

Faisabilité des périmètres de protection du captage de l'agglomération de Bourges à la Peupleraie de Souaire, commune de St-Germain-du-Puy.

Avis sur les résultats des études et travaux réalisés en 2021

Communauté d'agglomération Bourges Plus (18)
Indice BSS : BSS004AYRB

Alexis Gutierrez
Hydrogéologue agréé
17/05/2022

Sommaire

Sommaire	1
1 Introduction	3
2 Travaux réalisés en 2021	5
2.1 Pompages d'essais	7
2.1.1 Essais par paliers	7
2.1.2 Pompage de longue durée	9
2.2 Suivi des cours d'eau	13
2.2.1 Suivi des niveaux des cours d'eau.....	13
2.2.2 Suivi de la température.....	16
2.2.3 Jaugeages différentiels	18
2.3 Suivi des paramètres chimiques	20
2.3.1 Suivi des nitrates	20
2.3.2 Suivi de la conductivité	22
2.3.3 Analyse des nitrates à différentes profondeurs	22
2.4 Traçages.....	23
2.4.1 Traçage entre l'Yèvre et le forage de reconnaissance en pompage	23
2.4.2 Traçage entre le Pz_long et le forage de reconnaissance en pompage.....	23
2.4.3 Traçage entre le Pz_court et le forage de reconnaissance en pompage	24
2.5 Campagne géophysique.....	25
3 Interprétation	27
4 Conclusion.....	29
Références bibliographiques	31
ANNEXE : Réponses du SIVY (Syndicat intercommunal de la vallée de l'Yèvre) concernant les fluctuations cycliques observées dans les eaux de surface.	32

Liste des figures

Figure 1 : Proposition pour la zone d'étude environnementale	6
Figure 2 : Coupes géologique et techniques (d'après [8])	8
Figure 3 : Pompages par paliers (15/10/2020 et 24/08/2021)	9
Figure 4 : Ré-interprétation du pompage d'essai du 26/08 au 02/09/2021. La courbe théorique (courbe rouge) semble calée sur les données observées (points jaunes).....	10
Figure 5 : Interprétation au piézomètre court.....	11
Figure 6 : zoom sur les données de niveau dynamique au puits montrant i) un bruit lié à la qualité du capteur et ii) une fluctuation cyclique de période 24h.	11
Figure 7 : Interprétation de l'essai longue durée avec la méthode de Gringarten (fracture verticale).....	12
Figure 8 : Zoom sur les fluctuations cycliques aux piézomètres.	13
Figure 9 : Comparaison F_Reco et Pz long.....	13
Figure 10 : Fluctuations observées sur les eaux de surface.....	14
Figure 11 : Suivi des niveaux des cours d'eau et du forage F-Reco.....	15

Figure 12 : Inversion de l'axe des rabattements pour montrer la corrélation entre les fluctuations de surface et d'eau souterraine.....	15
Figure 13 : Suivi des niveaux et de la température sur le canal de dessèchement.....	16
Figure 14 : Suivi des niveaux et température sur l'Yévrette	16
Figure 15 : Suivi niveau et température sur le Pz Court	17
Figure 16 : Suivi niveau et température sur le Pz long	17
Figure 17 : Suivi niveau et température sur le forage de reconnaissance	18
Figure 18 : Ecran de calcul du logiciel Conexmin pour évaluer le volume soutiré à la rivière par le pompage.	19
Figure 19 : Localisation des points de mesure (source [10])	20
Figure 20 : Suivi des nitrates durant le pompage.....	21
Figure 21 : Evolution de la conductivité pendant le pompage.....	22
Figure 22 Interprétation du traçage Pz_Long - F_Reco	24
Figure 23 : Simulation d'un traçage au Pz-Court selon deux hypothèses (rapide et lente).....	25
Figure 24 : Linéaments dans la région de Bourges (Source : Maget et Gabouj, 1987)	26
Figure 25 : Corrélation des données de forage et des données de résistivités (Source [12]) ...	26
Figure 26 : Profils et ensembles géo-électriques interprétés (Source [12])	27
Figure 27 : Schéma conceptuel du fonctionnement du pompage au forage de reconnaissance.	28

1 Introduction

Les investigations menées sur le site de la Peupleraie de Souaire résultent de la réflexion menée dans le cadre de la révision des périmètres de protection de Saint-Ursin. La recherche d'une solution alternative en amont des sources de pollution potentielles y était préconisée et le site de la Peupleraie identifié comme un secteur d'intérêt [1] et [2]. C'est ainsi que Bourges Plus a entrepris une série de travaux dans la Peupleraie de Souaire :

- Campagne géophysique selon des profils perpendiculaires à la vallée en 2019 [3]
- Campagne géophysique selon des profils parallèles à la vallée en 2021 [12]
- Creusement du forage de reconnaissance et de deux piézomètres en 2020 [4]
- Analyse d'eau complète (type européenne) du 23/10/2020 [5]
- Diagraphies 'micromoulinet et Gamma Ray [6], Résistivités [7]

Une synthèse de ces travaux a été rédigée par Mme Santini (Bourges Plus) [8].

J'ai rédigé un premier avis sur les résultats de ces travaux [9], daté du 7 avril 2021. Le choix du site s'avérait prometteur et le forage montrait deux venues d'eau principales (de 9 à 15 m pour 40% du débit et de 32 à 38 m pour 60% du débit) avec semble-t-il l'arrivée d'eau profonde en charge par rapport à l'arrivée superficielle. La transmissivité y était très forte ($1,9 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$). Le rabattement était faible (2 m pour un pompage à 120 m³/h) et essentiellement dû aux pertes de charge quadratiques.

La qualité de l'eau était conforme et les nitrates en concentration plus faible (34 mg/L) que dans la majorité des ouvrages du secteur, indiquant le rôle bénéfique probable de la peupleraie sur la qualité de l'eau.

Sur le forage Pz-Long voisin de 12 m, les propriétés hydrodynamiques sont inférieures à celles du forage de reconnaissance. Les venues d'eau profondes n'y ont pas été rencontrées. 94% du débit provient des 20 premiers mètres.

Enfin, le piézomètre court Pz-Court, voisin de 9 m mais ne captant que la partie de l'aquifère située dans les alluvions a réagi au pompage d'essai dans une moindre mesure, confirmant que les niveaux captés ne sont pas en connexion directe avec les alluvions. Toutefois, un épisode pluvieux survenu pendant le pompage s'est ressenti immédiatement dans tous les ouvrages et dans les cours d'eau, signifiant que tous les niveaux captés sont en connexion hydraulique par le biais de réseaux de fissures (ou karstique) inégalement distribués (milieu hétérogène et anisotrope).

L'avis du 7 avril 2021 se terminait par une demande de travaux complémentaires rédigée en ces termes :

«Etant donné la forte variabilité de la productivité de l'aquifère à quelques mètres près, si un captage d'eau pour la consommation humaine est envisagé à la peupleraie de Souaire pour remplacer les ouvrages de Saint-Ursin, son emplacement définitif sera choisi sur l'emplacement actuel du forage de reconnaissance.

La protection d'un tel captage est encore très problématique. Ma première idée était de masquer les arrivées superficielles pour ne garder que les venues d'eau profonde. Cette configuration apporterait, a priori, une meilleure protection vis-à-vis des pollutions depuis la

surface, en particulier s'il s'agit de pollutions véhiculées par les eaux de surface ou dans les alluvions.

Toutefois, cette hypothèse amène à se poser les questions suivantes :

- *On se priverait de 40% de la capacité de l'ouvrage, ce qui nécessitera probablement de recourir à plusieurs autres forages pour atteindre les 450 m³/h souhaités.*
- *Privé du soutien par les eaux de surface, quel sera, sur le long terme, la productivité de l'ouvrage ? L'essai de 72h est trop court pour juger, dans un contexte de milieu fissuré très transmissif, de la pérennité du pompage.*
- *Si la teneur globale en nitrates est acceptable, le fait de se priver de la contribution des eaux superficielles se traduira-t-il par des teneurs en nitrates excessives ?*

Dans l'hypothèse où la coupe de forage ne masquerait pas les venues superficielles pour bénéficier de la capacité maximale du forage, d'autres questions se posent :

- *quelle serait la contribution des eaux de surface au pompage ? Y a-t-il un impact significatif sur le débit des cours d'eau ?*
- *le risque de contamination par les eaux de surface est-il important ?*
- *Quelles sont en amont les sites de pollution potentielles ?*
- *Les mesures de protection sont-elles envisageables ? Une station de mesure de la qualité de l'eau en amont pourrait servir de station d'alerte. Où faudrait-il la positionner ?*

Il faut donc mieux connaître cette ressource avant de décider de l'exploiter. C'est pourquoi je recommande des travaux complémentaires, dont le programme pourra être discuté plus en détail avec Bourges Plus :

- *Pompage de longue durée (1 semaine au moins) en période d'étiage avec une pompe un peu plus puissante et moins bridée que lors du premier pompage.*
- *Traçage entre le Pz-long et le forage, ainsi que le forage 519-4X-82 et le forage.*
- *Suivi des nitrates dans les eaux de surface*
- *Suivi des nitrates durant le pompage.*
- *Prélèvement des nitrates face aux différentes venues d'eau*
- *Suivi des débits des cours d'eau pendant le pompage (niveaux, jaugeages différentiels)*

En complément, selon le budget, peut-être serait-il possible de réaliser une campagne géophysique plus fine que la précédente de manière à identifier la direction de l'axe drainant intercepté par le forage. De même, la réalisation de piézomètres supplémentaires pourrait préciser les sens d'écoulement et la position de l'axe drainant.

Pour anticiper les étapes ultérieures il faudra prévoir une étude environnementale qui identifiera les sources potentielles de pollution. »

2 Travaux réalisés en 2021

La plupart des travaux demandés ont été réalisés. Ils ont été confiés au bureau d'étude EDREE qui a remis son rapport en Octobre 2021 [10]. Les travaux réalisés sont les suivants:

- Des pompages d'essais sur le sondage de reconnaissance (par paliers et longue durée) avec le suivi durant ces essais de :
 - la piézométrie sur les sondages voisins;
 - les concentrations en nitrates et la conductivité (au forage);
 - le niveaux des cours d'eau voisins;
- Un traçage durant le pompage longue durée ;
- Des prélèvements sélectifs

Ces travaux ont été réalisés en période d'étiage des cours d'eau (présentant une décroissance régulière de débit) et n'ont pas souffert d'épisode climatique venant perturber les essais. Ils sont résumés et analysés ci-après.

La coupe des ouvrages est rappelée en Figure 2 : Pz court ne capte que les alluvions, Pz long, tubé-cimenté jusqu'à 6 m, capte la partie supérieure des calcaires et F_reco, tubé cimenté jusqu'à 11 m capte à la fois la partie supérieure des calcaires dans la zone 11-15 m et la zone plus profonde 36-37 m.

Parallèlement aux travaux demandés, Bourges Plus a fait réaliser une campagne géophysique [12] parallèle à l'axe de la vallée dont je n'ai eu connaissance qu'en mars 2022.

Les travaux non réalisés consistent en un traçage entre le forage 519-4X-82 et le forage de reconnaissance, pour des raisons techniques (le forage 519-4X-82 était en pompage).

Sachant qu'il est envisagé un deuxième forage dans la peupleraie, voire un troisième, l'inventaire des sources de pollution pourra être réalisé sur un périmètre commun pour les deux ou trois ouvrages.

La zone sur laquelle il est proposé de mener l'étude environnementale s'étend en amont jusqu'à Savigny-en-Septaine et englobe Moulins-sur-Yèvre et Saint-Germain du Puy. Elle est représentée en Figure 1.

La zone ainsi délimitée fera l'objet d'une étude environnementale plus détaillée dans la moitié ouest, proche des forages (nécessitant des contrôles de terrain), tandis que sur le reste du bassin seront indiquées les sources de pollutions potentielles recensées dans les différentes bases de données (ICPE, Basias, etc).

17 Mai 2022



Figure 1 : Proposition pour la zone d'étude environnementale

2.1 Pompages d'essais

Le pompage d'essais a été confié à l'entreprise MASSÉ qui a mis en œuvre une pompe de surface de grande capacité (475 m³/h) [11]

2.1.1 Essais par paliers

Les premiers essais par paliers de 2 heures non enchaînées avaient été réalisés à 58, 86, 112 et 135 m³/h, les 15 et 16 octobre 2020. Les essais de MASSÉ les 24 et 25 août 2021 ont permis d'augmenter les débits à 136, 150, 170, 185 m³/h. La capacité nominale de la pompe est loin d'être atteinte car le dispositif de pompage est limité par le diamètre du tubage PVC (Ø200 mm) et la colonne d'aspiration (Ø168 mm). De fait, la vitesse dans la colonne d'aspiration varie de 1,7 à 2,3 m/s alors qu'elle ne devrait pas dépasser 1,5 m/s dans des conditions d'exploitation. Cette configuration est évidemment exceptionnelle pour permettre d'obtenir des valeurs plus élevées de débit. De fait, les 4 valeurs supplémentaires se combinent bien avec les précédentes (Figure 3). Les courbes caractéristiques des essais d'octobre 2020 et Août 2021 sont très similaires. Elles indiquent des pertes de charges quadratiques très élevées inhérentes au domaine fracturé ou karstique mais aussi à la conception du forage de reconnaissance. Elles devraient être plus faibles dans un forage d'exploitation de plus gros diamètre et de meilleur coefficient d'ouverture des crépines.

On retiendra pour l'interprétation un coefficient de pertes de charge quadratique entre 1150 et 1190 s²/m⁵.

Une reprise de l'ouvrage pour le transformer en forage d'exploitation permettra certainement de pomper à un débit supérieur, mais la définition du débit d'exploitation devra se faire au vu des caractéristiques finales de l'ouvrage et de simulations d'exploitation.

Faisabilité des périmètres de protection du captage de l'agglomération de Bourges à la Peupleraie de Souaire

17 Mai 2022

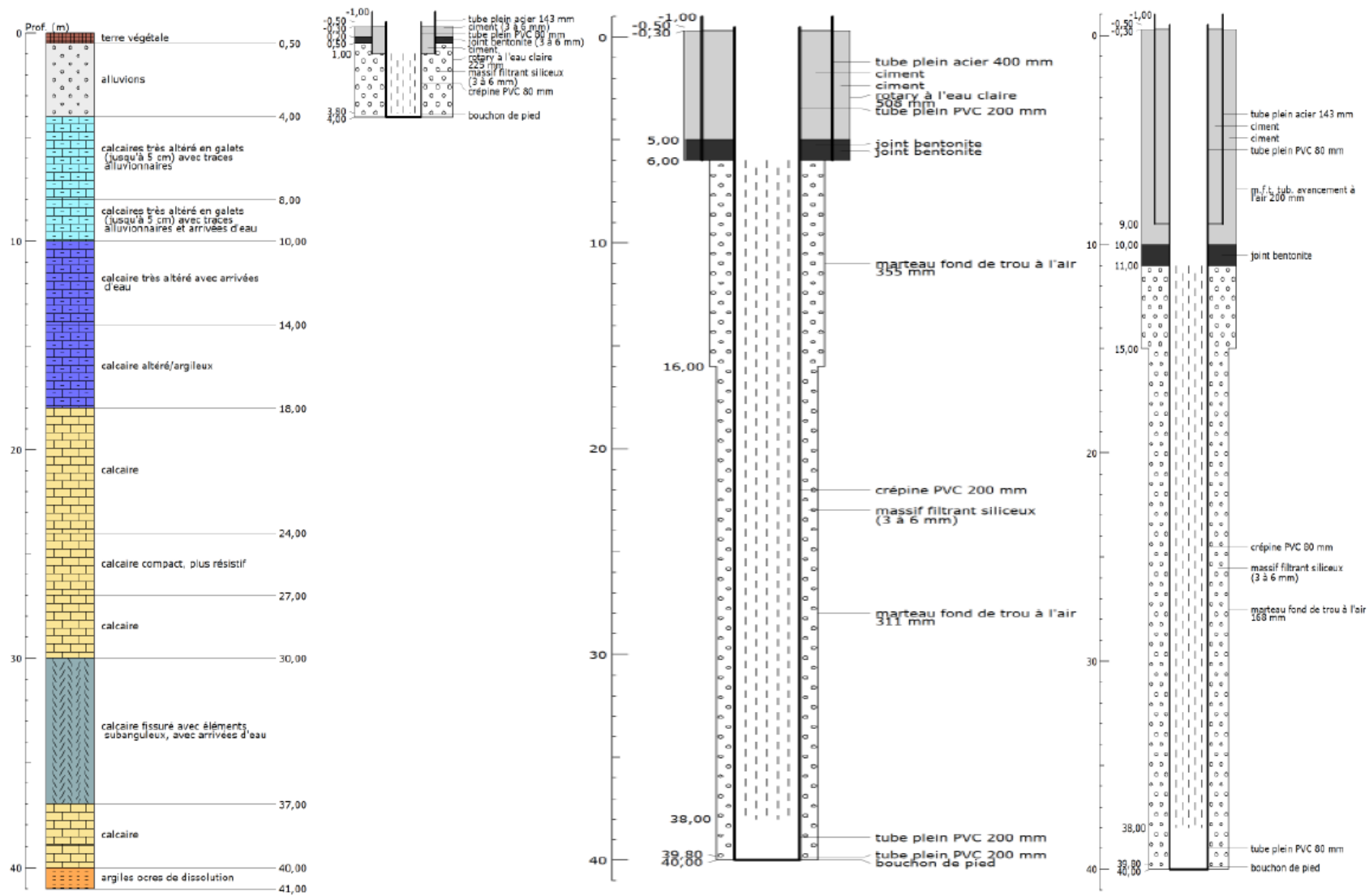


Figure 2 : Coupes géologique et techniques (d'après [8])

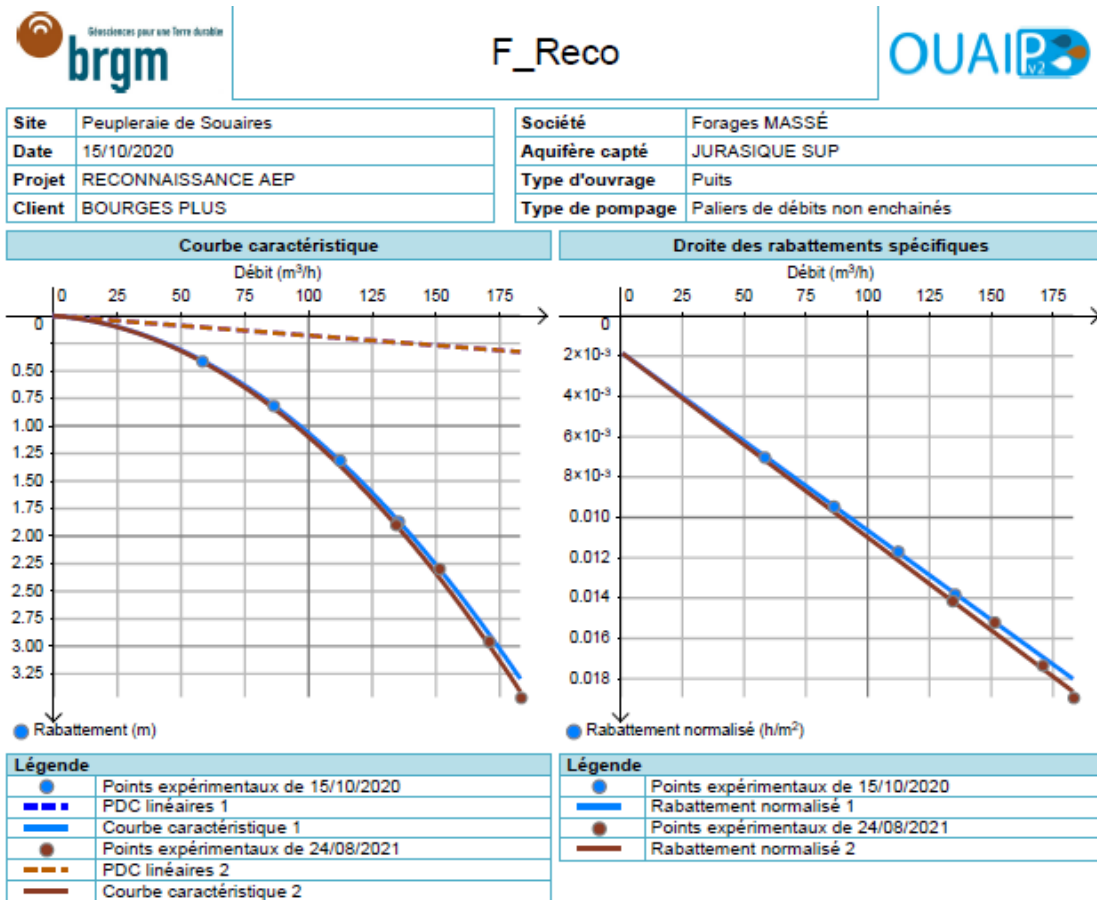


Figure 3 : Pompages par paliers (15/10/2020 et 24/08/2021)

2.1.2 Pompage de longue durée

Un essai de pompage d'une durée de 7 jours s'est déroulé du 26/08/2021 au 02/09/2021 au débit moyen de 185,8 m³/h. Le rabattement en fin d'essai est de 3,68 m ce qui confère à l'ouvrage un excellent débit spécifique de 50 m³/h/m.

Les ouvrages voisins ont été influencés par le pompage. Le fait que le piézomètre situé dans les alluvions (Pz-Court) présente un rabattement de 0,22 m durant le pompage confirme la connexion hydraulique entre les alluvions et le calcaire jurassique. Toutefois une connexion parfaite aurait provoqué un rabattement plus important au Pz_Court, plus proche du puits de pompage que Pz_long et pourtant moins impacté.

Au Pz_long (0,68 m de rabattement) la connexion hydraulique est plus franche mais l'interprétation de EDREE fait ressortir une perméabilité un peu plus faible. Cette hétérogénéité est classique dans ce type d'aquifère et souligne l'importance de transformer le forage de reconnaissance en forage d'exploitation plutôt que de créer un nouvel ouvrage à proximité.

17 Mai 2022

Les interprétations sont délicates car les rabattements sont essentiellement dus aux pertes de charge quadratique et toute variation extérieure devient sensible. Une réinterprétation des données de pompage a été jugée nécessaire. A première vue, un bon ajustement semble obtenu avec la formule de Theis sur le forage de reconnaissance (Figure 4). La transmissivité y est élevée ($1.910^{-1} \text{m}^2/\text{s}$).

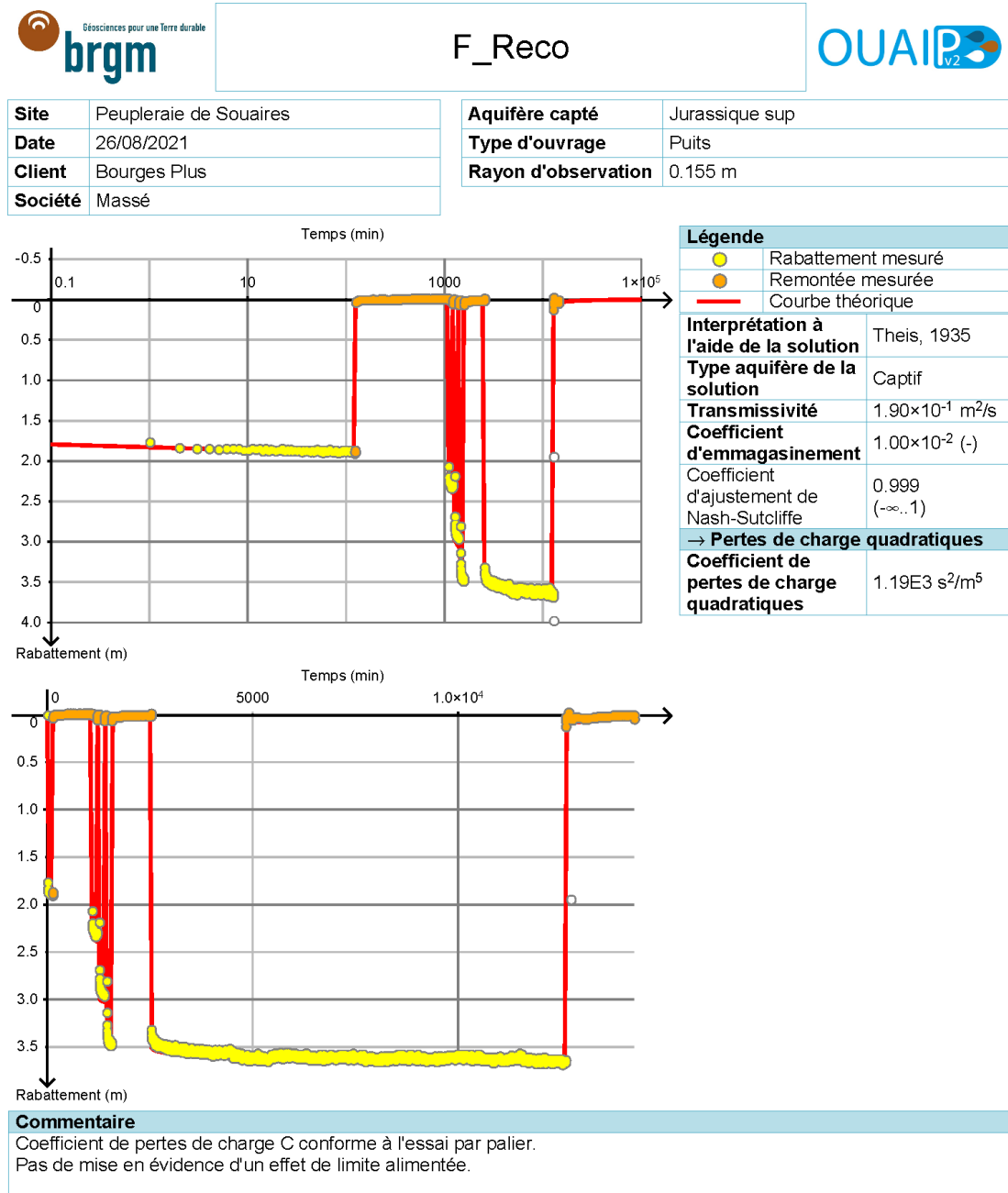


Figure 4 : Ré-interprétation du pompage d'essai du 26/08 au 02/09/2021. La courbe théorique (courbe rouge) semble calée sur les données observées (points jaunes)

L'interprétation est également réalisée au Pz_court avec des paramètres très proches de ceux du forage de reconnaissance ($T=2.10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$; $S=2.10^{-2}$), ce qui indique que **les alluvions et les fissures calcaires sont en connexion** (Figure 5).

17 Mai 2022

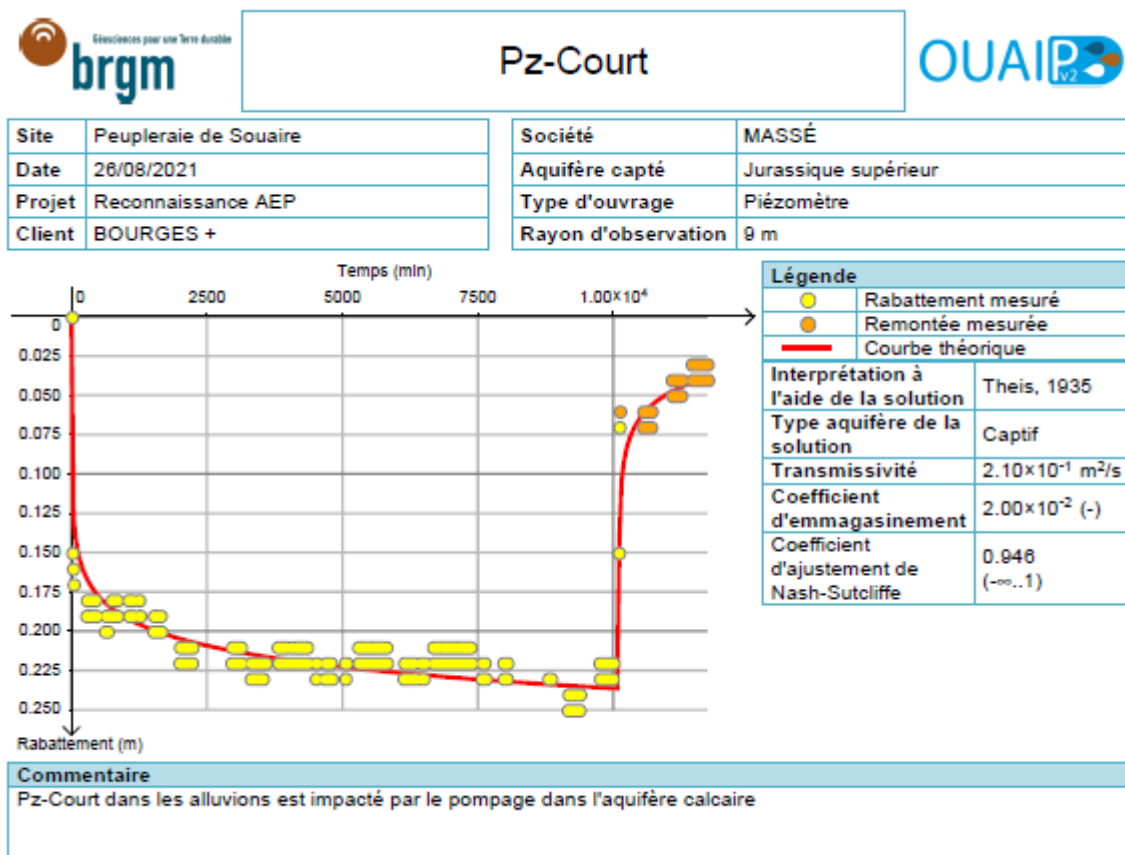


Figure 5 : Interprétation au piézomètre court

Dans le détail, (Figure 6), les mesures ne sont pas parfaites. Or, c'est sur la base de cet ajustement que l'on espère mettre en évidence un effet de limite éventuel pour préciser la connexion entre les cours d'eau et l'aquifère.

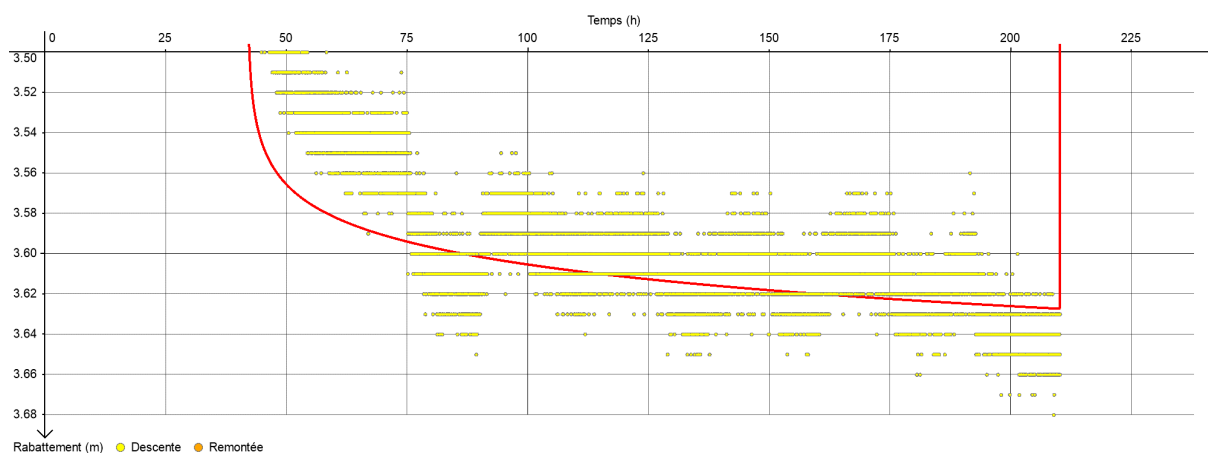


Figure 6 : zoom sur les données de niveau dynamique au puits montrant i) un bruit lié à la qualité du capteur et ii) une fluctuation cyclique de période 24h.

La qualité de l'ajustement est perturbée par plusieurs facteurs :

- La sensibilité des capteurs est insuffisante sur les trois ouvrages ce qui se traduit par un bruit au niveau de la donnée.
- Le niveau de la nappe n'est pas identique avant et après l'essai (à moins qu'il ne s'agisse d'un problème de dérive du capteur). Il nécessite une correction.
- Une cyclicité apparaît dans la variation de la donnée avec une période de 24h. L'amplitude est difficile à déterminer à cause du bruit de la donnée.

Une interprétation fine est donc difficile. L'évolution des niveaux pendant les pompages dans les différents ouvrages semble toutefois confirmer un écoulement dans un conduit karstique ou une fracture, que corroborent les diagraphies de venues d'eau. Une interprétation avec la formule de Gringarten pour fracture verticale a donc été tentée et donne des résultats acceptables, qui montrent que l'hypothèse est plausible (Figure 7).

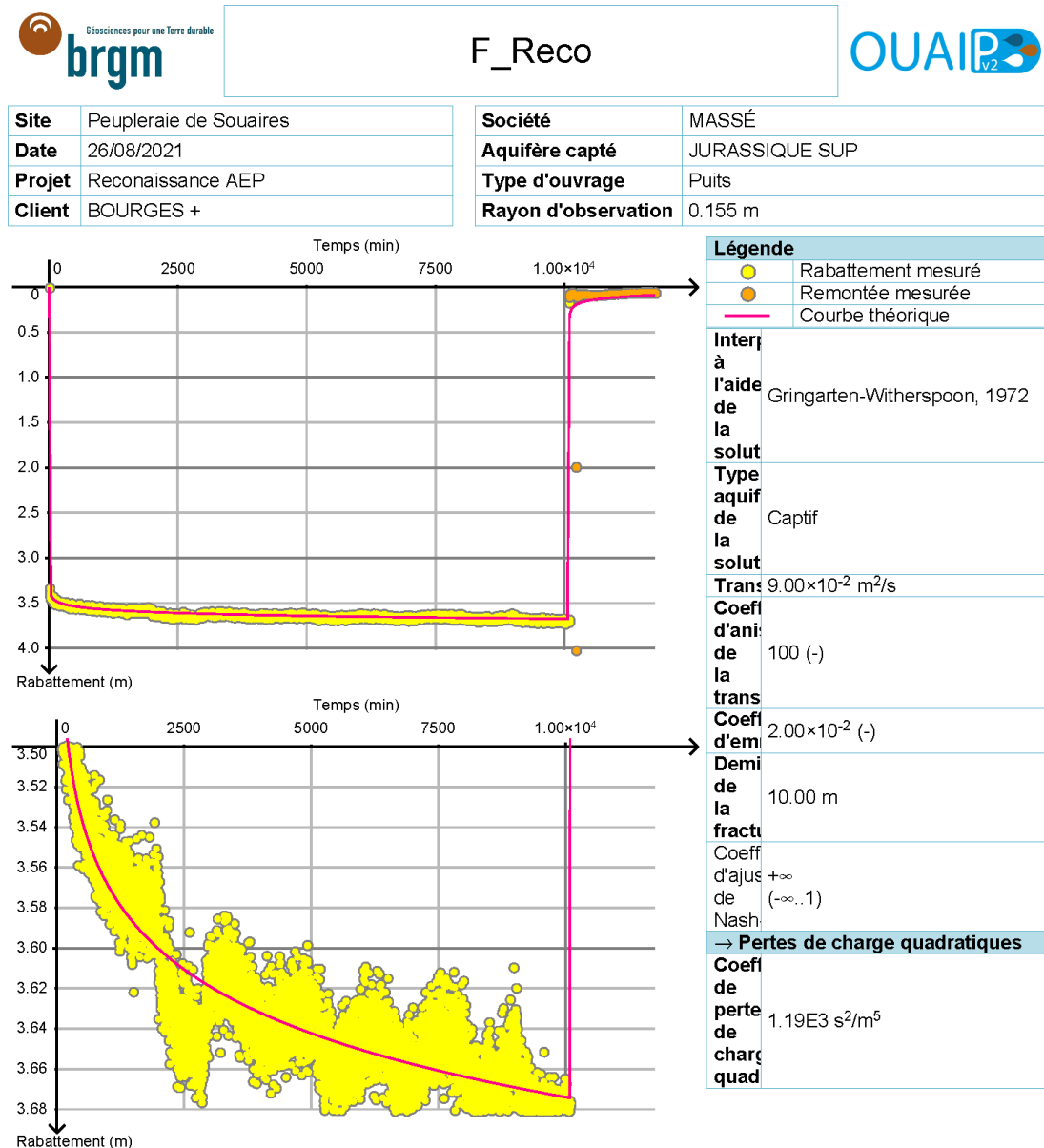


Figure 7 : Interprétation de l'essai longue durée avec la méthode de Gringarten (fracture verticale).

Aux piézomètres, on rencontre les mêmes fluctuations diurnes (Figure 8). Elles sont en phase sur Pz_court et Pz_long et de même amplitude. En revanche, elles sont déphasées de 12h avec celles du forage de reconnaissance et leur amplitude semble plus faible (mais cela est sans doute un artefact lié à la plus faible précision du capteur utilisé) (Figure 9).

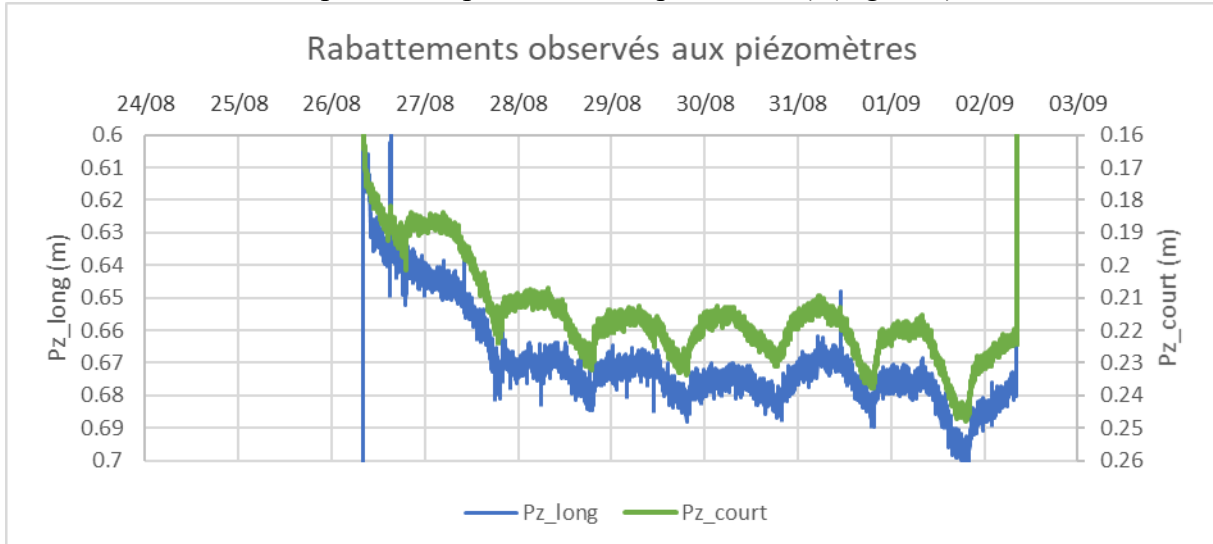


Figure 8 : Zoom sur les fluctuations cycliques aux piézomètres.

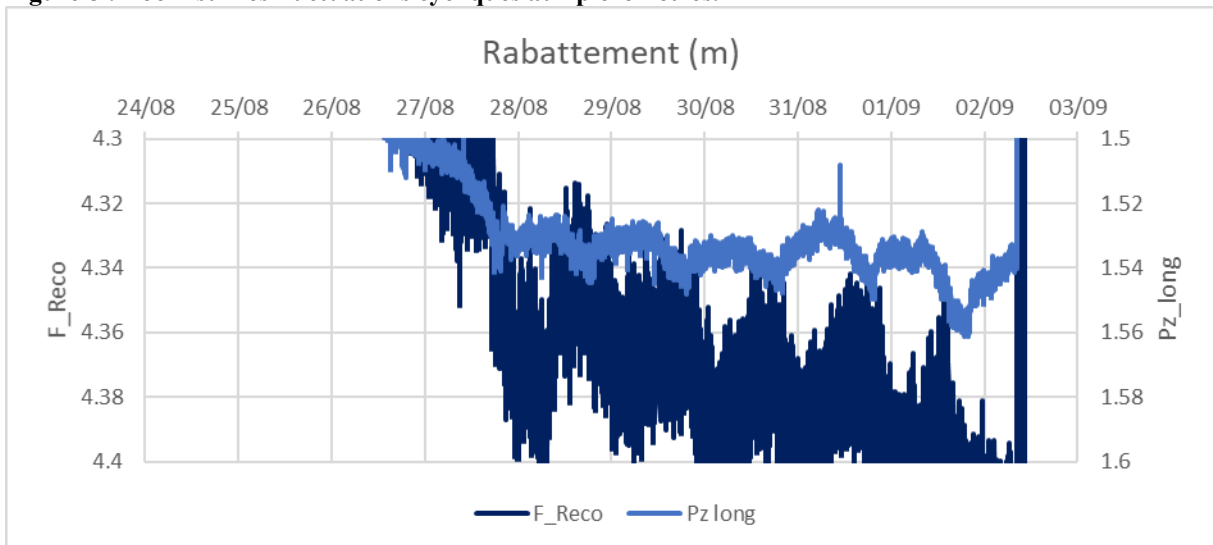


Figure 9 : Comparaison F_Reco et Pz long

2.2 Suivi des cours d'eau

Conformément au cahier des charges, le bureau d'étude EDREE a suivi le niveau des cours d'eau, le débit, les nitrates et la conductivité en divers endroits (amont et aval)

2.2.1 Suivi des niveaux des cours d'eau

Aucun impact du pompage à 186 m³/h pendant 7 jours n'a pu être mis en évidence sur le niveau des cours d'eau.

Les niveaux du canal de dessèchement et de l'Yèvre n'évoluent pas de manière parallèle. L'Yèvre baisse puis remonte tandis que le canal de dessèchement baisse de manière continue.

Les niveaux des cours d'eau (Figure 10) sont eux aussi affectés d'une périodicité cyclique (aussi bien le canal de dessèchement que l'Yèvre). EDREE émet l'hypothèse d'un impact par des prélèvements durant la journée. Après examen des données du précédent essai, cette fluctuation existait aussi en octobre 2020, hors période de pompage d'irrigation.

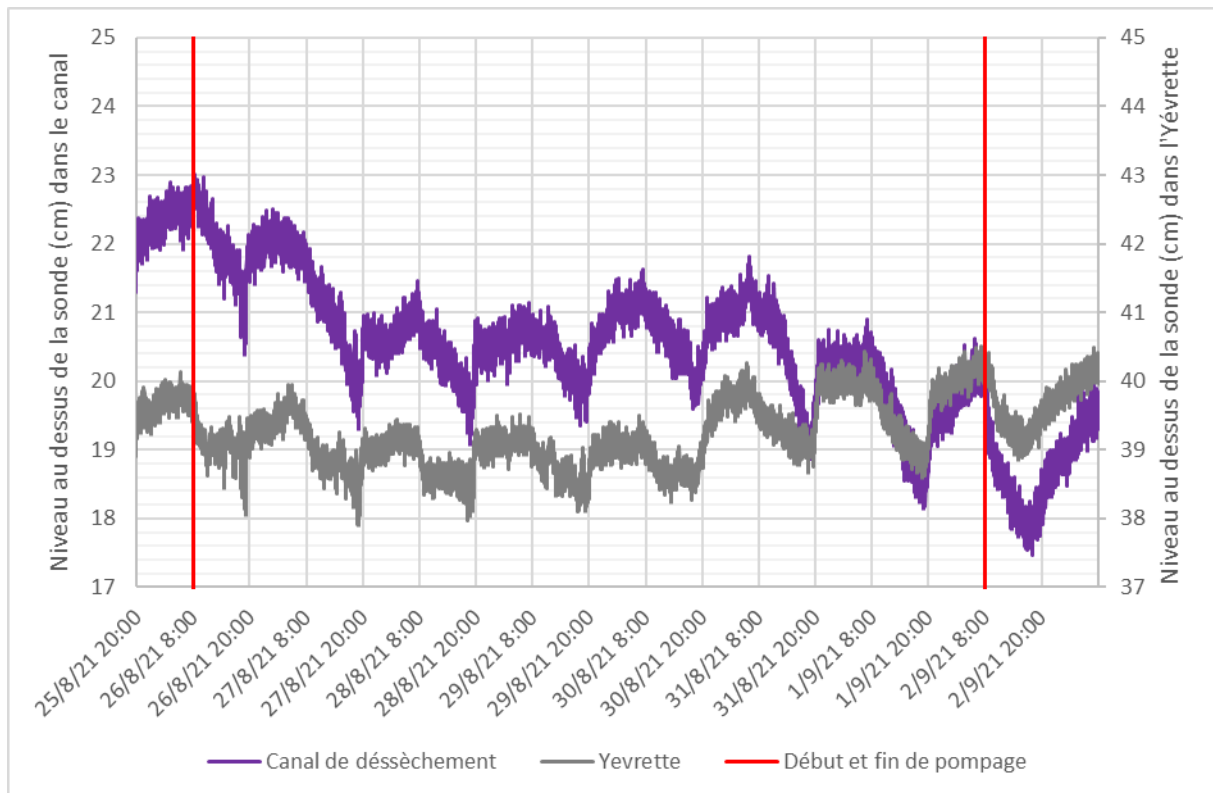


Figure 10 : Fluctuations observées sur les eaux de surface

En superposant les données de niveau d'eau au forage (la charge mesurée par le capteur de pression en m) avec le niveau d'eau dans les cours d'eau, on constate que les fluctuations sont anti corrélées (Figure 11). Cela se voit mieux en inversant l'axe des rabattements (Figure 12). Donc, la pression sur les capteurs monte (pendant la nuit) dans les eaux de surface, Pz_court et Pz_long alors qu'elle diminue dans le forage de reconnaissance, et vice versa.

17 Mai 2022

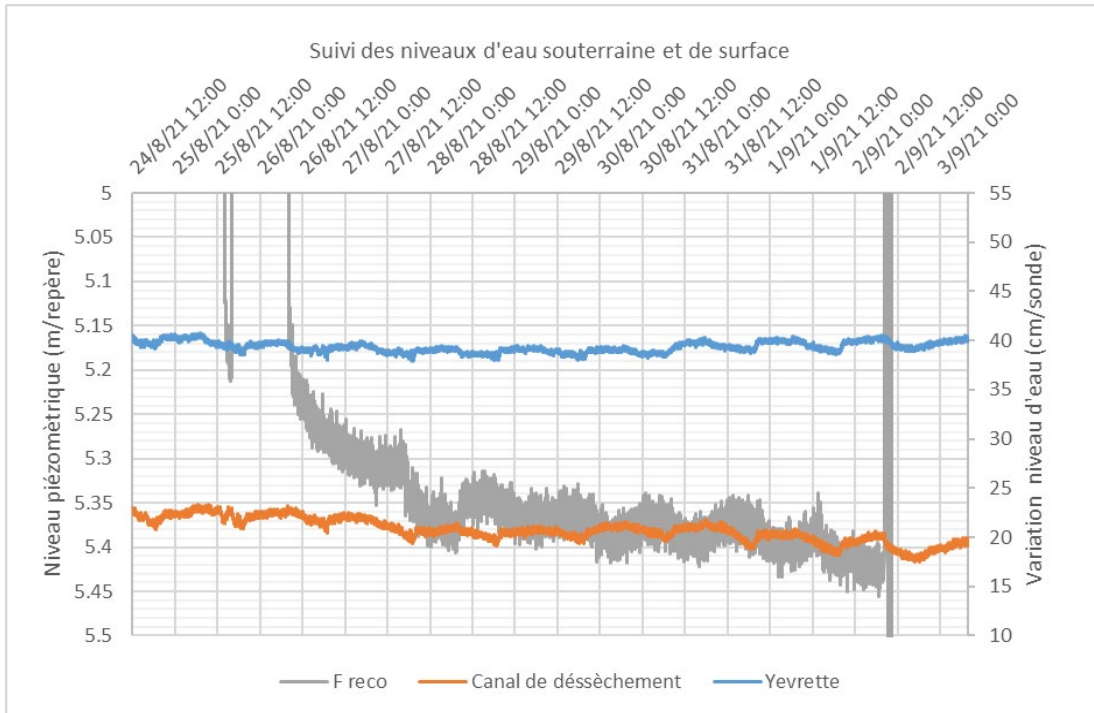


Figure 11 : Suivi des niveaux des cours d'eau et du forage F-Reco

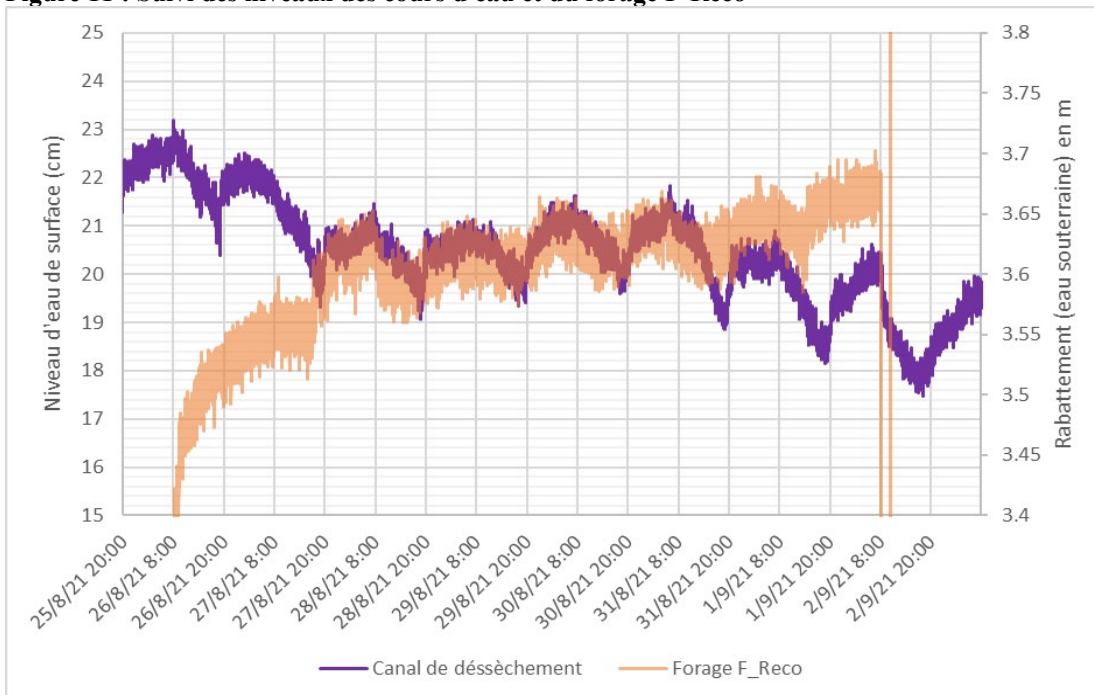


Figure 12 : Inversion de l'axe des rabattements pour montrer la corrélation entre les fluctuations de surface et d'eau souterraine

L'origine des fluctuations n'a pas été élucidée au moment de la rédaction de cet avis, mais l'allure très régulière, avec des décrochements importants à 8h et 20h font penser à une influence anthropique.

Interrogé, le SIVY nous a apporté les éléments recopiés en Annexe. Il n'y a pas d'explication à ce jour.

2.2.2 Suivi de la température

Les capteurs de pression disposent d'une sonde de température qui permet de corriger les pressions des variations de température (qui entraîne une variation de masse volumique de l'eau). Ces données n'ont pas été exploitées par EDREE. Elles sont présentées dans les figures suivantes (Figure 13 à Figure 17)

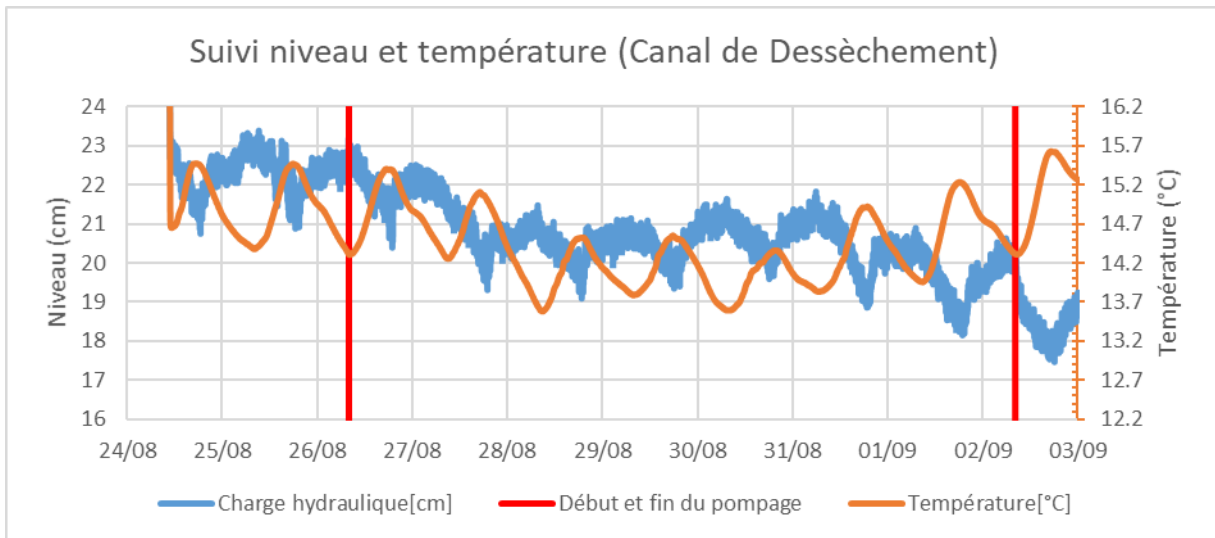


Figure 13 : Suivi des niveaux et de la température sur le canal de dessèchement

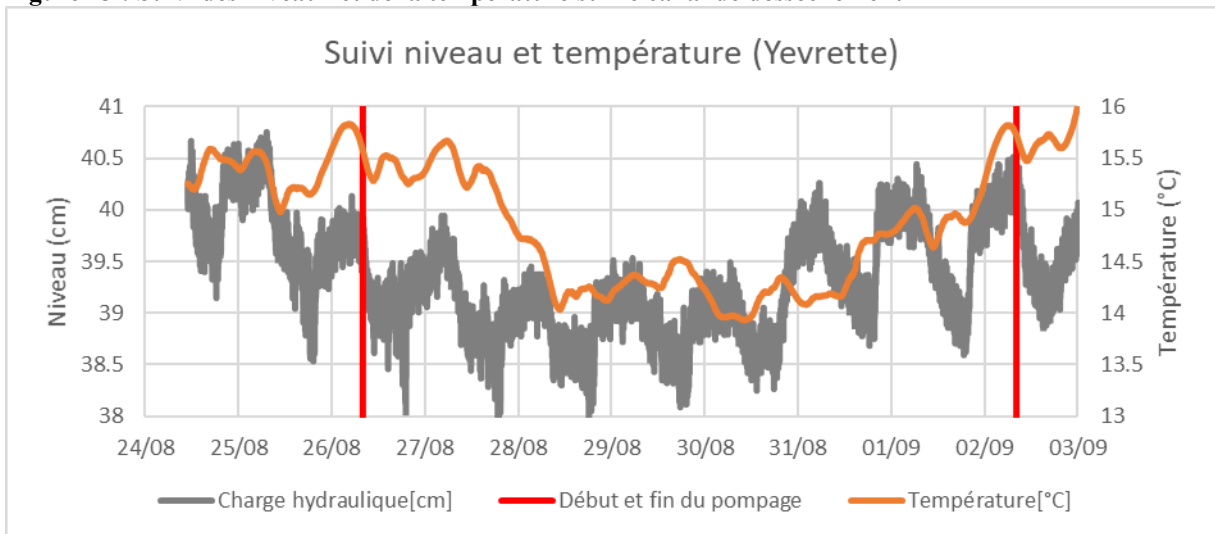


Figure 14 : Suivi des niveaux et température sur l'Yévrette

17 Mai 2022

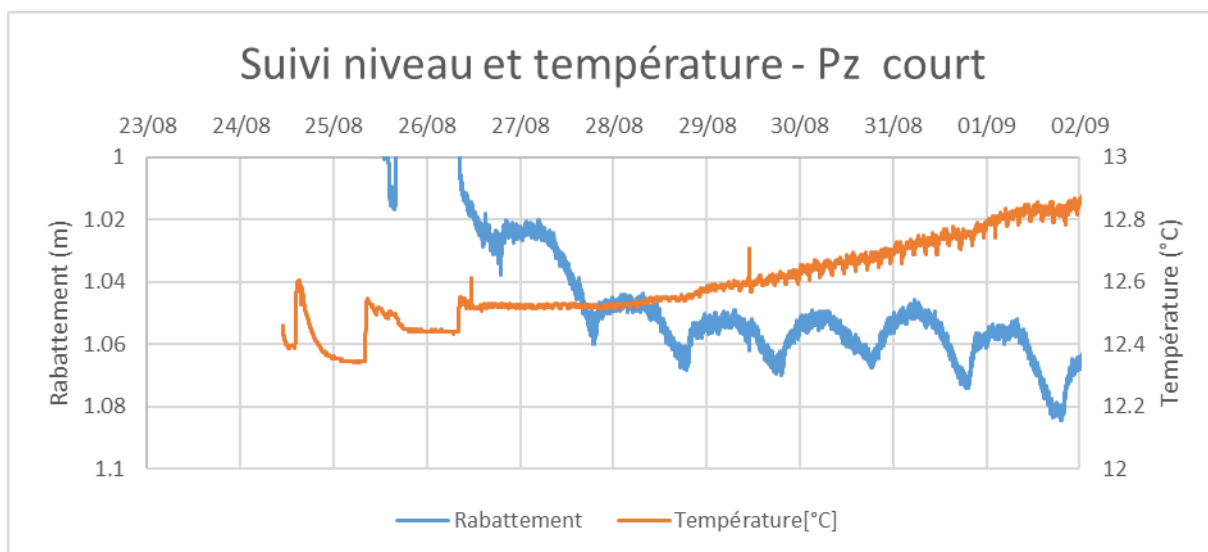


Figure 15 : Suivi niveau et température sur le Pz Court

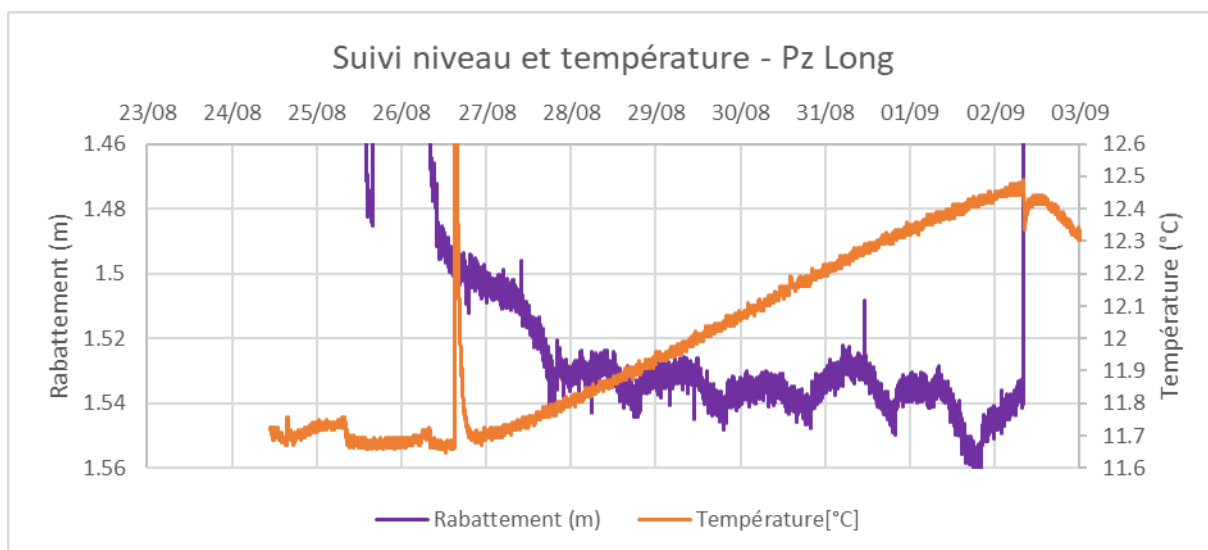


Figure 16 : Suivi niveau et température sur le Pz long

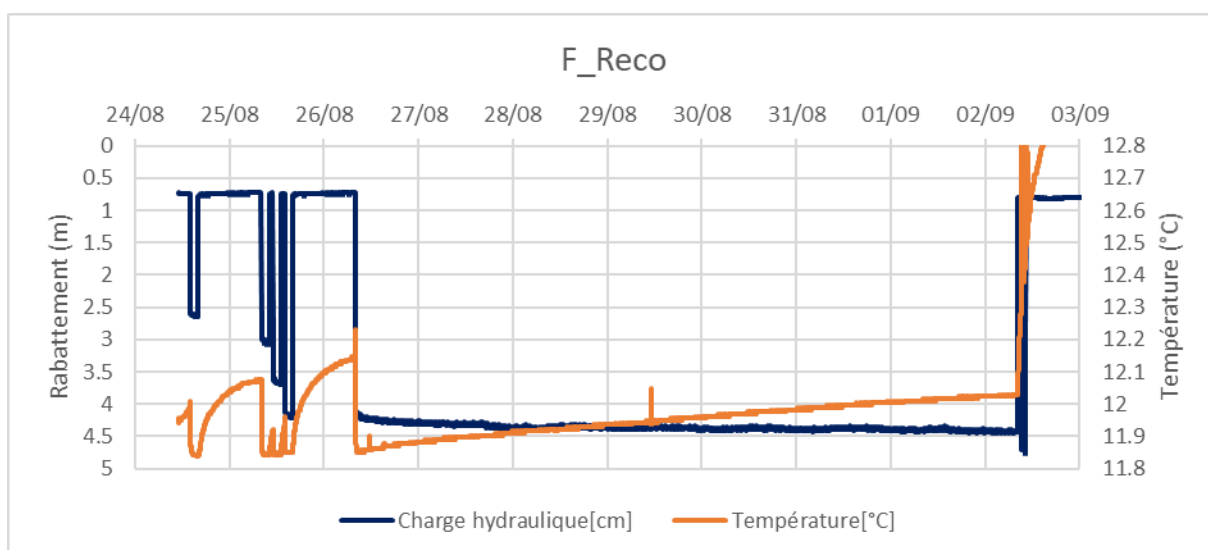


Figure 17 : Suivi niveau et température sur le forage de reconnaissance

Ces figures nous apprennent que

- La température des eaux de surface est influencée par les variations de températures journalières ainsi que d'un jour à l'autre (de 13,7 à 15,7°C au canal et de 14 à 16°C dans l'Yèvre). Les tendances sont identiques mais les fluctuations journalières sont différentes.
- Dans le canal de dessèchement, la température évolue de façon cyclique, sur une période de 24 h, de manière anti-corrélée avec la pression (le niveau monte durant la nuit et baisse dans la journée alors que la température monte entre 8h du matin et 8h du soir). Les alternances jour/nuit sont parfaites et de même amplitude.
- Dans l'Yèvre la situation est plus complexe. Les cycles journaliers sont perturbés.
- Dans les forages, la température de l'eau évolue à la hausse sans fluctuation journalière mais de manière distincte dans chaque ouvrage : de 12,5 à 12,8 (0,3) degrés en Pz_court, de 11,7 à 12,5 (0,8) degrés en Pz_long, de 11,85 à 12 (0,15 °C) en F_Reco. Dans ce dernier, la température décroît dès l'arrêt du pompage, tandis qu'elle continue d'augmenter dans les piézomètres.

Les eaux de surface étaient donc plus chaudes que les eaux souterraines au moment des essais. L'augmentation de la température dans les eaux des Pz court et surtout Pz long tendrait à prouver qu'une circulation s'établit entre le court d'eau et les piézomètres. Elle affecte dans une moindre mesure F_reco qui dispose d'une arrivée d'eau profonde (36-37 m) plus fraîche.

2.2.3 Jaugeages différentiels

Il est possible de calculer le volume (ou le débit) soutiré aux cours d'eau de surface dans des conditions de connexion directe entre les cours d'eau et l'aquifère capté. Le logiciel Conexmin, par exemple, propose ce calcul (Figure 18).

Les distances entre le forage et les stations de mesure des cours d'eau sont les suivantes :
F_Reco – Yèvre : 130 m
F_Reco – Canal : 100 m

Avec les paramètres de l'interprétation du pompage d'essais (formule de Theis), la totalité du débit pompé proviendrait des eaux de surface à ces distances (et même au-delà).

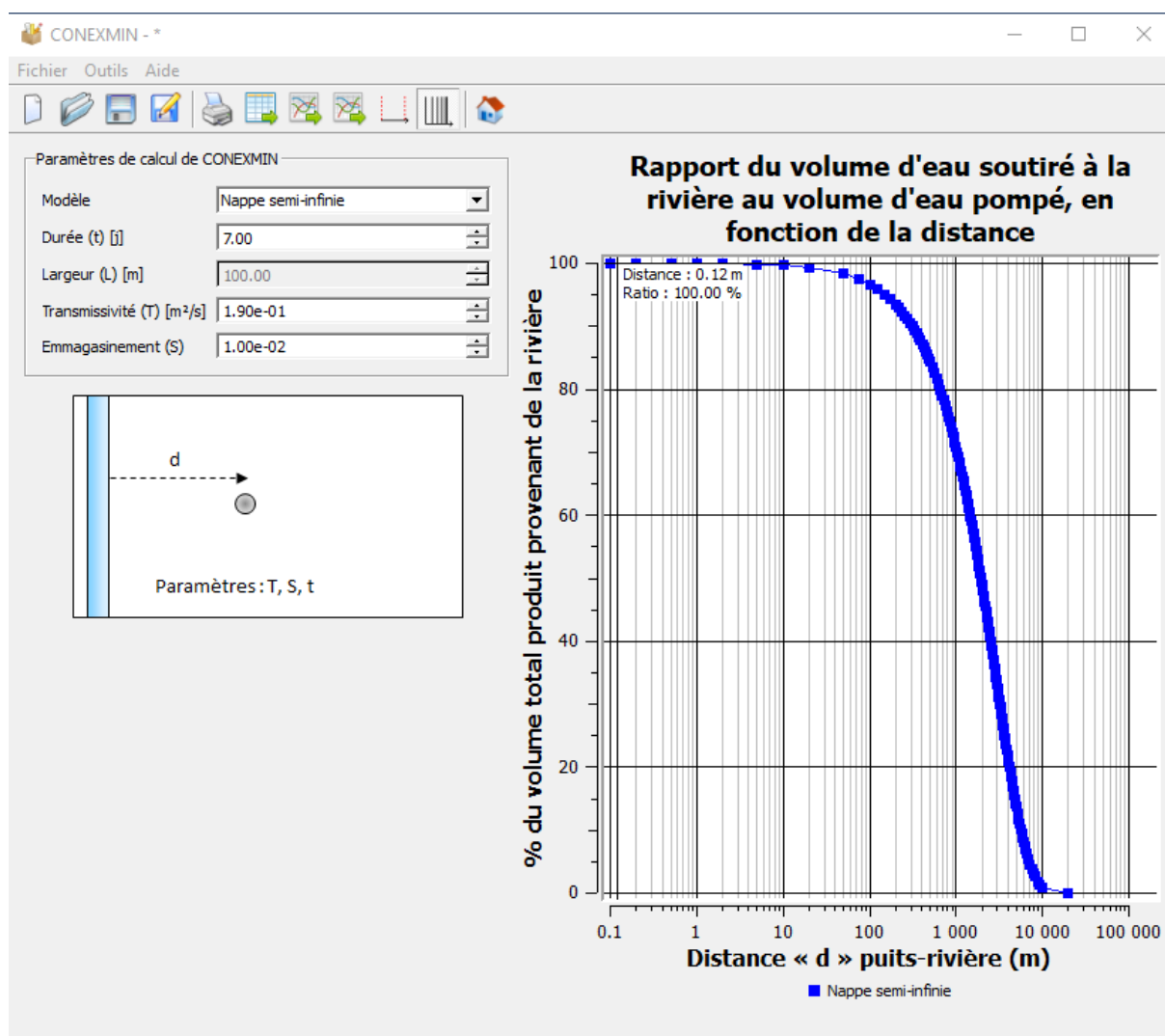


Figure 18 : Ecran de calcul du logiciel Conexmin pour évaluer le volume soutiré à la rivière par le pompage.

Des jaugeages ont été réalisés aux stations amont et aval reportées sur la Figure 19.

Les débits mesurés sont indiqués en m³/h dans le Tableau 1. Le débit de pompage (186 m³/h) représente en comparaison avec celui des eaux de surface, 10% de celui du canal de dessèchement et 50% du débit de l'Yèvre (environ).

	Temps de pompage	Yèvre Amont	Yèvre aval		Canal Amont	Canal aval	unités
24/08/2021	0	396	345.6		1868.4	1886.4	m³/h
26/08/2021	Quelques heures	262.8	306				m³/h
31/08/2021	5 jours	363.6	342		1422	1501.2	m³/h

Tableau 1 : Débits mesurés dans l'Yèvre et le Canal de dessèchement, avant et pendant le pompage.

Dans tous les cas de figure, une connexion directe des cours d'eau avec l'aquifère aurait eu un impact significatif sur le cours d'eau (surtout l'Yèvre). Or il n'en est rien. Les différences amont/aval ne dépassent pas l'incertitude de la mesure (estimée à 10%).

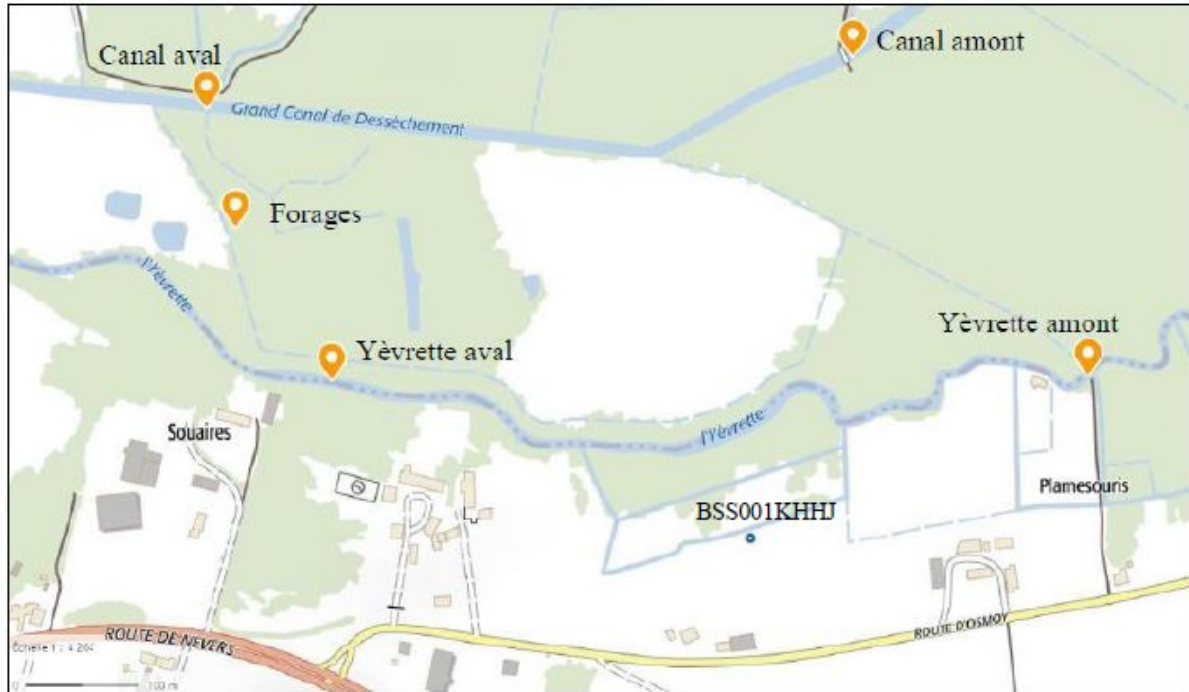


Figure 19 : Localisation des points de mesure (source [10])

On remarquera cependant à partir de la Figure 19, que la station Yèvre **n'est pas en aval** du forage. Il aurait été plus judicieux de situer cette station à l'ouest, où la distance est plus faible et la position bien en aval du captage par rapport aux écoulements des cours d'eau. De fait, l'absence d'impact sur l'Yèvre n'est pas significative d'une absence de relation avec les eaux de surface.

Mme Santini m'a indiqué que cette position résulte d'une contrainte de passage pour le tracteur de l'agriculteur. La conduite de rejet de l'eau pompée ne pouvait pas lui couper la route. Le rejet a dû être réalisé dans l'Yèvre en amont du captage forçant les mesures de débit à être réalisées elles aussi en amont, ce qui enlève beaucoup de sens à l'opération de jaugeage différentiel.

2.3 Suivi des paramètres chimiques

2.3.1 Suivi des nitrates

Des prélèvements ont été réalisés sur le forage de reconnaissance, le piézomètre court, le piézomètre long, la station Yèvre et la station Canal de dessèchement, au moyen de préleveurs automatiques, durant le pompage de longue durée, à la fréquence horaire le premier jour, puis toutes les 2 h, les 2ème et 3ème jour, puis toutes les 3 heures ensuite.

La Figure 20 illustre l'évolution des nitrates au cours du pompage. On y constate que les eaux de surface ont des concentrations nettement supérieures aux eaux souterraines (41 mg/L pour l'Yèvre et 48 mg/L pour le canal de dessèchement). A cette période de l'année où les écoulements de surface correspondent à la vidange des nappes, les cours d'eau portent la marque de territoires traversés plus impactés par les nitrates que la peupleraie.

Concernant les eaux souterraines, les eaux du forage de reconnaissance, dont une partie provient des arrivées d'eau profondes, sont plus chargées en nitrates (35 mg/L) que celles des piézomètres long (30 mg/L) et court (18 mg/L). De plus, dans les eaux souterraines, les teneurs ont une tendance à la baisse (0,7 à 1,1 mg/L/jour) au cours du pompage.

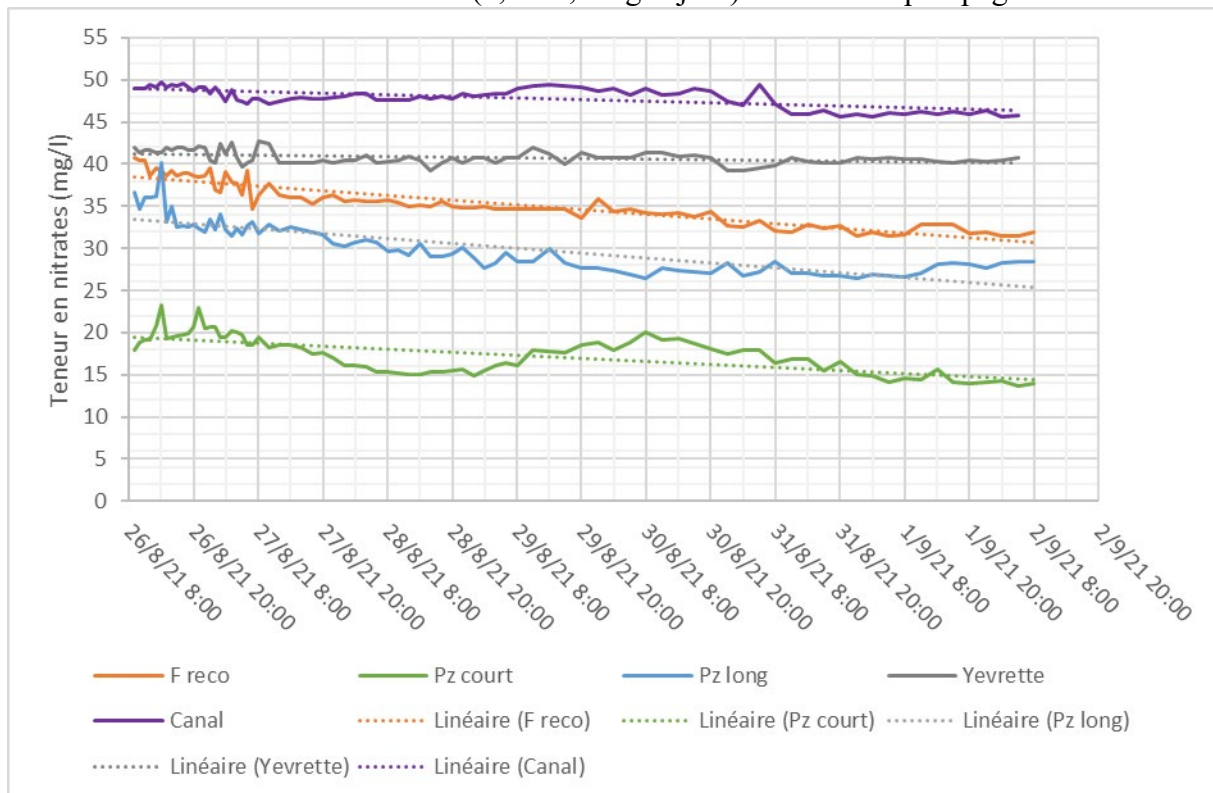


Figure 20 : Suivi des nitrates durant le pompage.

Les eaux souterraines semblent donc se diluer au cours du pompage. Comme l'indique EDREE, « la baisse de la teneur en nitrates observée au cours du pompage de longue durée sur l'eau du forage de reconnaissance peut s'expliquer par la participation de la nappe des alluvions à l'alimentation du forage et donc par un effet de dilution puisque la nappe des alluvions est moins chargée en nitrates que la nappe des calcaires ».

Cette hypothèse est cohérente avec le suivi de la température examiné plus haut.

A partir des 8 mg/L de décroissance observée au cours du pompage au forage F_Reco, EDREE estime une participation de la nappe des alluvions à l'alimentation du forage de reconnaissance à 39 % et une participation de la nappe des calcaires de 61 %. Ces proportions peuvent varier dans le temps.

2.3.2 Suivi de la conductivité

Tous les ouvrages et stations sont dans le même ordre de grandeur de conductivité (620-630 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sauf le piézomètre court. Celui-ci est donc plus minéralisé mais moins riche en nitrate. Il conviendrait de savoir quels sont les éléments responsables de cette conductivité plus élevée. Peut-être est-ce le fer.

La conductivité augmente dans les eaux souterraines au début du pompage pendant la première journée (Figure 21) puis évolue avec un bruit important sans manifester de tendance. Elle évolue peu dans les eaux de surface qui sont de même ordre de grandeur que les eaux de la nappe calcaire. Cet équilibre entre les conductivités des eaux de surface et des eaux de la nappe jurassique est un indice comme quoi la vallée de l'Yèvre est une zone de décharge de l'aquifère jurassique.

On peut s'étonner de ne pas voir la conductivité augmenter dans le forage tout au long du pompage si près de 40% des eaux pompées proviennent du niveau alluvial plus minéralisé. S'il s'agit du fer ou du manganèse, il y a peut-être en jeu des phénomènes de précipitation au passage entre le milieu réducteur des alluvions et celui plus oxydant des circulations karstiques.

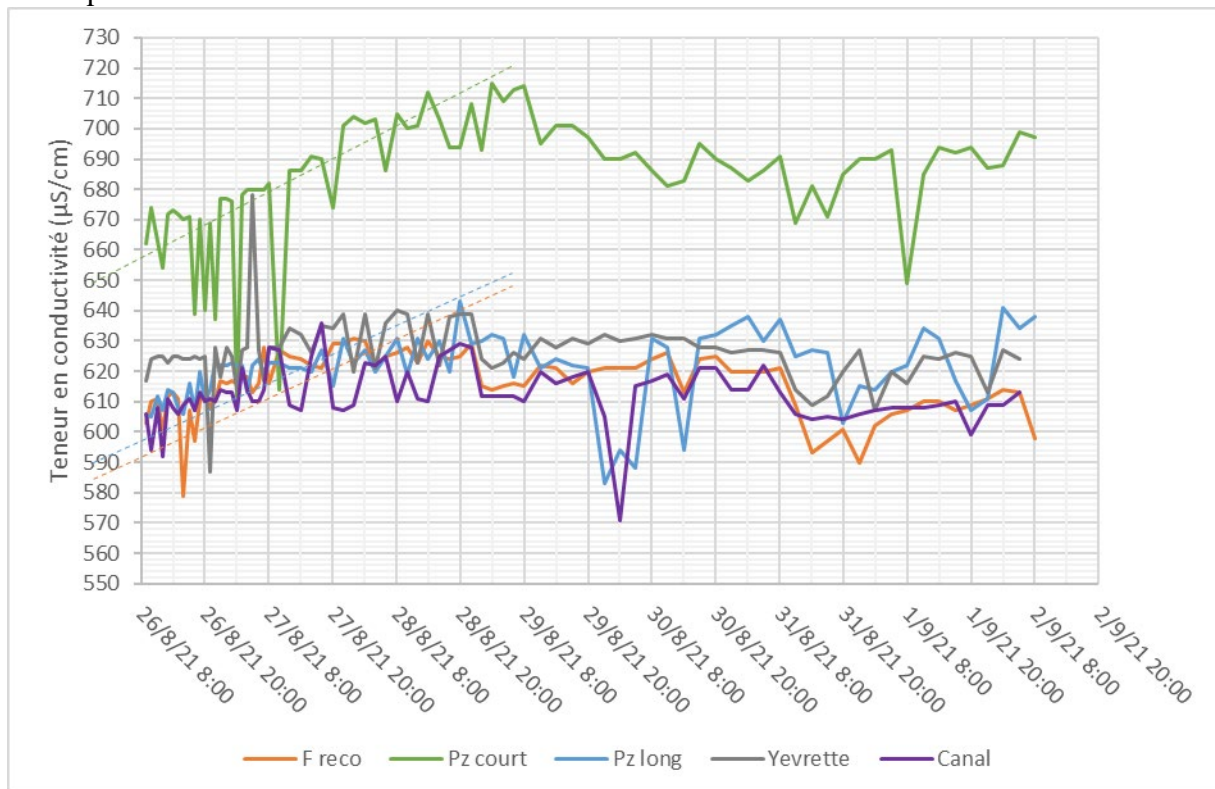


Figure 21 : Evolution de la conductivité pendant le pompage

2.3.3 Analyse des nitrates à différentes profondeurs

Dans le forage de reconnaissance les nitrates ont été mesurés face aux venues d'eau identifiées en micromoulinet : 13-15 m et 36-37 m après l'arrêt du pompage. La teneur de 36 mg/L a été mesurée aux deux endroits ce qui veut probablement dire que le pompage de

d'échantillonnage n'est pas suffisant (en débit et en durée) pour solliciter la contribution des alluvions à l'eau du forage.

2.4 Traçages

2.4.1 Traçage entre l'Yévrette et le forage de reconnaissance en pompage

Six heures après le début du pompage d'essais, 250 g d'uranine ont été injectés dans l'Yévrette pendant 6 heures, soit une concentration de 153 µg/l en moyenne en continu. Cette concentration est suffisante pour être détectée sans ambiguïté en cas de relation directe entre le cours d'eau et le pompage.

Du fait du faible débit de l'Yévrette au moment du traçage, le traceur s'est déplacé lentement dans le cours d'eau, à la vitesse de 45 m/h. L'échantillonnage a été ajusté afin de suivre le traceur et 86% du traceur injecté a été observé au point aval.

Aucune restitution n'a été observée au forage de reconnaissance pendant les 6 jours de suivis. Toutefois, en matière de traçage l'absence de traceur ne peut être considérée comme preuve absolue d'absence de connexion car le traceur peut être retenu dans le milieu. Néanmoins c'est un indice supplémentaire.

2.4.2 Traçage entre le Pz_long et le forage de reconnaissance en pompage

500 g de naphthionate ont été injectés en Pz_long, voisin de 12 m. Le traceur est partiellement ressorti (60% de la masse est récupérée) mais il est probable que ce chiffre soit sous-estimé car le maximum du pic n'a pas été mesuré. De plus, il reste généralement du traceur dans l'ouvrage d'injection malgré les chasses.

En effet, le traceur est passé trop vite par rapport au pas d'échantillonnage. Le pic mesuré est atteint dès la mesure n°2 à 20 minutes, soit une vitesse de transit de 60 cm par minute, significative d'une connexion via un réseau de fissure plutôt qu'à travers un drain karstique.

L'interprétation du traceur avec le logiciel TRAC du BRGM (Figure 22) donne une porosité de 2%.

17 Mai 2022

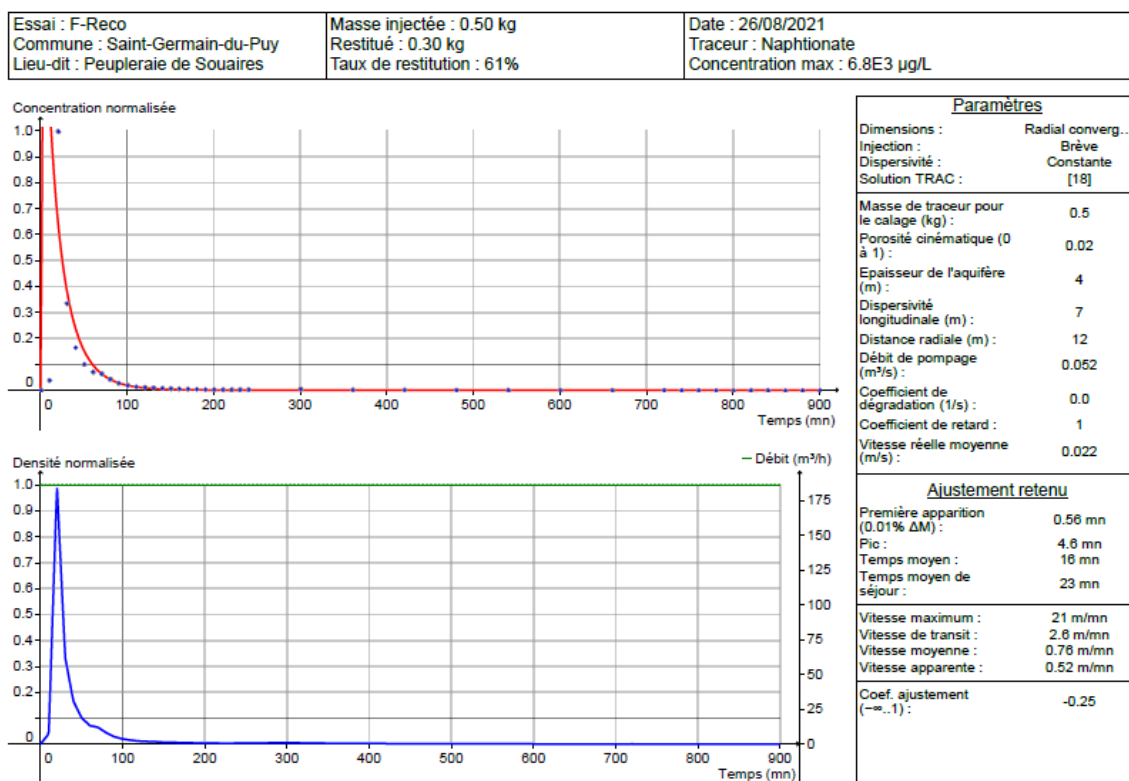


Figure 22 Interprétation du traçage Pz_Long - F_Reco

2.4.3 Traçage entre le Pz_court et le forage de reconnaissance en pompage

Ce traçage n'avait pas été proposé initialement car le choix s'était porté sur un traçage à partir du puits d'un agriculteur, (le forage 519-4X-82), mais ce dernier était en pompage. On ne sait pas d'ailleurs s'il a récupéré une partie du traceur injecté dans la rivière.

En remplacement de ce traçage non réalisé, et au vu de l'intérêt de quantifier la connexion entre les alluvions et la nappe calcaire dont plusieurs indices attestent l'existence, il est proposé de faire un traçage entre le piézomètre court et le forage de reconnaissance.

Connaissant les difficultés de mobilisation d'une unité de pompage, il est envisagé de mettre en œuvre un pompage de faible capacité (10 m³/h). Une simulation montre qu'une injection de 250 g d'uranine dans le piézomètre passerait probablement en moins de 24h.

La Figure 23 correspond à deux jeux de paramètres :

Hypothèse de transfert rapide	Hypothèse de transfert lent
Masse injectée : 250 g	Masse injectée : 250 g
Porosité 2% (interprétée sur pompage d'essai)	Porosité 2% (interprétée sur pompage d'essai)
Débit 10 m3/h	Débit 10 m3/h

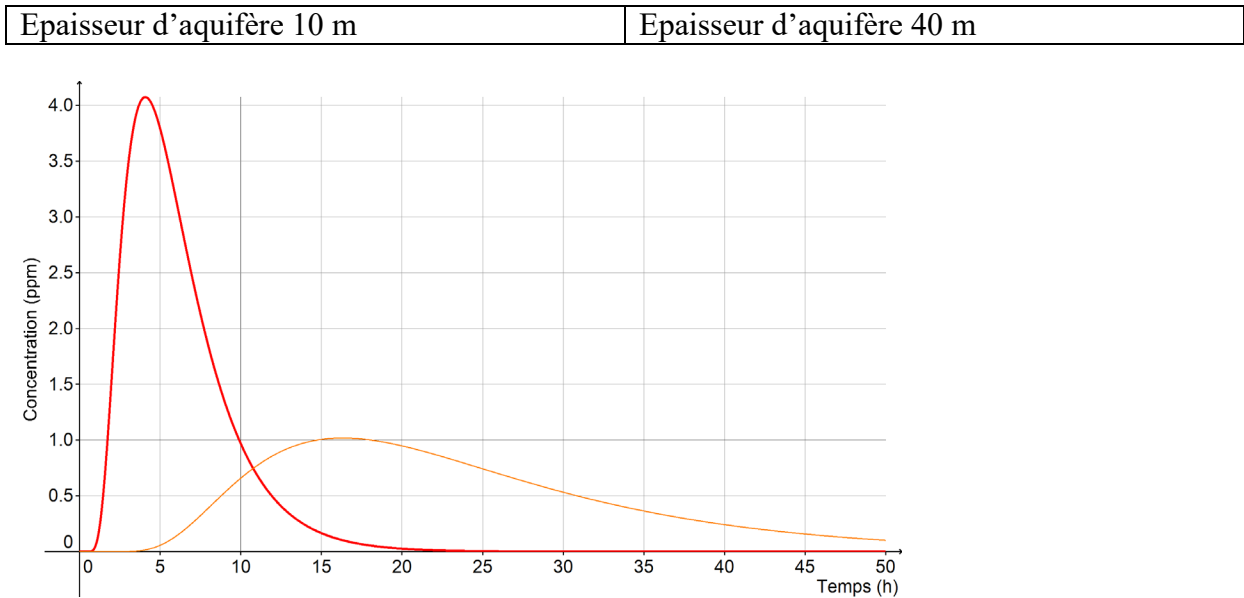


Figure 23 : Simulation d'un traçage au Pz-Court selon deux hypothèses (rapide et lente)

Il semble donc faisable de mettre en œuvre ce traçage avec de petits moyens.

2.5 Campagne géophysique

La société Infraneo des environs de Lyon a réalisé pour le compte de Bourges Plus une campagne géophysique. Contrairement à la précédente, cette campagne par tomographies électriques a été réalisée parallèle à l'axe de la vallée pour recouper les accidents tectoniques de direction Nord-Sud éventuels. En effet, les linéaments (indices de failles potentielles) repérables sur les images satellites sont fréquemment orientés soit dans l'axe de la vallée, soit perpendiculairement (Figure 24).

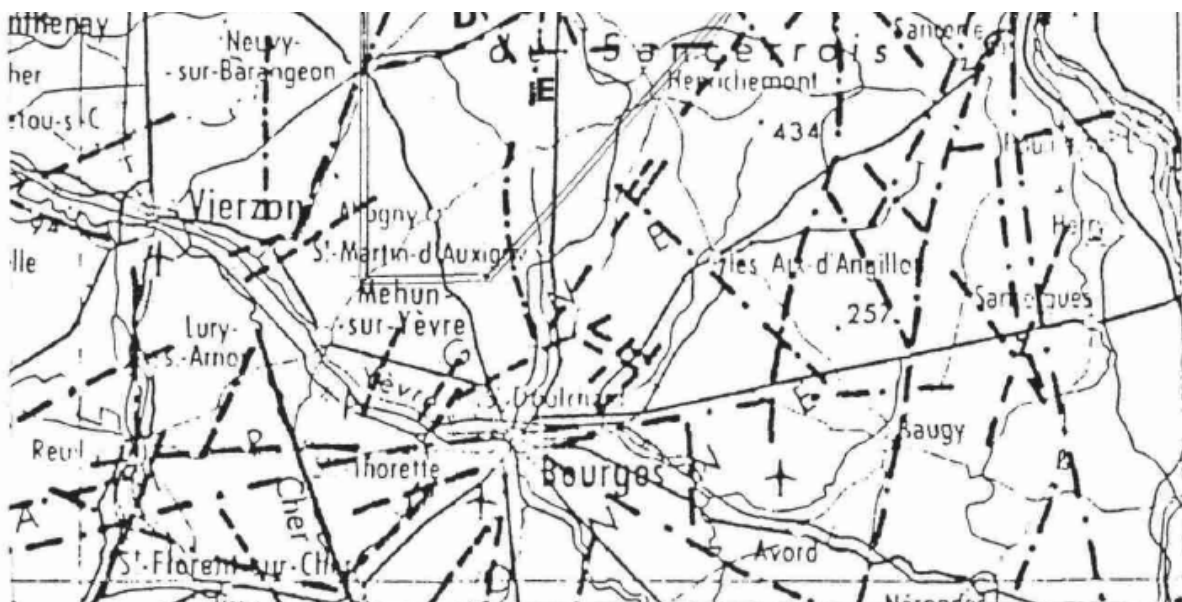


Figure 24 : Linéaments dans la région de Bourges (Source : Maget et Gabouj¹, 1987)

La campagne s'est déroulée du 5 au 9 juillet 2021. L'espacement des électrodes de 5 m permet une bonne résolution. Le dispositif a une profondeur théorique d'investigation de 60 m. La coupe géologique des forages (F-Reco et Pz-Long) a été utilisé pour calibrer le modèle géoélectrique.

D'après l'interprétation qui en résulte, un niveau altéré plus profond, potentiellement associé à des arrivées d'eau, se rencontrerait en dessous de la profondeur actuelle des forages (Figure 25). Ils seraient donc intéressants de poursuivre le futur forage d'exploitation sur environ 20 m (soit une profondeur totale de 60 m).

Les interprétations sur l'ensemble des profils font ressortir un couloir de direction Nord-Sud qui suggère des zones plus fracturées et altérées (zone bleue entourée sur la Figure 26).

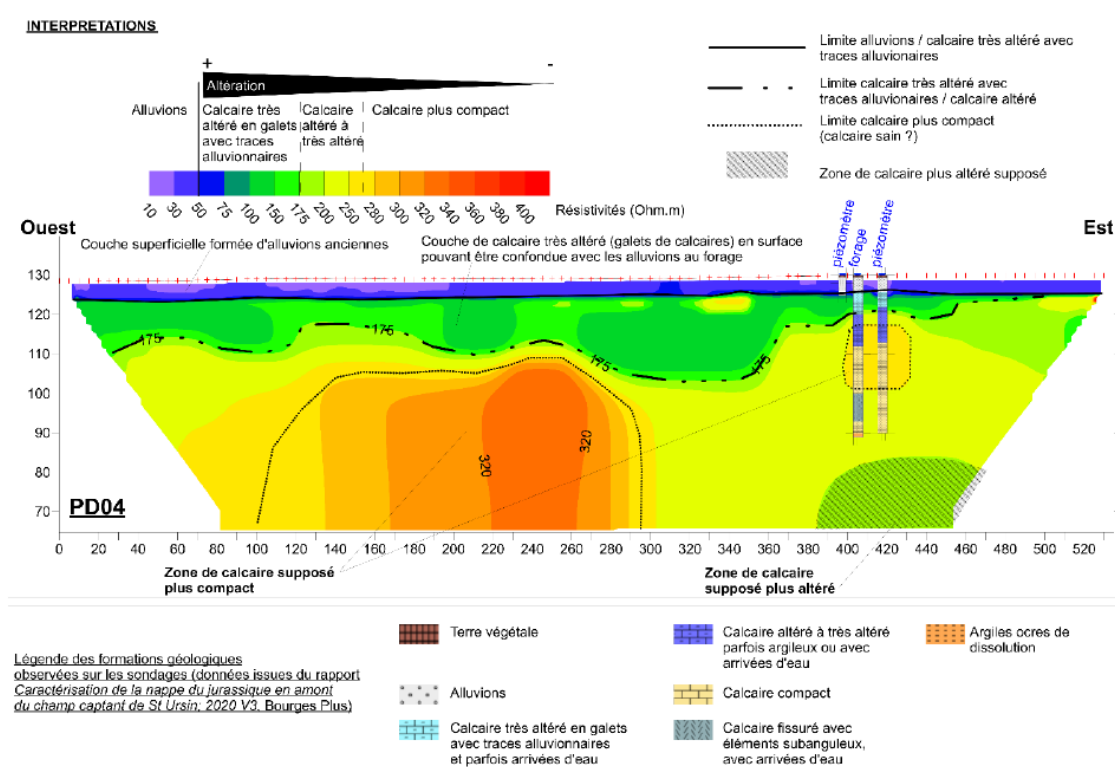


Figure 25 : Corrélation des données de forage et des données de résistivités (Source [12])

¹ Maget P. et Gabouj R., 1987 : Possibilités d'exploitation des ressources en eau souterraine dans le périmètre de l'A.S.A. de la Sologne du Cher. Rapport BRGM 87-SGN-598-CEN

17 Mai 2022

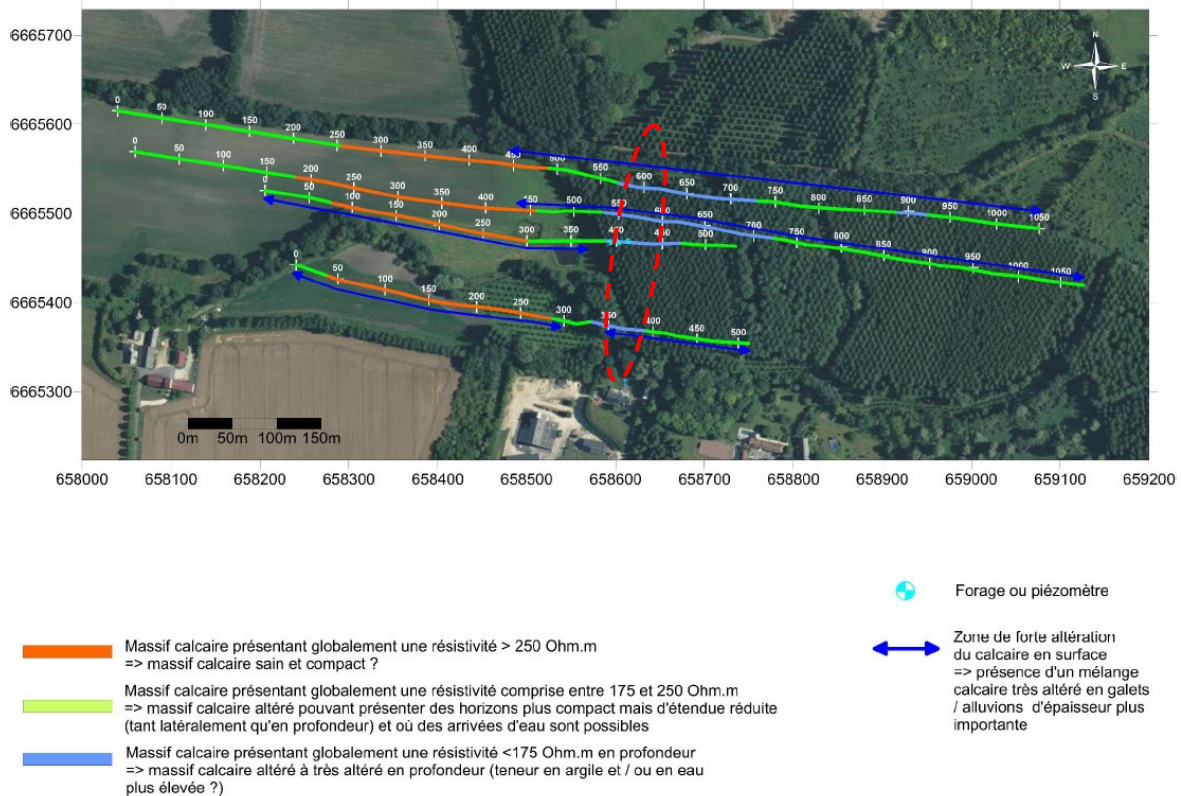


Figure 26 : Profils et ensembles géo-électriques interprétés (Source [12])

3 Interprétation

L'analyse des données nous montre que :

- L'essai de pompage, perturbé par des fluctuations cycliques ne permet pas de démontrer la relation avec le cours d'eau. Aucune « limite alimentée » n'est identifiée. En revanche, l'essai confirme la connexion avec la partie de la nappe contenue dans les alluvions (impact du pompage sur Pz_Court).
- Considérant les paramètres de l'aquifère et la position du captage à environ 100 m de deux cours d'eau, le pompage aurait dû impacter significativement les cours d'eau puisqu'il représente 50% du débit de l'Yèvre et 10% de celui du canal. Or il n'en est rien. Cependant, la position des jaugeages laisse planer le doute sur l'absence d'impact sur le débit de l'Yèvre.
- Le traçage en rivière pendant une durée de 6h aurait pu être détecté en cas de connexion directe. Il ne l'a pas été.

Ces trois constatations plaident pour une interaction nulle ou limitée entre le cours d'eau et la nappe. Cependant, d'autres indicateurs nous montrent l'existence de cette connexion :

- Les fluctuations de niveau dans le cours d'eau sont transmises dans les piézomètres (sans déphasage) et dans le forage de reconnaissance (avec déphasage). Lors du premier essai, la crue des cours d'eau s'était également sentie sur les forages.
- La température évolue durant le pompage dans le sens d'une alimentation de l'aquifère par la rivière (en particulier pour Pz long).

- Les nitrates évoluent également dans le sens d'une dilution. Celle-ci est interprétée comme étant une alimentation par drainance depuis la partie de la nappe contenue dans les alluvions vers celle contenue dans les calcaires.

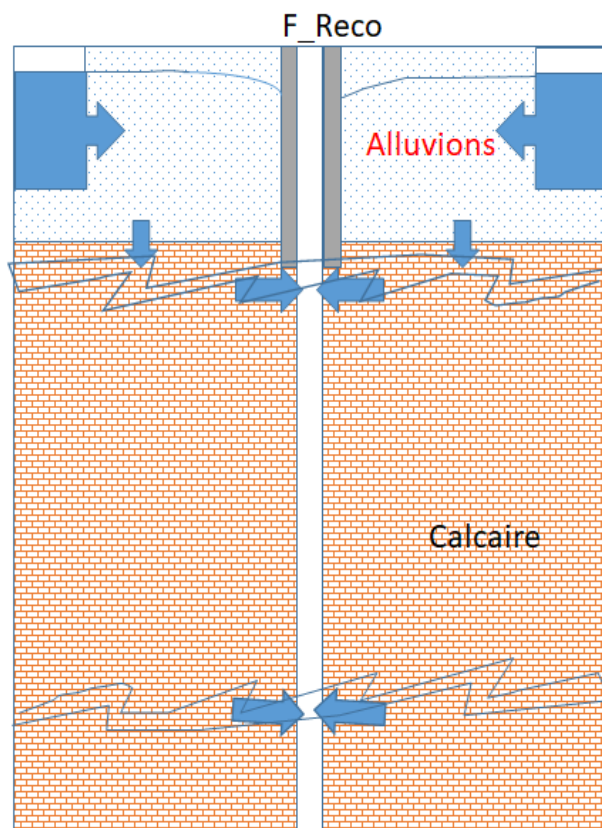
En complément des travaux réalisés, il faudra caractériser la qualité chimique des eaux des différents pôles identifiés (eau de surface, alluvions, calcaires), et ce, à plusieurs périodes de l'année si possible.

En pratique, il s'agira de réaliser avec une pompe de surface ou immergée une purge égale à au moins trois fois le volume du forage avant de prélever l'échantillon. Les paramètres à considérer pour la comparaison sont les suivants :

- Température, conductivité, pH et Eh à mesurer in situ
- Cations et Anions majeurs (H_2CO_3 , SO_4 , Cl , Ca , Mg , Na , K)
- NO_3 , NO_2 , NH_4
- Fe , Mn ,
- Atrazine déséthyl (DEA), métolachlore ESA, métolachlore OA
- Perchlorates

Pour remplacer le traçage qui n'a pas pu être fait on devra envisager un traçage entre le Pz-Court et le forage d'exploitation pour estimer les connexions entre les alluvions et le captage.

Une simulation (§2.4.3) a montré que le traceur passerait théoriquement en moins de 24 h à 48h (selon les hypothèses).



Le schéma conceptuel du pompage est donc le suivant (Figure 27) : les cours d'eau sont en relation avec la nappe des alluvions qui est indirectement sollicitée par les pompages.

Une modification du niveau du cours d'eau entraîne une onde de pression dans les différents compartiments aquifères qui est perçue très rapidement (transfert de pression). En revanche, une pollution qui proviendrait du cours d'eau mettra plus de temps, car elle devra traverser le filtre des alluvions et des calcaires fissurés (transport).

Figure 27 : Schéma conceptuel du fonctionnement du pompage au forage de reconnaissance.

Pour l'instant, cette connexion joue un rôle positif sur la teneur en nitrates de la nappe captée (dilution). Il est plus difficile de savoir ce qu'il en sera sur le long terme. Avec d'avantage d'eau de surface provenant des cours d'eau dans la nappe des alluvions, les conditions d'oxydo-réduction de cette nappe peuvent évoluer et son apport bénéfique s'estomper dans le temps. De même, en fonction de la gestion de la peupleraie, les teneurs en nitrates peuvent varier (en augmentant lors des coupes).

Néanmoins, vis-à-vis de la protection du captage par rapport aux pollutions accidentelles, les travaux réalisés montrent que les échanges avec les cours d'eau sont limités et différés dans le temps. Ils confirment la faisabilité de la protection du captage dans une configuration identique à l'actuelle (tubage étanche jusqu'à 11 m).

4 Conclusion

Les travaux réalisés apportent des éclairages sur les questions posées en introduction :

Considérant une coupe technique de forage similaire à celle du forage de reconnaissance (la coupe de forage ne masquerait pas la totalité des venues superficielles pour bénéficier de la capacité maximale du forage) :

- quelle serait la contribution des eaux de surface au pompage ?

Elle a été estimée à près de 40% après transit à travers les alluvions lors du pompage d'essai.

Y a-t-il un impact significatif sur le débit des cours d'eau ?

Aucun impact significatif n'a pu être mis en évidence, un impact est peu probable mais les mesures demeurent insuffisantes pour le confirmer avec certitude.

- le risque de contamination par les eaux de surface est-il important ?

Aucune connexion directe entre les cours d'eau et les eaux captées n'a été identifiée. La connexion existe cependant mais le cheminement de l'eau est diffus. Le risque est à considérer au regard des sources de pollution potentielles.

- Quelles sont en amont les sites de pollution potentielles ?

Elles restent à déterminer. Une zone d'étude a été proposée pour circonscrire les investigations à mener.

- Les mesures de protection sont-elles envisageables ?

Les travaux réalisés confirment la faisabilité de la protection du captage.

Il y a aujourd'hui deux hypothèses de coupe technique du forage d'exploitation :

- Un captage dans les conditions actuelles d'équipement du forage (alluvions masquées mais toutes les venues d'eau des calcaires sont captées). Le débit est maximisé (probablement supérieur à 200 m³/h). L'eau des alluvions, moins chargée en nitrates,

est sollicitée à travers la partie supérieure du calcaire, fracturée. La vitesse de transfert entre les alluvions et le calcaire pourra être précisée par le traçage demandé. Ce dernier confirmera alors le rôle bénéfique du réservoir alluvial sur l'aquifère calcaire (dilution des nitrates)

- Néanmoins il est également possible de ne capter que la venue d'eau profonde. On se priverait alors d'environ 40% du débit mais le captage serait mieux protégé vis-à-vis d'une contamination par la surface (dans le cas d'une pollution sur un cours d'eau par exemple). L'inventaire des sources de pollution potentielles devrait apporter un éclairage sur les risques de pollution.

Dans les deux cas, les résultats de la géophysique incitent à forer plus profond.

Avant de prendre une décision sur la coupe technique, je recommande de réaliser le ou les autres forages de reconnaissance. Si leur débit ou la qualité de l'eau apparaissait insuffisants, il serait alors possible d'opter pour la coupe technique n°1.

Références bibliographiques

- [1] Gutierrez A. (2019a). Périmètres de protection des captages de Saint-Ursin à Bourges (18). Avis préliminaire. 20 Mai 2019.
- [2] Gutierrez A. (2019b). Périmètres de protection des captages de Saint-Ursin. Avis sur les travaux complémentaires à réaliser. 16 Octobre 2019.
- [3] Géohydro investigations (2019) Etude Géophysique. Commune de Saint Germain du Puy Campagne de mesures du 16 au 19 décembre 2019. N° R/20/435/A575
- [4] Phréatec (2020), Travaux de forages à Bourges - Lot 1 : Site de la Peupleraie à Saint Germain du Puy. Rapport de forage. Projet n°2020019ARK.
- [5] Inovalys. Rapport d'essais 20HYD.5218.1 du 23/10/2020 (Analyses).
- [6] Soleo (2020). Diagraphies, rapport de mesures, intervention du 23/10/2020 (micromoulinet et Gamma Ray)
- [7] Soleo (2020). Diagraphies, rapport de mesures, interventions du 07/10/2020 (Résistivités)
- [8] Santini M. [BOURGES PLUS), 2020. Caractérisation de la nappe du jurassique en amont du champ captant de Saint-Ursin. Site de La Peupleraie. Avril 2021 – Version 3
- [9] Gutierrez A. (2021). Faisabilité des périmètres de protection du captage de Bourges à la Peupleraie de Souaire. 7 avril 2021.
- [10] EDREE, 2021. Métrologie et études au site de la peupleraie de Souaire, à Saint-Germain-du-Puy (18)
- [11] MASSÉ, 2021. Site de la Peupleraie – Pompages d'essai à Bourges (18) Rapport fin de travaux – version du 3 septembre 2021
- [12] INFRANEO, 2021. Site de la Peupleraie de Souaire à Saint Germain du Puy. Campagne géophysique. Caractérisation de fractures par tomographie électrique. GSE-21-01136 v2.

ANNEXE : Réponses du SIVY (Syndicat intercommunal de la vallée de l'Yèvre) concernant les fluctuations cycliques observées dans les eaux de surface.

Courrier du 2 mars adressé à Mme Santini.

Les fluctuations quotidiennes des hauteurs/débits sur le bassin de l'Yèvre, principalement en aval de Bourges, mais que l'on perçoit également sur d'autres secteurs, nous interpellent depuis de nombreuses années.

À ce stade, nous n'en sommes toujours resté qu'à des hypothèses et n'avons jamais identifié précisément la cause du phénomène. Nous avons bien entendu eu des pistes, le rythme biologique d'un milieu, ou les pompages mais les périodes ne correspondent effectivement pas toujours (en tout cas pour ce qui concerne un pompage agricole), nous avons interrogé Monsieur ROY lors de la sécheresse de 2019 puisque nous considérons que les débits des cours d'eau étaient alors susceptible d'être influencés par l'apport d'une station d'épuration comme celle de Bourges en amont proche de la station du Moulin Bâtard, mais cette hypothèse avait rapidement été invalidée.

Egalement, nous avons recherché du côté des ouvrages hydrauliques mobiles, puisqu'un ouvrage clapet/basculant (comme sur le val d'Auron) peut fonctionner par « à-coup » dans le cas du dysfonctionnement d'un vérin : la retenue se remplit progressivement et le clapet descend brutalement de quelques centimètres créant une augmentation importante et rythmée des débits en aval... nous avons déjà rencontré ce phénomène sur l'Yèvre au clapet de la Laiterie à Mehun-sur-Yèvre, mais pas en amont, à Bourges où le service rivière avait été interrogé sur ce point, et il n'y a pas, à notre connaissance, d'ouvrages automatisés récemment plus en amont, notamment en amont de la diffluence Yèvrette-Yèvre à Osmoy-Moulins-sur-Yèvre dont l'ouvrage est fixe (barrage des trois bondons).

Nous avons constaté un phénomène de fluctuations des niveaux de l'Ouatier en aval de l'usine Triballat au cours d'un chantier en 2020, au cours d'une même journée, entreprise qui dispose de pompes sur ce bassin pour son activité, mais aucune mesures / analyses spécifiques n'avaient été réalisées pour relier nos observations terrains à une activité anthropique, l'Ouatier se jette dans l'Yèvre après la diffluence avec l'Yèvrette, et les distances sont trop importantes, les fluctuations seraient enfin visibles sur la station de Maubranche. Nous nous étions également posé la question de l'impact des pompes de la base aérienne d'Avord sur le débit des cours d'eau (influence nappe-rivière) puisque les prélèvements sont assez conséquents, les distances sont là aussi conséquentes...

Enfin, Monsieur SENNEQUIER, riverain proche de l'Yèvrette et du site de la Peupleraie, nous évoque depuis plusieurs années, l'impact non négligeable, selon lui, sur les débits de l'Yèvrette, d'1 ou 2 pompage(s) agricole(s) situé(s) un peu plus en amont et proche(s) du cours d'eau. Nous avons tenté de prendre contact avec des riverains en 2020 pour faire des mesures amont / aval du cours d'eau au moment des pompes, sans succès, et il s'agissait là encore de pompage(s) agricole(s).

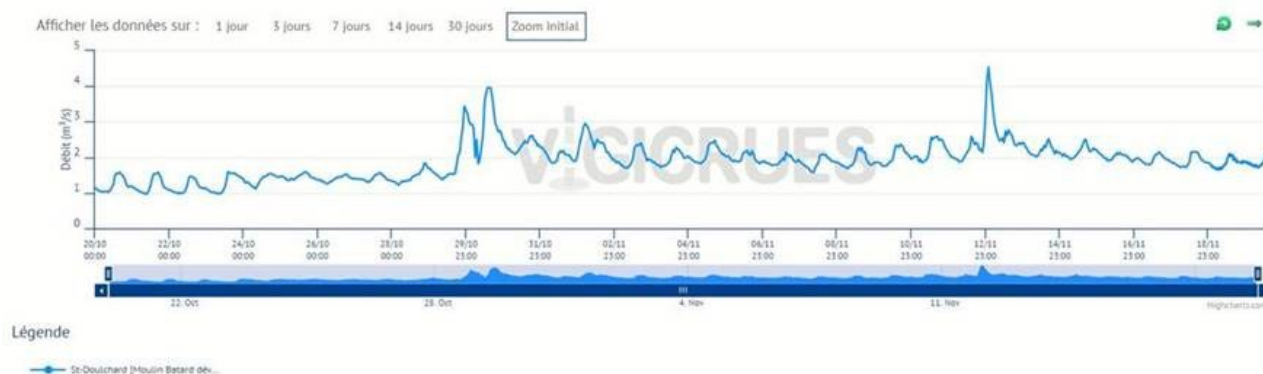
Pour conclure, nous ne sommes pas surpris de ces fluctuations que nous observons depuis plusieurs années, mais n'avons à ce jour jamais développé précisément nos recherches pour en connaître la/les origines.

Faisabilité des périmètres de protection du captage de l'agglomération de Bourges à la Peupleraie de Souaire

17 Mai 2022



St-Doulchard [Moulin Batard déviation] (Yèvre) - Débit - 20/11/2018 16:31



St-Doulchard [Moulin Batard déviation] (Yèvre) - Débits - 02/03/2022 10:46



Cordialement.

Jérémy JOLIVET

Responsable de la collectivité, chargé de projets
SIVY