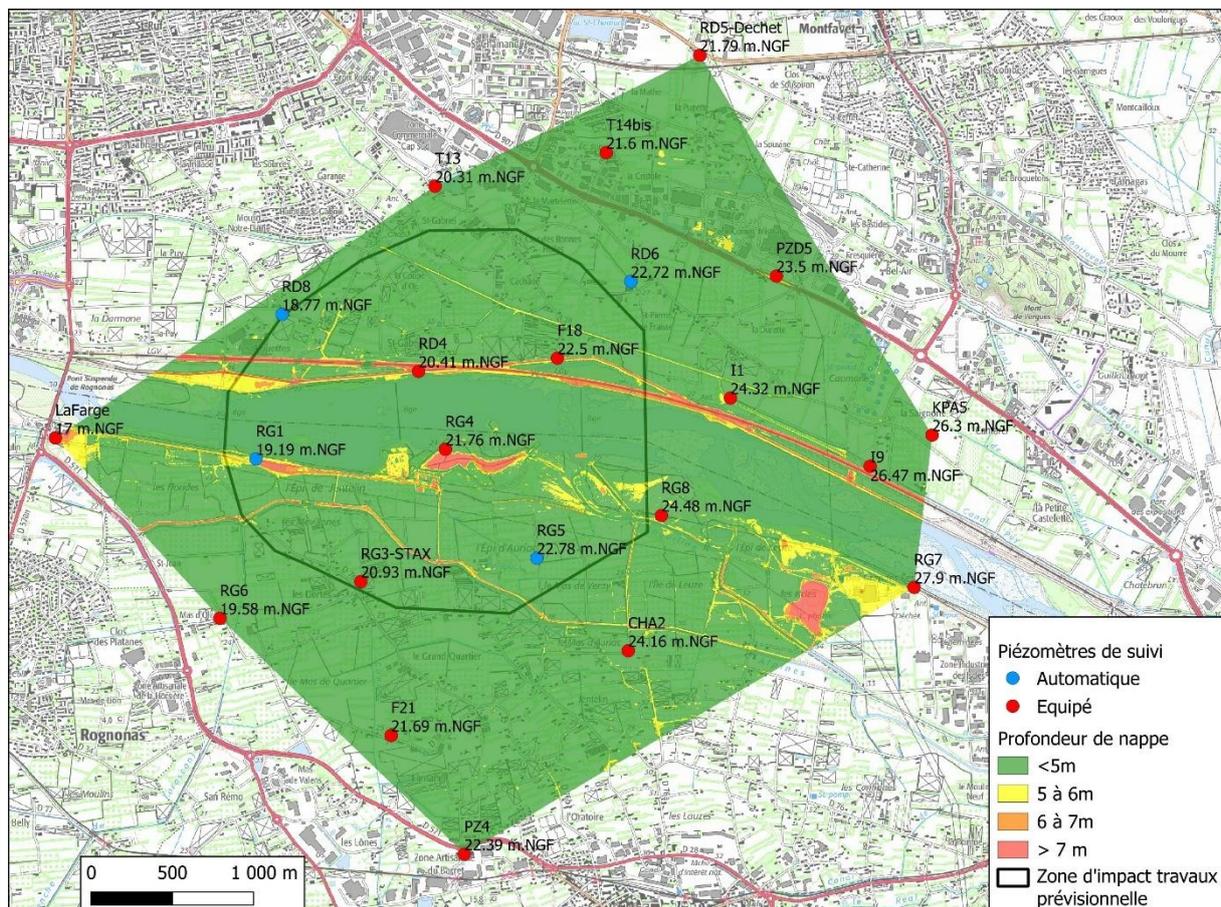


Figure 17: Carte de profondeur de la nappe post-travaux, au 20/09/2024.

5.4. BILAN DE L'IMPACT DES TRAVAUX SUR LA NAPPE LORS DE L'ÉTÉ 2024

5.4.1. Une nécessaire évolution de la méthode de calcul

Préalablement à la phase travaux, HYDROFIS avait été mobilisé pour réaliser une étude historique des données piézométriques dans le secteur des seuils (rapport édité en date du 17 avril 2024). Cette analyse avait permis de proposer un protocole de traitement des données piézométriques qui seront relevées pendant les travaux pour permettre de caractériser l'impact des travaux sur la piézométrie. En effet, pour être en mesure de caractériser l'impact des travaux sur la nappe, il faut être capable d'estimer quels auraient été les niveaux de nappe sans travaux (situation dite « non influencée par les travaux »).

Il avait été démontré qu'en période estivale, historiquement, le scénario le plus probable était celui d'une période sans pulse hydraulique significatif en Durance (la fin des restitutions a lieu habituellement fin mai à début juin), avec un niveau piézométrique maximum atteint début juillet, puis une lente descente des niveaux piézométriques de type logarithmique, à partir du 1^{er} juillet, liée à la baisse des volumes d'irrigation en plaine. Tout le protocole d'analyse des données était basé sur cette hypothèse.

A cause d'un premier semestre 2024 exceptionnel en termes de pluviométrie et de fonte du manteau neigeux accumulé dans les Alpes, EDF a exceptionnellement maintenu les restitutions durant tout le mois de juin jusqu'au 22 juillet. Il a donc fallu repenser le protocole d'interprétation des données du suivi piézométrique pour s'adapter à cette situation.

Il a en effet été nécessaire d'adapter le protocole d'interprétation des données de suivi de nappe, pour définir une situation non influencée. La méthode et ses résultats sont présentés en annexe du rapport. Dans un premier temps, cette méthode permet de proposer, piézomètre par piézomètre, une chronique de piézométrie « non influencée ». Le graphe ci-dessous permet d'illustrer le type de résultat obtenu sur un piézomètre.

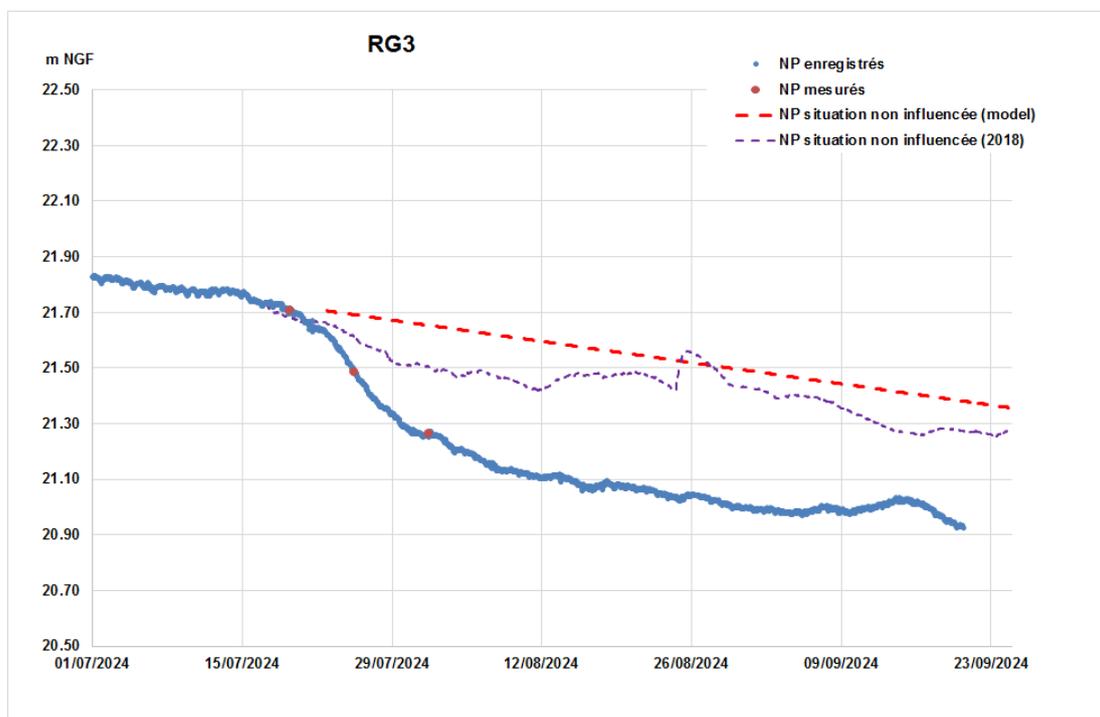


Figure 18 : Exemple de situations piézométriques observées durant les travaux.

Dans un second temps, à partir des impacts supposés des travaux (différence entre situation piézométrique observée et situation théorique non influencée), il est possible de calculer une carte des impacts des travaux sur la piézométrie de la nappe.

5.4.2. Des résultats conformes aux prévisions établies avant les travaux

Un résultat important est que l'impact constaté des travaux sur la nappe est très proche des estimations issues de la démarche de modélisation de 2020, tant dans son périmètre que dans l'ordre de grandeur des baisses piézométriques.

Détaillons :

- On observe des baisses d'environ 50 cm en bordure des seuils
- En champ proche (environ 600 m), la baisse liée aux travaux est comprise entre 50 et 30 cm. A noter une légère dissymétrie entre rive droite et rive gauche : la zone d'impact semble plus étendue du côté Châteaurenard que du côté d'Avignon.
- En champ lointain, les impacts sont tellement faibles (>10 cm) qu'ils sont difficiles à estimer, en particulier en rive droite, au regard des autres facteurs influençant la piézométrie. De plus, sur la rive gauche, les observations sont « polluées » par le développement puis les tests de pompage réalisés durant l'été sur le champ captant d'Auriac-Lieuze ; ces travaux ont généré un sur-rabattement important sur une grande surface de la nappe.

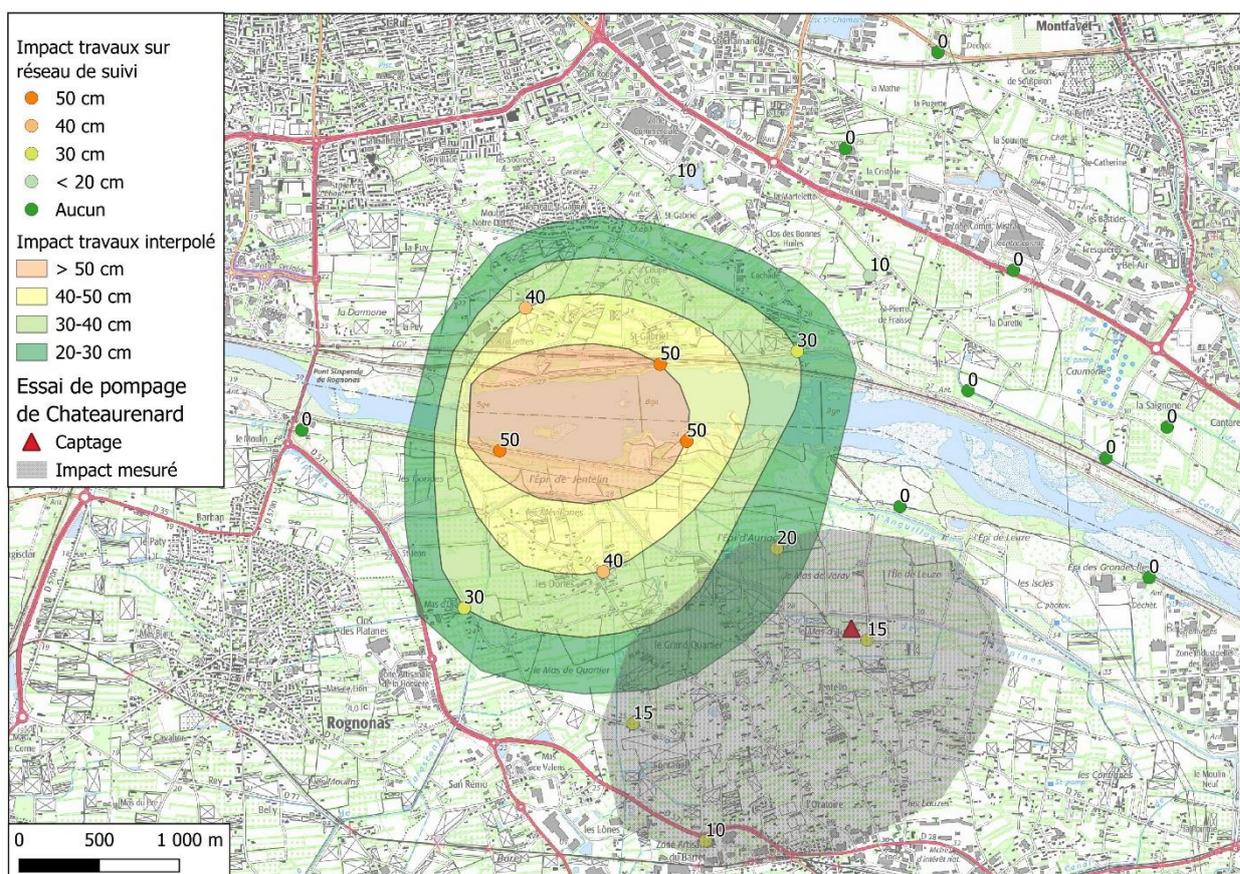


Figure 19 : Carte des impacts piézométriques observés au 20 septembre (fin des travaux).

6. Le suivi des usages au cours de l'été 2024

Les engagements pris par le SMAVD pour réaliser le suivi de la nappe et ses usages, et intervenir le cas échéant en cas d'impact avéré des travaux sur des usages préleveurs, a été présenté au paragraphe 3.3. Dans le présent chapitre nous revenons sur le suivi des usages au cours de l'été.

6.1. LOCALISATION DES FORAGES ET EVOLUTION DES NIVEAUX DE NAPPE

Suite aux études antérieures, le SMAVD dispose d'une base de données exhaustive des forages agricoles au-delà de la zone d'impact définitive supposée, et d'un recensement indirect des forages domestiques potentiels dans cette zone d'impact. Dans les cartes ci-dessous, qui figurent la profondeur du toit de la nappe au 19/07/2024 (juste avant les travaux) et au 20/09/2024 (fin du chantier), sont figurés ces forages. Le champ captant de la Saignonne est également indiqué, et apparaît en bordure du secteur suivi. De telles cartes piézométriques ont été réalisées régulièrement sur l'été.

Comme détaillé au paragraphe 5, une conclusion importante est que les niveaux piézométriques lors de l'été 2024 sont restés très confortables pour les usages, même dans le contexte du chantier. Sur les différentes cartes piézométriques produites sur la période on retrouve bien en effet des niveaux de nappe normaux, sans que l'on n'atteigne au droit des forages les niveaux de vigilance ou d'alerte prédéfinis.

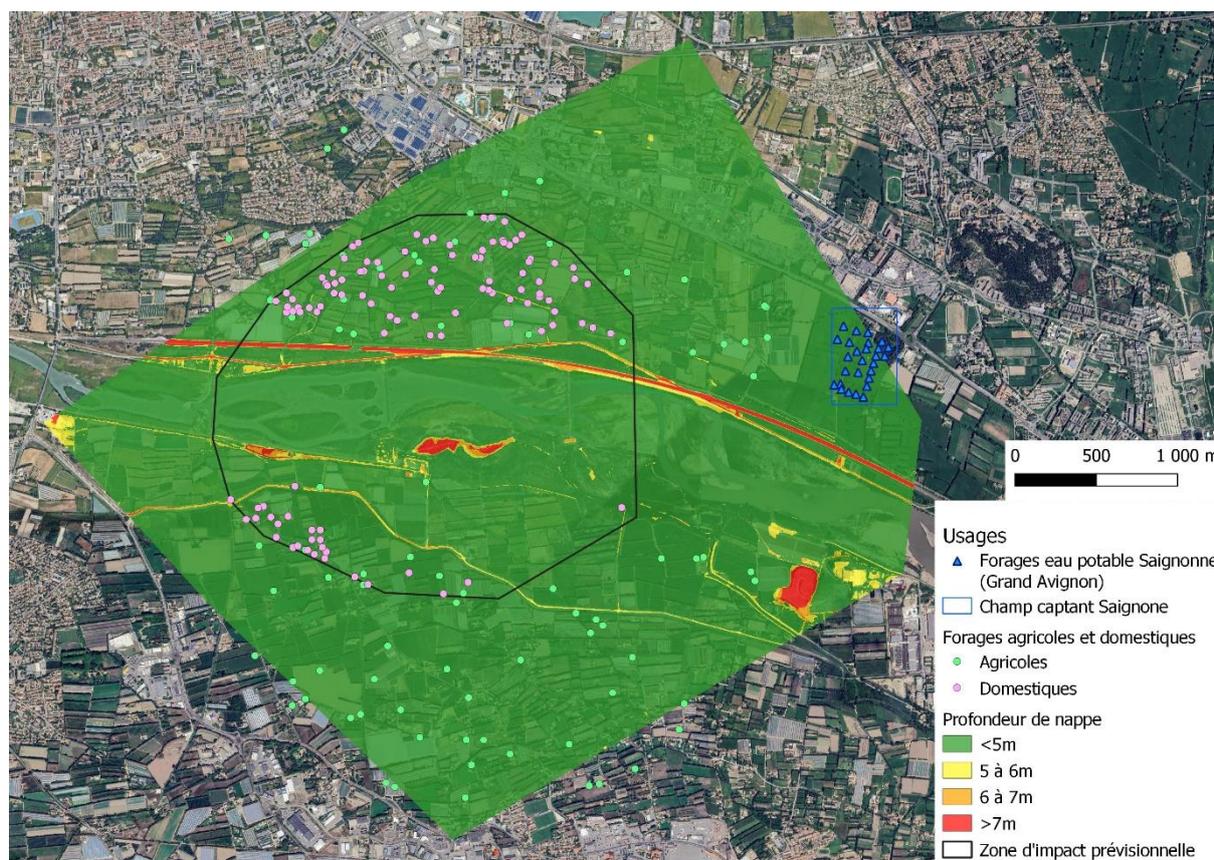


Figure 20 : Carte piézométrique au 19/07/2024 (avant travaux) et localisation des forages

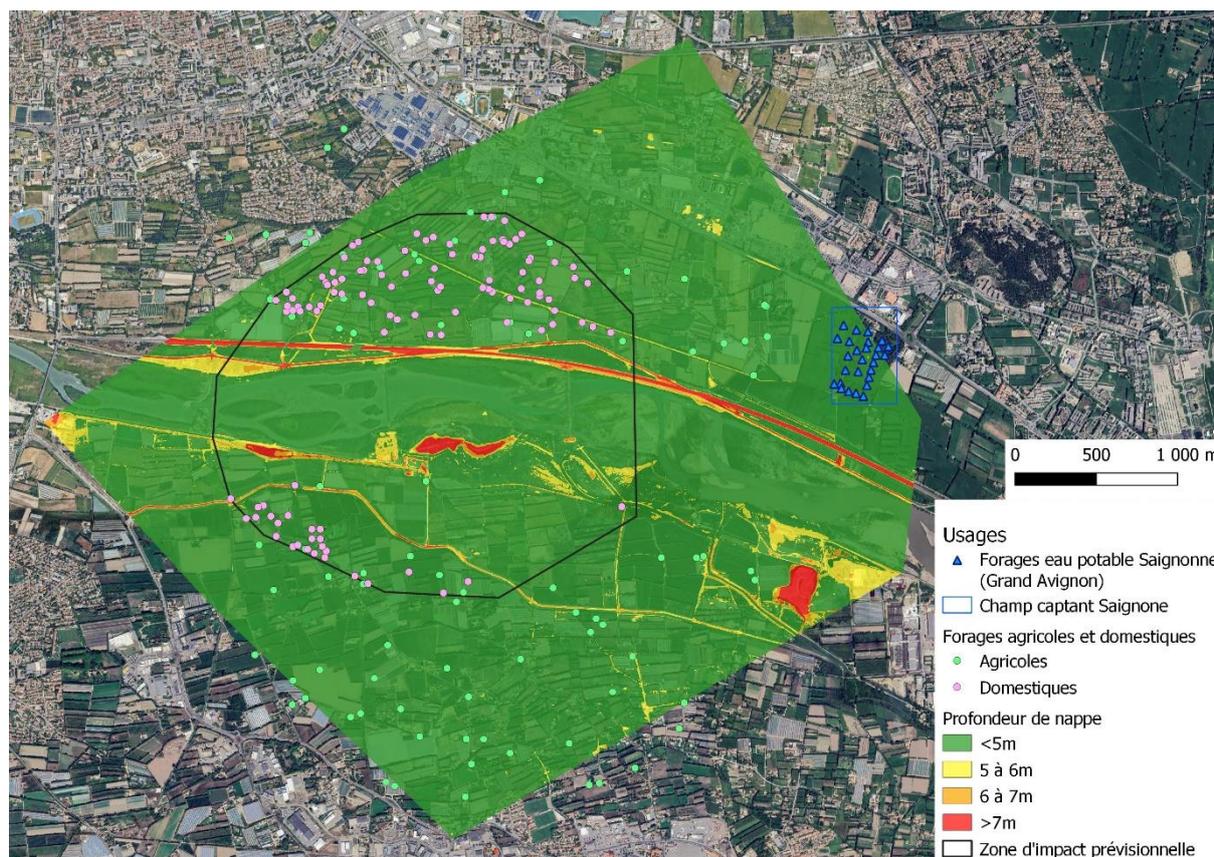


Figure 21 : Carte piézométrique au 20/09/2024 (fin du chantier) et localisation des forages

6.2. BILAN DES USAGES AFFECTES, DEFAILLANCES SURVENUES, ACTIONS CORRECTRICES MISES EN ŒUVRE

Compte tenu des niveaux de nappe confortables constatés tout l'été, aucun dysfonctionnement de forage imputable aux travaux n'a été répertorié au cours de la période. Pour rappel, l'abaissement piézométrique lié aux travaux durant la période estivale a été au maximum de 30-50 cm en champ proche et moyen, c'est-à-dire dans la gamme de ce qui avait été prévu.

Si aucun ouvrage n'a dysfonctionné du fait du chantier, 3 témoignages d'utilisateurs sont néanmoins remontés au SMAVD sur la période. Un bilan en est donné ci-dessous.

6.2.1. Difficultés d'amorçage sur une installation de pompage d'un forage agricole en ceinture verte d'Avignon

Un agriculteur de ceinture verte a témoigné le 07 août après midi de désamorçages fréquents sur la pompe équipant son forage. Suite à son appel, il a été fait un contrôle des niveaux de nappe dans les piézomètres proches. La profondeur de nappe rapportée au forage se situait alors entre 4.70 et 4.75m sous le terrain naturel, c'est-à-dire dans les normales de saison. Cette profondeur de nappe ne pose en principe aucun risque pour les forages existants, hormis pour les installations souffrant déjà de défauts de dimensionnement ou d'entretien. Ce niveau de nappe confortable et dans les normales de saison est également constaté sur l'ensemble de la zone couverte par le vaste

réseau de piézomètres du SMAVD. Par ailleurs le suivi piézométrique a permis de chiffrer l'abaissement lié aux travaux à environ 30 cm sur ce secteur.

Bien que le contrôle du niveau piézométrique dans le secteur et le suivi de l'impact travaux sur la nappe conclue à la faible probabilité d'une incidence du chantier sur le forage, il a été décidé de mener une levée de doute sur site. Pour cela, un diagnostic du forage et de l'installation a été déclenché en mobilisant les entreprises sous astreinte qui ont pu se rendre sur place dès le lendemain matin (08 aout). Les entreprises ont constaté la vétusté de certains équipements de l'installation de pompage, et ont mené des tests de fonctionnement. Le diagnostic identifie que le problème provient de l'installation, notamment de la colonne de pompage (tubage PVC, clapet, crépine ...) et écarte tout lien entre les travaux des seuils et les dysfonctionnements constatés.

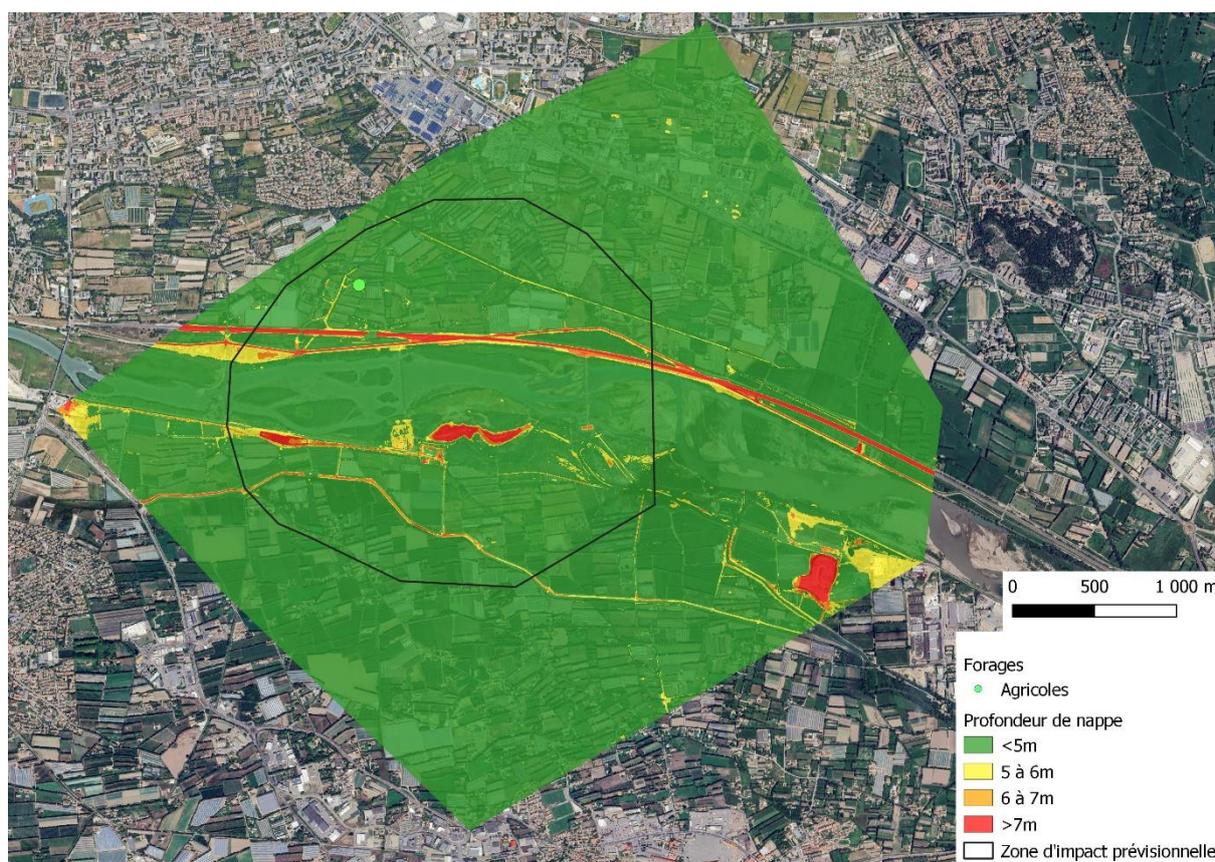


Figure 22 : Localisation du forage concerné sur la carte piézométrique du 08/08/2024

Le lundi 26 août, puis le mardi 27 août, le même propriétaire a recontacté le SMAVD pour signaler que le forage souffrait toujours de difficultés (pompe qui démarre bien, mais qui ne soutient pas les gros débits, avec beaucoup d'air qui se mélange à l'eau pompée). Pour autant, il s'avère que l'agriculteur n'a pas mené les réparations conseillées le 08 août pour la maintenance de la colonne de pompage, et n'a fait changer qu'un clapet. Cette réparation ponctuelle ne peut garantir que l'installation soit désormais fonctionnelle. Le niveau de nappe est globalement stable depuis le diagnostic mené le 08 août, la profondeur de nappe au niveau du forage étant autour de 4.75-4.80 m sous le terrain naturel, c'est-à-dire dans les normales de saison. Etant donné que les défauts constatés lors de la visite du 08 août n'ont pas été résolus, et compte tenu de la vétusté des équipements de pompage, les conclusions du diagnostic n'ont pas changé : les problèmes manifestés proviennent d'un défaut d'entretien ou de matériel vieillissant, notamment de la colonne PVC qui n'a pas été réparée conformément aux préconisations.

Il est recommandé au propriétaire de prendre attache avec une entreprise spécialisée pour procéder à une maintenance professionnelle de son pompage. Sans lien avec les travaux menés sur les seuils, aucune prise en charge financière des frais d'entretien et de maintenance des équipements n'est prévue.

6.2.2. Déficit de pression sur un forage exploité l'hiver en antigel sur la commune de Chateaurenard

Le 29/08, le SMAVD reçoit un appel d'un agriculteur de Chateaurenard qui a mené un test pendant les travaux sur un de ses forages proche de la Durance. Ce forage n'est pas utilisé actuellement au cours de l'été, il sert sur la période d'antigel (février à mai) et dessert des asperseurs répartis sur 6 ha. d'un périmètre de pêchers/abricotiers. Sur la période d'antigel, le débit de pompage est de l'ordre de 180 m³/h. D'après l'agriculteur, l'eau ne peut être prélevée à la pression habituelle : lors du test, la pression maximum soutenue est de 3 kbar au lieu des 4-4.5 kbar jugés nécessaires par l'agriculteur.

Le contrôle piézométrique du SMAVD révèle une profondeur du toit de la nappe à environ 3.7-3.8m de profondeur au droit du forage, c'est-à-dire dans les normales de saison, à un niveau qui ne pose en principe aucun souci. Le forage fait environ 18m de profondeur. L'abaissement piézométrique depuis le 19/07 (avant le démarrage des travaux) est de l'ordre de -70 à -75 cm dans ce secteur, dont environ -40 à -50 cm liés aux travaux (le reste de l'abaissement est lié principalement à l'arrêt des restitutions au 22/07, et dans une moindre mesure à la lente décroissance estivale du niveau de nappe qui a lieu tous les étés du fait de l'influence décroissante des retours de l'irrigation).

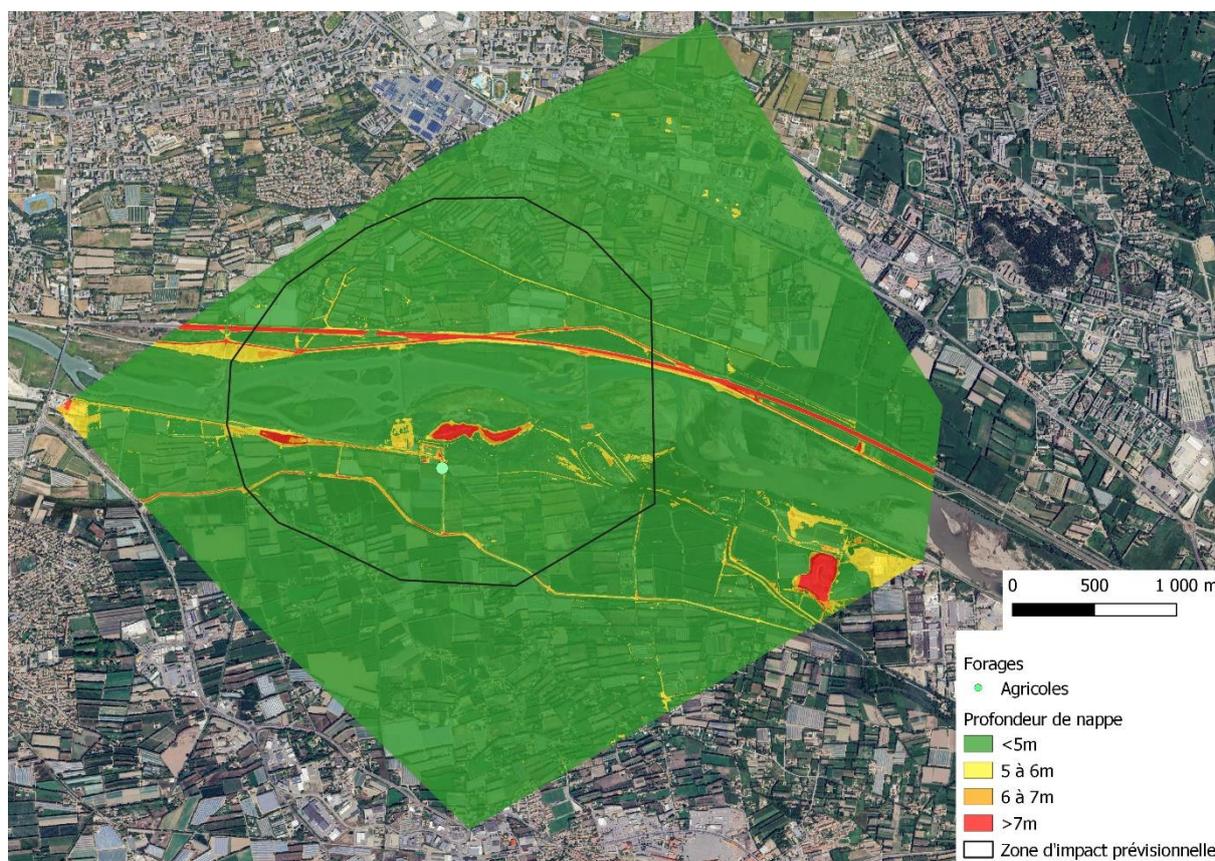


Figure 23 : Localisation du forage concerné sur la carte piézométrique du 22/08/2024

Le SMAVD a aussi mené l'analyse des niveaux de nappe historiques sur la période antigel. Il est à noter que sur le piézomètre RG4, situé le plus proche, le niveau de nappe lors du minimum hivernal (fin février/début mars, période d'usage antigel) est situé entre 21.85 et 22.08 m NGF (2022-2024). Lors de l'essai mené par l'utilisateur en août 2024, la nappe était autour de 21.85 m NGF, donc plutôt dans la fourchette basse du minimum hivernal.

Néanmoins, il est convenu de faire une levée de doute à l'automne 2024 en dehors de la période de travaux avec un test de fonctionnement sur site.

- Depuis un premier test de pompage en réel a été fait fin octobre 2024 sur site en présence de l'utilisateur. La nappe était alors remontée de près de 40 cm par rapport à août compte tenu de l'hydrologie en rivière, revenant à un niveau « moyen » par rapport à l'historique. Lors du test il n'y avait pas de problème de pression pour l'antigel, mais la marge sur la pression était faible.
- Il est convenu de revenir mener un diagnostic de l'installation en décembre ou janvier et de refaire un test de pompage en anticipation de la période d'antigel. En effet, le niveau de la nappe devrait alors avoir baissé (habituellement les niveaux les plus bas se situent début mars), pour permettre de constater si l'usage est susceptible ou non d'être affecté.

6.2.3. Défaut supposé sur un forage à Chateaurenard

Le 21/08, un agriculteur de Chateaurenard a informé le SMAVD d'un dysfonctionnement sur un de ses forages utilisés pour l'irrigation de vergers. Le forage concerné se situe près de l'épi de Leuze, sur la partie très amont de la zone d'impact potentielle. L'agriculteur informe que son forage créé récemment (quelques années), souffre d'entrées de sable à l'amorce notamment.

Le contrôle piézométrique révèle une profondeur du toit de la nappe à environ 3.4 m de profondeur au droit du forage, c'est-à-dire dans les normales de saison, à un niveau qui ne pose en principe aucun souci. D'autre part, l'impact travaux évalué sur ce secteur de nappe est évalué entre 0 et 10 cm, difficile à distinguer compte tenu des variations liées aux autres effets sur la nappe (le reste de l'abaissement est lié principalement à l'arrêt des restitutions au 22/07, et dans une moindre mesure à la lente décroissance estivale du niveau de nappe qui a lieu tous les étés du fait de l'influence décroissante des retours de l'irrigation). Ce niveau de nappe n'est pas susceptible de poser de problème à une pompe à aspiration. D'autre part, l'arrivée de sable dans un forage, notamment à l'amorce, est généralement liée à un pompage à un débit trop élevé au regard du diamètre de l'ouvrage, ou à une crépine endommagée qui laisse pénétrer du sable dans l'ouvrage. Dans le cas présent d'un forage récent, la sur-sollicitation semble la cause la plus probable.

Une visite de terrain a eu lieu le 22/08 par un agent du SMAVD pour évaluer la situation. Le forage est situé dans une fosse aménagée dans le terrain, diminuant d'autant la hauteur d'aspiration. Cette configuration exclut a priori toute défaillance liée au niveau de la nappe.

Après cet échange avec l'agriculteur concerné, il a été conclu que l'impact travaux très faible sur le secteur, couplé à un niveau de nappe haut pour la saison, et à un défaut non imputable à un niveau de nappe, excluait une défaillance causée par les travaux. Aucun diagnostic n'a donc été mené par le SMAVD.

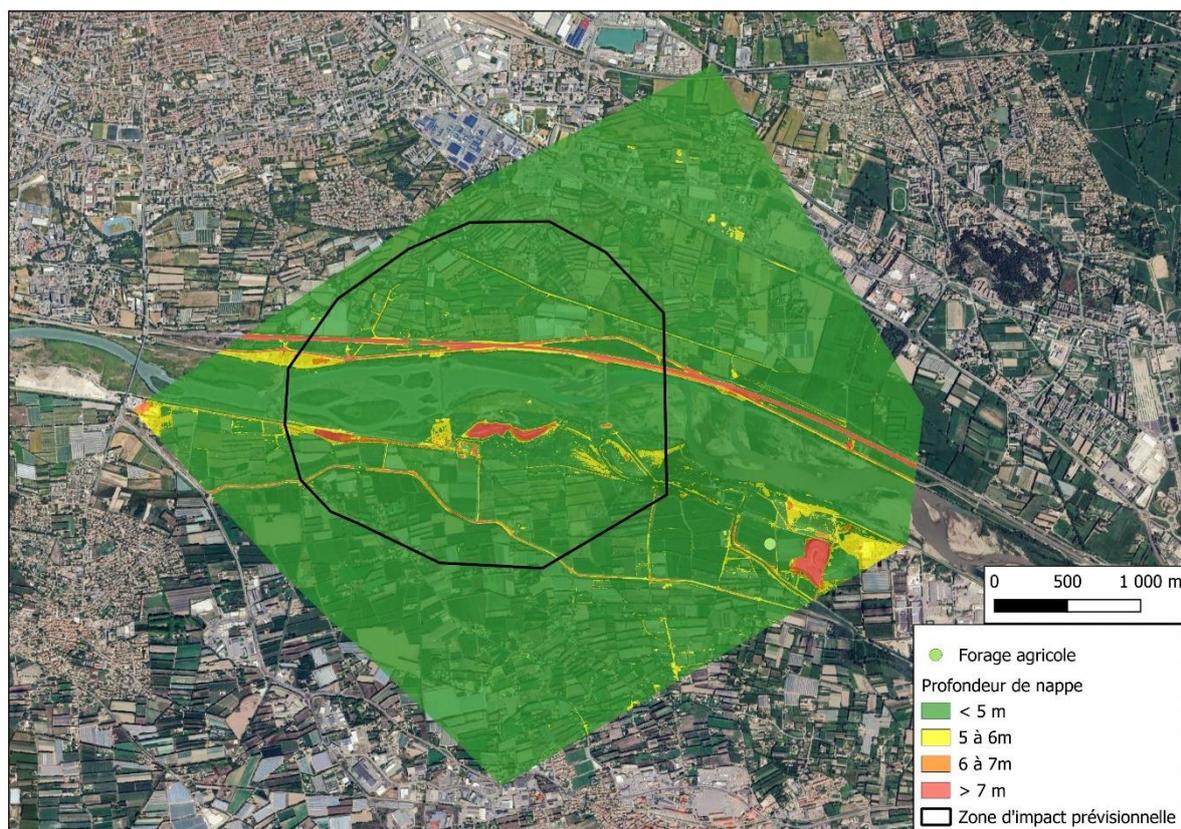


Figure 24: Localisation du forage concerné sur la carte piézométrique du 22/08/2024

7. Bilan et perspectives pour la suite

Les gros travaux de terrassement sur les seuils ont été terminés à l'issue du chantier 2024 et la Durance circule désormais dans les ouvrages reconfigurés, notamment dans les échancrures abaissées. Le chantier reprendra à l'été 2025 pour finaliser les passes à poissons des seuils 68 et 67 à l'intérieur des rideaux de palplanches déjà constitués. En situation d'étiage, les débits de Durance se concentreront à l'été 2025 dans ces échancrures. Les travaux 2025 à l'intérieur des rideaux de palplanches devraient être menés sans affecter les niveaux d'eau en rivière, la procédure de réalisation ne prévoit pas à ce stade de réaliser d'abaissement particulier.

D'ici le chantier de l'été 2025, le SMAVD va continuer à surveiller les niveaux de nappe dans le secteur, afin de suivre l'évolution de la piézométrie au-delà de l'effet immédiat des travaux. La surveillance va notamment porter sur la période hiver-printemps 2025 au cours de laquelle certains forages sont exploitées en antigel, et où la nappe arrive habituellement en situation basse aux alentours de mars (pas de retour à la nappe des débits de l'irrigation gravitaire à cette saison).

7.1. BILAN DE L'IMPACT DES TRAVAUX SUR LA NAPPE DURANT L'ÉTÉ 2024

Le suivi de la nappe à l'été 2024 permet de conclure que l'impact des travaux pendant le chantier est de l'ordre de 50 à 30 cm environ en champ proche et moyen.

On peut constater que les impacts constatés des travaux sont très proches des estimations issues de la démarche de modélisation de 2020, tant dans leur périmètre que dans les ordres de grandeur des baisses piézométriques.

Détaillons :

- On observe des baisses d'environ 50 cm en bordure des seuils
- En champ proche (environ 600m), la baisse liée aux travaux est comprise entre 50 et 30 cm. A noter une légère dissymétrie entre rive droite et rive gauche : la zone d'impact semble plus étendue du côté Châteaurenard que du côté d'Avignon.
- En champ lointain, les impacts sont tellement faibles (>10 cm) qu'ils sont difficiles à estimer, en particulier en rive droite. De plus, sur la rive gauche, les observations sont « polluées » par le développement puis les tests de pompage réalisés durant l'été sur le nouveau champ captant d'Auriac-Lieuze de la régie des eaux Terres de Provence ; ces travaux AEP ont généré un sur-rabatement important sur une grande surface de la nappe comme indiqué dans la figure qui suit.

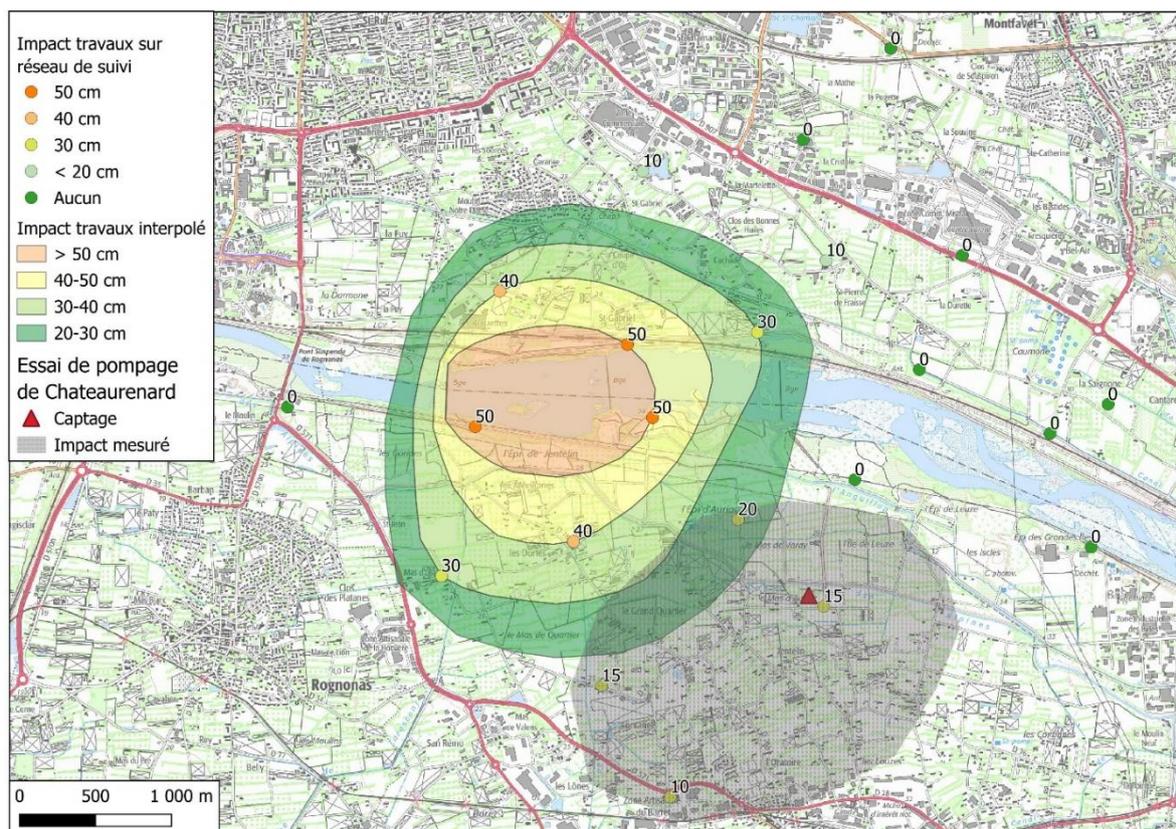


Figure 25 : Carte des impacts piézométriques observés au 20 septembre (fin des travaux).

A noter que les hypothèses pessimistes d'impact « réhaussé » durant la phase chantier n'ont pas été constatées. Ceci s'explique notamment par la procédure retenue pour la réalisation des travaux de terrassement qui s'est attachée à abaisser le moins possible les niveaux d'eau, et à les suivre finement.

7.2.SAISON HIVER-PRINTEMPS 2025

7.2.1. Le suivi de la nappe

Le suivi de la nappe en période automnale et hivernale sera poursuivi dans sa configuration actuelle (maintien du dispositif de suivi en continu par les capteurs) ; la fréquence des relèves manuelles sera mensuelle de janvier à avril.

Il existe en effet deux enjeux forts sur cette période :

- Caractériser une éventuelle évolution de l'impact des travaux suite à de probables décolmatages causés par des crues morphogènes, qui viendraient modifier les conditions d'échange entre la Durance et sa nappe alluviale au droit des souilles.
- Anticiper les niveaux bas de nappe en fin de période hivernale, voire printanière (de fin janvier à début avril) qui pourraient impacter les forages en place destinés à assurer une protection contre le gel.

Concernant l'attribution de l'abaissement piézométrique définitif lié aux travaux réalisés durant la période estivale 2024, la nappe atteignant en général le niveau bas autour du 1^{er} mars (date de

remise en eau de certains canaux agricoles), il suffira de comparer les niveaux piézométriques observés sur le réseau de suivi au 1er mars aux données antérieures. En cas de sous-passement significatif par rapport aux données historiques, la recherche d'une année passée présentant un cumul mensuel des débits équivalents pourrait permettre par comparaison d'affiner cette estimation. En effet, rappelons qu'historiquement, on observe une excellente corrélation entre niveaux de nappe au 1er mars et hydraulicité de la Durance les 30 jours précédents en période hivernale.

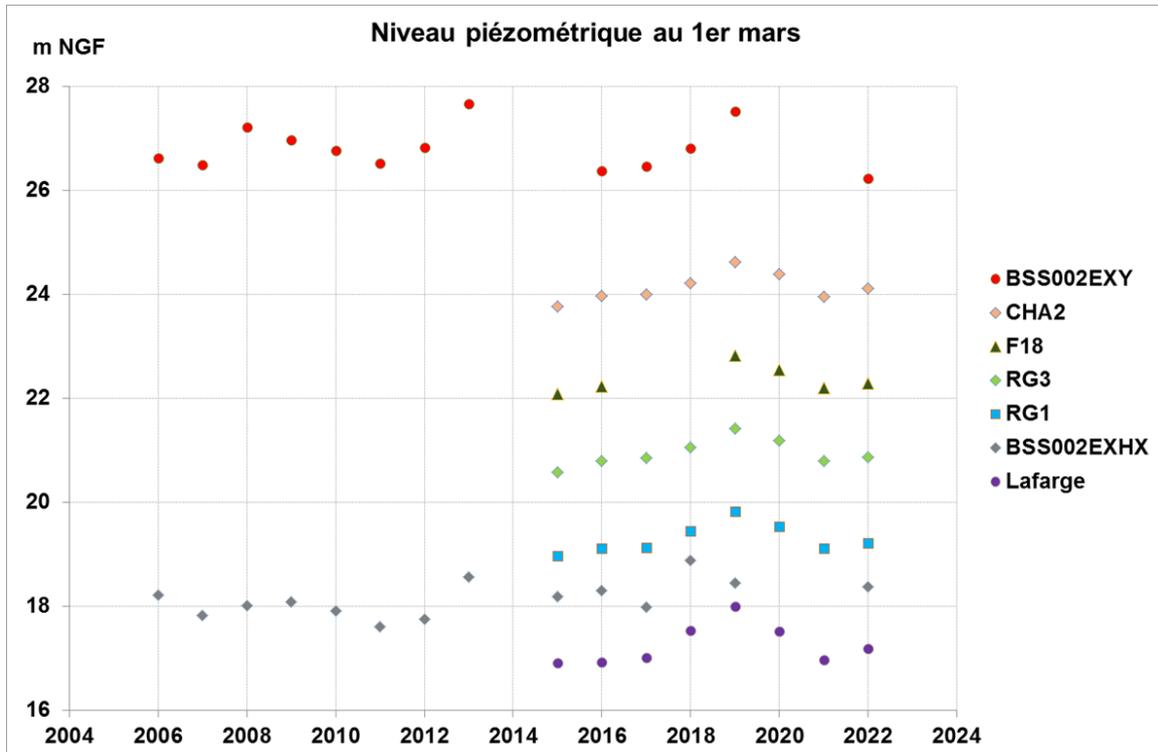


Figure 26 : Rappel des niveaux historiques de nappe au 1er mars sur les piézomètres de référence

Il est prévu de mobiliser l'hydrogéologue de la société HYDROFIS courant février pour analyser les chroniques piézométriques enregistrées.

7.2.2. Le suivi des usages

Anticipation des défaillances :

L'usage antigel est caractérisé par la mobilisation d'importants débits dans les forages sur de brèves durées de temps (quelques heures). Ces débits élevés sont susceptibles de provoquer des rabattements plus importants dans les ouvrages, qui s'additionnent à la profondeur de la nappe dans l'ouvrage, proche du plus bas en cette saison. Cet usage est donc particulièrement susceptible d'être touché par l'abaissement de la nappe lié aux travaux.

L'anticipation passe par la surveillance du niveau de nappe au droit des ouvrages référencés comme étant utilisés pour l'antigel, en prenant en compte une marge supplémentaire par rapport à la profondeur mesurée pour inclure le rabattement.

Organisation du SMAVD :

Les entreprises de travaux et les entreprises intervenant pour le diagnostic des forages sont toujours sous contrat ce qui permettra de mener les opérations d'analyse et au besoin de remédiation.

L'enjeu sera de suivre avant même la période d'antigel l'évolution de la nappe à l'automne et à l'hiver, pour disposer d'un temps d'avance le cas échéant, d'autant que cette période est déconnectée du temps du chantier des seuils.

7.3. TRAVAUX PREVUS POUR L'ETE 2025

7.3.1. Le suivi de la nappe

Le suivi de la nappe sera mené de manière similaire à l'été 2024. Il n'est pas prévu d'abaissement des niveaux de Durance lors du chantier 2025, donc l'état de la nappe juste avant le chantier devrait donner une bonne indication de son évolution possible au cours de l'été. Rappelons que les conditions de l'été 2024 ont été exceptionnelles avec un régime de restitution anormal de début juin à la mi-juillet ; il est nécessaire d'anticiper des conditions hydrologiques plus défavorables avec des niveaux de nappe plus bas au début de l'été 2025.

Au vu de ces considérations, le suivi piézométrique sera assuré au cours de l'été avec le même dispositif composé de capteurs enregistreurs en continu mais les relevés seront réalisés avec une fréquence mensuelle. Au fur et à mesure des relevés en nappe, le niveau piézométrique sera projeté sur chaque forage agricole ou individuel. La profondeur de nappe sera classifiée en fonction des niveaux d'alerte pour anticiper un abaissement qui pourrait devenir problématique vis-à-vis des usages.

Le niveau de la nappe observée début juillet devrait permettre de projeter l'évolution au cours de l'été 2025 de la piézométrie sur le réseau, et ainsi de permettre l'anticipation d'éventuels sous-passements des niveaux d'alerte.

7.3.2. Le suivi des usages

Les entreprises de travaux et les entreprises intervenant pour le diagnostic des forages sont sous contrat et sur site, ce qui permettra de mener les opérations d'analyse et au besoin de remédiation.

De la même manière que pour le suivi de l'été 2024, il est prévu de mobiliser l'hydrogéologue de la société HYDROFIS durant l'été 2025 pour assurer le suivi analytique des chroniques piézométriques enregistrées.

8. Annexe : Eléments de méthode pour le calcul de l'impact des travaux.

8.1. PREAMBULE

Dans le cadre d'un programme de modification de la géométrie des seuils 67 et 68 dans le secteur d'Avignon et d'aménagement de passes à poissons sur ces seuils, le SMAVD a souhaité mobiliser une expertise pour déterminer si des éventuelles baisses de nappe qui seraient constatées pendant et après les travaux, sont liées aux travaux ou à une situation conjoncturelle.

En effet, le SMAVD s'est engagé auprès des tiers et des partenaires à couvrir pendant les travaux les pertes d'usage des forages agricoles et domestiques qui seraient liées à l'aménagement et à l'abaissement des seuils. Ceci nécessite d'objectiver si les éventuelles baisses de nappe qui seraient constatées pendant les périodes à enjeux (étés des travaux, période hiver-printemps entre les deux années de travaux au moment de l'antigel), sont en tout état de cause liées aux travaux ou à une situation conjoncturelle. La décision de déclencher ces mesures devra être réalisée dans un délai très court compte tenu de l'enjeu économique ou sanitaire que peut représenter une perte d'usage de certains forages (activité maraîchère, antigel d'hiver en arboriculture, eau courante pour les forages domestiques dans les zones non desservies par un réseau d'eau potable).

Il s'agit donc de permettre de quantifier l'effet réel de l'abaissement des seuils sur la piézométrie (c'est-à-dire discriminer les variations liées à l'arasement des seuils des autres variations habituelles de la piézométrie).

Pour cela, le SMAVD a souhaité faire analyser le set de données disponibles sur son réseau de piézomètres sur la période historique, ainsi que les données qui seront acquises pendant la période de travaux. Cette prestation permettra en outre au SMAVD de bénéficier du regard d'un acteur extérieur au chantier pour réaliser le bilan après travaux des variations de nappe.

L'analyse des données de suivi durant la phase travaux est l'objet de la présente annexe. Les analyses sur les données historiques de piézométrie ont fait l'objet d'un rapport édité le 17 avril 2024.

Le réseau de suivi en place est rappelé dans la figure ci-dessous.

Préalablement à la phase travaux, HYDROFIS avait été mobilisé pour réaliser une étude historique des données de nappe dans le secteur des seuils (rapport en date du 17 avril 2024). Cette analyse avait permis de proposer un protocole de traitement des données de suivi de nappe pour caractériser les impacts des travaux en termes de piézométrie. En effet, pour être en mesure de caractériser l'impact des travaux sur la nappe, il faut être capable d'estimer quels auraient été les niveaux de nappe sans travaux (situation dite non influencée par les travaux).

Il avait été démontré qu'en période estivale, historiquement, le scénario le plus probable était celui d'une période sans pulse hydraulique en Durance (fin des restitutions fin mai à début juin), avec une lente descente des niveaux piézométriques à partir du 1^{er} juillet. Tout le protocole d'analyse des données était basé sur cette hypothèse.

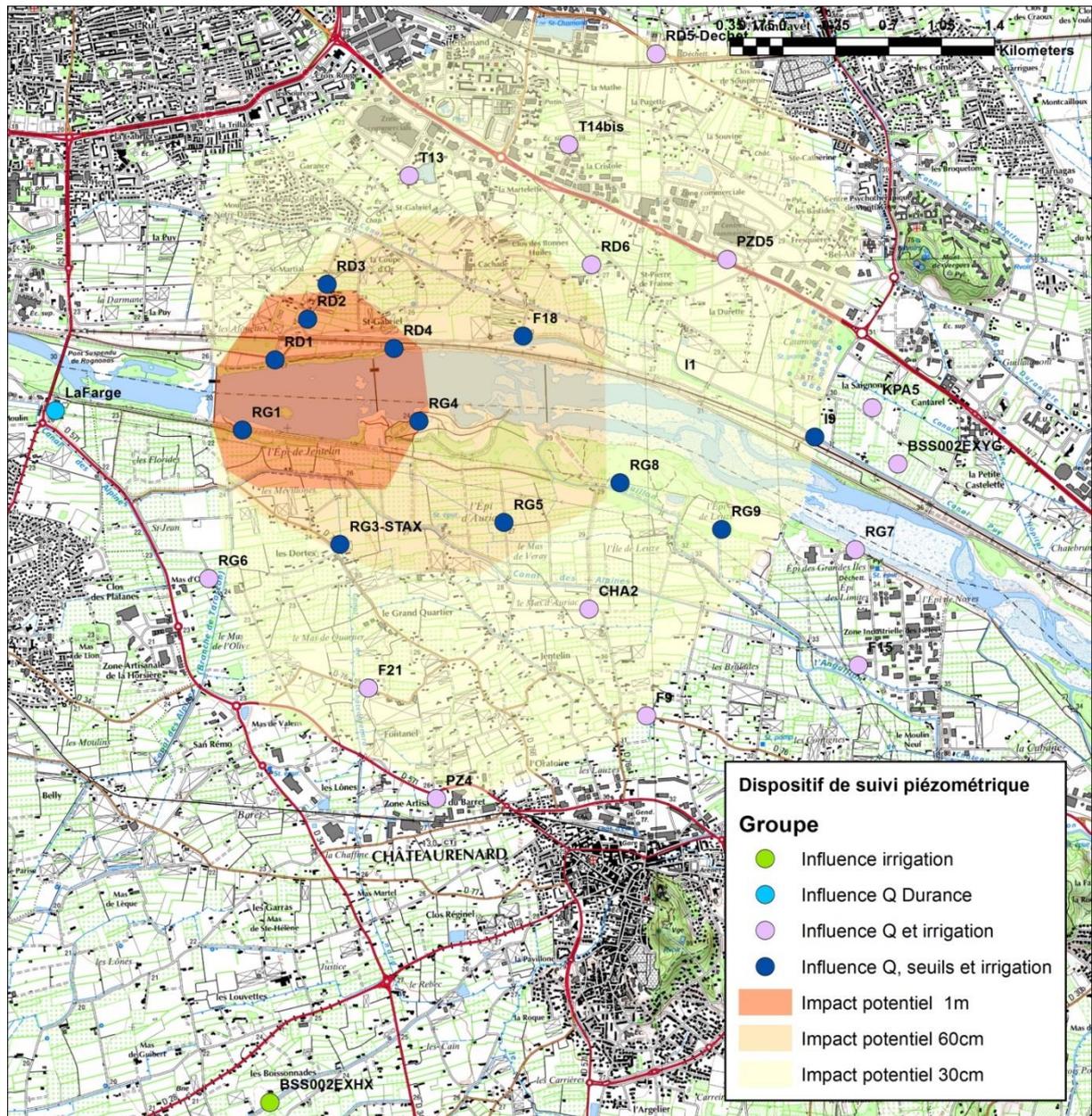


Figure 27: Catégorisation des piézomètres du réseau de suivi (HYDROFIS & BRLI, 2024).

A cause d'un premier semestre 2024 exceptionnel en termes de pluviométrie, EDF a exceptionnellement maintenu les restitutions durant tout le mois de juin jusqu'au 15 juillet. Il a donc fallu repenser en totalité le protocole d'interprétation des données du suivi piézométrique.

Dans cette annexe, nous commençons par la recherche d'une situation antérieure similaire puis nous proposons une nouvelle méthode pour essayer de caractériser les impacts des travaux sur les niveaux de nappe.

8.2. RECHERCHE DE SITUATIONS HYDROLOGIQUES PROCHES DE CELLE OBSERVEE EN 2024

JUSTIFICATION DE L'ANNEE 2018 COMME ANNEE DE REFERENCE

Le graphe ci-dessous permet de constater le caractère exceptionnel de l'année 2024 en termes d'hydraulicité de la Durance, avec un régime de restitutions continu du début avril à la mi-juillet 2024.

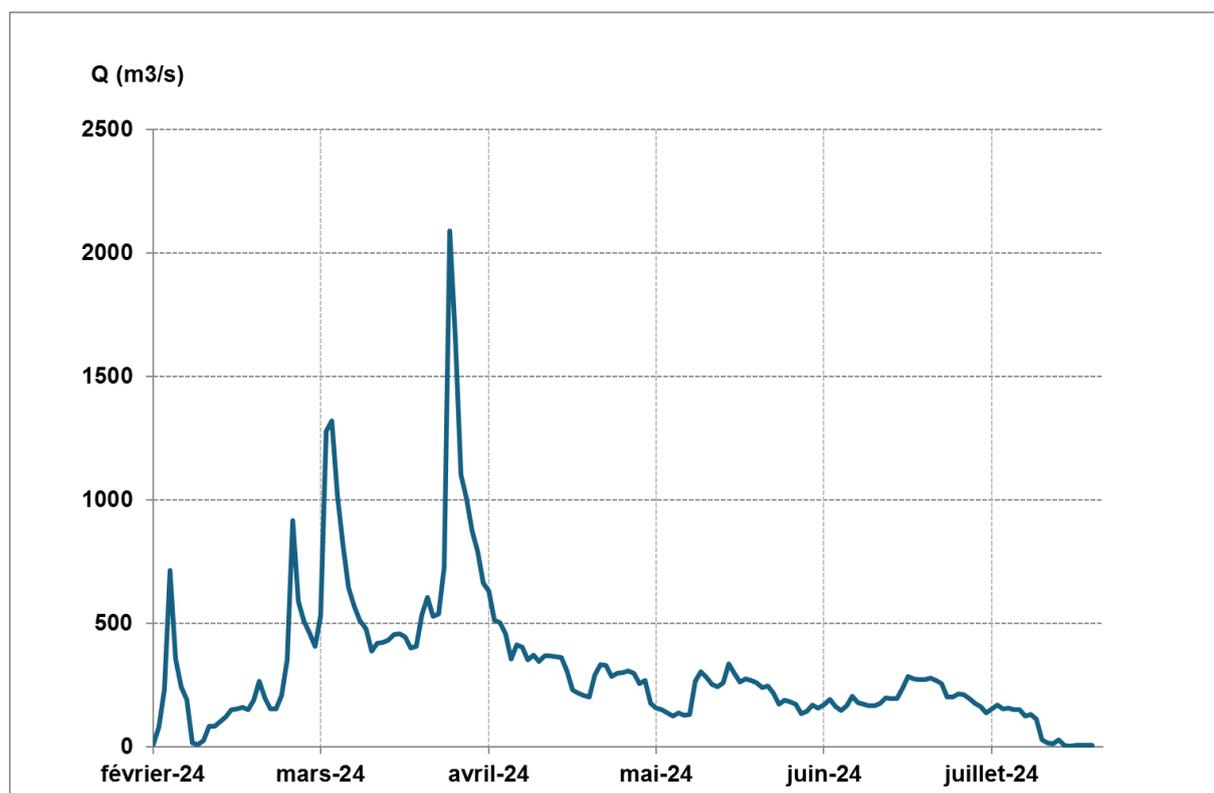


Figure 28: Débit journalier en Durance en 2024.

Afin d'identifier une année qui pourrait se rapprocher de 2024, nous avons procédé à deux analyses :

- Analyse de la situation piézométrique au 1^{er} juin.
- Analyse des débits moyens sur trois périodes d'antériorité différentes.

Les graphes ci-dessous permettent plusieurs observations intéressantes :

- En termes de situation piézométrique, deux années se rapprochent des niveaux hauts de nappe observés au 1^{er} juin 2024 : 2020 et 2018.
- L'analyse de l'historique des débits montre à quel point 2024 est exceptionnel : si on remonte jusqu'en mars, 2024 n'a pas d'équivalent. L'année qui s'en rapproche le plus est 2018 avec des hydraulicités proches sur les mois de mai et de juin.

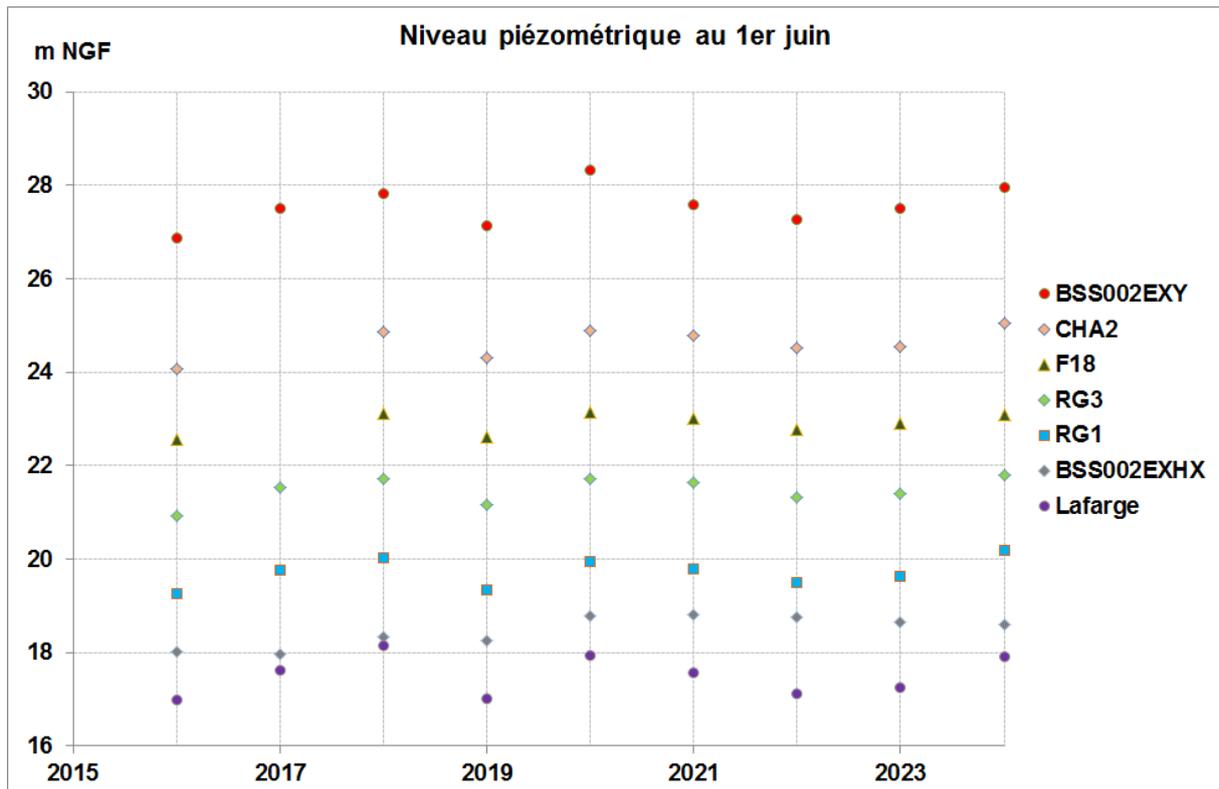


Figure 29: Situation piézométrique au 1^{er} juin de 2015 à 2024 sur les piézomètres de référence.

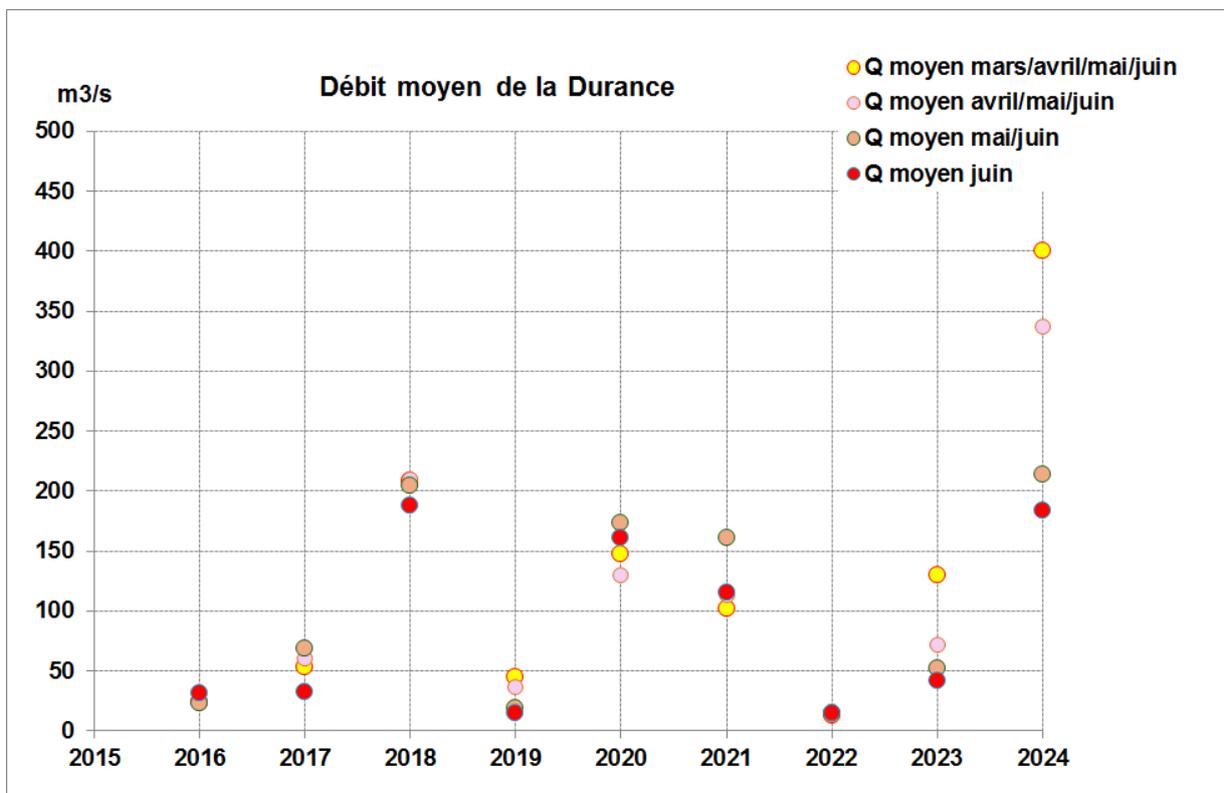


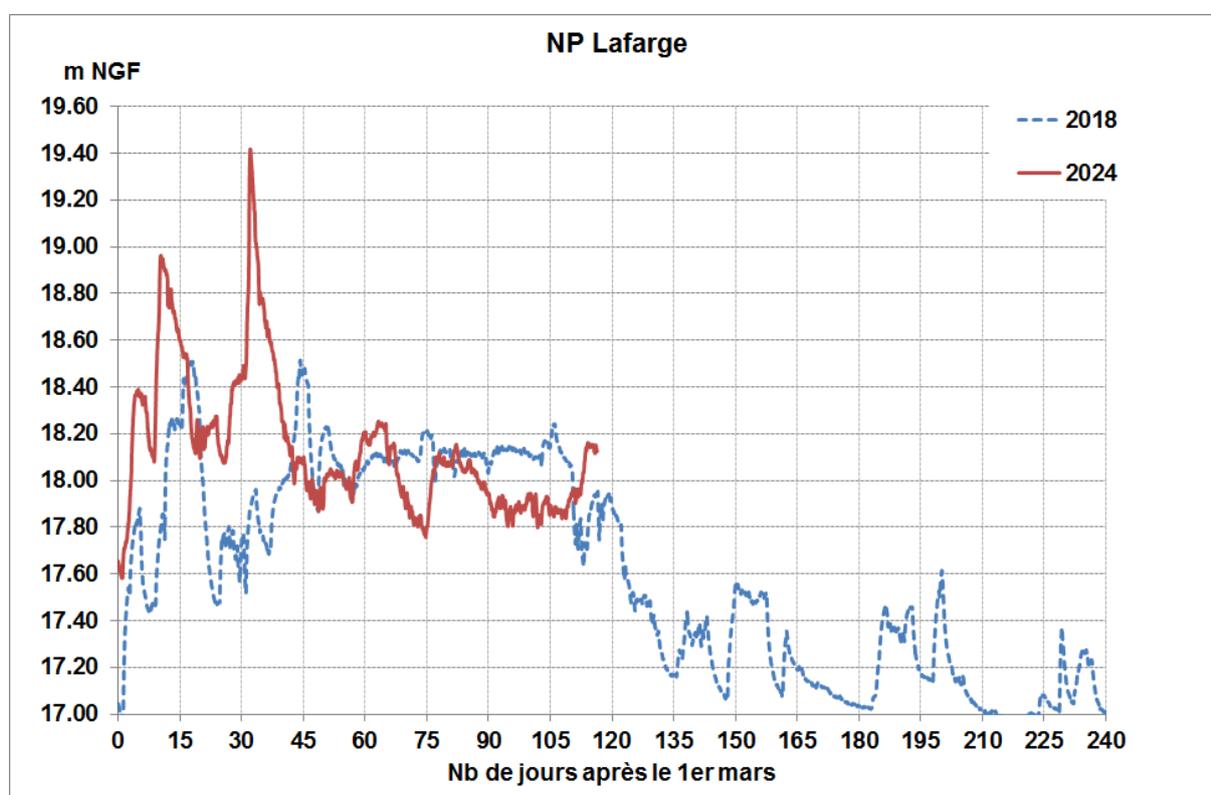
Figure 30: Débit moyen en Durance sur des périodes variables de 2016 à 2024.

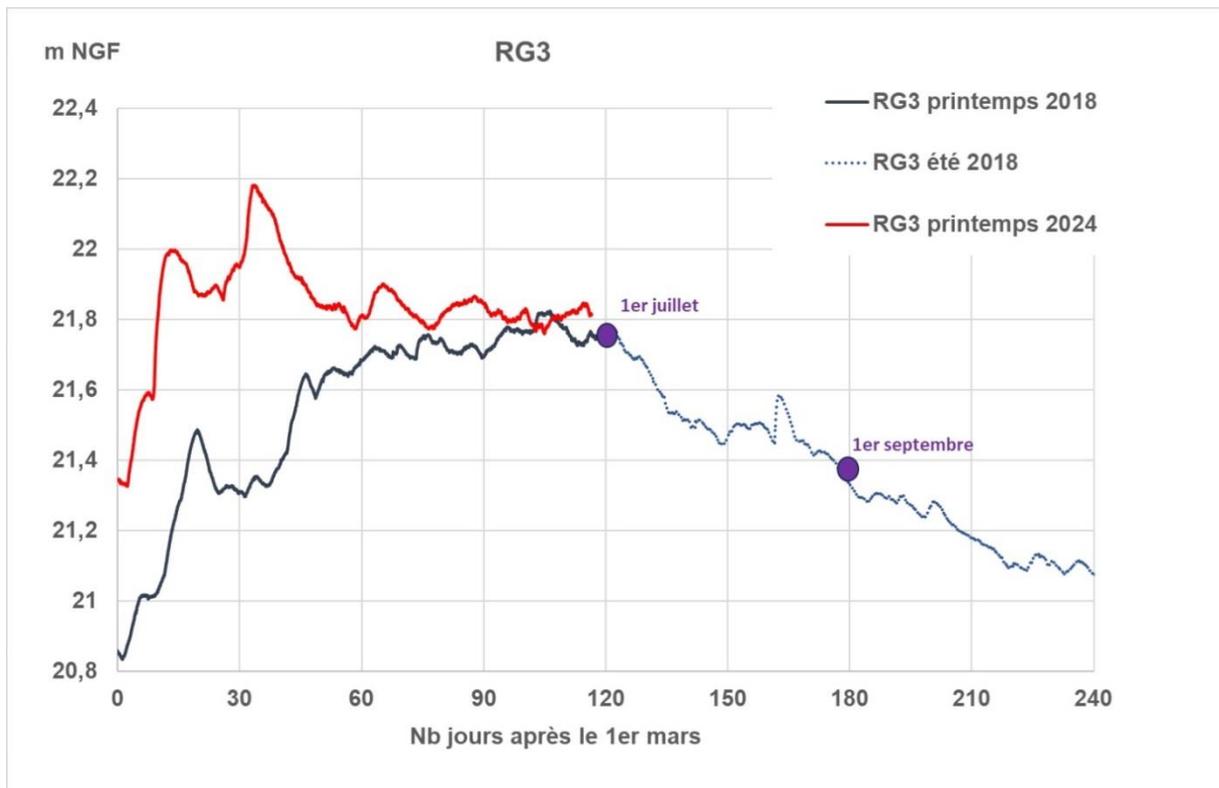
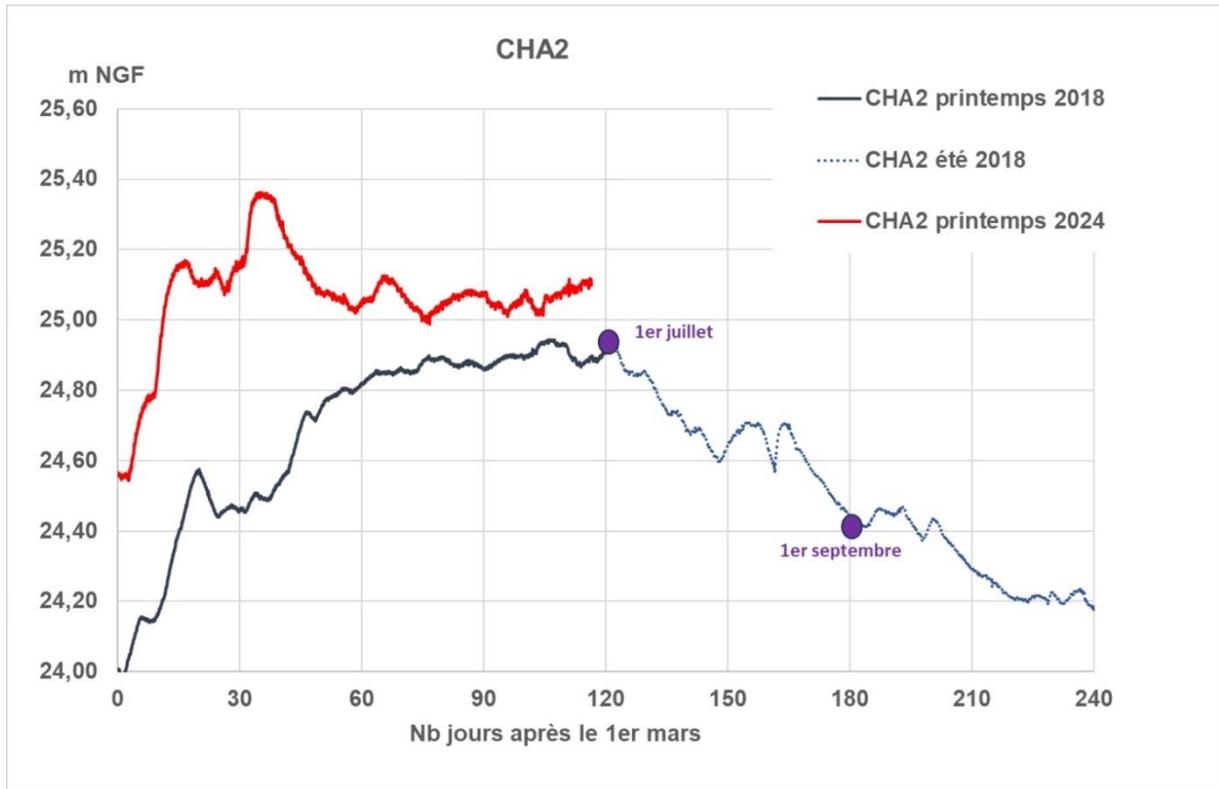
Fort de ce constat, nous avons cherché à comparer les variations piézométriques sur certains des piézomètres de référence pour analyser le degré de similarité entre 2018 et 2024.

On peut observer des situations sur le mois de juin très similaires avec des écarts piézométriques de l'ordre de 20 cm. Rappelant qu'en 2018, les restitutions avaient été stoppées au 1^{er} juillet, cela permet d'appréhender la dynamique de nappe à la baisse consécutivement à cet arrêt ; pour les piézomètres dans la zone projet, on peut observer des baisses de nappe qui varient en fonction de la distance à la Durance et qui vont s'étaler du 1^{er} juillet à la fin octobre.

Le piézomètre LAFARGE est un bon indicateur de la ligne d'eau en Durance. On peut observer que le passage des débits de restitution au débit réservé, se traduit par une chute du niveau de nappe de plus de 100 cm en environ 15 jours.

Figure 31: Comparaison des variations piézométriques entre 2018 et 2024.





Au vu de ces observations, il nous semble pertinent de prendre 2018 comme année de référence sur les évolutions probables de la nappe consécutivement à l'arrêt des restitutions dans une situation non influencée par les travaux.

Cette approche souffre de deux biais/limites :

- Nous disposons d'observations des évolutions piézométriques sur un nombre limité de piézomètres en 2018 : LAFARGE, RG1, RG3, CHA2, BSS002EXHX (Châteaurenard), BSS002EXYG (Avignon/Saignonne), T14, F18, RD1, RD2.
- En 2024, l'arrêt des restitutions se fera avec 15 jours de retard par rapport à 2018. Or, il avait été démontré qu'entre le 1^{er} et le 15 juillet, il y avait aussi une baisse consécutive à la diminution de l'irrigation en plaine de Durance. Les vitesses de diminution étaient alors estimées entre 0,1 et 0,7 cm/jour). Le biais est donc compris entre 1,5 et 10 cm. Il peut donc être considéré comme négligeable.

Analyse des comportements en 2018

Une première approche a été d'essayer de voir s'il était possible de déterminer une loi de comportement post-restitution en ne considérant que les premiers 5 jours post-restitution (délai observé en 2024 avant le début des travaux).

Cette approche a été conduite sur l'ensemble des piézomètres avec des chroniques en 2018. Il a été constaté qu'une calibration sur 5 jour n'est pas suffisante pour modéliser la dynamique de la nappe jusqu'à fin octobre. La courbe modélisée ne reproduit jamais correctement le comportement de long terme.

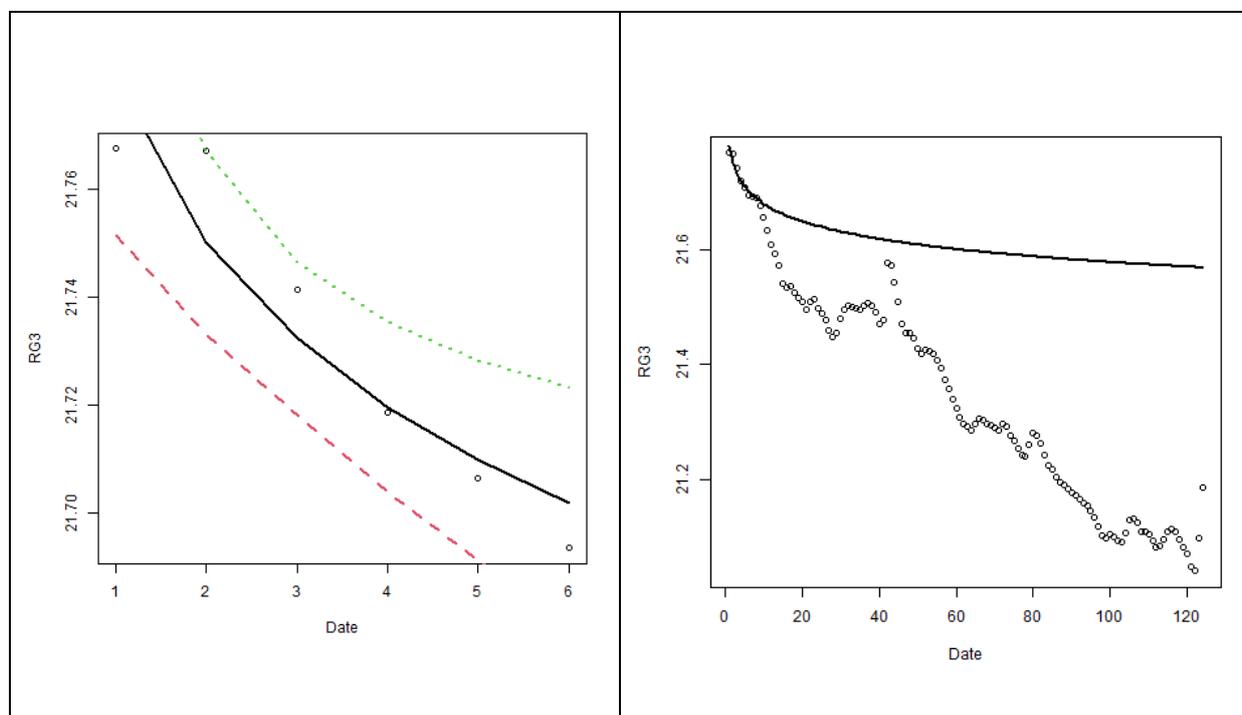


Figure 32: Visualisation de la modélisation calibrée sur 5 jours de l'évolution du toit de nappe pour RG3.

Dans un deuxième temps, nous avons donc cherché à trouver une loi de décroissance de type logarithmique, calée sur la totalité de la courbe de 2018 (120 jours de décroissance post-restitution).

La calibration sur 120 jours donne un résultat plus ou moins satisfaisant dépendamment de la dynamique de l'évolution de la station considérée.

Le tableau ci-dessous donne les résultats de cette calibration. Rappelons qu'une modélisation reproduisant parfaitement les données d'origine devrait se voir attribuer un coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) de 1.

Or, on peut observer des critères de Nash relativement moyens, voire faibles sur certains piézomètres.

Nom du piézomètre	Ordonnée à l'origine (a)	Coefficient directeur (b)	Qualité du modèle (NSE)
BSS002EXHX	18.4304428296985	0.0765234196250484	0.450253230563398
BSS002EXYG	27.9908669251867	-0.17528232631385	0.557417600149567
CHA2	25.2943042926117	-0.209701394202189	0.77289378739293
F18	23.0720172456203	-0.0767065946591485	0.049764975891368
LaFarge	17.6869148281018	-0.120632797298354	-1.07245116052315
RD1-out	19.4426214976991	-0.0678748110820763	-0.2207836431435
RD2-out	20.0770605438447	-0.0660846958027717	0.236132547018839
RG1	20.0159908619483	-0.135752925563167	0.622129505488925
RG3	22.0751129603	-0.189559298360084	0.796839173809445
T14-out	22.1634165147443	-	-40.2834921760476

Figure 33: Résultat de la calibration sur 120 jours pour l'ensemble des piézomètres ayant de la donnée pendant l'été-automne 2018.

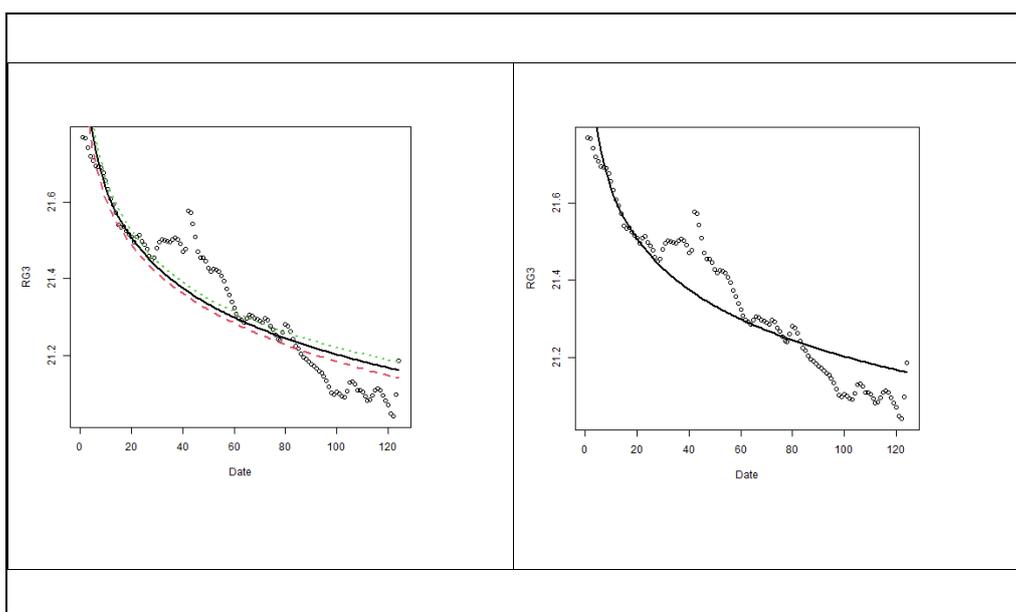
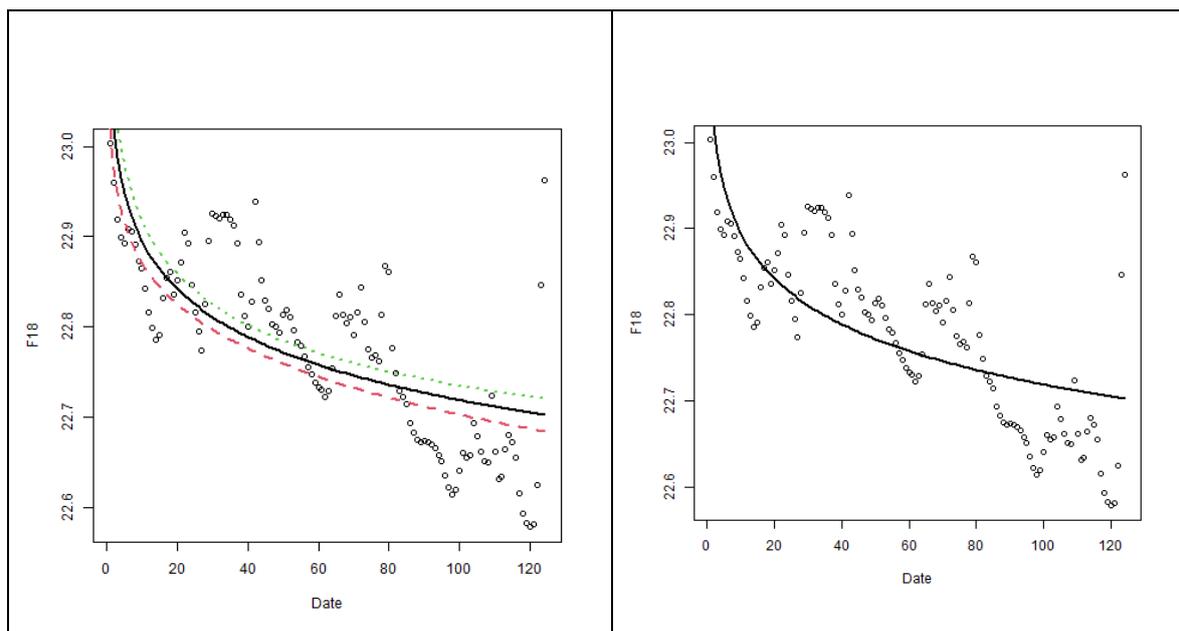


Figure 34: Visualisation de la modélisation calibrée sur 120 jours de l'évolution du toit de nappe pour RG3.



Visualisation de la modélisation calibrée sur 120 jours de l'évolution du toit de nappe pour F18.

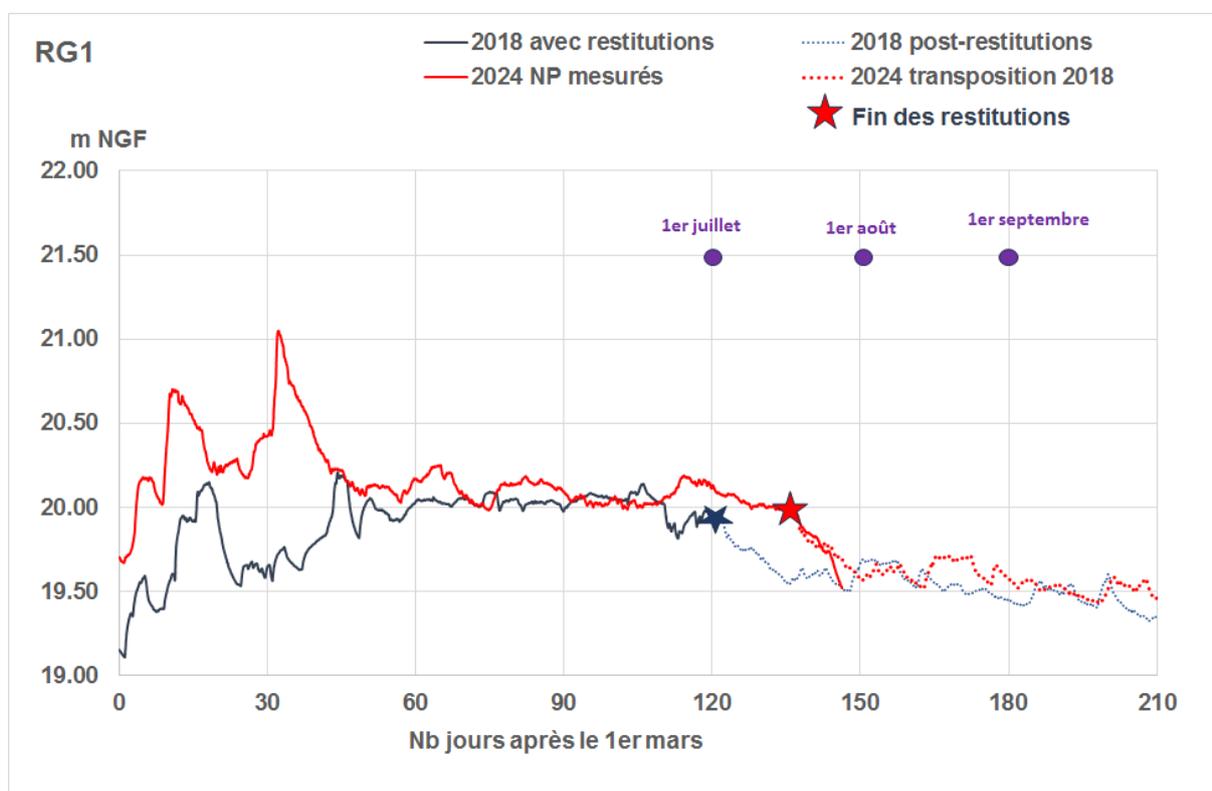
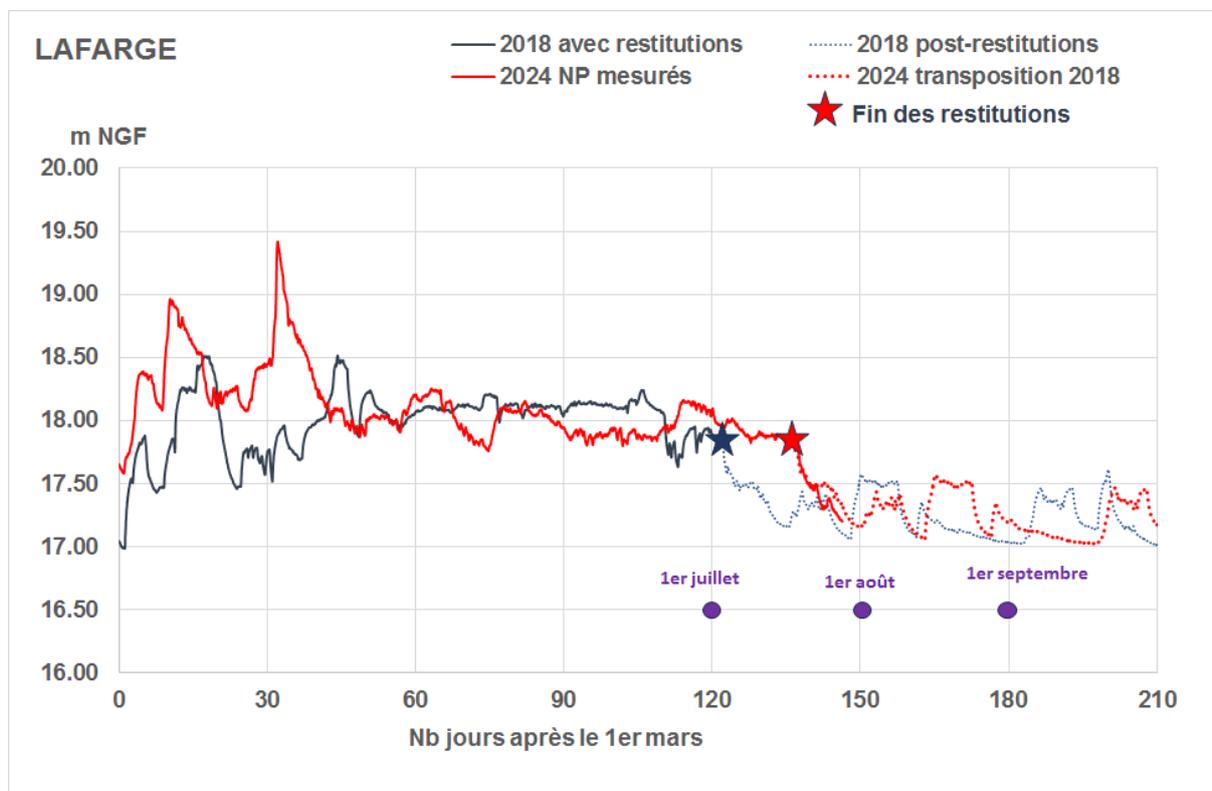
Il existe deux explications possibles à un faible critère de Nash :

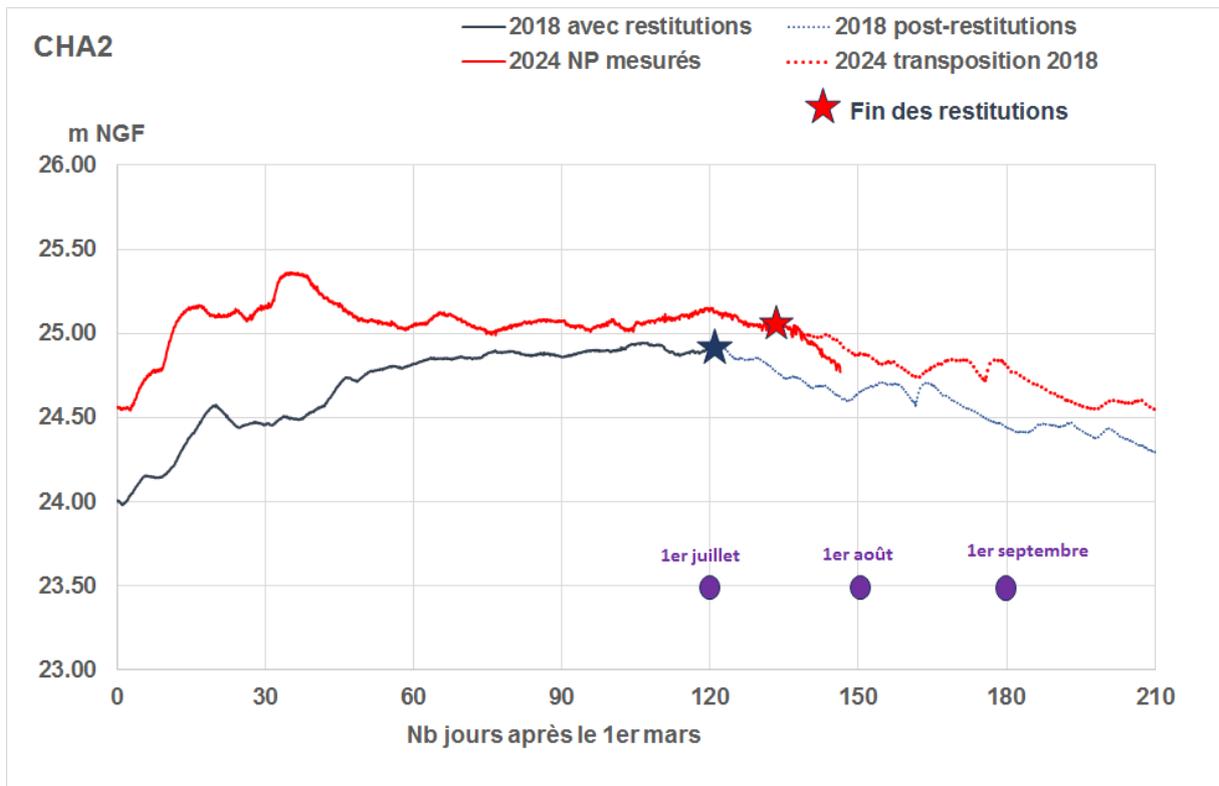
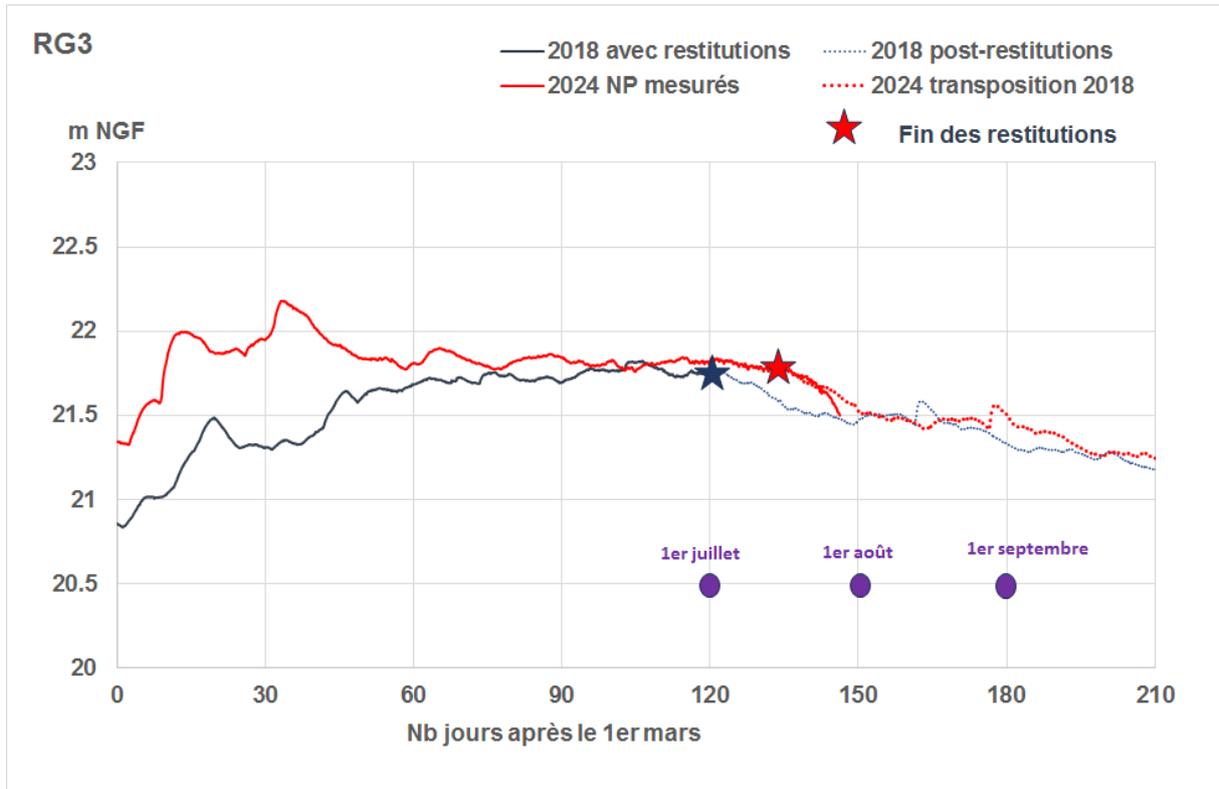
- Soit la courbe ne parvient pas à reproduire l'évolution générale du toit de nappe car le piézomètre est très éloigné de la Durance (et donc peu influencé par les variations de débit) comme c'est le cas sur la figure de T14-out.
- Soit le modèle représente bien en tendance l'évolution de la nappe mais ne parvient pas à reproduire la variabilité autour de cette tendance comme c'est le cas sur la figure de F18. En rappelant que ces « anomalies » sont principalement expliquées par des restitutions de faible débit et de courte durée observées durant l'été 2018.

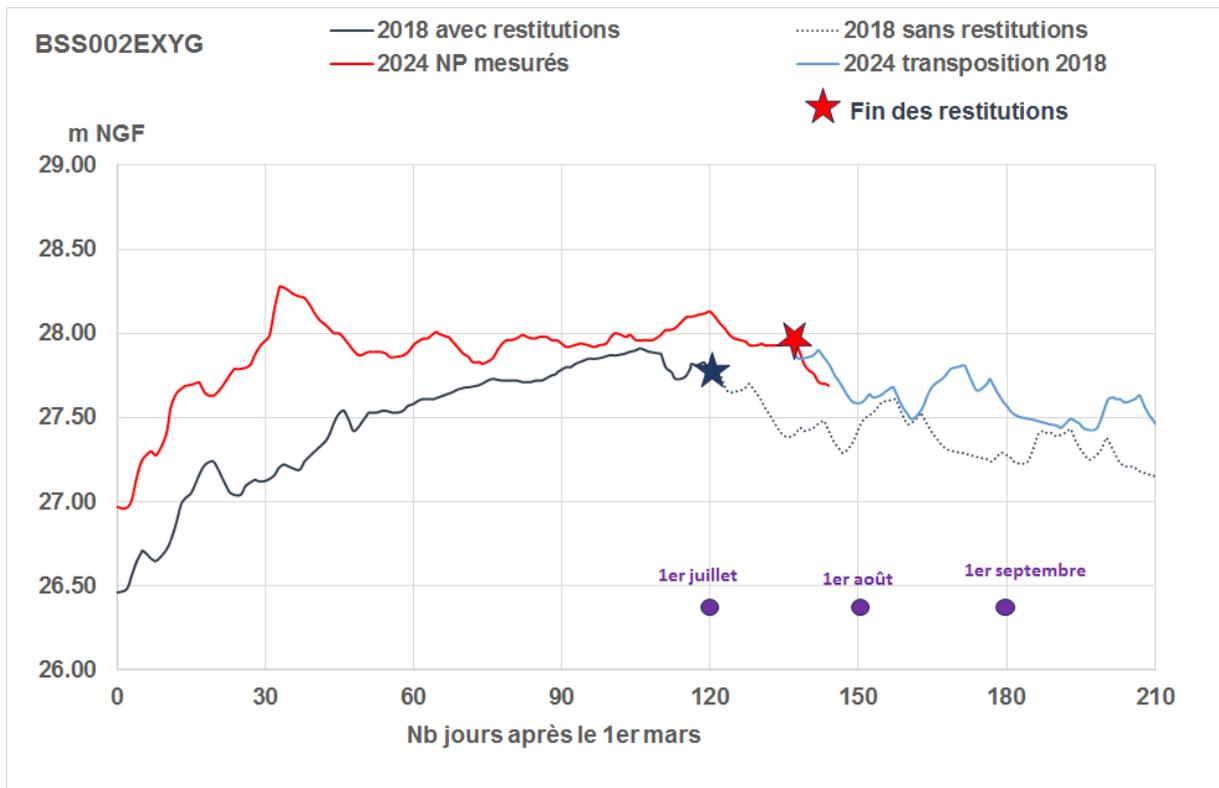
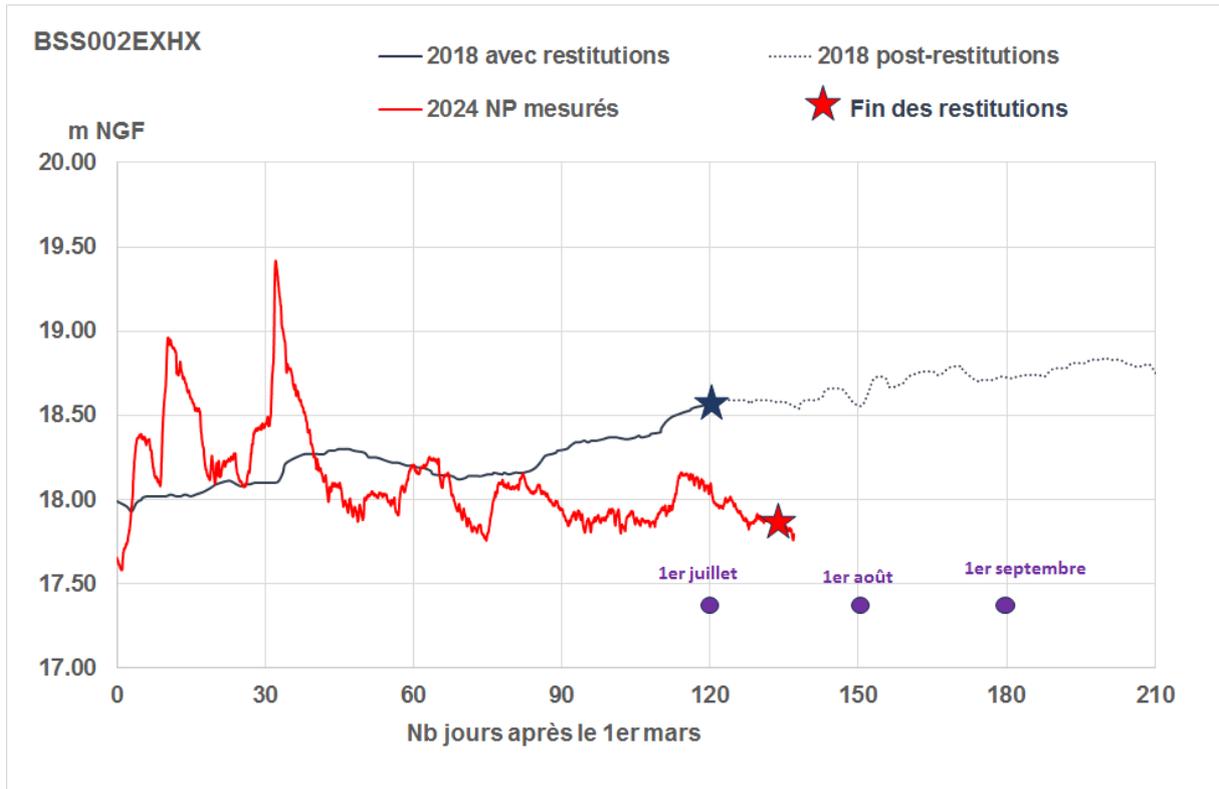
Au vu de ces considérations, il nous semble que la courbe de « tendance » calée sur les variations de 2018 apporte peu d'informations pertinentes, voire qu'elle peut prêter à de mauvaises interprétations.

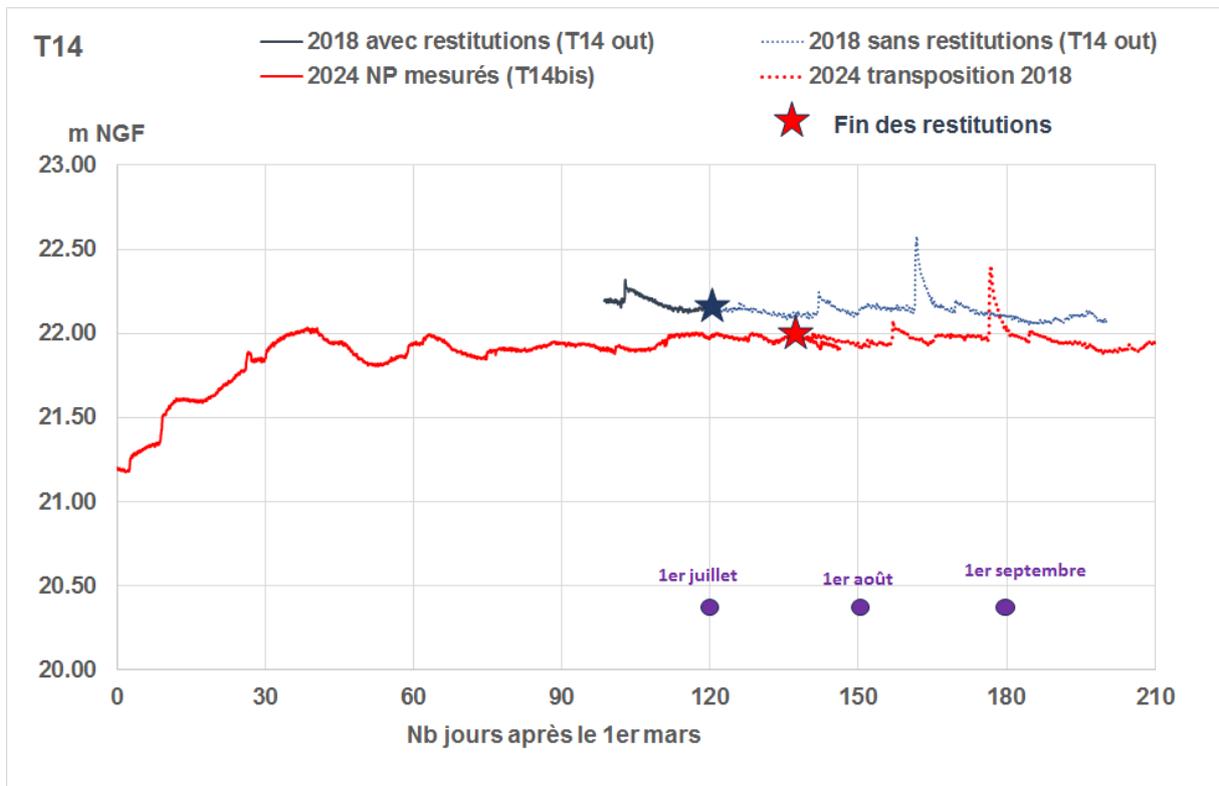
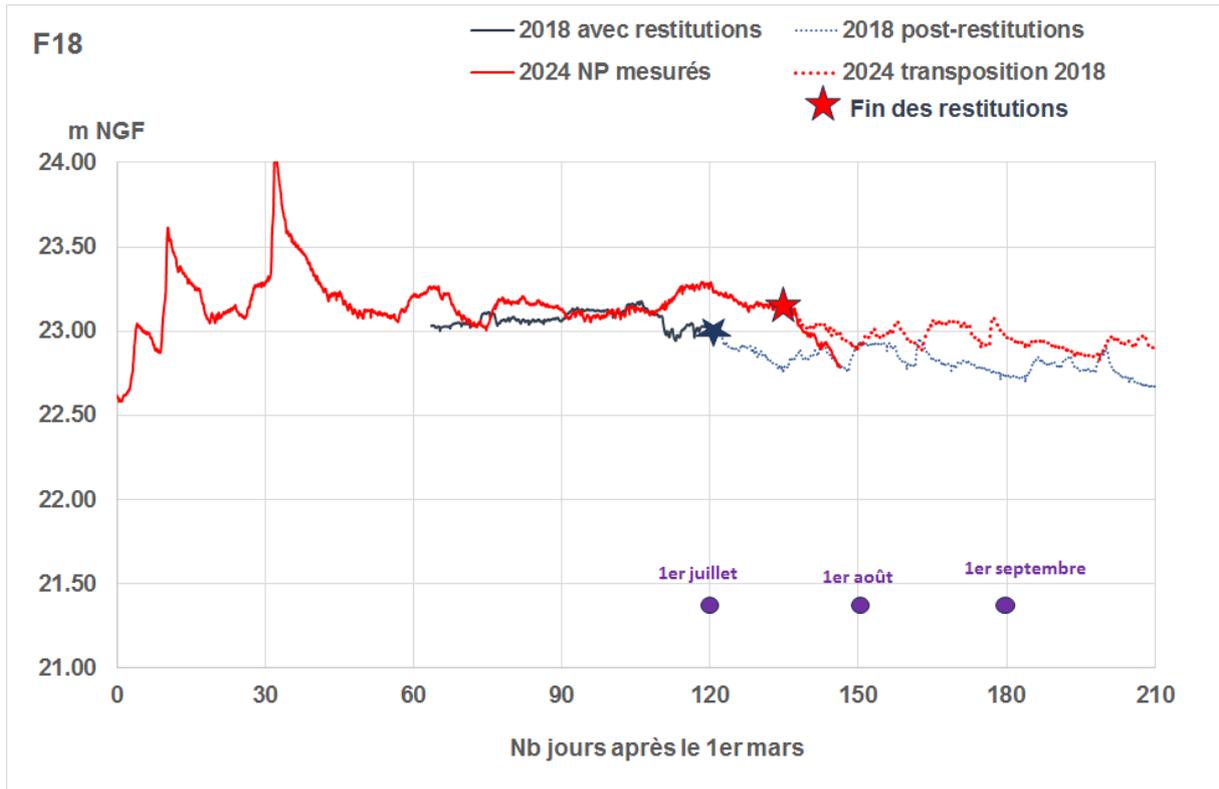
Nous avons donc reporté sur les chroniques 2024, les variations consécutives, « brutes » à l'arrêt des restitutions observés en 2018.

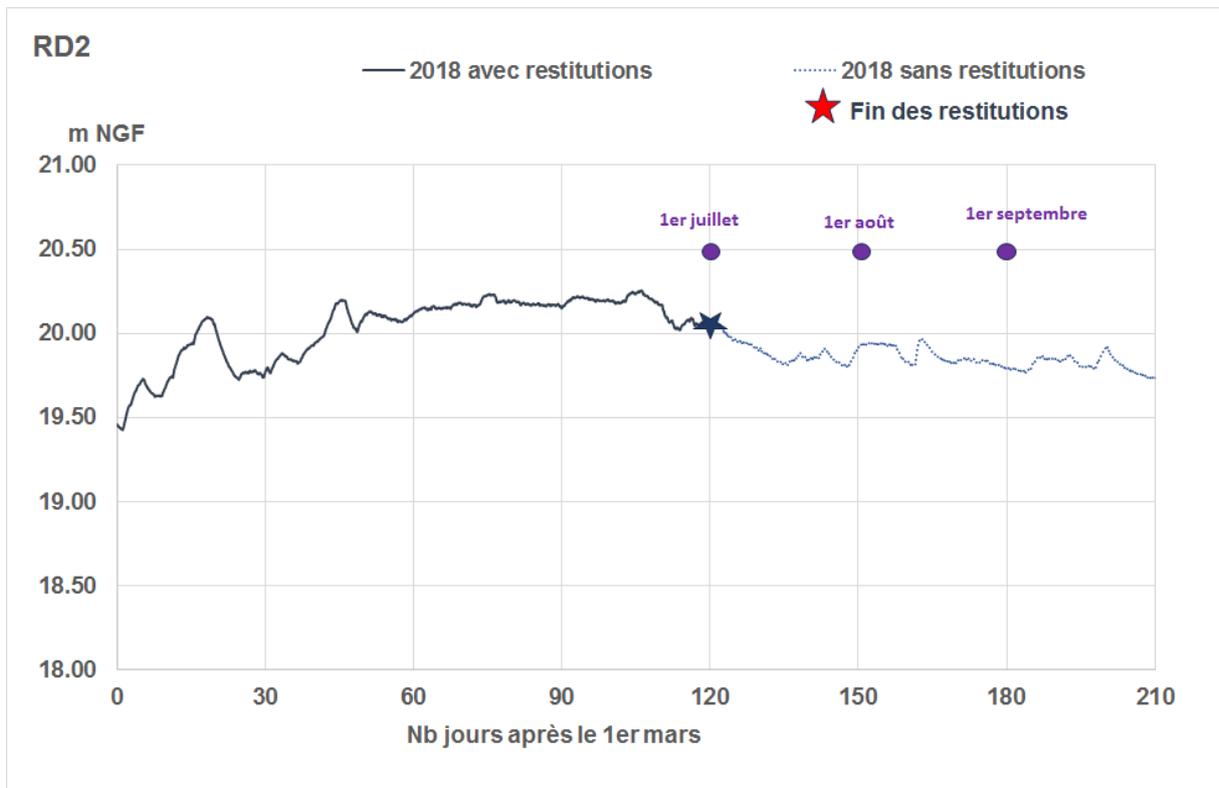
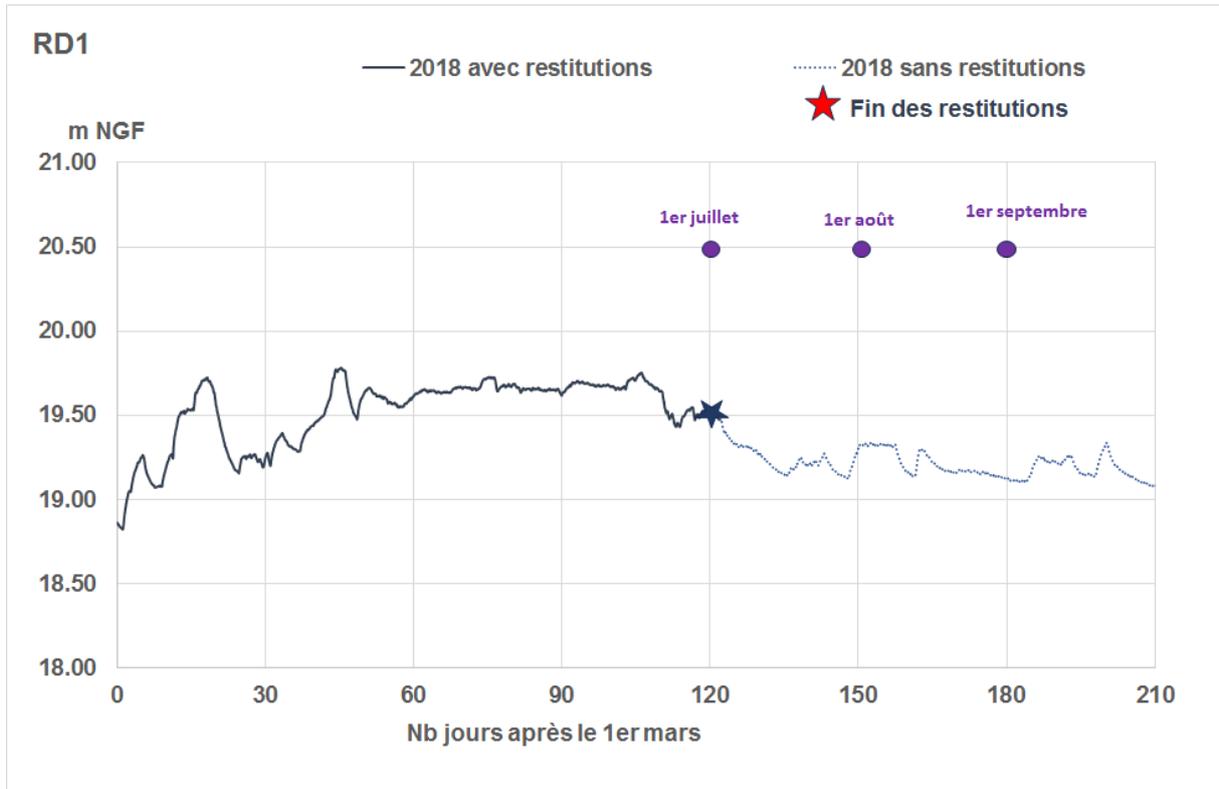
Figure 35: Situations piézométriques théoriques attendues sur un nombre limité de piézomètres par extrapolation des variations de nappe observées en 2018.











8.3. DETERMINATION DE LA PIEZOMETRIE NON-INFLUENCEE PAR LES TRAVAUX

POSITION DU PROBLEME

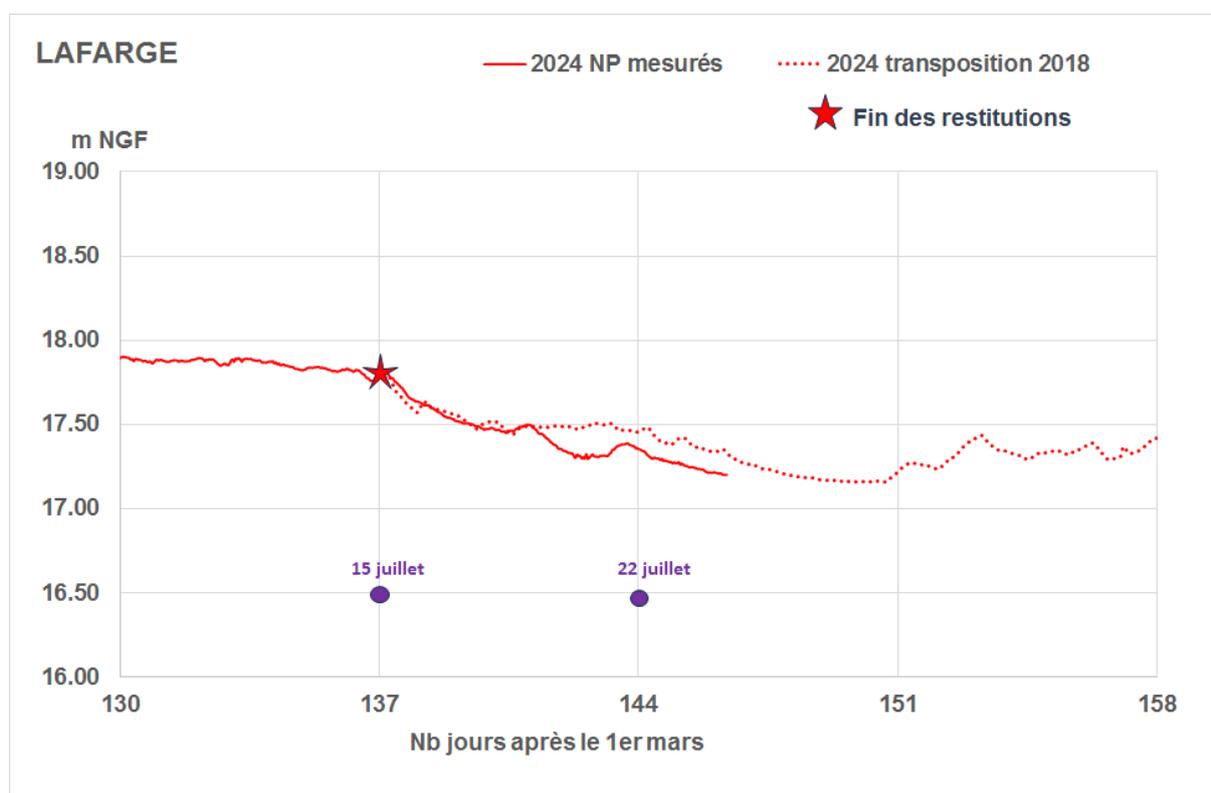
Les courbes ci-dessous illustrent la situation piézométrique observée au 25 juillet 2024.

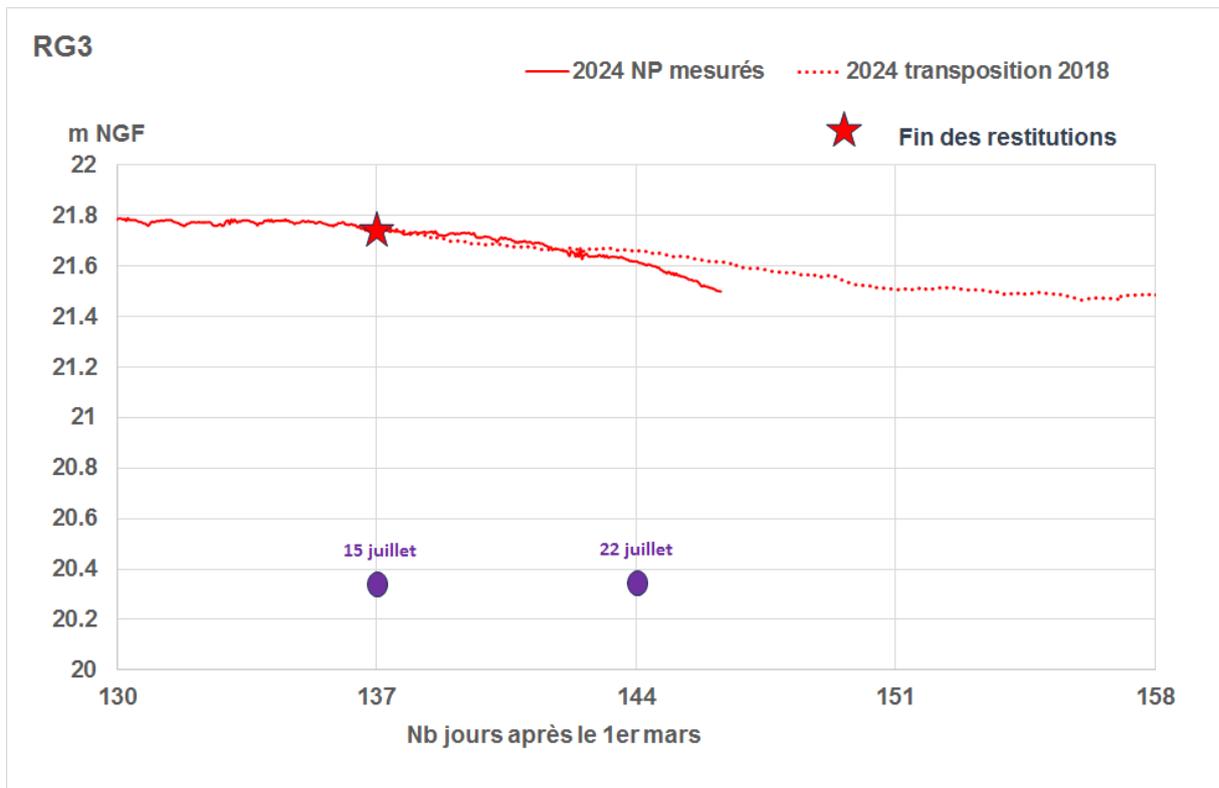
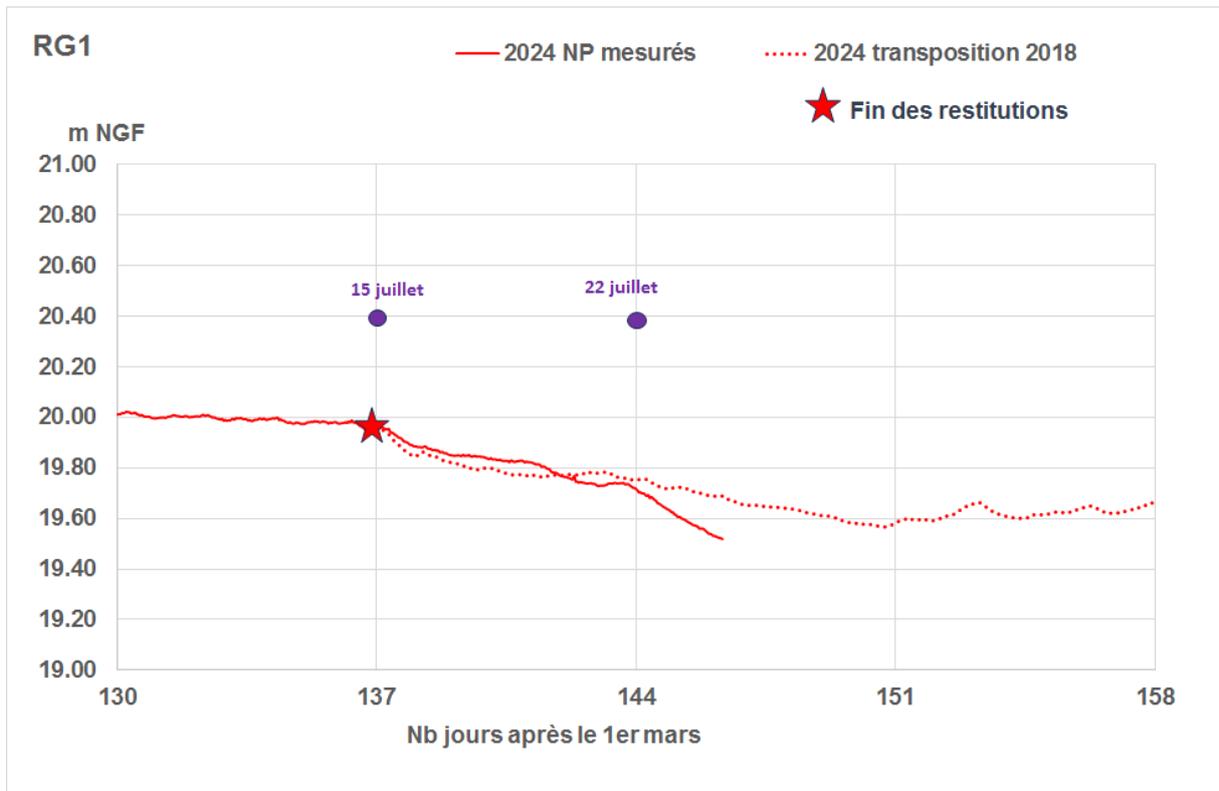
Les restitutions ont été stoppées dans la nuit du 15 au 16 juillet ; les vannes de vidange des seuils 68 et 37 ont été successivement ouvertes les 19 et 20 juillet.

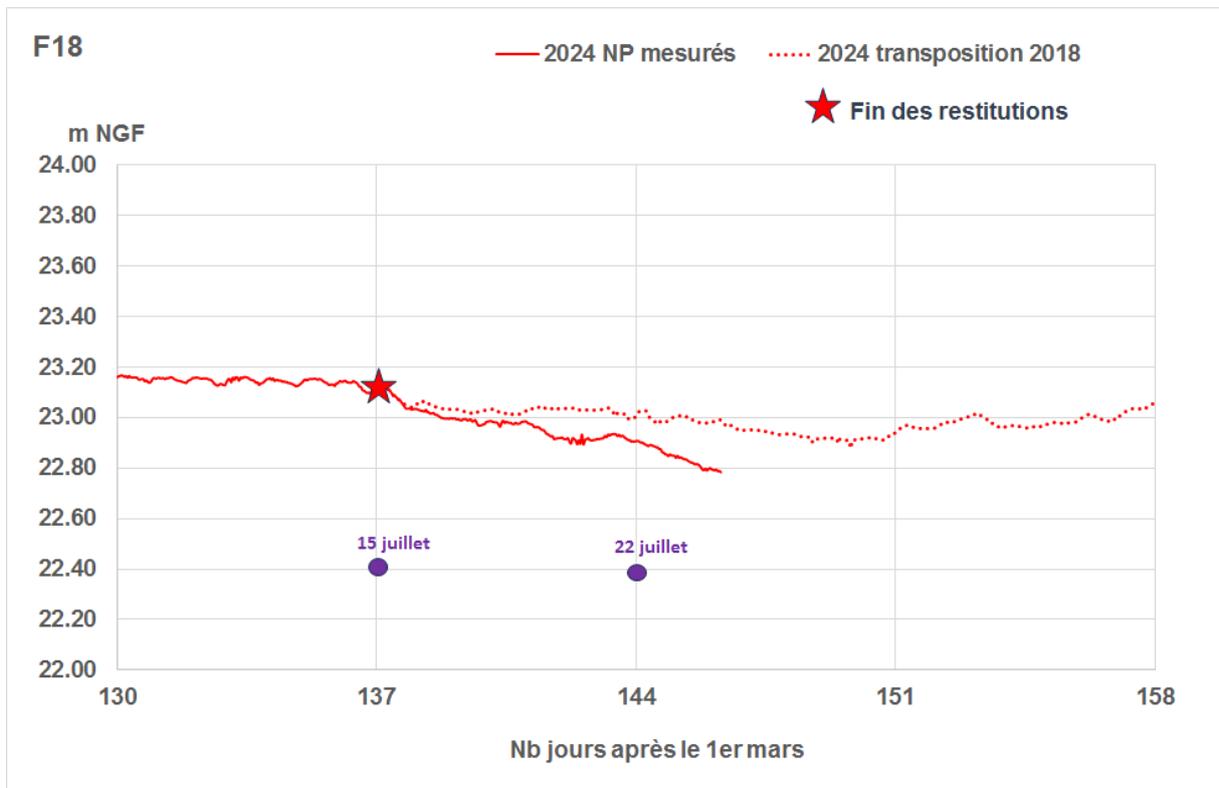
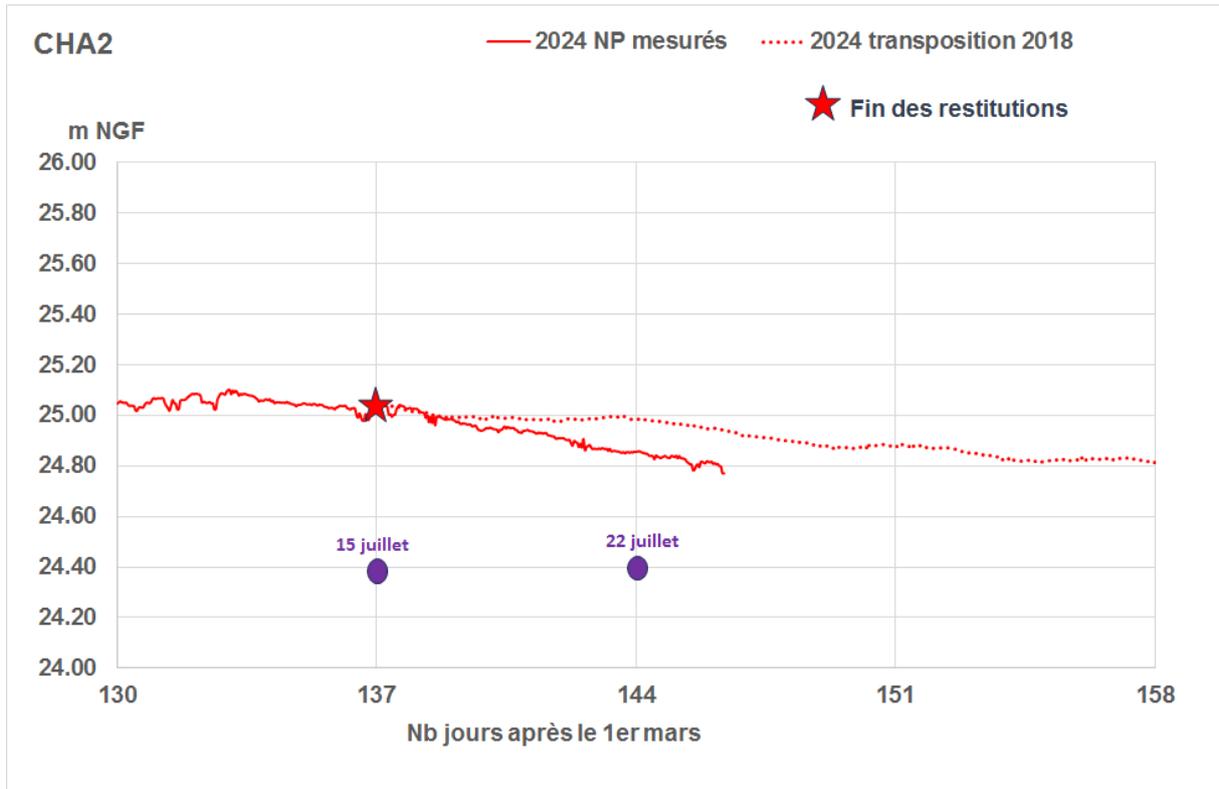
Le piézomètre LAFARGE, très représentatif de l'impact du débit de la Durance sur les niveaux de nappe, permet de constater des augmentations de débit mineures et temporaires les nuits du 21 et 22 juillet. Pour le reste, on observe une décroissance avec une dynamique très proche de celle observée en 2018.

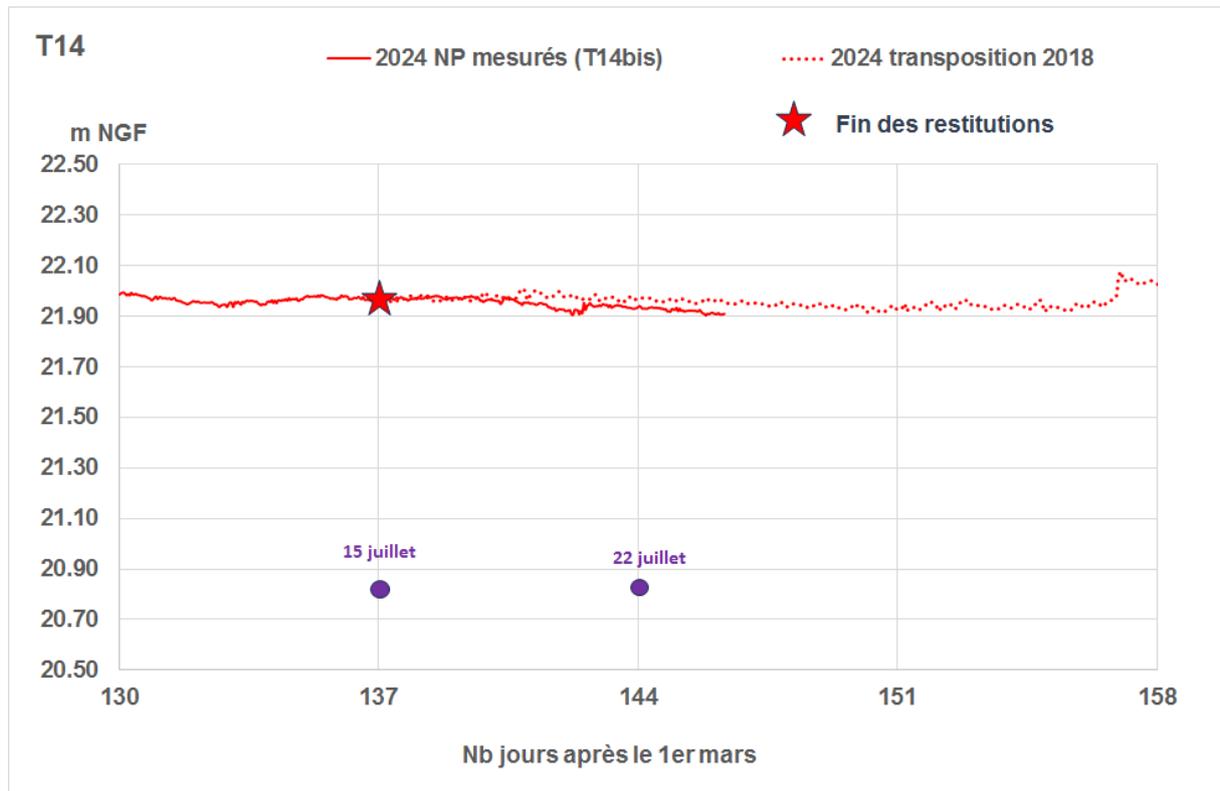
Les autres piézomètres montrent des situations contrastées : influence certaine des travaux qui se traduit par une rupture de pente (RG1, RG3, F18), absence d'influence pour d'autres, éloignés de la Durance (T14, CHA2 a priori).

Situations piézométriques observées en juillet 2024, comparées aux évolutions enregistrées en 2018









Après concertation avec le SMAVD, il avait été décidé d'essayer de caler des lois de comportement de long terme sur l'ensemble des piézomètres de suivi. Pour les piézomètres influencés, le calage se faisait sur la partie de la courbe non influencée par les travaux ; pour les autres, la période de calage s'étendait du 16 au 25 juillet. Cette approche s'est révélée non conclusive avec des comportements extrapolés au long terme (à partir du 15 août), qui étaient non cohérents avec les minimas enregistrés en période hivernale par le passé.

Après de nombreuses recherches, il est apparu que la méthode la plus robuste pour estimer un éventuel impact des travaux était d'adopter une loi de comportement linéaire, défini entre un maxima (NP observé avant début de l'impact des travaux, marqué par un point d'inflexion) et un minima déterminé arbitrairement comme le NP le plus bas enregistré dans les chroniques historiques (ante2024) et reporté au 15 mars 2025 (date approximative récurrente d'observation des minimas piézométriques).

Cette approche est basée pour partie sur du dire d'experts, avec un certain degré d'incertitude associé :

- Par la détermination du point d'inflexion qui marque le début de l'influence des travaux. Sur certains piézomètres, il est évident mais sur d'autres, plus lointains de la zone travaux, il est nécessairement spéculatif. Pour ces derniers, nous avons cherché un point d'inflexion au-delà du 26 juillet.

- Par le choix de la loi de comportement. Le choix d'une loi de comportement linéaire est un choix volontairement pessimiste ; en ne tenant pas compte des variations de plus court terme (amortissement généralement de type logarithmique pour passer des NP hauts aux NP bas), on maximise les impacts potentiels.

Proposition de chroniques piézométriques non influencées par les travaux

Le tableau ci-dessous résume les paramètres clés de la procédure de calage et propose une première estimation des impacts associés à la réalisation des travaux durant l'été 2024 :

ID piézomètre	Point inflexion	Estimation impact travaux (cm)	NP bas historique	Autres observations
LAFARGE		Nul	16,88	Champ proche Durance
RG1	22-juil	50	19,06	Champ proche Durance
RG6	27-juil	30	19,30	
RG3	23-juil	40	20,80	
RG4	25-juil	50	21,85	Champ proche Durance
F21	23-juil	<30	21,50	Influence CC Euze
PZ4	24-juil	<30	22,10	Influence CC Euze
RG5	23-juil	<30	22,6	Influence CC Euze
CHA2	26-juil	<30	23,80	Influence CC Euze
RG8		Nul	24,50	Champ proche Durance
RG7		Nul	27,50	Champ proche Durance
RD8	22-juil	40	18,8	
RD4	22-juil	50	20,40	Champ proche Durance
T13	25-juil	<20	19,85	
T14		Nul	20,74	
RD5		Nul	20,60	
RD6	23-juil	<20	22,00	
F18	22-juil	30	22,20	
I1		Nul	24,00	Champ proche Durance
I9		Nul	25,60	Champ proche Durance
PZD5		Nul	22,30	
KPA5		Nul	25,10	Influence CC Saignonne

Synthèse des paramètres de détermination du régime non influencé et estimation des impacts

Les courbes ci-dessous permettent de visualiser les chroniques piézométriques enregistrées durant l'été 2024 et les propositions en termes d'évolution probable des niveaux de nappe dans une situation non influencée par les travaux.

A noter que pour les piézomètres en place en 2018, la méthode d'estimation de la situation non influencée donne des variations très proches de celles enregistrées en 2018, ce qui est un indice de robustesse de la méthode.

Rappelons ici les travaux réalisés durant l'été sur le champ captant d'Auriac-Lieuze qui ont « pollué » les niveaux de nappe de façon évidente sur le piézomètre CHA2, de façon plus secondaire pour les piézomètres F21, RG5 et RG8

Chroniques piézométriques observées durant l'été 2024 et situation piézométrie non influencée supposée.

