



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Projet CENARI-O - Estimation des caractéristiques hydrodynamiques et hydrodispersives de la nappe des alluvions dans le Loiret

Rapport final

BRGM/RP-72899-FR

Version 1 du 4 septembre 2023

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

KLINKA Thomas

Avec la contribution de **DEFARGE Christian, JOZJA Nevila**
(Université d'Orléans, CETRAHE/ISTO)

Vérificateur :

Nom : GUTIERREZ Alexis

Fonction : Correspondant Scientifique

Date : 25/09/2023

Signature :

Approbateur :

Nom : Alain Saada

Fonction : Directeur Régional

Date : 23/11/2023

Signature :

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



Avertissement

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

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers 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 mis à votre disposition.

Mots clés : Pompage d'essai, essai de nappe, essai de puits, OUAIP, traçage, TRAC, alluvions, calcaires de Beauce, Loiret, projet CENARI-O, Val d'Orléans, karst, relation nappe-rivière

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

KLINKA Thomas. (2023) – Projet CENARI-O - Estimation des caractéristiques hydrodynamiques et hydrodispersives de la nappe des alluvions dans le Loiret. Rapport final V1. BRGM/RP-72899-FR, 60 p.

Projet soutenu par la Région Centre-Val de Loire



© BRGM, 2023, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-21/09/2021

Synthèse

Les investigations hydrogéologiques menées dans le cadre du projet CENARI-O ont permis de développer des connaissances inédites sur la région du Val, en particulier sur le Loiret et la nappe des alluvions ou des calcaires de Beauce. Ces recherches ont combiné un pompage d'essai de longue durée avec un traçage en écoulement radial convergent, suivis par une surveillance de la pression et de la température des eaux souterraines et eaux de surface pendant plus de 2 ans.

Concernant l'hydrodynamique, les résultats montrent que la transmissivité varie autour de 10^{-3} m²/s, et le coefficient d'emmagasinement est d'environ 2×10^{-3} . La diffusivité est estimée entre 0,5 et 1 m²/s, indiquant une bonne propagation d'influence d'une perturbation dans l'aquifère saturé. Bien que le Loiret semble influencer le niveau de la nappe, le pompage en nappe n'a pas rencontré de limite alimentée pendant les essais hydrodynamiques.

En ce qui concerne l'hydrodispersion, l'expérience de traçage a été couronnée de succès, avec environ 60 % de la masse restituée. Un modèle analytique monocouche a été utilisé pour représenter l'hydrodispersion, mais un modèle bicouche reste possible en raison de la faible connaissance de la lithologie du secteur. Des questions subsistent concernant le pompage dans un puits voisin, qui pourrait capter les alluvions et les calcaires, provoquant un transfert rapide de pression et de matière dans l'aquifère.

La porosité cinématique est estimée à 2,3 %, la dispersivité à 0,38 m, avec une vitesse maximale de 22 m/jour et une vitesse moyenne de 11 m/jour dans des conditions de gradients forcés.

Le suivi sur deux cycles hydrologiques montre des phases de recharge et de vidange continues, généralement d'un mois, parfois deux mois. Les niveaux piézométriques restent rarement stables plus de 10 jours. Le Loiret semble être systématiquement à l'origine des variations de niveaux piézométriques, avec un déphasage de quelques heures à 48 heures au maximum entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Une élévation de la cote du Loiret semble provoquer une variation correspondante d'environ la moitié dans la nappe aux points d'observation. Ces relations peuvent varier selon les conditions hydrologiques et la distance de l'observation.

Il est important de noter que le nivellement altimétrique des points est essentiel pour comprendre les relations entre les eaux souterraines et les eaux de surface, et d'autres facteurs externes, comme les précipitations et les ouvertures/fermetures des vannes dans le bassin, peuvent également influencer les observations.

D'après les suivis réalisés, un pas de temps horaire semble suffisant pour décrire ces phénomènes d'interaction entre eaux souterraines et eaux de surface.

Sommaire

1. Le projet CENARI-O	9
2. Introduction	10
3. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques	11
3.1. Méthode	11
3.2. Mise en œuvre	11
3.3. Matériels et mesures	17
3.3.1. <i>Pompage et suivi du débit de pompage</i>	17
3.3.2. <i>Suivi du niveau d'eau</i>	17
3.3.3. <i>Pré-test de pompage</i>	18
3.4. Données de l'essai	18
3.4.1. <i>Pré-test</i>	18
3.4.2. <i>Essai de nappe</i>	21
3.5. Interprétation	25
3.5.1. <i>Pré-test</i>	26
3.5.2. <i>Essai de nappe</i>	30
3.6. Synthèse	33
4. Caractérisation des propriétés hydrodispersives	35
4.1. Méthode	35
4.2. Mise en œuvre	35
4.3. Matériels et mesures	35
4.4. Données de l'essai	35
4.5. Interprétation	37
4.6. Synthèse	41
5. Suivi des niveaux dynamiques de l'hydrosystème	43
5.1. Présentation des chroniques suivis	44
5.1.1. <i>Baromètre</i>	44
5.1.2. <i>Puits M. Liger</i>	44
5.1.3. <i>Puits Mme De Koninck</i>	45
5.1.4. <i>Loiret</i>	46
5.2. Comparaison des chroniques et analyses	48
5.3. Synthèse	53
6. Conclusion	55
7. Références	57

Liste des figures

Illustration 1 : Schéma représentant une limite alimentée (à gauche) et étanche (à droite).....	11
Illustration 2 : Localisation des points de suivi (flèches rouges et orange) sur fond de carte (IGN, orthophoto)	12
Illustration 3 : Synthèse des coordonnées et caractéristiques des points de suivis de l'essai de nappe.....	13
Illustration 4 : A gauche puits de M. Liger, à droite puits de Mme De Koninck.....	14
Illustration 5 : Sondage à même le sol localisé dans la cave de Mme Moreau, affleurement et arrivée d'eau variable au cours de l'année.....	14
Illustration 6 : Coupe technique du puits de M. Liger (puits de pompage), la nature des ouvertures (barbacanes ?) n'est pas connue	15
Illustration 7 : Coupe technique du puits de Mme De Koninck (puits d'observation), , la nature des ouvertures n'est pas connue	16
Illustration 8 : Rabattement au puits de pompage (Puits Liger) durant le pré-test à 9.5 m ³ /h, pas de temps 1 s	19
Illustration 9 : Rabattement au puits d'observation (Puits De Koninck) durant le pré-test à 9.5 m ³ /h, pas de temps 5 min.....	19
Illustration 10 : Comparaison du rabattement au puits de pompage (Puits Liger) et au point d'observation (Puits De Koninck) durant le pré-test à 9.5 m ³ /h.....	20
Illustration 11 : Évolution de la profondeur du niveau d'eau et de la température au puits de pompage (Puits Liger) du 27/08 au 20/10/20	22
Illustration 12 : Évolution de la profondeur du niveau d'eau et de la température au droit du puits d'observation (Puits De Koninck) du 26/08 au 25/10/2020	23
Illustration 13 : Évolution du niveau d'eau relatif et de la température au droit d'un trou localisé dans la cave de Mme Moreau du 03/09 au 06/10/2020.....	24
Illustration 14 : Évolution du niveau d'eau relatif et de la température du Loiret du 24/09 au 27/10/2020.....	25
Illustration 15 : Pré-test - Paramètres hydrodynamiques déduits.....	27
Illustration 16 : Pré-test - Calage retenu avec la méthode de Theis (courbe rouge) au point d'observation, en haut échelle arithmétique, en bas échelle semi-logarithmique.....	28
Illustration 17 : Pré-test - Calage retenu avec la méthode de Theis (courbe verte) au puits de pompage, en haut échelle arithmétique, en bas échelle semi-logarithmique	29
Illustration 18 : Essai de nappe - Paramètres hydrodynamiques déduits.....	30
Illustration 19 : Essai de nappe - Calage retenu avec la méthode de Theis (courbe rouge) au point d'observation, en haut échelle arithmétique, en bas échelle semi-logarithmique.....	31
Illustration 20 : Essai de nappe - Calage retenu avec la méthode de Theis (courbe verte) au puits de pompage, en haut échelle arithmétique, en bas échelle semi-logarithmique	32
Illustration 21 : Propriétés hydrodynamiques déduites lors des pompages d'essai.....	33
Illustration 22 : Simulation de l'impact du pompage d'essai d'après les propriétés déduites au puits de pompage pour r=100 m	34
Illustration 23 : Courbe de restitution du traceur au cours du temps (date).....	36

Illustration 24 : Courbe de restitution du traceur depuis l'injection (temps t_0 , en jours).....	36
Illustration 25 : Schéma du système de traçage radial convergent	37
Illustration 26 : Résultat du calage de la courbe de restitution, en bleu observations, en rouge calage analytique	38
Illustration 27 : Paramètres de calage de la courbe de restitution.....	38
Illustration 28 : Schéma d'un aquifère constitué d'un système bicouche non communicant.....	39
Illustration 29 : Résultat du calage de la courbe de restitution, en bleu observations, en rouge calage analytique, courbe orange milieu 1, courbe verte milieu 2.....	40
Illustration 30 : Paramètres de calage de la courbe de restitution via un modèle bicouche.....	40
Illustration 31 : Localisation des suivis au bord du Loiret	43
Illustration 32 : Synthèse des points suivis et de leurs chroniques.....	43
Illustration 33 : Suivi barométrique et température de l'air entre avril 2021 et mai 2023.....	44
Illustration 34 : Suivi en pression (colonne d'eau) et température de l'eau entre avril 2021 et mai 2023 (en bas) au puits Liger et entre avril 2021 et août 2022 (en haut).....	45
Illustration 35 : Suivi en pression (colonne d'eau) et température de l'eau entre avril 2021 et mai 2023 (en bas) au puits De Koninck et entre avril 2021 et août 2022 (en haut).....	46
Illustration 36 : Suivi en pression (colonne d'eau) et température de l'eau entre avril 2021 et mai 2023 (en bas) au niveau du Loiret et entre avril 2021 et août 2022 (en haut)	47
Illustration 37 : Cotes piézométriques des deux puits (en haut) en supposant qu'elles sont à la même altitude (en bas) entre avril 2021 et août 2022.....	49
Illustration 38 : Cote piézométrique et cote du fil d'eau du Loiret (en haut) configurée de façon à comparer la réactivité nappe-rivière (en bas).....	50
Illustration 39 : Zoom sur une période de hausse du Loiret suivie d'une rehausse des cotes piézométriques moins de 24h après	52
Illustration 40 : Cotes piézométriques des deux puits (en haut) en supposant qu'elles sont à la même altitude (en bas) entre avril 2021 et mai 2023	52

1. Le projet CENARI-O

Ce paragraphe est commun aux trois rapports du projet CENARI-O.

Les relations d'échange entre eaux souterraines et eaux de surface sont encore mal contraintes dans l'espace et dans le temps. Ces échanges sont cependant primordiaux dans le contexte de changement climatique qui prédit l'augmentation des événements extrêmes, étiages plus sévères et crues majeures.

Pour des longs fleuves (milliers de kilomètres), le flux d'échange net avec le milieu souterrain est approximativement égal au débit. À l'échelle plus détaillée du tronçon de rivière, l'importance des échanges hyporhéiques augmente fortement (Cardenas, 2008), et leur rôle est fondamental, que ce soit pour l'écologie des rivières ou pour la compréhension des flux biogéochimiques (Boulton et al., 1998). Or, les méthodes existantes sont essentiellement basées sur des approches à grande échelle et ne permettent pas une gestion des petits cours d'eau sensibles, par tronçon.

Le projet CENARI-O a pour ambition de développer une méthode multicritère de caractérisation fine des échanges nappe-rivière. Pour caractériser ces échanges, à chaque échelle spatiale correspond une méthodologie adaptée : télédétection, piézométrie, pompages d'essai et débitmétrie, traçage artificiel, traçage naturel de l'eau (température, isotopie de l'eau, ions majeurs ou carbone organique dissous, gaz dissous). Coupler ces différentes méthodes scientifiques de caractérisation des échanges entre nappes et rivières, sur le système Loire-nappe-Loiret, permettra de développer une approche innovante, dans la description multi-échelle des échanges nappe-rivière. Les verrous scientifiques identifiés portent sur les variations spatiales et temporelles des flux d'eau, ainsi que sur leur quantification.

Ce projet vise à confronter les différentes méthodes citées précédemment, sur les mêmes tronçons de rivières, entre Loire et Loiret où les échanges nappe/rivière sont très importants (Binet *et al.*, 2017; Lalot *et al.*, 2015). Notre hypothèse est que la diversité des résultats, liés aux différentes méthodologies, doit nous permettre d'appréhender les échanges (et les mélanges) dans toute leur complexité spatio-temporelle.

Les résultats et interprétations des méthodes de caractérisation des échanges nappe-rivière font l'objet de trois rapports :

Projet CENARI-O. Variabilité spatio-temporelle de la chimie des eaux dans la caractérisation des échanges nappe-rivière du Loiret. Rapport final. BRGM/RP-72897-FR.

Projet CENARI-O. Morphologie karstique en rivière des pertes dans la Loire à Jargeau aux résurgences du Loiret (45). Rapport final. BRGM/RP-72898-FR

Projet CENARI-O. Estimation des caractéristiques hydrodynamiques et hydrodispersives de la nappe des alluvions dans le Loiret. Rapport final. BRGM/RP-72899-FR

2. Introduction

Dans le cadre du projet CENARI-O, des investigations hydrogéologiques ont été menées afin de développer les connaissances sur le Loiret et la nappe des alluvions ou des calcaires de Beauce. Il s'agit notamment d'évaluer à partir d'expérimentations sur le terrain, plus précisément sur la commune de Saint-Hilaire-Saint-Mesmin (45) les propriétés de l'aquifère constitué par les alluvions, à l'affleurement.

Ces expériences, inédites, n'avaient jusqu'alors jamais été conduites sur ce secteur d'étude. Elles sont de deux types, la première s'intéresse aux caractéristiques de flux et d'emménagement de l'aquifère, tandis que la seconde se focalise sur les propriétés hydrodispersives sur le milieu souterrain, traduisant les vitesses d'écoulement ainsi que la dispersivité et le cheminement de l'eau.

Enfin, en complément, une action a été réalisée à la suite des pompages d'essai couplé au test de traçage artificiel, il s'agit du suivi en pression et température des eaux de surface et des eaux souterraines afin d'identifier leur interaction, pendant plus de 2 ans avec un pas d'acquisition de 15 ou 30 minutes.

Dans ce rapport, on s'attache à détailler le protocole expérimental mis en œuvre, les résultats ainsi que les interprétations quantitatives qui en découlent. Pour terminer on synthétisera ces données de sorte à ce qu'elles permettent d'enrichir les connaissances actuelles.

3. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques

3.1. METHODE

Les pompages d'essai constituent un outil essentiel pour la caractérisation du milieu souterrain. Ils sont particulièrement utilisés en hydrogéologie (et dans l'exploitation pétrolière) afin d'estimer les propriétés hydrodynamiques des aquifères : à savoir le coefficient de perméabilité (K , m/s) et le coefficient d'emmagasinement spécifique (S_s , en m^{-1}). Estimer K et S_s permet de déterminer la transmissivité (T , m^2/s) et le coefficient d'emmagasinement (S , sans unité) qui intègrent l'épaisseur de l'aquifère. Ces paramètres jouent un rôle clé, notamment dans la délimitation des périmètres de protection, la prédiction du transport de contaminant et l'estimation de la recharge des aquifères.

Le suivi de l'évolution du front de pression sous l'effet d'un pompage dans l'aquifère peut permettre d'identifier ses caractéristiques (T , S) ainsi que ses frontières géologiques ou hydrodynamiques (Illustration 1 : limite d'alimentation, limite étanche).

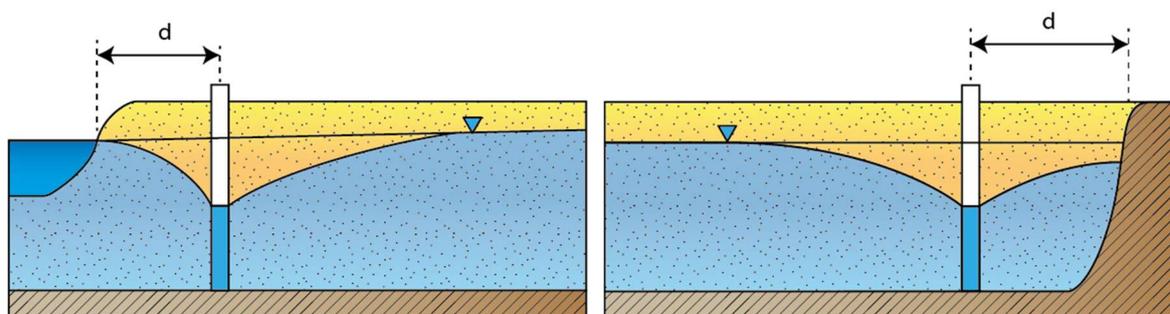


Illustration 1 : Schéma représentant une limite alimentée (à gauche) et étanche (à droite)

L'essai de nappe est un essai de longue durée (en général 24 à 96 h selon les objectifs et besoins en terme de simulation) à débit constant qui consiste à suivre l'évolution du niveau dynamique au puits de pompage et au droit d'un ou plusieurs piézomètres (points d'observation) alentours ainsi que le débit de pompage afin d'en déduire les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère. Le suivi de la descente ainsi que de la phase de remontée sont suivis sur l'ensemble des ouvrages.

3.2. MISE EN ŒUVRE

Un pompage d'essai de longue durée (essai de nappe de 8 jours, soit environ 195 h) à débit constant a été réalisé du jeudi 24/09/2020 à 13h00 au vendredi 02/10/2020 à 16h34 (fin du pompage), la remontée a été suivie *via* des capteurs de pression en place pendant au moins 18 jours (soit 435 h).

Un essai de puits n'a pas pu être réalisé compte tenu des contraintes de temps et du dispositif technique qui a été livré (défaillance du coffret de commande de la pompe avec variateur de fréquence). Le débit de pompage a été fixé de telle sorte à ce qu'il induise un faible dénoyage de l'aquifère afin de rester dans l'hypothèse d'un écoulement radial convergent.

Le débit de pompage « objectif » de l'essai de nappe a été fixé de l'ordre de $10 \text{ m}^3/\text{h}$. Une phase de préreglage du débit a été réalisée le 17/09/2020 lors d'un pré-test.

Il est à noter que dans le cas présent, les points d'observation satellites sont constitués d'un puits d'observation et d'un sondage localisé dans une cave, située à environ 2.5 m sous le niveau du sol et dont le propriétaire indique que le niveau de l'eau dans la cave fluctue au cours de l'année. Il est à noter qu'un autre puits existe dans le secteur mais le propriétaire a refusé que des mesures y soient réalisées. Ces deux points sont localisés :

- Puits d'observation de Mme De Koninck : distant de 33 m du puits de pompage ;
- Sondage localisé dans la cave, point d'observation de Mme Michèle : distant de 58 m du puits de pompage ;
- Suivi du niveau au droit des bords du Loiret : distant de 100 m du puits de pompage.

Autres ouvrages connus non suivis :

- Puits de M. Ferreira ([BSS001BZMM](#) / 03981X0352), n'a pas souhaité participer à l'étude, distant de 195 m du puits de pompage ;
- Puits de Mme Michèle, l'ouvrage n'est pas accessible, il est scellé en surface, distant de 65 m du puits de pompage.

Les ouvrages suivis sont présentés sur la carte à l'illustration 2. La zone ne présente pas d'autres forages connus ou identifiés lors de la visite de terrain dans les alentours susceptibles de perturber l'essai de nappe.

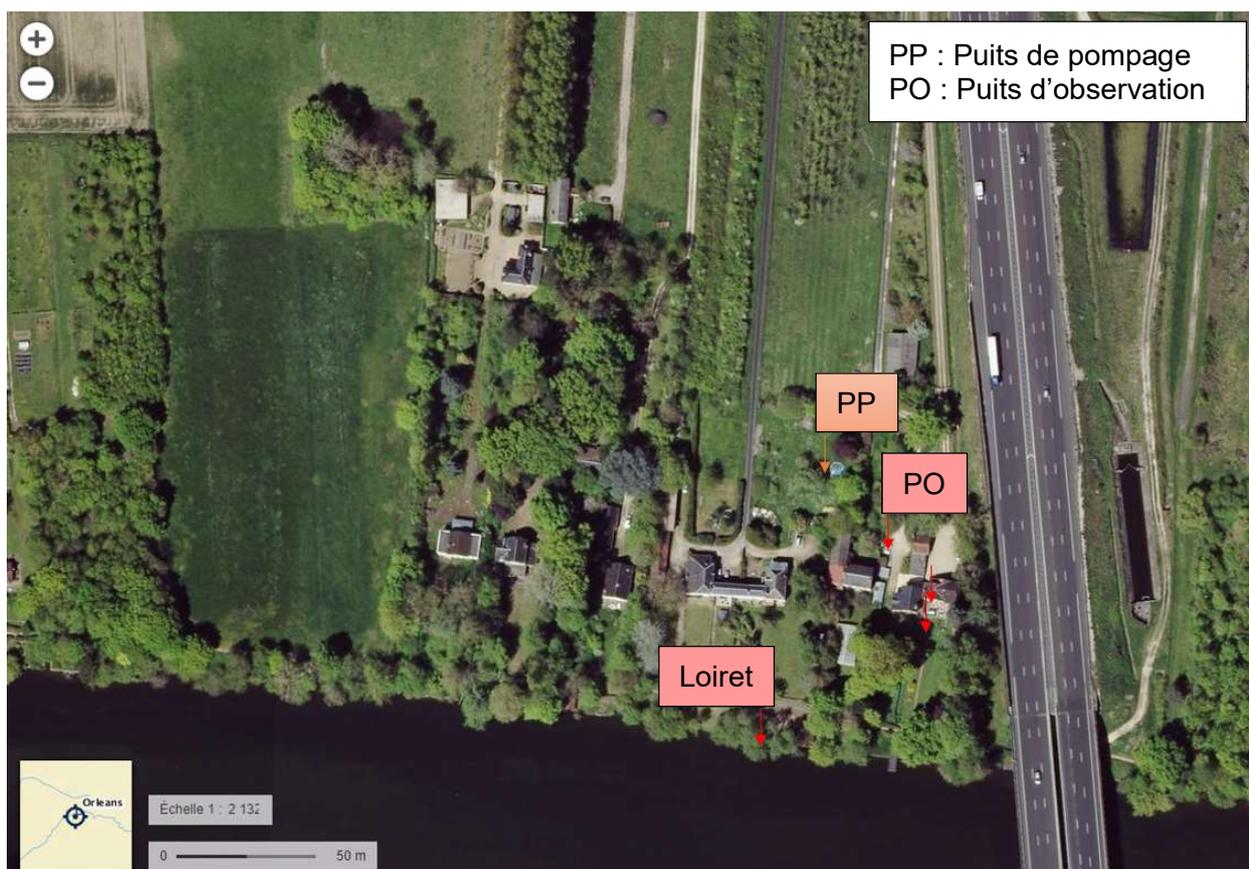


Illustration 2 : Localisation des points de suivi (flèches rouges et orange) sur fond de carte (IGN, orthophoto)

Les coordonnées et caractéristiques des points suivis sont synthétisées à l'illustration 3 :

Type de suivi	X (Lambert 93, m)	Y (Lambert 93, m)	Diamètre (mm)	Profondeur (m)	Margelle (m)	Profondeur du niveau statique (m/repère)	Altitude du repère de mesure (mNGF)
Puits de pompage	614 883	6 753 168	1000	6.26	0.35	3.83	92.78
Puits d'observation	614 906	6 753 142	750	4.90	0.30	4.90	92.976
Cave (trou dans le sol)	614 925	6 753 125	200	0.20	-2.50	0.00	NC
Loiret	614 863	6 753 070	NA	NA	NA	NA	90.712

Illustration 3 : Synthèse des coordonnées et caractéristiques des points de suivis de l'essai de nappe

Il est à noter que l'on attribue les numéros BSS suivants aux ouvrages suivis précédents :

- Puits de pompage : [BSS001BZAY](#) (03981X0099) (M. Liger)
- Puits d'observation à 33 m au SO du puits de pompage : non référencé (Mme De Koninck)
- Cave (sondage dans le sol) : non référencé
- Loiret : il s'agit d'un capteur de pression installé de façon temporaire dans le Loiret

Des photos des points d'observation sont présentées à l'illustration 4 et l'illustration 5. Les repères de mesure ont été nivelés au GPS différentiel à précision centimétrique.

Les coupes techniques des puits ont été redessinées sur la base des observations faites sur le terrain (donc sans lithologie). L'illustration 6 présente la coupe technique du puits de M. Liger et l'illustration 7 celle du puits de Mme De Koninck.



Illustration 4 : A gauche puits de M. Liger, à droite puits de Mme De Koninck



Illustration 5 : Sondage à même le sol localisé dans la cave de Mme Moreau, affleurement et arrivée d'eau variable au cours de l'année

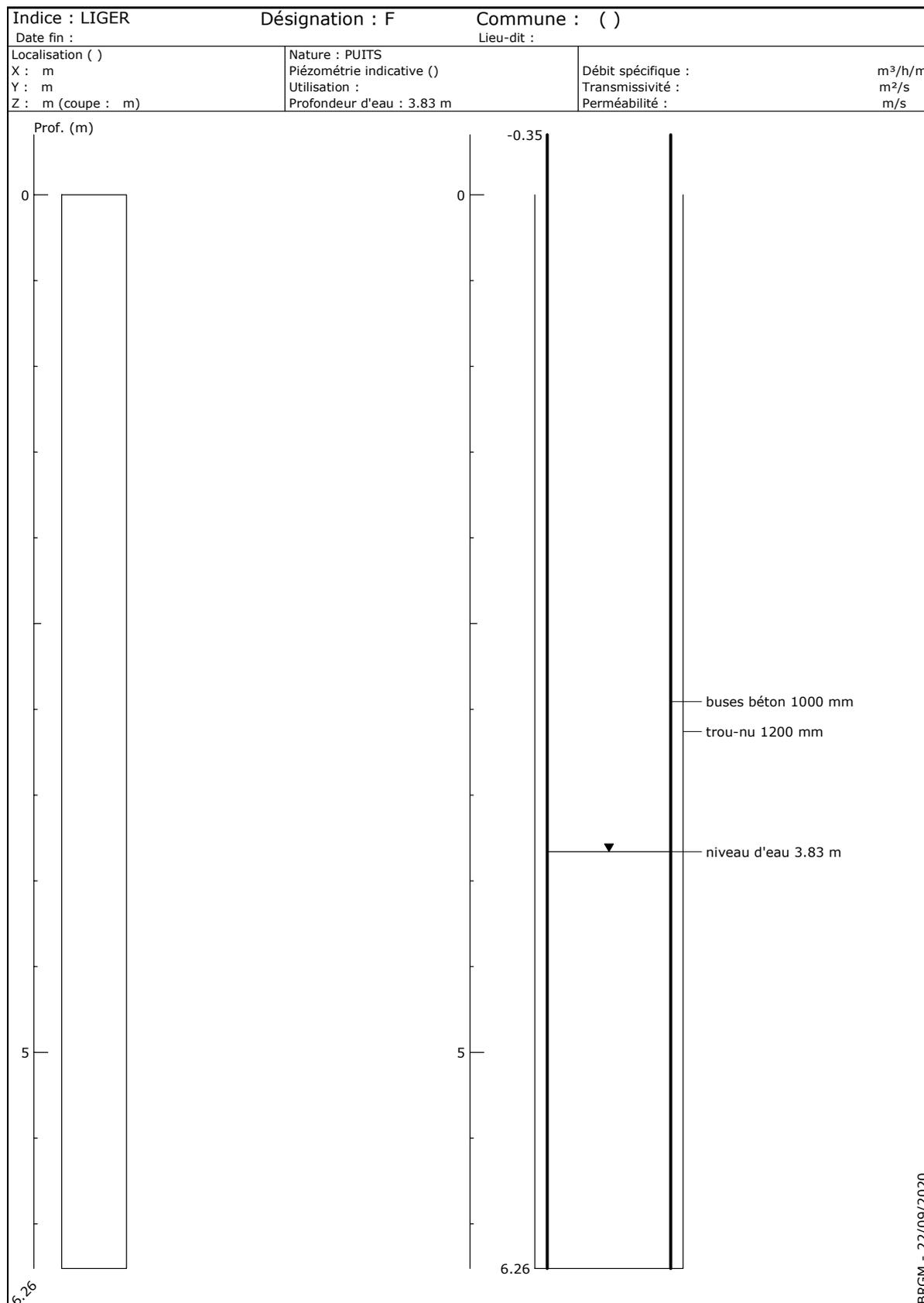


Illustration 6 : Coupe technique du puits de M. Liger (puits de pompage), la nature des ouvertures (barbacanes ?) n'est pas connue

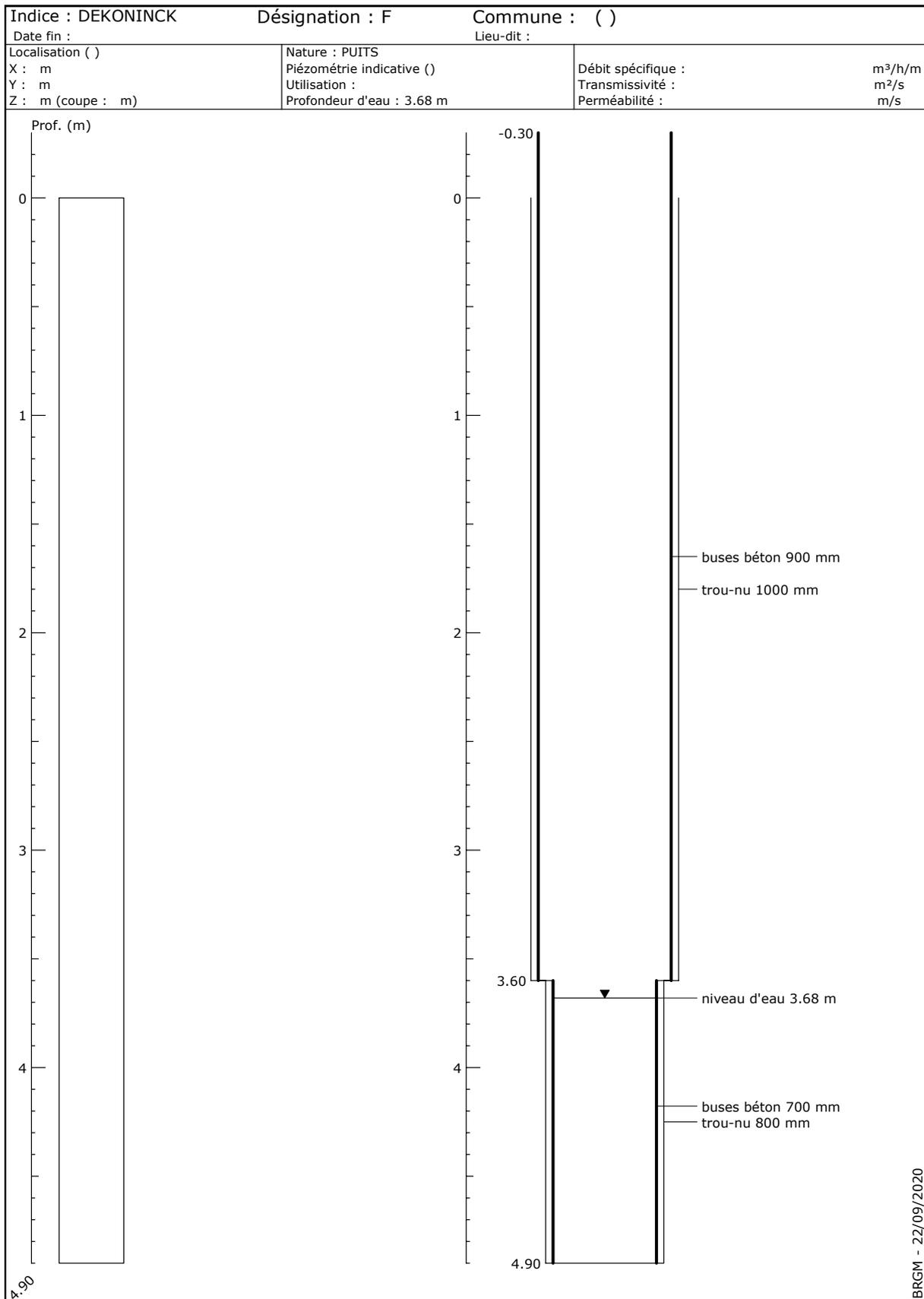


Illustration 7 : Coupe technique du puits de Mme De Koninck (puits d'observation), la nature des ouvertures n'est pas connue

3.3. MATERIELS ET MESURES

D'un point de vue pratique, l'essai de nappe a été réalisé sur le puits de pompage de M. Liger. Pour le suivi de cet essai, le puits de pompage a été équipé des dispositifs décrits ci-après.

3.3.1. Pompage et suivi du débit de pompage

Une pompe adaptée à la gamme de débit à tester et capable de refouler une hauteur manométrique totale compatible avec l'équipement en place (pertes de charges linéaires liées aux tuyaux/conduites, à la hauteur totale de refoulement jusqu'au point d'exhaure) a été installée. Il s'agit d'une pompe de modèle Grundfos SQE77-40, d'un débit nominal de 7 m³/h (puissance nominale P2 = 1.55 kW), de diamètre extérieur 3 pouces (soit 74 mm). La crépine de la pompe a été installée à 6 m de profondeur (par rapport au repère, le haut de la margelle du puits).

Un compteur débitmétrique a été installé (débitmètre électromagnétique) avec affichage direct du débit instantané, de modèle IFM 2000 avec plage de mesure du débit de 0.3 à 36 m³/h. L'acquisition automatique des données et leur envoi par e-mail (télésurveillance) à intervalle régulier (paramétrable) sur une centrale n'a pas été rendu possible malgré la commande de ce matériel (indisponibilité lors de l'envoi).

Un coffret de commande de la pompe avec variateur aurait dû permettre la régulation du débit, toutefois ce dernier s'est révélé non fonctionnel lors de l'installation. Une vanne de régulation du débit montée sur la canalisation a permis d'ajuster le débit de pompage.

Le rejet des eaux de pompage a été réalisé 60 m en aval (tuyau souple NBR pouvant être aplati, DN50), proche du Loiret, dans un tuyau collectant les eaux pluviales et se jetant 40 m en aval dans le Loiret. Le volume total rejeté durant l'essai de nappe est de l'ordre de 1 414 m³.

Le réglage de la vanne a été réalisé une heure avant le début de l'essai afin d'évaluer :

- Le plus faible débit admissible par la pompe, induisant un rabattement significatif ;
- Le plus fort débit respectant le rabattement maximal admissible.

L'alimentation de la pompe se fait *via* le réseau électrique.

3.3.2. Suivi du niveau d'eau

Un capteur de pression Mini Diver a été mis en place pour suivre l'évolution du niveau d'eau au droit du puits de pompage, ce capteur a été positionné 2,08 m (24/09/2020) sous le niveau d'eau (soit à 6,03 m/repère) et environ 1 m au-dessous de la crépine d'aspiration de la pompe. La sensibilité du capteur est adaptée aux gammes de pression à mesurer soit 1 bar (0-10 m). Le capteur a été équipé d'un câble de liaison permettant le suivi en temps réel et la paramétrisation de ce dernier une fois immergé. Un capteur de secours a été installé en doublon pour pallier à toute défaillance technique.

Une sonde piézométrique manuelle (de longueur supérieure à 10 m) a été utilisée pour contrôler régulièrement l'évolution du niveau d'eau en cours de pompages et interpréter l'essai en temps réel.

Les appareils liés à l'enregistrement (capteur de pression, baromètre) et munis d'une horloge ont été synchronisés à la même heure (*via* une horloge atomique) avant le début des essais.

Un suivi de la barométrie est réalisé *via* un baromètre et le suivi du niveau Loiret (à 100 m du puits de pompage) a également été réalisé *via* un capteur de pression immergé, à environ 1 m sous le niveau du Loiret.

3.3.3. Pré-test de pompage

En préalable à l'essai de nappe un pré-test a été réalisé afin de se mettre dans les conditions de l'essai de nappe, son objectif est de :

- Tester la mise en marche/l'installation de la pompe dans le puits sur un temps court (inférieur à 1 heure) ;
- Vérifier la modulation du débit de pompage (possibilité de faire varier le débit, de le brider) ;
- Contrôler le fonctionnement du débitmètre (stabilité du débit, enregistrement du débit, déstockage des données sur support informatique) ;
- Mesurer les variations du niveau dynamique sous l'effet du pompage (mesure du niveau statique et dynamique) afin de dimensionner par la suite le débit envisagé lors de l'essai de nappe.

Le pré-test a été réalisé le 17/09/2020 à 10h55 pendant 50 minutes à 10 m³/h. Il a permis de tester l'ensemble de l'installation et de vérifier les points techniques importants à la bonne réalisation de l'essai de nappe.

Les valeurs de rabattement et de débit de pompage ont permis d'établir plus précisément le programme de l'essai de nappe (débits envisageables). Ce dernier a permis de mesurer l'impact du pompage sur un point d'observation (Puits Mme De Koninck).

3.4. DONNEES DE L'ESSAI

Ce chapitre présente les données acquises durant les essais : pré-test et essai de nappe.

3.4.1. Pré-test

Le pré-test a permis de tester l'installation en place. Il a été réalisé au droit du puits Liger, d'une durée de 50 min à 9.5 m³/h. Le suivi du niveau a été réalisé en même temps au puits d'observation (Puits De Koninck). Le troisième ouvrage d'observation (Cave Mme Moreau) n'était pas encore accessible lors de l'essai.

L'illustration 8 et l'illustration 9 présentent les rabattements mesurés avec les capteurs de pression installés respectivement au puits Liger et au puits De Koninck durant le pré-test. Durant le pré-test, le niveau dynamique au puits de pompage est passé sous le niveau du capteur de pression, cette observation est traduite par l'absence de suivi de 12 à 22 min, le temps de repositionner le capteur de pression.

Les niveaux suivants ont été mesurés (en mètres par rapport au repère, m/r) :

- Au puits de pompage (Puits Liger) :
 - o Niveau statique avant le début de l'essai : 3.95 m/r ;
 - o Rabattement : 1.30 m (t=50 min).
- Au puits d'observation (Puits De Koninck) :
 - o Niveau statique avant le début de l'essai : 3.82 m/r ;
 - o Rabattement : 0.11 m (t=50min).

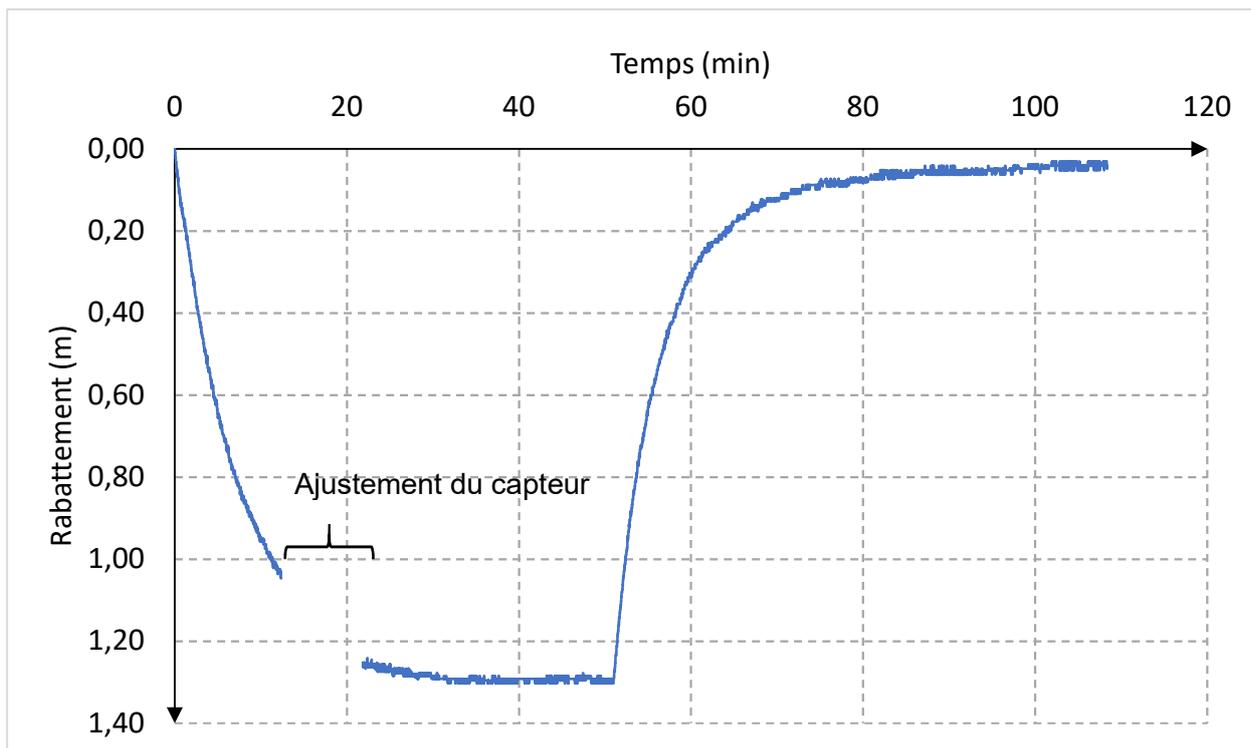


Illustration 8 : Rabattement au puits de pompage (Puits Liger) durant le pré-test à $9.5 \text{ m}^3/\text{h}$, pas de temps 1 s

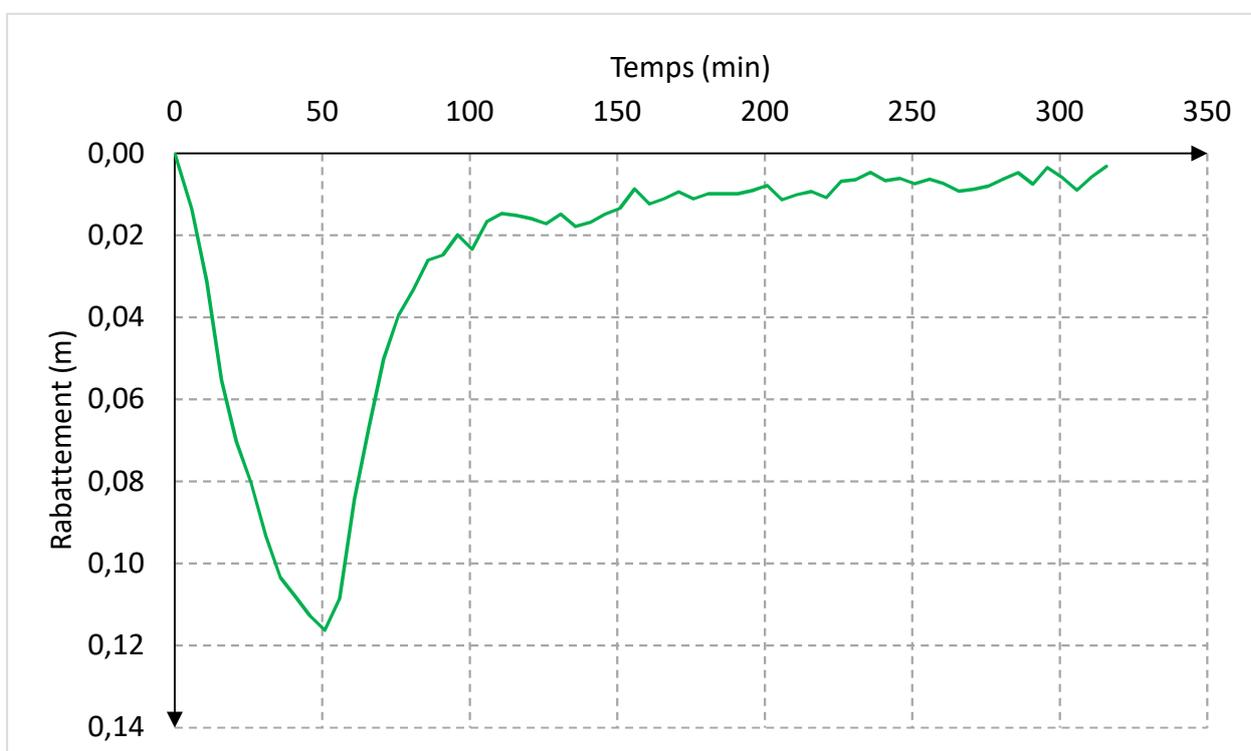


Illustration 9 : Rabattement au puits d'observation (Puits De Koninck) durant le pré-test à $9.5 \text{ m}^3/\text{h}$, pas de temps 5 min

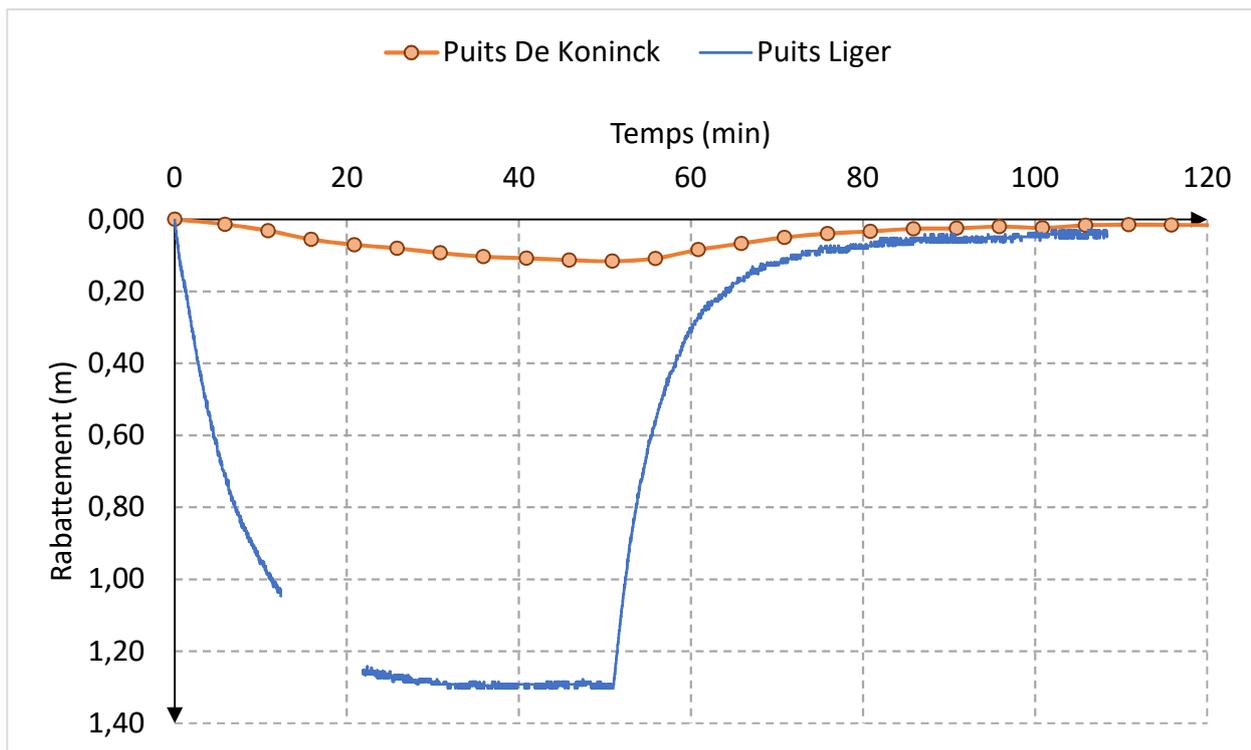


Illustration 10 : Comparaison du rabattement au puits de pompage (Puits Liger) et au point d'observation (Puits De Koninck) durant le pré-test à 9.5 m³/h

3.4.2. Essai de nappe

L'essai de nappe a été réalisé au droit du puits Liger, d'une durée d'environ 8 jours initialement à 9.5 m³/h, le débit a été modulé à 7 m³/h au bout d'un jour en raison de la baisse rapide des niveaux dans le puits induisant un niveau dynamique proche de la crépine d'aspiration de la pompe. Le débit de pompage et le niveau dynamique ont été contrôlés par la suite une fois par jour.

Le suivi du niveau d'eau a été réalisé au puits d'observation (Puits De Koninck) ainsi que sur un troisième point d'observation (Cave de Mme Moreau).

Le niveau relatif du Loiret a également été suivi pendant l'essai, le capteur était positionné en rive droite du Loiret, au niveau de la propriété de M. Liger, sur les bords du Loiret.

On présente ci-après les chroniques temporelles de pression relatives qui ont été mesurées, elles sont traduites en :

- Profondeur de niveau d'eau par rapport au repère de mesure au puits de pompage puits Liger ;
- Profondeur de niveau d'eau par rapport au repère de mesure au point d'observation puits De Koninck ;
- Hauteur d'eau par rapport au-dessus du capteur de pression, trou (30 cm de profondeur, la cave se situe environ 2,5 m sous le niveau du sol) dans la cave de Mme Moreau ;
- Hauteur d'eau par rapport au-dessus du capteur de pression au niveau du Loiret.

Au puits de pompage (Puits Liger), le niveau statique mesuré avant le début de l'essai était de 3,95 m/r.

L'illustration 11 montre l'évolution de la profondeur du niveau d'eau et la température au puits Liger avant, pendant et après le pompage. Il est à noter que la température varie brusquement avant le début de l'essai de 14,1°C à 23,2°C. Cette anomalie est liée à la vidange de la piscine hors sol présente à quelques mètres du puits de pompage et atteignant rapidement la nappe (quelques jours). On note à la fin de l'essai (fin de la remontée) que le niveau dans le puits est supérieur au niveau de départ.

L'illustration 12 et l'illustration 13 présentent l'évolution des niveaux d'eau au droit des capteurs de pression installés respectivement au puits de pompage Liger, au puits d'observation De Koninck et au droit du trou dans la cave de Mme Moreau.

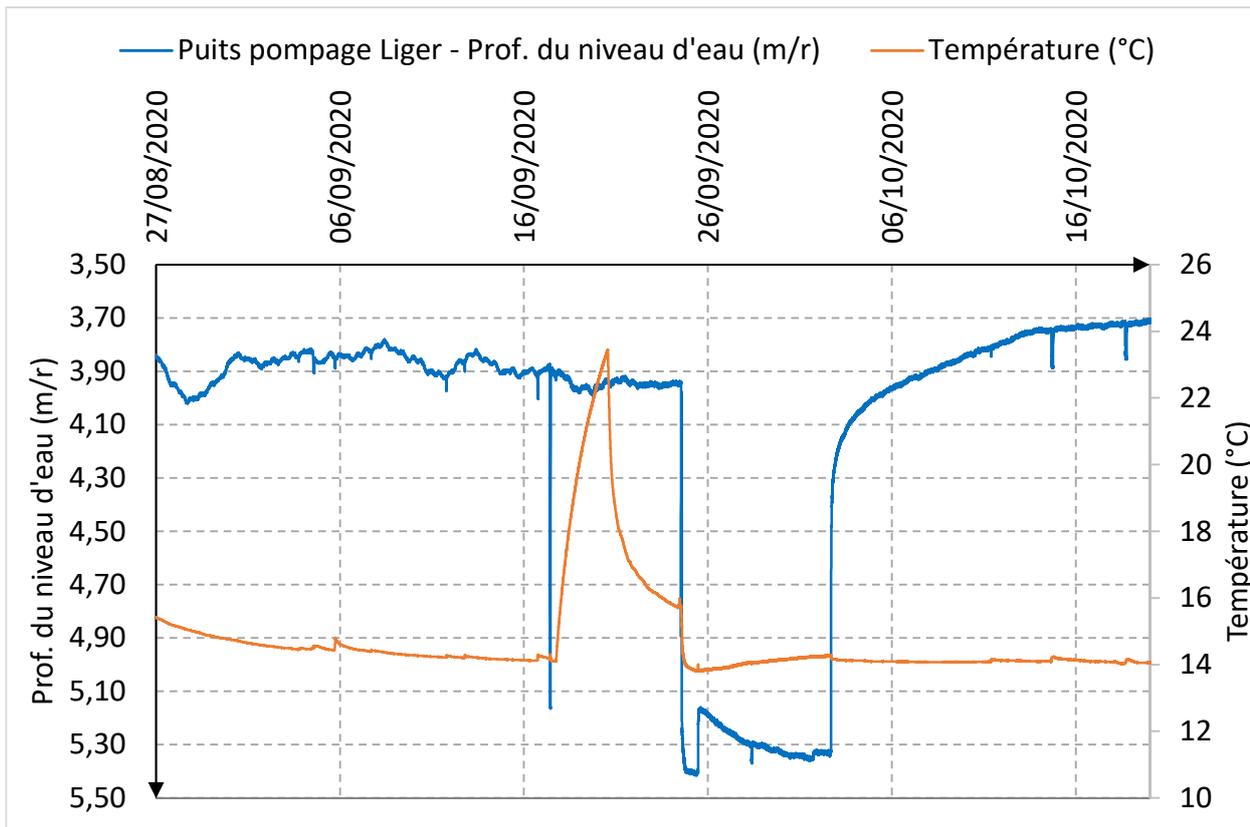


Illustration 11 : Évolution de la profondeur du niveau d'eau et de la température au puits de pompage (Puits Liger) du 27/08 au 20/10/20

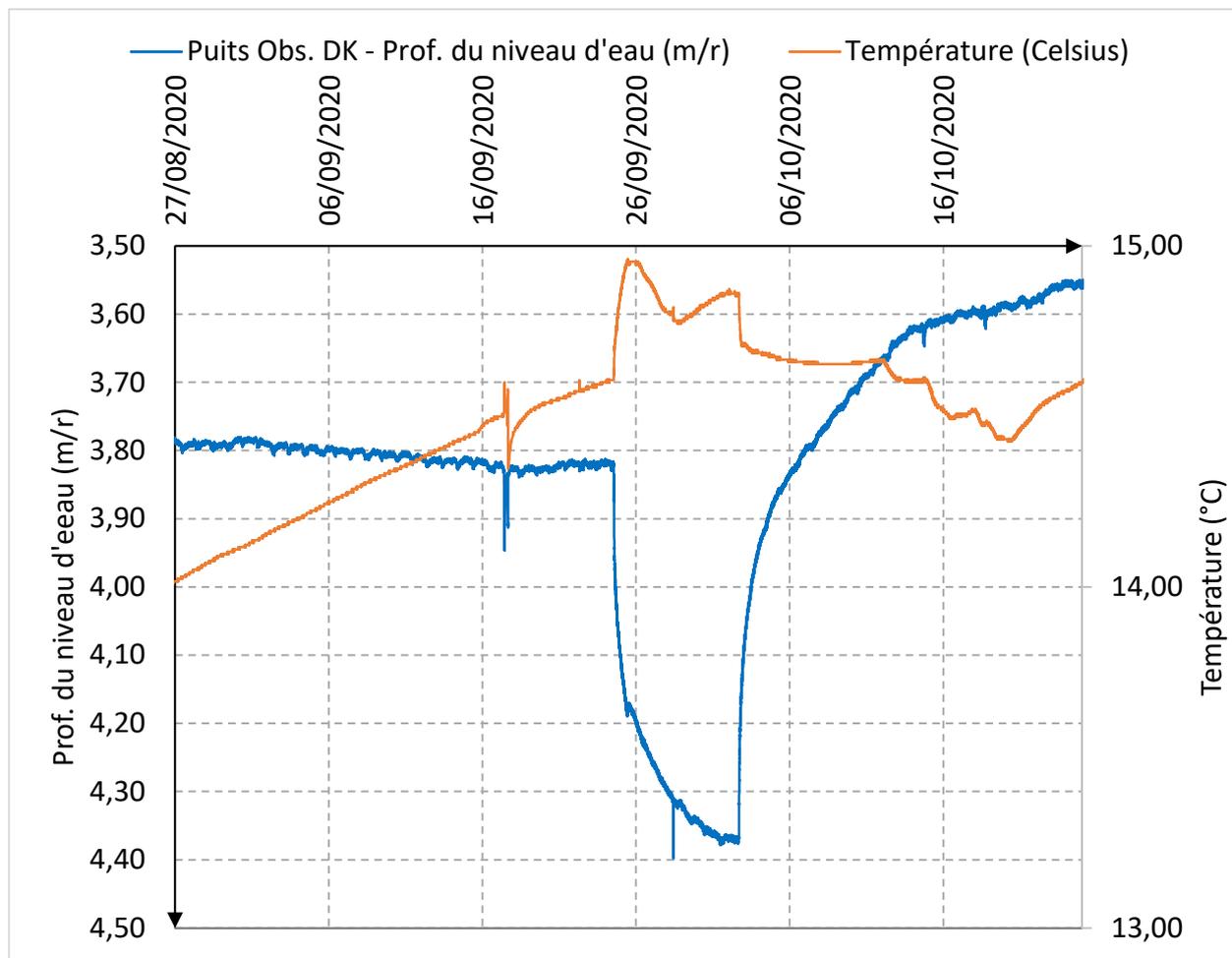


Illustration 12 : Évolution de la profondeur du niveau d'eau et de la température au droit du puits d'observation (Puits De Koninck) du 26/08 au 25/10/2020

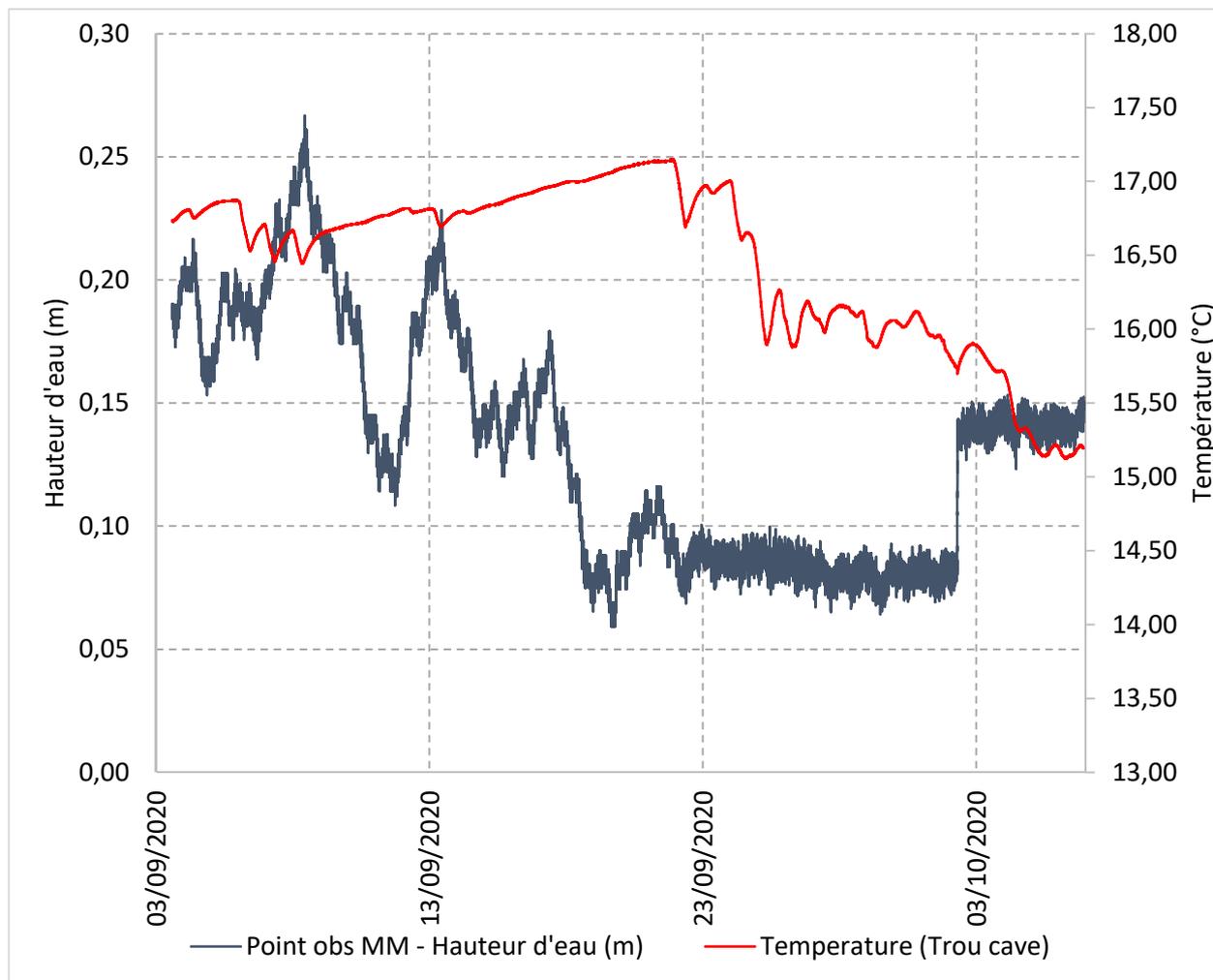


Illustration 13 : Évolution du niveau d'eau relatif et de la température au droit d'un trou localisé dans la cave de Mme Moreau du 03/09 au 06/10/2020

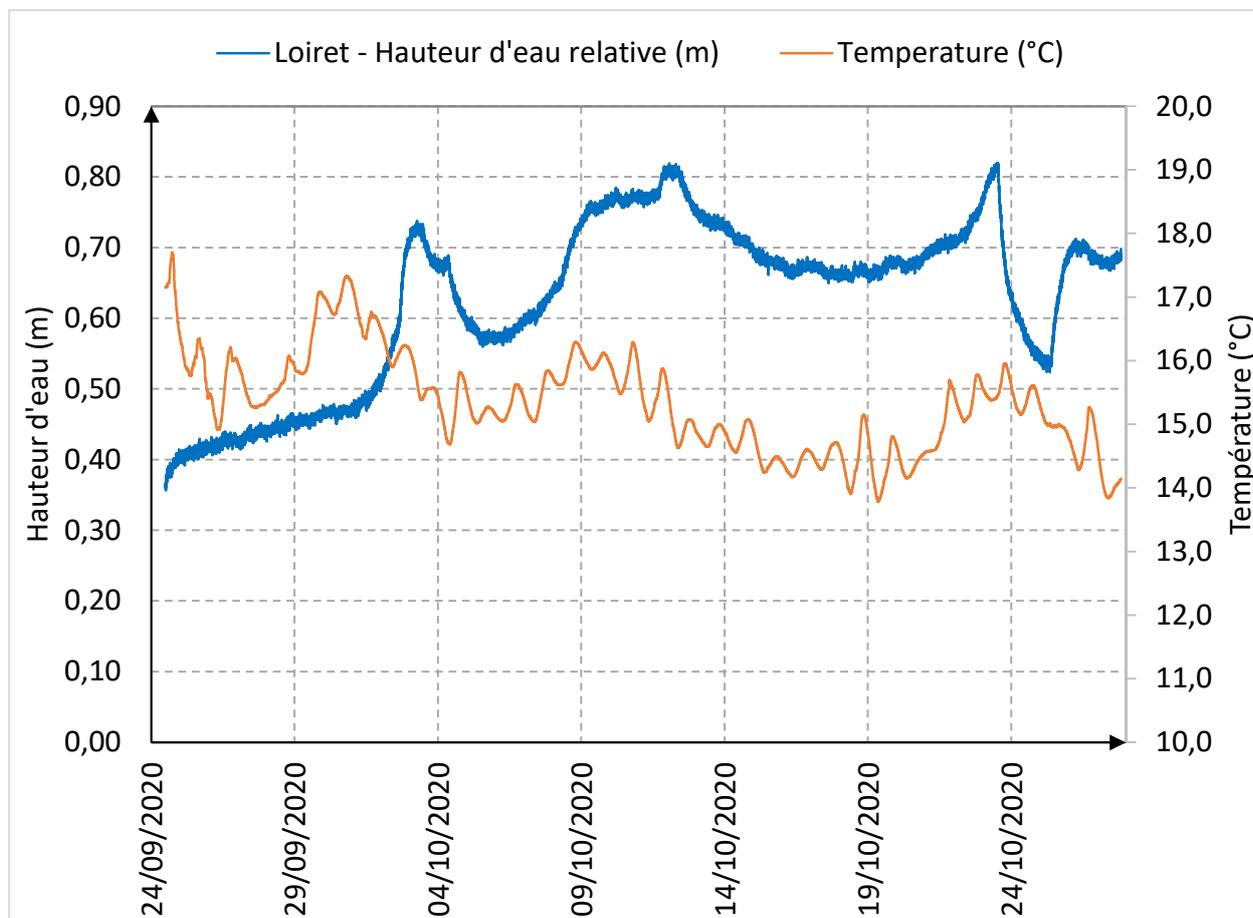


Illustration 14 : Évolution du niveau d'eau relatif et de la température du Loiret du 24/09 au 27/10/2020

3.5. INTERPRÉTATION

L'interprétation du pré-test et de l'essai nappe a été réalisée au puits de pompage (Puits Liger) et au point d'observation (Puits De Koninck). Le deuxième point d'observation n'ayant pas réagi, il est probablement trop peu profond pour être connecté à l'aquifère.

La méthode d'interprétation consiste à simuler l'évolution des niveaux dynamiques mesurés à la descente et ainsi que pendant la remontée à l'aide d'un seul et même jeu de paramètres hydrodynamiques.

L'interprétation a été réalisée avec le logiciel OUAIP, en accès libre (www.ouaip.brgm.fr). Le choix de la méthode analytique employée repose sur le schéma conceptuel établi pour ce type de milieu alluvial. Par ailleurs, la forme de la courbe de rabattement (et sa dérivée) permet de réaliser un pré-diagnostic (non traité ici) des conditions d'écoulement dans l'aquifère et d'aider à l'identification du modèle conceptuel à adopter pour l'interprétation.



La solution analytique retenue est la solution de Theis C. (1935), dont les conditions d'applications sont les suivantes :

- Nappe homogène, isotrope, de dimension infinie et d'épaisseur constante,
- Puits parfait,
- Écoulement en régime transitoire,
- Écoulement vers le puits horizontal.

3.5.1. Pré-test

L'interprétation a été faite dans premier temps **au point d'observation**. On peut observer au regard de la solution analytique retenue pour l'interprétation que le point d'observation réagit avec un retard léger (quelques minutes) lors de la phase de pompage tandis que la remontée est synchronisée avec l'arrêt du pompage. La remontée est légèrement plus rapide dans la réalité que le rabattement théorique qui a été ajusté. Au bout de 300 minutes après le début du pompage, le rabattement théorique (0,09 m) et observé (0,06 m) sont presque identiques.

Le calage retenu est présenté à l'illustration 16 :

- Le calage en bleu a été privilégié car il cale mieux la phase de descente et de remontée ;
- Contrairement au calage en rouge qui cale seulement la descente.

On retient les propriétés suivantes :

- $T = 4,28 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
- $S = 2,79 \times 10^{-3}$

Le coefficient d'emménagement est faible (environ 2.8 pour mille) compte tenu du mode de gisement des alluvions (nappe libre).

Au puits de pompage, la mise en œuvre de l'effet de capacité est nécessaire afin de reproduire le retard au rabattement que l'on observe au début de la phase de pompage. L'effet de capacité mise en œuvre permet de reproduire la phase de descente et la phase de remontée ($r_c = 0,52 \text{ m}$), le rayon (r) de l'ouvrage est d'environ 0,5 m (diamètre de l'ouvrage : 1 m).

On a pris le parti d'utiliser le coefficient d'emmagasinement déduit de l'interprétation au point d'observation ($S = 2.79 \times 10^{-3}$) et d'ajouter un effet de skin pour caler la descente et la remontée ($W_{\text{skin}} = 15.7$).

Enfin la transmissivité retenue pour caler l'essai est de $6.96 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Illustration 17).

Les transmissivités sont proches, entre $2,8 \times 10^{-3}$ et $7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ en revanche l'estimation du coefficient d'emmagasinement demeure faible. L'absence d'un autre point d'observation ne permet pas d'étudier à ce stade, d'autres possibles interprétations.

Les propriétés déduites sont résumées à l'illustration 15 :

	m^2/s	-	m	m	-
	T	S	r	rc	W_{skin}
Puits de pompage	6.96E-03	2.79E-03	0.50	0.52	15.70
Point d'observation	4.28E-03	2.79E-03	33.00	-	-

Illustration 15 : Pré-test - Paramètres hydrodynamiques déduits

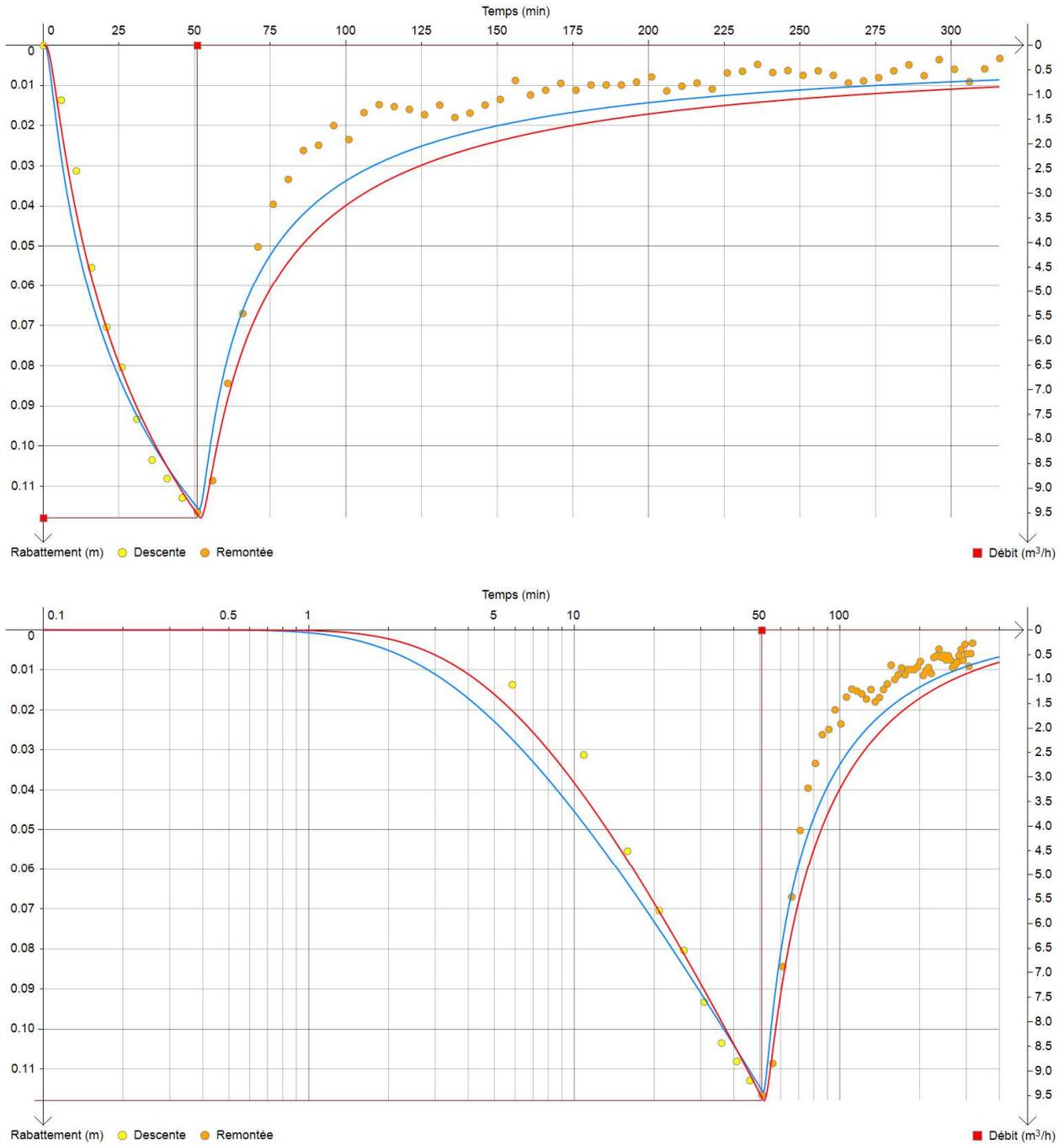


Illustration 16 : Pré-test - Calage retenu avec la méthode de Theis (courbe rouge) au point d'observation, en haut échelle arithmétique, en bas échelle semi-logarithmique

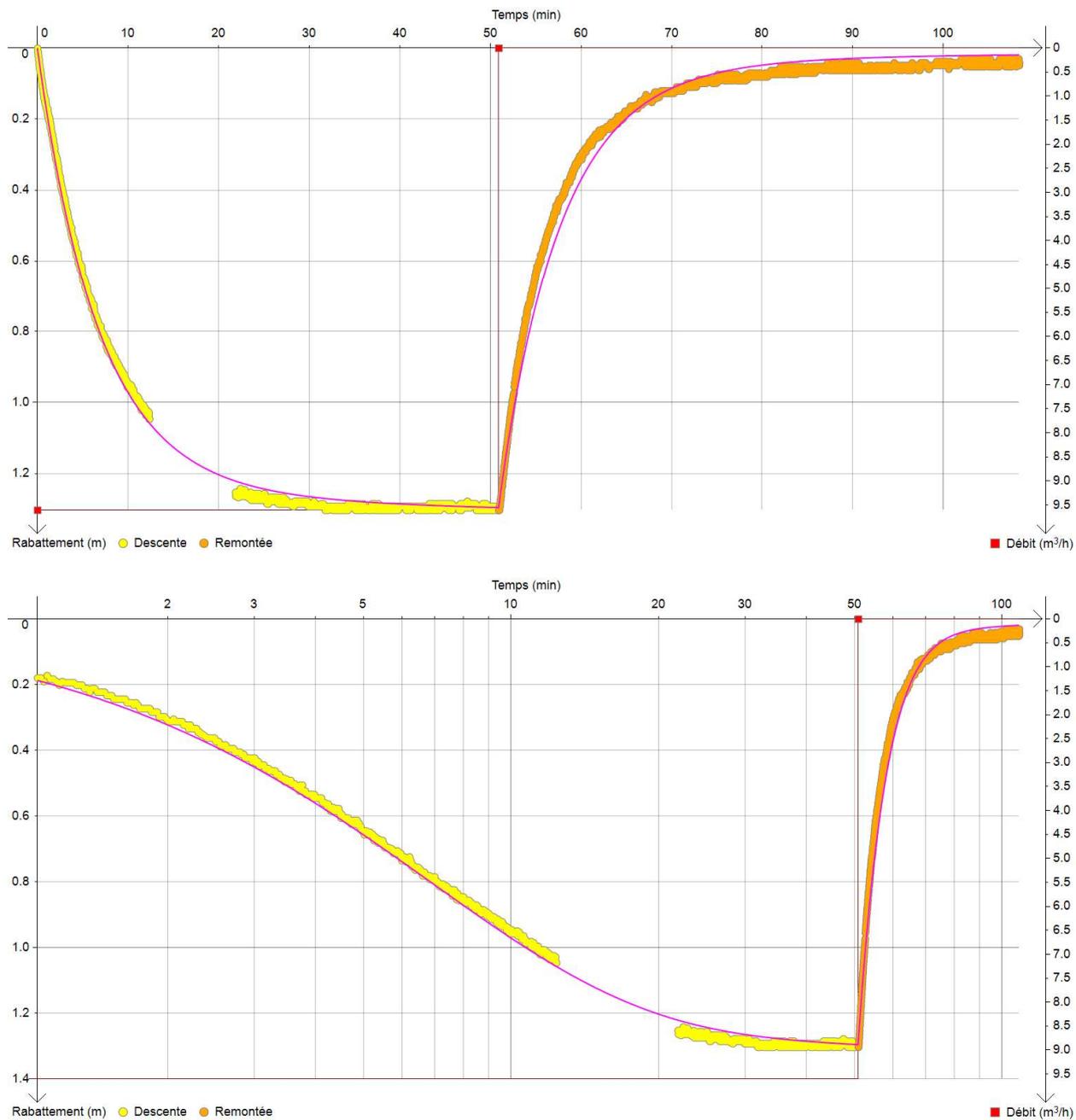


Illustration 17 : Pré-test - Calage retenu avec la méthode de Theis (courbe verte) au puits de pompage, en haut échelle arithmétique, en bas échelle semi-logarithmique

3.5.2. Essai de nappe

L'interprétation a été faite dans premier temps **au point d'observation**. On observe au regard de la solution analytique retenue que le point d'observation réagit avec un retard léger (quelques minutes) lors de la phase de pompage tandis que la remontée est synchrone avec l'arrêt du pompage. La remontée est légèrement plus rapide dans la réalité que le rabattement théorique qui a été ajusté. Au bout de 300 minutes après le début du pompage, le rabattement théorique (0,09 m) et observé (0,06 m) sont presque identiques.

Le calage retenu est présenté à l'illustration 19 :

- Le calage en bleu a été privilégié car il cale mieux la phase de descente et de remontée ;
- Contrairement au calage en rouge qui cale seulement la descente.

On retient les propriétés suivantes :

- $T = 4,28 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
- $S = 2,79 \times 10^{-3}$

Le coefficient d'emmagasinement est faible (environ 2,8 pour mille) compte tenu du mode de gisement supposé des alluvions (nappe libre).

Au puits de pompage, la mise en œuvre de l'effet de capacité est nécessaire afin de reproduire le retard au rabattement que l'on observe au début de la phase de pompage. L'effet de capacité permettant de reproduire la phase de descente et la phase de remontée est d'environ 0.52 m (r_c), tandis que le rayon (r) de l'ouvrage est d'environ 0.5 m (diamètre de l'ouvrage : 1 m).

On a pris le parti de mettre en œuvre le coefficient d'emmagasinement déduit de l'interprétation au point d'observation ($S=2,79 \times 10^{-3}$) et d'ajouter un effet de skin pour caler la descente et la remontée ($W_{\text{skin}} = 15,7$).

Enfin la transmissivité retenue pour caler l'essai est de $6,96 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Illustration 20).

Les transmissivités sont proches, entre $2,8 \times 10^{-3}$ et $7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ en revanche l'estimation du coefficient d'emmagasinement demeure faible. L'absence d'un autre point d'observation ne permet pas d'étudier à ce stade d'autres interprétations possibles.

Les propriétés déduites sont résumées à l'illustration 18.

	m^2/s	-	m	m	-
	T	S	r	rc	Wskin
Puits de pompage	6.96E-03	2.79E-03	0.50	0.52	15.70
Point d'observation	4.28E-03	2.79E-03	33.00	-	-

Illustration 18 : Essai de nappe - Paramètres hydrodynamiques déduits

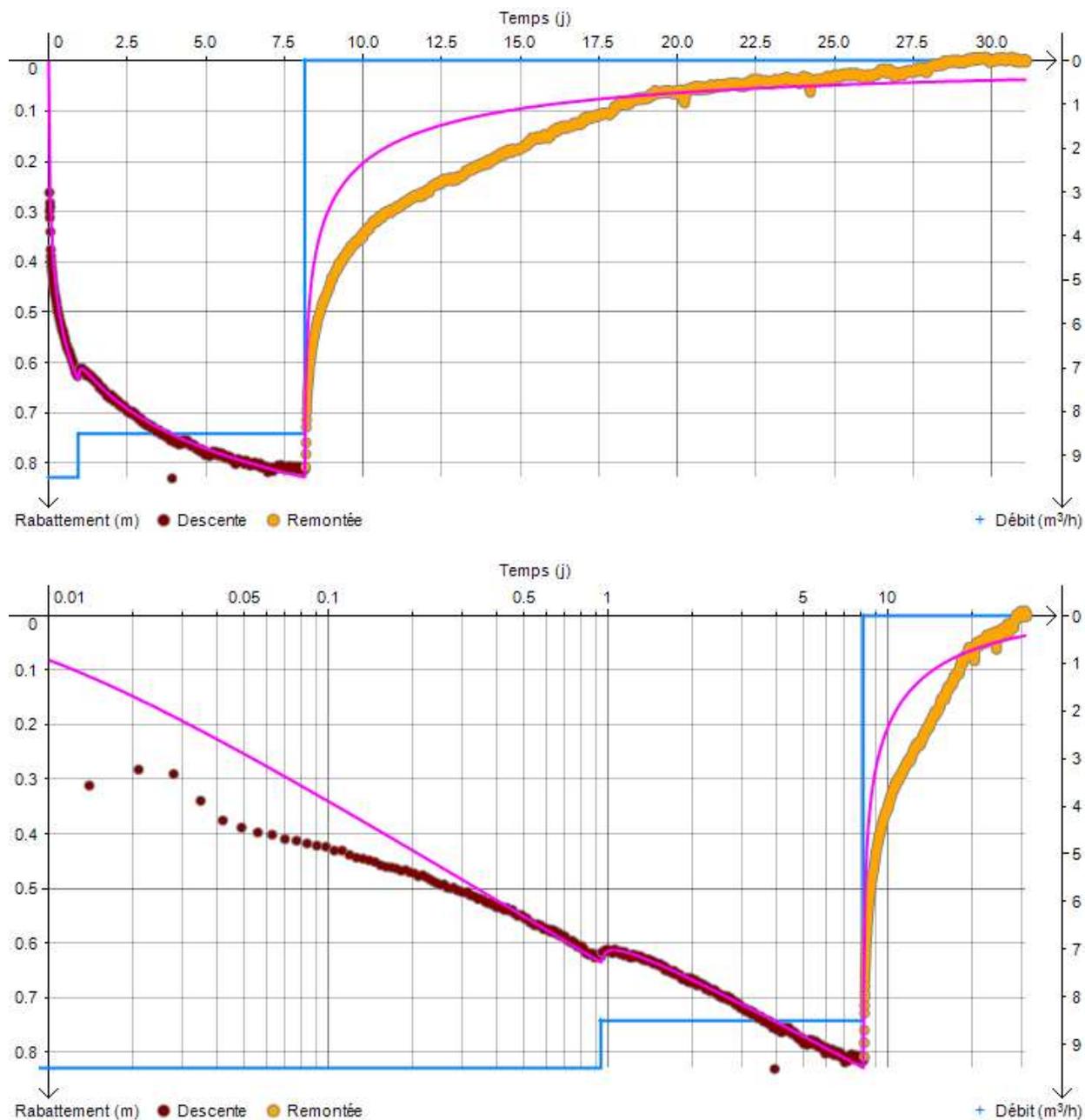


Illustration 19 : Essai de nappe - Calage retenu avec la méthode de Theis (courbe rouge) au point d'observation, en haut échelle arithmétique, en bas échelle semi-logarithmique

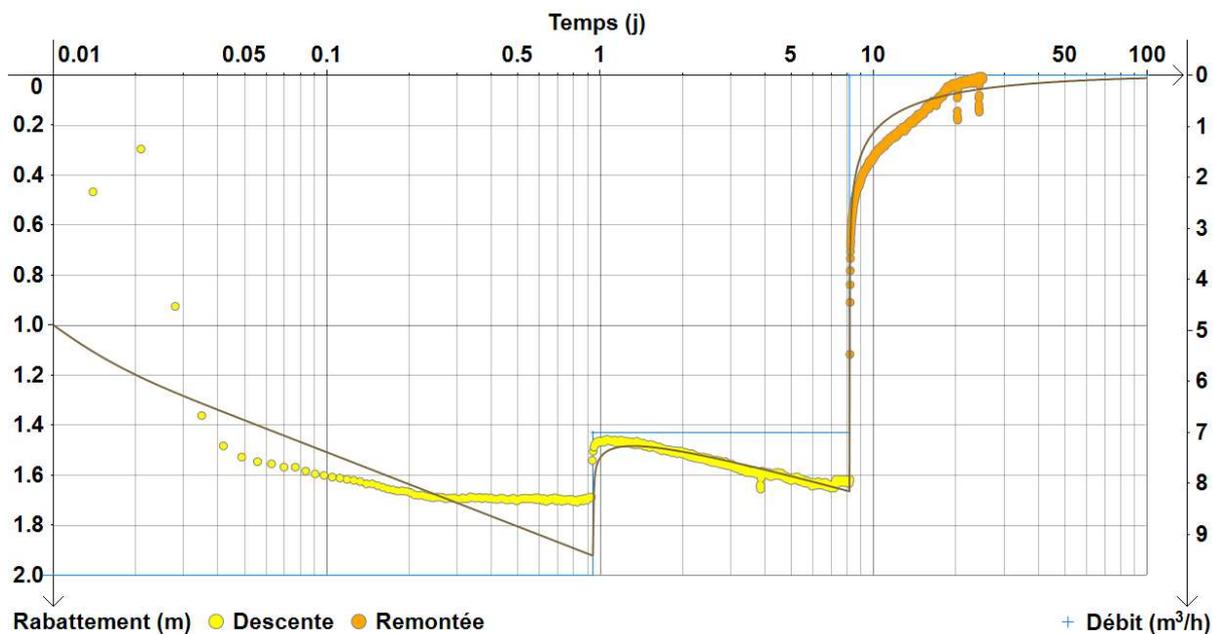
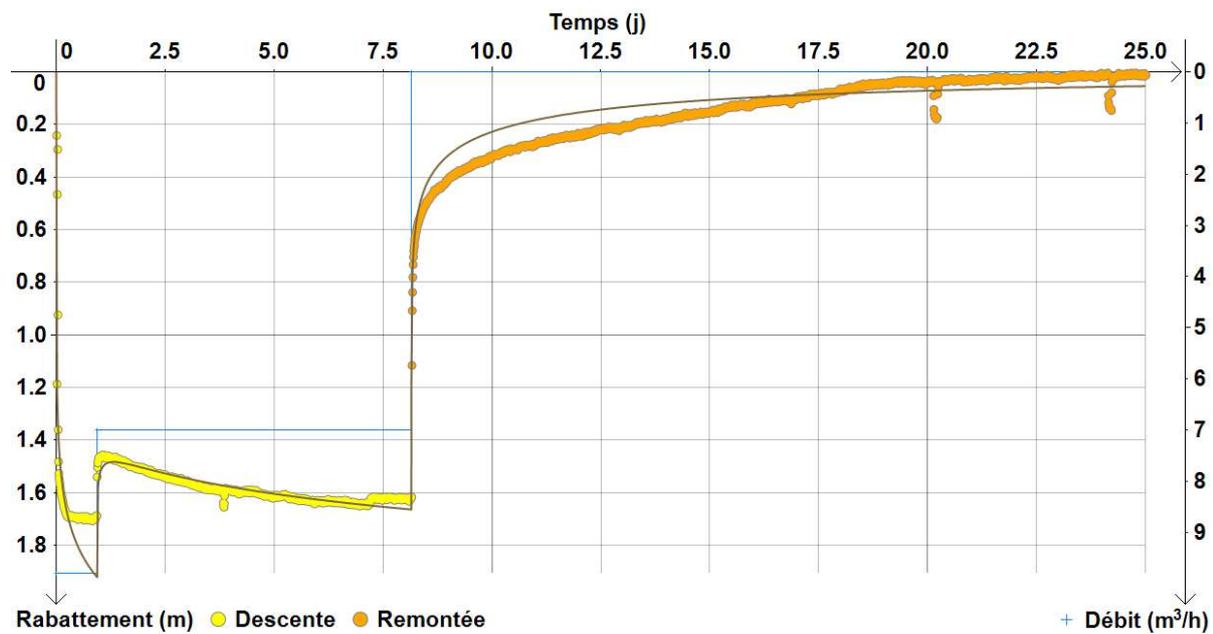


Illustration 20 : Essai de nappe - Calage retenu avec la méthode de Theis (courbe verte) au puits de pompage, en haut échelle arithmétique, en bas échelle semi-logarithmique

3.6. SYNTHÈSE

Zunino (1979) mentionne l'absence d'estimation de la transmissivité dans la partie Ouest du Val qui intéresse cette étude, tandis que dans la partie Est une large gamme de transmissivité est proposée, allant de 10^{-5} m²/s à 3×10^{-2} m²/s.

Les propriétés hydrodynamiques à ce jour lacunaire dans ce secteur ont été déduites à l'aide des pompages d'essai (pré-test, essai de puits, essai de nappe) au droit de l'aquifère capté.

Lors du pré-test la transmissivité est de l'ordre de 4×10^{-3} (point d'observation) à 5×10^{-3} m²/s (puits de pompage) après plus de 60 minutes de pompage. Le coefficient d'emmagasinement au point d'observation est de $2,9 \times 10^{-3}$, caractéristique d'une nappe captive à semi-captive.

Lors de l'essai de nappe (7 jours, soit environ 168 la durée du pré-test) la transmissivité est un peu plus faible, de l'ordre de $1,6 \times 10^{-3}$ (point d'observation) à $1,2 \times 10^{-3}$ m²/s (puits de pompage) après plus de 7 jours de pompage. Le coefficient d'emmagasinement au point d'observation est également un peu plus faible, environ $2,1 \times 10^{-3}$.

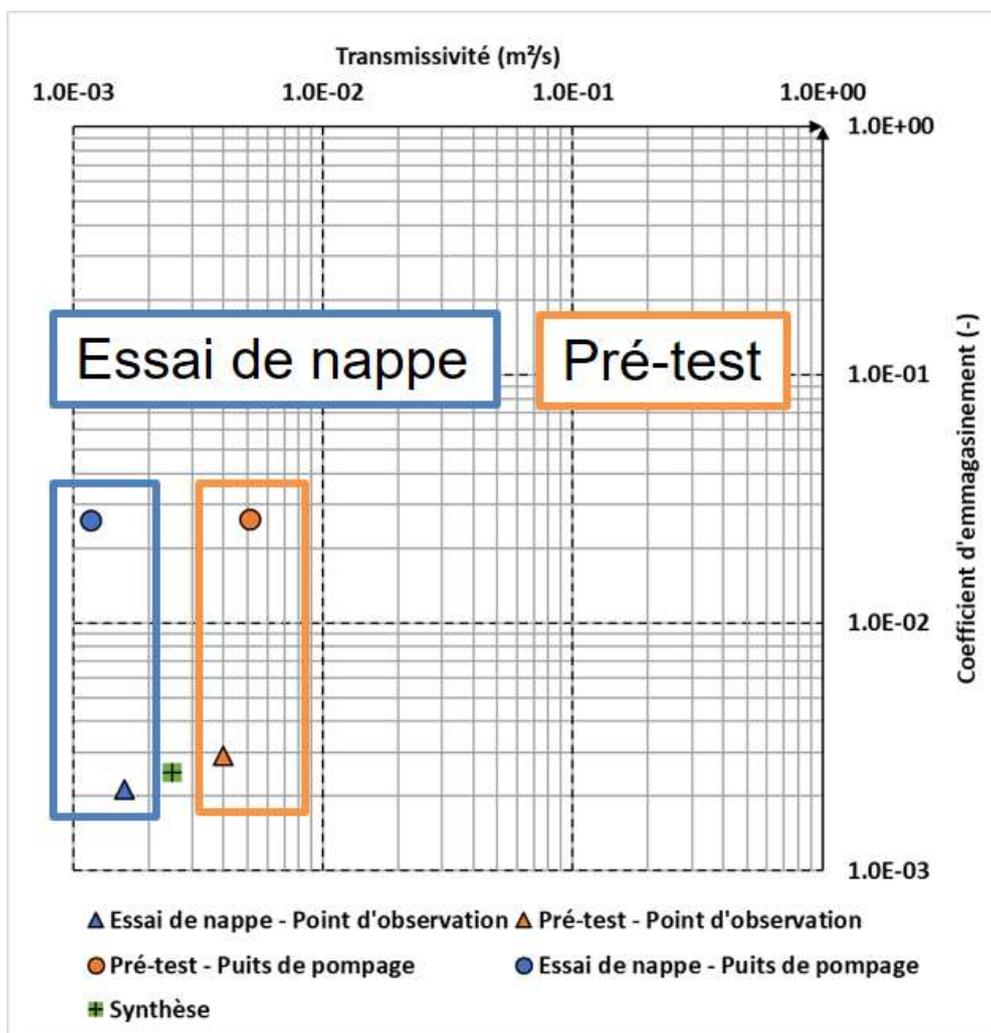


Illustration 21 : Propriétés hydrodynamiques déduites lors des pompages d'essai

L'estimation des propriétés hydrodynamiques permet de calculer une diffusivité proche de 1, en considérant la moyenne des propriétés de l'ordre de 2.5×10^{-3} pour T et S. La diffusivité (T/S) est la propriété en jeu dans la propagation d'influence d'une perturbation dans le milieu aquifère saturé.

L'analyse des courbes de rabattement n'as pas montré d'effet de limite alimentée, malgré la proximité du Loiret (environ 100 m du puits de pompage).

Une simulation avec la solution de Theis (Illustration 22), considérant les propriétés déduites au puits de pompage (soit $T=2,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et $S=2,1 \times 10^{-3}$) on observerait un rabattement à 100 m du puits de pompage (au niveau du Loiret) d'environ 64 cm après 7 jours de pompage continu à débit constant ($8 \text{ m}^3/\text{h}$). Si l'on considérait le Loiret comme intervenant en tant que limite alimentée, ce rabattement à $r=100 \text{ m}$ ne serait plus que d'environ 20 cm.

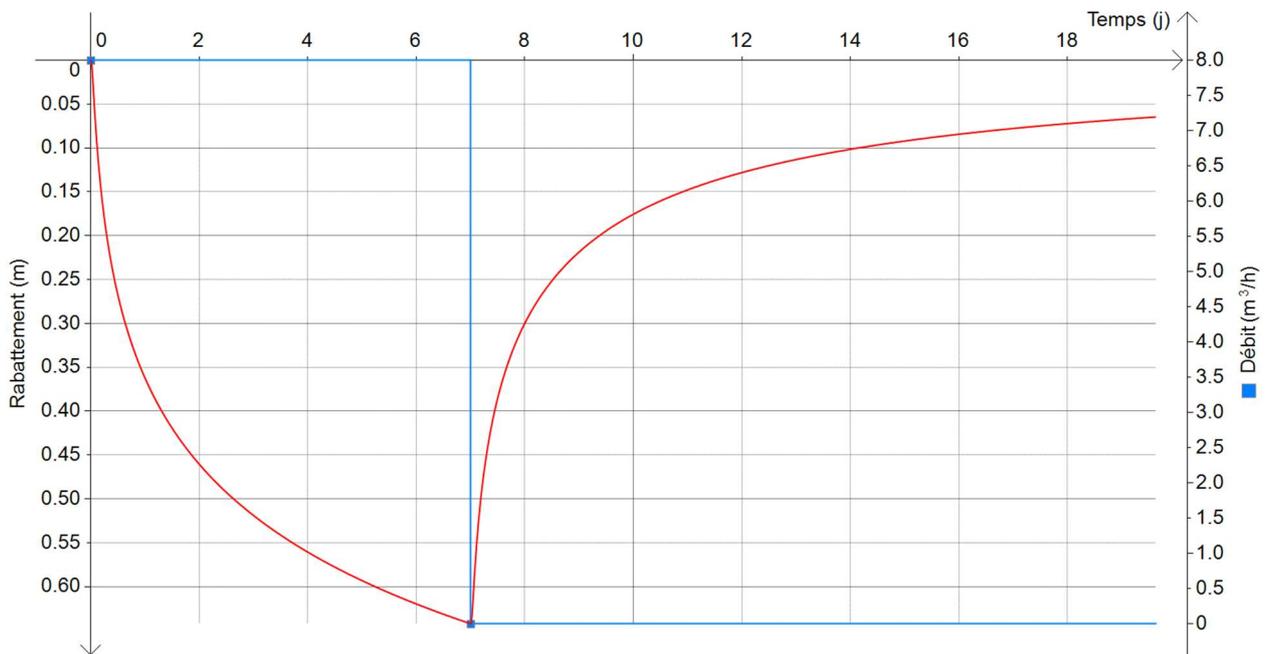


Illustration 22 : Simulation de l'impact du pompage d'essai d'après les propriétés déduites au puits de pompage pour $r=100 \text{ m}$

Cette dynamique de l'aquifère interpelle, dans la mesure où, tel que cela sera montré par la suite, le Loiret impacte le niveau de la nappe, en revanche il semble que durant les conditions hydrologiques des essais, le pompage en nappe n'ait pas rencontré de limite alimentée ou n'ait pas été soutenu par une telle limite. Il est à noter qu'en considérant $S=2 \cdot 10^{-3}$ on est en milieu semi-captif à captif avec une couche isolante, il s'agit peut-être de la même couche qui isole de la condition à la limite alimentée (Loiret).

4. Caractérisation des propriétés hydrodispersives

4.1. METHODE

Les traçages « qualitatifs » ont pour objectif de vérifier l'existence d'une connexion hydraulique entre deux points distincts des eaux souterraines. Les traçages « quantitatifs » ont pour finalité de déterminer les propriétés hydrodispersives des aquifères grâce à l'analyse de la forme de la courbe de restitution (concentration en un point du système de traçage au cours du temps).

4.2. MISE EN ŒUVRE

Un essai de traçage a été réalisé par le CETRAHE le 28/09/2020, l'objectif de cet essai est de caractériser les propriétés hydrodispersives du milieu souterrain.

Le traçage a été réalisé 4 jours après la mise en place de l'essai de longue durée, c'est-à-dire en conditions d'écoulement radial convergent. Tandis que le pompage est continu sur le puits de M. Liger à 7 m³/h depuis le 24/09/2020, 18 g de Naphtionate ont été injectés le 28/09/2020 à 11h46 dans le puits de Mme De Koninck. Il s'agit d'une injection « brève » devant le temps de transport. La distance entre le point d'injection et le point de restitution est d'environ 33 m.

4.3. MATERIELS ET MESURES

Un fluorimètre a été installé à 5.65 m de profondeur dans le puits de pompage avec un pas d'acquisition de 5 minutes. Des prélèvements automatiques pour analyse spectrofluorimétrique n'ont pas été possible en raison de la profondeur trop importante du niveau d'eau (environ 5.33 m/repère). En l'absence de ces prélèvements et analyse, l'estimation du bruit de fond est rendue plus difficile.

Les 18 g injectés sont dilués dans une solution de 1.5 L (*via* un tube rigide dans le puits) et une chasse de 20 L a été appliquée.

4.4. DONNEES DE L'ESSAI

La courbe de restitution en Naphtionate est présentée à l'illustration 23. Ces données brutes ont été tracées en fonction du temps depuis le moment de l'injection, visible à l'illustration 24.

On peut observer la première apparition du traceur qui a lieu vers 1.7 jours (40 heures et 48 minutes) et atteint la concentration maximale de 52 µg/L vers 2.8 jours (67 heures et 12 minutes), la fin du suivi a lieu vers 4.2 jours (100 heures et 48 minutes). Malgré le transport du traceur dans le milieu souterrain, le pompage a dû être interrompu en raison de l'inondation d'une cave suite à la fuite d'une canalisation d'exhaure de l'eau de pompage. Ainsi la fin de la restitution complète n'est pas connue en raison de l'arrêt imprévu.

Les données ont été importées dans le logiciel TRAC (cf. 4.5) pour interprétation selon les mécanismes d'advection-dispersion.

On peut ainsi calculer la masse restituée, de 10.84 g (sur 18 g injecté) ce qui correspond à une restitution d'environ 60.2 % (sachant que le traçage a dû être stoppé avant la fin de la restitution).

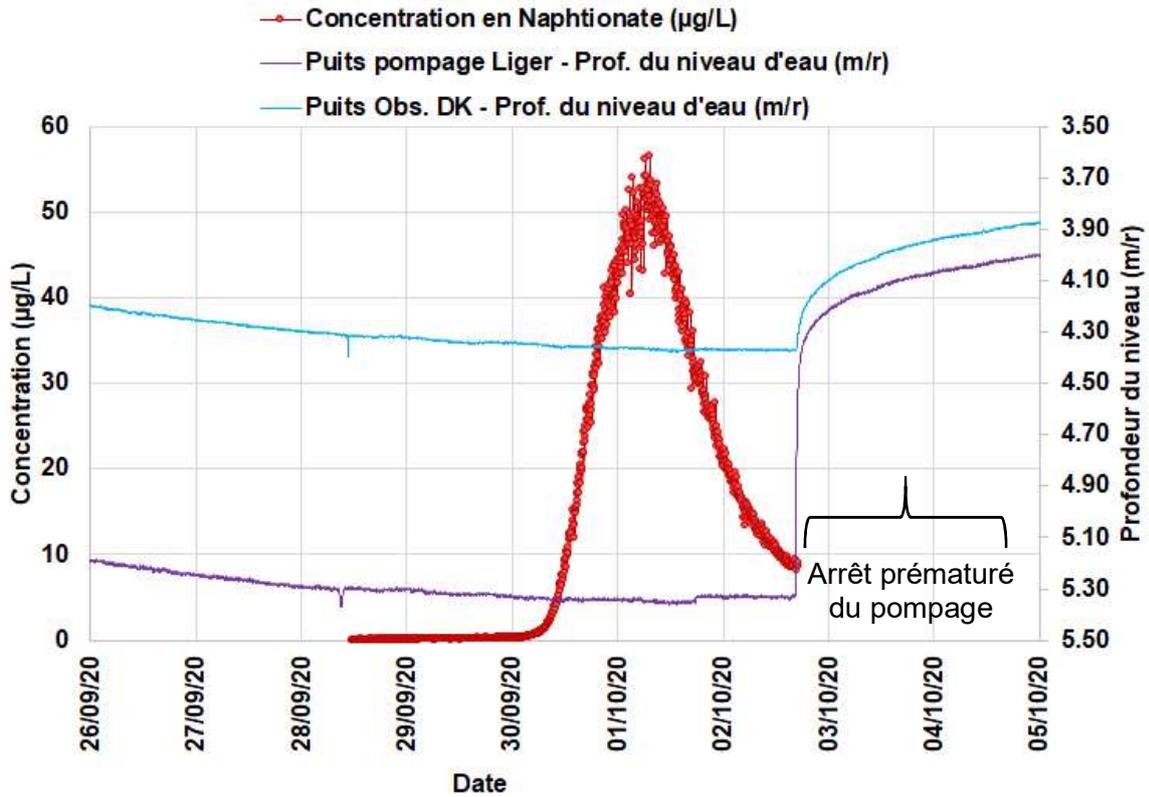


Illustration 23 : Courbe de restitution du traceur au cours du temps (date)

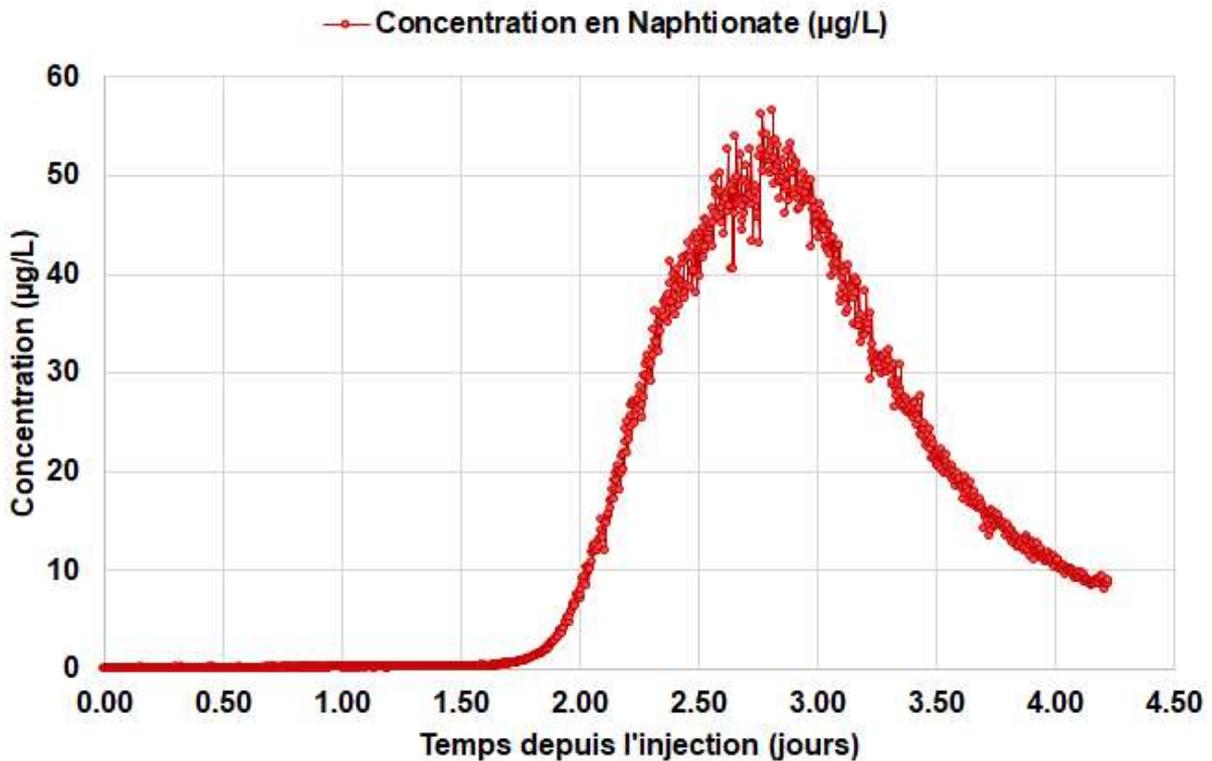


Illustration 24 : Courbe de restitution du traceur depuis l'injection (temps t_0 , en jours)

4.5. INTERPRÉTATION

Les données corrigées du bruit de fond ont été interprétées avec le logiciel TRAC disponible gratuitement sur : <http://trac.brgm.fr>.



L'interprétation a été réalisée selon une solution semi-analytique correspondant au modèle d'écoulement radial convergent (solution n°18 dans le logiciel TRAC) présenté à l'illustration 25.

Une solution « bicouche », qui combine deux solutions en parallèle sans cinétique d'échange entre les milieux, n'améliore pas significativement l'ajustement de la solution analytique aux données de restitution du traceur.

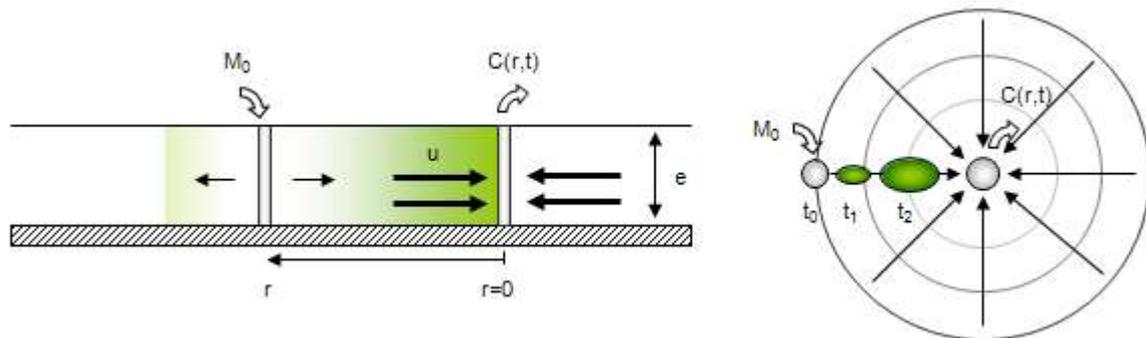


Illustration 25 : Schéma du système de traçage radial convergent

Sous TRAC, il est possible de déduire les principales caractéristiques hydrodispersives de l'aquifère d'après la courbe de restitution :

- Première apparition : 1.5 jour
- Durée de restitution : 3.4 jours
- Pic de concentration : 2.8 jours
- Temps moyen : 2.9 jours
- Temps moyen de séjour : 2.9 jours
- Temps de disparition : supérieur à 4.9 jours

Selon ces différents temps, on calcule les vitesses caractéristiques du gradient induit par le pompage :

- Vitesse maximale : 22 m/jour (t_{\min})
- Vitesse moyenne : 11 m/jour (t_{moy})

Après ajustement par essai et erreur, on obtient le calage présenté à l'illustration 26 ainsi que les paramètres suivants résumés à l'illustration 27.

Les paramètres hydrodispersifs ont été estimés, soit la porosité cinématique de l'ordre de 2.3 % et la dispersivité longitudinale de 0.38 m (soit 1/86 de la distance de transport).

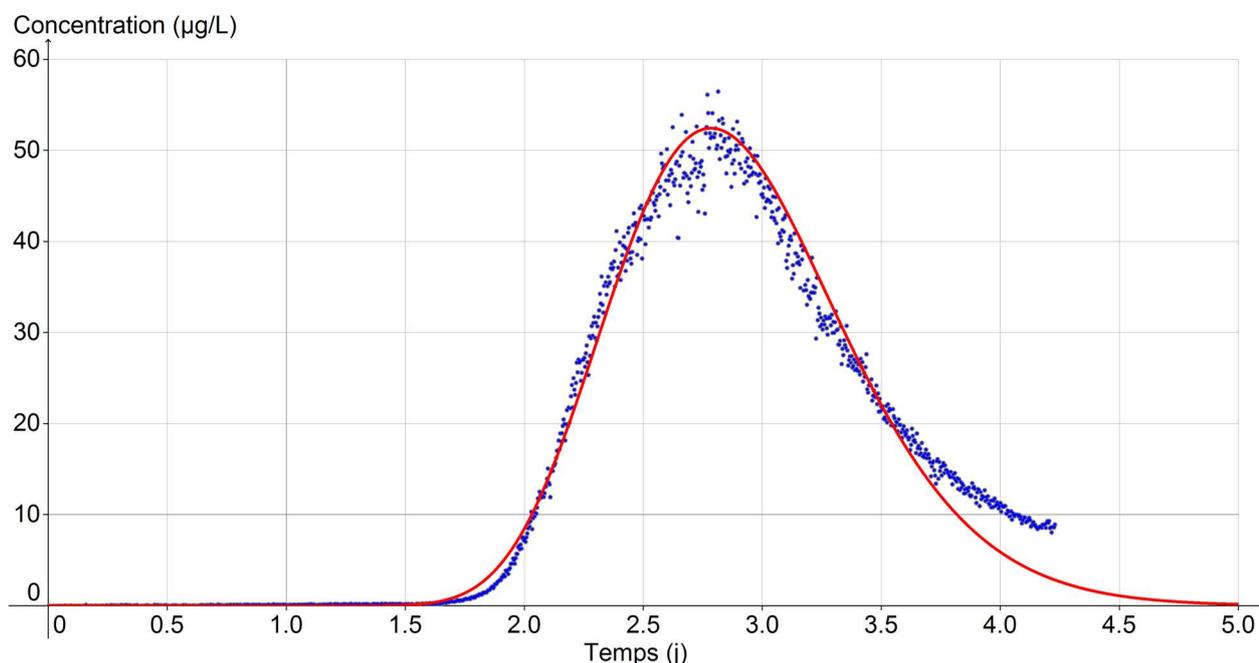


Illustration 26 : Résultat du calage de la courbe de restitution, en bleu observations, en rouge calage analytique

Paramètre	Valeur	Unité
Masse injectée	18.0	g
Masse restituée	10.8	g
Pourcentage de restitution	60.0	%
Porosité cinématique	2.3	%
Vitesse réelle	1.35E-04	m/s
	0.49	m/h
	11.66	m/j
Epaisseur aquifère	6.15	m
Dispersivité longitudinale	0.38	m
Distance puits - piézomètre	33	m
Débit de pompage	7	m ³ /h
	1.94E-03	m ³ /s
Nash	0.982	-

Illustration 27 : Paramètres de calage de la courbe de restitution

Un modèle bicouche, qui représenterait par exemple la connexion des alluvions avec les calcaires de Beauce est théoriquement possible afin d'essayer d'améliorer le calage. L'interprétation de ce traçage est possible via un modèle « hétérogène », on considère le système de traçage comme la juxtaposition de deux milieux homogènes différents (Illustration 28), parallèles, dans la formation en place et non communicants (pas d'échange) (Brissaud, 1978).

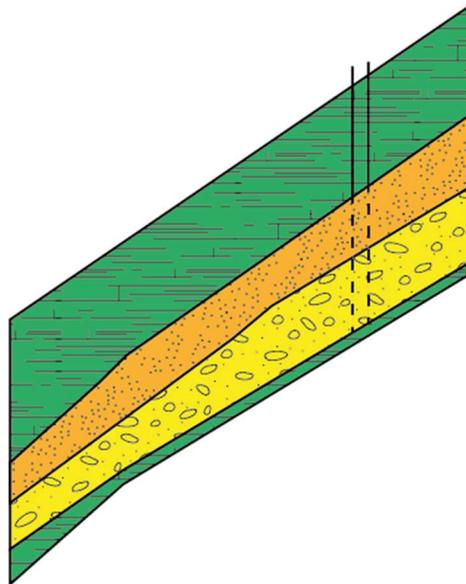


Illustration 28 : Schéma d'un aquifère constitué d'un système bicouche non communicant

Soit un milieu « A » plus perméable responsable de l'apparition précoce (C_1) du traceur et un milieu « B » moins perméable justifiant la trainée de concentration (C_2), on suppose un double milieu dans lequel le traceur transiterait. Un tel système a été modélisé avec TRAC, en supposant une répartition des masses à parts égales (50%) dans chaque milieu en supposant également un débit d'écoulement identique dans chacun des milieux ($Q_1 = Q_2$).

L'évolution globale de la concentration s'exprime par :

$$C = \frac{(C_1 Q_1 + C_2 Q_2)}{Q}$$

$$C = C_1 + C_2$$

Dans ce cas chaque courbe de restitution est caractérisée par sa porosité et sa dispersivité. Ce schéma fait apparaître cinq paramètres : deux par couche et répartition du débit entre les deux couches. La méthode consiste à décomposer la réponse globale du système en superposition de deux courbes de restitution.

Les résultats de ce modèle sont présentés à l'illustration 29, mais il n'améliore pas significativement les paramètres/résultats obtenus (Illustration 30), pour cette raison ils ne sont pas détaillés davantage, conservés à titre d'illustration.

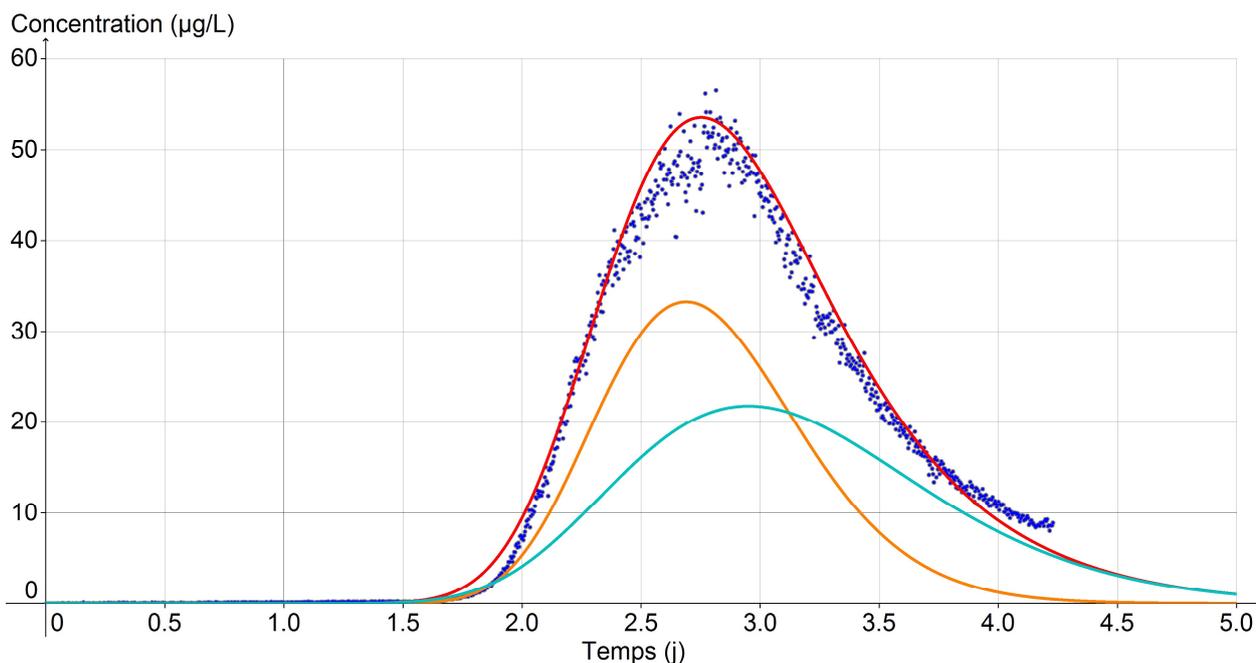


Illustration 29 : Résultat du calage de la courbe de restitution, en bleu observations, en rouge calage analytique, courbe orange milieu 1, courbe verte milieu 2

	Courbe 1	Courbe 2	
Paramètre	Valeur	Valeur	Unité
Masse injectée	0.009	0.009	kg
Masse restituée	0.0054	0.0054	kg
Pourcentage de restitution	32.78	32.78	%
Porosité cinématique	2.19	2.45	%
Vitesse réelle	1.40E-04	1.26E-04	m/s
	0.50	0.45	m/h
	12.10	10.89	m/j
Epaisseur aquifère	6.15	6.15	m
Dispersivité longitudinale	0.304	0.580	m
Distance puits - piézomètre	33	33	m
Débit de pompage	7	7	m ³ /h
	1.94E-03	1.94E-03	m ³ /s
Nash	0.987		-

Illustration 30 : Paramètres de calage de la courbe de restitution via un modèle bicouche

4.6. SYNTHÈSE

En synthèse, on retient que l'essai de traçage est un succès, environ 60 % de la masse a été restituée jusqu'à l'arrêt prématuré de la pompe. Un modèle analytique monocouche permet de représenter l'hydrodispersion dans le sous-sol entre les deux ouvrages souterrains testés.

Un modèle bicouche reste possible. Il représenterait par exemple la connexion des alluvions avec les calcaires de Beauce. Dans ce secteur, la lithologie est peu connue. La profondeur des alluvions serait de l'ordre de 6-7 m et les puits sont de l'ordre de 5-6 m de profondeur. Davantage de connaissances sur la profondeur des formations et leur lithologie est nécessaire.

Un questionnement existe sur le pompage dans le puits de M. Liger, l'ouvrage pourrait capter les alluvions ainsi que les calcaires, ce qui expliquerait un transfert de pression rapide lors de l'essai de nappe (coefficient d'emménagement de 2.8×10^{-3}) et un transfert de matière dans la partie libre de l'aquifère (coefficient d'emménagement de 2.3 %).

On a pu déterminer la porosité cinématique de l'ordre de 2.3 % ainsi que la dispersivité de l'ordre de 0.38 m (soit 1/86 de la distance de transport). La vitesse maximale est de 22 m/j et la vitesse moyenne de 11 m/j dans ces conditions de gradients forcés.

5. Suivi des niveaux dynamiques de l'hydrosystème

Suite aux pompages d'essai réalisés ainsi qu'à l'essai de traçage, il a été décidé de maintenir l'équipement de suivi hydrogéologique et hydrologique en place. En l'occurrence, 2 capteurs de pression ont été maintenus dans les puits « Liger » et « De Koninck », un capteur de pression sur les bords du Loiret (nommé « Loiret » ci-après) ainsi qu'un baromètre pour compenser la pression totale mesurée par les capteurs.

Leur localisation schématique sur vue 3D Google Maps est présentée à l'illustration 31.

Ces suivis ont permis d'établir l'altitude du fil d'eau du Loiret (en mNGF), la cote piézométrique au droit des deux puits, ainsi que les températures de l'eau sur les 3 suivis.

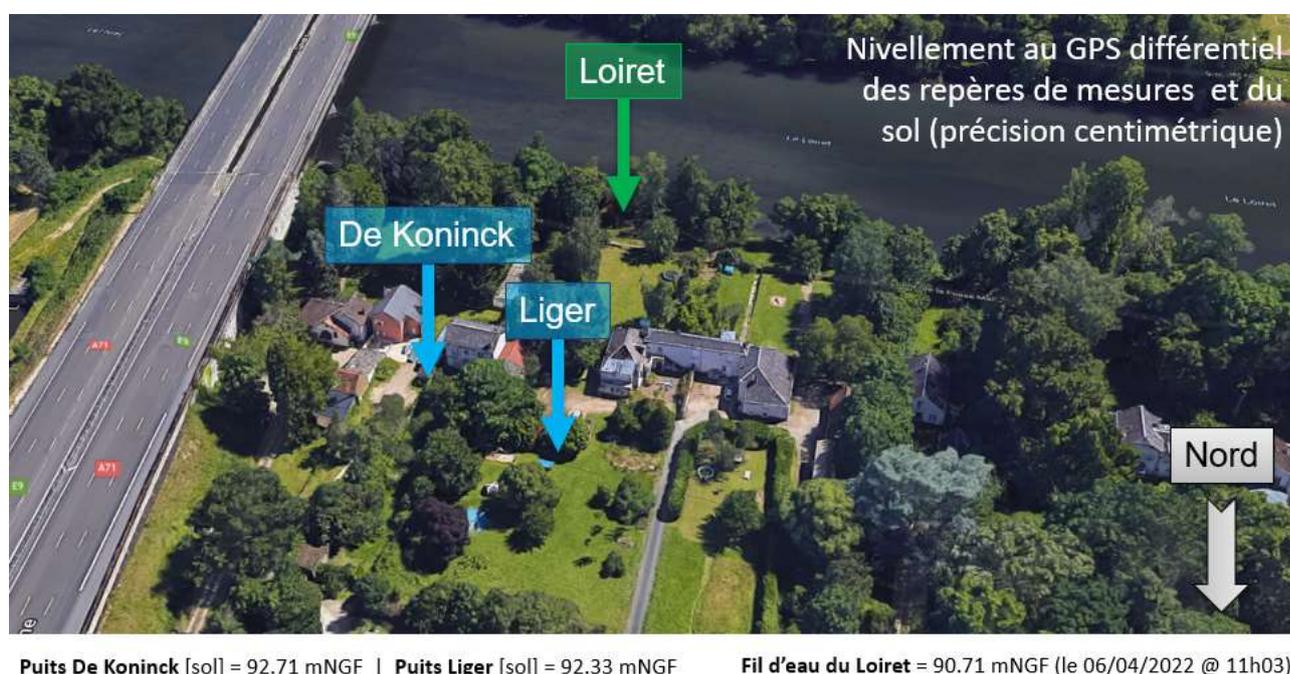


Illustration 31 : Localisation des suivis au bord du Loiret

L'ensemble des suivis a été réalisé du 22/04/2021 au 12/05/2023, soit sur plus de deux ans. L'illustration 32 détaille les suivis en terme de durée, pas de temps et grandeurs suivies. Le retrait des appareils a été réalisé le 29/06/2023. Deux nivellements et quatre contrôles des données ont été réalisés le 25/08/2021, 06/04/2022, 06/05/2022 et 26/08/2022.

Nom du point	Liger	De Koninck	De Koninck	Loiret
Mesures	Pression + Température	Pression + Température	Pression + Température	Pression + Température
Surveillance	Eaux souterraines	Eaux souterraines	Pression atmosphérique	Eaux de surface
Date de début	22/04/2021	24/04/2021	22/04/2021	22/04/2021
Date du dernier déstockage	12/05/2023	12/05/2023	12/05/2023	12/05/2023
Pas d'acquisition (min)	30	15	15	30
Durée (j)	2 ans et 2 semaines			

Illustration 32 : Synthèse des points suivis et de leurs chroniques

Ces suivis permettent d'étudier les relations entre les niveaux de la nappe, celui du Loiret ainsi que les interactions avec les précipitations sur deux cycles hydrologiques.

Un travail a été mené sur les données pour : supprimer l'effet de la barométrie, recalculer les chroniques par rapport aux dates de contrôle et de nivellement des ouvrages, calculer la cote du fil d'eau du Loiret.

5.1. PRESENTATION DES CHRONIQUES SUIVIS

5.1.1. Baromètre

La pression dépendant du profil de température qui règne au-dessus du lieu où on la mesure, le baromètre est équipé d'un appareil mesurant la température. Les variations de température du baromètre vont de -5°C (le 18/12/2022) à 43°C (le 19/07/2022), elles montrent des modulations en phase avec les cycles saisonniers (Illustration 33). Les variations de pressions oscillent entre $9.95 \text{ mH}_2\text{O}$ (9.757 bar) et $10.49 \text{ mH}_2\text{O}$ (1.028).

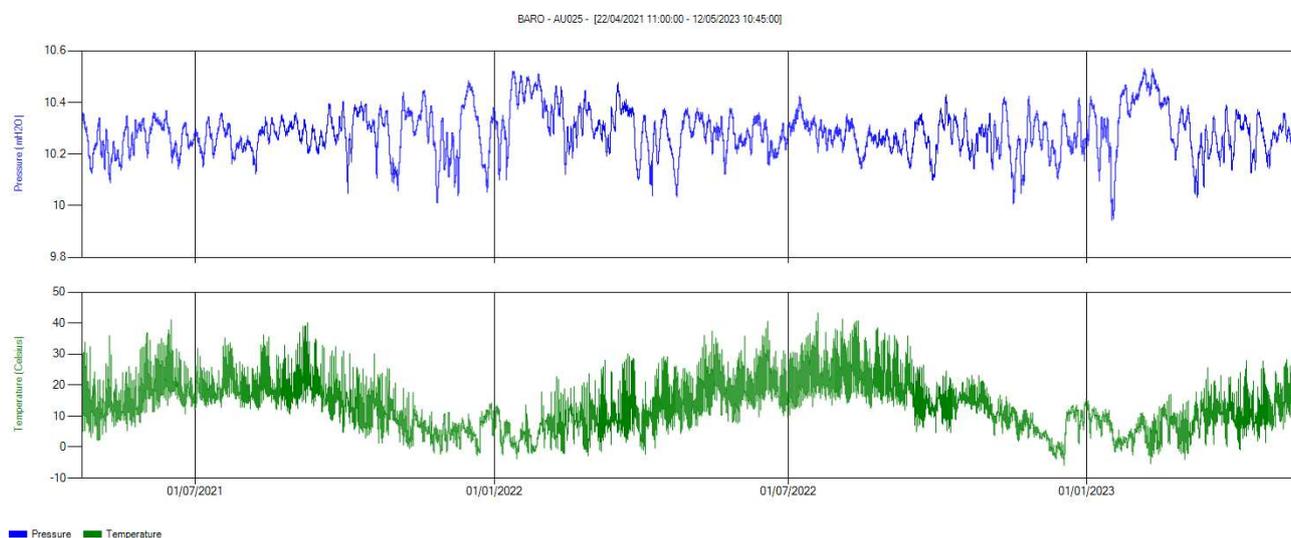
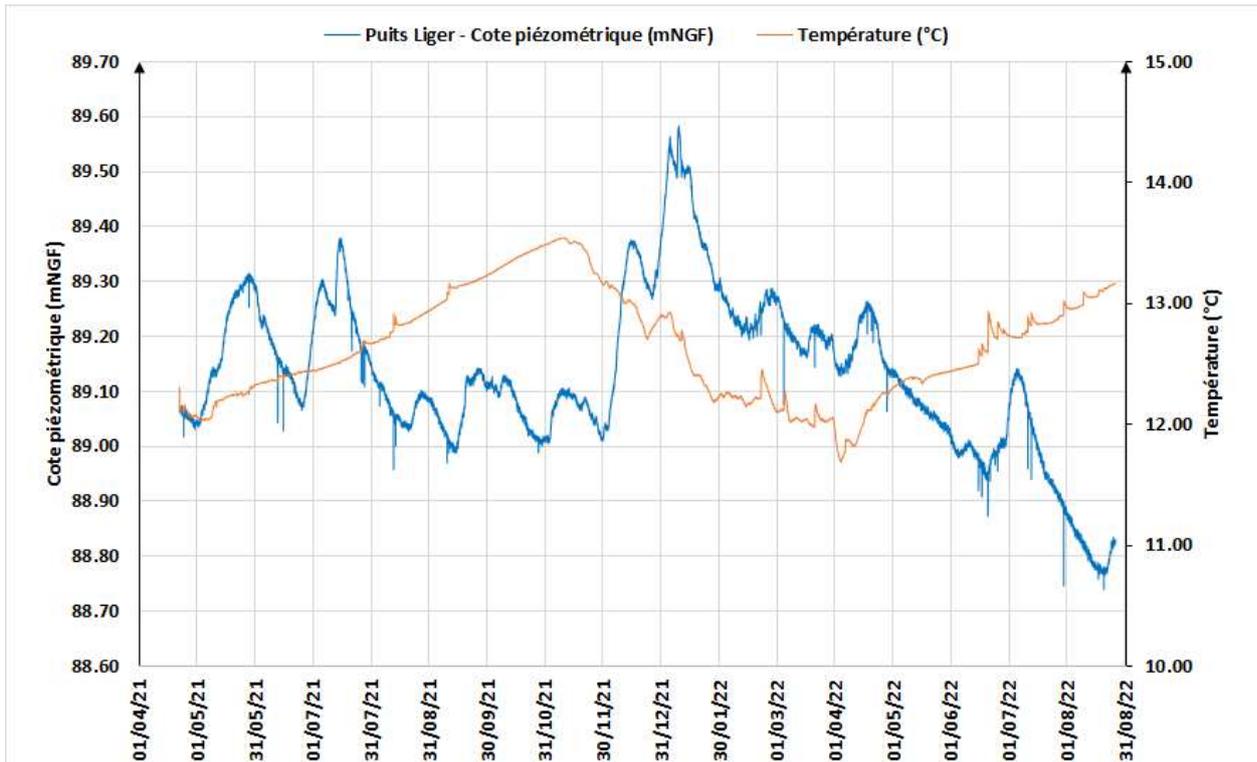


Illustration 33 : Suivi barométrique et température de l'air entre avril 2021 et mai 2023

5.1.2. Puits M. Liger

Les variations de température de l'eau de ce puits vont de 11.6°C à 13.8°C , le déphasage observé entre la température de l'air et celle de l'eau du puits est d'environ 5 mois. La chronique présente une anomalie (novembre 2022) en raison du fait que le propriétaire a dû sortir le capteur de pression. Ce qui induit une rehausse de la température du capteur de pression pendant quelques jours. Le capteur a été réinstallé quelques jours après. Les données corrigées de cet artefact sont présentées par la suite.

Les variations de niveaux montrent un battement de la nappe inférieur à un mètre, d'environ 0.84 m (Illustration 34). On observe une phase d'élévation des niveaux à partir de décembre 2021 suivi d'une phase de diminution des niveaux jusque fin août 2022. Dès septembre 2022 on observe une phase d'élévation des niveaux jusqu'en janvier 2023, puis phase de diminution des niveaux jusqu'en février, suivi d'une élévation mi-février puis d'une stabilisation. Ces observations sont analogues sur le Puits de Koninck. Il est à noter que le puits Liger fait l'objet de baisse du niveau d'eau momentanée liée certainement à un ouvrage distant captant de l'eau régulièrement.



LIGER - W3689 - [22/04/2021 09:30:00 - 29/06/2023 09:30:00]

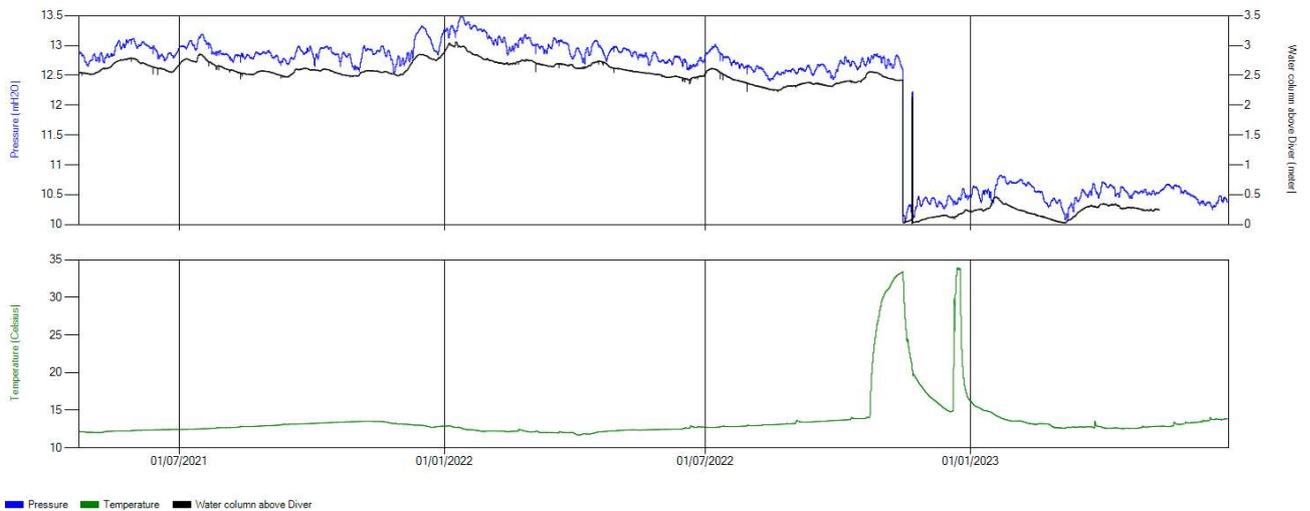


Illustration 34 : Suivi en pression (colonne d'eau) et température de l'eau entre avril 2021 et mai 2023 (en bas) au puits Liger et entre avril 2021 et août 2022 (en haut)

5.1.3. Puits Mme De Koninck

Les variations de température de l'eau de ce puits vont de 11.4°C à 14.7°C, le déphasage observé entre la température de l'air et celle de l'eau du puits est d'environ 3 mois. Il apparaît que la dynamique d'évolution des températures de ce puits est plus rapide. Cela peut être lié à une différence d'environnement entre le puits De Koninck exposé au soleil couvert par une plaque en acier et le puits Liger sous un couvert végétal à l'ombre des arbres.

Les variations de niveaux montrent un battement de la nappe inférieur à un mètre, d'environ 0.62 m (Illustration 35). On observe exactement la même dynamique d'évolution des niveaux que le puits Liger.

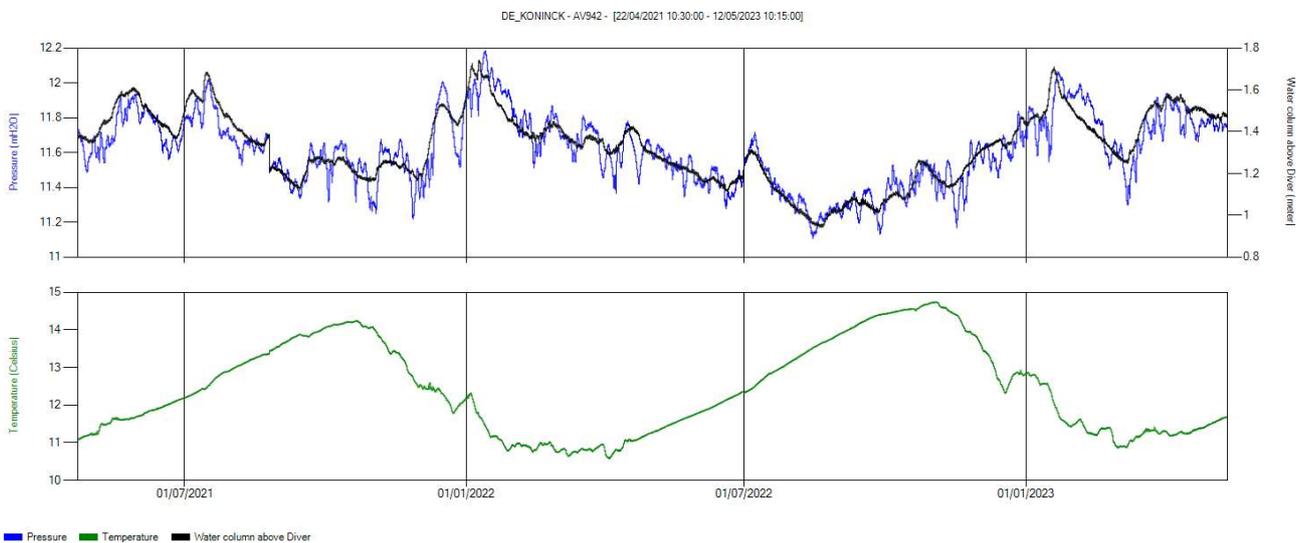
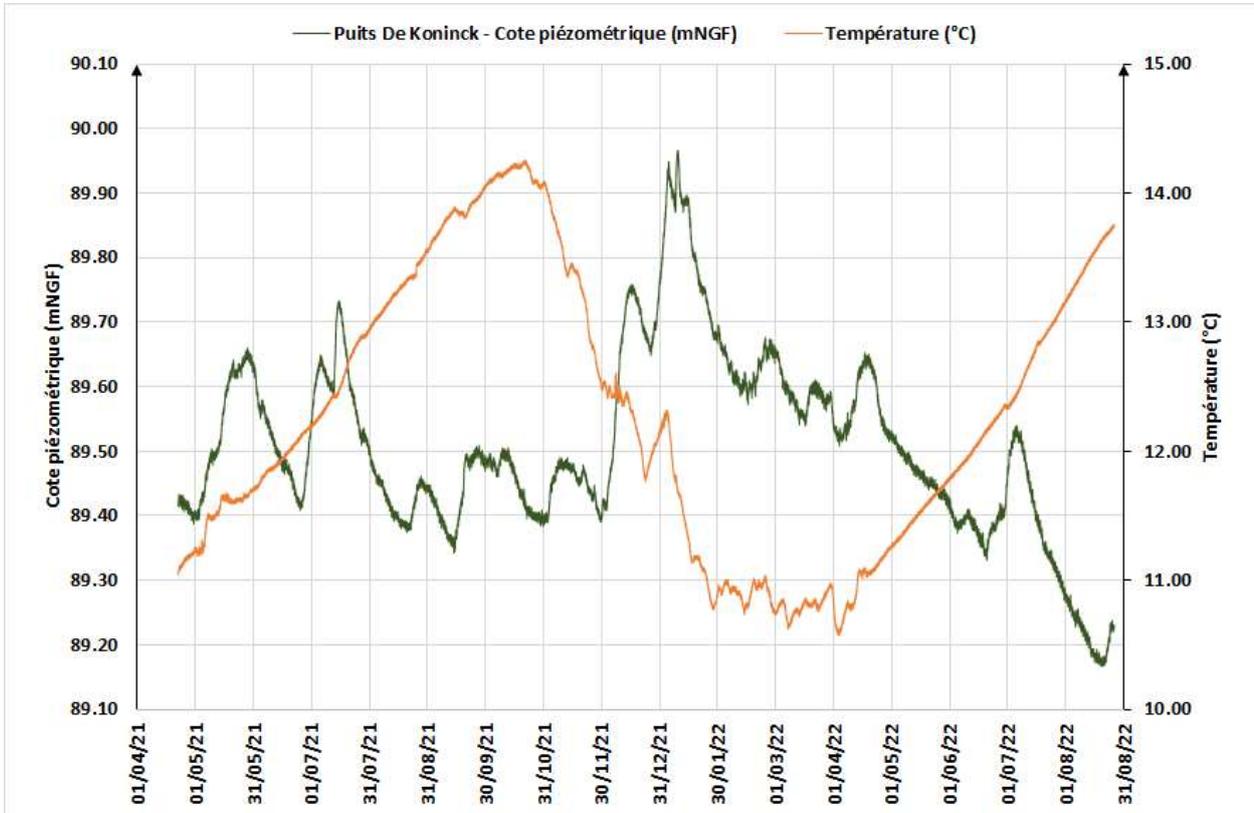


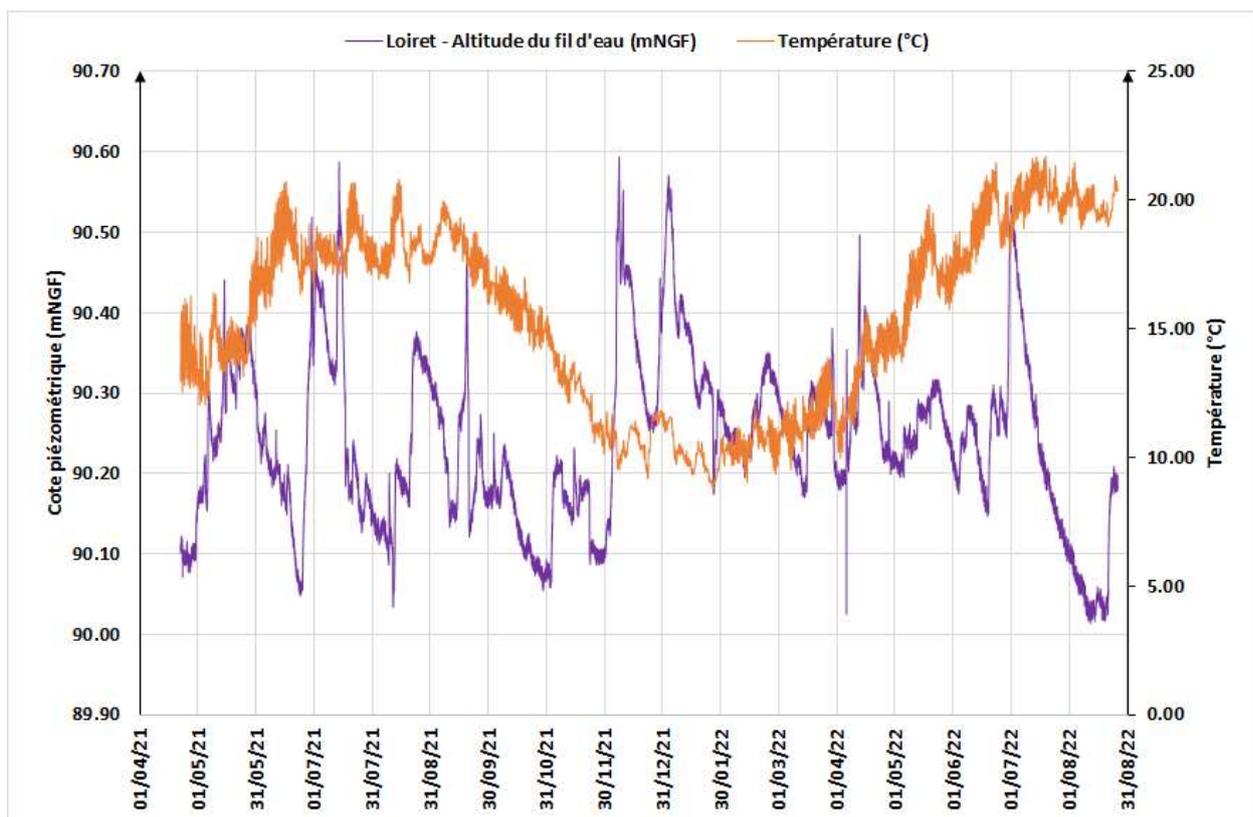
Illustration 35 : Suivi en pression (colonne d'eau) et température de l'eau entre avril 2021 et mai 2023 (en bas) au puits De Koninck et entre avril 2021 et août 2022 (en haut)

5.1.4. Loiret

Les variations de température de l'eau du Loiret (à environ 1 m de profondeur) vont de 8.7°C à 21.7°C.

Le déphasage observé entre la température de l'air et celle de l'eau du Loiret est très faible, inférieur à 24h. Lorsque la température de l'air augmente, la température du Loiret augmente également en faible proportion et avec une inertie inférieure à 24h.

Les variations de niveaux montrent un battement du Loiret inférieur à un mètre, d'environ 0,74 m (Illustration 36). On observe une dynamique d'évolution des niveaux, en temps, en variation et en ordre de grandeur proche de celle de la nappe aux puits Liger et De Koninck. Cette dernière sera précisée dans la partie suivante.



LOIRET - W0793 - [24/09/2020 12:00:00 - 27/10/2020 19:58:00]

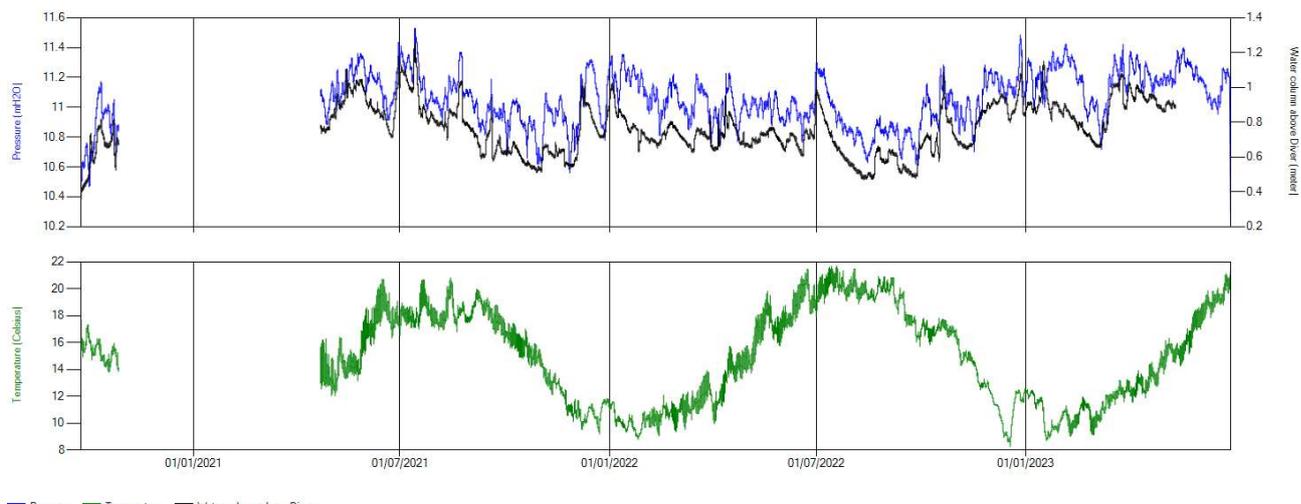


Illustration 36 : Suivi en pression (colonne d'eau) et température de l'eau entre avril 2021 et mai 2023 (en bas) au niveau du Loiret et entre avril 2021 et août 2022 (en haut)

5.2. COMPARAISON DES CHRONIQUES ET ANALYSES

Dans un premier temps, l'analyse des données est présentée sur la période avril 2021 à août 2022 (17 mois), il s'agit d'une comparaison des cotes piézométriques et de la cote du fil d'eau du Loiret. Puis l'analyse est présentée sur la seconde période suivie d'août 2022 à mai 2023 (10 mois). L'ensemble des deux périodes intègre 2 cycles hydrologiques.

L'illustration 37 (en haut) présente l'évolution des cotes piézométriques des deux puits suivis, la différence de cote piézométrique est inférieure à 40 cm, elle est probablement due à un problème de nivellement malgré l'utilisation d'un GPS différentiel à précision centimétrique. Il est utile de rappeler que le puits Liger se trouve sous un arbre, la mesure GPS a donc été décalée de quelques mètres afin d'obtenir une bonne couverture satellite.

Il n'est pas aisé d'identifier la source de l'erreur. D'après Géoportail, le MNT est proche de 92,40 mNGF au droit des deux zones où sont localisées les puits. La cote altimétrique du repère de mesure (92,98 mNGF) et du sol (92,71 mNGF) au droit du puits De Koninck serait surestimée d'environ 40 cm. En supposant que le puits De Koninck présente un nivellement incorrect et que la nappe se trouve en réalité à la même cote piézométrique au niveau des deux puits, ce qui apparaît très probable, les courbes d'évolution piézométriques se superposeraient très exactement en gommant ces différences altimétriques (Illustration 37, en bas).

L'évolution des niveaux piézométriques est donc très semblable entre les deux ouvrages. Par la suite, on considérera seulement l'ouvrage Liger.

Les niveaux piézométriques reflètent durant cette période des phases de recharge (indiquées par des flèches rouges) et de vidange de la nappe (flèches violette). Ces phases de recharge durent généralement 1 mois (mai et juillet 2022), parfois 2 mois en octobre et novembre, de façon quasi continue, puis succèdent des phases de vidange, de même durée, parfois 2 mois en continu en mai-juin 2022 et juillet-août 2022. Les niveaux demeurent rarement constants.

La comparaison des cotes piézométriques avec celles du fil d'eau du Loiret montre à l'illustration 38 (en haut) que le Loiret est toujours en position perchée, d'environ 1 m, par rapport aux alluvions.

Afin de comparer l'évolution relative des deux chroniques piézométriques et fil d'eau entre elles, on les représente sur deux axes de même amplitude (2 m) et un point de départ des chroniques commun en terme d'altitude (Illustration 38, en bas).

Ce graphique permet d'établir les liens de causalité entre un signal influençant, ou en partie influençant et un signal influencé.

En l'occurrence, on observe de façon systématique qu'une élévation ou une baisse du niveau du Loiret induit respectivement une hausse ou baisse des niveaux piézométriques. Il est intéressant de constater que le niveau de la nappe à proximité du Loiret est principalement contrôlé, mais pas exclusivement, par le niveau du Loiret. La nappe suit les variations imposées par le Loiret ainsi que d'autres variations qui se surimposent (pompage, précipitations) non exposées ici.

La réactivité de la nappe aux perturbations du Loiret présente plusieurs dynamiques, parfois rapide : inférieure à 2h (élévation du Loiret de 24 cm induisant une élévation du niveau de la nappe de 12 cm, le 13/07/2021).

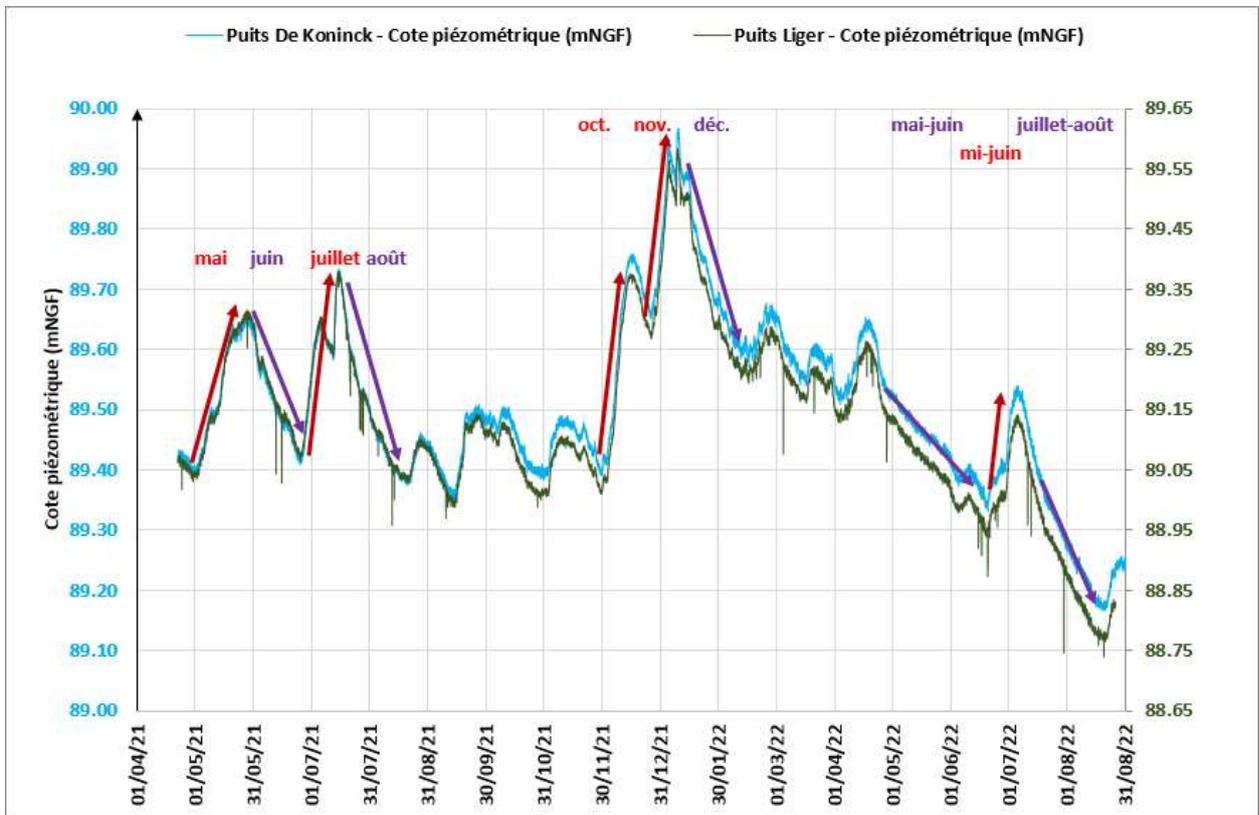
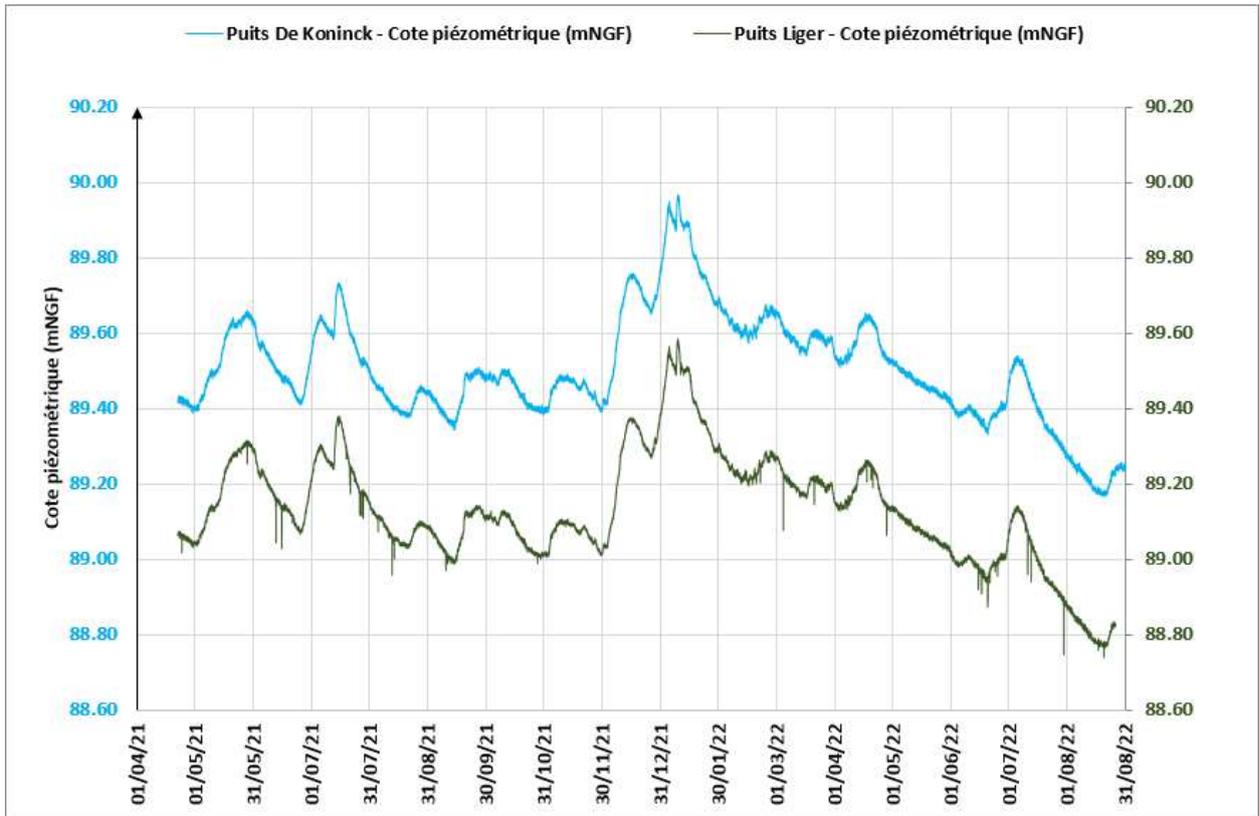


Illustration 37 : Cotes piézométriques des deux puits (en haut) en supposant qu'elles sont à la même altitude (en bas) entre avril 2021 et août 2022

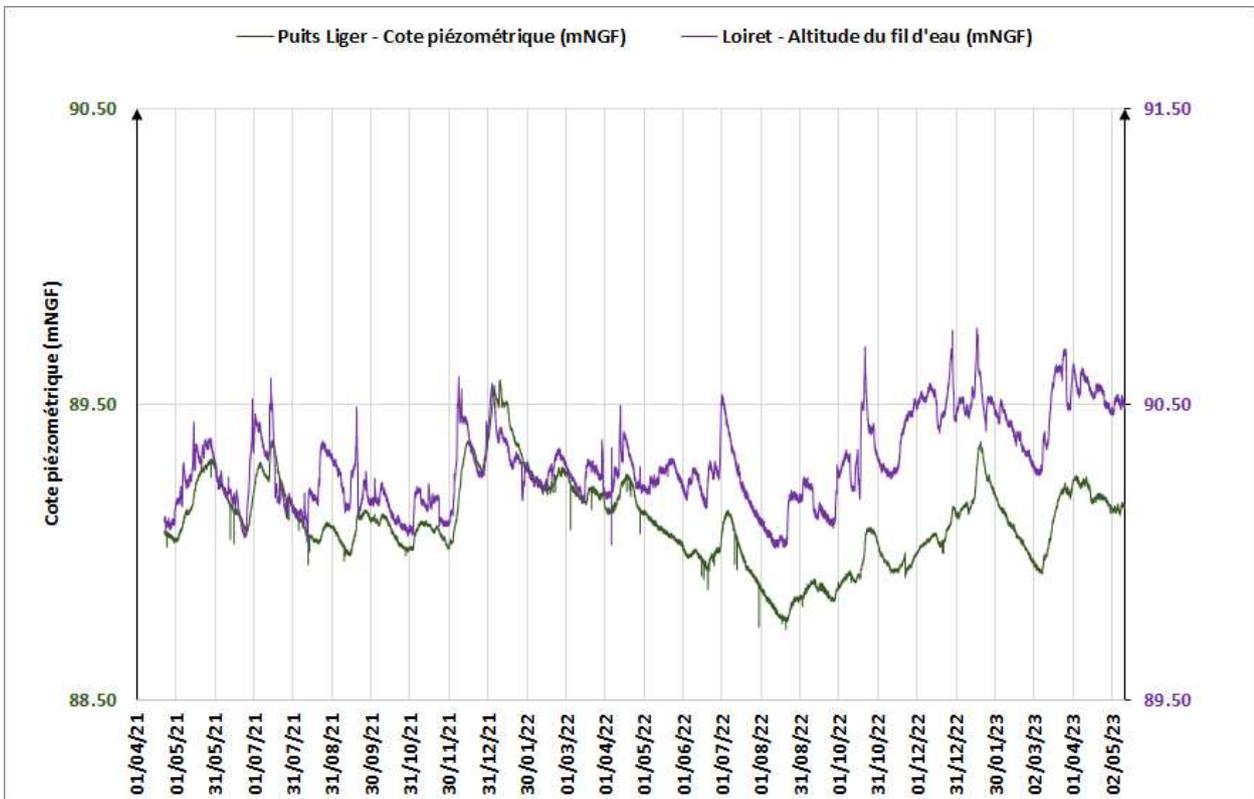
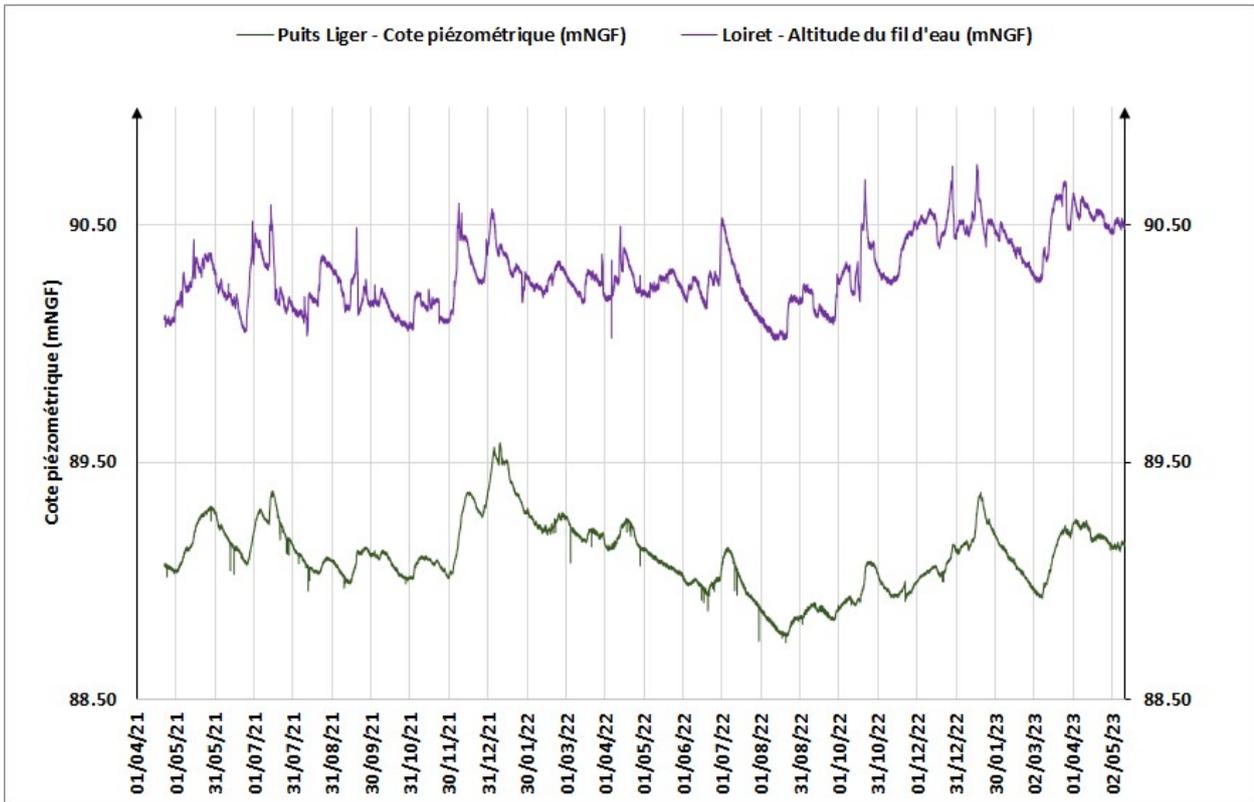


Illustration 38 : Cote piézométrique et cote du fil d'eau du Loiret (en haut) configurée de façon à comparer la réactivité nappe-rivière (en bas)

Dans d'autres conditions hydrologiques et météorologiques la dynamique est plus diffuse de l'ordre que 24h, notamment le 25/06/2021 où l'augmentation du fil d'eau du Loiret de 45 cm en une semaine induit une montée plutôt lente des niveaux de la nappe d'environ 23 cm pendant deux semaines.

L'illustration 39 montre que le 29/06 le Loiret passe de 90.26 mNGF à 90.52 mNGF (soit +0.26 m) le 01/07 (soit 48 heures après), la cote piézométrique commence à s'élever moins de 24h après le début de la rehausse d'environ 13 cm.

Toutes les dynamiques de crue et baisse du Loiret n'ont pas été étudiées au cas par cas, seulement quelques événements emblématiques de la période suivie.

Des analyses corrélatoires et spectrales pourraient permettre de qualifier les dynamiques entre de Loiret et la nappe, notamment de préciser les différents déphasages entre la série influençante et la série influencée. Il est à préciser que les pluies n'ont pas été étudiées dans le cas présent, il est certain qu'elles concourent à l'alimentation du bassin versant, des rivières, du Loiret et de la nappe. Elles constituent aussi très probablement une troisième série influençante.

L'illustration 40 présente l'ensemble de la période suivie (d'avril 2021 à mai 2023) pour les cotes piézométriques et le fil d'eau du Loiret. On peut y observer les mêmes dynamiques que sur la première période.

On observe de façon notable une baisse continue durant environ 46 jours du Loiret et ainsi des niveaux de la nappe (du 20/01/2023 au 08/03/2023). Ce même épisode avait aussi été observé pendant une durée comparable du 01/07/2022 au 21/08/2022.

À ces analyses, il serait intéressant de connaître et distinguer précisément les variations naturelles du Loiret de celles liées à des manœuvres de vannage en amont du bassin. Les différentes sources connues au droit du bassin peuvent également concourir à une alimentation distincte du Loiret dans ce secteur.

De façon globale, on remarque sur quelques épisodes, non nécessairement généralisable à toute la chronique, qu'une variation du niveau du Loiret induit au droit des deux puits suivis une variation du niveau de l'ordre de la moitié, avec une dynamique allant de quelques heures à jours.

Les chroniques de température du Loiret et de l'eau de la nappe n'ont pas été exploitées, il serait intéressant d'observer si une corrélation peut avoir lieu. Toutefois il faut garder à l'esprit que les températures du Loiret à environ 1 m de profondeur sont liées aux variations moyennes atmosphériques de la température, tandis que la température de la nappe réagit avec une grande inertie (plusieurs mois) à la température atmosphérique. Un point qu'il semblerait intéressant d'étudier, serait l'impact d'un phénomène de crue sur le Loiret en utilisant la température comme traceur thermique de l'eau jusqu'au droit des puits.

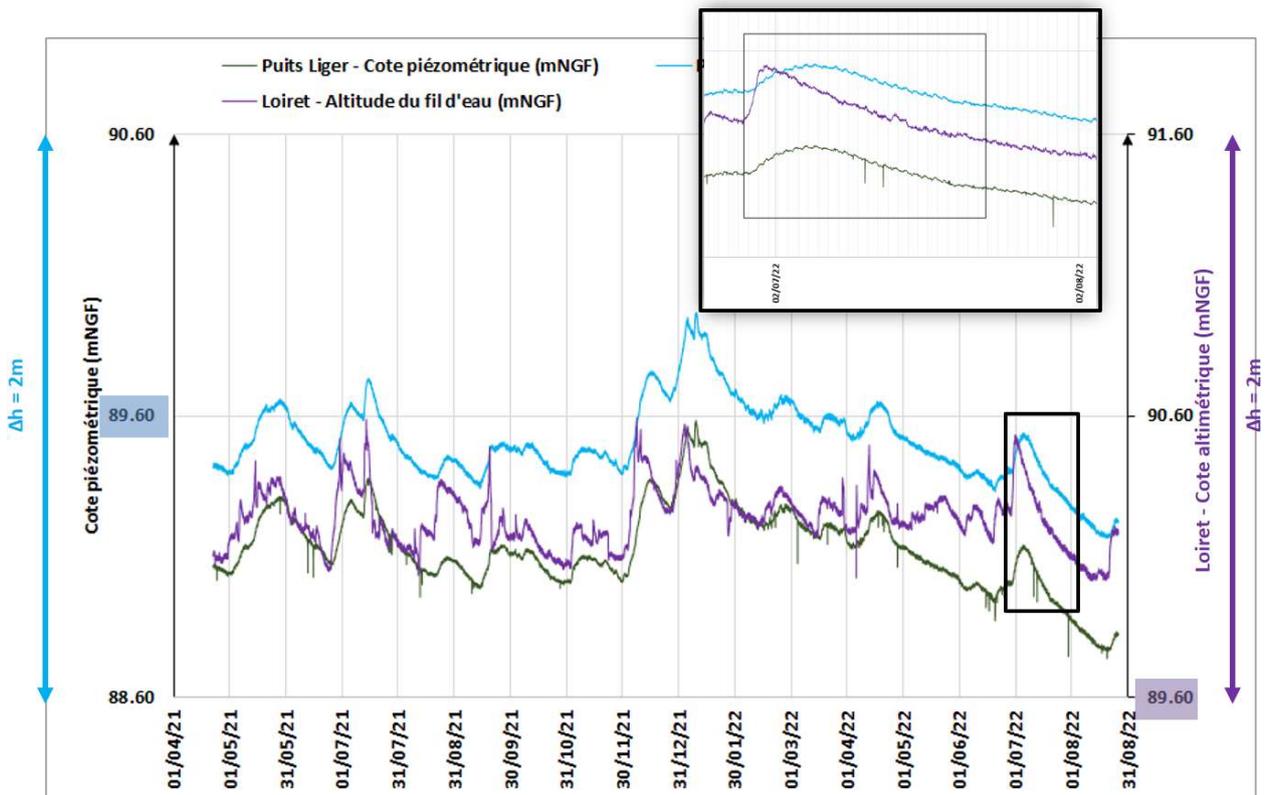


Illustration 39 : Zoom sur une période de hausse du Loiret suivie d'une rehausse des cotes piézométriques moins de 24h après

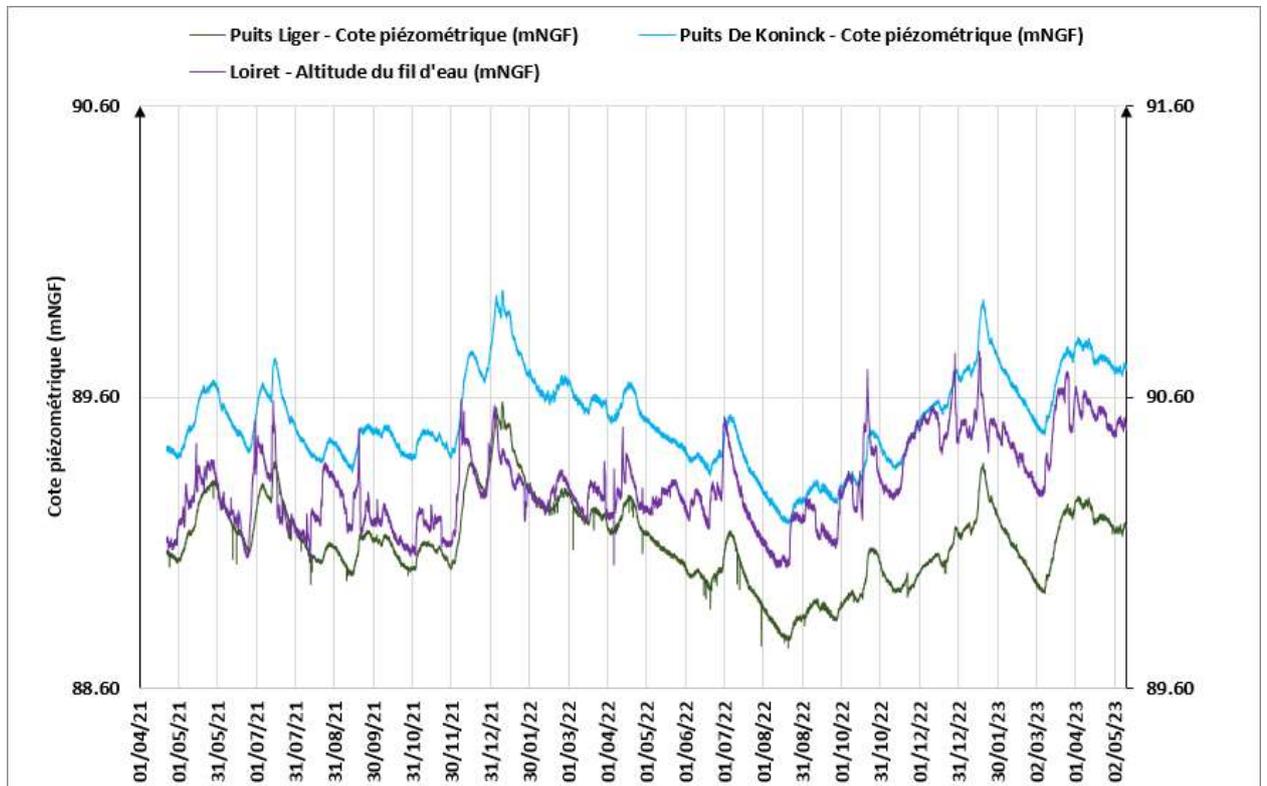


Illustration 40 : Cotes piézométriques des deux puits (en haut) en supposant qu'elles sont à la même altitude (en bas) entre avril 2021 et mai 2023

5.3. SYNTHÈSE

La description de l'évolution des cotes piézométriques sur deux ans au droit de deux puits situés à moins de 100 m du Loiret montre des phases de recharge et vidange continue, en général de l'ordre d'un mois, plus rarement d'une durée consécutive de deux mois. Les niveaux demeurent rarement stables plus de 10 jours.

La description de l'évolution des cotes du fil d'eau du Loiret sur deux ans (à proximité des deux puits suivis), montre cette même dynamique, plus réactive par définition, mais sur les mêmes temporalités en terme de cycle de recharge et de vidange.

L'étude des relations entre les eaux souterraines et les eaux de surface au travers des évolutions de cotes de ces deux grandeurs montre que le Loiret semble être systématiquement à l'origine des variations de niveaux piézométriques au droit de la nappe.

La relation apparaît ainsi s'établir dans le sens Loiret - nappe. Il n'a toutefois pas été recherché d'exception à cette règle, notamment dans la mesure où l'on peut aussi se représenter la nappe comme alimentant le Loiret en étiage.

Il existe un déphasage entre les eaux souterraines et les eaux de surface, de l'ordre de quelques heures à 48 h tout au plus.

Sur les quelques événements analysés, une élévation de la cote du fil d'eau du Loiret « h » semble imposer une variation pour moitié de la nappe « h/2 ». Il est probable que cette relation varie selon les conditions hydrologiques.

Il coexiste des phénomènes sur le long terme d'élévation/baisse du Loiret (un mois par exemple) et des phénomènes de crue/décru (quelques jours) à forte réactivité de courte durée vis-à-vis de la nappe des alluvions.

Pour aller plus loin, d'après les suivis réalisés, un pas de temps horaire semble suffisant pour décrire ces phénomènes.

Des analyses corrélatoires et spectrales pourraient permettre de qualifier les dynamiques entre de Loiret et la nappe, notamment de préciser les différents déphasages entre la série influençante et la série influencée. Il est à préciser que les pluies n'ont pas été étudiées dans le cas présent, il est certain qu'elles concourent à l'alimentation du bassin versant, des rivières, du Loiret et de la nappe. Elles constituent aussi très probablement une troisième série influençante.

Il serait intéressant de connaître la diffusivité de ces influences à plus grande distance des berges du Loiret (> 100m). À ce titre un suivi serait nécessaire dans quelques piézomètres localisés dans les alluvions et dans les calcaires afin d'identifier le comportement des deux nappes, et si elles sont distinctes ou confondues comme cela est supposé.

Le nivellement altimétrique des points est essentiel pour connaître les cotes des niveaux mesurés et déduire le sens des relations. Cette étude ESO/ESU doit être complétée par l'étude des précipitations, non réalisées ici (tâche non prévue initialement), ainsi que l'étude des ouvertures/fermetures des vannes dans le bassin durant le suivi qui peuvent constituer un facteur externe influençant les chroniques suivies.

6. Conclusion

Les investigations hydrogéologiques menées dans le cadre du projet CENARI-O ont permis de développer les connaissances sur le Loiret et la nappe des alluvions ou des calcaires de Beauce, jusque-là non connues spécifiquement dans ce secteur du Val.

Ces expériences, inédites, n'avaient jusqu'alors jamais été conduites sur ce secteur d'étude.

Il s'agissait de réaliser **simultanément un pompage d'essai de longue durée, couplé à un traçage en écoulement radial convergent. Un suivi en pression et température des eaux souterraines au droit de deux puits et au niveau du Loiret pendant plus de 2 ans** à un pas d'acquisition de 15 et 30 minutes a permis d'enregistrer les variations de ces paramètres dans les deux compartiments.

Hydrodynamique

Lors du pré-test de pompage, la transmissivité estimée varie de l'ordre de 4×10^{-3} m/s (point d'observation) à 5×10^{-3} m²/s (puits de pompage) après plus de 60 minutes de pompage. Le coefficient d'emmagasinement au point d'observation est de 2.9×10^{-3} , caractéristique d'une nappe captive.

Lors de l'essai de nappe (7 jours, soit environ 168 heures, durée du pré-test), la transmissivité estimée est un peu plus faible, de l'ordre de 1.6×10^{-3} (point d'observation) à 1.2×10^{-3} m²/s (puits de pompage) après plus de 7 jours de pompage. Le coefficient d'emmagasinement au point d'observation est également un peu plus faible, environ 2.1×10^{-3} .

On peut retenir que l'ordre de grandeur de la transmissivité est de 10^{-3} m²/s et celui du coefficient d'emmagasinement de 2×10^{-3} . Selon les valeurs moyenne de T et S retenues, la diffusivité est de l'ordre de 0.5 à 1 m²/s. Il s'agit d'un bon indicateur de la propagation d'influence d'une perturbation dans le milieu aquifère saturé.

Cette dynamique de l'aquifère interpelle, dans la mesure où, tel que cela a pu être observé grâce au suivi des capteurs de pression, le Loiret impacte le niveau de la nappe, en revanche il semble que durant les conditions hydrologiques des essais, le pompage en nappe n'ait pas rencontré de limite alimentée ou n'ait pas été soutenu par une telle limite.

Hydrodispersion

L'expérience de traçage en condition d'écoulement radial convergent est un succès, environ 60 % de la masse a été restituée jusqu'à l'arrêt prématuré de la pompe. Un modèle analytique monocouche permet de représenter l'hydrodispersion dans le sous-sol entre les deux ouvrages souterrains testés.

Un modèle bicouche reste possible (connexion des alluvions avec les calcaires de Beauce). Dans ce secteur, la lithologie est peu connue. Cependant la profondeur des alluvions serait de l'ordre de 6-7 m et les puits sont de l'ordre de 5-6 m de profondeur.

Un questionnement existe sur le pompage dans le puits de M. Liger, l'ouvrage pourrait capter les alluvions ainsi que les calcaires, ce qui expliquerait un transfert de pression rapide lors de l'essai de nappe (coefficient d'emmagasinement de 2.8×10^{-3}) et un transfert de matière dans la partie libre de l'aquifère (coefficient d'emmagasinement de 2.3 %).

On a pu déterminer la porosité cinématique de l'ordre de 2.3 % ainsi que la dispersivité de l'ordre de 0.38 m (soit 1/86 de la distance de transport). La vitesse maximale est de 22 m/j et la vitesse moyenne de 11 m/j dans ces conditions de gradients forcés.

Monitoring ESU/ESO sur deux cycles hydrologiques

La description de l'évolution des cotes piézométriques sur deux ans au droit de deux puits situés à moins de 100 m du Loiret montre des phases de recharge et vidange continue, en général de l'ordre d'un mois, plus rarement d'une durée consécutive de deux mois. Les niveaux demeurent rarement stables plus de 10 jours.

La description de l'évolution des cotes du fil d'eau du Loiret sur deux ans (à proximité des deux puits suivis), montre cette même dynamique, plus réactive par définition, mais sur les mêmes temporalités en terme de cycle de recharge et de vidange.

L'étude des relations entre les eaux souterraines et les eaux de surface au travers des évolutions de cotes de ces deux grandeurs montre que le Loiret semble être systématiquement à l'origine des variations de niveaux piézométriques au droit de la nappe.

La relation apparaît ainsi s'établir dans le sens Loiret - nappe. Il n'a toutefois pas été recherché d'exception à cette règle, notamment dans la mesure où l'on peut aussi se représenter la nappe comme alimentant le Loiret en étiage.

Il existe un déphasage entre les eaux souterraines et les eaux de surface, de l'ordre de quelques heures à 48 h tout au plus.

Sur les quelques évènements analysés, une élévation de la cote du fil d'eau du Loiret « h » semble imposer une variation pour moitié de la nappe « h/2 ». Il est probable que cette relation varie selon les conditions hydrologiques.

Il coexiste des phénomènes sur le long terme d'élévation/baisse du Loiret (un mois par exemple) et des phénomènes de crue/décru (quelques jours) à forte réactivité de courte durée vis-à-vis de la nappe des alluvions.

Le nivellement altimétrique des points est essentiel pour connaître les cotes des niveaux mesurés et déduire le sens des relations. Cette étude ESO/ESU doit être complétée par l'étude des précipitations, non réalisées ici (tâche non prévue initialement), ainsi que l'étude des ouvertures/fermetures des vannes dans le bassin durant le suivi qui peuvent constituer un facteur externe influençant les chroniques suivies.

7. Références

- Binet, S., Joigneaux, E., Pauwels, H., Albéric, P., Fléhoc, Ch., Bruand, A.** 2017. Water exchange, mixing and transient storage between a saturated karstic conduit and the surrounding aquifer: Groundwater flow modeling and inputs from stable water isotopes. *Journal of Hydrology* **544**: 278-289.
- Boulton A.J. Findlay S., Marmonier P., Stanley E.H., Valett H.M.,** 1998. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annual Review of Ecology and Systematics* **29**(1): 59-81.
- F. Brissaud, F. Lambert, Ph. Couchat,** 1978. Étude numérique de l'influence des conditions aux limites sur les solutions de l'équation de la dispersion pour un écoulement unidimensionnel, *Journal of Hydrology*, Volume 37, Issues 3–4, 1978, Pages 365-377, ISSN 0022-1694,
- Cardenas B.,** 2008. Surface water-groundwater interface geomorphology leads to scaling of residence times. *Geophysical Research Letters*. **35** (8), <https://doi.org/10.1029/2008GL033753>
- Gutierrez Alexis, Klinka Thomas, Thiery Dominique, Elsass J.** (2012) - Manuel d'utilisation de TRAC : Aide à l'interprétation de traçages en milieux poreux. Rapport final. BRGM/RP-60660-FR, 111 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-60660-FR.pdf>
- 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 <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-68509-FR.pdf>
- Klinka, Thomas ; Gutierrez, Alexis ; Thiery, Dominique** (2012) - Validation du logiciel TRAC : aide à l'interprétation de traçages en milieu poreux. Rapport final. BRGM/RP-59425-FR, 57 p., 1 ann. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-59425-FR.pdf>
- Lalot, E., Curie, F., Wawrzyniak, V., Baratelli, F., Schomburgk, S., Flipo, N., Piegay, H., Moatar, F.,** 2015. "Quantification of the contribution of the Beauce groundwater aquifer to the discharge of the Loire River using thermal infrared satellite imaging." *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **19**(11): 4479-4492.
- Zunino C.** (1979). Contribution à l'étude hydrogéologique du Val d'Orléans (Établissement d'un modèle mathématique de simulation de nappe) - Université d'Orléans, thèse de 3^{ème} cycle.



**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 ou UTAM

Adresse

Tél. :

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm