



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

Document à accès immédiat

# Évaluation de la drainance entre aquifères dans le bassin des Trois-Rus (Authion, Maine-et- Loire)

Rapport final

**BRGM/RP-73908-FR**

Version 2 du 24 mars 2025

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques

**T. Klinka, P. Chrétien, A. Sebai**

1.89 3740.46 -625.5

*Ce rapport a été vérifié le 26/09/2024 et approuvé le 14/10/2024 selon la procédure interne en vigueur au sein du BRGM, qui garantit le respect de ses engagements contractuels, de l'intégrité et de l'impartialité du contenu scientifique et technique du présent rapport, de l'éthique et de la déontologie du BRGM, ainsi que des dispositions réglementaires et législatives auquel il est soumis pour l'exercice de son activité.*

**Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.**

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)



**SMBAA**  
Syndicat Mixte du Bassin de

## Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu contractuellement.

Le demandeur assure lui-même la diffusion qu'il souhaite des exemplaires de ce tirage initial, dont il est seul propriétaire.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur, ainsi que par les termes de la convention.

Les justificatifs du contrôle qualité de ce rapport (auteur, vérificateur, approbateur) peuvent être communiqués à titre confidentiel au destinataire du rapport, à sa demande et dans le strict respect de la réglementation applicable au traitement des données à caractères personnels.

Le BRGM ne saurait être tenu responsable de la divulgation du contenu total ou partiel de ce rapport à un tiers non-autorisé qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

## Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



### Mots clés :

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**T. Klinka, P. Chrétien, A. Sebai** 2025. Évaluation de la drainance entre aquifères dans le bassin des Trois-Rus (Authion, Maine-et-Loire). Rapport final V2. BRGM/RP-73908-FR, 57 p.

© BRGM, 2025, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.  
IM003-MT008-P2-08/04/2024

## Synthèse

Depuis 2004, le suivi des variations de l'aquifère séno-turonien libre réalisé par le BRGM au moyen du piézomètre BSS001FEJP à Neuillé (Maine-et-Loire) montre une tendance à la baisse, qu'il n'a pas été possible d'expliquer de façon univoque lors de précédents travaux (Chrétien et al., 2011).

Le Syndicat Mixte du Bassin de l'Authion et ses Affluents (SMBAA) et le BRGM ont noué un partenariat en 2020 pour faire progresser la connaissance des eaux souterraines du bassin versant. L'action 3 de la convention SMBAA-BRGM a pour objectifs de déterminer si des échanges par drainance verticale pouvaient avoir lieu dans les unités de gestion (UG) 6 et 9 entre les sables du Cénomaniens inférieur, captifs sous les marnes à ostracées, et l'aquifère sablo-crayeux séno-turonien libre. La question qui se pose est celle des intenses prélèvements saisonniers dans les sables cénomaniens captifs, et leurs éventuels impacts sur la ressource séno-turonienne libre.

Pour apporter des premiers éléments de réponse à cette interrogation, le BRGM a mené en mars 2024 un pompage d'essai de 72h au moyen d'un forage au Cénomaniens à Neuillé (Maine-et-Loire, UG 6), tout en enregistrant les variations piézométriques dans les aquifères en présence (sables cénomaniens captifs et tuffeau séno-turonien libre). Outre le puits de pompage, quatre piézomètres ont été instrumentés de sondes piézométriques (trois piézomètres au Séno-Turonien et un piézomètre au Cénomaniens). Un piézomètre a été foré spécialement pour l'occasion à proximité immédiate du puits de pompage.

Les résultats de l'essai sont interprétés avec la méthode de Hantush avec drainance verticale, mais également par la méthode en dérivée au puits de pompage. La modélisation de l'essai a permis d'estimer la transmissivité de l'aquifère cénomaniens entre  $4,1$  et  $4,5 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, et son coefficient d'emmagasinement à  $2,5 \times 10^{-4}$ .

Par ailleurs, un effet de drainance est mis en évidence entre les sables cénomaniens captifs et le tuffeau séno-turonien libre, à travers les marnes à ostracées. L'impact du pompage dans l'aquifère captif sur l'aquifère de surface existe et a pu être simulé. Le rabattement engendré par un seul pompage sur l'aquifère de surface demeure modeste (de l'ordre de 20 cm à une distance d'un mètre du puits de pompage), mais le cumul des pompages de tous les forages du secteur de Neuillé pourrait être significatif pour la piézométrie du tuffeau. En effet, le calcul du flux de drainance montre qu'après moins de 40 j de pompage, le volume extrait des sables cénomaniens par pompage est intégralement remplacé par un volume équivalent provenant du tuffeau.

Ces résultats obtenus sur la base d'un unique essai de nappe sont pertinents à la Malgagne, mais leur extrapolation à l'ensemble des UG 6 et 9 demeure limitée et incertaine. Afin de prolonger ce travail, il serait intéressant :

- de réinterpréter avec la méthode de la dérivée des rabattements d'autres essais de nappe dont les données brutes sont disponibles dans les UG 6 et 9 ;
- de caractériser les signatures isotopiques des eaux souterraines afin d'identifier les venues d'eau turonienne dans l'aquifère cénomaniens ;
- d'estimer l'impact cumulé de tous les pompages actifs dans les sables cénomaniens des UG 6 et 9 au droit des captages AEP de Neuillé.



## Sommaire

1. Introduction .....	9
2. Examen de la drainance entre Cénomaniens inférieurs et Séno-Turonien dans le bassin des Trois-Rus.....	11
2.1. Contexte hydrogéologique.....	11
2.2. Réalisation d'un essai de nappe (longue durée) dans les sables cénomaniens inférieurs captifs.....	12
2.2.1. Recherche de sites propices à la réalisation de l'essai de nappe longue durée...	13
2.2.2. Protocole expérimental.....	17
2.2.3. Résultats.....	17
2.2.4. Interprétation de l'essai de longue durée.....	29
2.2.5. Quantification de l'effet de la drainance.....	36
2.2.6. Synthèse des interprétations.....	42
3. Conception d'un site témoin pour l'étude des relations nappe-plan d'eau.....	43
3.1. Proposition de sites d'investigations.....	43
3.2. Instrumentation possible du site retenu .....	43
4. Conclusions.....	45
5. Bibliographie .....	47

## Liste des illustrations

Illustration 1 : Chronique piézométrique de l'aquifère du tuffeau séno-turonien à Neuillé (BSS001FEJP).....	9
Illustration 2 : Coupe géologique schématique du coteau de Neuillé (l'échelle verticale est fortement dilatée) adapté de Chrétien et al., 2011.....	11
Illustration 3 : Extrait de la carte géologique harmonisée au 1/50 000 du Maine-et-Loire dans le secteur de Neuillé (UG9).....	12
Illustration 4 : Secteurs à investiguer pour identifier le site propice à la réalisation de l'essai de nappe.....	14
Illustration 5 : Situation générales des ouvrages identifiés à proximité du forage BSS003CKLY.....	15
Illustration 6 : Localisation des ouvrages d'intérêt pour le suivi de l'essai de nappe longue durée.....	16
Illustration 7 : Données brutes de suivis en pression (profondeur) et débit de pompage au PP BSS003CKLY.....	19
Illustration 8 : Données brutes de suivis en pression (profondeur, en noir) et débit de pompage simplifié (en rouge) au PP BSS003CKLY (en haut, échelle arithmétique, en bas échelle semi-logarithmique).....	20
Illustration 9 : Suivi des cotes piézométriques des ouvrages suivis avant, pendant et après le pompage (11-14/03/2024), sur les deux axes verticaux dh=1m.....	22
Illustration 10 : Evolution des niveaux souterrains dans la nappe libre (dh = 0.8 m) et précipitations journalières.....	23

Illustration 11 : Evolution des niveaux souterrains dans la nappe captive/semi-captive (dh = 1 m) et précipitations journalières. ....	24
Illustration 12 : Niveaux souterrains (en bleu) au droit du puits Rabineau et chronique de débit simplifiée au puits de pompage (en rouge). Haut : période complète de mesure, bas : zoom sur la période de l'essai de longue durée.....	25
Illustration 13 : Niveaux souterrains (en bleu) au droit du puits Godineau et chronique de débit simplifiée au puits de pompage (en rouge). Haut : période complète de mesure, bas : zoom sur la période de l'essai de longue durée.....	26
Illustration 14 : Profondeurs du niveaux (en bleu) au droit du puits Rabineau et chronique de débit simplifiée au puits de pompage (en rouge). Haut : période complète de mesure, bas : zoom sur la période de l'essai de longue durée.....	27
Illustration 15 : Rabattement au droit du forage BSS001HKXN. Haut : période complète de mesure, bas : zoom sur la période de l'essai de longue durée. ....	28
Illustration 16 : Schéma de principe de l'impact d'un puits de pompage sur les niveaux souterrains à un instant temps « t » et ouvrage adjacent captant le même aquifère. ....	29
Illustration 17 : En haut, diagnostic de l'essai en dérivée, en bas, calage à l'aide de la solution de Hantush. ....	31
Illustration 18 : Interprétation au puits de pompage selon la méthode de Hantush (courbe rose) selon une échelle arithmétique (en haut) et semi-logarithmique (en bas), en bleu variation du débit de pompage, points jaune/orange rabattement à la descente/remontée. ....	33
Illustration 19 : Interprétation au point d'observation BSS001HKXN selon la méthode de Hantush (courbe rose) selon une échelle arithmétique (en haut) et semi-logarithmique (en bas), en bleu variation du débit de pompage, points jaune/orange rabattement à la descente/remontée. ....	35
Illustration 20 : En rose solution de Hantush, en rouge solution de Theis (en haut : échelle arithmétique, en bas : échelle logarithmique). Simulation du rabattement durant un an de pompage continu à 18 m <sup>3</sup> /h. ....	37
Illustration 21 : Schéma de la solution permettant de restituer l'impact d'un pompage dans un aquifère captif sur l'aquifère de surface au travers d'une éponte semi-perméable. ....	38
Illustration 22 : Paramètre de la solution analytique. ....	38
Illustration 23 : Simulation de l'impact sur l'aquifère de surface en termes de rabattement (en haut : scénario $T = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , en bas : $T = 4,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ). ....	40
Illustration 24 : Calcul du flux de drainance en provenance de l'aquifère supérieur selon un débit de pompage de 40 m <sup>3</sup> /h. ....	41
Illustration 25 : Carte non exhaustive de sites adaptés aux observations des relations entre eaux souterraines et plans d'eau. ....	43

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Dates de suivi des ouvrages lors de l'essai de nappe. ....	18
Tableau 2 : Caractéristiques des ouvrages suivis lors de l'essai de longue durée.....	18
Tableau 3 : Chronique de débit de pompage simplifiée au PP BSS003CKLY du 11 au 14/03/2024. ....	21
Tableau 4 : Plages de variations des cotes piézométriques des ouvrages suivis entre le 20/03/2024 et le 22/03/2024 (* = hors pompage). ....	22

## Liste des annexes

Annexe 1	Coupe technique du puits de pompage BSS003CKLY .....	49
Annexe 2	Coupe technique du piézomètre BSS004KHBP .....	53
Annexe 3	Interprétation des pompages d'essai selon la méthode de Theis .....	55
Annexe 4	Inventaire des méthodes d'investigation possibles et objectifs recherchés .....	61



## 1. Introduction

L'aquifère du Séno-Turonien à Neuillé (UG 6 et 9 du bassin versant de l'Authion) est exploité pour la production d'eau potable au moyen des captages de Boisaudier, la Petite Rue Noire, et Bois de Buton (ce dernier appartenant à la commune de Vernantes). Depuis 2004, la ressource en eaux souterraines voit son niveau piézométrique baisser, comme l'illustre la chronique du piézomètre DCE BSS001FEJP implanté à Petite Rue Noire dans l'UG6 (cf. Illustration 1).

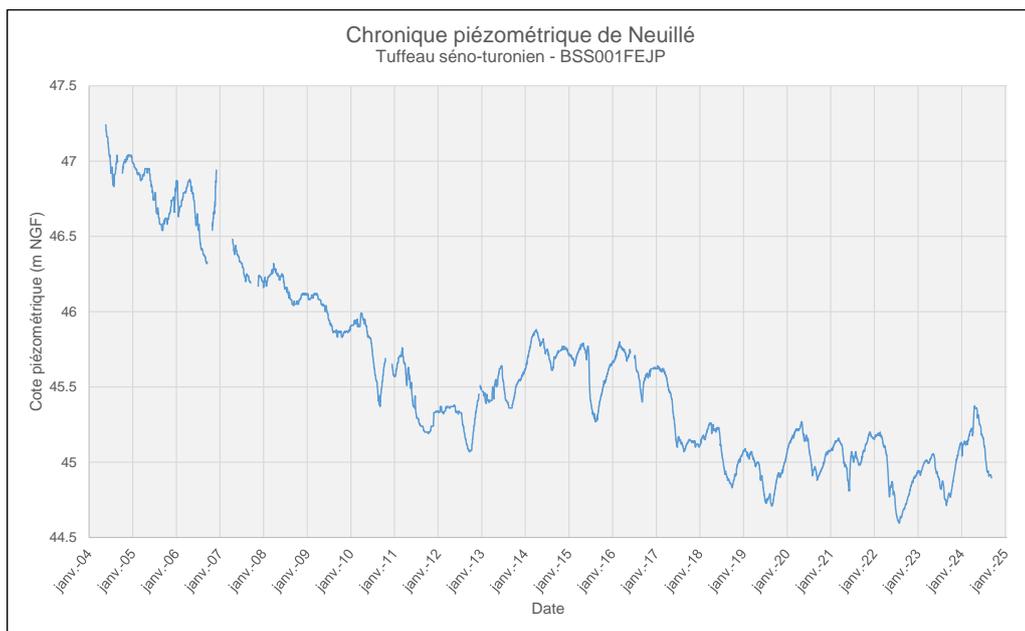


Illustration 1 : Chronique piézométrique de l'aquifère du tuffeau séno-turonien à Neuillé (BSS001FEJP).

De premières investigations ont été réalisées par le BRGM en 2011 (Chrétien et al., 2011) mais n'ont pas permis d'identifier l'origine de cette baisse.

Le Syndicat Mixte du Bassin de l'Authion et de ses Affluents (SMBAA) souhaite poursuivre ces investigations. En partenariat avec le SMBAA, l'étude menée par le BRGM vise à déterminer si les prélèvements effectués dans les sables cenomaniens inférieurs dans le secteur du bassin des Trois Rus sont susceptibles d'avoir une incidence significative sur le réservoir du tuffeau Séno-turonien. Pour cela, l'étude vise à mettre en évidence les éventuels échanges entre l'aquifère des sables cenomaniens inférieurs captifs et l'aquifère du tuffeau séno-turonien sus-jacent, par drainance au travers des marnes à ostracées.



## 2. Examen de la drainance entre Cénomaniens inférieur et Séno-Turonien dans le bassin des Trois-Rus

### 2.1. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Les formations géologiques rencontrées dans le secteur d'étude sont de nature sédimentaire et appartiennent au Bassin Parisien. On rencontre notamment, de haut en bas (cf. Illustration 2 & Illustration 3) :

- les grès bartoniens, dont la présence dans l'UG9 se cantonne au sommet des plateaux crayeux. Ces grès peuvent se trouver sous forme friable et s'apparentent alors à des sables. Ils proviennent du remaniement des sables sénoniens sur place ou à faible distance ;
- les sables gréseux coniaciens (Sénonien inférieur) ;
- les sables turoniens ;
- la craie turonienne (tuffeau d'Anjou). C'est une craie blanche, tendre, souvent friable ;
- les marnes à ostracées cénomaniennes, dont l'épaisseur avoisine 12 m ;
- les sables cénomaniens (sables du Maine), au sein desquels il est possible de distinguer les sables du Perche et les sables de la Trugalle sous-jacents.

À cela s'ajoutent les alluvions modernes et les alluvions anciennes de très basses terrasses de l'Authion qui ont été déposées sur les formations cénomaniennes (marnes ou sables).

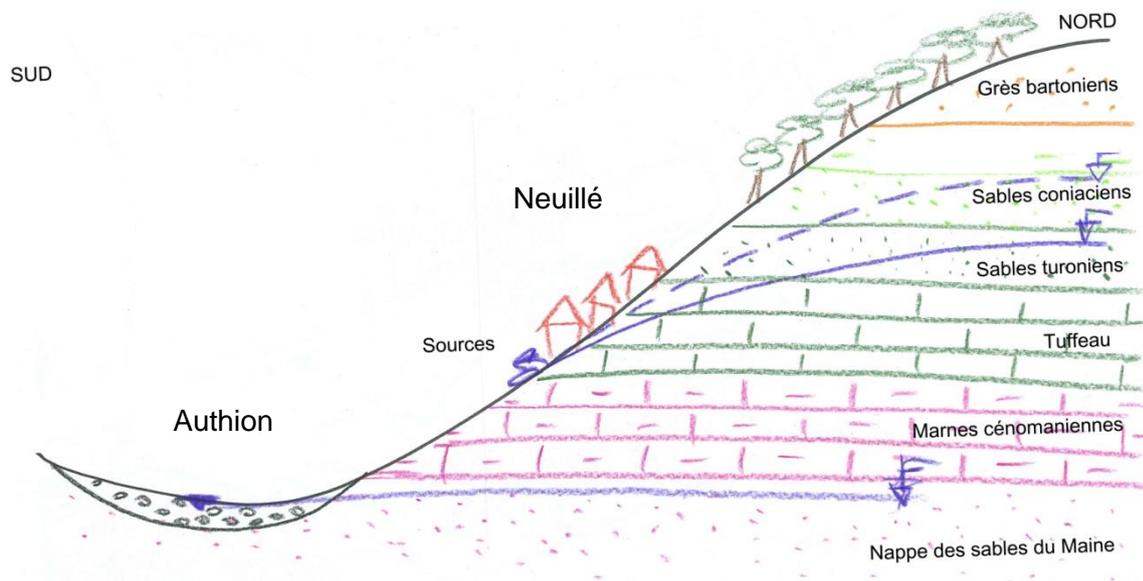


Illustration 2 : Coupe géologique schématique du coteau de Neuillé (l'échelle verticale est fortement dilatée) adapté de Chrétien et al., 2011.

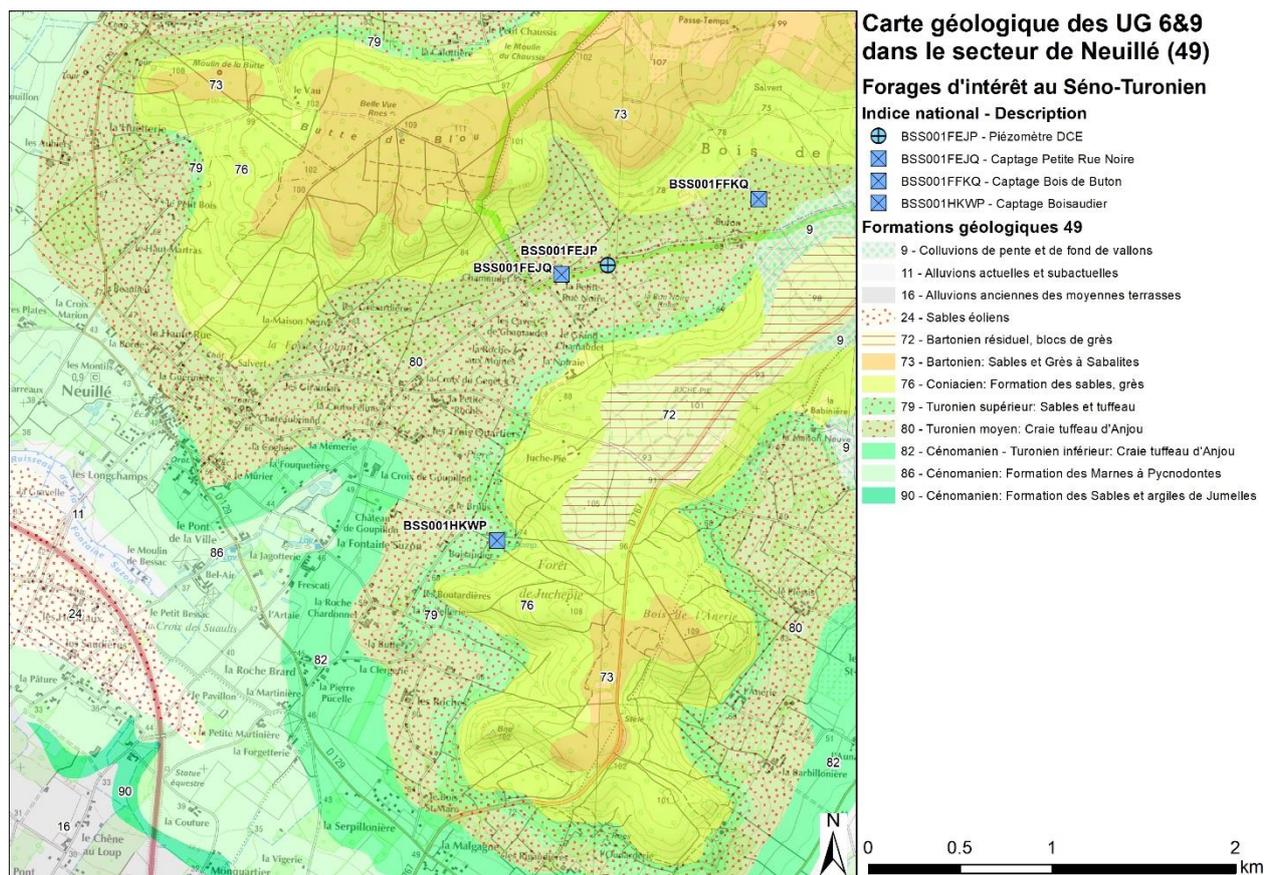


Illustration 3 : Extrait de la carte géologique harmonisée au 1/50 000 du Maine-et-Loire dans le secteur de Neuillé (UG9).

Les ressources en eau souterraine sont présentes par les aquifères suivants :

- les alluvions de l'Authion, qui peuvent être hydrauliquement connectées aux sables cénomaniens lorsqu'elles reposent directement sur eux (dans les cas où les marnes à ostracées sont absentes) ;
- l'aquifère séno-turonien, constitué de l'ensemble formé par les réservoirs gréso-sableux du Coniacien et du Turonien et la craie turonienne. Le niveau piézométrique de cet aquifère multicouche s'établit en règle générale dans le tuffeau ;
- l'aquifère des sables cénomaniens.

## 2.2. REALISATION D'UN ESSAI DE NAPPE (LONGUE DUREE) DANS LES SABLES CENOMANIENS INFÉRIEURS CAPTIFS

Un essai de nappe de longue durée (durée de pompage supérieure à 72 h) a permis de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques des sables cénomaniens captifs. L'essai permet également d'apporter des éléments quantitatifs sur la drainance éventuelle qui se joue entre les sables cénomaniens captifs et le tuffeau Séno-Turonien, *via* les marnes cénomaniennes à ostracées.

Dans ce chapitre, on décrit le protocole expérimental mis en place dans ce dessein, les données brutes à l'issue de cet essai, les interprétations qui en découlent et enfin les incidences en termes de drainance.

### 2.2.1. Recherche de sites propices à la réalisation de l'essai de nappe longue durée

Pour la bonne réalisation de l'essai de nappe et l'atteinte des objectifs de l'étude, il convient de disposer :

- d'un puits de pompage (forage) dans le Cénomaniens (captif) ;
- d'un piézomètre de contrôle dans le Turonien (libre, situé en surface).

Le programme technique du partenariat conclu entre le SMBAA et le BRGM ne prévoit pas que soient réalisés des travaux de forage. C'est la raison pour laquelle dans un premier temps, le BRGM a recherché dans la BSS des forages propices à la réalisation de l'essai.

Pour cela, nous avons procédé en deux temps :

#### a) Recherche de secteurs d'investigation à partir de données bibliographiques

Ces secteurs ont été délimités en croisant plusieurs critères. Les critères favorables étaient les suivants :

- Présence du tuffeau à l'affleurement ;
- Existence de forages (connus en BSS ou dans une base fournie par le SMBAA<sup>1</sup>) captant les sables cénomaniens uniquement (disposant donc d'une coupe technique prouvant que la cimentation isole bien l'aquifère turonien) ;
- Existence de puits ou forages (connus en BSS ou dans une base fournie par le SMBAA<sup>1</sup>) captant le tuffeau séno-turonien uniquement (possibilité de s'en assurer grâce à la connaissance de la profondeur de l'ouvrage) ;
- Présence d'habitat ancien proche (pour maximiser les chances de trouver un puits dans le tuffeau, ces puits n'étant pas toujours connus en BSS) – cette information peut être obtenue par l'observation des photos aériennes, sur lesquelles l'habitat ancien se repère aux rues étroites et tortueuses et bâtiments mitoyens, puis se confirme par exemple aux moyens de Google Street View.

À l'issue de ce travail, huit secteurs d'investigation ont été proposés par le BRGM au SMBAA (cf. Illustration 4 : Secteurs à investiguer pour identifier le site propice à la réalisation de l'essai de nappe. Illustration 4).

---

<sup>1</sup> Cette base est issue de celle de la Chambre Régionale d'Agriculture qui fait office d'Organisme Unique de Gestion Collective (OUGC) dans le bassin versant de l'Authion.

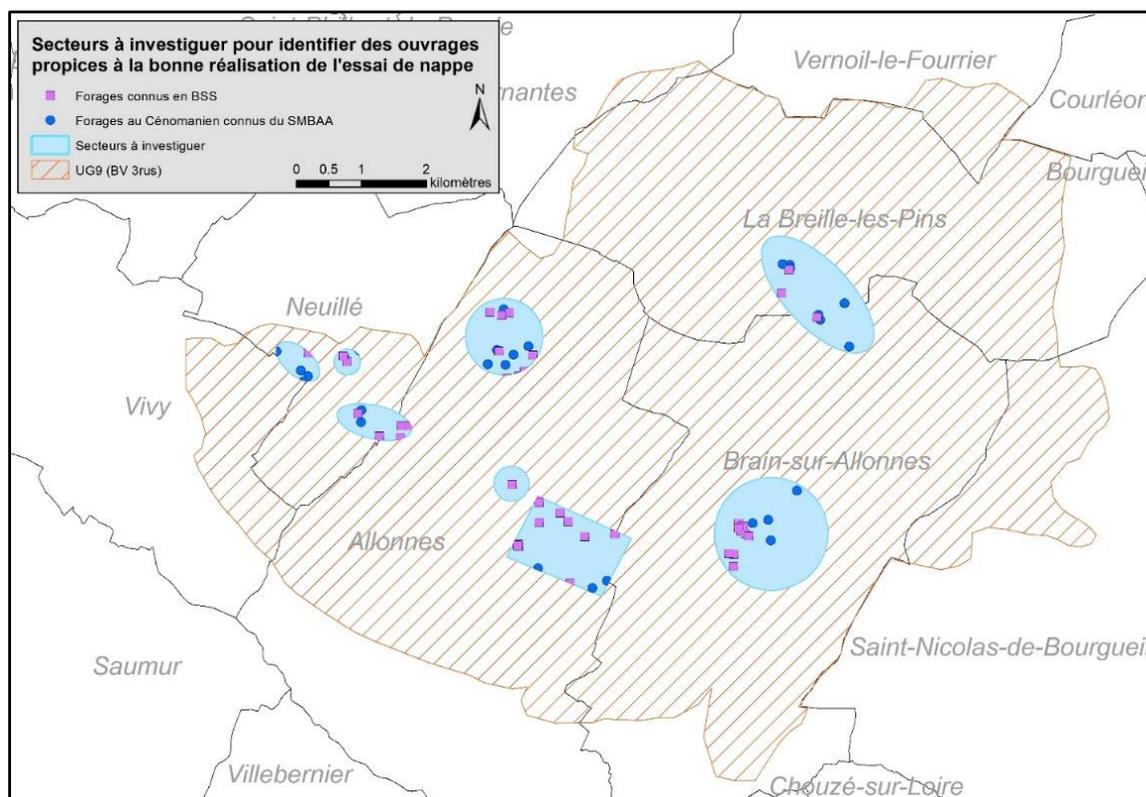


Illustration 4 : Secteurs à investiguer pour identifier le site propice à la réalisation de l'essai de nappe.

*b) Investigations de terrain pour valider le choix du site*

Les 3 et 4 octobre 2023, une équipe constituée d'agents du SMBAA et du BRGM s'est rendue sur le terrain pour inspecter les ouvrages identifiés au sein des secteurs proposés, obtenir l'accord des propriétaires pour la réalisation de l'essai et valider le choix du site le cas échéant.

Ces investigations ont fait l'objet d'un compte-rendu de terrain détaillé transmis au SMBAA en octobre 2023. Il en ressort que le forage BSS003CKLY constitue un candidat valable pour la réalisation de l'essai de nappe :

- il capte les sables cénomaniens et isole le tuffeau séno-turonien ;
- il est en bon état ;
- un fossé en aval du forage permettra d'évacuer l'exhaure sans incidence sur la piézométrie des aquifères en place.

*c) Description du forage BSS003CKLY*

Le forage est implanté au lieu-dit la Malgagne à Neuillé. Il est utilisé pour l'arrosage de vergers (pommes et poires). Il présente une profondeur de 80 m environ. Le niveau statique de la nappe s'établissait à 23,76 m/sol le 4 octobre 2023. Le dossier BSS de ce forage comporte la coupe technique de l'ouvrage (cf. Annexe 1). Celle-ci indique qu'une cimentation de 25 m occulte le premier aquifère (tuffeau) et que des crépines sont positionnées au niveau des sables cénomaniens.

Le dossier loi sur l'eau (disponible en BSS) évoque un essai de 74h (sans suivi piézométrique dans le tuffeau) réalisé entre le 29/03/2012 et le 01/04/2012 dont l'interprétation permet d'estimer la transmissivité de l'aquifère. Cependant, les données brutes de cet essai n'ont pas pu être récupérées auprès du bureau d'études en charge du dossier loi sur l'eau en 2012.

La gérante de la SCEA Terre d'Automne qui exploite les vergers et le forage a donné son accord pour que nous utilisions le forage et le dispositif de pompage en place pour réaliser l'essai. L'entreprise Debernard qui a installé le dispositif de pompage a fourni les informations suivantes :

- Pompe positionnée à 70 m de profondeur
- Débit de la pompe à 60 m de profondeur : 46 m<sup>3</sup>/h
- Débit de la pompe à 55 m : 50,5 m<sup>3</sup>/h

Il est décidé en accord avec l'entreprise GHI-SAS (prestataire du BRGM pour la réalisation du pompage d'essai) d'utiliser la pompe en place pour l'essai de nappe.

d) *Inventaire des piézomètres aux alentours du forage BSS003CKLY*

Plusieurs ouvrages ont été identifiés à proximité du puits de pompage (cf. Illustration 5 et Illustration 6).

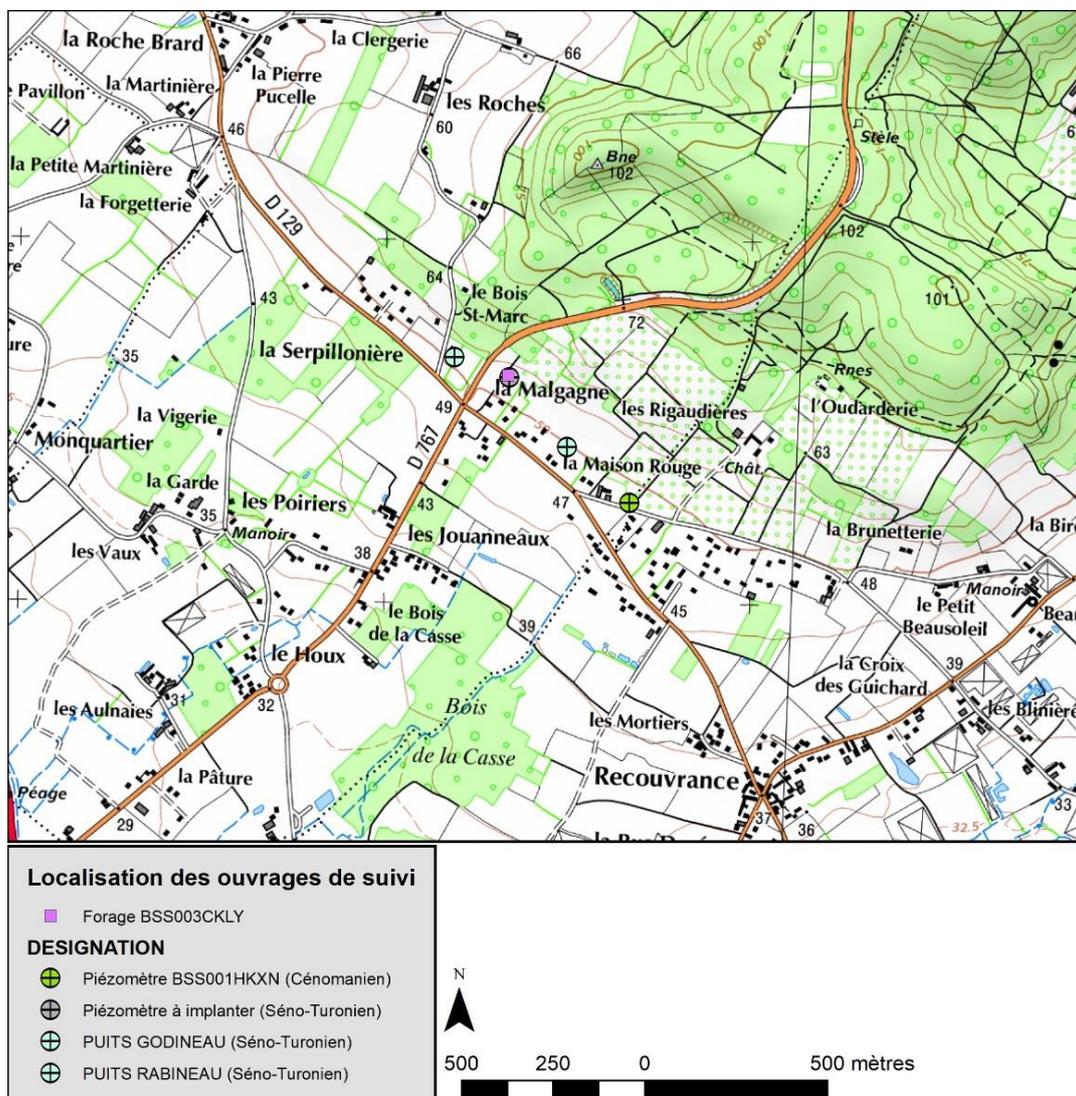


Illustration 5 : Situation générales des ouvrages identifiés à proximité du forage BSS003CKLY.

Le forage BSS001HKXN est utilisé par la SCEA Terre d'Automne pour l'irrigation de ses vergers. Il capte les sables cénomaniens captifs et est éloigné de 500 m du forage BSS003CKLY.

Les puits suivants ont été identifiés dans le Séno-Turonien :

- Puits Godineau, à 150 m du forage BSS003CKLY ;
- Puits Rabineau, à 250 m du forage BSS003CKLY.

Pour maximiser les chances d'atteindre les objectifs de l'étude, il est décidé en accord avec la propriétaire de la parcelle d'implanter un piézomètre dans le tuffeau à proximité immédiate (3 m) du forage BSS003CKLY.

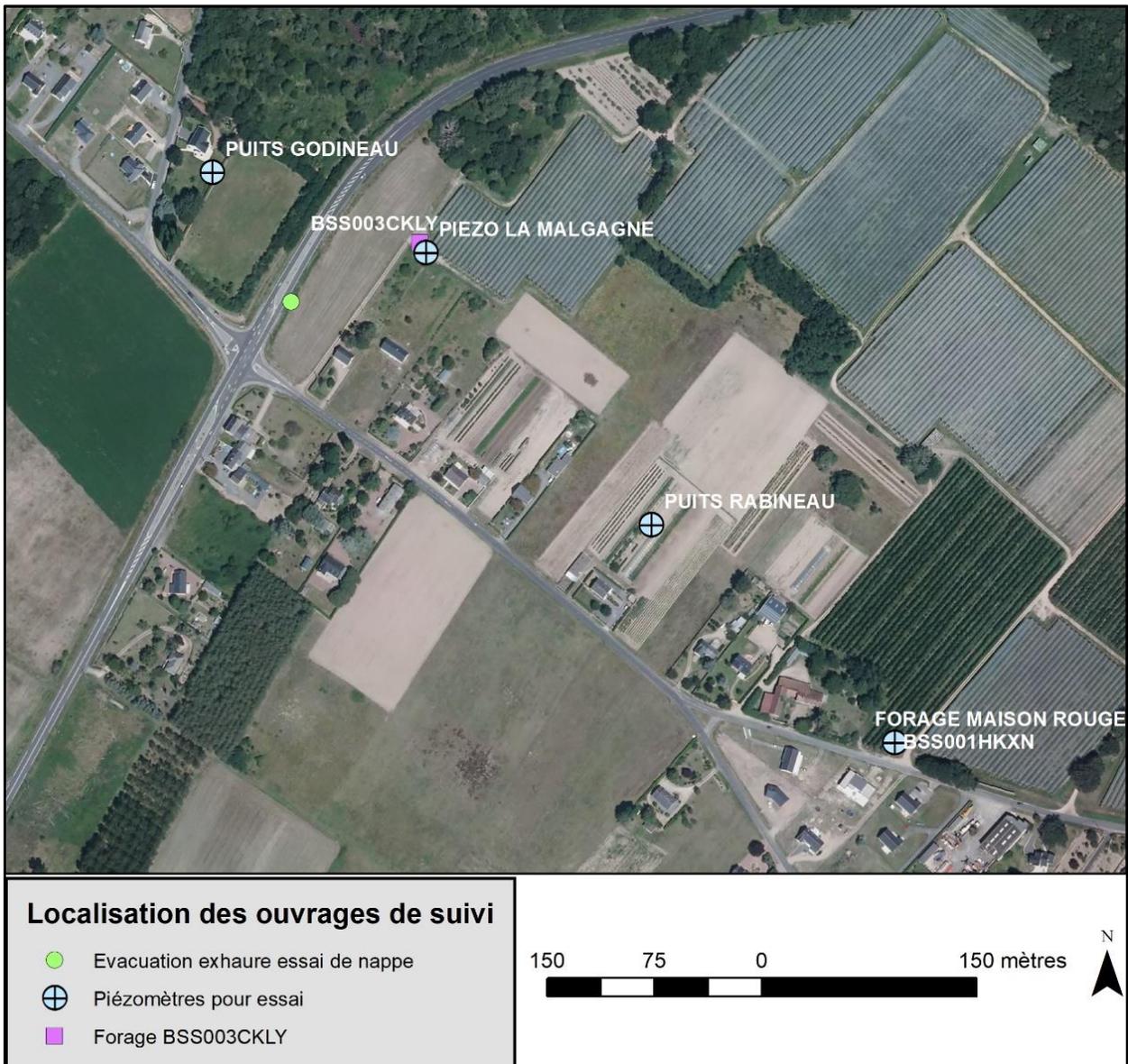


Illustration 6 : Localisation des ouvrages d'intérêt pour le suivi de l'essai de nappe longue durée.

### 2.2.2. Protocole expérimental

Afin d'atteindre les objectifs rappelés ci-dessus, le protocole expérimental prévoit la réalisation des tâches suivantes :

*a) Implantation d'un piézomètre dans le tuffeau séno-turonien*

Ces travaux non prévus initialement au cahier des charges de l'étude sont possibles grâce à l'utilisation du budget prévu pour un deuxième essai de nappe, qui en accord avec notre partenaire le SMBAA, ne sera en définitive pas réalisé.

Les travaux de forage ont eu lieu en février 2024 (Chretien, 2024). Le piézomètre porte l'indice national BSS004KHBP. Sa coupe technique figure en Annexe 2.

*b) Instrumentation des piézomètres*

Le BRGM procède le 20 février 2024 à l'installation de sondes piézométriques dans les quatre piézomètres identifiés.

*c) Pompage d'essai de 72h dans les sables cénomaniens*

Le pompage est confié à l'entreprise GHI SAS prestataire du BRGM. Elle est chargée de suivre en continu :

- les niveaux piézométriques au droit du forage de pompage BSS003CKLY (sables cénomaniens inférieurs) ;
- le débit d'exhaure ;

L'enregistrement des données débute sept jours avant le début de l'essai et se poursuit jusqu'au rétablissement du niveau statique initial (soit 8 jours après la fin de l'essai). GHI-SAS utilise une sonde de mesure non pourvue de dispositif de compensation de la pression atmosphérique et enregistre donc simultanément les variations de la pression atmosphérique.

### 2.2.3. Résultats

L'essai de longue durée a été réalisé à partir du 11/03/2024 à 11h30 au débit moyen de 18 m<sup>3</sup>/h au droit du forage BSS000CKLY. La remontée a été suivie pendant plus de 72h après l'arrêt du pompage. La différence entre le débit de pompage en mars 2023 et le débit de la pompe lors de son installation en 2012 (40 m<sup>3</sup>/h) pourrait provenir du colmatage des crépines du forage. Cette information a été communiquée à la gérante de la SCEA Terre d'Automne, ainsi que les solutions techniques qui pourraient être mises en œuvre pour y remédier.

La campagne d'irrigation n'avait pas démarré le 11 mars 2024. Si l'on néglige les effets d'un test de fonctionnement de la pompe réalisé par l'exploitant pendant une courte durée le 8 mars, la nappe peut être considérée au repos avant la réalisation de l'essai.

Le suivi en pression est disponible au droit des ouvrages suivants pour ces dates (Tableau 1) :

BSS	Date début mesures	Date fin mesures	Durée (j)
<b>BSS003CKLY</b>	05/03/2024 12:53	22/03/2024 10:06	<b>17</b>
<b>BSS004KHBP</b>	20/02/2024 11:00	22/03/2024 10:30	<b>31</b>
<b>Godineau</b>	20/02/2024 16:00	22/03/2024 10:00	<b>31</b>
<b>Rabineau</b>	20/02/2024 14:00	22/03/2024 11:00	<b>31</b>
<b>BSS001HKXN</b>	20/02/2024 13:00	22/03/2024 11:00	<b>31</b>

Tableau 1 : Dates de suivi des ouvrages lors de l'essai de nappe.

Pour mémoire ces ouvrages correspondent aux entités hydrogéologiques suivantes :

- BSS003CKLY : puits de pompage (PP), captant les sables du cénonanien captifs,
- BSS004KHBP : point d'observation (PO), à 3 m du PP, captant la nappe libre sus-jacente (tuffeau séno-turonien),
- « Godineau » : point d'observation (PO), à 153 m au NO du PP, captant la nappe libre sus-jacente (tuffeau séno-turonien),
- « Rabineau » : point d'observation (PO), à 256 m au SE du PP, captant la nappe libre sus-jacente (tuffeau séno-turonien),
- BSS001HKXN : point d'observation (PO), à 483 m au SE du PP, captant les sables du cénonanien captifs.

Les caractéristiques des ouvrages suivis sont synthétisées dans le Tableau 2 ci-dessous :

Identifiant ou Nom	Type [PO/PP]	Aquifère	Prof. totale (m)	Diamètre (mm)	Distance au PP (m)	DGPS		Altitude au sol (mNGF)	Alt. du repère de mesure (mNGF)	H repère (m) [Alt. Repère - Zsol]	Lieu dit	Commune
						X L93 (m)	Y L93 (m)					
BSS003CKLY	PP	Sables du cénonanien	80.0	180	0.0	472387.00	6695580.00	53.22	53.88	0.66	La Malgagne	Neuillé
BSS004KHBP	PO	Tuffeau Turonien	19.0	64	3.0	472389.58	6695574.81	53.22	53.89	0.67	La Malgagne	Neuillé
Godineau	PO	Tuffeau Turonien	15.7	700	153.4	472243.19	6695628.18	51.14	51.46	0.32	Bois Saint Marc	Neuillé
Rabineau	PO	Tuffeau Turonien	17.4	240	256.1	472547.79	6695381.00	49.27	48.54	-0.73	La Malgagne	Neuillé
BSS001HKXN	PO	Sables du cénonanien ?	30.0	310	483.4	472718.75	6695221.23	46.99	45.96	-1.03	Maison Rouge	Allonnes

Tableau 2 : Caractéristiques des ouvrages suivis lors de l'essai de longue durée.

a) Suivi au puits de pompage BSS003CKLY

L'illustration 7 présente l'évolution de la profondeur du niveau d'eau au PP, avant, durant et après le pompage.

Avant le début de l'essai de longue durée, on note la régularité des niveaux, autour de 21,22 m de profondeur contre 21,40 m au début du suivi (soit une élévation du niveau de 18 cm en 5 jours). On observe la bonne anti-corrélation des niveaux avec le débit et ses variations en début d'essai. Par ailleurs, on note qu'après 72h de remontée, le forage a été utilisé à 3 reprises pour de courtes durées de pompage à un débit manifestement similaire à celui de l'essai au vu des rabattements engendrés. Ces utilisations de la pompe correspondent à des tests de fonctionnement de l'exploitant.

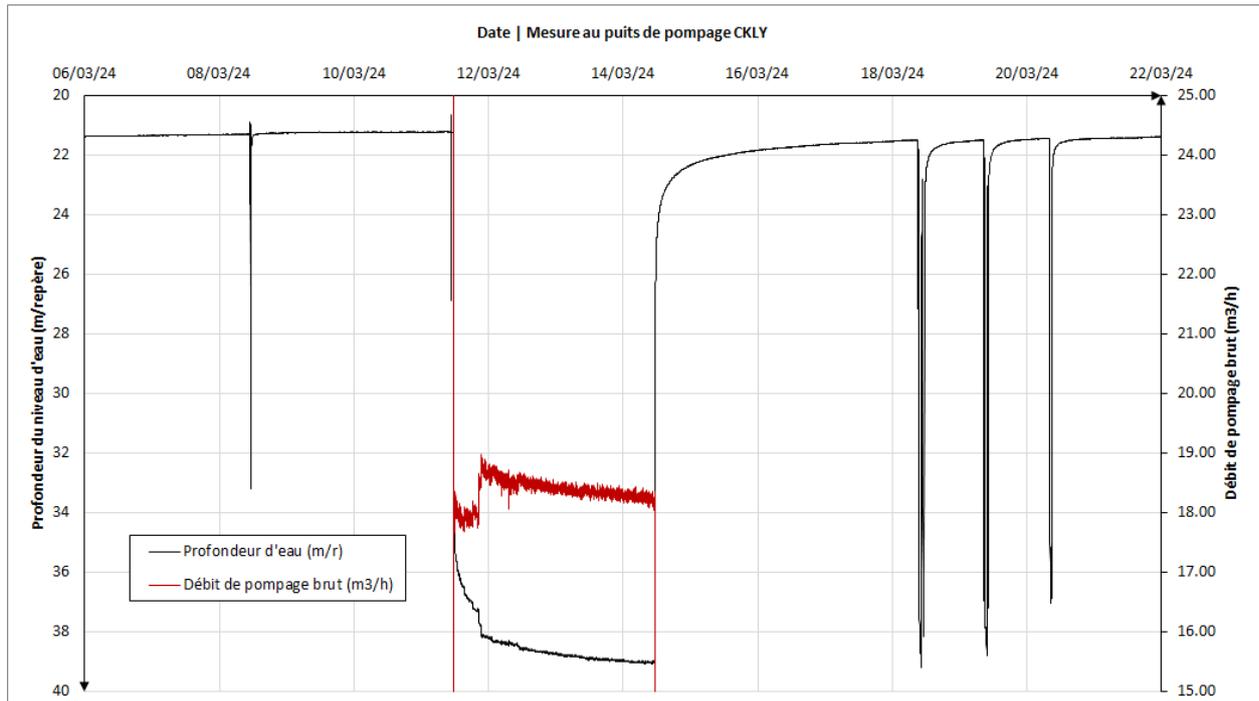


Illustration 7 : Données brutes de suivis en pression (profondeur) et débit de pompage au PP BSS003CKLY.

L'illustration 8 montre le rabattement calculé « s » à partir des données brutes ( $s_{\max} = 17,85$  m pour un débit moyen de  $18,26$  m<sup>3</sup>/h) ainsi que la chronique de débit simplifiée. En vue de l'interprétation, seules les variations de débit significatives ont été conservées, la chronique de débit simplifiée est rappelée dans le Tableau 3.

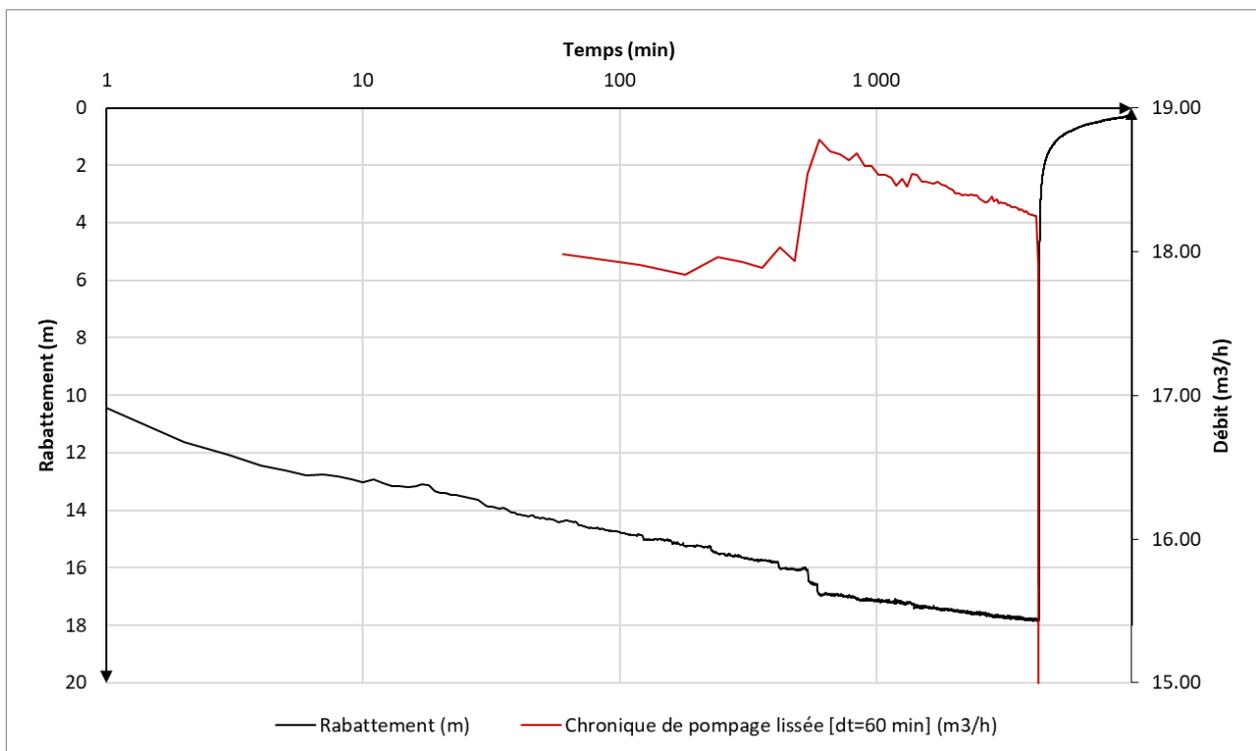
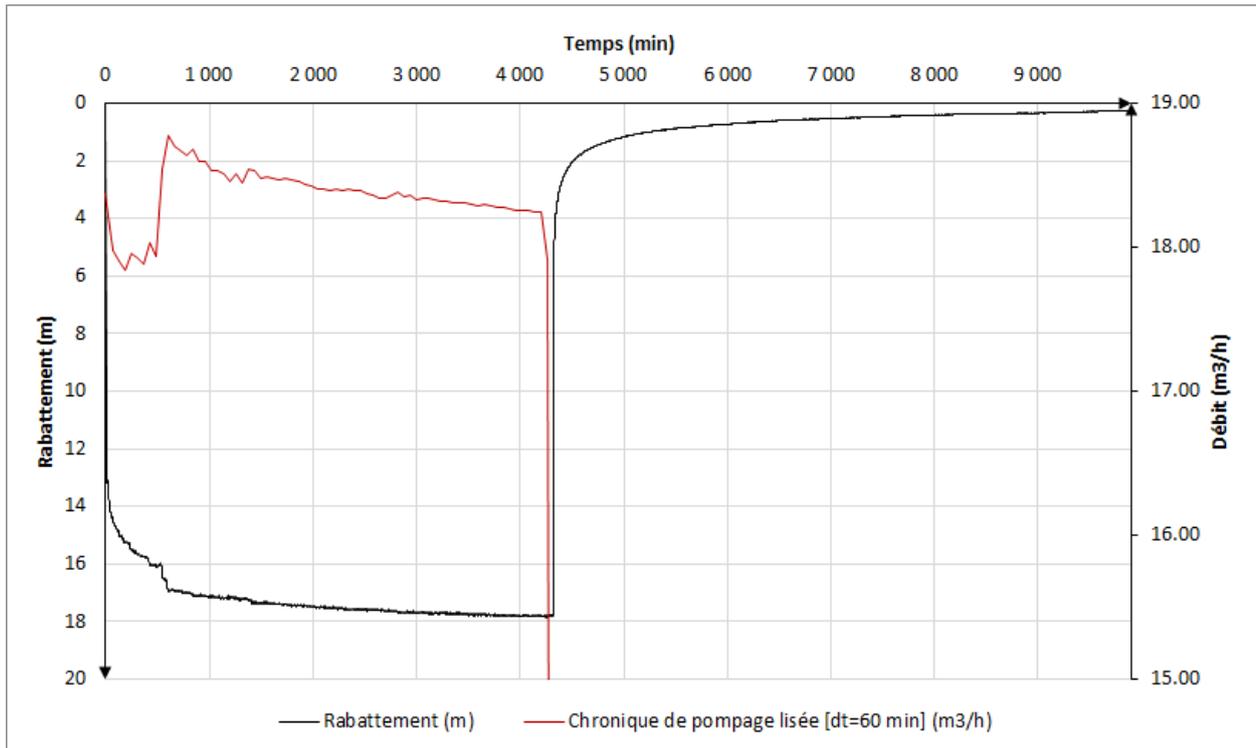


Illustration 8 : Données brutes de suivis en pression (profondeur, en noir) et débit de pompage simplifié (en rouge) au PP BSS003CKLY (en haut, échelle arithmétique, en bas échelle semi-logarithmique).

	Chronique de pompage simplifiée [dt=60 min] (m <sup>3</sup> /h)
0.00	18.37
480.00	17.93
540.00	18.54
960.00	18.59
1380.00	18.54
1800.00	18.46
2220.00	18.40
2640.00	18.34
3060.00	18.34
3480.00	18.31
3900.00	18.26
4320.00	0.00

Tableau 3 : Chronique de débit de pompage simplifiée au PP BSS003CKLY du 11 au 14/03/2024.

On déduit les caractéristiques suivantes de données de l'essai :

s (m) =	17.85	s/Q (m/m <sup>3</sup> /h) =	0.98
Q (m <sup>3</sup> /h) =	18.26	Q/s (m <sup>3</sup> /h/m) =	1.02

*b) Suivi aux points d'observation (Godineau, Rabineau, BSS004KHBP, BSS001HKXN)*

L'illustration 9 montre une vue d'ensemble des cotes piézométriques des différents suivis avant, pendant et après le pompage. Pour faciliter les comparaisons de niveaux, les échelles verticales de gauche et de droite sont de même amplitude (1 m).

Par ailleurs le Tableau 4 complète ce graphique des variations de niveaux min et max (hors pompage).

On observe sur l'ensemble des ouvrages suivis une hausse des niveaux de l'ordre de 30-40 cm dans la nappe libre à 78 cm dans la nappe supposée captive.

Il est intéressant de constater que les 3 ouvrages captant la nappe libre montrent une élévation du niveau comparable de 33 à 39 cm sur toute la durée du suivi. Les chroniques pourraient presque se superposer, indépendamment des cotes piézométriques initiales. En revanche, la phase de pompage, initiée du 11/03/2024 au 15/03/2024 ne semble pas présenter d'effet distinguable sur les niveaux au droit de ces ouvrages (absence de rabattement identifiable).

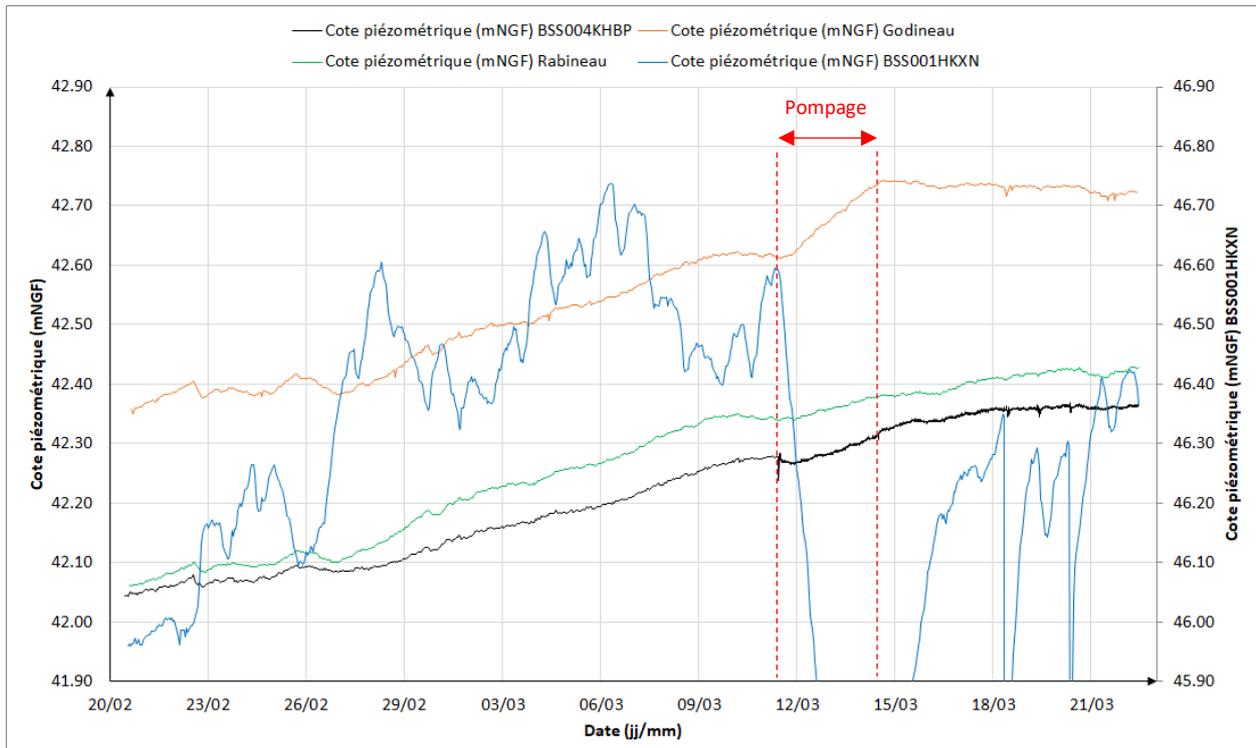


Illustration 9 : Suivi des cotes piézométriques des ouvrages suivis avant, pendant et après le pompage (11-14/03/2024), sur les deux axes verticaux  $dh=1m$ .

	Cote piézométrique (mNGF)		
	Min	Max	dH
<b>Godineau</b>	42.35	42.74	0.39
<b>Rabineau</b>	42.06	42.43	0.37
<b>KHBP</b>	42.04	42.37	0.33
<b>HKXN *</b>	45.96	46.74	0.78

Tableau 4 : Plages de variations des cotes piézométriques des ouvrages suivis entre le 20/03/2024 et le 22/03/2024 (\* = hors pompage).

L'illustration 10 montre en complément des niveaux souterrains les précipitations journalières (mm/j) au droit de la station météorologique de Vernantes, à 9 km au nord du site. Aucune corrélation évidente ne semble se dégager de ce graphique. Il est probable que la recharge de la nappe libre soit liée à des événements antérieurs aux temporalités observées sur ce graphique (1 mois d'observation). On rappelle que la profondeur des niveaux souterrains de la nappe libre est de l'ordre de 10 m (zone non saturée à traverser avant l'atteinte de la nappe).

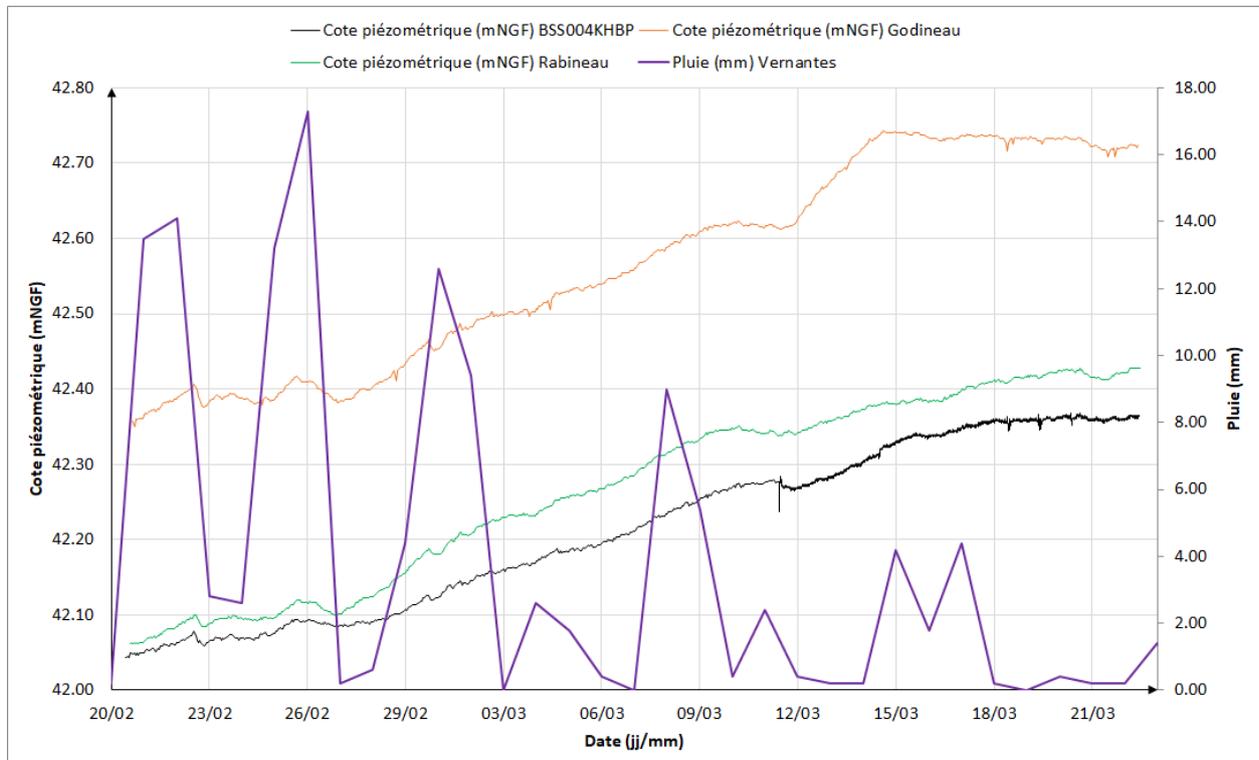


Illustration 10 : Evolution des niveaux souterrains dans la nappe libre ( $dh = 0.8$  m) et précipitations journalières.

Enfin, l'illustration 11 associe l'évolution des niveaux du forage BSS001HKXN (sables du Cénomaniens) et des précipitations journalières à cette même station météorologique.

On observe de prime abord, en opposition aux tendances de la nappe libre, des fluctuations sensiblement chaotiques, à la hausse et à la baisse, journalières et assez régulières. La tendance montre une fluctuation avec une hausse des niveaux, de l'ordre de 78 cm, soit au moins le double de ce qui est observé sur la nappe libre.

Lors du début de l'essai de longue durée, il faut moins de 30 minutes pour qu'un premier rabattement de l'ordre du centimètre se fasse ressentir au droit du forage BSS001HKXN. L'extension du cône de rabattement dans le milieu est très rapide, caractéristique d'une diffusivité d'un aquifère captif ou semi-captif.

Par ailleurs, après l'arrêt du pompage, on observe qu'il faut moins de 1h30 pour que le niveau commence sa remontée.

Il est à noter enfin qu'il n'y a pas de corrélation manifeste entre les précipitations récentes et les niveaux souterrains. Il n'y a pas non plus de relation entre la pression atmosphérique et les niveaux souterrains.

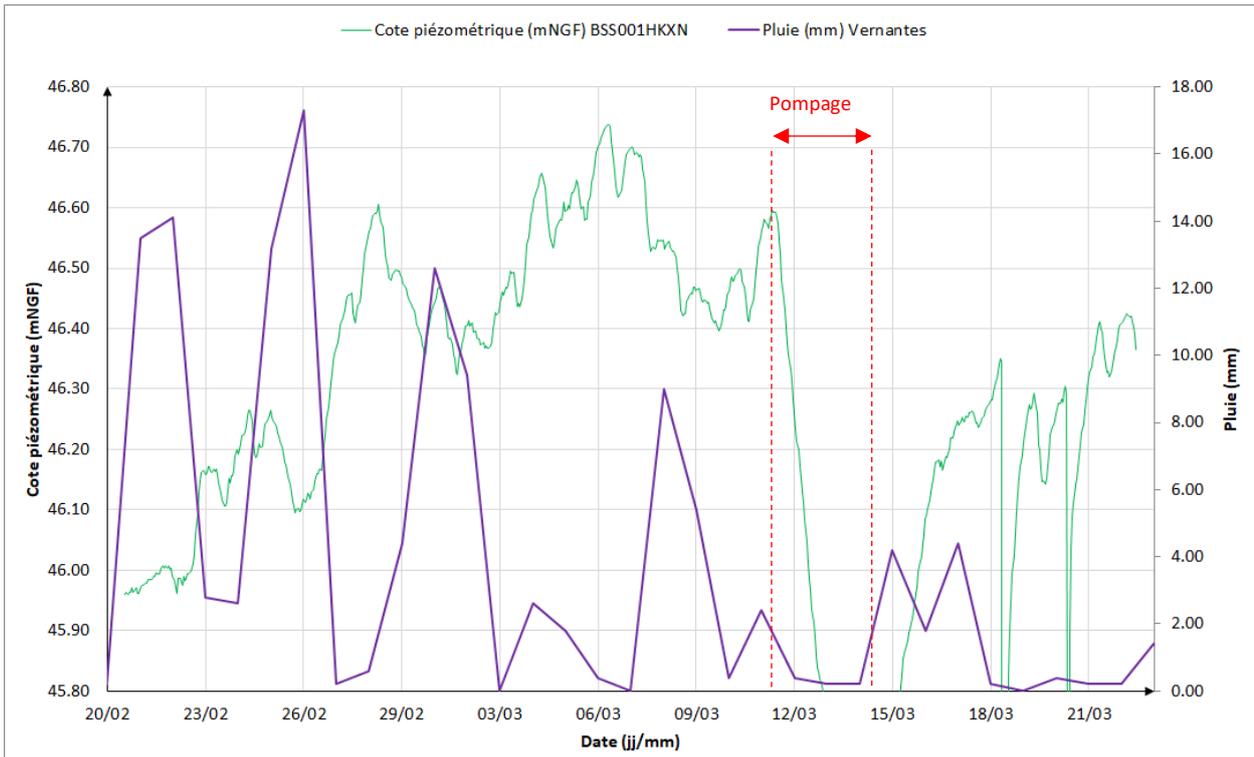


Illustration 11 : Evolution des niveaux souterrains dans la nappe captive/semi-captive ( $dh = 1\text{ m}$ ) et précipitations journalières.

c) Suivi aux points d'observation (Tuffeau turonien : Godineau, Rabineau, BSS004KHBP ; sables cénomaniens : BSS001HKXN)

L'illustration 12 présente en détail l'évolution des niveaux d'eau au puits Rabineau. On y observe leur évolution croissante (37 cm) sur l'ensemble du suivi ainsi que spécifiquement durant la période de l'essai de longue durée. Le deuxième graphique permet d'observer en détail la phase qui concerne le pompage longue durée ainsi que l'arrêt du pompage. On n'y décèle aucun signe d'inflexion des niveaux en phase de pompage ou d'arrêt de pompage.

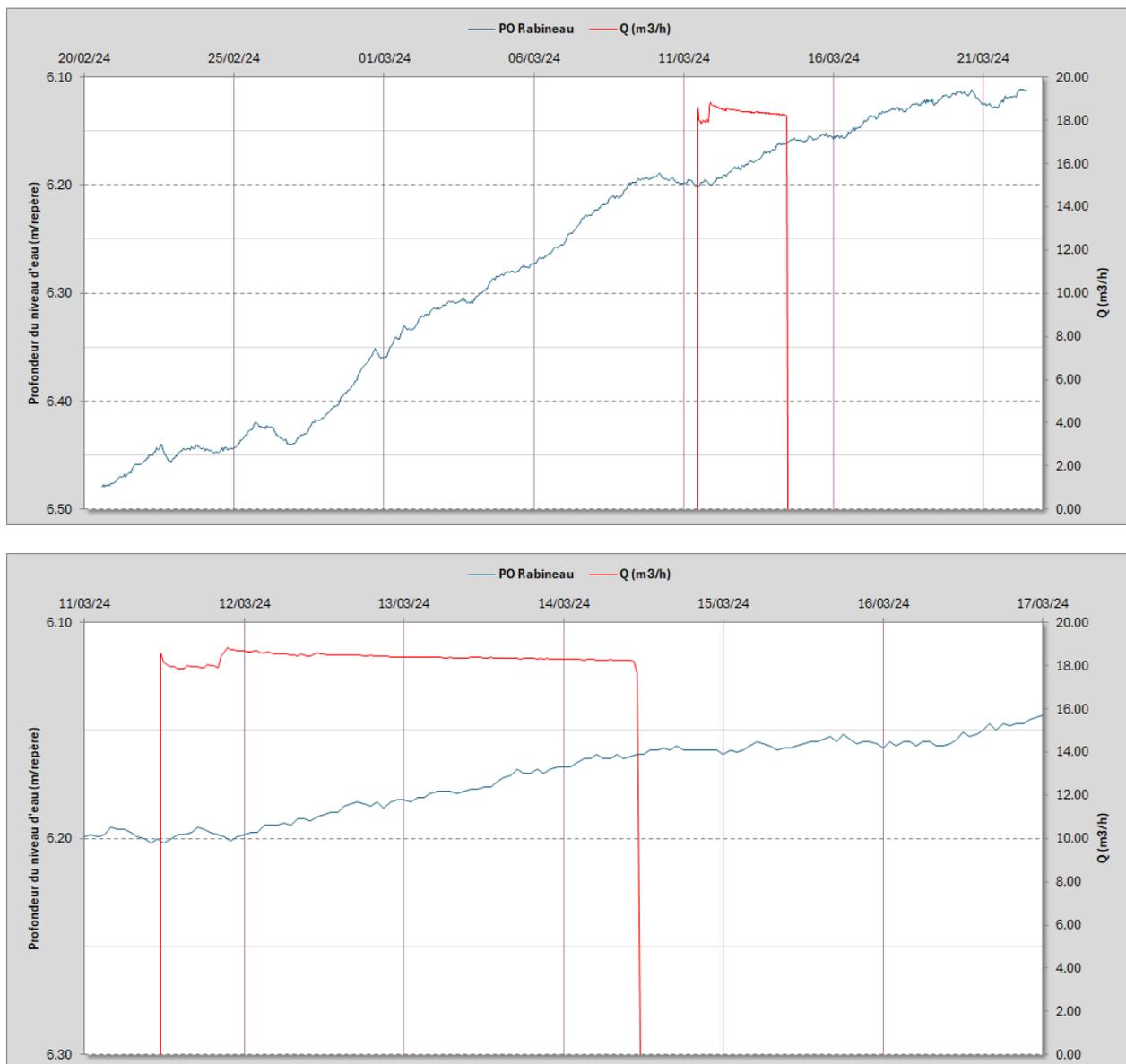


Illustration 12 : Niveaux souterrains (en bleu) au droit du puits Rabineau et chronique de débit simplifiée au puits de pompage (en rouge). Haut : période complète de mesure, bas : zoom sur la période de l'essai de longue durée.

c) Suivi au point d'observation Godineau

L'illustration 13 présente en détail l'évolution des niveaux d'eau au puits Godineau. On y observe leur évolution croissante (39 cm) sur l'ensemble du suivi ainsi que spécifiquement durant la période de l'essai de longue durée. Le deuxième graphique permet d'observer en détail la phase qui concerne le pompage longue durée ainsi que l'arrêt du pompage. On n'y décèle aucun signe d'inflexion des niveaux en phase de pompage ou d'arrêt de pompage.

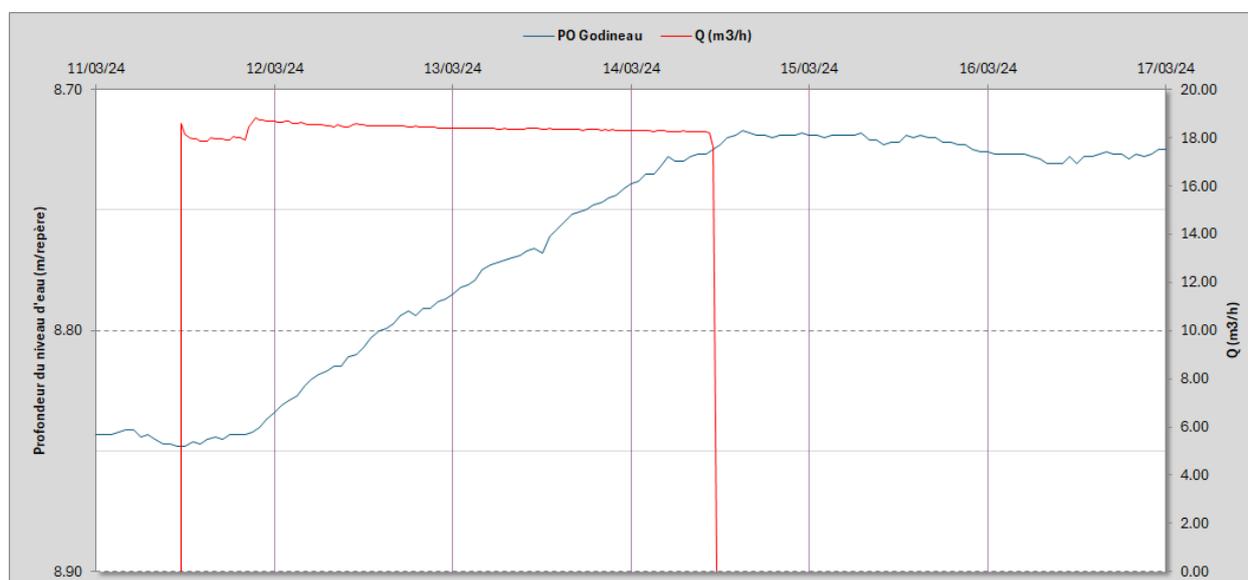
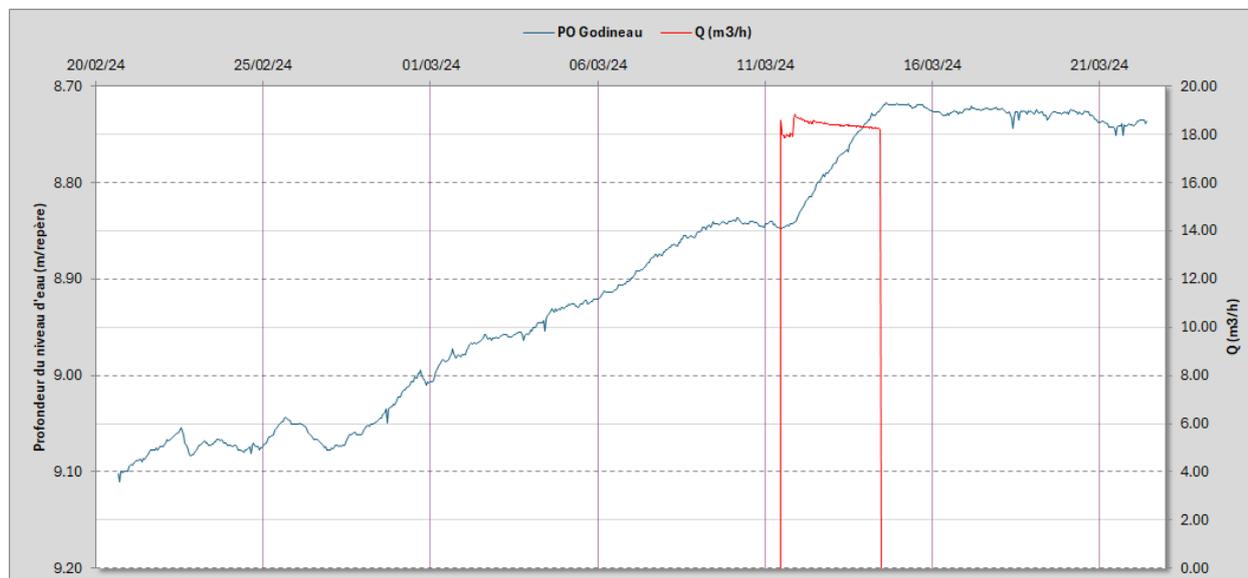


Illustration 13 : Niveaux souterrains (en bleu) au droit du puits Godineau et chronique de débit simplifiée au puits de pompage (en rouge). Haut : période complète de mesure, bas : zoom sur la période de l'essai de longue durée.

d) *Suivi au point d'observation BSS004KHBP*

L'illustration 14 présente en détail l'évolution des niveaux d'eau au forage BSS004KHBP. On y observe leur évolution croissante (33 cm) sur l'ensemble du suivi ainsi que spécifiquement durant la période de l'essai de longue durée. Le deuxième graphique permet d'observer en détail la phase qui concerne le pompage longue durée ainsi que l'arrêt du pompage. On n'y décèle aucun signe d'inflexion des niveaux en phase de pompage ou d'arrêt de pompage.

Il est à noter toutefois que lorsque le pompage démarre on observe une rehausse momentanée, inattendue de la pression (niveaux) dans le forage. Le même phénomène réciproque est observé lors de l'arrêt du pompage, on observe une baisse momentanée de la pression (niveau). Cet ouvrage est très proche du puits de pompage (3 m), à ce stade il semble exister une interférence entre les deux ouvrages, sans qu'il soit possible d'expliquer sa nature (électromagnétique ?).

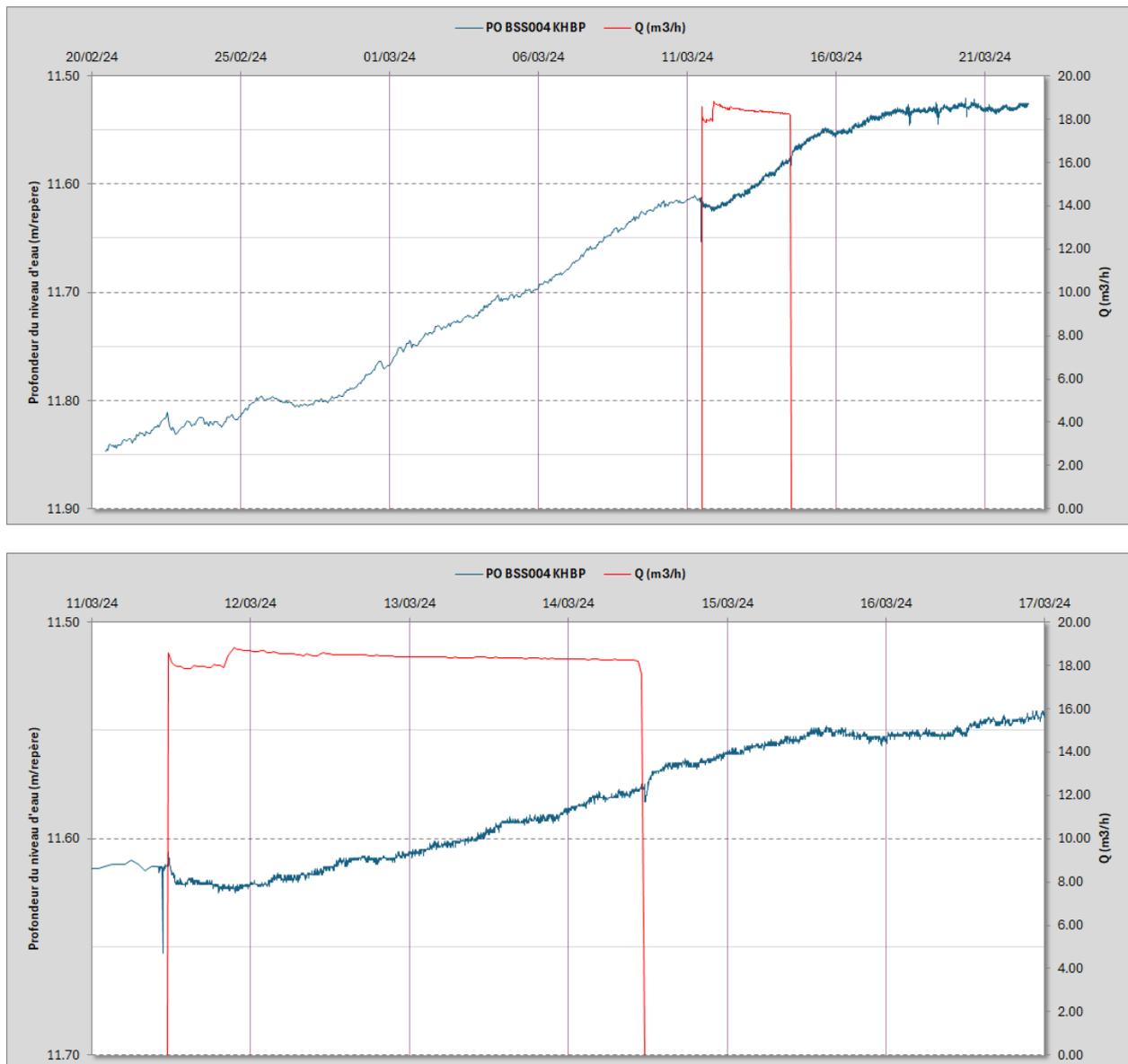


Illustration 14 : Profondeurs du niveaux (en bleu) au droit du puits Rabineau et chronique de débit simplifiée au puits de pompage (en rouge). Haut : période complète de mesure, bas : zoom sur la période de l'essai de longue durée.

e) *Suivi au point d'observation BSS001HKXN*

L'illustration 15 présente en détail l'évolution des niveaux d'eau au forage BSS001HKXN. On y observe leur évolution globalement croissante (78 cm, hors pompage) sur l'ensemble du suivi. Durant la période de l'essai de longue durée, les phases de rabattement et de remontée sont bien marquées.

Le deuxième graphique permet d'observer en détail la phase qui concerne le pompage longue durée ainsi que l'arrêt du pompage. La phase de descente est marquée par de légères inflexions qui se surimpriment, probablement de même nature que celles observées avant le début du pompage. La phase de remontée est aussi affectée par les pompages ayant lieu après la phase de remontée de 72h.

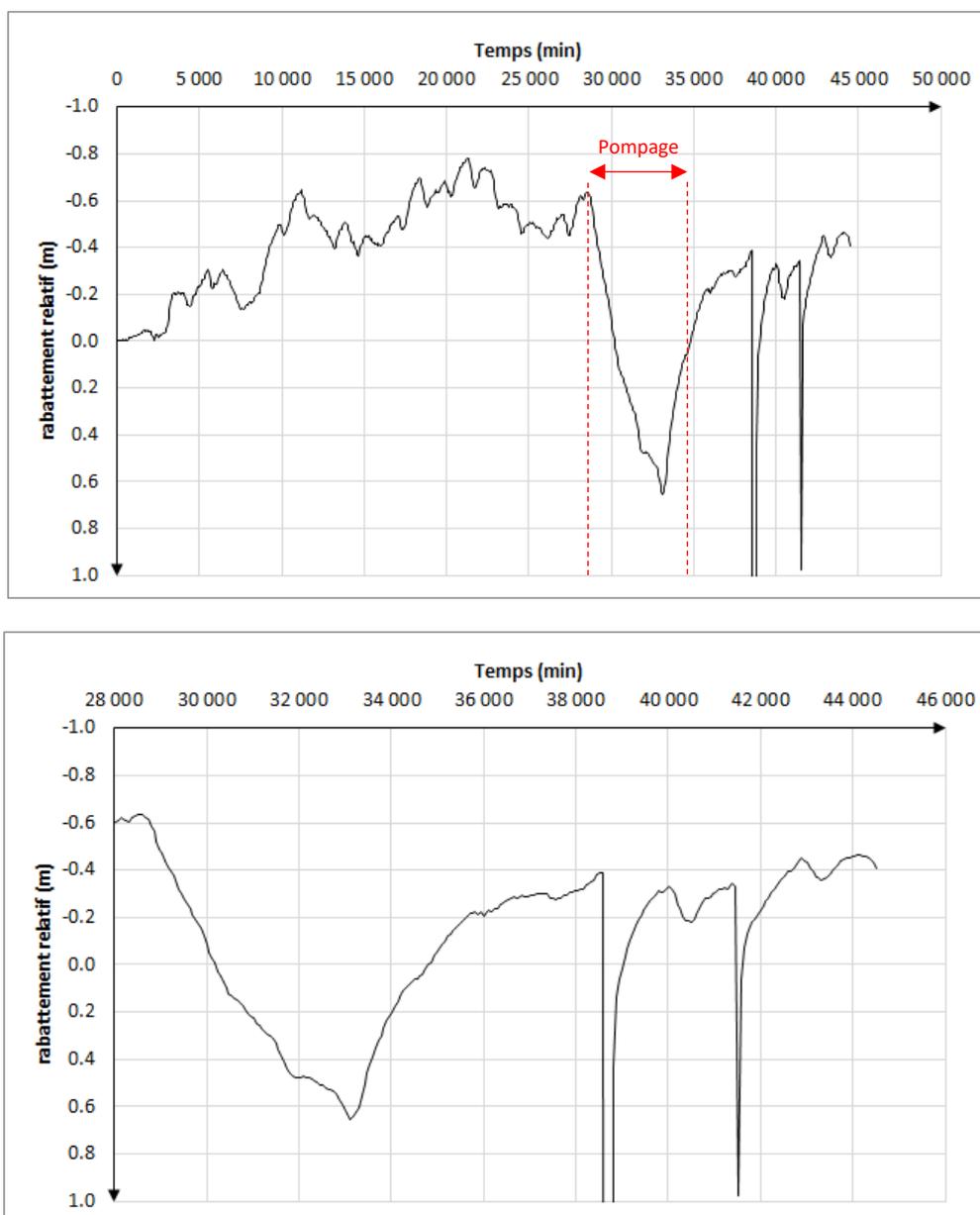


Illustration 15 : Rabattement au droit du forage BSS001HKXN. Haut : période complète de mesure, bas : zoom sur la période de l'essai de longue durée.

## 2.2.4. Interprétation de l'essai de longue durée

Les données acquises précédemment (temps depuis le début du pompage, rabattement, chronique de débit simplifiée) ont été interprétées au puits de pompage ainsi qu'au forage BSS001HKXN présentant une réponse structurée à l'essai de longue durée.

De prime abord, un diagnostic de l'essai est réalisé au puits de pompage *via* la méthode des dérivées introduite dans OUAIP v3 (non diffusée à ce jour). Par la suite, en s'appuyant sur ce diagnostic, une interprétation plus traditionnelle est réalisée pour vérifier la cohérence des hypothèses envisagées.

L'illustration 16 présente un schéma de principe de l'impact d'un puits de pompage sur le niveau d'eau souterrain à un instant temps « t » et sur un ouvrage adjacent captant le même aquifère, sur lequel repose l'interprétation conduite au PP et au PO.

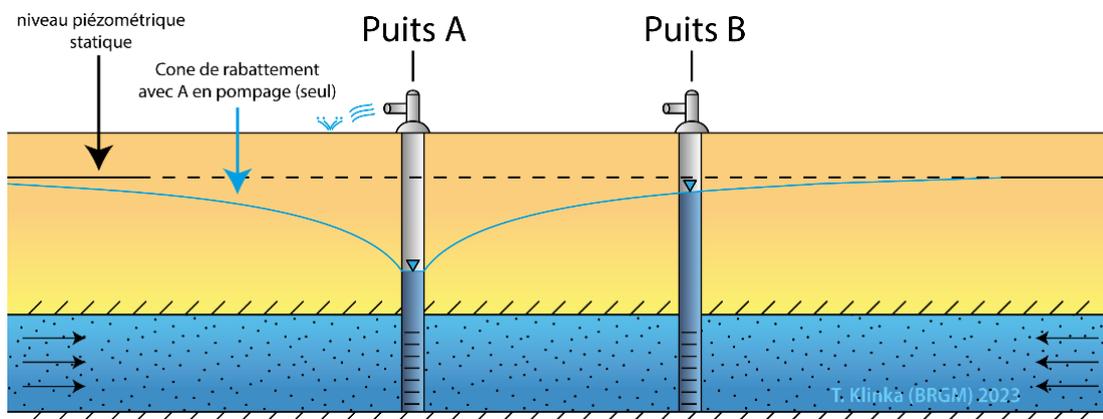


Illustration 16 : Schéma de principe de l'impact d'un puits de pompage sur les niveaux souterrains à un instant temps « t » et ouvrage adjacent captant le même aquifère.

### a) Interprétation en dérivée au puits de pompage BSS003CKLY

L'illustration 17 présente plusieurs éléments : en rond orange et jaune il s'agit du rabattement normalisé à la descente (jaune) et à la remontée (orange), orienté positivement vers le haut, en fonction du temps de superposition. D'après ce rabattement normalisé, la dérivée est calculée à la descente (triangle vert clair) ainsi qu'à la remontée (triangle vert foncé).

On observe deux phases principales d'après la dérivée du rabattement normalisé :

- d'une part un écoulement radial (pente de la dérivée = 0) d'environ 100 à 400 minutes,
- puis la manifestation d'un effet de drainance (pente de la dérivée négative) de 400 minutes à la fin de l'essai.

D'après ce diagnostic, nous avons interprété l'essai de pompage de longue durée à l'aide de la solution de Hantush qui permet d'intégrer un effet de drainance au travers d'une éponte semi-perméable.

En rouge, on identifie sur le graphique du haut, le rabattement normalisé simulé à partir de cette solution, ainsi que la dérivée simulée calculée à la descente et à la remontée (pointillé vert clair et vert foncé).

Il est à noter qu'en l'absence d'essai de puits récent, l'essai de puits réalisé en 28/02/2012 sert de référence pour l'estimation du coefficient de PDC quadratique, soit :  $C = 29\,050 \text{ s}^2/\text{m}^5$ .

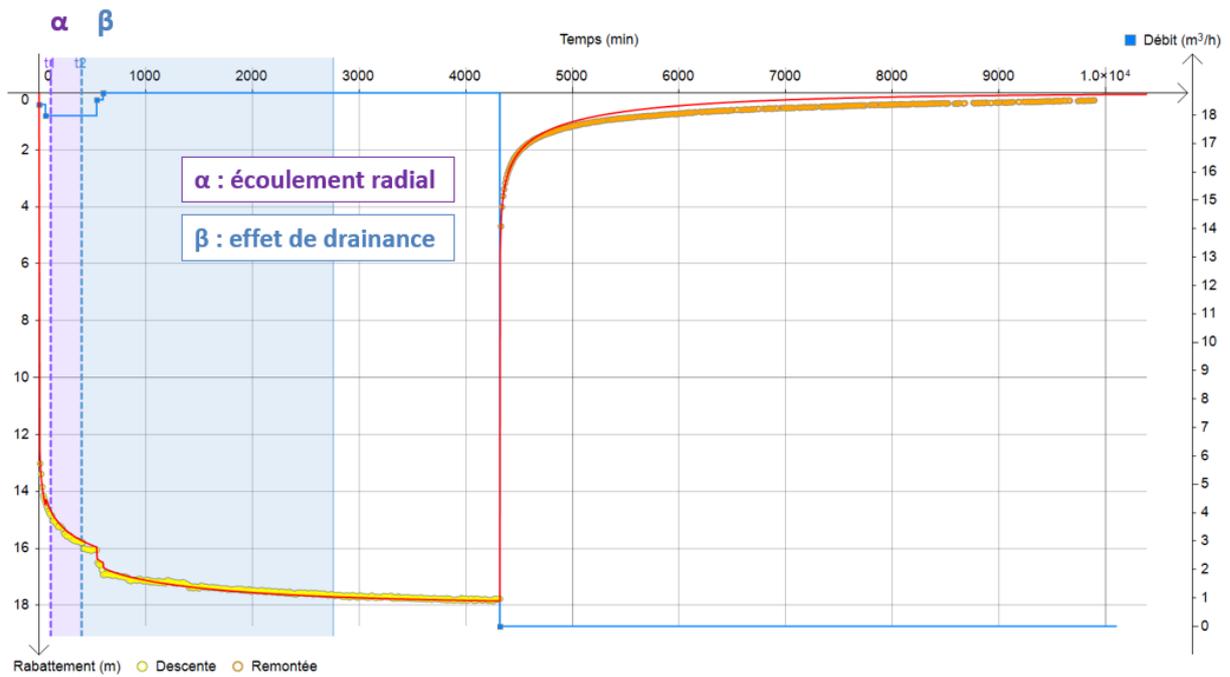
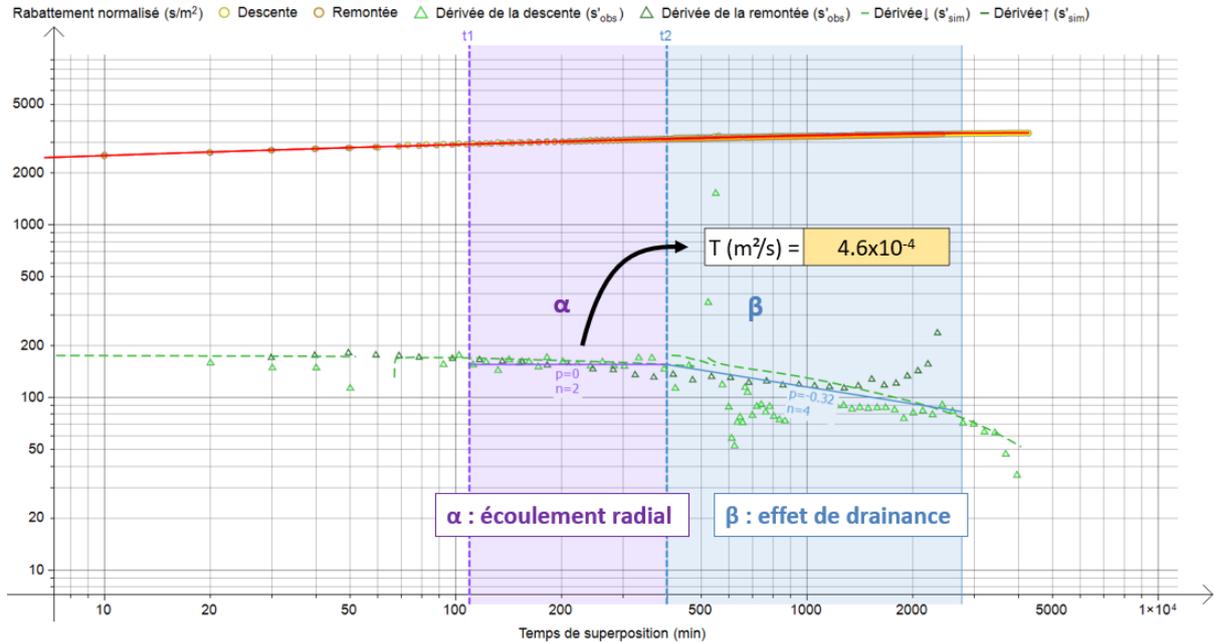
Les meilleurs paramètres retenus de la solution de Hantush sont les suivants :

T (m <sup>2</sup> /s) =	4.5x10 <sup>-4</sup>
L (m) =	941
K' (m/s) =	1.1x10 <sup>-8</sup>
e' (m) =	21.5

La perméabilité déduite de cette interprétation est relativement faible (K'=10<sup>-8</sup> m/s) en comparaison de la transmissivité de l'aquifère pompé (T=4.5x10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s).

En Annexe 3, à titre de comparaison, on trouvera les interprétations des données avec la solution de Theis afin de quantifier l'écart à la solution de Hantush en termes de propriété hydrodynamique (transmissivité).

Évaluation de la drainage entre aquifères dans le bassin des Trois-Rus (Authion, Maine-et-Loire)



Courbe	E		Δ↓	Δ↑	Formule	r	T	S	L	C
	1.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Hantush, 1955/1964	0.09	4.53E-4	1.00E-4	941.17	2.90E4

Illustration 17 : En haut, diagnostic de l'essai en dérivée, en bas, calage à l'aide de la solution de Hantush.

*b) Interprétation au puits de pompage BSS003CKLY*

Le rabattement spécifique est de l'ordre de  $0,98 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ , soit trois fois plus fort qu'il y a 12 ans ( $0,29 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ ).

L'interprétation de l'essai a été réalisée à l'aide de la solution de Hantush avec un effet de drainance.

Les pertes de charge quadratiques (PDCQ) n'ayant pas été réévaluées depuis l'essai de puits de 2012, les mêmes PDCQ ont été considérées, soit  $C \# 29\,000 \text{ s}^2/\text{m}^5$ .

L'illustration 18 présente l'évolution du rabattement (à la descente/à la remontée) au puits de pompage en échelle arithmétique et semi-logarithmique en fonction du débit de pompage (en bleu).

L'ajustement retenu selon la méthode de Hantush (courbe rose) est présenté. Les temps courts sont bien ajustés et les temps longs de la remontée sont légèrement supérieurs à ceux observés.

Avec la solution de Hantush, le facteur de drainance ajusté est  $L = 970 \text{ m}$ , soit  $K' = 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  avec  $e' = 21,5 \text{ m}$  (d'après la coupe géologique), la transmissivité de l'aquifère pompé est de  $T = 4,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Évaluation de la drainance entre aquifères dans le bassin des Trois-Rus (Authion, Maine-et-Loire)

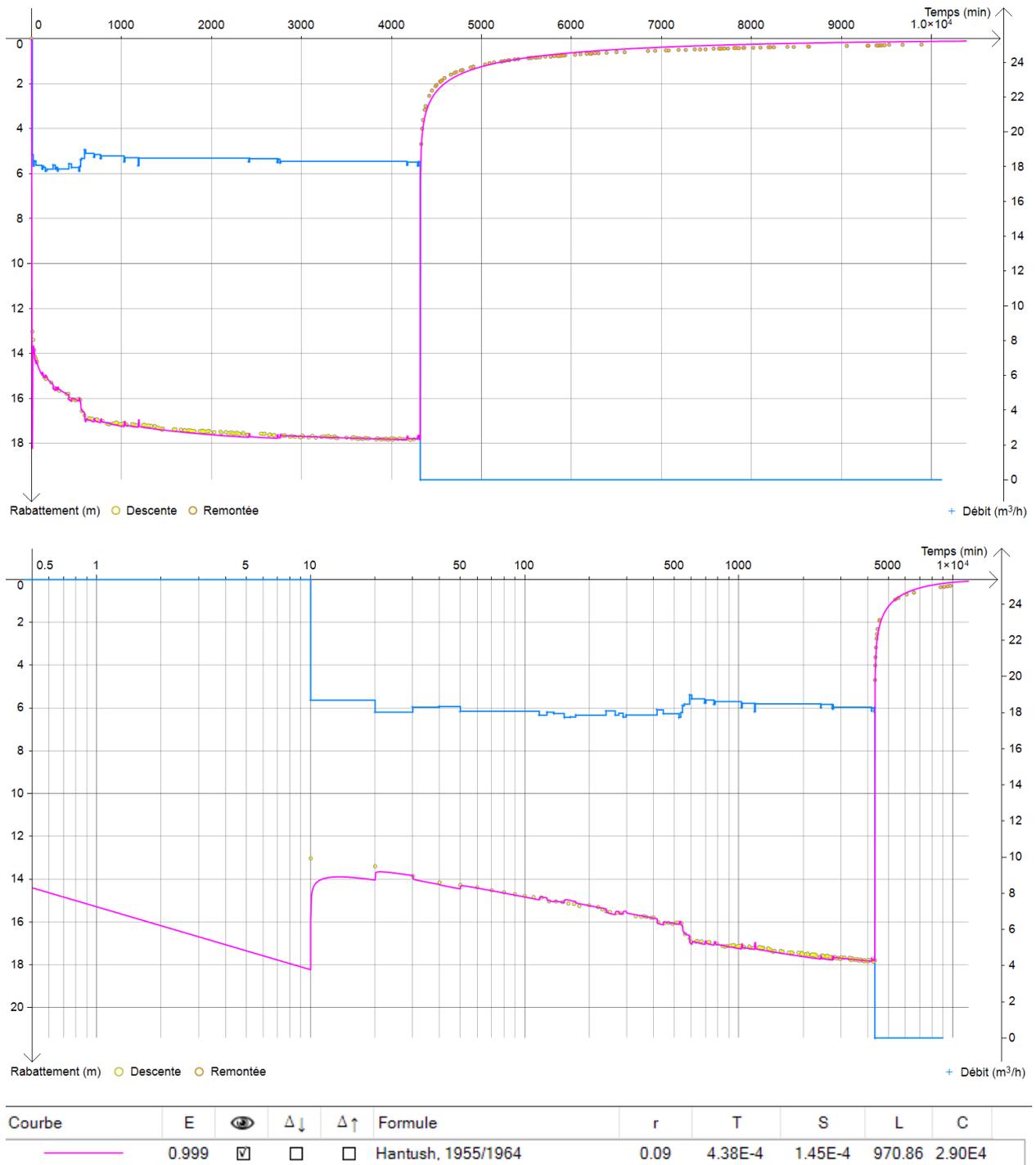


Illustration 18 : Interprétation au puits de pompage selon la méthode de Hantush (courbe rose) selon une échelle arithmétique (en haut) et semi-logarithmique (en bas), en bleu variation du débit de pompage, points jaune/orange rabattement à la descente/remontée.

*c) Interprétation au point d'observation BSS001HKXN*

L'interprétation de l'essai a été réalisé selon la solution Hantush avec un effet de drainance.

L'illustration 19 présente l'évolution du rabattement (à la descente/à la remontée) au point d'observation BSS001HKXN en échelle arithmétique et semi-logarithmique en fonction du débit de pompage (en bleu).

On observe que la chronique de rabattement subit des variations externe indépendantes du débit de pompage et de ses faibles variations, elles se traduisent par des oscillations autour du rabattement, en phase de descente et aussi en phase de remontée.

L'ajustement retenu selon la méthode de Hantush (courbe rose) est présenté. La solution de Hantush présente un bon ajustement en phase de descente ainsi qu'en phase de remontée, notamment par l'effet de drainance qui permet de simuler plus justement la remontée par rapport aux observations.

Avec la solution de Hantush, le facteur de drainance ajusté est  $L = 857$  m (vs 970 sur le PP), soit  $K' = 1.2 \times 10^{-8}$  m/s avec  $e' = 21.5$  m (d'après la coupe géologique), la transmissivité de l'aquifère pompé est de  $T = 4.1 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.

Il est à noter que si les variations de niveaux piézométriques observés durant l'essai sont assimilables au fonctionnement d'un aquifère libre (épisode de recharge ?), d'après l'interprétation de l'essai de longue durée la réponse du piézomètre est caractérisée par un coefficient d'emmagasinement correspondant à un aquifère captif.

Évaluation de la drainage entre aquifères dans le bassin des Trois-Rus (Authion, Maine-et-Loire)

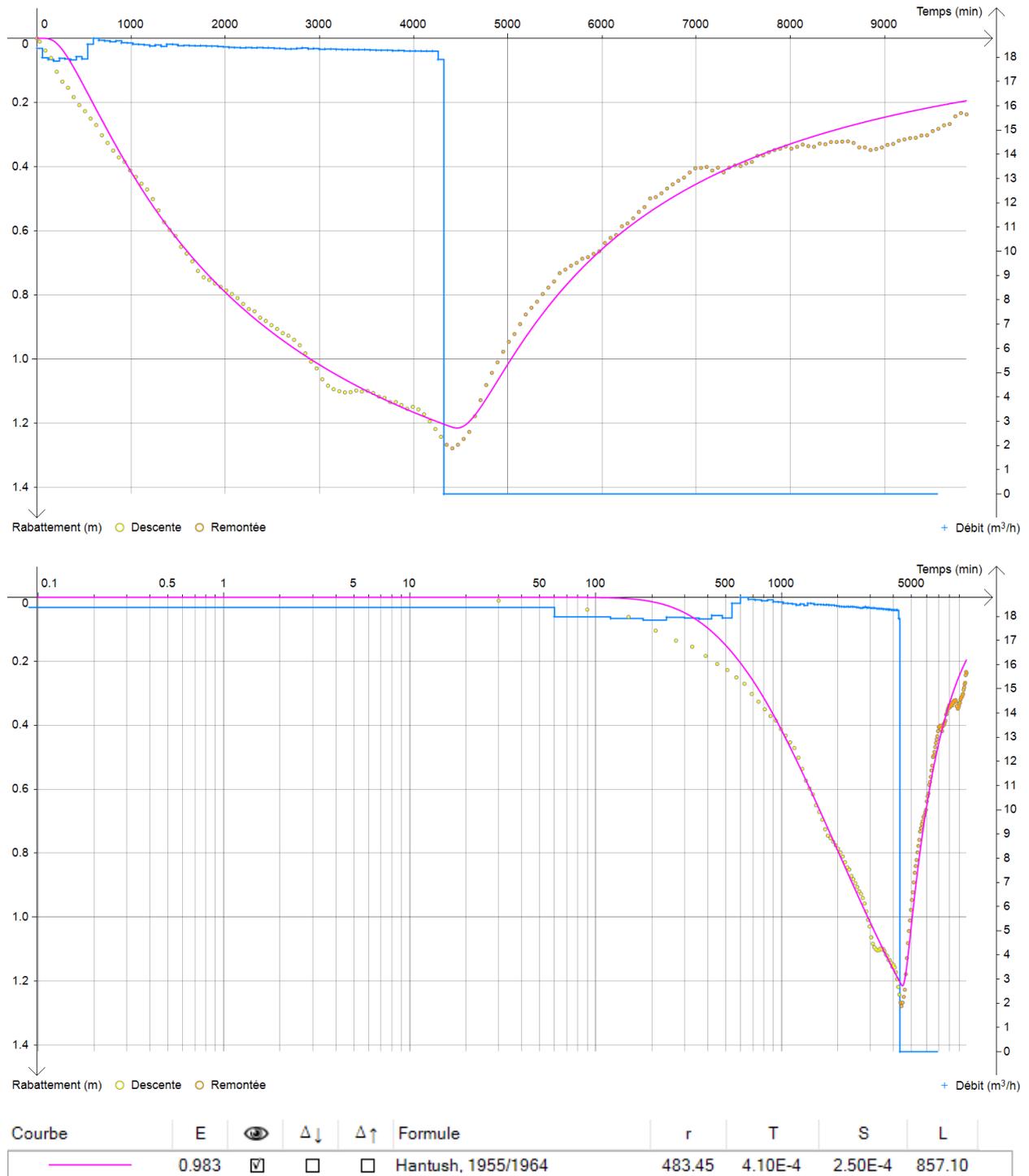


Illustration 19 : Interprétation au point d'observation BSS001HKXN selon la méthode de Hantush (courbe rose) selon une échelle arithmétique (en haut) et semi-logarithmique (en bas), en bleu variation du débit de pompage, points jaune/orange rabattement à la descente/remontée.

## 2.2.5. Quantification de l'effet de la drainance

### a) Quantification de l'effet de la drainance

Afin de quantifier l'effet et l'impact de la drainance ou le comportement de l'aquifère sans intégrer la drainance, différentes simulations ont été opérées.

Dans un premier temps, deux simulations comparatives sont menées à l'aide de la solution de Hantush, intégrant la drainance et la même solution sans drainance afin d'estimer l'impact hydrodynamique sur les rabattements induits par un pompage continu durant 1 an à 18 m<sup>3</sup>/h.

L'illustration 20 présente les résultats de cette simulation, les paramètres considérés sont ceux des interprétations précédentes.

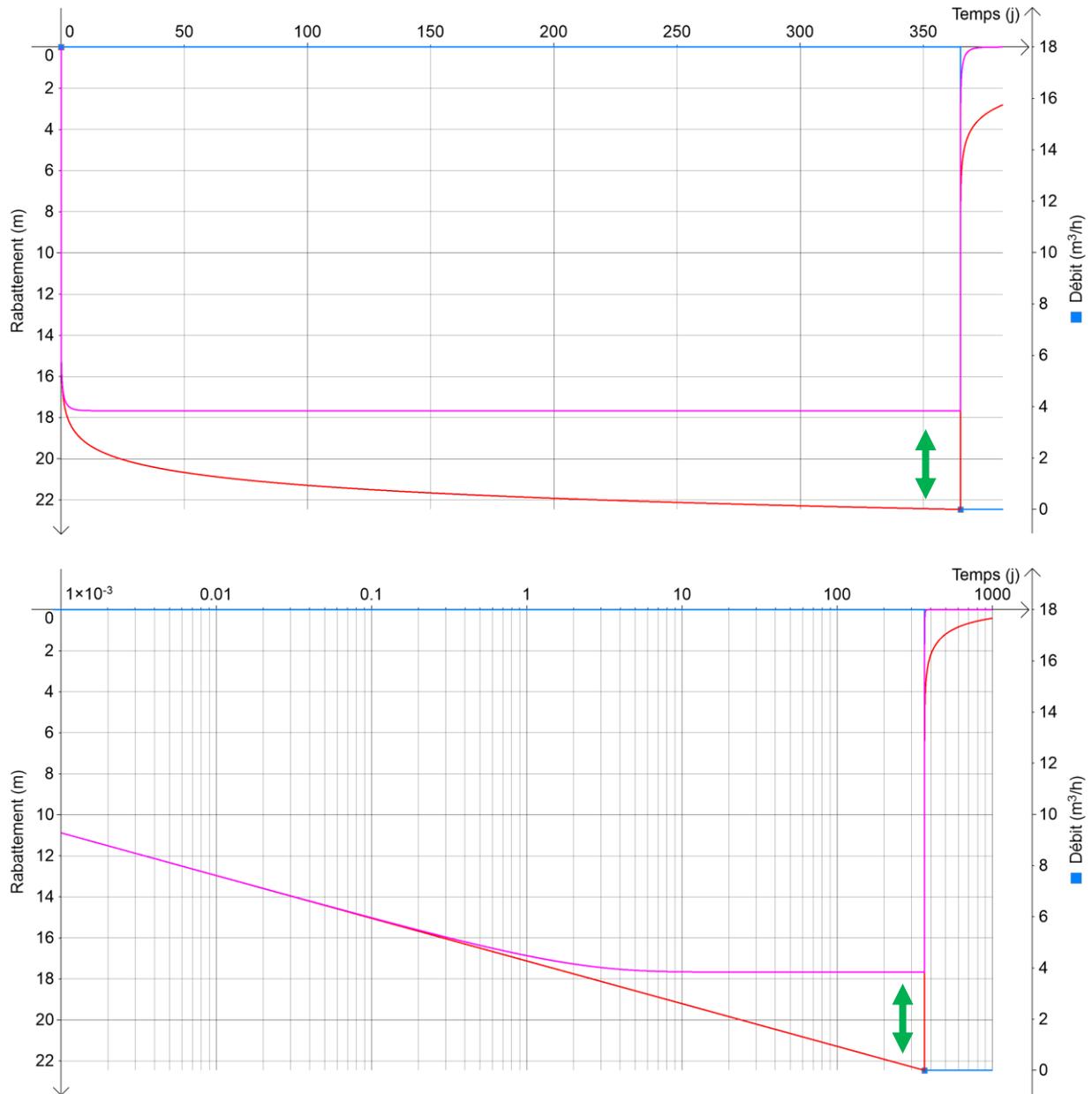
Selon les modèles des Theis et de Hantush le rabattement différentiel entre ces deux solutions serait 4,8 m au bout d'un an de pompage continu. La solution de Hantush montre la stabilisation du rabattement après 10 jours de pompage, compensé par l'apport d'eau via l'éponte semi-perméable.

Par ailleurs, à l'illustration 20, la solution de Hantush montre que dès que le niveau d'eau se stabilise, autant d'eau pompée rentre dans le système par drainance.

Il est à noter que dans la solution de Hantush le stock de l'aquifère au-dessus de l'aquitard est supposé illimité, ce qui n'est pas le cas dans la réalité ; cette hypothèse est donc optimiste.

Tenant compte de cela, il est possible que dans la réalité il y ait moins d'écart entre les deux simulations (différence de rabattement inférieure à 4,8 m), il s'agit donc plutôt d'une valeur maximale.

Évaluation de la drainance entre aquifères dans le bassin des Trois-Rus (Authion, Maine-et-Loire)



Courbe	Formule	T	S	r	L	C
—	<input checked="" type="checkbox"/> Theis, 1935	4.40E-4	1.40E-4	0.09		2.90E4
—	<input checked="" type="checkbox"/> Hantush, 1955/1964	4.40E-4	1.40E-4	0.09	938.00	2.90E4

Illustration 20 : En rose solution de Hantush, en rouge solution de Theis (en haut : échelle arithmétique, en bas : échelle logarithmique). Simulation du rabattement durant un an de pompage continu à 18 m<sup>3</sup>/h.

Une autre simulation a été réalisée afin de simuler l'impact d'un pompage en nappe captive dans l'aquifère de surface. A cet effet, un pompage continu à 40 m<sup>3</sup>/h dans l'aquifère captif est mise en œuvre. La solution (adaptation de la solution de Hunt et Scott 2007 ; voir par ex. Dewandel et al. 2023) permet de restituer l'impact en termes de rabattement dans l'aquifère libre en prenant en compte l'éponte semi-perméable.

L'illustration 21 présente un schéma de principe de la solution.

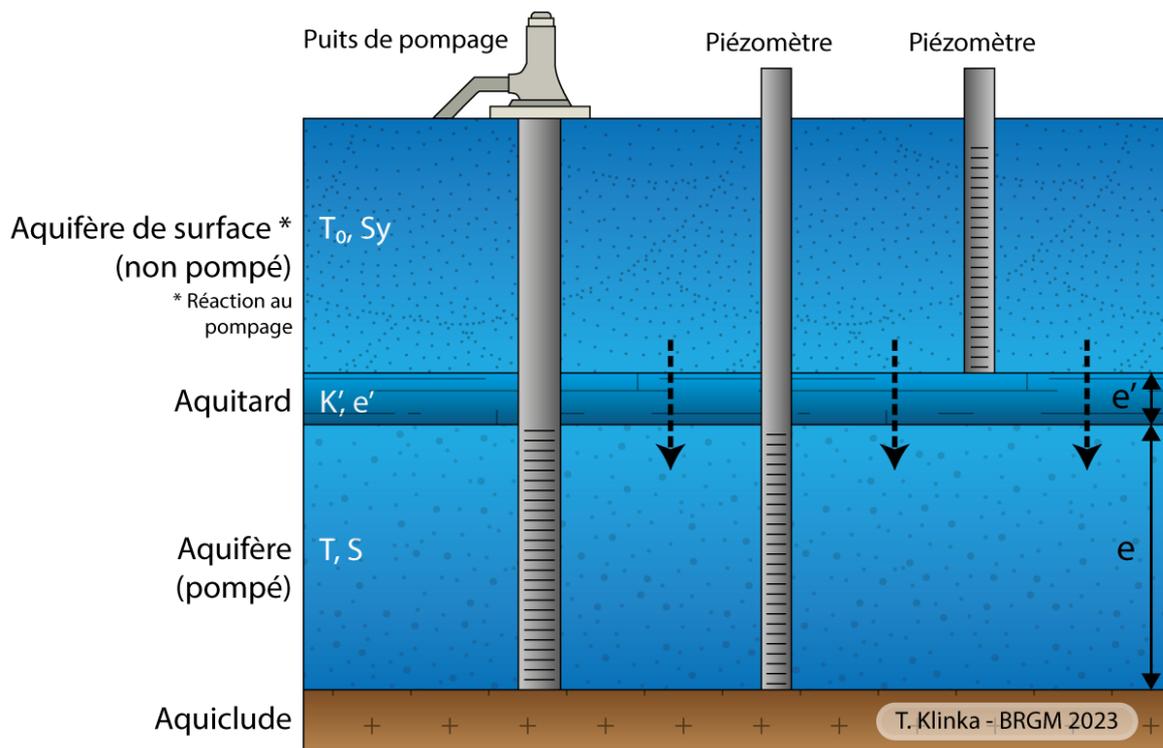


Illustration 21 : Schéma de la solution permettant de restituer l'impact d'un pompage dans un aquifère captif sur l'aquifère de surface au travers d'une éponte semi-perméable.

Aquifère de surface :	
Transmissité	$T_0$ (m <sup>2</sup> /s) = 1.50E-03
Porosité efficace	$S_y$ (-) = 1.30E-01
Anisotropie de transmissivité	$A_{Ty/Tx}$ (-) = 1.00
Distance au puits de pompage	$r$ (m) = 1.00

Aquitard :	
Perméabilité	$K'$ (m/s) = 1.00E-08
Épaisseur	$e'$ (m) = 21.5
Facteur de drainance	$L$ (m) = 973

Aquifère pompé :	
Transmissité	$T$ (m <sup>2</sup> /s) = 4.40E-04
Coefficient d'emmagasinement	$S$ (-) = 2.50E-04
Rayon du forage	$R_c$ (m) = 0.1
Captage	Complet

Illustration 22 : Paramètre de la solution analytique.

L'illustration 22 synthétise les paramètres hydrodynamiques retenus pour le calcul de la solution. Pour mémoire, les essais de longue durée sur les 2 captages AEP de Neuillé proches donnent pour l'aquifère de surface :  $T=4,5 \times 10^{-3}$  et  $1,5 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s.

On a considéré  $r=1$  m, 100 m, 500 m, et 1 000 m afin de déduire l'impact dans l'aquifère de surface à une distance variable du puits de pompage, c'est-à-dire, approximativement au droit du puits de pompage jusqu'à 1 km de ce dernier. Les résultats de la simulation sont reproduits à l'illustration 23, selon deux scénarios de transmissivité suivants.

Pour  $T \# 1.5 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s : pour les 4 distances au puits de pompage dans l'aquifère de surface :

- rabattement à  $r=1$  m dans l'aquifère de surface **s # 0,17 m** pour  $t_{\text{pompage}} = 100$  jours
- rabattement à  $r=100$  m dans l'aquifère de surface **s # 0,16 m** pour  $t_{\text{pompage}} = 100$  jours
- rabattement à  $r=500$  m dans l'aquifère de surface **s # 0,11 m** pour  $t_{\text{pompage}} = 100$  jours
- rabattement à  $r=1\ 000$  m dans l'aquifère de surface **s # 0,05 m** pour  $t_{\text{pompage}} = 100$  jours

Pour  $T \# 4.5 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s : pour les 4 distances au puits de pompage dans l'aquifère de surface :

- rabattement à  $r=1$  m dans l'aquifère de surface **s # 0,11 m** pour  $t_{\text{pompage}} = 100$  jours
- rabattement à  $r=100$  m dans l'aquifère de surface **s # 0,11 m** pour  $t_{\text{pompage}} = 100$  jours
- rabattement à  $r=500$  m dans l'aquifère de surface **s # 0,09 m** pour  $t_{\text{pompage}} = 100$  jours
- rabattement à  $r=1\ 000$  m dans l'aquifère de surface **s # 0,05 m** pour  $t_{\text{pompage}} = 100$  jours

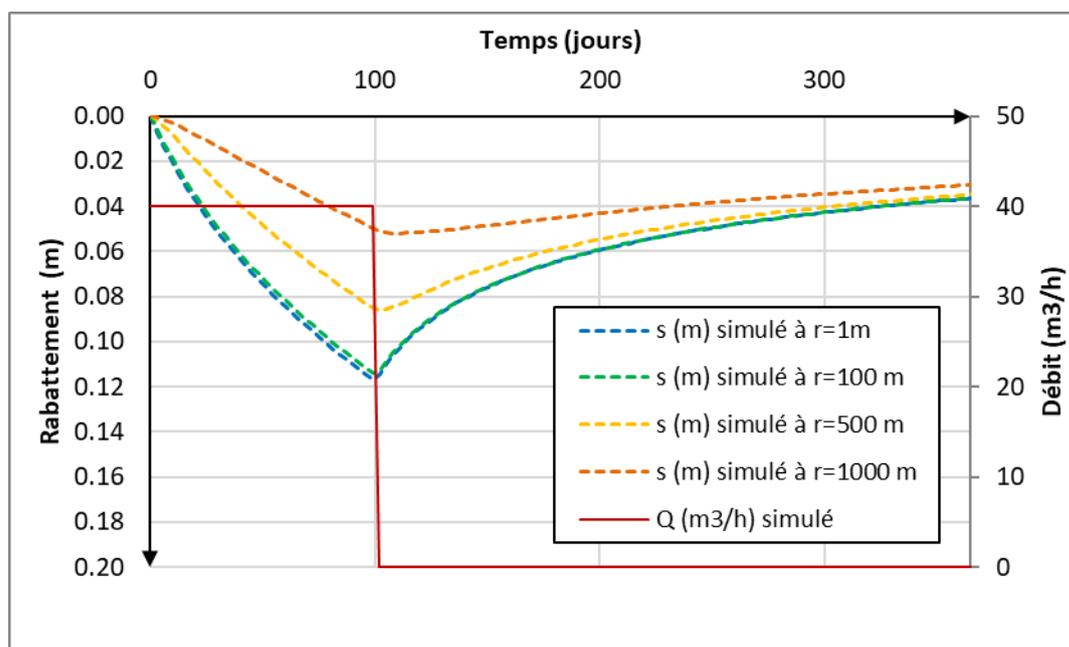
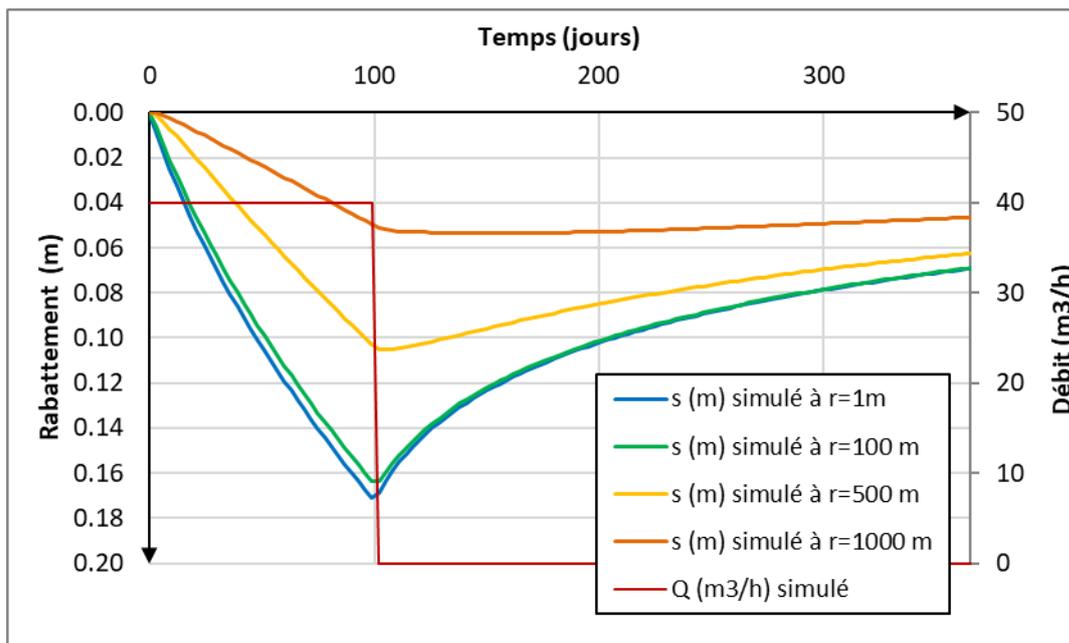


Illustration 23 : Simulation de l'impact sur l'aquifère de surface en termes de rabattement (en haut : scénario  $T = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , en bas :  $T = 4,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

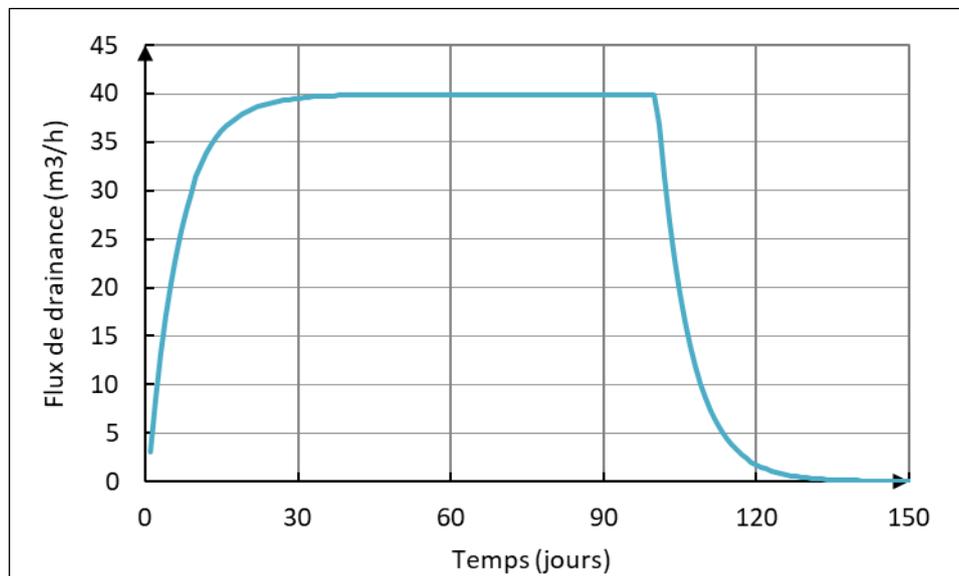
*b) Quantification de l'effet de la drainance en termes de flux*

Afin de compléter l'approche de l'estimation de l'impact en termes de rabattement sur l'aquifère supérieur, on a calculé l'effet du pompage dans l'aquifère pompé sur l'aquifère supérieur en termes de flux. Les mêmes hypothèses que précédemment ont été retenues, *via* la méthode de Hunt & Scott (2007).

Tel que montré au paragraphe précédent, le pompage dans l'aquifère inférieur impacte l'aquifère supérieur sur une très grande zone, ce qui se traduit en termes de flux de drainance par des volumes, ou débit de soutirage sur le Tuffeau conséquents :

- en moins de 40 jours de pompage on fait à peu près rentrer 100% du débit pompé dans le Cénomaniens par drainance du Turonien.

L'illustration 24 montre le calcul de l'impact du pompage dans le Cénomaniens sur le Tuffeau, pour un débit de 40 m<sup>3</sup>/h :



*Illustration 24 : Calcul du flux de drainance en provenance de l'aquifère supérieur selon un débit de pompage de 40 m<sup>3</sup>/h.*

## 2.2.6. Synthèse des interprétations

L'interprétation de l'essai de longue durée montre qu'il existe un effet de drainance entre l'aquifère captif et libre. Il a été possible de quantifier cette drainance au travers d'une perméabilité de l'aquitard, de l'ordre de  $K' = 1 \times 10^{-8}$  m/s pour une épaisseur de 21,5 m.

Les faibles écarts de transmissivité entre puits de pompage et point d'observation sont probablement liés à une certaine hétérogénéité du système multicouche et surtout à l'incertitude sur le rabattement (voire de la solution de Hantush c'est-à-dire stock infini de l'aquitard) :

- le piézomètre sur sa chronique long terme présente un comportement plus d'aquifère libre (mais il répond en système captif), ce qui traduit un comportement d'un aquifère semi-captif.

Il est à noter que les autres points d'observation dans l'aquifère de surface même beaucoup plus proches n'ont pas réagi à l'essai ce qui confirme les valeurs de l'épente semi-perméable.

Le piézomètre KHBP à 3 m du puits montre de brusques variations de charge à la mise en route et à l'arrêt du pompage :

- il s'agit d'un phénomène curieux, pour lequel aucune explication claire n'a été trouvée.

L'impact sur l'aquifère de surface a pu être simulé au travers de plusieurs simulations, l'une sur l'impact du rabattement dans l'aquifère captif (4,8 m de rabattement complémentaire s'il n'y avait pas de drainance). L'impact théorique sur l'aquifère de surface serait de l'ordre de 17 cm au bout de 100 jours de pompage à 40 m<sup>3</sup>/h à une distance d'un mètre du puits de pompage, dans l'aquifère de surface. À une distance d'un kilomètre, le rabattement théorique serait de 5 cm.

Ces valeurs de rabattement sont modestes, mais ne sont engendrées que par un seul pompage. L'impact cumulé de tous les pompages au Cénomaniens est donc lui plus net (d'après la base de données de l'OUGC consolidée par SETEC dans le cadre de l'étude HMUC, 7 forages pompent les sables cénomaniens dans un rayon d'un kilomètre des deux captages AEP de Neuillé).

Par ailleurs, le calcul du flux de drainance entre l'aquifère de surface et l'aquifère profond montre qu'après moins de 40 j de pompage, le volume extrait des sables cénomaniens par pompage est intégralement remplacé par un volume équivalent provenant du tuffeau. Ce phénomène souligne lui aussi l'impact cumulé que peuvent avoir tous les forages exploitant les sables cénomaniens sur l'aquifère de surface.

### 3. Conception d'un site témoin pour l'étude des relations nappe-plan d'eau

#### 3.1. PROPOSITION DE SITES D'INVESTIGATIONS

Le BRGM a identifié une quarantaine de sites intéressants pour observer les relations entre eaux souterraines et eaux superficielles contenues dans un plan d'eau, en s'appuyant sur les critères suivants :

- Présence d'un plan d'eau dont la surface de plan d'eau n'excède pas 20 000 m<sup>2</sup> (soit 2 ha)
- Présence d'un aquifère libre (d'après la BDLISA et la carte géologique au 1/50 000),
- Présence d'une parcelle publique à proximité immédiate du plan d'eau,
- Accès aisé par une voie de communication carrossable.

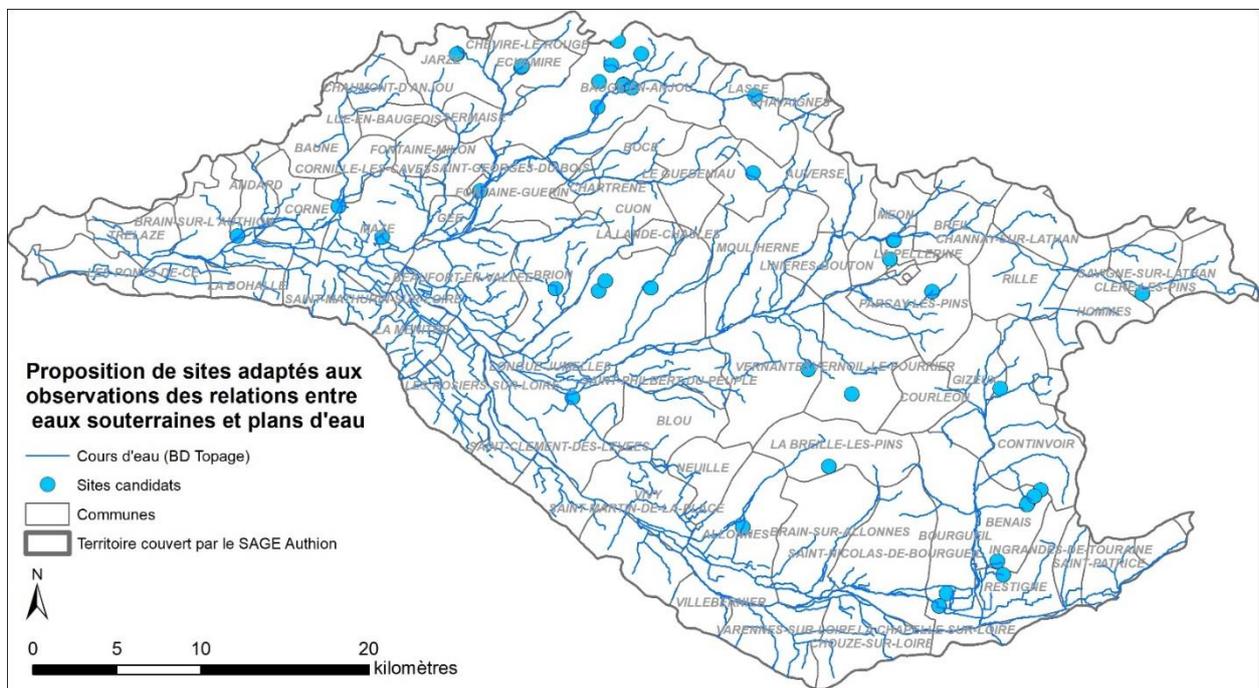


Illustration 25 : Carte non exhaustive de sites adaptés aux observations des relations entre eaux souterraines et plans d'eau.

Avant d'aller plus loin, il conviendra que le SMBA contacte les propriétaires des plans d'eau et/ou parcelles concernées, puis effectue des visites de terrain destinées à s'assurer que le site est propice aux observations des relations nappe/plan d'eau.

#### 3.2. INSTRUMENTATION POSSIBLE DU SITE RETENU

L'annexe 4 dresse la liste des possibilités d'instrumentation du site témoin et des objectifs recherchés par une telle instrumentation.



## 4. Conclusions

Les travaux menés en 2023 et 2024 par le SMBAA et le BRGM au sein des UG 6 et 9 du bassin versant de l'Authion avaient pour objectifs d'améliorer la compréhension du fonctionnement des eaux souterraines, en particulier dans le secteur de Neuillé. Ils visaient notamment à déterminer si des échanges par drainance verticale pouvaient avoir lieu entre les sables du Cénomaniens inférieur, captifs sous les marnes à ostracées, et l'aquifère sablo-crayeux séno-turonien libre.

En effet, depuis 2004, on observe une tendance à la baisse du niveau piézométrique de l'aquifère séno-turonien. De premières investigations avaient été réalisées par le BRGM en 2011 mais n'avaient pas permis d'identifier l'origine de cette baisse. Les prélèvements dans l'aquifère des sables cénomaniens peuvent-ils engendrer la baisse observée dans le tuffeau séno-turonien ?

Pour apporter des premiers éléments de réponse à cette interrogation, le BRGM a mené en mars 2024 un essai de nappe de 72h au moyen d'un forage au Cénomaniens à Neuillé tout en enregistrant les variations piézométriques dans les aquifères en présence (sables cénomaniens captifs et tuffeau séno-turonien libre).

Les résultats de l'essai ont été interprétés par les méthodes de Hantush avec drainance verticale (introduites dans le logiciel [QUAIP](#)) mais également par la méthode en dérivée au puits de pompage. Ces interprétations permettent d'estimer la transmissivité de l'aquifère cénomaniens entre  $4,1$  et  $4,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ , et son coefficient d'emmagasinement à  $2,5 \times 10^{-4}$ .

Elles permettent également de montrer **qu'il existe un effet de drainance entre l'aquifère captif du Cénomaniens et libre du Turonien**. Il a été possible de quantifier cette drainance au travers d'une perméabilité de l'aquitard, de l'ordre de  $K' = 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  et une épaisseur de 21,5 m. L'impact du pompage en terme de rabattement à la Malgagne dans l'aquifère captif sur l'aquifère de surface est faible, mais il existe et ce dernier a pu être simulé. L'impact théorique sur l'aquifère de surface serait de l'ordre de 20 cm au bout d'un an de pompage à  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  à une distance d'un mètre du puits de pompage, dans l'aquifère de surface. Il serait de 5 cm à un kilomètre du puits de pompage.

Ces valeurs de rabattement sont modestes, mais ne sont engendrées que par un seul pompage. Il est intéressant de noter que le calcul du flux de drainance montre qu'après moins de 40 j de pompage, le volume extrait des sables cénomaniens par pompage est intégralement remplacé par un volume équivalent provenant du tuffeau. Ce phénomène souligne l'impact cumulé que pourraient avoir tous les forages exploitant les sables cénomaniens sur l'aquifère de surface.

Ces résultats obtenus sur la base d'un unique essai de nappe sont pertinents à la Malgagne, mais leur extrapolation à l'ensemble des UG 6 et 9 demeure limitée et incertaine. Afin de prolonger ce travail, il serait intéressant :

- de réinterpréter avec la méthode de la dérivée des rabattements d'autres essais de nappe dont les données brutes sont disponibles dans les UG 6 et 9 ;
- de caractériser les signatures isotopiques des eaux souterraines afin d'identifier les venues d'eau turonienne dans l'aquifère cénomaniens ;
- d'estimer l'impact cumulé de tous les pompages actifs dans les sables cénomaniens des UG 6 et 9 au droit des captages AEP de Neuillé.



## 5. Bibliographie

Chrétien P. & Lucassou F. avec la collaboration de Baudouin V., Frioux A., Gautron C., Lair M., Rodriguez G., Rouxel E. & Toutain J. (2011) – Bassin Versant de Neuillé – Interprétation des campagnes piézométriques basses et hautes eaux. Rapport final – BRGM/RP-60290-FR, 46 p., 12 ill., 4 tab., 2 ann.

Chrétien P. 2024. Dossier de déclaration d'un piézomètre à Neuillé (49). Rubrique 1.1.1.0 de l'article R 214-1 du Code de l'Environnement. Rapport final V0. BRGM/RP-73409-FR, 28 p., 5 ill., 1 ann.

Dewandel B., Cabaret O., Barrière J., 2023. Valorisation des essais par pompage dans les formations carbonatées du Crétacé et du Jurassique du Bassin nord aquitain – Projet Eaux-SCARS. Rapport Final V1. BRGM/RP-73124-FR, 102 p.

Hunt, B. and Scott D., 2007. Flow to well in a two-aquifer system. J. of Hydrologic Engineering, 146-155.

KLINKA Thomas, GUTIERREZ Alexis, ELSASS J., LETAT Bruno (2020) - Manuel de OUAIP v2 – Outil d'Aide à l'Interprétation des Pompages d'essai. Rapport final (BRGM/RP-68509-FR, 136 p., 127 ill.)

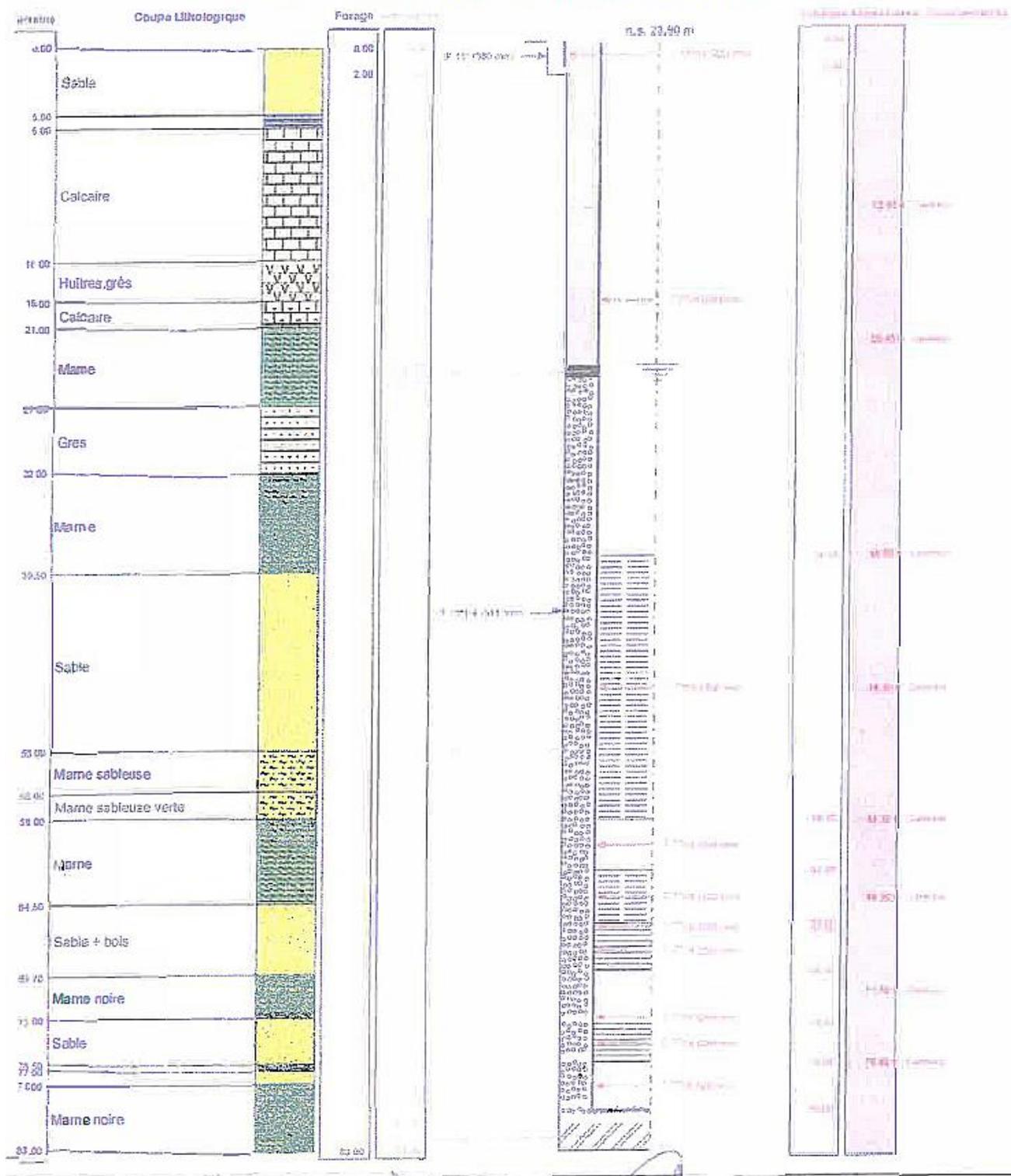


## **Annexe 1 Coupe technique du puits de pompage BSS003CKLY**

*N.B.* : La coupe technique n'est pas connue sous une meilleure qualité.

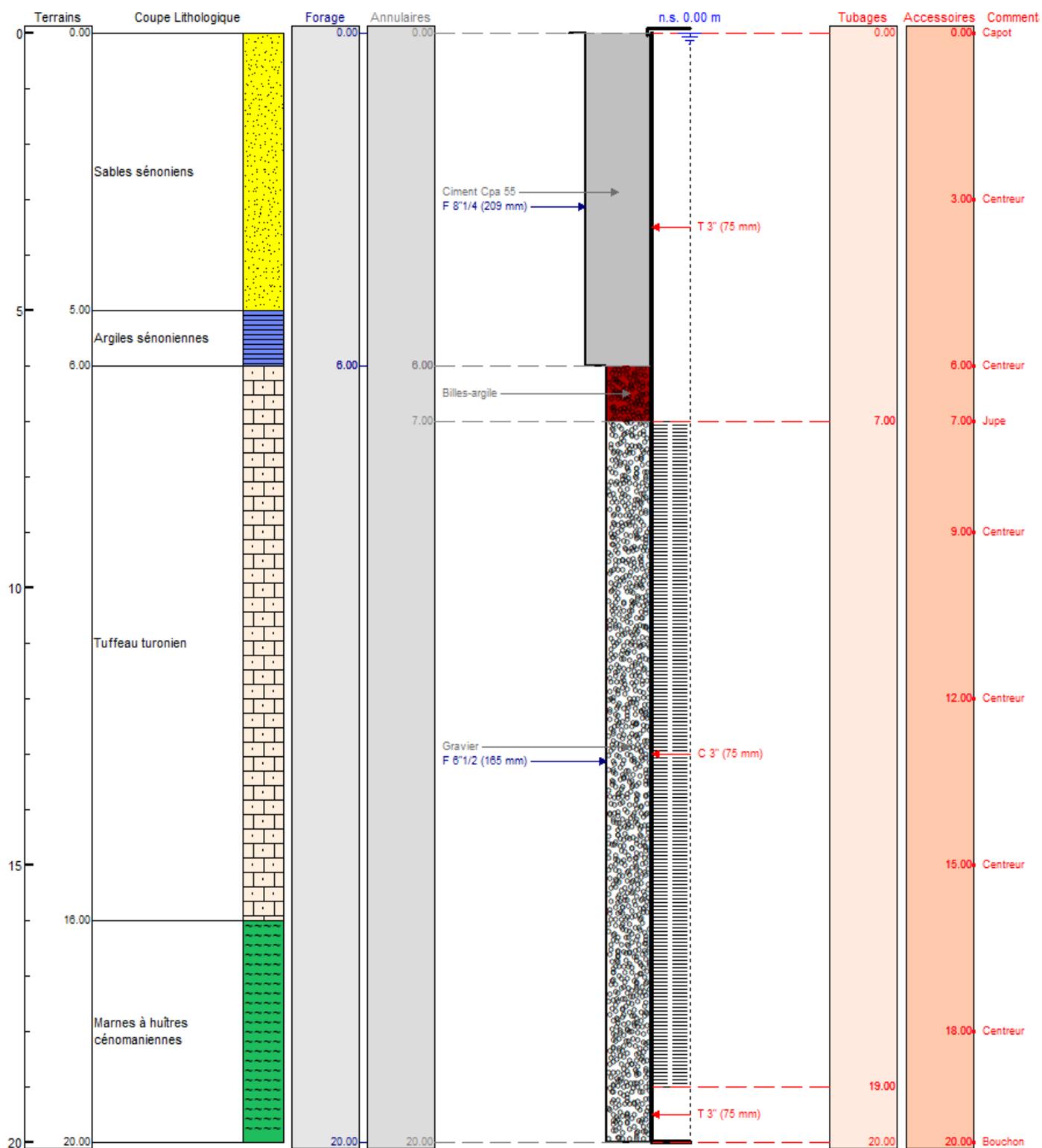


Figure 3 – Coupe géologique et technique de l'ouvrage





## **Annexe 2 Coupe technique du piézomètre BSS004KHBP**



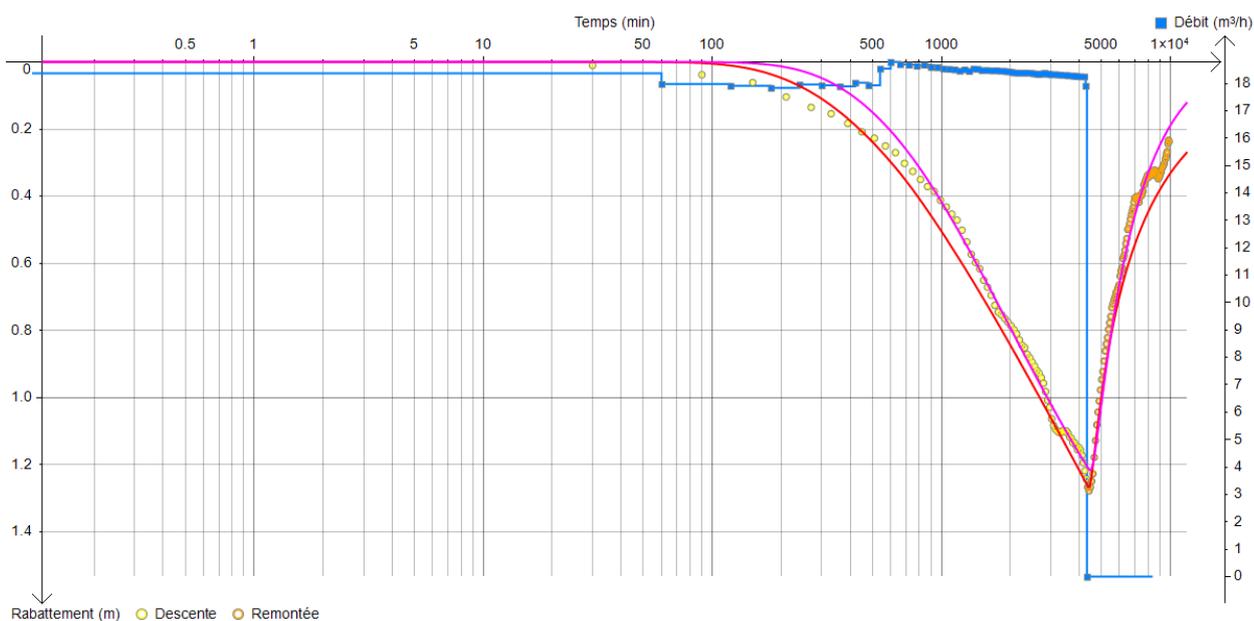
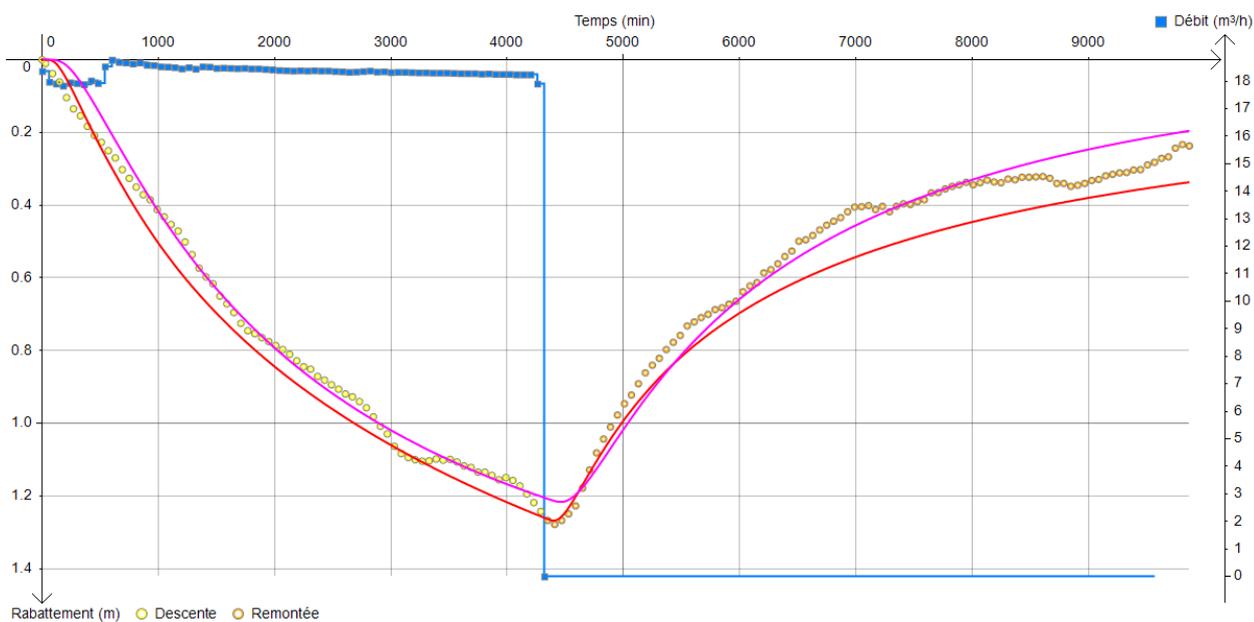
## **Annexe 3 Interprétation des pompages d'essai selon la méthode de Theis**

L'ajustement testés selon la méthode Theis (courbe rouge) et selon la méthode de Hantush (courbe verte) sont présentés ci-dessous. Les temps courts sont un peu mieux ajustés avec la solution de Hantush que la solution de Theis, et les temps longs de la remontée sont légèrement supérieurs à ceux observés, tandis que la solution de Theis demeure inférieure à ces derniers.

Avec la solution de Hantush, le facteur de drainance ajusté est  $L = 970$  m, soit  $K' = 1 \times 10^{-8}$  m/s avec  $e' = 21,5$  m (d'après la coupe géologique), la transmissivité de l'aquifère pompé est de  $T = 4,4 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.

Avec la solution de Theis, on obtiendrait  $T = 6,1 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.

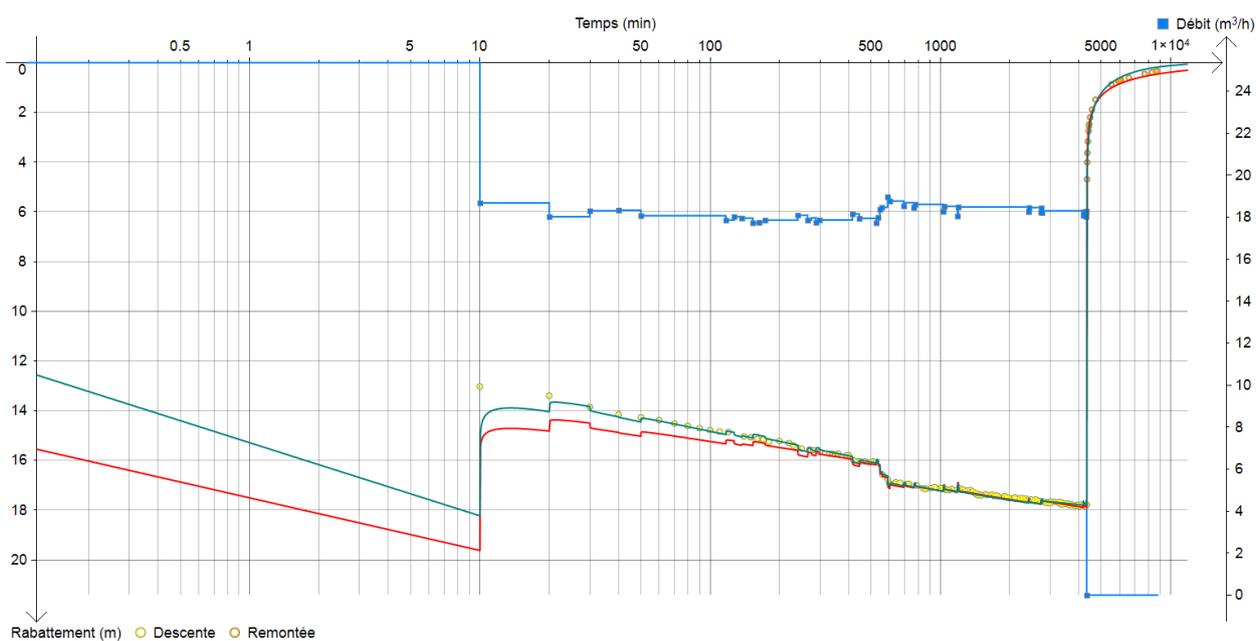
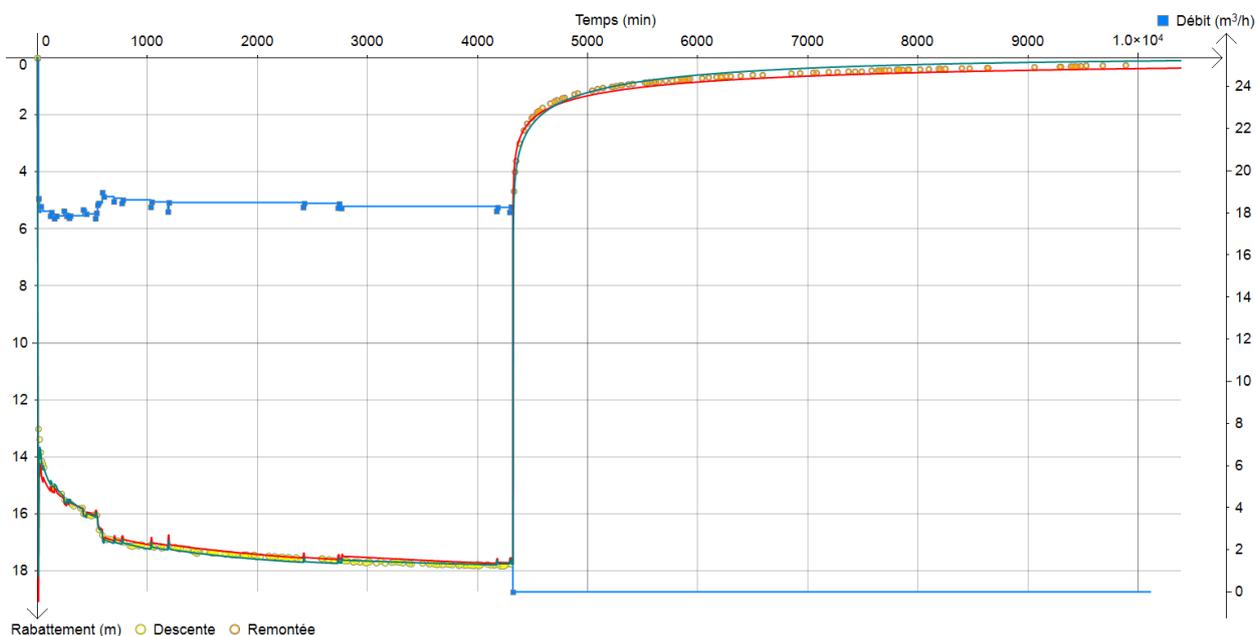
## Évaluation de la drainance entre aquifères dans le bassin des Trois-Rus (Authion, Maine-et-Loire)



Courbe	E		Formule	T	S	r	L
—	0.956	<input checked="" type="checkbox"/>	Theis, 1935	6.63E-4	2.27E-4	483.45	
—	0.983	<input checked="" type="checkbox"/>	Hantush, 1955/1964	4.10E-4	2.50E-4	483.45	857.10

Interprétation au point d'observation BSS001HKXN selon la méthode de Theis (courbe rouge) et selon la méthode de Hantush (courbe verte) selon une échelle arithmétique (en haut) et semi-logarithmique (en bas), en bleu variation du débit de pompage, points jaune/orange rabattement à la descente/remontée.

## Évaluation de la drainance entre aquifères dans le bassin des Trois-Rus (Authion, Maine-et-Loire)



Courbe	E	<input checked="" type="checkbox"/>	Formule	T	S	r	L	C
—	0.999	<input checked="" type="checkbox"/>	Theis, 1935	6.10E-4	2.60E-7	0.09		2.90E4
—	0.999	<input checked="" type="checkbox"/>	Hantush, 1955/1964	4.38E-4	1.45E-4	0.09	970.86	2.90E4

Interprétation au puits de pompage selon la méthode de Theis (courbe rouge) et selon la méthode de Hantush (courbe verte) selon une échelle arithmétique (en haut) et semi-logarithmique (en bas), en bleu variation du débit de pompage, points jaune/orange rabattement à la descente/remontée.

Les deux ajustements testés selon la méthode de Theis (courbe rouge) et selon la méthode de Hantush (courbe rose) sont également reportés. La solution de Hantush présente un meilleur ajustement en phase de descente et notamment de remontée que la solution de Theis, notamment par l'effet de drainance qui permet de simuler plus justement la remontée par rapport aux observations. La solution de Theis simule une remontée inférieure à ce qui est observée.

Avec la solution de Hantush, le facteur de drainance ajusté est  $L = 857$  m (vs 970 sur le PP), soit  $K' = 1.2 \times 10^{-8}$  m/s avec  $e' = 21.5$  m (d'après la coupe géologique), la transmissivité de l'aquifère pompé est de  $T = 4.1 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.

Avec la solution de Theis, on obtiendrait  $T = 6.6 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.



## **Annexe 4 Inventaire des méthodes d’investigation possibles et objectifs recherchés**



## Évaluation de la drainance entre aquifères dans le bassin des Trois-Rus (Authion, Maine-et-Loire)

Donnée à acquérir sur site	Détail	Type	Priorité	Objectifs recherchés	Commentaires	Méthode/instrumentation	Sources bibliographiques
Résistivité électrique	Panneaux électriques	Géophysique	2	Géométrie des formations géologiques en présence	Profondeur d'investigation : 20 m max.		RP-59068-FR §4.2
Géologie	Log géologiques	Géologie	1	Lithologie et géométrie des formations géologiques	Profondeur d'investigation : 20 m max.	sondages, forages (<20 m) sondages à la tarière manuelle (<2 m)	
Piézométrie	Mesures piézométriques continues	Hydrologie	1	Connaissance des fluctuations du niveau de la nappe libre		Piézomètres captant la nappe libre équipés de sondes de mesure (fréquence 1h)	RP-63922-FR.pdf
Pluviométrie	Quantité de précipitations	Hydrologie	1	Connaissance des entrées d'eau météorique		Pluviomètre	
Limnimétrie	Hauteur d'eau dans le plan d'eau	Hydrologie	1	Connaissance des fluctuations du niveau du plan d'eau		Sonde de mesure de pression placée en un point bas du plan d'eau	RP-63922-FR.pdf
Débits rivière	Hauteur d'eau dans la rivière	Hydrologie	1	Etablissement d'une courbe de tarage Q=f(h)		Sonde de mesure de pression placée en un point bas du cours d'eau	
Débits rivière	Jaugeages ponctuels	Hydrologie	1			Micromoulinet, courantomètre, ...	
Météo	température	Climatologie	1	impact de ces facteurs sur les variations du niveau d'eau dans le plan d'eau	recupérer également les données fournies par MétéoFrance sur une station proche (ou radar) : P, ETP	thermomètre	
Météo	vitesse du vent	Climatologie	2			anémomètre	
Météo	évaporation	Climatologie	1			bac d'évaporation	
Volumes prélevés	Volumes horaires prélevés par les usagers proches en continu	Usages	1	chronique des prélèvements d'eau	Préférable de sélectionner un plan d'eau sans prélèvement	compteurs/débitmètres connectés	
Profondeur du plan d'eau	mesures en plusieurs points de la profondeur du PE	Bathymétrie	1	géométrie du fond du plan d'eau		embarcation + GPS + pige si profondeur max < 3 m	
Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère libre	perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement	Hydrodynamique	1	Caractériser les écoulement dans le milieu poreux aquifère	repandre les caractéristiques de l'essai "la Malgagne" à Neuillé	essai de nappe 72h	RP-73908-FR
Traçage	Injection de traceur dans le PE, dans la rivière, dans les piézomètres, notamment pendant l'essai de nappe longue durée	Hydrodynamique	1	relations nappe rivière sous l'effet d'un pompage relation plan d'eau nappe sous l'effet d'un pompage	Comme la majorité de la respiration aérobie a lieu dans le lit du ruisseau, la conversion de la résazurine en résoufline représente également une mesure du taux d'échange entre la colonne d'eau et le lit du cours d'eau.	traceur : chlorure, fluorescéine, bromure, résazurine, bromure de potassium	Tracer-based characterization of hyporheic exchange and benthic biolayers in streams
Pédologie	granulométrie, porosité, conductivité hydraulique (=perméabilité)	Géologie	1	Caractériser les sédiments des berges du plan d'eau	cylindres de 30 cm de diamètres enfoncés de 10cm dans les sédiments, parois à niveau, injection d'eau à niveau constant		Physical controls and predictability of stream hyporheic flow evaluated with a multiscale model

## Évaluation de la drainance entre aquifères dans le bassin des Trois-Rus (Authion, Maine-et-Loire)

Donnée à acquérir sur site	Détail	Type	Priorité	Objectifs recherchés	Commentaires	Méthode/instrumentation	Sources bibliographiques
paramètres physico-chimiques	Conductivité pH Eh	Géochimie	2	drainage des nappes dans rivière + dynamique des apports souterrains	Le suivi des paramètres tels que la conductivité, le pH ou le potentiel redox (Eh) mesurables in situ est utilisé pour étudier le drainage des eaux souterraines dans les cours d'eau.  Le suivi de la conductivité est particulièrement efficace lorsque les eaux souterraines sont très minéralisées. Les variations temporelles de la conductivité des cours d'eau permettent également de mettre en évidence la dynamique des apports souterrains.	échantillonnage et analyse au moyen de piézomètre + prise d'eau de surface  dans les piézos : log de conductivité en mesurant à plusieurs profondeurs, notamment en période de HE pour détecter des arrivées d'eau de surface via la zone hyporhéique	RP-57044-FR §7.3.1 RP-59068-FR §5.1
ions majeurs	Ca, Mg, Na, K, HCO <sub>3</sub> , Cl, SO <sub>4</sub> , SiO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub>	Géochimie	2	détection de mélange d'eaux	minéralisation des eaux souterraines souvent plus stable et plus forte que celle des eaux de surface.  Dans les cours d'eau, il est possible d'observer des mélanges d'eaux issues de plusieurs sources en proportion différente. Pour étudier des mélanges, il est usuel d'examiner la relation des éléments de la minéralisation de tous les points d'eau avec l'élément conservatif le plus représentatif, comme les chlorures, le sodium ou les nitrates selon les cas.  Calcium et bicarbonates : en milieu carbonaté, bon marqueur des échanges nappe-rivière car principalement apporté par les eaux souterraines ce qui permet de quantifier l'apport des ESOU dans les ESUP	échantillonnage et analyse au moyen de piézomètre + prise d'eau de surface  diagrammes de Piper	RP-57044-FR §7.3.2 RP-59068-FR §5.2.2
Pression partielle de CO <sub>2</sub>	P[CO <sub>2</sub> ]	Géochimie	2	qualification de la contribution des ESOU à la qualité des ESUP	bon marqueur de la contribution des ESOU à l'alimentation des rivières. Permet de déterminer les zones principales de drainage de la nappe	échantillonnage et analyse au moyen de piézomètre + prise d'eau de surface	RP-57044-FR §7.3.2 RR-38793-FR
Isotopes	isotopes stables de l'eau : Δ18O et Δ2H	Géochimie	2	détermination de l'origine de la recharge d'un aquifère de manière spatiale (zone de recharge) et temporelle  quantification des apports des ESOU à la rivière et leur localisation et temporalité	à l'échelle d'un aquifère alluvial où la recharge est locale, la signature isotopique en isotopes stables reflète la signature moyenne pondérée des pluies efficaces.	échantillonnage et analyse au moyen de piézomètre + prise d'eau de surface	RP-57044-FR §7.4.2 b
Isotopes	isotopes du Strontium 87Sr/86Sr	Géochimie	2	permet de distinguer l'apport d'ESOU socle vs ESOU carbonatée dans une eau de surface	Les variations du rapport isotopique du Sr dans un hydrosystème donnent ainsi des informations sur l'origine et les proportions de mélanges des différents composants fluides ainsi que sur la nature et l'intensité des processus d'interaction eau-roche liés à l'altération et à l'érosion.	échantillonnage et analyse au moyen de piézomètre + prise d'eau de surface	RP-57044-FR §7.4.3 a
Isotopes	isotopes du radon 222Rn	Géochimie	2	utilisé avec succès dans de nombreuses études pour localiser des arrivées d'eau souterraine dans des rivières (zones de décharge)	le Rn est un gaz dont les concentrations dans l'atmosphère sont si faibles qu'une eau naturelle en contact avec l'atmosphère (nappe libre) perdra continuellement du Rn par volatilisation.  Ainsi les eaux souterraines ont des plus fortes concentrations en 222Rn que les ESUP, et toute augmentation de concentration en Rn dans une rivière sera un indicateur tangible d'un apport local d'ESOU	échantillonnage et analyse au moyen de piézomètre + prise d'eau de surface	RP-57044-FR §7.4.4 c





**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Direction régionale Pays-de-la-Loire**

1 rue des Saumonières  
BP 92342  
44323 – Nantes cedex 3 – France  
Tél. : 02 51 86 01 51

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**