



REPUBLIQUE
ET CANTON
DE GENEVE

POST TENEBRAS LUX

DD/331180/1

Lot en date du 23.02.2024

Office Cantonal de l'Eau

Rue David-Dufour 5 - Case postale 206
1211 Genève 8

Dynamique d'échange entre l'Aire et les eaux souterraines et étude de faisabilité pour la recharge artificielle de la nappe superficielle de l'Aire



L'Aire à proximité de la frontière, en mai 2023

Rapport d'évaluation

Juin 2023

Dossiers 1951A et 1991A



Table des matières

1.	Introduction	1
1.1	Contexte de l'étude.....	1
1.2	Objectifs de l'étude	2
1.3	Prestations réalisées	2
2	Contexte hydrologique et hydrogéologique local	3
2.1	L'Aire.....	3
2.2	La nappe de l'Aire	3
2.3	Dynamique d'échange entre l'Aire et les nappes d'eau souterraine	5
2.3.1	Campagnes de jaugeages de l'OCEau.....	5
2.3.2	Campagnes d'observations des débits – HGENv.....	6
2.3.3	Interactions rivière – nappes.....	8
2.3.4	Synthèse.....	10
2.3.5	Perspectives	10
2.4	Apports vers l'Aire	10
2.4.1	STEP de Neydens	10
2.4.2	Ruisseau des Velues	11
2.4.3	Collecteurs secteurs Paguette-Frontière	11
2.5	Prélèvements d'eau de l'Aire	12
3	Investigations de terrain	13
3.1	Réalisation d'un puits d'infiltration et de piézomètres de suivi	13
3.2	Test d'infiltration avec essai de coloration.....	14
3.2.1	Modalités de mise en œuvre des tests	14
3.2.2	Aspects hydrauliques.....	16
3.2.3	Restitution des colorants	17
3.2.4	Calcul du taux de restitution	19
3.2.5	Evaluation de la vitesse de l'eau souterraine.....	19
3.2.6	Utilisation du logiciel TRAC du BRGM.....	20
3.2.7	Suivi des paramètres physico-chimiques de la nappe.....	20
3.3	Suivi du niveau et de la température la nappe de l'Aire	22
3.3.1	Variations du niveau de la nappe de l'Aire.....	22
3.3.2	Variations de la température de la nappe de l'Aire	22
3.4	Campagnes piézométriques synchrones	24
4	Modélisation hydrodynamique	27
4.1	Construction du modèle géologique	27
4.2	Calibration du modèle.....	29
4.2.1	Calibration en régime permanent.....	30
4.2.2	Calibration du modèle en régime transitoire	31
4.3	Simulation de l'infiltration artificielle de l'eau de l'Aire dans la nappe	32
4.4	Simulation de l'exploitation thermique de la nappe	34
4.4.1	Scénario d'exploitation simulé	34
4.4.2	Hypothèses retenues pour les simulations thermiques.....	34
4.4.3	Localisation des puits d'exploitation dans le modèle	35
4.4.4	Résultats hydrauliques et thermiques.....	35
4.5	Critique du modèle et propositions d'amélioration	37
5	Synthèse	38
6	Perspectives.....	40



Liste des figures

Figure 1 : Variations piézométriques de la nappe de l'Aire	4
Figure 2 : Observations du 17 mai 2022 sur l'Aire	6
Figure 3 : Carte des observations quantitatives sur l'Aire et les échanges rivière-nappes	7
Figure 4 : Coupe hydrogéologique du pont de Thairy au pont de Lully	9
Figure 5 : Vue des effluents de la STEP de Neydens	10
Figure 6 : Evolution du débit de l'Aire au limnimètre du pont de Thairy du 15 au 21 juin 2022	11
Figure 7 : Vue des collecteurs d'eau mélangée à la frontière	11
Figure 8 : vue de la station de pompage et de la passe à poissons	12
Figure 9 : vue de la retenue collinaire d'Ogny, alimentant le réseau d'irrigation agricole de la plaine de l'Aire	12
Figure 10 : Photographies du chantier de réalisation du puits d'infiltration	13
Figure 11 : Carte de localisation des ouvrages réalisés en 2021 pour le test d'infiltration	14
Figure 12 : Dispositif de prélèvement d'eau de l'Aire, à la frontière F-CH, pour la réalisation du test d'infiltration	16
Figure 13 : Photographie de l'injection de fluorescéine dans le puits d'infiltration	16
Figure 14 : Variations du niveau de la nappe de l'Aire au cours du test d'infiltration	17
Figure 15 : Evolution de la concentration en fluorescéine dans les piézomètres de surveillance	17
Figure 16 : Evolution de la concentration en sulforhodamine B dans le piézomètre P2	18
Figure 17 : Photographie de l'arrivée du colorant (fluorescéine) dans le puits P1 le 23.02.2022	19
Figure 18 : Courbe de restitution de la Fluorescéine dans le piézomètre P1 - logiciel TRAC	20
Figure 19 : Graphiques des mesures des paramètres physico-chimiques de la nappe	21
Figure 20 : Evolution du niveau de l'Aire entre fin décembre 2021 et novembre 2022	23
Figure 21 : Evolution de la température de l'Aire entre fin décembre 2021 et novembre 2022	23
Figure 22 : Carte piézométrique de la nappe de l'Aire	25
Figure 23 : Périmètre de modélisation et conditions limites	28
Figure 24 : Distribution des conductivités hydrauliques sur le périmètre d'étude	29
Figure 25 : Répartition des charges hydrauliques simulées et observées – hautes eaux 2022	30
Figure 26 : Répartition des charges hydrauliques simulées et observées – basses eaux 2021	30
Figure 27 : Evolution des charges hydrauliques simulées au cours du test d'infiltration	31
Figure 28 : Evolution des concentrations en fluorescéine au cours du test de traçage	31
Figure 29 : Localisation des sites d'infiltration pour les scénarios de simulation	32
Figure 30 : Evolution de la charge hydraulique le long de l'Aire lors de la recharge artificielle	32
Figure 31 : Localisation des puits de l'installation géothermique simulée	35
Figure 32 : Secteurs influencés par l'installation géothermique simulée	36
Figure 33 : Bulle thermique après 30 ans de fonctionnement de la PAC	36

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résultats des jaugeages de l'OCEau sur l'Aire	5
Tableau 2 : Observations quantitatives sur l'Aire entre mai et octobre 2022	6
Tableau 3 : Mesures piézométriques réalisées en 2022 sur la nappe de l'Aire	24
Tableau 4 : Répartition mensuelle des besoins de la PAC pour intégration dans le modèle	34
Tableau 5 : Propriétés physiques utilisées dans le modèle	35

Liste des annexes

Annexe 1 : Carte de situation hydrologique et hydrogéologique	42
Annexe 2 : Logs géologiques et techniques des piézomètres P1 et P2	44
Annexe 3 : Suivi de la qualité de la nappe de l'Aire au cours du test d'infiltration	45
Annexe 4 : Résultats des calculs TRAC	46
Annexe 5 : Présentation détaillée des travaux de modélisation et de simulations numériques	47



1. Introduction

1.1 Contexte de l'étude

Hydro-Géo Environnement est impliqué depuis de nombreuses années sur différentes études concernant l'Aire et sa nappe d'accompagnement dans le secteur de Lully, Certoux et Thérrens :

- Mandat 1536 A et B (GESDEC / OCEau) – Evaluation de l'impact des pompages dans le puits de l'entreprise Jaquenoud à Lully sur la nappe de l'Aire et le débit de l'Aire, suivi hydrogéologique de 2019 à 2022 ;
- Mandat 2048 (GESDEC) - Puits de pompage de l'entreprise Magnin à Lully – état des lieux, impact sur la nappe de l'Aire et rapport pour la demande d'autorisation d'exploiter ;
- Mandat 1824 (OCEau) : Renaturation de l'Aire, 4ème étape. Prestations de Suivi Environnemental de Réalisation (SER) ;
- Mandat 1885 (OCEau) : Renaturation de l'Aire, 4ème étape. Suivi hydrogéologique de la nappe superficielle de l'Aire, avant, pendant et après travaux ;
- Mandat 1319 – phases A, B et C (SIG) : Evaluation du potentiel hydrogéologique de la nappe de l'Aire pour une valorisation thermique. Ce mandat comprend la réalisation d'un puits de pompage de grand diamètre (10'') et de tests hydrogéologiques associés ainsi que la réalisation d'une modélisation hydrodynamique et thermique de la nappe de l'Aire ;
- Mandat 1951 B (OCEau) : Suivi de la qualité de l'Aire pendant 1 année. Ce mandat inclut l'installation de deux stations de mesures avec sondes multi-paramètres, proche de la frontière française à l'amont (stade de la Paguette) et au droit du pont de l'autoroute (station limnimétrique des Bossenailles de l'OCEau) à l'aval, la maintenance mensuelle des stations et la rédaction de notes de synthèse trimestrielles ;
- Mandat 2188 (GESDEC) : Etat des lieux qualitatif de la nappe de l'Aire et synchrone aux prélèvements d'eau de l'Aire effectués par l'OCEau. Ces prélèvements ont été effectués le 04.10.2022 au droit de 11 piézomètres existants, selon une répartition visant à couvrir l'essentiel de l'extension de la nappe à l'amont du pont de Lully.

En avril 2021, une réflexion a été initiée par l'OCEau et SIG sur l'utilisation de l'eau de l'Aire en crue (en hiver majoritairement et dans sa partie amont), pour du stockage saisonnier dans la nappe de l'Aire, par infiltration artificielle.

La recharge artificielle des nappes est une pratique qui vise à augmenter les volumes d'eau souterraine disponibles en favorisant, par des moyens artificiels, l'infiltration d'eaux extérieures (la rivière, par exemple) jusqu'à l'aquifère.



Dans le cas de la nappe de l'Aire, le stockage artificiel de l'eau de surface dans l'aquifère permettrait une utilisation différée de la ressource en eau souterraine pour :

- Renforcer, dans le secteur de Lully, le soutien d'étiage du cours d'eau, sujet aux assèchs et à des températures élevées en période estivale ;
- Augmenter la quantité d'eau disponible dans la nappe pour son exploitation thermique par pompe à chaleur (pompage – restitution) ;
- Un usage d'irrigation maraîchère en été, notamment à partir de 3 puits de pompage existants (secteur de Lully).

1.2 Objectifs de l'étude

La présente étude a pour objectif de préciser les échanges rivière-nappe et évaluer la faisabilité du projet de recharge artificielle de la nappe à partir des crues de l'Aire.

Pour ce faire, une synergie des études hydrogéologiques en cours a permis :

- De mutualiser les données piézométriques acquises dans le cadre du suivi de la renaturation de l'Aire (mandat 1885) et des études d'impact de l'exploitation des puits agricoles existants (mandats 1536 et 2048) ;
- D'utiliser le modèle hydrodynamique de la nappe de l'Aire, développé dans le cadre de l'étude géothermique (mandat 1319), en précisant les aspects relations nappe/river, pour simuler le projet de recharge artificielle de la nappe.

1.3 Prestations réalisées

Les investigations hydrogéologiques suivantes, complémentaires aux mandats en cours, ont été réalisées :

- L'évaluation des relations nappe-rivière le long de l'Aire (entre le pont de Thairy et le pont de Lully). Ces travaux ont permis de conceptualiser les échanges entre la rivière et la nappe de l'Aire dans la zone d'étude afin de quantifier ce phénomène dans le modèle hydrodynamique ;
- La réalisation de deux campagnes de mesures piézométriques synchrones à l'échelle de la nappe pour préciser son écoulement en périodes de hautes et basses eaux ;
- Le suivi en continu (pas de temps de 30 minutes) du niveau et de la température de la nappe sur 4 piézomètres en bordure de l'Aire ;
- La réalisation d'un puits d'infiltration et de deux piézomètres de surveillance ;
- La réalisation d'un test d'infiltration grandeur nature pendant 47 jours avec traçage de l'eau infiltrée par coloration afin de déterminer la vitesse de circulation de l'eau souterraine dans la nappe ;
- La réalisation d'un modèle hydrodynamique et thermique de la nappe de l'Aire avec :
 - o La prise en compte des relations nappe-rivière le long du tronçon étudié ;
 - o La simulation d'une recharge artificielle de la nappe pour évaluer l'impact positif du stockage saisonnier sur la nappe et le cours d'eau ;
 - o La simulation d'une exploitation thermique de la nappe.



2 Contexte hydrologique et hydrogéologique local

Le secteur d'étude prend en compte la partie centrale de l'Aire ainsi que la nappe de l'Aire, situées entre Saint-Julien-en-Genevois, en France et le Pont de Lully à Bernex (voir carte de localisation en Annexe 1).

2.1 L'Aire

L'Aire prend sa source au pied du Salève, en Haute-Savoie, et se jette dans l'Arve après avoir parcouru environ 11 kilomètres. Elle n'est connue sous ce nom qu'à partir de Saint-Julien-en-Genevois, où elle résulte de la confluence de divers cours d'eau, dont le grand-Nant, le ruisseau de la Folle, le Ternier et le ruisseau de l'Arande.

Sur la zone d'étude, l'Aire s'écoule globalement vers le Nord-Nord-Est entre Saint-Julien-en-Genevois et Lully.

Le débit (en m³/s), le niveau (en m.s.m) et la température (en °C) du cours d'eau sont suivis par deux stations limnimétriques :

- Station hydrométrique - [V024 5610](#) de la DREAL Auvergne-Rhône-Alpes : L'Aire à Saint-Julien-en-Genevois (Thairy) à l'amont de la zone d'étude. Les données sont disponibles au pas de temps 5 minutes sur le [site Hydroréel](#) ;
- Station de mesure de l'Office Cantonal de l'eau, l'[Aire - Boissenailles](#), située à l'aval.

En complément, deux stations de mesures, avec sondes multi-paramètres, ont été provisoirement installées le 27.01.2022 dans le lit de l'Aire, proche de la frontière française au niveau du stade de la Paguette et au droit du pont de l'autoroute (station limnimétrique des Bossenailles de l'OCEau) à l'aval. Ces deux stations ont permis un suivi pendant 12 mois de la qualité du cours d'eau¹.

2.2 La nappe de l'Aire

La nappe de l'Aire est une nappe superficielle transfrontalière qui s'étend des régions de Norcier et Thérans en France dans sa partie la plus amont, au pont des Marais à l'aval. D'une longueur de l'ordre de 4 km, elle a une largeur maximale d'environ 1,5 km dans sa partie centrale.

Le réservoir aquifère est constitué des alluvions gravelo-sableuses de l'Aire, déposées sur les argiles glacio-lacustres peu perméables du retrait würmien (substratum de la nappe). Son épaisseur est variable à l'échelle de la zone d'étude, le corps principal se trouve à l'amont de Lully où les graviers sont plus épais et représentent un réservoir nettement plus important².

La nappe de l'Aire est perchée au-dessus de la nappe du Genevois, localement présente vers 60 m de profondeur sous les formations de retrait würmien (voir Figure 4) et se situe, de ce fait, en secteur B de protection des eaux (particularité genevoise signalant la présence en profondeur d'une nappe principale du domaine public).

¹ Hydro-Géo Environnement, mars 2023. Alimentation artificielle de la nappe de l'Aire. Surveillance de la qualité de l'Aire – rapport de synthèse du 1^{er} février 2022 au 1^{er} février 2023. Dossier 1951-B.

² Hydro-Géo Environnement, novembre 2018. Investigations hydrogéologiques de la plaine de l'Aire dans le secteur de Lully (Bernex). Phase A : évaluation du potentiel géothermique de la nappe de l'Aire. Dossier 1319-A.



La nappe de l'Aire est libre, avec quelques secteurs localement captifs à l'aval du fossé de la Genévière. Son alimentation s'effectue principalement par les précipitations efficaces sur son emprise et les exfiltrations de l'Aire, et dans une moindre mesure, par les eaux de ruissellement en provenance des coteaux adjacents.

La nappe s'écoule globalement vers le nord-est avec un gradient hydraulique variant de 0.5 à 0.75% en régime de basses et hautes eaux respectivement.

En relation avec le projet de renaturation de l'Aire, la plaine de l'Aire est pourvue de près de 40 piézomètres (voir localisation en Annexe 1). Un suivi régulier de la nappe est réalisé par le GESDEC sur plus d'une dizaine de piézomètres. Les mesures effectuées entre 2002 et 2022 sont présentées en Figure 1 :

- Les variations piézométriques les plus importantes sont observées à l'amont de la nappe où l'épaisseur des graviers non saturés est la plus importante. Le battement de la nappe est de l'ordre de 2 à 3 mètres et sa profondeur varie de 2 à 8 mètres environ selon les ouvrages et la période de l'année, hautes ou basses eaux (piézomètres 224, 232) ;
- Dans le secteur intermédiaire (piézomètres 229 et 231), la nappe présente un comportement médian dans l'amplitude des variations piézométriques et sa profondeur ;
- Plus à l'aval, le battement de la nappe est plus faible (1 à 2 mètres) par effet de drainage de la rivière et de la faible épaisseur de l'aquifère (piézomètres 235 et 252). La nappe y est plus superficielle, à une profondeur comprise entre 1,5 et 2 mètres.

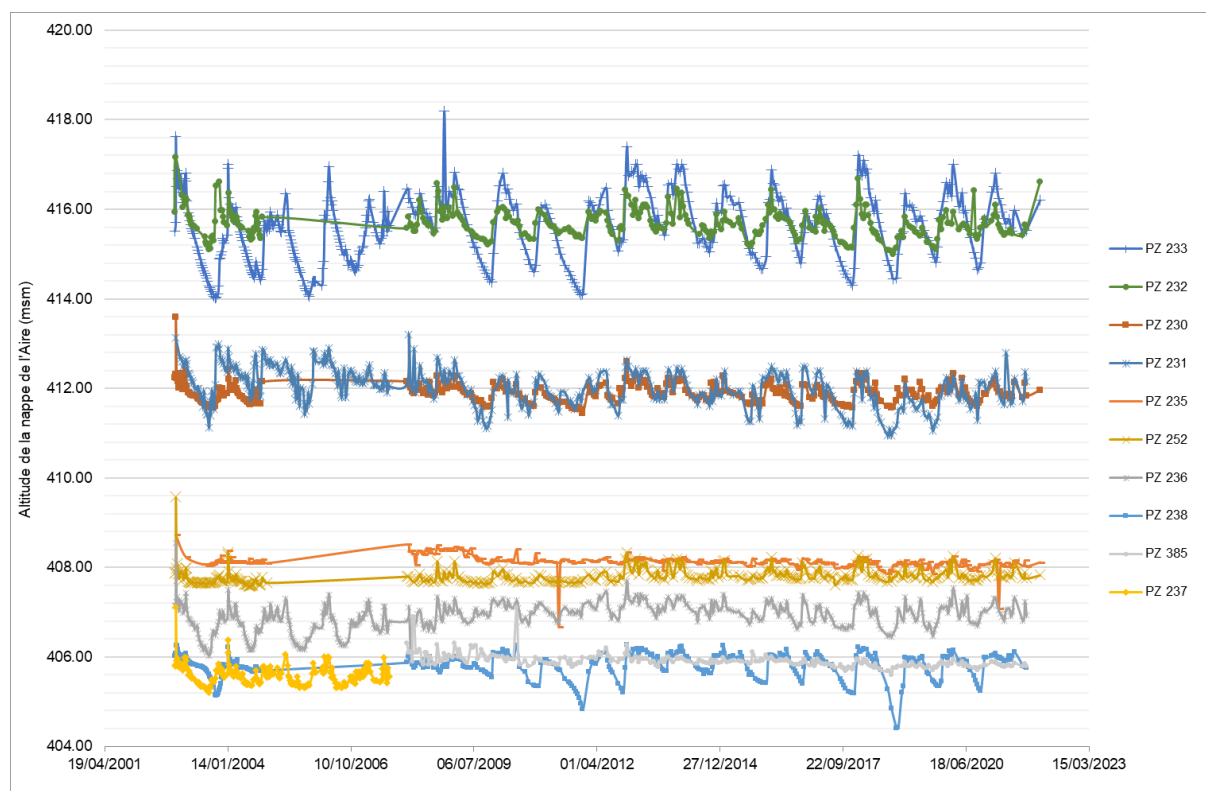


Figure 1 : Variations piézométriques de la nappe de l'Aire



2.3 Dynamique d'échange entre l'Aire et les nappes d'eau souterraine

Plusieurs types d'interactions entre les eaux de surface et les nappes interviennent dans le secteur d'étude : la rivière draine la nappe, la rivière alimente la nappe ou la rivière est déconnectée de la nappe (lit colmaté par ex.). Pour une même portion de rivière, ces relations peuvent changer dans le temps en fonction des conditions hydrologiques et hydrogéologiques et peuvent être influencées par des activités anthropiques (pompages, aménagements...).

Dans la partie amont de la zone étudiée, dans le secteur de Thairy, l'Aire s'écoule une soixantaine de mètres au-dessus de la nappe du Genevois. Plus à l'aval, entre la frontière et le pont des Marais, elle s'écoule en interaction avec la nappe de l'Aire.

2.3.1 Campagnes de jaugeages de l'OCEau

En coordination avec notre bureau, l'OCEau a réalisé deux campagnes de jaugeages sur l'Aire, en octobre 2020 et février 2021, afin de quantifier les échanges entre la rivière et les aquifères présents dans le secteur.

L'AIRE			Campagne 1		Campagne 2	
			01.10.2020		25.02.2021	
Station	PK	BV [km ²]	Q [l/s]	Notes	Q [l/s]	Notes
Aval Grand Nant	12.2	46	52		373	
Station de pompage	10.9	46.2	44		362	
Pont Thairy (Hydroréel)	10.25	46.3	42	Hydroréel	390	Hydroréel
Grande ferme isolée	9.8	48.3	42		383	
Amont STEP S.Julien	9.1	50.6	16	Estimé	309	
Frontière FR-GE	9	50.8	23		325	Jaugeage douteux. Q estimé
Bossenailles	5.8	59.2	69		335	
Centenaire	4.8	65.3	75		390	
Pont-Rouge	1.55	71.6	78		417	

* estimés / indirects

Tableau 1 : Résultats des jaugeages de l'OCEau sur l'Aire

La campagne d'octobre 2020 a été réalisée en situation de type basses-eaux. On observe une diminution du débit de l'ordre de 10 l/s entre « Aval Grand Nant » et « Grande ferme isolée », percolant en profondeur jusqu'à la nappe du Genevois. De ce point et jusqu'à « amont STEP St-Julien » soit au niveau de la passerelle du stade de la Paguette, les pertes atteignent 26 l/s sur ce linéaire de 700 m et alimentent soit la nappe de l'Aire ou la nappe du Genevois. L'augmentation du débit de 16 l/s à 23 l/s entre « amont STEP St-Julien » et la frontière est consécutive aux apports de 2 collecteurs en RD. Et enfin, sur le linéaire frontière-Bossenailles on constate un accroissement du débit de la rivière passant de 23 à 69 l/s, consécutif aux exfiltrations de la nappe de l'Aire dans le cours d'eau. Plus à l'aval et en l'état des connaissances, la limite d'extension de la nappe de l'Aire se situe au niveau du pont des Marais au-delà duquel seuls des apports d'eau de ruissellement contribuent à accroître le débit de la rivière.



2.3.2 Campagnes d'observations des débits – HGENv.

Plusieurs campagnes d'observation avec estimation de débits (+/- 20%) ont été réalisées à 5 reprises entre mai et octobre 2022, en période de basses-eaux, sur le linéaire compris entre le pont de Thairy et le pont de Lully :

Q l/s (+/- 20% sauf données limni DREAL/OCEau)	17.5.2022 16-19h	17.8.2022 15-17h	31.8.2022 8-10h	6.9.2022 15-17h	20.10.2022 9-11h
Pont de thairy limni DREAL	64	20	71	26	34
Ruisseau des Velues	0.3	sec	Sec	sec	sec
Seuil Grande Ferme	40	8	35	20	25
Amont passerelle Paguette	20	Sec	20	Sec	15
Collecteurs "EM" Paguette am/av	2 / 1	0.8 / 0.3	0.5 / 0.3	0.6 / 0.5	3 / 5
Seuil Frontière	25	1	20	1	20
Seuil oléoduc	10	Sec	1	Sec	Sec
Pont Certoux	Sec	Sec	Sec	Sec	Sec
Nant Génévrière 1	Sec	Sec	Sec	Sec	Sec
Nant Génévrière 2	10	Sec	Sec	Sec	Sec
Seuil passerelle Bis	20	0.3	8	5	10
Pont de Lully	50	8	25	20	30
Pont centenaire OCEau (moy 24h)	126	400 (?)	36	51	64

Tableau 2 : Observations quantitatives sur l'Aire entre mai et octobre 2022



Figure 2 : Observations du 17 mai 2022 sur l'Aire

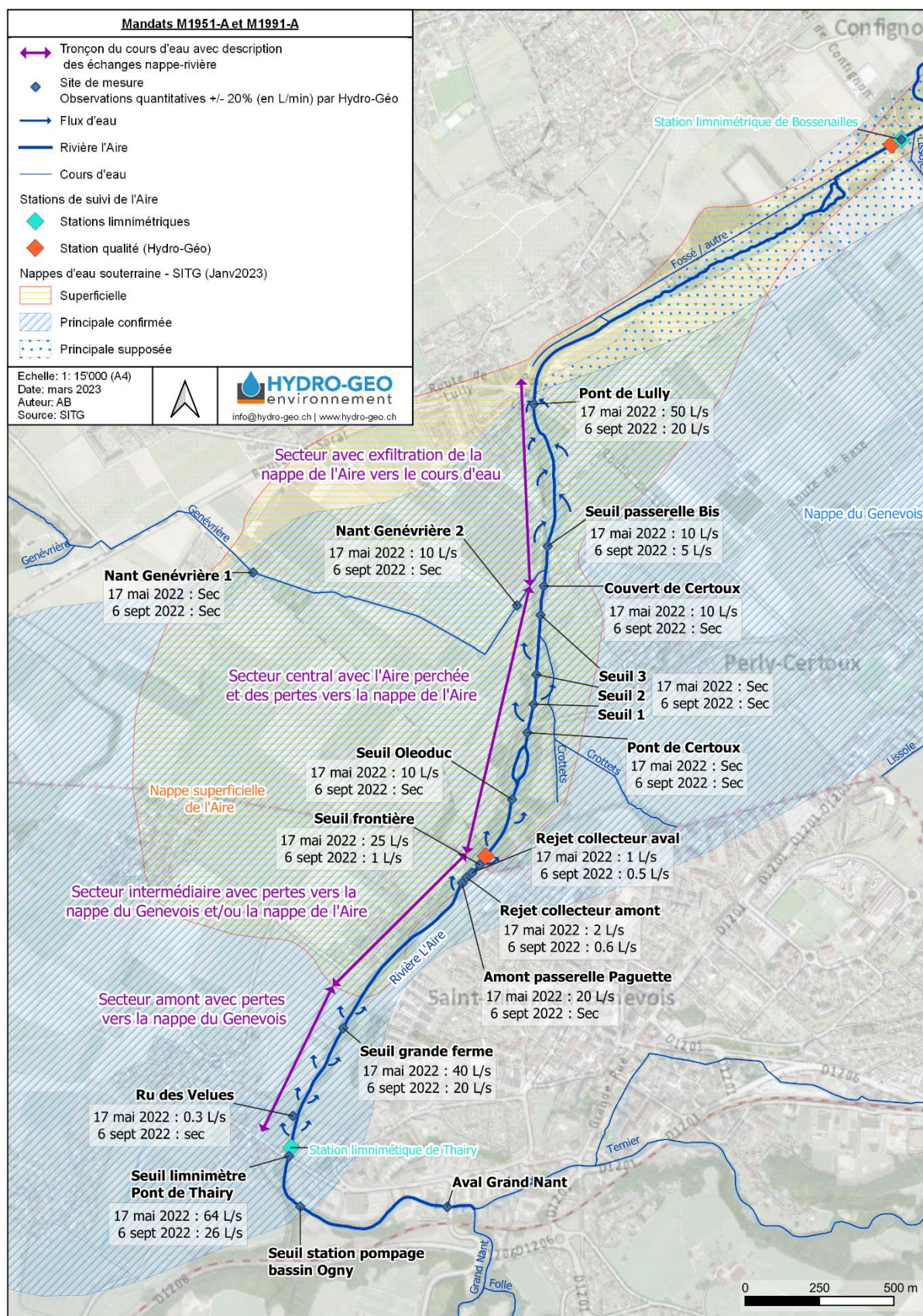


Figure 3 : Carte des observations quantitatives sur l'Aire et les échanges rivière-nappes



2.3.3 Interactions rivière – nappes

Les interactions rivière-nappes ont été affinées suite à la compilation des données géologiques existantes. Un profil en long est présenté en figure 4. Sur la base de ce document et des observations de terrain, les modalités d'échanges rivière-nappes peuvent être décrites comme suit :

Secteur de Thairy jusqu'à l'entrée du village de Thérrens

A l'amont de la zone d'étude, différentes investigations réalisées par notre bureau (forages, campagnes géophysiques et observations de terrain) ont mis en évidence sur une surface estimée à 20 ha l'absence ou la faible épaisseur de couverture protectrice morainique. Cette configuration ne permet pas l'établissement d'une nappe superficielle et implique que les eaux de surface peuvent percoler en profondeur jusqu'à la nappe du Genevois, présente vers 60 m, entraînant une diminution sensible du débit de l'Aire. Ce contexte implique une vulnérabilité de la nappe du Genevois vis-à-vis d'éventuelles migrations de polluants en provenance des eaux de surface.

En octobre 2020, la campagne de jaugeage a permis de quantifier ces pertes avec une diminution du débit de l'ordre de 10 L/s entre « Aval Grand Nant » et « Grande ferme isolée ».

Entre Thérrens et la frontière

Entre Thérrens et la frontière, les pertes de l'Aire sont particulièrement marquées : en octobre 2020, de « Grande ferme isolée » jusqu'à la passerelle du stade de la Paguette, à l'amont de deux collecteurs en rive droite de l'Aire, les pertes atteignent 26 L/s sur ce linéaire de 700 m. La destination des pertes de la rivière reste à préciser. Dans ce secteur, les eaux de l'Aire alimenteraient tantôt la nappe du Genevois, tantôt la nappe de l'Aire.

Directement à l'amont de la frontière, les deux collecteurs déversent en continu un mélange d'eaux claires et usées (site d'observation « amont/aval rejet collecteurs » ou « amont STEP St-Julien ») participant au débit du cours d'eau.

Entre la frontière et le couvert de Certoux

Entre la frontière et le couvert de Certoux, l'Aire et la nappe de l'Aire sont peu connectées : le lit de la rivière, constitué de graviers sableux, est perché. Sa base se trouve entre 0.5 m et 1.5 m au-dessus du niveau piézométrique moyen.

Dans ce secteur, les pertes du cours d'eau participent directement à l'alimentation de la nappe superficielle de l'Aire, ce qui a été confirmé lors des essais d'infiltration et de coloration réalisés directement à l'aval de la frontière (voir chapitre 3.2).

Entre le couvert de Certoux et le pont de Lully

Au niveau des terrains de tennis de Certoux, un abaissement de la topographie permet l'exfiltration des eaux souterraines vers la rivière. En octobre 2020, sur le linéaire frontière-Bossenailles, on constate un accroissement du débit de la rivière passant de 23 à 69 L/s, consécutif aux apports de la nappe.

A l'aval du pont de Lully

Plus à l'aval et en l'état des connaissances, la limite d'extension de la nappe de l'Aire se situe au niveau du pont des Marais au-delà duquel seuls des apports d'eau de ruissellement contribuent à accroître le débit de la rivière.

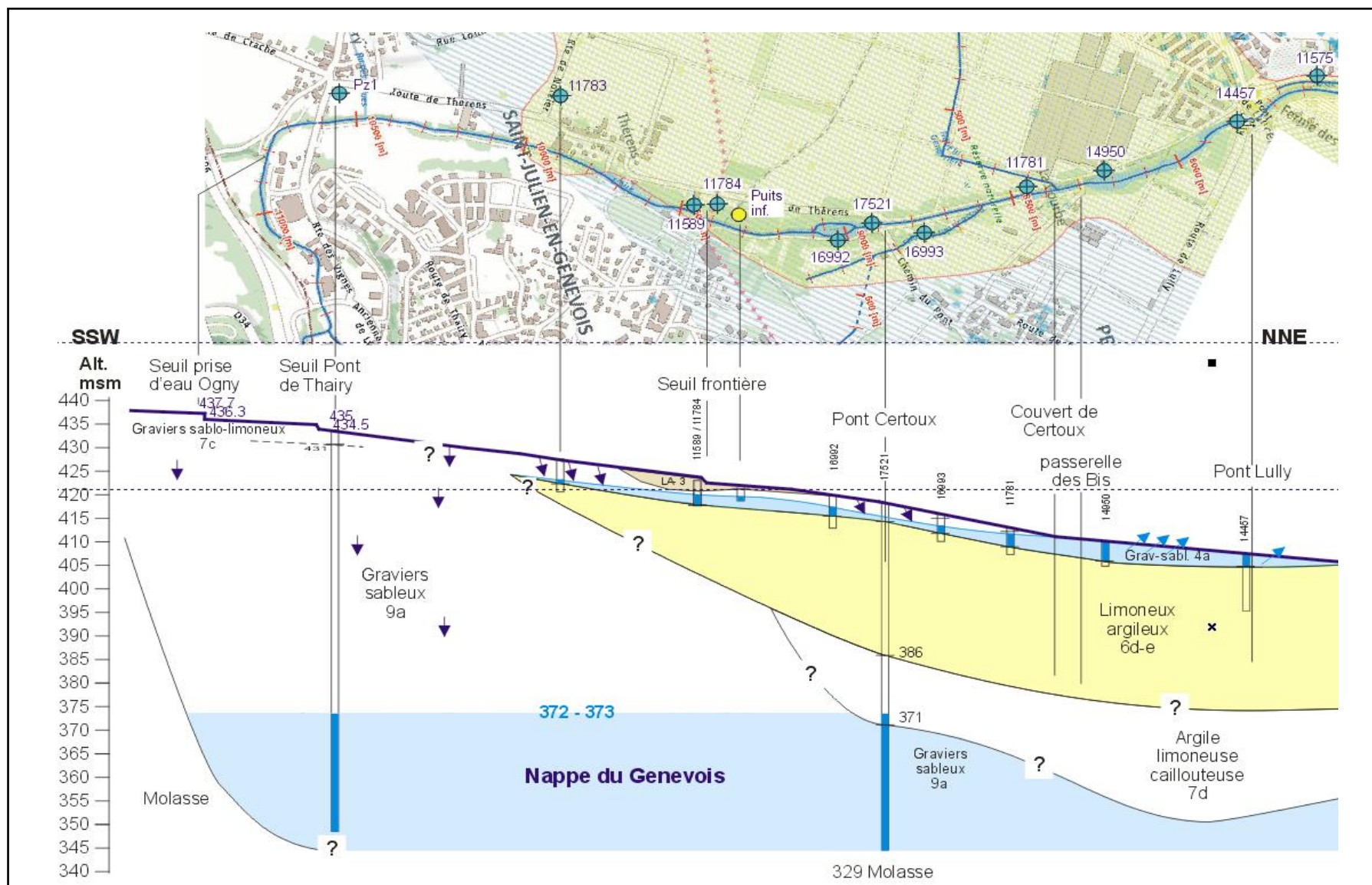


Figure 4 : Coupe hydrogéologique du pont de Thairy au pont de Lully

2.3.4 Synthèse

Il ressort que les échanges entre la rivière et les nappes présentes dans la zone d'étude sont variables le long du cours d'eau : Entre Thairy et Thérrens les pertes de l'Aire percolent en profondeur vers la nappe du Genevois, entre la frontière et le couvert de Certoux elles alimentent la nappe de l'Aire. Plus à l'aval, la nappe superficielle s'exfiltre dans la rivière.

Les photographies de l'Aire à l'étiage (mai 2022) sont présentées en Figure 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** La carte des observations quantitatives sur l'Aire en Figure 3 ainsi que la coupe géologique (Figure 4) synthétisent l'ensemble des données à disposition et illustrent les échanges rivière-nappe entre le pont de Thairy et le pont de Lully.

2.3.5 Perspectives

Afin de préciser les relations rivière-nappe dans le secteur d'étude, il serait nécessaire de réaliser des investigations complémentaires, en particulier entre la « grande ferme isolée » et la frontière franco-suisse, avec :

- La réalisation de jaugeages avec des profils intermédiaires, pour mieux localiser et quantifier les pertes (y compris en hautes eaux) ;
- La réalisation de reconnaissances géophysiques et hydrogéologiques dans ce secteur, pour préciser l'extension de la fenêtre géologique sans protection morainique de surface et ainsi mieux comprendre la destination des pertes de la rivière : vers la nappe de l'Aire ou vers la nappe du Genevois

2.4 **Apports vers l'Aire**

2.4.1 STEP de Neydens

Lors des observations réalisées durant les étiages de l'été 2022, des variations quotidiennes et régulières de débits d'environ 20 L/s ont été enregistrées par le limnimètre du pont de Thairy. Après diverses recherches et échanges avec les responsables de la Communauté de Communes du Genevois (CCG), il apparaît que celles-ci étaient liées aux rejets de la STEP de Neydens déversés dans le ruisseau de La Folle, affluent du Grand Nant puis de l'Aire, à quelque 2,9 km en amont du pont de Thairy (voir photographie en Figure 5).

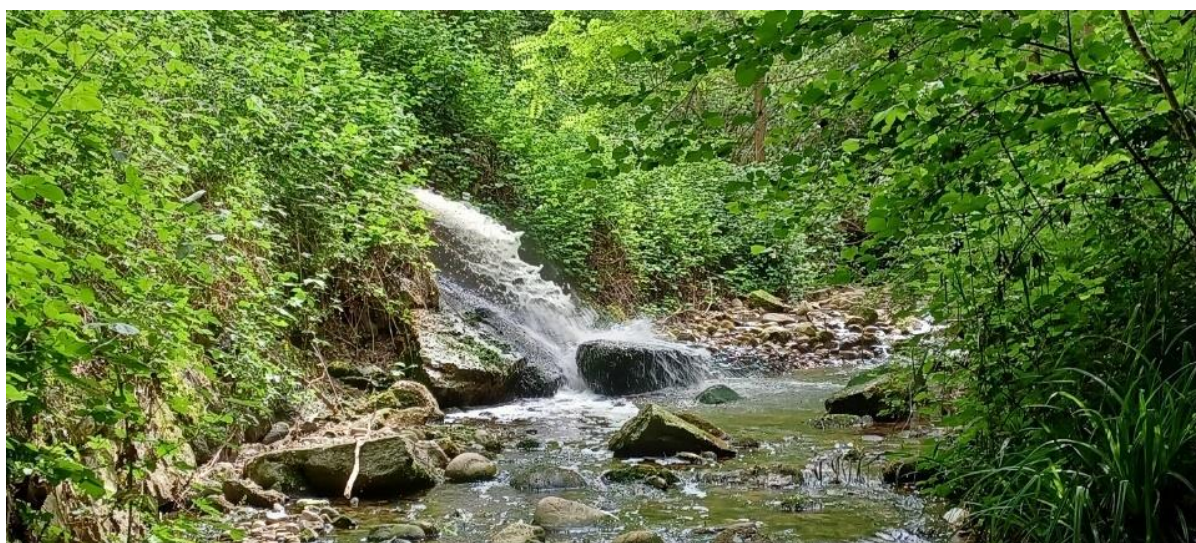


Figure 5 : Vue des effluents de la STEP de Neydens

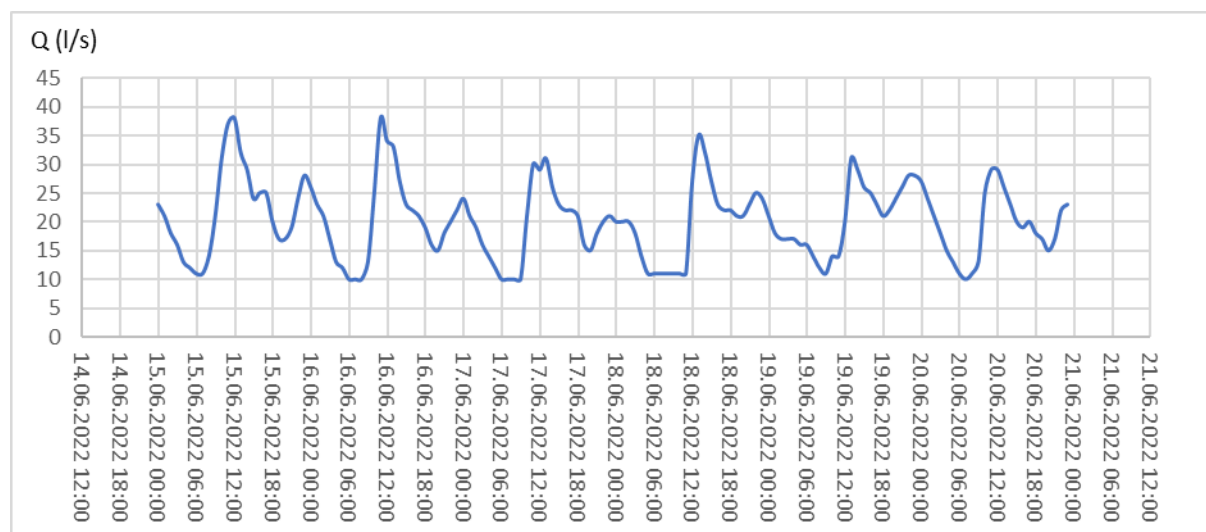


Figure 6 : Evolution du débit de l'Aire au limnimètre du pont de Thairy du 15 au 21 juin 2022
(fluctuations liées aux apports de la STEP de Neydens)

En basses-eaux, le débit de la rivière dans le secteur du pont de Thairy est constitué pour moitié par les rejets du système de traitement d'eaux usées de Neydens.

2.4.2 Ruisseau des Velues

Le ruisseau des Velues qui prend sa source au-dessus du hameau de Songy, traverse la plaine de Crache-Thairy avant de rejoindre l'Aire peu en aval du pont de Thairy. Lors des observations de l'été 2022, il était en général à sec. Il est le seul affluent de l'Aire entre la confluence du nant de Ternier-Grand Nant et le nant de la Genévrière.

2.4.3 Collecteurs secteurs Paguette-Frontière

Directement à l'aval de la passerelle de la Paguette et en RD, on relève les apports de 2 collecteurs d'eau mélangée se déversant dans l'Aire, dont le plus à l'aval constituait l'exutoire de l'ancienne STEP de Saint-Julien. D'un débit relativement régulier, de l'ordre de 0.3 à 5 l/s selon les observations de l'été 2022, ces apports permettent le maintien, en étiage marqué, de la faune piscicole dans un plan d'eau très restreint (photographie en Figure 7).



Figure 7 : Vue des collecteurs d'eau mélangée à la frontière
La station de mesure de la qualité de l'Aire provisoirement installée pour le mandat 1951-B est visible

2.5 Prélèvements d'eau de l'Aire

Lors des nombreuses observations réalisées durant les basses-eaux de 2022, essentiellement de mai à novembre, aucun prélèvement des eaux de l'Aire n'a été constaté au niveau de la station de pompage pour l'alimentation de la retenue collinaire d'Ogny. Les conditions de pompage définies dans une convention datée de décembre 1987 prévoient un débit minimum de 65 l/s réservé à l'Aire.



Figure 8 : vue de la station de pompage et de la passe à poissons



Figure 9 : vue de la retenue collinaire d'Ogny, alimentant le réseau d'irrigation agricole de la plaine de l'Aire

3 Investigations de terrain

Afin d'étudier la faisabilité de recharger artificiellement la nappe de l'Aire à partir de crues de l'Aire, et d'évaluer l'impact de cette recharge sur les niveaux et la température des eaux souterraines et du cours d'eau, des investigations hydrogéologiques de terrain ont été effectuées entre octobre 2021 et septembre 2022 :

- Réalisation d'un puits d'infiltration et de 2 piézomètres de surveillance pour la mise en œuvre d'un test d'infiltration avec coloration ;
- Suivi du niveau et de la température de la nappe de l'Aire avec la réalisation de campagnes piézométriques synchrones.

3.1 Réalisation d'un puits d'infiltration et de piézomètres de suivi

Afin de permettre la réalisation et le suivi d'un test d'infiltration grandeur nature, un puits d'infiltration et 2 piézomètres de suivi ont été mis en place en amont de la nappe de l'Aire en 2021 (voir localisation en Figure 11) :

- Le puits d'infiltration se situe à 70 m des berges de l'Aire, sur la parcelle 1'707 et a été réalisé le 10.11.2021. Le puits est constitué d'anneaux préfabriqués en béton, de diamètre 1 m, troués sur la partie inférieure (Figure 10). La base repose directement sur le toit des graviers aquifères de la nappe de l'Aire, situés sous l'horizon superficiel limoneux, à une profondeur d'environ 4 m ;
- Les piézomètres P1, situé le long du chemin du loup et P2, en bordure de la route de Thérans, ont été réalisés en octobre 2021 pour permettre le suivi du test d'infiltration. Ils sont implantés environ 100 m au nord-ouest et au nord-est, respectivement, du puits d'infiltration. Ces ouvrages (diamètre 4.5") atteignent le toit du substratum (6 à 7 m de profondeur) et sont crépinés au droit de la nappe de l'Aire. Les coupes géologiques et techniques des ouvrages sont présentées en Annexe 2.

La parcelle n°1'707 préalablement identifiée est idéalement située à l'amont de la nappe de l'Aire, à proximité du cours d'eau sur les terrasses alluviales sablo-graveleuses et présente une légère dépression topographique.



Figure 10 : Photographies du chantier de réalisation du puits d'infiltration

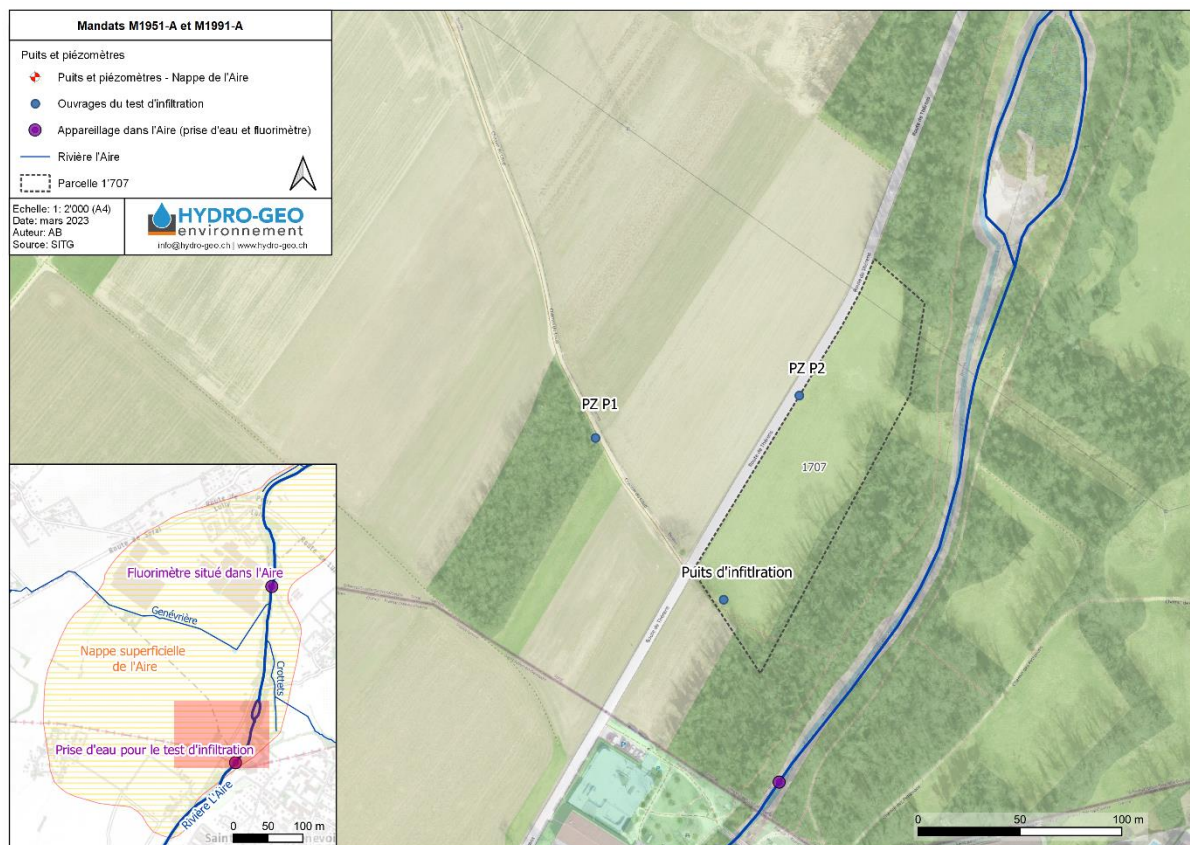


Figure 11 : Carte de localisation des ouvrages réalisés en 2021 pour le test d'infiltration

3.2 Test d'infiltration avec essai de coloration

Le test d'infiltration avec coloration a pour objectifs de vérifier la faisabilité d'infiltrer un débit en continu dans la nappe de l'Aire, à proximité du cours d'eau, de déterminer les vitesses de déplacement de la nappe mais également de permettre une calibration dynamique du modèle numérique.

3.2.1 Modalités de mise en œuvre des tests

L'essai d'infiltration avec coloration a été réalisé du 11.02.2022 à 10h30 au 29.03.2022 à 08h30 selon le protocole suivant :

- Infiltration dans le puits au débit de 12 L/s du 11.02 au 14.03.2022, réduit à 10 L/s jusqu'au 30.03.2022 suite à un colmatage progressif et partiel du puits. L'infiltration a été effectuée sur une durée de 47 jours pour permettre de constater l'impact de la recharge de la nappe sur les piézomètres environnants, situés à l'aval du puits ;
- En l'absence d'hydrante dans le secteur, l'eau d'infiltration a été prélevée par pompage dans l'Aire et dirigée dans le puits d'infiltration par une conduite horizontale. L'essai a été réalisé en fin d'hiver, au cours d'une période généreuse en pluie (Figure 12) ;
- Injection de 20 L de fluorescéine sodique diluée à 30 % (soit 6 kg) dans le puits d'infiltration, le 18.02.2022 entre 11h50 et 12h00, soit environ une semaine après le démarrage du test d'infiltration (Figure 13) ;



- Injection de 5 L de sulforhodamine B diluée à 30 % (soit 1.5 kg) dans le puits d'infiltration, le 24.02.2022 à 16h30, soit 13.25 jours après le lancement du test d'infiltration ;
- Echantillonnage de l'eau souterraine pour suivi de la coloration à une fréquence journalière après l'injection du colorant, du 18.02 au 11.03, puis tous les mois jusqu'au 09.09.2022 ;
- Utilisation d'une pompe 1" pour prélever l'eau souterraine dans les piézomètres P1, P2 et PZ 18'669 : mesure de niveau statique, pompage au débit de 7 à 9 L/min pendant 5 minutes avec l'utilisation d'un tuyau souple spécifique à chaque piézomètre, échantillonnage et mesure des paramètres physico-chimiques (température, pH, conductivité, oxygène dissous et redox) ;
- Utilisation de préleveurs jetables sur les autres points d'observation : mesure de niveau statique, échantillonnage de l'eau souterraine après renouvellement de 5 fois le volume du piézomètre et mesure des paramètres physico-chimiques (température, pH, conductivité, oxygène dissous et redox) ;
- Utilisation d'un flaconnage spécifique et envoi des prélèvements au laboratoire d'analyse (AquaGéo) ;
- Monitoring en continu du colorant au moyen d'un fluorimètre installé dans le lit du cours d'eau, environ 20 m en amont du PZ 14'950, à proximité de la passerelle des bis et dans le secteur d'exfiltration de la nappe de l'Aire ;
- Suivi du niveau et de la température de la nappe en continu à partir des capteurs installés dans le puits d'infiltration et les piézomètres d'observation.

Les ouvrages suivis au cours des tests sont les suivants (voir localisation en Annexe 1) :

- Les piézomètres P1 et P2, situés environ 100 m à l'aval du puits d'infiltration ;
- Le piézomètre 11'569 (PZ 232), situé environ 230 m au nord du puits ;
- Le piézomètre 11'560 (PZ 223), situé environ 400 m au nord-ouest du puits ;
- Le piézomètre 16'992, situé 300 m au nord-est ;
- Le piézomètre 18'669, puits P3 de l'entreprise Jaquenoud, situé 900 m au nord ;
- Le puits de l'entreprise Magnin, situé 950 m au nord.



Figure 12 : Dispositif de prélèvement d'eau de l'Aire, à la frontière F-CH, pour la réalisation du test d'infiltration



Figure 13 : Photographie de l'injection de fluorescéine dans le puits d'infiltration

3.2.2 Aspects hydrauliques

Le test d'infiltration a montré la capacité de l'aquifère de la nappe de l'Aire à recevoir 10 à 12 L/s en continu .

La Figure 14 présente les résultats du test d'infiltration et son impact sur le niveau de la nappe au droit du puits d'infiltration et des piézomètres de suivi alentours. Le suivi montre que :

- Au repos, l'épaisseur saturée de la nappe varie d'environ 2 m (puits P1 et P2) à 5 m (PZ 11'569) ;
- Au cours du test, l'élévation moyenne du niveau d'eau dans le puits d'infiltration est de 3.5 m ;
- Au droit des piézomètres d'observation, le niveau de la nappe suit l'évolution du niveau de l'Aire. La nappe est peu influencée par le test d'infiltration ;
- Après l'arrêt de l'infiltration, le retour au niveau statique est rapide (env. 12 heures) montrant ainsi la bonne perméabilité de la nappe au droit du puits.

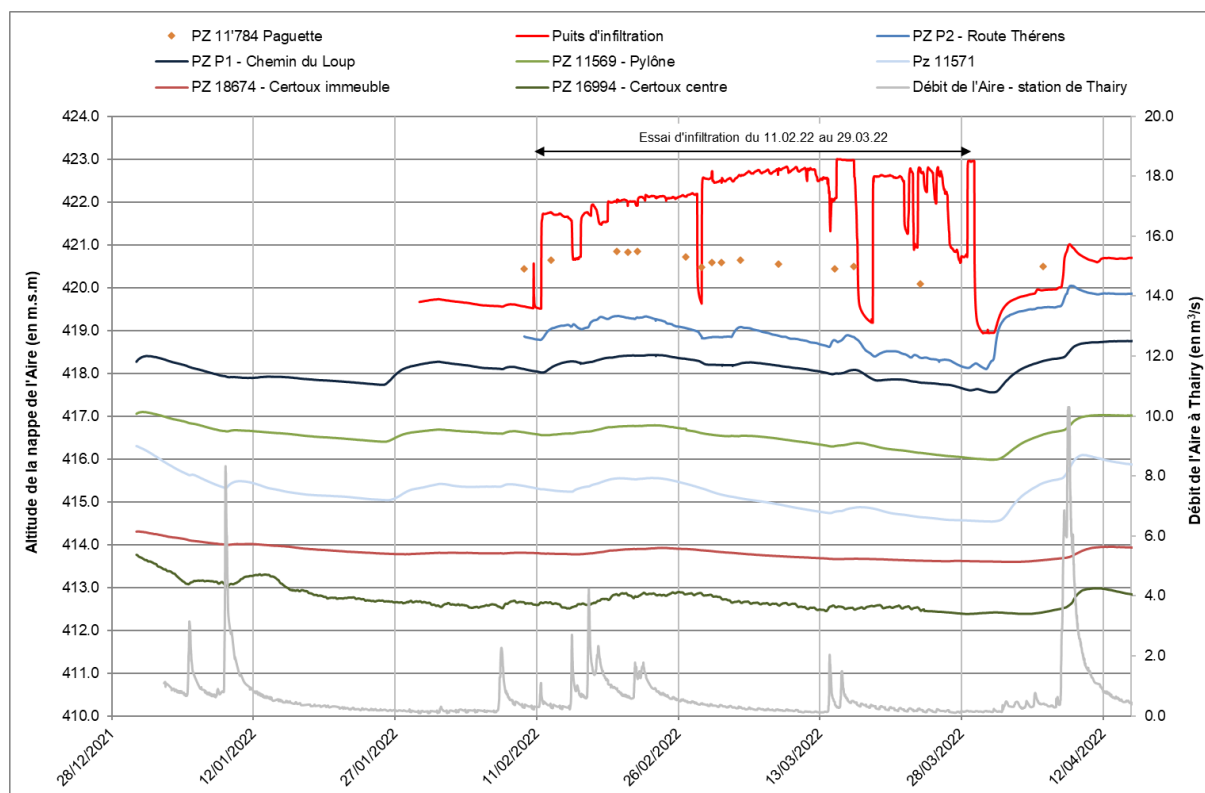


Figure 14 : Variations du niveau de la nappe de l'Aire au cours du test d'infiltration

3.2.3 Restitution des colorants

La courbe de restitution du traceur représente la concentration en traceur (en $\mu\text{g/L}$ = ppb), mesurée au point d'observation, en fonction du temps à partir de l'injection. Cette courbe permet notamment de visualiser les différents temps caractéristiques (temps d'arrivée du colorant, temps du pic, temps moyen).

La Figure 15 présente la courbe de restitution de la fluorescéine (concentration au cours du temps en $\mu\text{g/L}$ ou ppb) dans les piézomètres de contrôle suivis au cours du test d'infiltration puis pendant 5 mois après l'arrêt de l'infiltration.

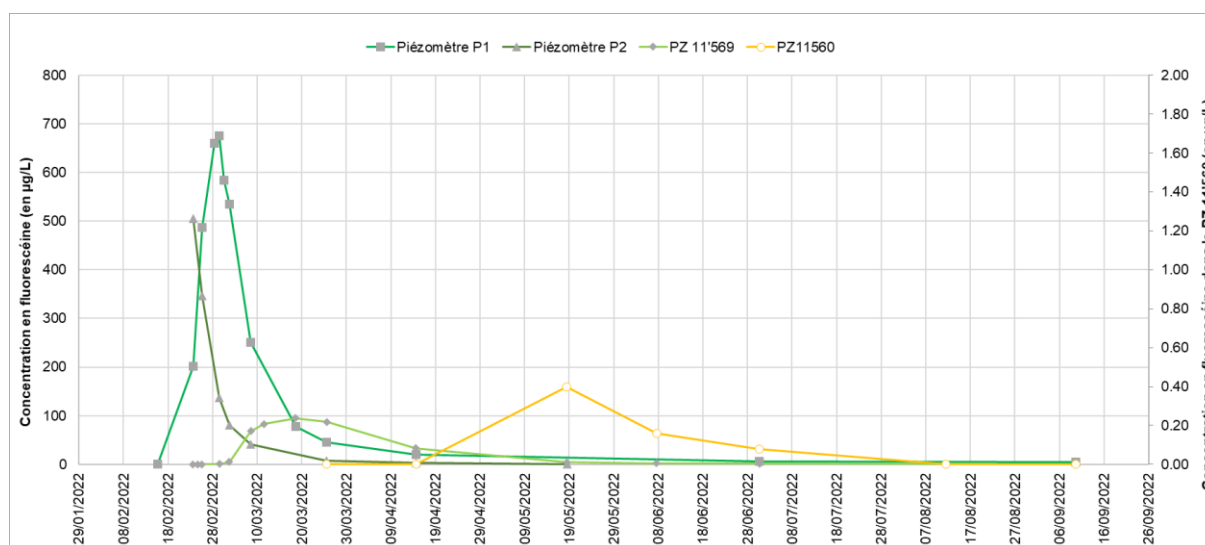


Figure 15 : Evolution de la concentration en fluorescéine dans les piézomètres de surveillance entre l'injection du colorant le 18.02.2022 et début septembre 2022

La Figure 16 présente la courbe de restitution de la sulforhodamine B dans le piézomètre de contrôle P2 au cours du test d'infiltration puis pendant 5 mois après l'arrêt de l'infiltration.

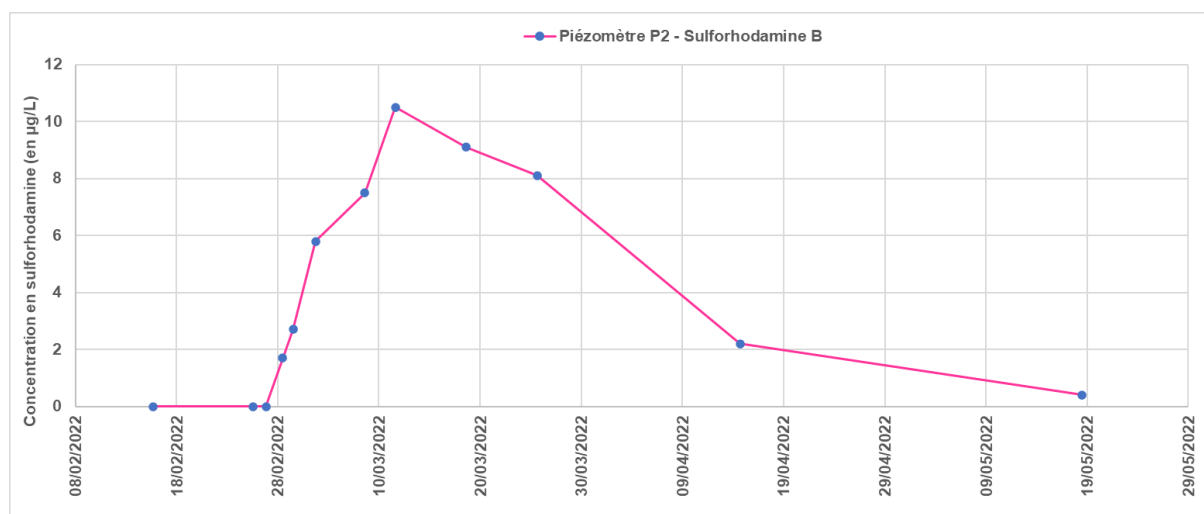


Figure 16 : Evolution de la concentration en sulforhodamine B dans le piézomètre P2 entre l'injection du colorant le 24.02.2022 et le 19.05.2022

Les courbes de restitution montrent que :

- Dans le piézomètre P1, la fluorescéine a été détectée lors de l'échantillonnage le 23.02.2022 (photographie en Figure 17) et le pic, très marqué, a été observé le 01.03.2022 à une concentration d'environ 675 µg/L (ou ppb). La montée du colorant a duré environ 6 jours et sa décroissance est rapide, ce qui indique une dispersion assez faible du colorant entre le puits d'infiltration et P2 ;
- Dans le piézomètre P2, le pic de fluorescéine n'a pas été observé car l'arrivée du colorant a été plus rapide que la date du premier échantillonnage, le 23.02.2022. Une coloration à la sulforhodamine B a donc été réalisée dans un second temps, le 24.02.2022. La courbe de restitution montre une arrivée du colorant le 28.02.2022 soit un peu moins de 4 jours après l'injection. Le pic est observé le 11.03.2022, soit presque 15 jours après l'injection, à une concentration d'environ 10 µg/L. La différence de comportement entre la fluorescéine et la sulforhodamine B (gamme de concentrations analysées et temps de propagation) s'explique par la quantité de colorant injectée mais également par une adsorption plus importante de la sulforhodamine aux formations géologiques en place, notamment aux particules fines (type limons, argiles) ;
- Le piézomètre PZ 11'569 présente un pic de colorant plus étalé du fait de sa distance avec le point d'injection (230 m) : la dispersion du colorant est plus élevée. L'arrivée du traceur a été mesurée le 03.03.2022 et le pic présente une concentration d'environ 95 µg/L, le 18.03.2022 ;
- Dans le piézomètre PZ 11'560, situé environ 400 m à l'aval du point d'injection, la fluorescéine est détectée le 18.05.2022 à une faible concentration de 0.4 µg/L ;
- Aucune trace de colorant n'a été détectée par le fluorimètre situé dans l'Aire, dans le secteur d'exfiltration de la nappe.



Figure 17 : Photographie de l'arrivée du colorant (fluorescéine) dans le puits P1 le 23.02.2022

3.2.4 Calcul du taux de restitution

Le calcul du taux de restitution, ou taux de récupération, (rapport de la somme de traceur restitué au point d'observation sur la quantité totale injectée) n'est pas possible dans le cadre de cet essai car les piézomètres suivis n'ont pas fait l'objet d'un pompage en continu.

3.2.5 Evaluation de la vitesse de l'eau souterraine

La vitesse de transit de l'eau souterraine peut être calculée à partir de la courbe de restitution :

La vitesse maximale :

$$v_{max} = \frac{x}{t_{1^{ère} \text{ apparition}}}$$

Et la vitesse de transit du pic :

$$v_{pic} = \frac{x}{t_{pic}}$$

Avec :

- v : la vitesse de transit
- x : la distance (à vol d'oiseau) entre le point d'injection et le point d'observation
- t : le temps de transit du traceur

A partir du suivi de la concentration en fluorescéine dans les piézomètres P1 et PZ 11'569, la vitesse maximale d'écoulement de la nappe de l'Aire est évaluée à 0.3 m/h, soit environ 7.2 m/jour. Cette vitesse est approximative du fait des prélèvements ponctuels effectués dans les ouvrages (la date et l'heure d'arrivée du colorant ne sont pas précisément connues).

La vitesse de transit du pic approche 0.15 m/h sur P1 et 0.02 m/h sur PZ 11'569, soit entre 0.5 et 3.5 m/jour. La vitesse de la nappe est plus élevée en direction de P2, soit dans la direction d'écoulement de l'Aire.

3.2.6 Utilisation du logiciel TRAC du BRGM

L'essai de coloration à la fluorescéine a été modélisé à partir du Logiciel TRAC du BRGM (Figure 18), un outil d'aide à l'interprétation des traçages en milieu poreux, sur la base des concentrations ponctuelles mesurées dans les piézomètres P1, P2 et PZ 11'569.

Les résultats détaillés des simulations sont présentés en Annexe 5 et fournissent les estimations complémentaires suivantes :

- La **vitesse moyenne de transit est calculée à 0.3 m/h soit 7.2 m/j** ;
- La vitesse maximale serait d'environ 1.4 m/h en direction de P1 et presque 2 fois supérieure en direction de P2 (2.7 m/h).

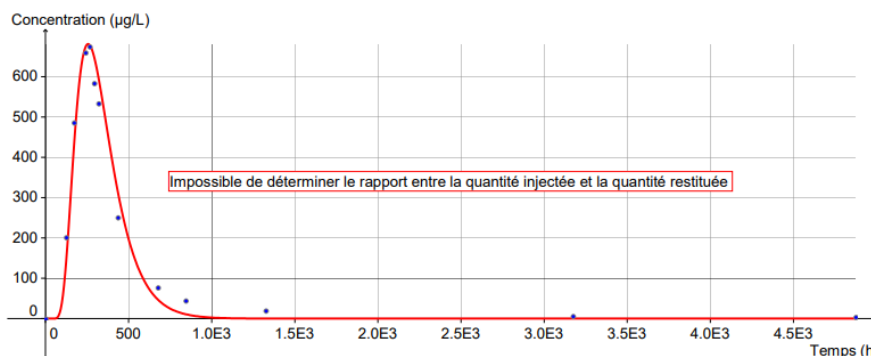


Figure 18 : Courbe de restitution de la Fluorescéine dans le piézomètre P1 - logiciel TRAC

3.2.7 Suivi des paramètres physico-chimiques de la nappe

Les campagnes de mesures de terrain ont été effectuées au droit des piézomètres d'observation entre le 15.02 et le 09.09.2022 pour échantillonner l'eau souterraine (suivi de la coloration dans les ouvrages), mesurer le niveau (variations piézométriques) et les paramètres physico-chimiques de la nappe.

Les mesures effectuées, compilées en Annexe 4 et présentées en Figure 19, montrent que :

- La température de la nappe de l'Aire augmente progressivement au cours du suivi jusqu'en septembre 2022, en lien avec les températures extérieures. Les variations sont synchrones, la température fluctue entre 5.8 et 20.8°C sur les ouvrages au cours du suivi. L'amplitude des variations est plus élevée dans les piézomètres situés proches du cours d'eau (P2, PZ 16'992). Les températures mesurées en été sont également plus élevées à l'aval de la nappe (Puits de l'entreprise Magnin, PZ 18'669) qu'à l'amont (PZ 11'569 et 11'50) ;
- Le pH est resté assez stable au cours du test, entre 6.9 et 7.9 sur tous les ouvrages. Le pH mesuré dans le puits d'infiltration est influencé par la proximité de l'Aire et de son pH plus élevé ;
- La conductivité électrique de la nappe a varié entre 500 et 900 µS/cm. L'oxygène dissous entre 2 et 15 mg/L. Les variations semblent plus marquées sur les ouvrages proches de l'Aire (P1, P2, PZ 16'992), plus stables sur les PZ 11'560, 18'669 et le puits de l'entreprise Magnin.

Le suivi des paramètres physico-chimiques semble montrer l'effet du test d'infiltration sur les propriétés de la nappe de l'Aire, de façon plus ou moins marquée selon la distance au cours d'eau.

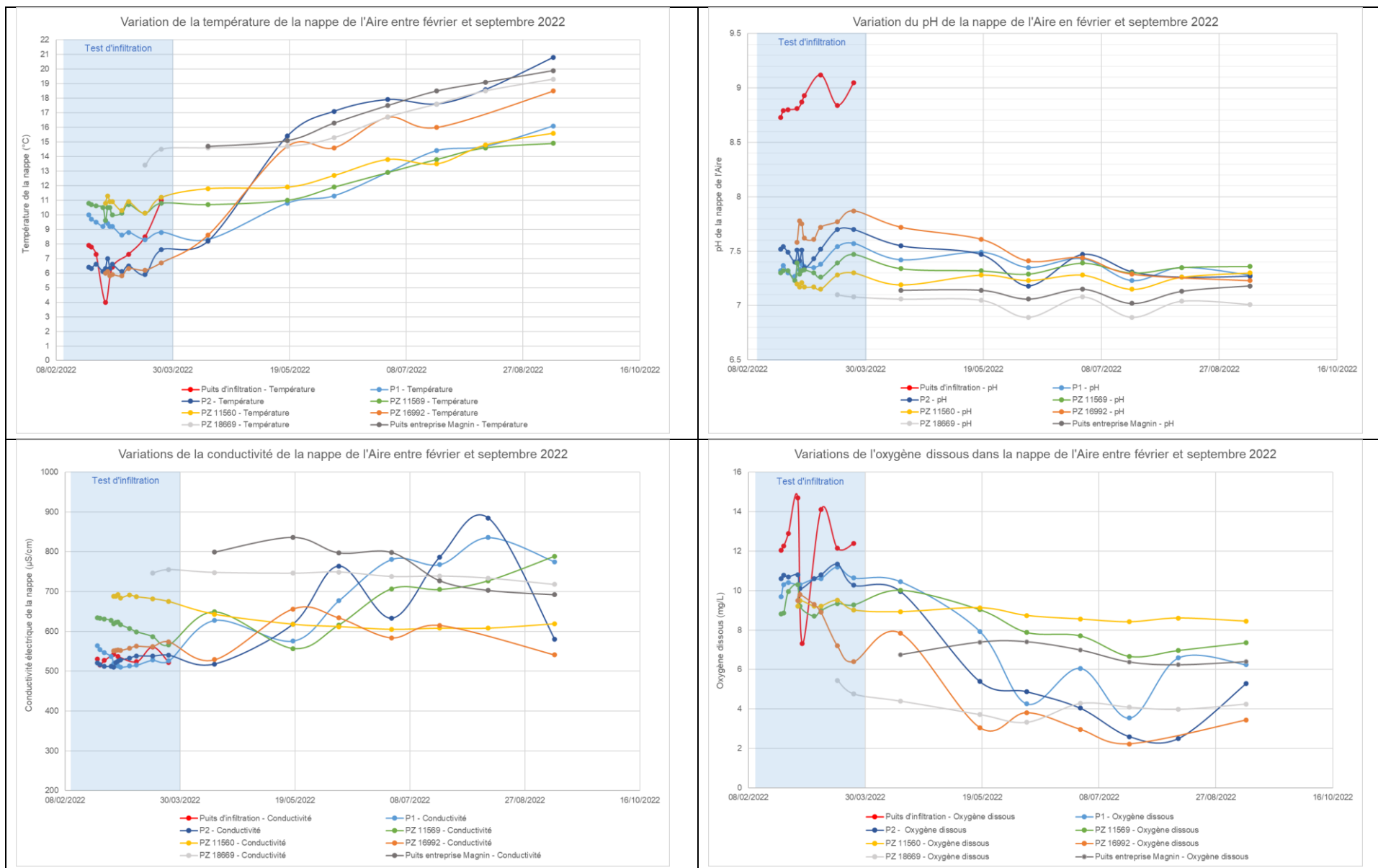


Figure 19 : Graphiques des mesures des paramètres physico-chimiques de la nappe



3.3 Suivi du niveau et de la température la nappe de l'Aire

Les variations du niveau et de la température de la nappe de l'Aire sont suivis en continu (pas de temps de 30 minutes), depuis le 30.12.2021, sur 4 ouvrages situés à proximité de l'Aire : le puits d'infiltration, les piézomètres P1 et P2 et le piézomètre 11'569.

3.3.1 Variations du niveau de la nappe de l'Aire

Le suivi du niveau de la nappe de l'Aire dans le secteur amont (Figure 20), montre que :

- Les variations sont synchrones au droit des piézomètres suivis ;
- Le battement de la nappe est de l'ordre d'un mètre et augmente en s'approchant de l'Aire, ce qui confirme la connexion entre la nappe et le cours d'eau, dans ce secteur ;
- Le graphique présente également le suivi du niveau de la nappe dans trois piézomètres situés à Certoux, effectué dans le cadre de la renaturation de l'Aire. Ces ouvrages réagissent de la même façon aux variations de la nappe, plus tamponnées en s'éloignant du cours d'eau.

Le suivi historique effectué par le GESDEC dans le PZ 15'569 indique que l'amplitude de la nappe peut atteindre environ 2.5 m dans ce secteur – voir Figure 1.

Suite à la remise en eau du nouveau lit de l'Aire le 30 mars 2022 (4^{ème} étape du projet sur le linéaire entre le pont de Certoux et la frontière française), les variations piézométriques de la nappe sont directement marquées par les crues de l'Aire. En particulier, le 8.04.2022, la crue de l'Aire (10.1 m³/s) a engendré une remontée de la nappe dans les piézomètres suivis, plus marquée sur les ouvrages proches du cours d'eau. Ce phénomène ne semblait pas aussi marqué lors de la crue du 9.01 (env. 8 m³/s) qui n'a pas engendré de hausse significative des niveaux de la nappe.

3.3.2 Variations de la température de la nappe de l'Aire

Le suivi des variations de la température de l'Aire, dans le secteur amont (Figure 21), montre que :

- Les variations de température dans la nappe dans le puits d'infiltration et le piézomètre P2 (le plus proche du cours d'eau) suivent les variations de température de l'Aire ;
- Ces fortes variations sont liées aux fluctuations de la température extérieure et confirment la connexion entre la nappe et le cours d'eau ;
- En s'éloignant du cours d'eau, les variations de température diminuent : les piézomètres P1 et PZ 11'569 présentent des variations plus faibles et tamponnées, caractéristiques des nappes d'eau souterraines superficielles.

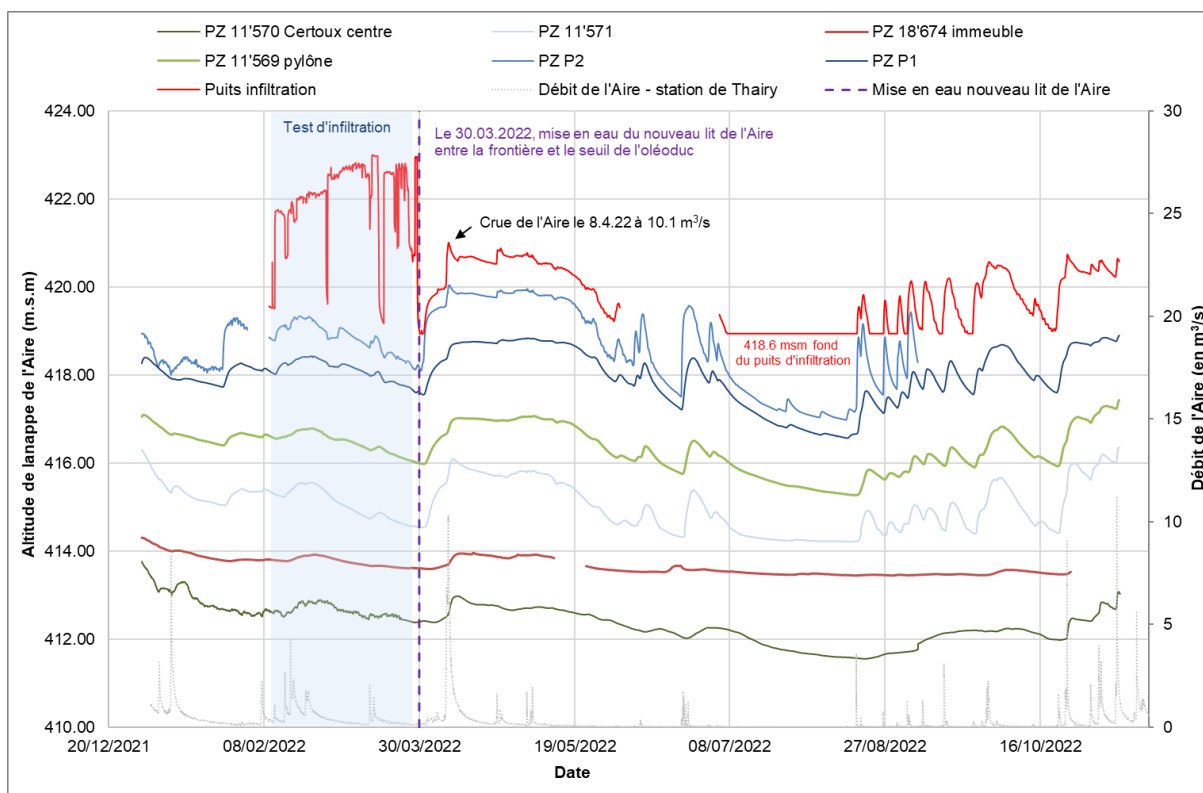


Figure 20 : Evolution du niveau de l'Aire entre fin décembre 2021 et novembre 2022

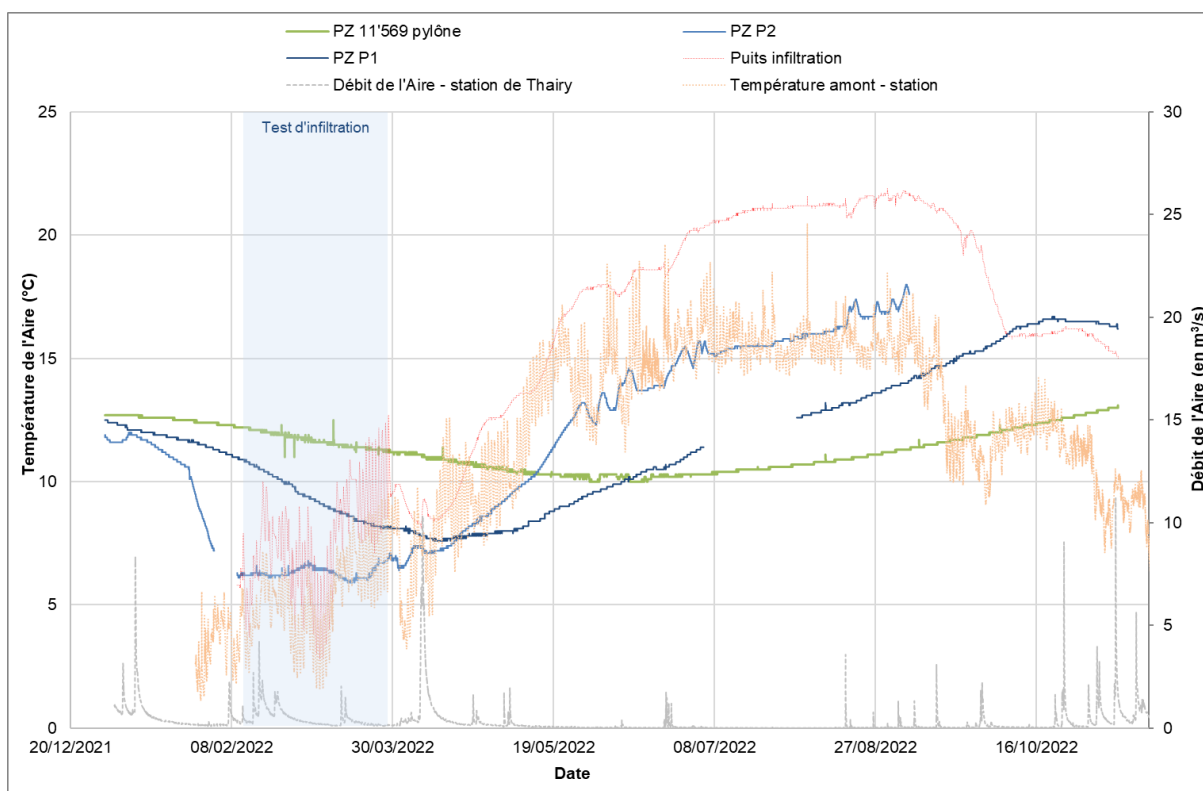


Figure 21 : Evolution de la température de l'Aire entre fin décembre 2021 et novembre 2022



3.4 Campagnes piézométriques synchrones

Afin de préciser les écoulements de la nappe de l'Aire à l'échelle de la zone étudiée, une campagne de mesures du niveau de la nappe a été réalisée dans tous les piézomètres accessibles le 06.02.2022, dans une situation de hautes eaux.

En complément, une moyenne des cotes piézométriques mesurées par le GESDEC au mois de septembre (basses eaux), entre 2012 et 2021, a été calculée sur 10 piézomètres de la plaine de l'Aire pour caractériser l'écoulement de la nappe en période de basses eaux. En effet, les mesures de terrain du 16.08.2022 n'ont pas pu être exploitées car une crue de l'Aire a provoqué la hausse du niveau de la nappe à proximité du cours d'eau.

Le résultat de ces campagnes est présenté dans le Tableau 3.

Points d'observation (Piézomètres)	Cote mesurée le 06.02.2022 (en m.s.m)	Cote mesurée le 16.08.2022 (en m.s.m)	Moyenne des mesures basses eaux du GESDEC (en m.s.m)
11784 – PZ 257	420.43		
11564 – PZ 227	418.44		
11559 – PZ 222	417.11	416.00	
11561 – PZ 224	416.63		
11560 – PZ 223	416.16	415.41	
11569 – PZ 232	416.62	415.28	415.27
16992	417.70		
11592 – PZ 248	417.94		
11570 – PZ 233	416.20	414.7	414.87
11571 – PZ 234	415.46	414.22	
16993	415.27		
11562 – PZ 225	414.42	413.08	
18674	413.80	413.45	
18676	414.04		
18675	413.80		
16994	412.74	411.57	
11567 – PZ 230	411.96	411.65	411.60
18669	411.60		
14950	409.78		
18668	409.10		
11568 – PZ 231	412.43		411.33
11779 – PZ 252	407.83		407.71
11572 – PZ 235	408.11		407.96
11573 – PZ 236	407.12		406.69
Puits P1	413.67	412.39	
12433 – PZ 385			405.76
11575 – PZ 238	405.96		405.33
PZ P1		416.66	
PZ P2		417.18	
11566 – PZ 229			411.70

Tableau 3 : Mesures piézométriques réalisées en 2022 sur la nappe de l'Aire

La carte piézométrique (Figure 22) illustre les mesures de terrain du 06.02.2022 (période de hautes eaux) et les mesures du 01.09.2022 (période de basses eaux) et présente les isopièzes de la nappe en période de hautes eaux.

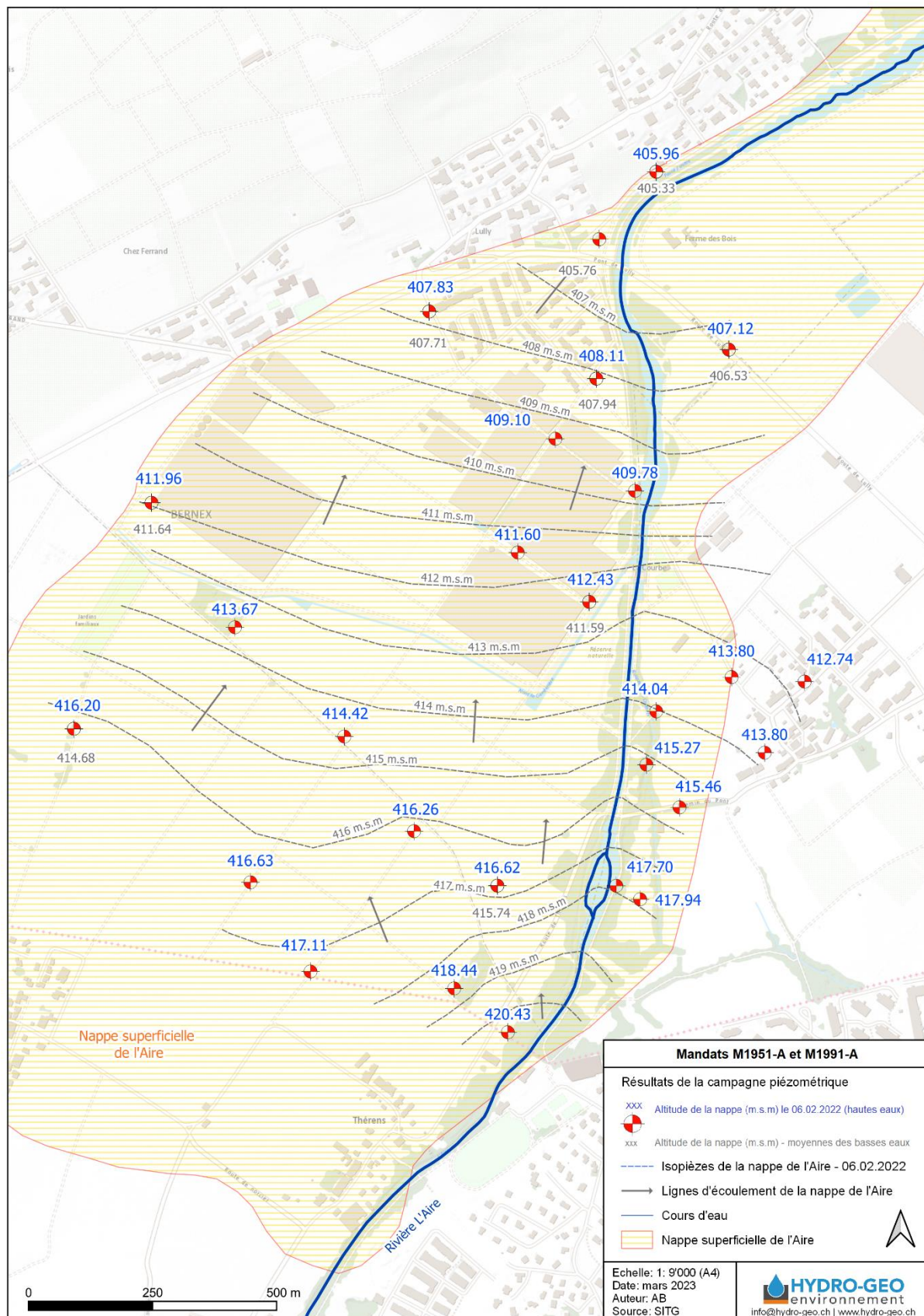


Figure 22 : Carte piézométrique de la nappe de l'Aire



Ces mesures piézométriques ont permis d'appréhender les variations d'écoulement de la nappe au cours d'une année hydrologique et les changements éventuels des relations entre la nappe et l'Aire.

Elles confirment l'écoulement global de la nappe de l'Aire vers le nord-nord-est avec un gradient hydraulique moyen d'environ 8.2 ‰ en période de hautes eaux et 7.4 ‰ en période de basses eaux (voir carte piézométrique en Figure 22).

L'amplitude de la nappe est plus importante en bordure sud et sud-ouest de la nappe (amont), elle est réduite à moins de 20 cm au nord de la nappe (aval), ce qui est cohérent avec les résultats du suivi interannuel effectué par le GESDEC (Figure 1).

La carte piézométrique permet également de montrer que :

- Dans la partie amont, la nappe de l'Aire est alimentée par le cours d'eau ;
- Plus à l'aval, l'inflexion des isopièzes montre que la nappe alimente le cours d'eau. Les mesures piézométriques corroborent les observations de terrain effectuées en basses eaux.

Les mesures piézométriques synchrones de la nappe ainsi que les observations des pertes/gains dans l'Aire à l'été 2022 confirment que les relations entre la nappe et le cours d'eau sont constantes au cours de l'année hydrologique.



4 Modélisation hydrodynamique

Une modélisation hydrodynamique de la nappe de l'Aire a été réalisée à partir du logiciel Feflow 7.5 afin d'effectuer des simulations d'exploitation de la nappe avec :

- La prise en compte des relations nappe-rivière le long du tronçon étudié ;
- La simulation d'une recharge artificielle de la nappe pour évaluer l'impact positif du stockage saisonnier ;
- La simulation d'une exploitation thermique de la nappe permettant d'orienter l'exploitation vers la solution la moins impactante pour le milieu.

Le modèle conceptuel a été validé au cours d'une séance technique, le 30.06.2022.

La construction du modèle, son calage ainsi que les résultats obtenus sont présentés en Annexe 6 sous la forme d'un compte-rendu de modélisation et simulation numérique.

La simulation des écoulements souterrains s'effectue en 3 dimensions monocouche, en condition de milieu saturé « non confiné » (la surface de la couche suit la piézométrie de la nappe).

4.1 Construction du modèle géologique

Le modèle numérique se base sur la géométrie connue de l'aquifère (toit/base des graviers et sables aquifères à partir de 98 logs de sondages), ses caractéristiques hydrodynamiques (champs de perméabilité évalués au cours des tests hydrogéologiques dans la zone d'étude) et les hypothèses de conditions aux limites utilisées pour reproduire au mieux le fonctionnement de la nappe de l'Aire.

Le périmètre du modèle comprend toute la plaine de l'Aire et s'étend de Thairy, à l'amont, jusqu'au dernier piézomètre suivi à l'aval (PZ 11'579). Latéralement, le modèle comprend le secteur de Perly-Certoux centre, à l'est.

La Figure 23 présente les conditions limites utilisées dans le modèle :

- Hauteur d'eau imposée sur l'Aire (Condition de Dirichlet – potentiel imposé) :
 - o MNT en période de hautes eaux, soit de 401.62 à 430.50 m.s.m
 - o MNT - 0.35 m en période de basses eaux, soit de 401.27 à 340.46 m.s.m
- Hauteur d'eau imposée sur le fossé de la Genévière (Condition de Dirichlet - potentiel imposé) :
 - o De 410.61 à 414.46 m.s.m (hautes eaux)
 - o De 410.46 à 414.11 m.s.m
- Recharge de la nappe : infiltration efficace en période de hautes eaux fixée à 0.318 mm/j (cette évaluation a été réalisée à partir du logiciel ESPERE du BRGM)
- Pompage de la nappe dans les puits agricoles (Condition de puits) :
 - o Puits de l'entreprise Jaquenoud : pompage fixe à 0.5 L/s (pour le modèle hautes eaux – février 2022) et 3.6 L/s (pour le modèle basses eaux – niveaux piézométriques intermédiaires)
 - o Puits de l'entreprise Magnin : pompage fixe à 0.5 L/s

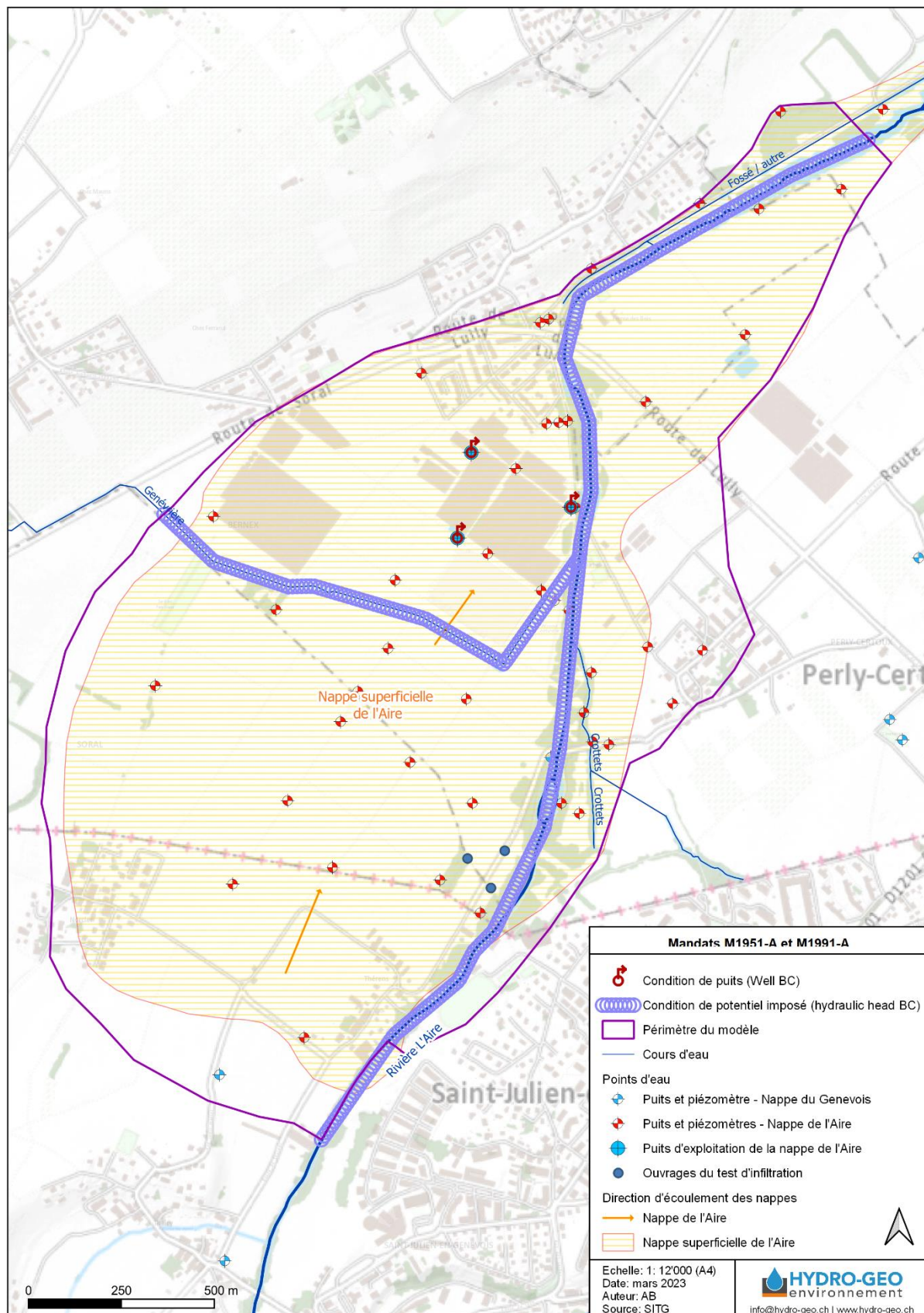


Figure 23 : Périmètre de modélisation et conditions limites

4.2 Calibration du modèle

Afin de reproduire le plus justement possible les écoulements dans le périmètre d'étude, trois calages ont été effectués :

- En permanent – calage des niveaux d'eau à partir des mesures piézométriques synchrones en période de hautes eaux, effectuées en février 2022 sur 25 piézomètres de la zone d'étude ;
- En permanent – calage des niveaux d'eau à partir des cotes piézométriques moyennes en période de basses eaux, sur 10 piézomètres de la zone d'étude ;
- En transitoire – reproduction de l'essai d'infiltration avec coloration, réalisé en février et mars 2022.

Les valeurs de conductivité hydrauliques appliquées au modèle sont issues des résultats des tests hydrogéologiques effectués sur 16 puits/piézomètres captant la nappe de l'Aire.

Les conductivités hydrauliques sont hétérogènes à l'échelle de la nappe, comprises entre $1,2 \cdot 10^{-3}$ et $2 \cdot 10^{-5}$ m/s (voir Figure 24).

La valeur de conductivité hydraulique verticale $K_{zz} = K_{xx}/10$ (anisotropie communément acceptée pour les aquifères alluviaux).

Une bande de conductivité plus faible a été appliquée au modèle le long de l'Aire pour modéliser les pertes de charges observées avec la nappe.

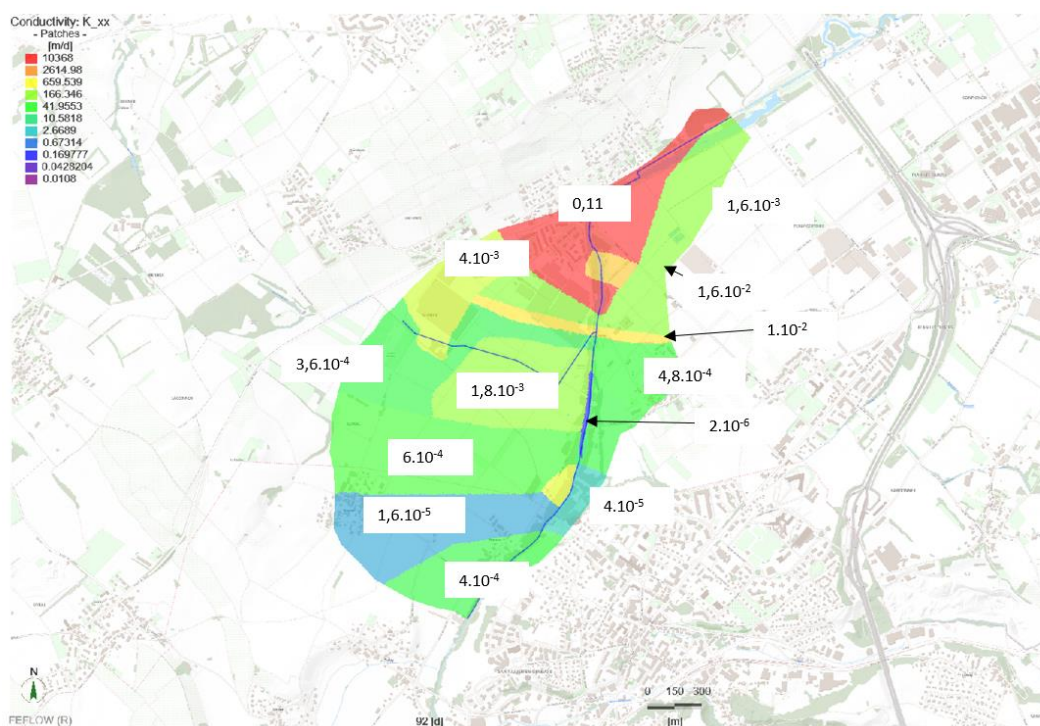


Figure 24 : Distribution des conductivités hydrauliques sur le périmètre d'étude

4.2.1 Calibration en régime permanent

La calibration du modèle a été réalisée en période de hautes et basses eaux sur la base de mesures piézométriques synchrones à l'échelle du modèle.

La différence entre les valeurs observées et simulées est indiquée par un plot d'erreur dont les valeurs maximales sont de 1 m.

La calibration est considérée comme satisfaisante.

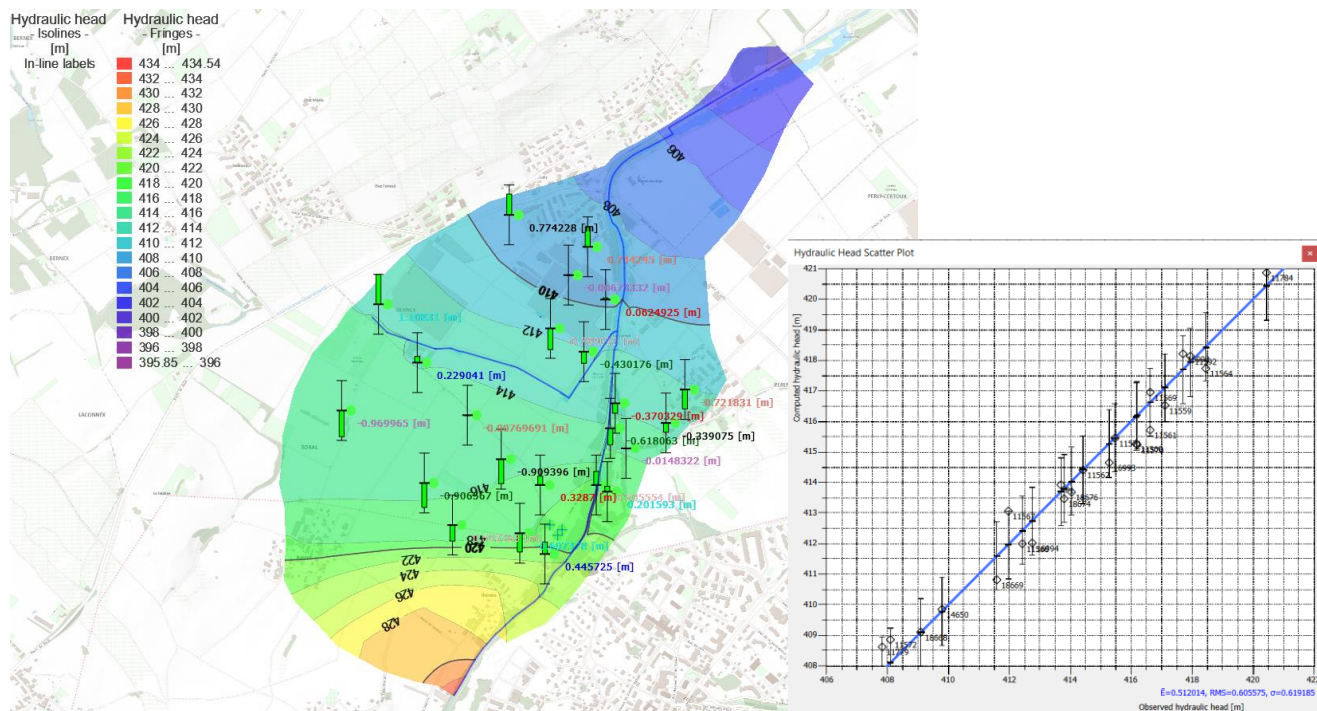


Figure 25 : Répartition des charges hydrauliques simulées et observées – hautes eaux 2022

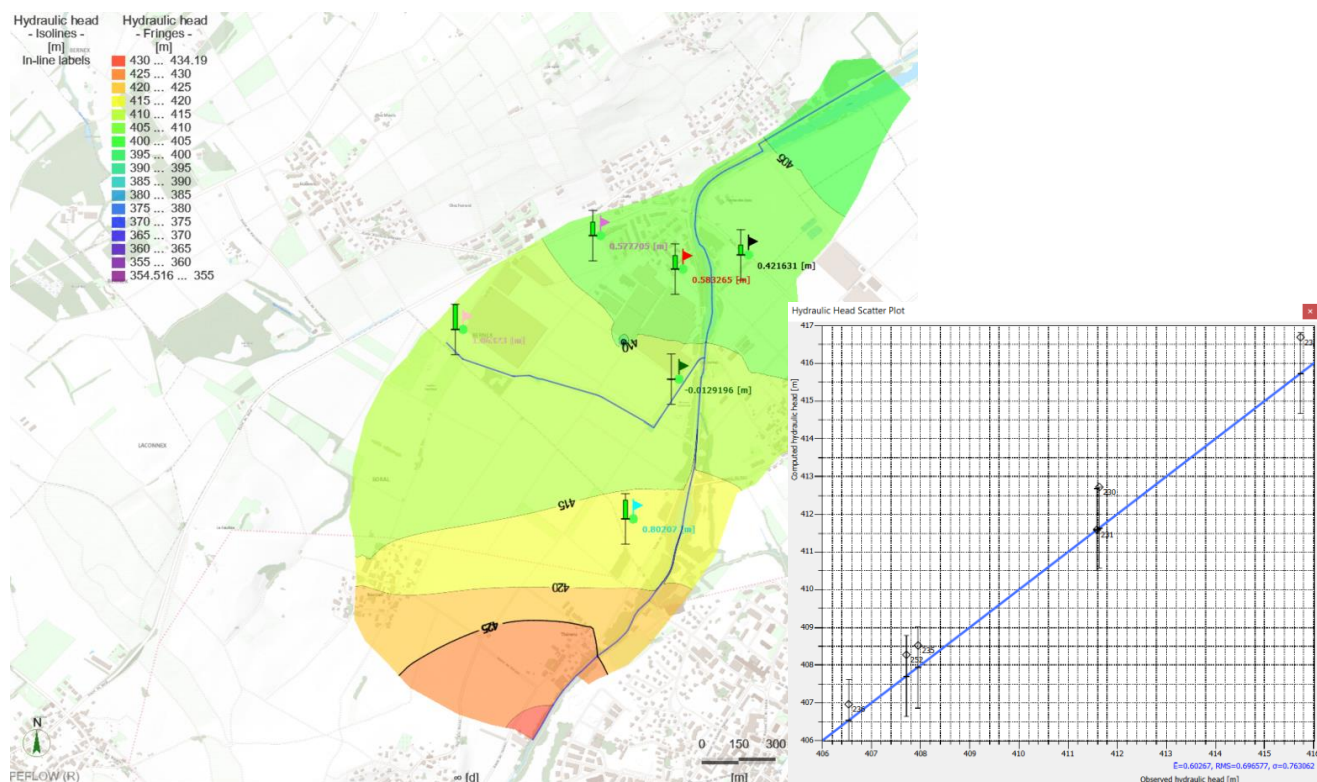


Figure 26 : Répartition des charges hydrauliques simulées et observées – basses eaux 2021



4.2.2 Calibration du modèle en régime transitoire

Les résultats du test d'infiltration avec coloration ont été utilisés pour calibrer les écoulements dans la zone amont du modèle, en régime transitoire :

- Débit d'infiltration : 10 L/s pendant 1176 heures (soit 47 jours) ;
- Injection du colorant (fluorescéine) dans le puits d'infiltration le 18.02.22, soit une semaine après le lancement du test d'infiltration ;
- Dans le puits d'infiltration, la remontée moyenne mesurée sur le terrain est de 3 m, comparable à la hausse simulée par le modèle (Figure 27) ;
- Dans les piézomètres d'observation P1, P2 et PZ 11'569, la remontée du niveau d'eau mesurée sur le terrain est d'environ 50 cm, la hausse simulée approche 1 m dans le modèle (erreur de 50 cm) (Figure 27) ;
- La calibration du modèle a été effectuée à partir de l'évolution de la concentration en fluorescéine dans le piézomètre P1 : le maximum de concentration est mesuré le 01.03.2022 (Figure 28).

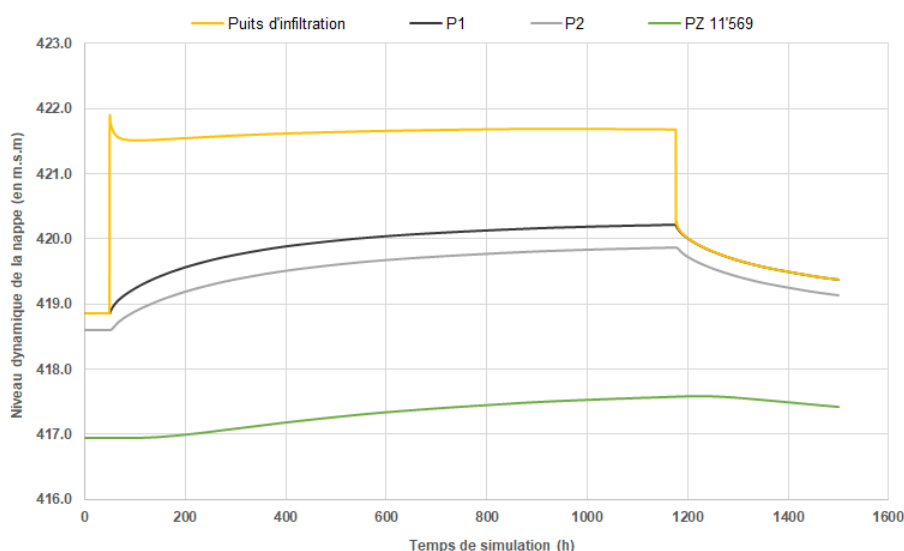


Figure 27 : Evolution des charges hydrauliques simulées au cours du test d'infiltration

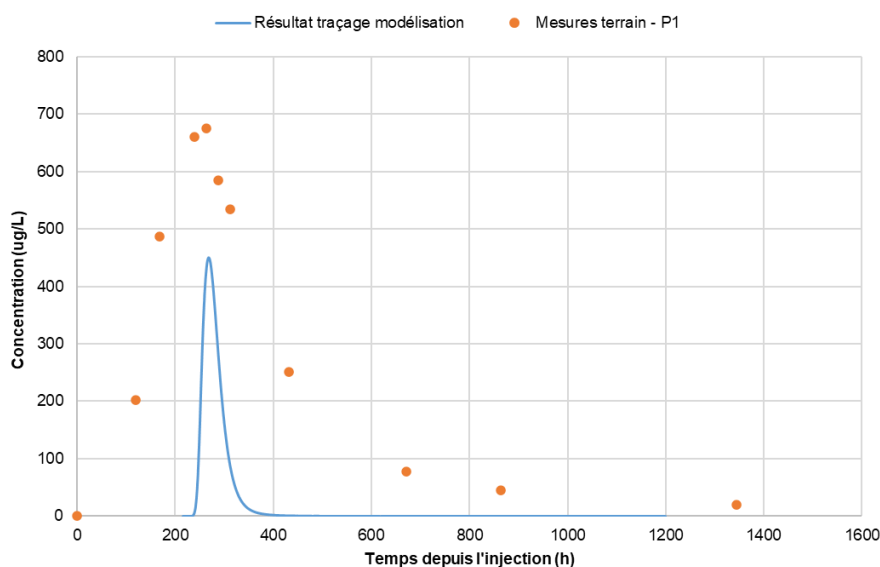


Figure 28 : Evolution des concentrations en fluorescéine au cours du test de traçage.
Valeurs simulées vs. mesures de terrain

4.3 Simulation de l'infiltration artificielle de l'eau de l'Aire dans la nappe

De manière à vérifier la faisabilité d'une infiltration artificielle de l'eau de l'Aire dans la nappe pour du stockage saisonnier, plusieurs scénarios de simulation ont été réalisés :

- Infiltration simulée à 100 m de l'Aire (à proximité du puits d'infiltration existant), à 600 m ou à 900 m de l'Aire (au droit de la future chaudière CAD Lully) (Figure 29) ;
- Variation du débit d'injection de 10 L/s à 100 L/s ;
- Infiltration simulée sur une période de 90 jours ;
- Simulation des variations du niveau de la nappe pendant 12 mois après l'injection.

Le détail des scénarios modélisés et les résultats associés sont présentés en Annexe 6.

Les résultats du modèle ont permis de quantifier l'impact du débit et de l'emplacement de la recharge sur le niveau de la nappe et la réalimentation de l'Aire (Figure 30).



Figure 29 : Localisation des sites d'infiltration pour les scénarios de simulation

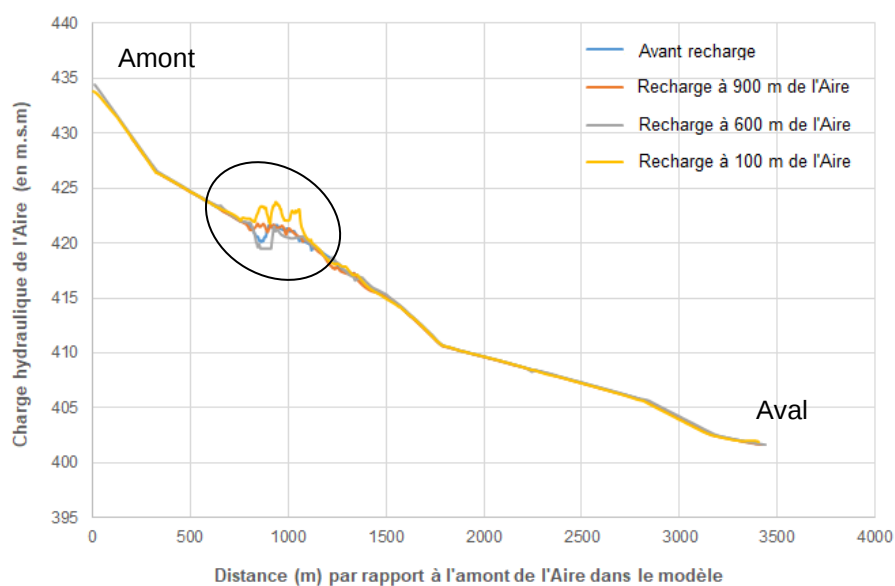


Figure 30 : Evolution de la charge hydraulique le long de l'Aire lors de la recharge artificielle



Les résultats de modélisation permettent de mettre en évidence plusieurs points sur le comportement de la nappe, suite à une injection d'eau de plusieurs mois :

- L'évolution de la charge hydraulique simulée le long de l'Aire lors de la recharge artificielle, pour les 3 sites de recharge, montre une exfiltration de la nappe au niveau de la passerelle des Bis (Figure 30) ;
- Le niveau de la nappe est plus élevé que l'Aire et permet une réalimentation de la rivière ;
- Plus le débit et le temps d'injection dans la nappe sont importants, plus le stockage engendré peut jouer son rôle d'apport hydraulique lors des périodes d'étiage ;
- Les simulations indiquent un temps de transfert vers l'Aire de l'eau injectée de l'ordre de 150 à 250 jours, soit environ 5 à 8 mois ;
- L'impact de l'injection, après son arrêt, est relativement long et pourrait permettre une alimentation plus importante de l'Aire sur certains tronçons ;
- La recharge artificielle ne semble pas influencer notablement le niveau de la nappe à l'aval, au droit des habitations de Lully ;
- Le fossé de la Genévrière draine la nappe en basses et hautes eaux selon le modèle, son rôle n'est pas encore clairement défini et mal contraint par le modèle. Des investigations complémentaires sont nécessaires pour mieux appréhender son rôle sur l'écoulement de la nappe.

Le dôme piézométrique significatif simulé par l'infiltration artificielle permet donc d'avoir un volume d'eau disponible dans le réservoir aquifère plus important. Ce stockage se manifeste également par un déphasage hydraulique entre le moment où l'eau est injectée dans le réservoir et son exfiltration dans l'Aire.

Ces résultats positifs tendent à **confirmer la faisabilité d'utiliser la nappe de l'Aire pour du stockage saisonnier.**



4.4 Simulation de l'exploitation thermique de la nappe

Afin de vérifier la faisabilité du fonctionnement d'une PAC sur la nappe de l'Aire pour alimenter le futur CAD Lully, tout en respectant les éléments légaux en vigueur³, un scénario d'exploitation thermique a été simulé sur une durée de 30 ans : Le dispositif est constitué d'un puits de pompage et de 10 puits de rejet, distants de 354 m, exploitant la nappe de l'Aire au débit nominal de 800 L/min pour une puissance de chaud de 167 kW et un ΔT de fonctionnement de 3K.

Le détail du scénario modélisé est présenté en Annexe 6.

4.4.1 Scénario d'exploitation simulé

La répartition mensuelle des besoins énergétiques (part source froide en kWh/mois), le débit mensuel (en L/min) et le delta T (°C) pris pour la simulation sont présentés dans le Tableau 4.

	Débit typique logement	Débit hydraulique	ssance de la F	Delta T
Unité	%	L/min	kWh/mois	°C
Janvier	80	640	99517	-3
Février	80	640	89887	-3
Mars	60	480	74638	-3
Avril	40	320	48154	-3
Mai	10	80	12440	-3
Juin	10	80	12038	-3
Juillet	10	80	12440	-3
Août	10	80	12440	-3
Septembre	10	80	12038	-3
Octobre	40	320	49759	-3
Novembre	80	640	96307	-3
Décembre	80	640	99517	-3
Annuel	43	340	622 486	-3

Tableau 4 : Répartition mensuelle des besoins de la PAC pour intégration dans le modèle

4.4.2 Hypothèses retenues pour les simulations thermiques

Les hypothèses suivantes ont été retenues pour la simulation des scénarios d'exploitation :

- La température initiale de la nappe est constante et fixée à 11°C ;
- Les conditions limites de Dirichlet (températures imposées) ont été fixées à 11°C ;
- Le modèle ne tient donc pas compte des variations saisonnières importantes de la température de l'eau souterraine ;
- Les chroniques d'exploitation types (débits et températures) sont répétées cycliquement sur une période de 30 ans ;
- Les paramètres thermiques utilisés pour les simulations sont présentés en Tableau 5.

³ L'annexe 2, ch. 21, OEaux pose les exigences générales concernant la qualité des eaux souterraines. Selon l'al. 3, l'apport ou le prélèvement de chaleur ne doit pas modifier la température des eaux souterraines de plus de 3°C par rapport à l'état nature au-delà de 100 m du point d'injection ; La variation peut être supérieure à 3°C aux alentours immédiats, soit dans un rayon de 100 m au maximum.

Propriété physique	Notation	Valeur	Unité
Capacité calorifique volumique du solide	$\rho^s c^s$	$2,52 \times 10^6$	$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
Conductivité thermique du solide	λ^s	3	$J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$
Capacité calorifique volumique du fluide	$\rho^f c^f$	$4,18 \times 10^6$	$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
Conductivité thermique du fluide	λ^f	0,60	$J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$
Dispersivité longitudinale	α_L	5	m
Dispersivité transversale	α_T	0,5	m

Tableau 5 : Propriétés physiques utilisées dans le modèle

4.4.3 Localisation des puits d'exploitation dans le modèle

Les puits d'exploitation ont été positionnés à proximité la future chaufferie CAD de Lully (voir localisation en Figure 31).

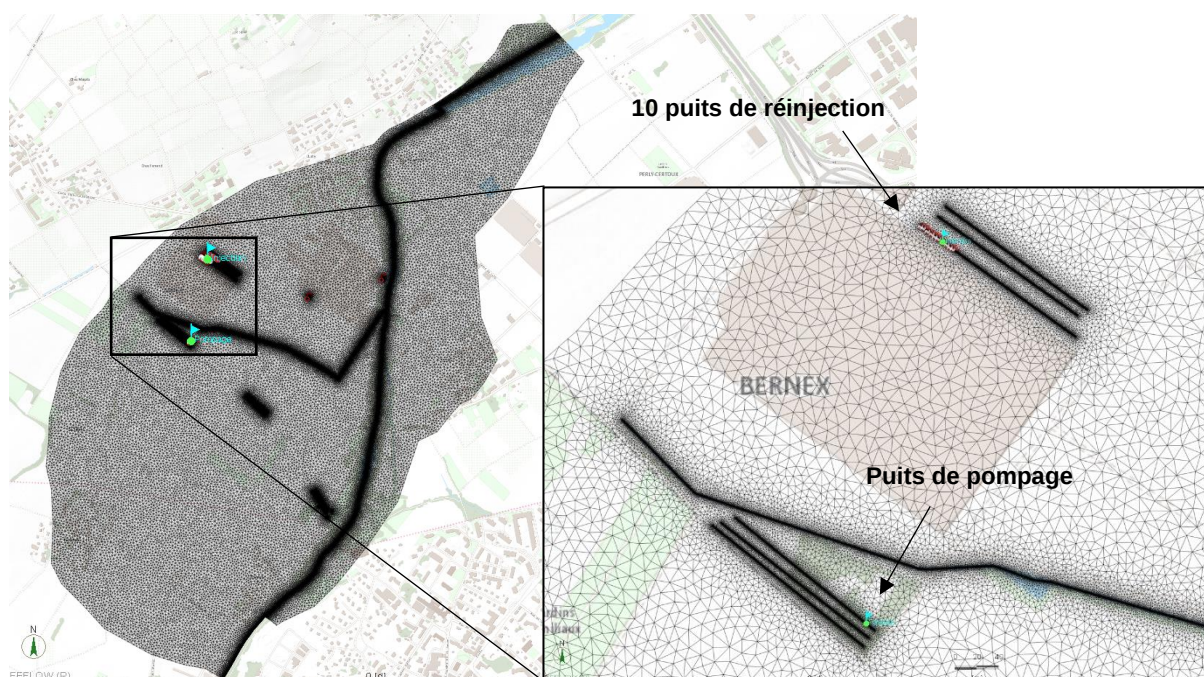
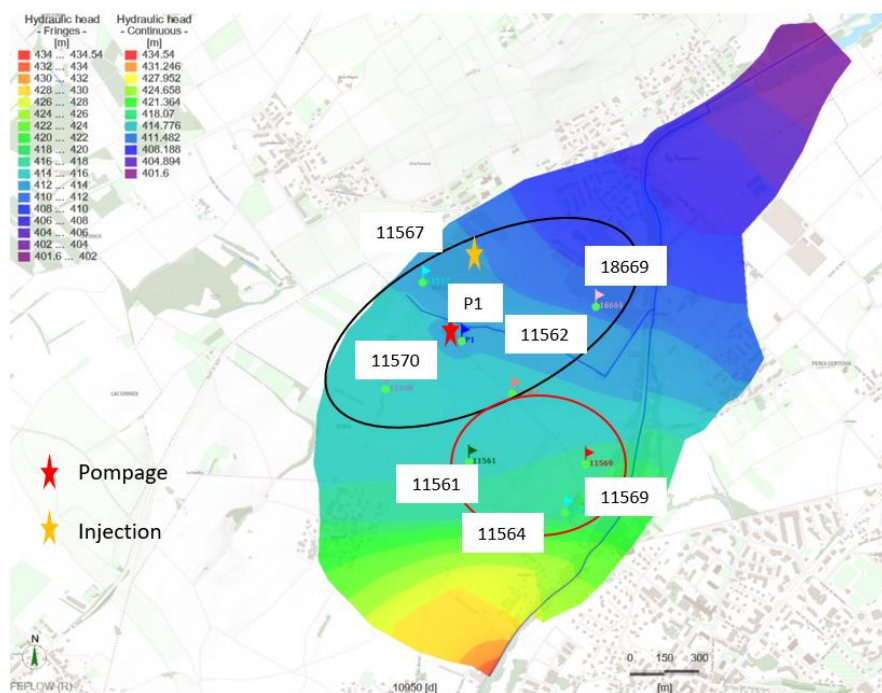


Figure 31 : Localisation des puits de l'installation géothermique simulée

4.4.4 Résultats hydrauliques et thermiques

Les résultats de la modélisation de l'exploitation thermique de la nappe pendant 30 ans appellent les commentaires suivants :

- L'exploitation de la nappe engendre une remontée de 0.1 m à 1 m dans le puits d'injection et un rabattement de 0.40 à 2 m dans le puits de pompage ;
- Le niveau simulé de la nappe est influencé par le fonctionnement de l'installation géothermique de façon plus ou moins marquée selon le secteur (Figure 32) ;
- L'exploitation thermique engendre une bulle thermique qui atteint le puits de pompage au bout de 4 ans et l'Aire au bout de 9 ans (Figure 33) ;
- Les températures simulées de cette bulle varient entre 10.3 et 7.2°C et ;
- Environ 100 m à l'aval du puits de rejet, la température simulée de la nappe serait d'environ 7.6°C après 30 ans d'exploitation (soit un ΔT de 3.4°C) ;
- La température globale de la nappe diminue de 1°C après 30 ans d'exploitation.



-  Zone dont le niveau de la nappe varie de manière annuelle en fonction du débit de réinjection de la PAC durant les 30 ans : 500 m au Nord Est et 300 m au Sud Ouest autour du puits de pompage.
-  Zone dont le niveau de la nappe diminue d'une dizaine de centimètres la première année puis se stabilise

Figure 32 : Secteurs influencés par l'installation géothermique simulée

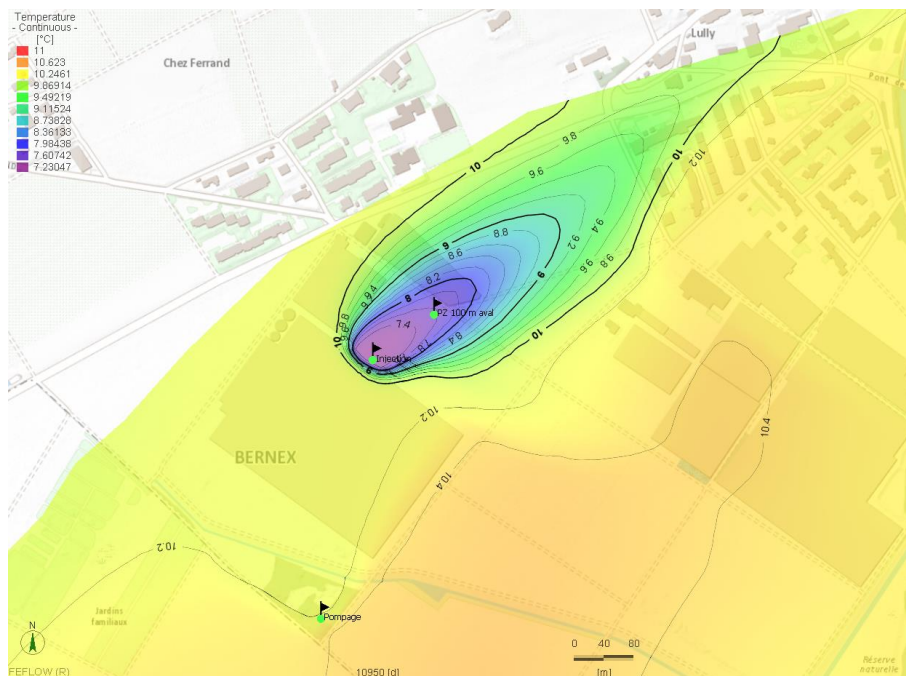


Figure 33 : Bulle thermique après 30 ans de fonctionnement de la PAC

Ces résultats positifs tendent à **confirmer la faisabilité d'utiliser la nappe de l'Aire pour une exploitation thermique par pompe à chaleur.**



4.5 Critique du modèle et propositions d'amélioration

Dans l'interprétation des résultats, il est **impératif de considérer que les simulations numériques effectuées ne constituent qu'une représentation simplifiée de la réalité.**

Le modèle hydrodynamique et thermique présente des forces et faiblesses qu'il convient de souligner pour permettre une analyse critique des résultats.

Les atouts du modèle sont :

- La caractérisation géométrique précise de l'aquifère de la nappe de l'Aire, à partir de l'analyse d'une centaine de logs de forages dans la zone d'étude ;
- Le nombre important de données disponibles sur la conductivité hydraulique de la nappe, caractérisée à partir de tests hydrogéologiques dans la zone d'étude ;
- La calibration du modèle en régime permanent (en situation de hautes eaux) sur la base d'une piézométrie synchrone robuste, réalisée sur une trentaine de piézomètres dans le périmètre du modèle ;
- La calibration du modèle en régime transitoire à partir du test d'infiltration de plus de 47 jours (fréquence de mesures élevée, suivi piézométrique des ouvrages alentours) ;
- La calibration du modèle sur le suivi du traçage à la fluorescéine (écoulement massique) pendant 5 mois après l'arrêt du test d'infiltration ;
- La prise en compte simplifiée des relations entre la nappe et la rivière sur le tronçon étudié ainsi que la prise en compte de la recharge par les précipitations efficaces, estimées à partir du logiciel ESPERE du BRGM.

Les limites du modèle sont :

- La schématisation des champs de conductivité hydraulique appliqués pour reproduire l'écoulement de la nappe ;
- La simplification de la recharge de la nappe et du niveau de l'Aire (invariables dans le temps) ;
- La simplification des prélèvements dans la nappe de l'Aire ;
- Les conditions d'exploitation géothermique simplifiées : les débits d'exploitation théoriques mensuels estimés et les températures d'injection.

Les résultats présentés doivent donc être interprétés avec prudence. Nous recommandons au maître d'ouvrage et à ses mandataires de réaliser un suivi sur le long terme des températures et des débits prélevés et restitués à la nappe.

Enfin, les pistes d'amélioration du modèle sont les suivantes :

- La prise en compte de chroniques de précipitation et de hauteur d'eau dans la rivière ;
- L'amélioration des connaissances sur les prélèvements dans la nappe ;
- L'amélioration de la prise en compte des relations nappe-rivière le long du tronçon du cours d'eau.



5 Synthèse

En avril 2021, une réflexion a été initiée par l'OCEau et SIG sur l'utilisation de l'eau de l'Aire en crue (en hiver majoritairement et dans le secteur de son entrée sur territoire suisse), pour du stockage saisonnier dans la nappe de l'Aire, par infiltration artificielle.

Dans le cas de la nappe de l'Aire, le stockage artificiel de l'eau de surface dans l'aquifère permettrait une utilisation différée de la ressource en eau souterraine pour :

- Renforcer, plus à l'aval, le soutien d'étiage du cours d'eau, sujet aux assecs et à des températures élevées en période estivale ;
- Augmenter la quantité d'eau disponible dans la nappe pour une exploitation thermique par pompe à chaleur ;
- Augmenter la quantité d'eau disponible dans la nappe pour un usage d'irrigation maraîchère en été ;

La présente étude a permis d'évaluer la faisabilité du projet de recharge artificielle de la nappe à partir des crues de l'Aire. Pour ce faire, des investigations hydrogéologiques de terrain ainsi qu'une modélisation hydrogéologique ont été réalisées entre octobre 2021 et septembre 2022.

Evaluation des relations nappe-rivière

Dans la partie amont de la zone étudiée, l'Aire s'écoule une soixantaine de mètres au-dessus de la nappe du Genevois. Plus à l'aval, entre la frontière et le pont de Lully, elle s'écoule en relation avec la nappe de l'Aire.

Plusieurs campagnes d'observations du débit par notre bureau en période d'étiage, entre mai et octobre 2022, ainsi que la campagne de jaugeage de l'OCEau d'octobre 2020, ont permis de préciser la dynamique entre le cours d'eau et les nappes présentes dans la zone d'étude.

Il ressort que les échanges entre la rivière et les nappes sont variables le long du cours d'eau : les pertes de l'Aire percolent vers la nappe du Genevois entre Thairy et Thérrens, alimentent la nappe de l'Aire entre la frontière et le couvert de Certoux ou drainent la nappe de l'Aire entre le couvert de Certoux et le Pont de Lully.

Test d'infiltration avec coloration

Le test d'infiltration avec coloration a été réalisé du 11.02.2022 à 10h30 au 29.03.2022 à 08h30 afin de vérifier la faisabilité d'infiltrer un débit en continu dans la nappe de l'Aire, en bordure du cours d'eau, de déterminer les vitesses de déplacement de la nappe mais également de permettre une calibration dynamique du modèle numérique.

Le test d'infiltration a confirmé la capacité de l'aquifère à infiltrer 10 à 12 L/s en continu dans la nappe de l'Aire pendant presque 50 jours, à partir d'un unique puits d'un diamètre de 0.8 m. Il a aussi montré la connexion entre la nappe et le cours d'eau dans ce secteur.

La vitesse de transit de l'eau souterraine a pu être calculée à partir du suivi de la concentration en fluorescéine dans les piézomètres P1 et PZ 11'569 :

- La vitesse moyenne de transit est évaluée à 0.3 m/h soit 7.2 m/j ;
- La vitesse maximale serait d'environ 1.4 m/h en direction de P1 et presque 2 fois supérieure en direction de P2 (2.7 m/h).



Suivi piézométrique de la nappe

Les variations du niveau et la température de la nappe de l'Aire ont été suivies en continu, entre le 30.12.2021 et le 10.11.2022, sur 4 ouvrages situés en bordure de l'Aire : le puits d'infiltration, les piézomètres P1 et P2 et le piézomètre 11'569.

En complément, afin de préciser les écoulements de la nappe de l'Aire à l'échelle de la zone étudiée, une campagne de mesures du niveau de la nappe a été réalisée à partir de l'ensemble des piézomètres accessibles le 06.02.2022 (situation de hautes eaux).

Les mesures effectuées confirment :

- L'écoulement global de la nappe de l'Aire vers le nord-nord-est avec un gradient hydraulique d'environ 8.2 ‰ en période de hautes eaux et 7.4 ‰ en basses eaux ;
- L'amplitude de la nappe plus importante en bordure sud de la nappe (amont), réduite à moins de 20 cm au nord de la nappe (aval), ce qui est cohérent avec le suivi interannuel effectué par le GESDEC ;
- La connexion entre la nappe et le cours d'eau dans le secteur amont (frontière), où les variations de niveau et de température sont plus importantes en direction de l'Aire.

Modélisation hydrodynamique de la nappe

Une modélisation hydrodynamique de la nappe de l'Aire a été réalisée à partir du logiciel Feflow 7.5 afin d'effectuer des simulations d'exploitation de la nappe avec :

- La prise en compte des relations nappe-rivière le long du tronçon étudié ;
- La simulation d'une recharge artificielle de la nappe pour évaluer l'impact positif du stockage saisonnier ;
- La simulation d'une exploitation thermique de la nappe permettant d'orienter l'exploitation vers la solution la moins impactante pour le milieu.

Afin de reproduire le plus justement possible les écoulements dans le périmètre d'étude, trois calages ont été effectués en régime permanent (campagnes piézométriques synchrones) et transitoire (reproduction de l'essai d'infiltration avec coloration).

Les résultats du modèle tendent à confirmer la faisabilité d'utiliser la nappe de l'Aire pour du stockage saisonnier :

- Plus le débit et le temps d'injection dans la nappe sont importants, plus le stockage engendré peut jouer son rôle d'apport hydraulique lors des périodes d'étiage ;
- Les simulations indiquent un temps de transfert vers l'Aire de l'eau injectée de l'ordre de 150 à 250 jours, soit environ 5 à 8 mois ;
- L'impact de l'injection, après son arrêt, est relativement long et pourrait permettre une alimentation plus importante de l'Aire sur certains tronçons ;
- La recharge artificielle ne semble pas influencer notablement le niveau de la nappe à l'aval, au droit des habitations de Lully.

Les résultats du modèle tendent également à confirmer la faisabilité d'utiliser la nappe de l'Aire pour une exploitation thermique par pompe à chaleur pour alimenter le futur CAD Lully :

- L'exploitation de la nappe à un débit nominal de 800 L/min n'engendre pas de dérive hydraulique importante ;



- L'exploitation thermique engendre une bulle thermique qui atteint le puits de pompage au bout de 4 ans et l'Aire au bout de 9 ans (Figure 33) ;
- Environ 100 m à l'aval du puits de rejet, la température simulée de la nappe serait d'environ 7.6°C, après 30 ans d'exploitation (soit un ΔT de 3.4°C par rapport à l'état initial) ;
- La température globale de la nappe diminue de 1°C après 30 ans d'exploitation.

6 Perspectives

Amélioration des connaissances sur les relations nappe-rivière

La destination des pertes de l'Aire reste incertaine entre la « grande ferme isolée » et la frontière franco-suisse. Des investigations complémentaires permettraient de mieux cerner les relations entre le cours d'eau et les nappes dans ce secteur, avec :

- La réalisation de jaugeages avec des profils intermédiaires, pour mieux localiser et quantifier les pertes (y compris en hautes eaux) ;
- La réalisation de reconnaissance géophysiques et/ou hydrogéologiques dans ce secteur, pour valider ou non la présence de protection imperméable au toit de l'alluvion ancienne, et ainsi mieux comprendre la destination des pertes de la rivière.

Evaluation de l'effet de la renaturation de l'Aire

Pour évaluer de l'effet de la renaturation du cours d'eau sur la recharge de la nappe de l'Aire, il serait pertinent de réaliser les prestations complémentaires suivantes :

- Poursuite du suivi du niveau et de la température de la nappe pendant 1 an sur une dizaine de piézomètres avec une analyse comparative des variations de la nappe à proximité du cours d'eau, avant et après les travaux de renaturation ;
- Suivi des paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine à une fréquence bimestrielle, pendant 1 an et dans une dizaine de piézomètres afin d'appréhender la variabilité de la qualité de la nappe par secteur et dans le temps ;
- Utilisation de l'analyse par cytométrie de flux pour déterminer l'impact du décolmatage du lit du cours d'eau sur la qualité microbiologique des eaux souterraines.

Rôle du Fossé de la Genévière sur la nappe de l'Aire

Afin de déterminer le rôle du fossé de la Genévière sur l'écoulement de la nappe, des investigations hydrogéologiques complémentaires devraient être menées : implantation de piézomètres à proximité du fossé, campagnes de jaugeages avec mise en place d'un déversoir à l'aval du fossé, suivi piézométrique en continu.

Perfectionnement du modèle hydrodynamique

Les pistes d'amélioration du modèle sont les suivantes :

- Prise en compte de chroniques de précipitation et de hauteur d'eau dans la rivière ;
- Précision des connaissances sur les prélèvements dans la nappe ;
- Amélioration de la prise en compte des relations nappe-rivière le long du tronçon du cours d'eau.



Petit-Lancy, le 8 juin 2023.

Hydro-Géo Environnement

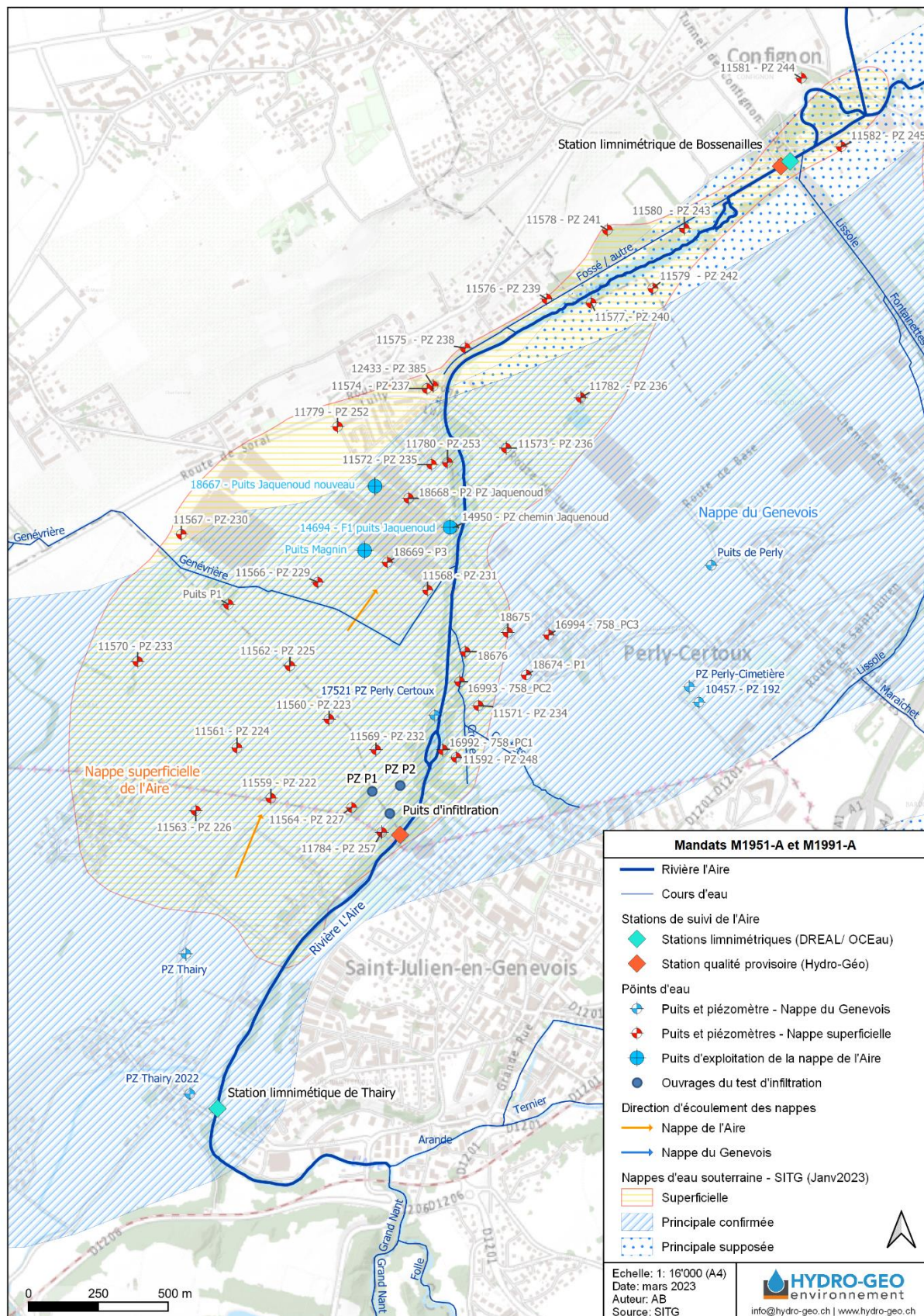
Ludovic Savoy

Marc Hottinger

Alexandra Bel



Annexe 1 : Carte de situation hydrologique et hydrogéologique





Annexe 2 : Logs géologiques et techniques des piézomètres P1 et P2

Projet : Alimentation artificielle nappe de l'Aire
Etude hydrogéologique de faisabilité
OCEau Renaturation/Secoe - SIG thermique



Date des travaux : 3-5.11.2021

Profondeur du forage : 7.8 m

Technique de forage : Carottage à sec

1286 Soral (GE)

Chemin du Loup

Parcelle n° 10572

Coordonnées : 2 494516 / 1 111946

Cote TN : 422.4 m.s.m.

Entreprise de forage : Augsburg

Réf. forage : F1

Propriétaire : DP communal

MO : OCEau / SIG

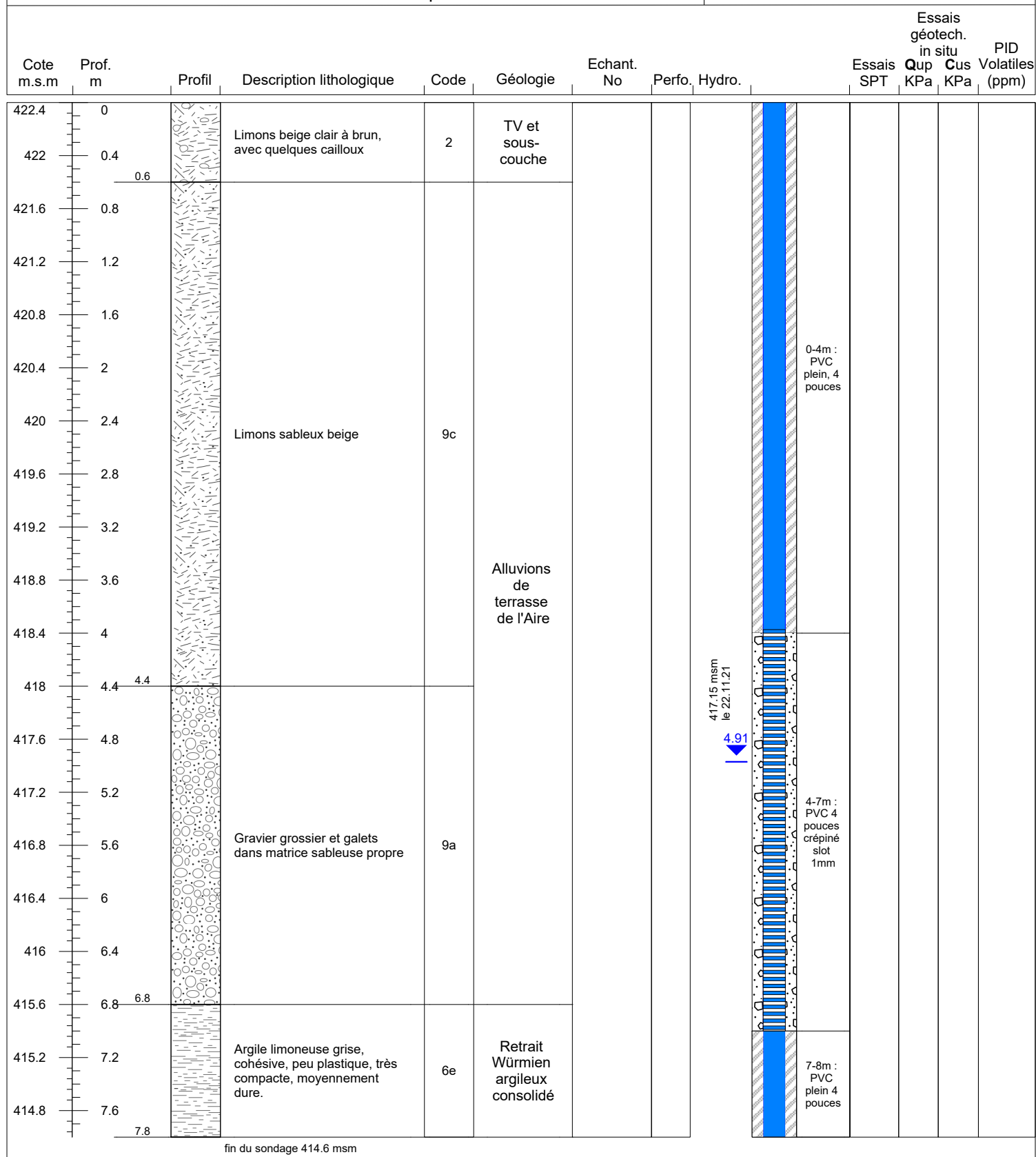
Remarques :

Equipement : piézomètre

Alt. tube piézométrique : 422.06 msm

Diamètre perforation : 168 mm

Diamètre piézomètre : 4"



Projet : Alimentation artificielle nappe de l'Aire
Etude hydrogéologique de faisabilité
OCEau Renaturation/Secoe - SIG thermique



Date des travaux : 8-10.11.2021
Profondeur du forage : 6 m
Technique de forage : Carottage à sec

1233 Bernex (GE)
Route de Thérans
Parcelle n° 7671

Coordonnées : 2 494617 / 1 111965
Cote TN : 421.4 m.s.m.

Entreprise de forage : Augsburg
Réf. forage : F2

Propriétaire : DP communal
MO : OCEau / SIG

Remarques :

Equipement : piézomètre
Alt. tube piézométrique : 421.34 msm

Diamètre perforation : 168 mm
Diamètre piézomètre : 4"

										Essais géotech. in situ				PID
Cote m.s.m	Prof. m	Profil	Description lithologique	Code	Géologie	Echant. No	Perfo.	Hydro.		Essais SPT	Q _{up} KPa	C _{us} KPa	Volatiles (ppm)	
421.2	0		Limons beige clair à brun, avec quelques cailloux	2										
420.8	0.4													
420.4	0.8													
420	1.2		Limons sableux beige, caillouteux	9c										
419.6	1.6													
419.2	2													
418.8	2.4		Gravier sableux, limoneux de 2.5 à 4.3 puis propre	9a				417.61 msm le 22.11.21 3.73						
418.4	2.8													
418	3.2													
417.6	3.6													
417.2	4													
416.8	4.4													
416.4	4.8		Argile limoneuse grise, cohésive, peu plastique, très compacte, moyennement dure.	6e										
416	5.2													
415.6	5.6													
	6	fin du sondage 415.4 msm												

0-2m :
PVC
plein, 4
pouces

2-5m :
PVC 4
pouces
crépiné
slot
1mm

5-6m :
PVC
plein 4
pouces

417.61 msm
le 22.11.21
3.73



Annexe 3 : Suivi de la qualité de la nappe de l'Aire au cours du test d'infiltration

Paramètres		Unités	9.02	10.02	12.02	15.02	18.02	19.02	20.02	21.02	23.02	24.02	25.02	26.02	28.02	1.03	2.03	3.03	4.03	7.03	8.03	9.03	10.03	11.03	14.03	16.03	18.03	23.03	25.03	28.03	30.03	5.04	14.04	17.05	18.05	19.05	2.06	7.06	30.06	21.07	11.08	9.09		
Puits infiltration	Niveau nappe	m	-3.09	-3.13	-0.88			-0.63	-0.64	-0.74	-0.55	-0.56	-0.56	-0.52	-3.03	-0.02		-0.04	-0.03		0.08			-0.1	-0.55	0.4	à ras	0.06	à ras	-1.95		-2.71		-2.32		-2.42	-3.12							
	Débit d'infiltration	L/min			12.5			12.5	12.5	11.1				12.05	0	12.1		12.1			11.5	11.8			6.6	11.1		8.7		1.5	0	0		0		0	0							
	Température	°C									7.9	7.8	7.3			4			6.4				7.3				8.5		11.0															
	pH	-									8.73	8.79	8.8			8.81		8.87	8.93				9.12			8.84		9.05																
	Conductivité	µS/cm									531	516	527			542		537					524				561		522															
	Redox	mV									223	228	197			198							196				191.8		184.8															
P1 chemin du Loup	Oxygène dissous	mg/L								12.05	12.25	12.9			14.7		7.32						14.1			12.14		12.4																
	Niveau statique	m	-3.96			-3.82	-3.7			-3.65	-3.63	-3.65	-3.69	-3.73	-3.80	-3.86	-3.87	-3.88	-3.81		-3.88		-3.97			-4.21	-4.28	-4.31		-3.77	-3.30	-3.35		-3.41	-4.05	-4.24	-4.18	-5.26	-5.45	-3.93				
	Température	°C									10	9.7	9.5		9.2	9.6	9.4	9.2	9.2		8.6		8.8			8.3		8.8																
	pH	-									7.32	7.37	7.3		7.27	7.39	7.33	7.38	7.36		7.35		7.38			7.54		7.57																
	Conductivité	µS/cm									564	554	547		537	519	516	513	510		513		515			528		526																
	Redox	mV									222	234	204			186	295				288		215			176.5		142.8																
P2 route de Thérans	Oxygène dissous	mg/L								9.7	10.31	10.4			10.3	10.3					10.6		10.61			11.2		10.64																
	Echantillonnage									Oui	Oui	Oui										Oui					Oui		Oui						Oui									
	Niveau statique	m	-2.48			-2.31	-2.08			-2.04	-2.08	-2.15	-2.23	-2.3	-2.50	-2.5	-2.5	-2.46	-2.27		-2.47		-2.59			-2.94	-2.99	-3.05		-1.81	-1.49	-1.65	-1.73	-1.8	-2.63	-2.40	-3.01	-4.10	-4.33	-2.33				
	Température	°C									6.4	6.3	6.6		6.1	6.3	7	6.3	6.6		6.1		6.5			5.9		7.6																
	pH	-									7.52	7.54	7.49		7.4	7.51	7.41	7.51	7.35		7.43		7.52			7.7		7.7																
	Conductivité	µS/cm									521	517	512		512	510	522	525	528		533		538			538		540																
PZ 11569 pyône	Redox	mV								190	200	217			232	314					292		187.4			164		141.7																
	Oxygène dissous	mg/L								10.6	10.77	10.7			10.8	10.1					10.6		10.8			11.34		10.28																
	Echantillonnage									Oui	Oui	Oui										Oui				Oui		Oui		Oui					Oui									
	Niveau statique	m	-4.22			-4.22	-4.11			-4.07	-4.05	-4.07	-4.11	-4.14	-4.19	-4.24	-4.29	-4.31	-4.31		-4.37		-4.46			-4.54		-4.76					-4.28	-4.84	-3.94	-3.97	-4.01	-4.68	-4.8	-4.63	-5.26	-5.54	-4.69	
	Température	°C									10.8	10.7	10.6		10.5	9.6	10.5	10.5	10		10.1		10.7			10.1		10.8																
	pH	-									7.3	7.32	7.32		7.23	7.39	7.29	7.32	7.33		7.3		7.26			7.39		7.47																
PZ 11560	Conductivité	µS/cm								634	633	631		628	619	622	623	617		607		599			587		566		566															
	Redox	mV								262	262	203			186	250					282		204			174.1		191																
	Oxygène dissous	mg/L								8.82	8.86	9.95			10.3	9.2					8.7		8.99			9.35		9.28																
	Echantillonnage									Oui	Oui	Oui										Oui				Oui		Oui		Oui					Oui									
	Niveau statique	m														-4.14	-4.14	-4.17	-4.18		-4.23		-4.27			-4.34		-4.44					-4.47	-4.13	-4.12		-4.55	-4.59	-4.81	-5.02	-4.88			
	Température	°C														10.8	11.3	10.9	10.9		10.3		10.9			10.1		11.2																
PZ 16992	pH	-									7.2	7.17	7.21	7.17	7.17	7.2	7.17	7.21	7.17		7.17		7.15			7.28		7.3																
	Conductivité	µS/cm									688	688	692	684		691					691		687			682		675																
	Redox	mV									288	214				282					282		225.3			157.8		160.6																
	Oxygène dissous	mg/L									9.2	9.5				9.2					9.2		9.21			9.51		9.02																
	Echantillonnage										Oui	Oui										Oui				Oui		Oui		Oui					Oui									
	Niveau statique	m														-5.03	-5.06	-5.07	-5.1		-5.29		-5.44			-5.34		-5.65						-4.17	-4.59			-5.7	-5.46	-6.23	SEC à -6,30	-4.96		
PZ 18669	Température	°C														6	6.1	5.8	5.9		5.8		6.3			6.2		6.7																
	pH	-									7.58	7.78	7.75	7.62	7.61	7.72	7.78	7.75	7.62		7.61		7.72			7.77		7.87																



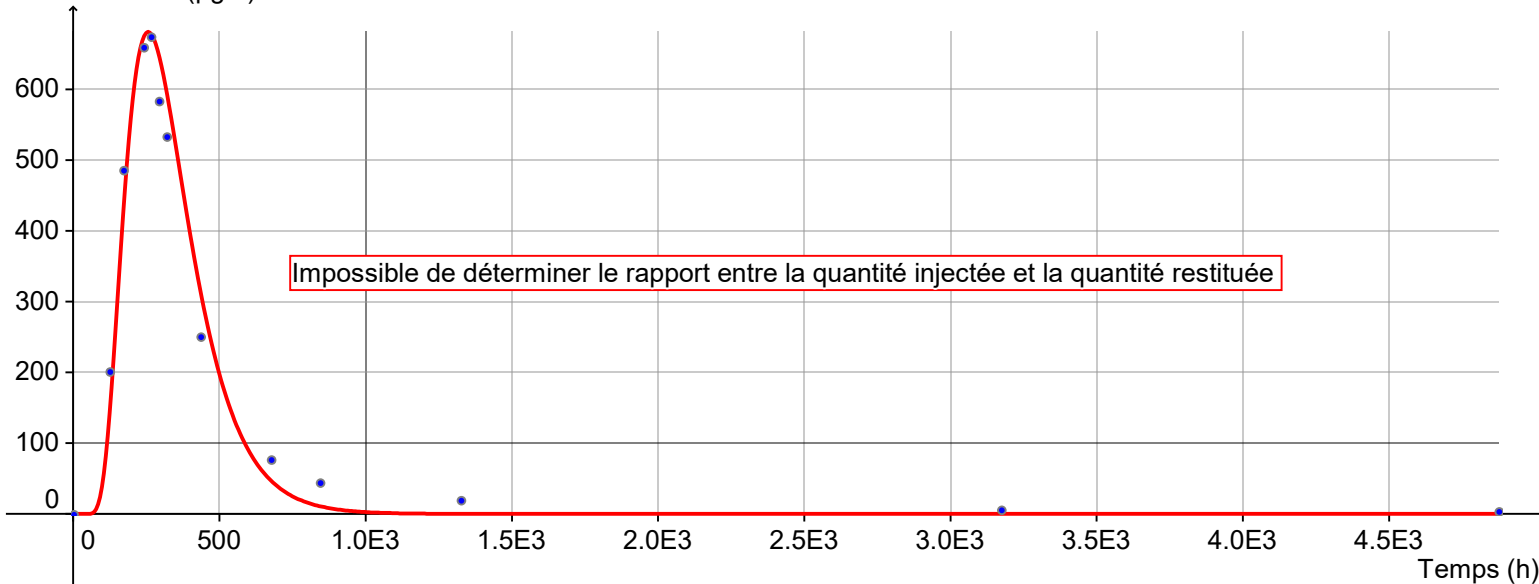
Annexe 4 : Résultats des calculs TRAC

Essai : P1 - Test d'infiltration dans la nappe de l'Aire - restitution dans le piézomètre P1
Commune : Bernex (GE)
Lieu-dit :

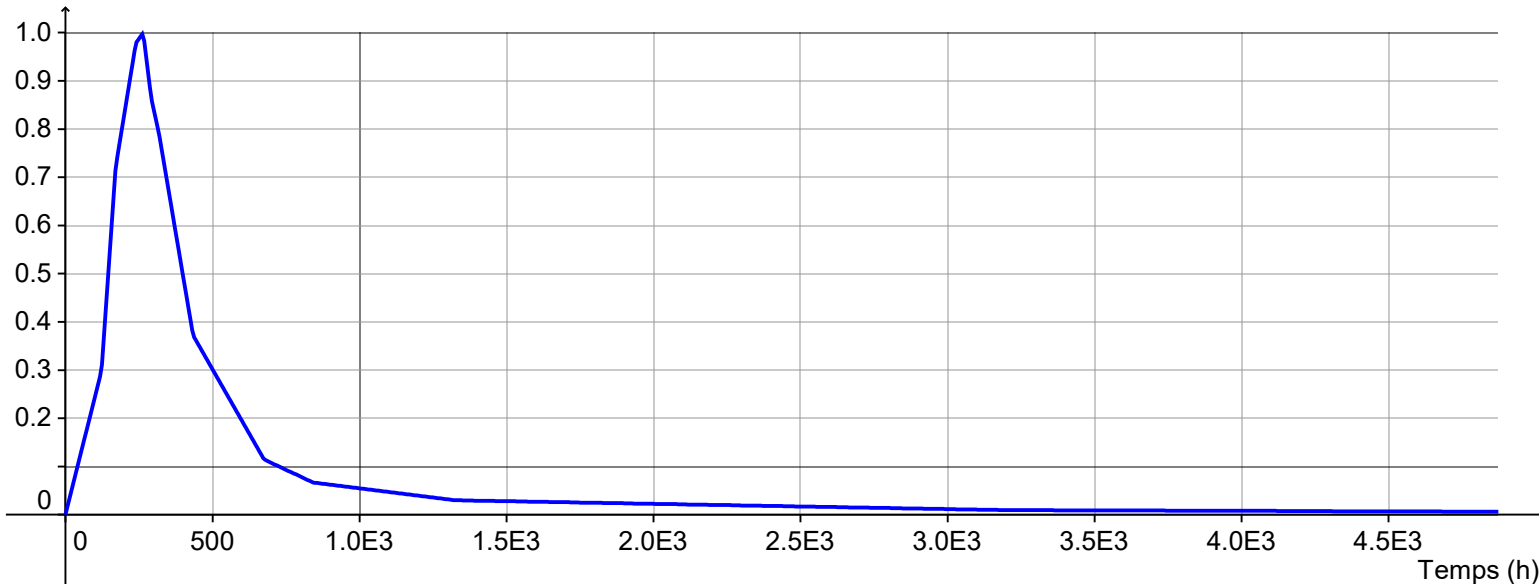
Masse injectée : 6.0 kg
Restitué :
Taux de restitution :

Date : 16/03/2023
Traceur : Fluorescéine
Concentration max : 6.8E2 µg/L

Concentration (µg/L)



Densité normalisée



Paramètres

Dimensions :	1D
Injection :	Brève
Dispersivité :	Constante
Milieu :	Semi-infini
Solution TRAC :	[03]

Masse de traceur pour le calage (kg) :	6
Porosité cinématique (0 à 1) :	0.042
Vitesse réelle (m/s) :	0.21
Aire de la section transversale (m²) :	0.93
Dispersivité longitudinale (m) :	9.5
Distance du point de mesure selon l'axe des abscisses (m) :	1×10^2
Coefficient de dégradation (1/s) :	0.0
Coefficient de retard :	2.3×10^3

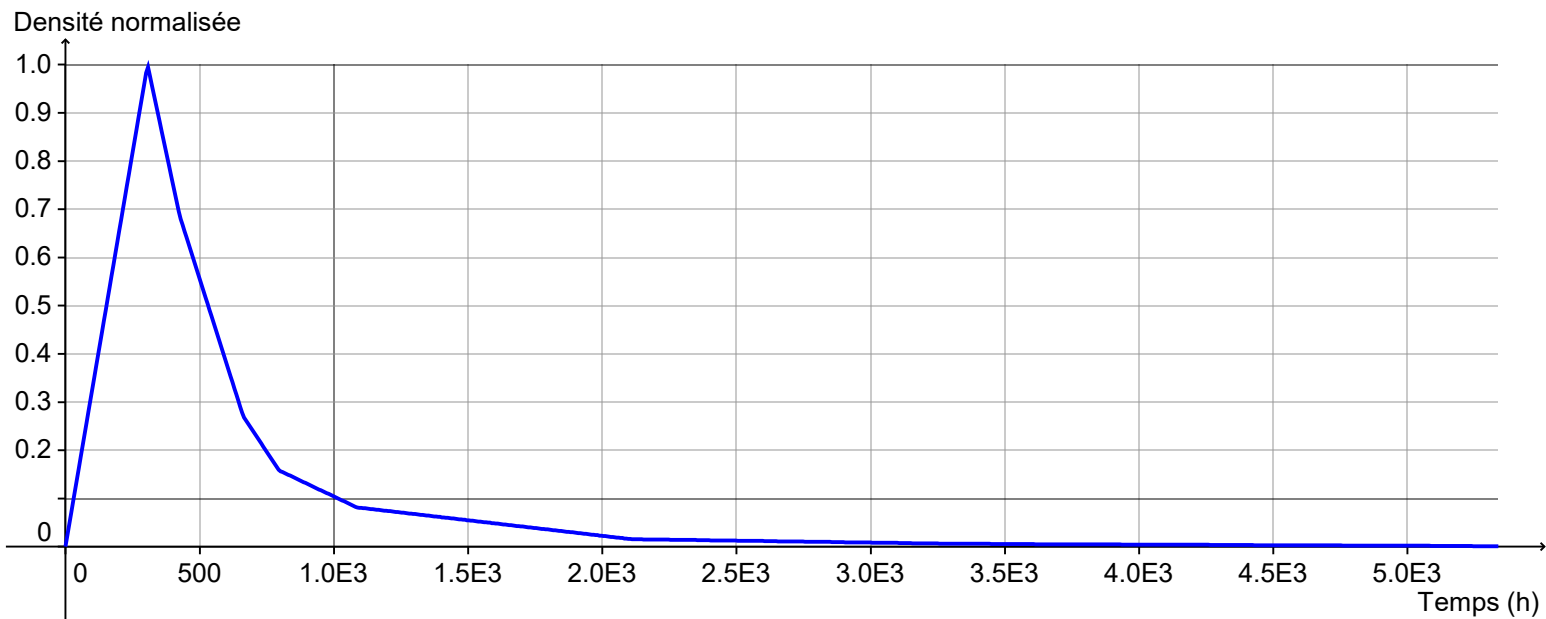
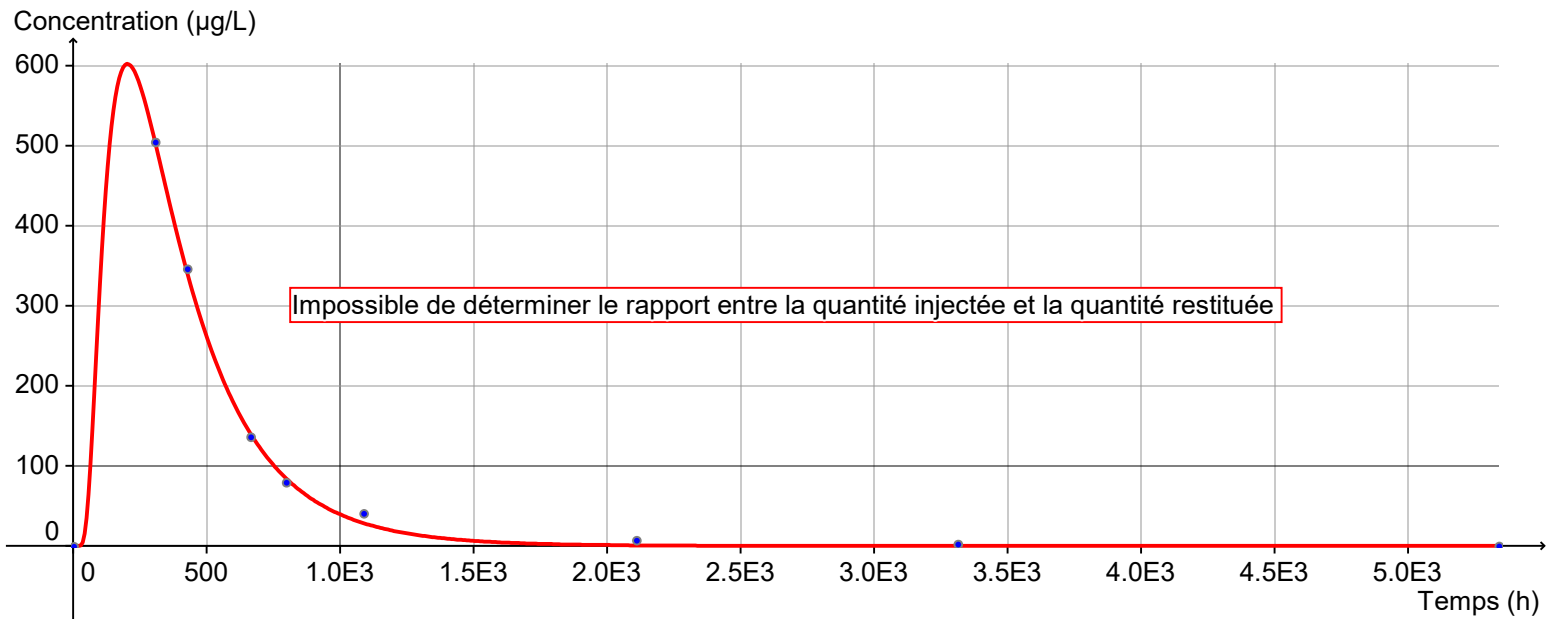
Ajustement retenu

Première apparition (0.01% ΔM) :	73 h
Pic :	2.6×10^2 h
Temps moyen :	3.1×10^2 h
Temps moyen de séjour :	3.3×10^2 h

Vitesse maximum :	1.4 m/h
Vitesse de transit :	0.39 m/h
Vitesse moyenne :	0.32 m/h
Vitesse apparente :	0.30 m/h

Coef. ajustement ($-\infty..1$) :	0.97
-------------------------------------	------

Essai : P2 - Test d'infiltration dans la nappe de l'Aire	Masse injectée : 6.0 kg	Date : 16/03/2023
Commune : Bernex (GE)	Restitué :	Traceur : Fluorescéine
Lieu-dit :	Taux de restitution :	Concentration max : 6.0E2 µg/L



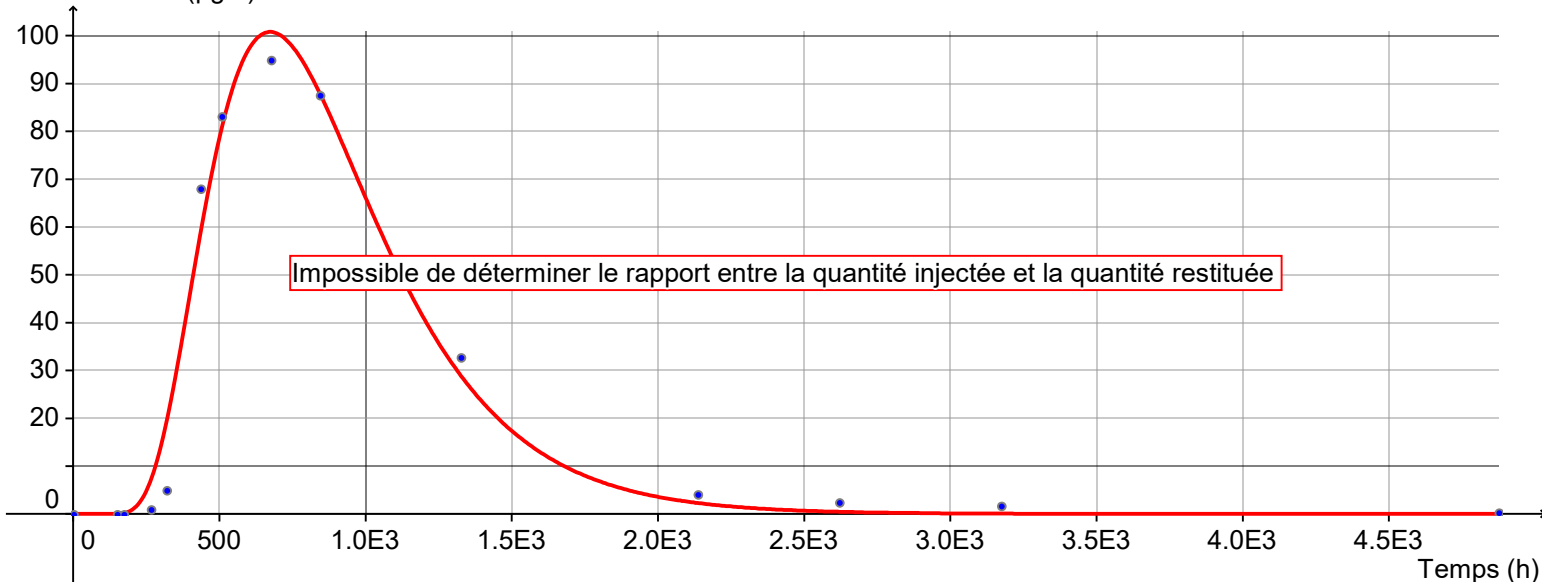
Paramètres	
Dimensions :	1D
Injection :	Brève
Dispersivité :	Constante
Milieu :	Semi-infini
Solution TRAC :	[03]
Masse de traceur pour le calage (kg) :	6
Porosité cinématique (0 à 1) :	0.045
Vitesse réelle (m/s) :	0.20
Aire de la section transversale (m²) :	0.71
Dispersivité longitudinale (m) :	28
Distance du point de mesure selon l'axe des abscisses (m) :	1×10^2
Coefficient de dégradation (1/s) :	0.0
Coefficient de retard :	2.3×10^3
Ajustement retenu	
Première apparition (0.01% ΔM) :	37 h
Pic :	2.0×10^2 h
Temps moyen :	3.3×10^2 h
Temps moyen de séjour :	4.0×10^2 h
Vitesse maximum :	2.7 m/h
Vitesse de transit :	0.49 m/h
Vitesse moyenne :	0.30 m/h
Vitesse apparente :	0.25 m/h
Coef. ajustement ($-\infty..1$) :	1.0

Essai : PZ 11'569 - Test d'infiltration dans la nappe de l'Aire
Commune : Bernex (GE)
Lieu-dit :

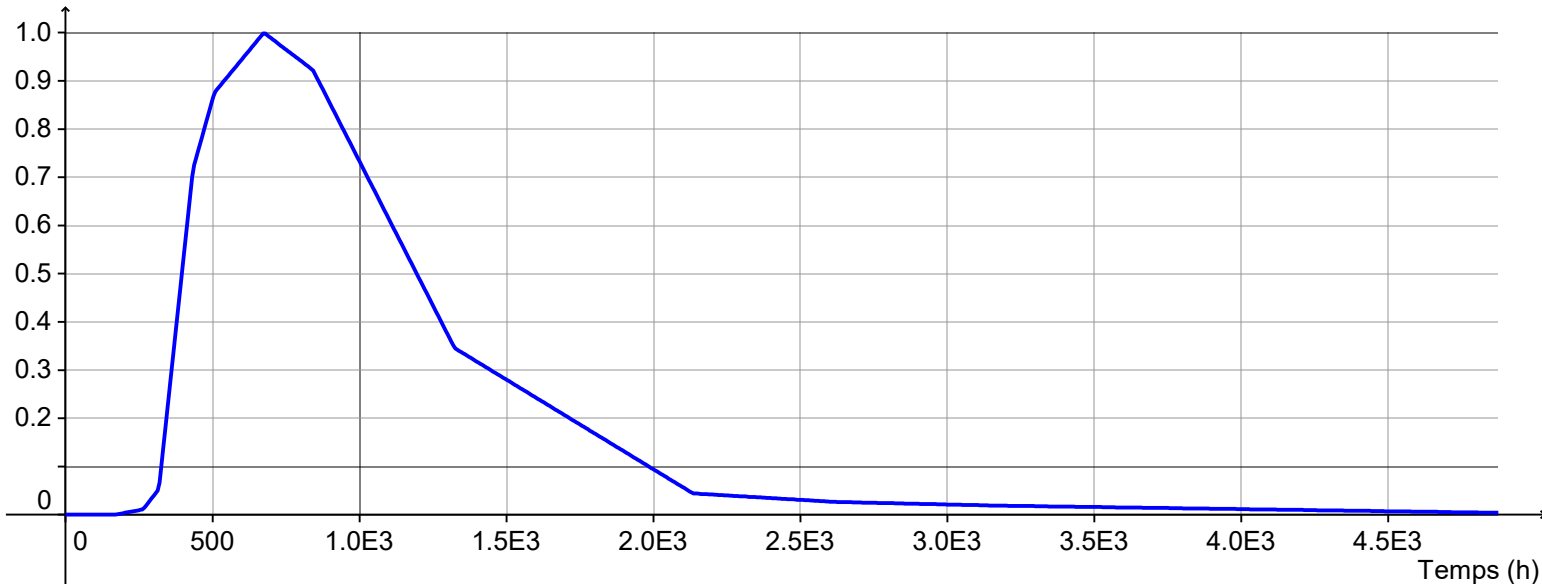
Masse injectée : 6.0 kg
Restitué :
Taux de restitution :

Date : 16/03/2023
Traceur : Fluorescéine
Concentration max : 1.0E2 µg/L

Concentration (µg/L)



Densité normalisée



Paramètres

Dimensions :	1D
Injection :	Brève
Dispersivité :	Constante
Milieu :	Semi-infini
Solution TRAC :	[03]

Masse de traceur pour le calage (kg) :	6
Porosité cinématique (0 à 1) :	0.15
Vitesse réelle (m/s) :	0.12
Aire de la section transversale (m²) :	1.2
Dispersivité longitudinale (m) :	23
Distance du point de mesure selon l'axe des abscisses (m) :	2.3×10^2
Coefficient de dégradation (1/s) :	0.0
Coefficient de retard :	1.5×10^3

Ajustement retenu

Première apparition (0.01% ΔM) :	1.9×10^2 h
Pic :	6.7×10^2 h
Temps moyen :	8.1×10^2 h
Temps moyen de séjour :	8.8×10^2 h

Vitesse maximum :	1.2 m/h
Vitesse de transit :	0.35 m/h
Vitesse moyenne :	0.29 m/h
Vitesse apparente :	0.26 m/h

Coef. ajustement ($-\infty..1$) :	0.98
-------------------------------------	------



Annexe 5 : Présentation détaillée des travaux de modélisation et de simulations numériques

***L'Aire et
sa nappe d'accompagnement
-
Modélisation hydrogéologique***

- ▶ Présentation des enjeux liés à la nappe de l'Aire
- ▶ Contexte hydrogéologique et géologique
- ▶ Description des échanges nappe - rivière
- ▶ Modélisation de la nappe
 - ▶ 1- Construction du modèle
 - ▶ 2- Modélisation de l'état initial en hautes eaux
 - ▶ 3- Modélisation de l'état initial en basses eaux
 - ▶ 4- Modélisation du test d'infiltration
 - ▶ 5- Modélisation de la recharge artificielle
 - ▶ 6- Modélisation de l'installation thermique
- ▶ Conclusions

1. Soutien d'étéage à la rivière

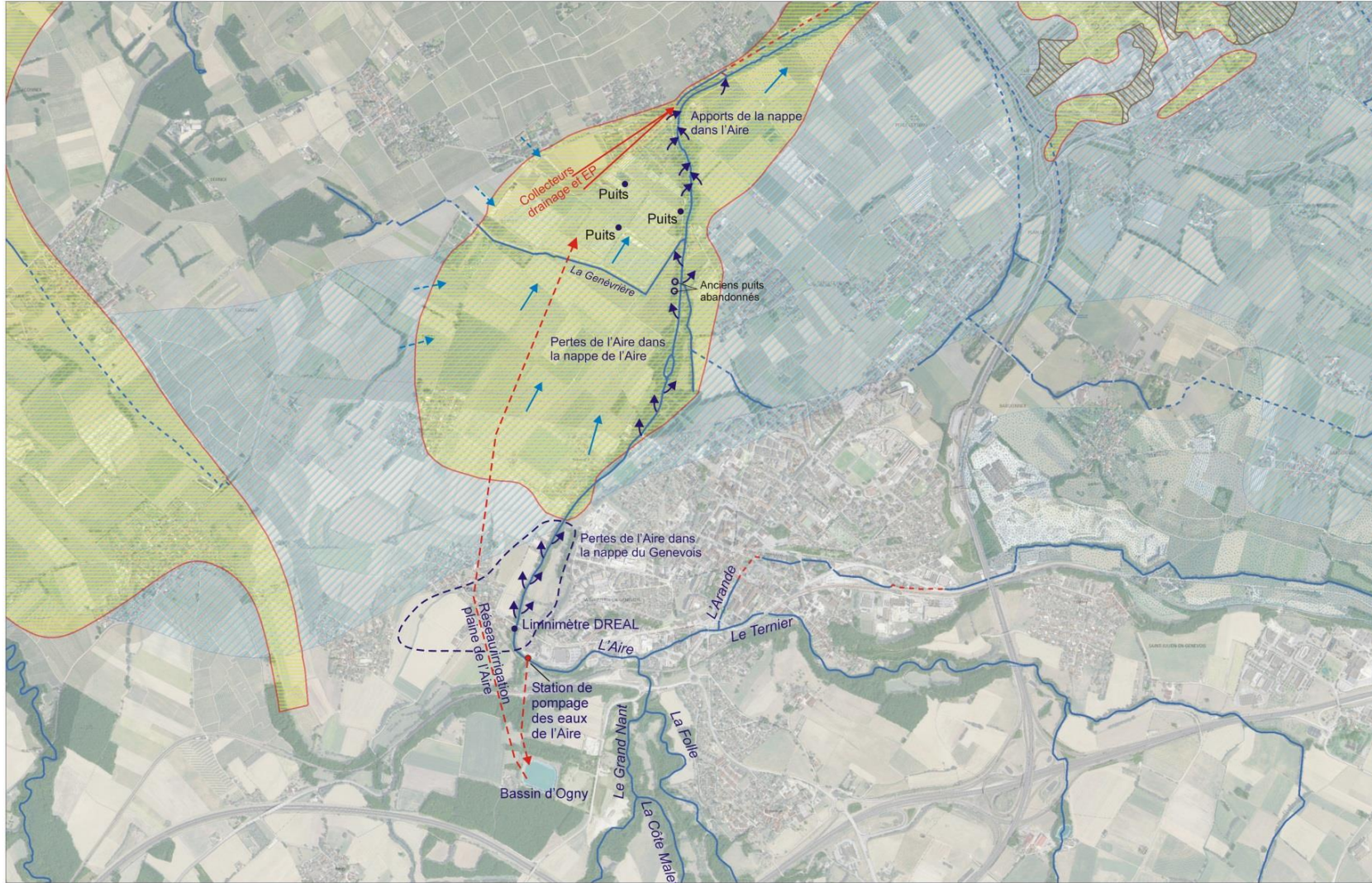
- Restitution naturelle des eaux de la nappe à la rivière
- Phénomène naturel qui se produit en tout temps dès le secteur du couvert de Certoux

2. Pompage pour irrigation maraîchère

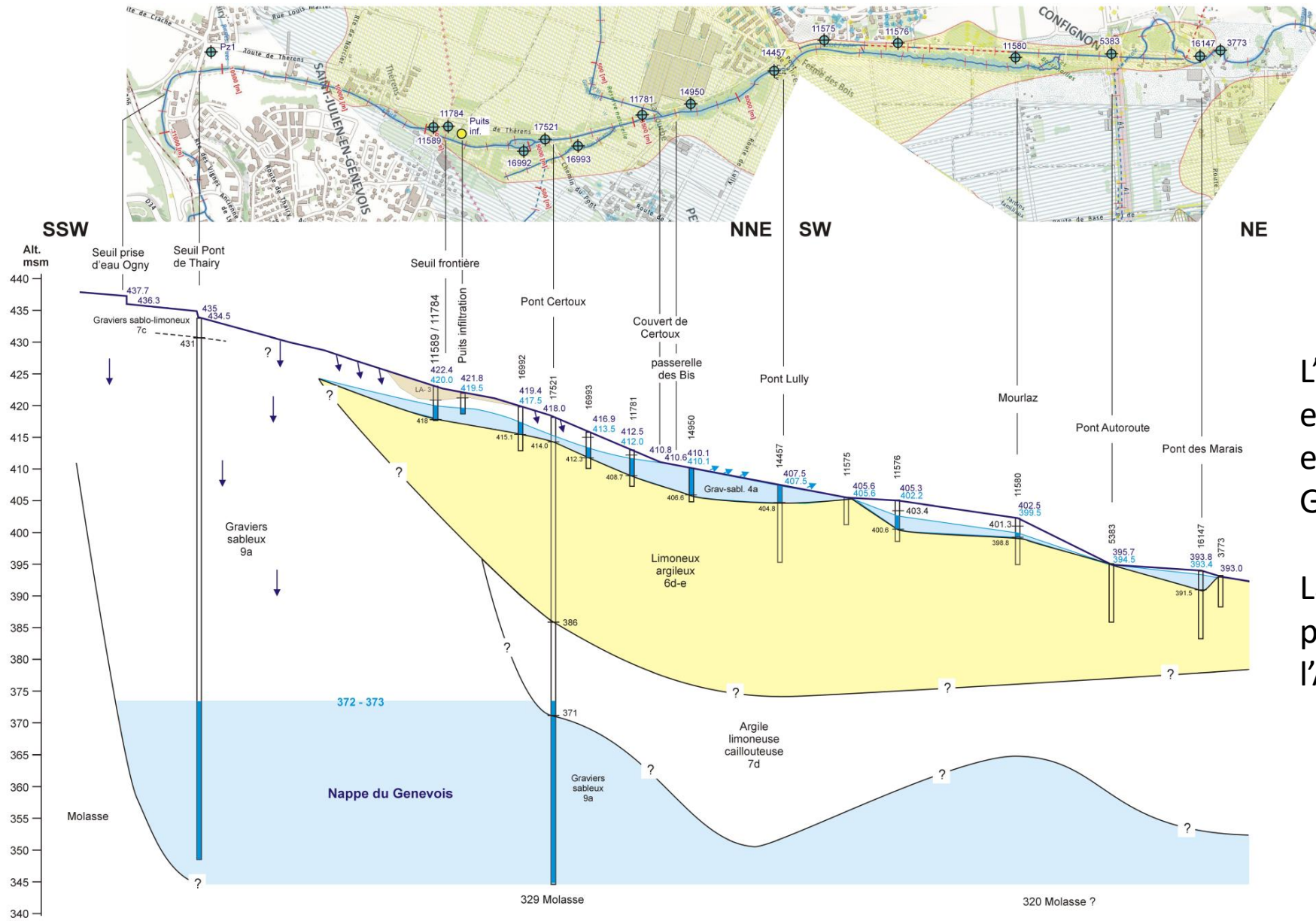
- Prélèvements à partir de 3 puits existants sur la nappe

3. Exploitation thermique des eaux de la nappe

- Par pompage - PAC eau-eau – restitution à la nappe

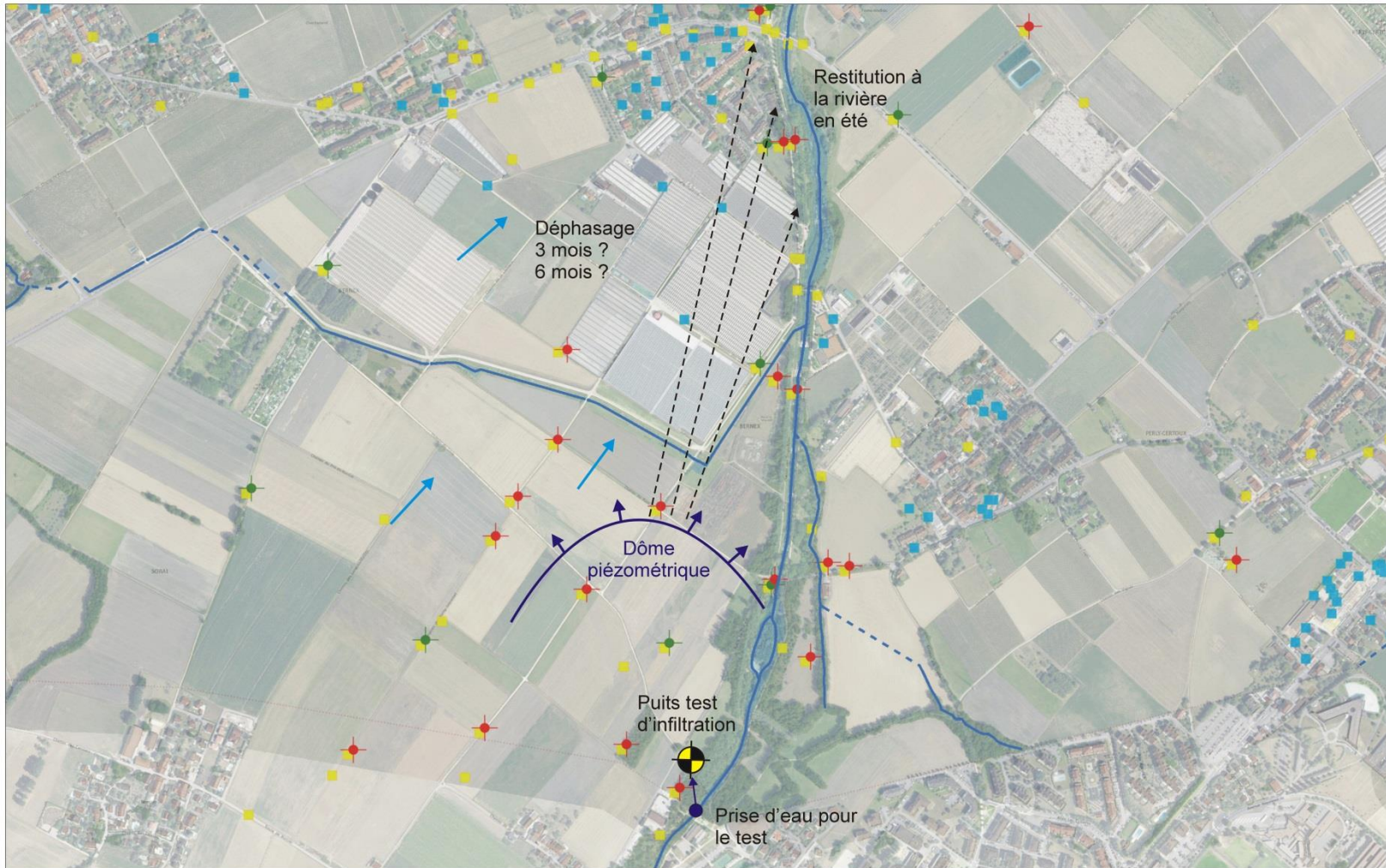


- Aquifère composé d'alluvions de l'Aire épais de **3 à 7 m**, profond de **1 à 5 m**.
- Nappe alimentée par l'Aire et le ruissellement issu des coteaux.
- Nappe drainée par l'Aire.



L'aquifère de la nappe de l'Aire est situé sur des limons argileux et au dessus de la nappe du Genevois.

La nappe est alimentée en amont par l'Aire et drainée en aval par l'Aire.

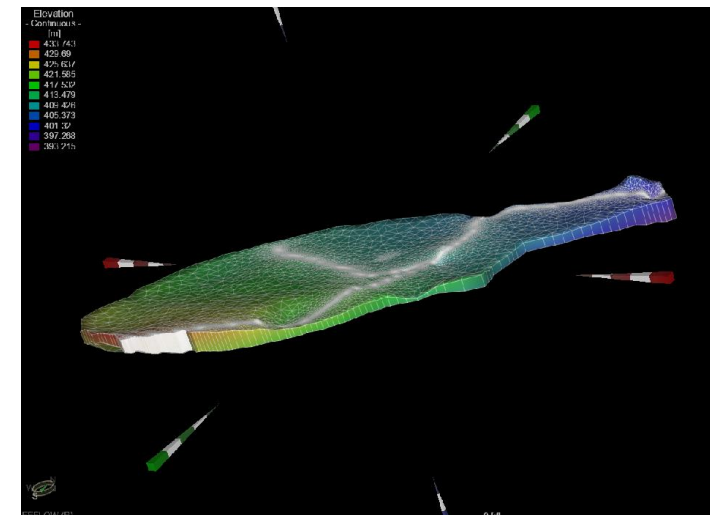


Rappel des objectifs et dispositif :

- Stocker les crues hivernales de l'Aire dans la nappe pour améliorer le soutien d'été de l'Aire en été.
- Exploitation thermique de la nappe.
- Puits test et piézomètres d'observation pour calibration d'une simulation numérique.

Maillage et conditions limites

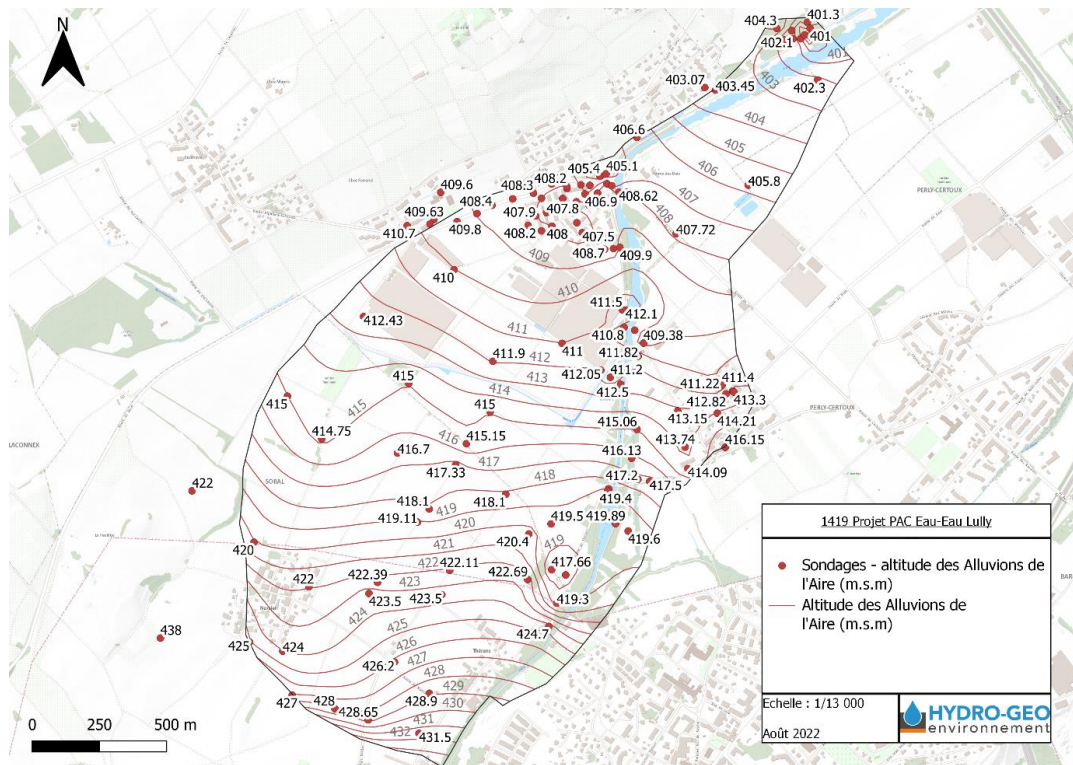
- ✓ Modèle 3D mono couche
- ✓ Ecoulement simulé en condition saturée et non-confiné
- ✓ 757 670 nœuds et de 756 646 éléments, raffinement de 0,15 m au droit des puits et de l'Aire
- ✓ Période de hautes eaux :
 - Hauteur d'eau imposée à l'Aire (MNT) de 401,62 msm à 430,50 msm et Hauteur d'eau imposée au Nant la Genevrière de 410,61 à 414,46
 - Infiltration efficace : 0,38 mm/j (ESPERE BRGM)
 - Exploitation des puits agricoles
 - Jaquenoud : 0,5 L/s
 - Magnin : 0,5 L/s
- ✓ Période de basses eaux (intermédiaire):
 - Hauteur d'eau imposée à l'Aire (MNT -0,35 m) de 401,27 msm à 430,13 msm et Hauteur d'eau imposée au Nant la Genevrière de 410,46 à 414,11
 - Exploitation des puits agricoles
 - Jaquenoud : 3,6 L/s
 - Magnin : 0,5 L/s



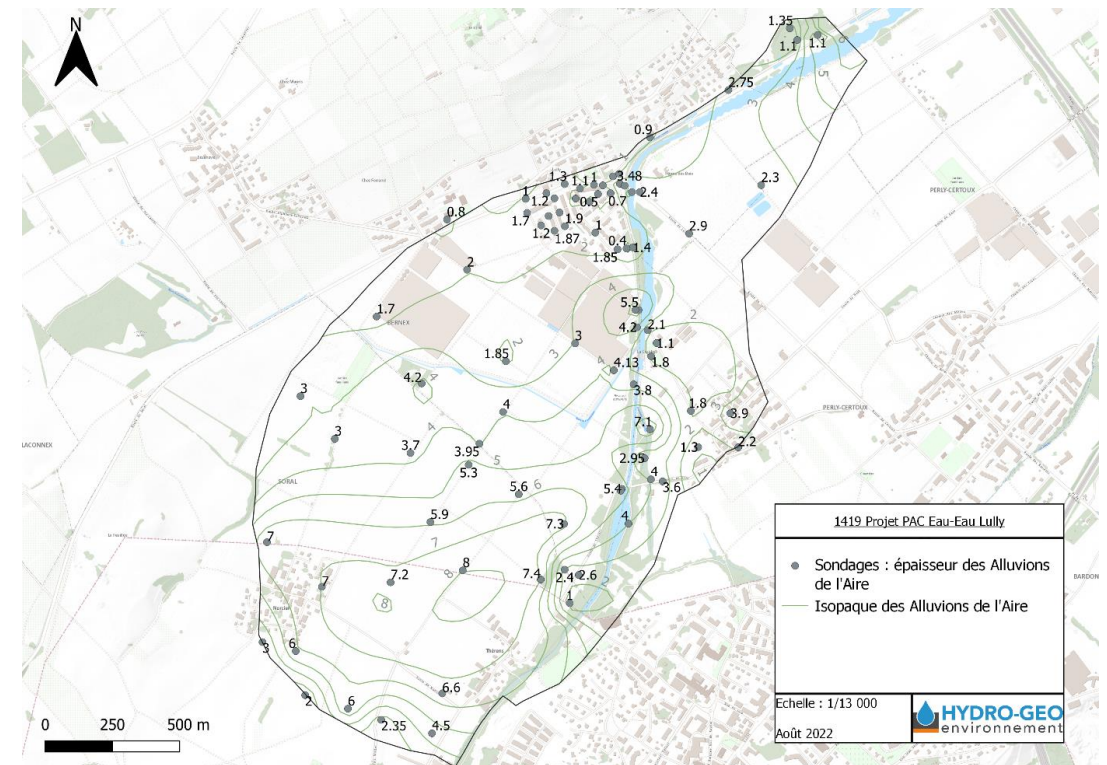
Géométrie de la nappe

Toit et base des alluvions – interpolation des données de 98 sondages pour le toit de l'aquifère et 76 sondages pour la base de l'aquifère

Toit des alluvions de l'Aire

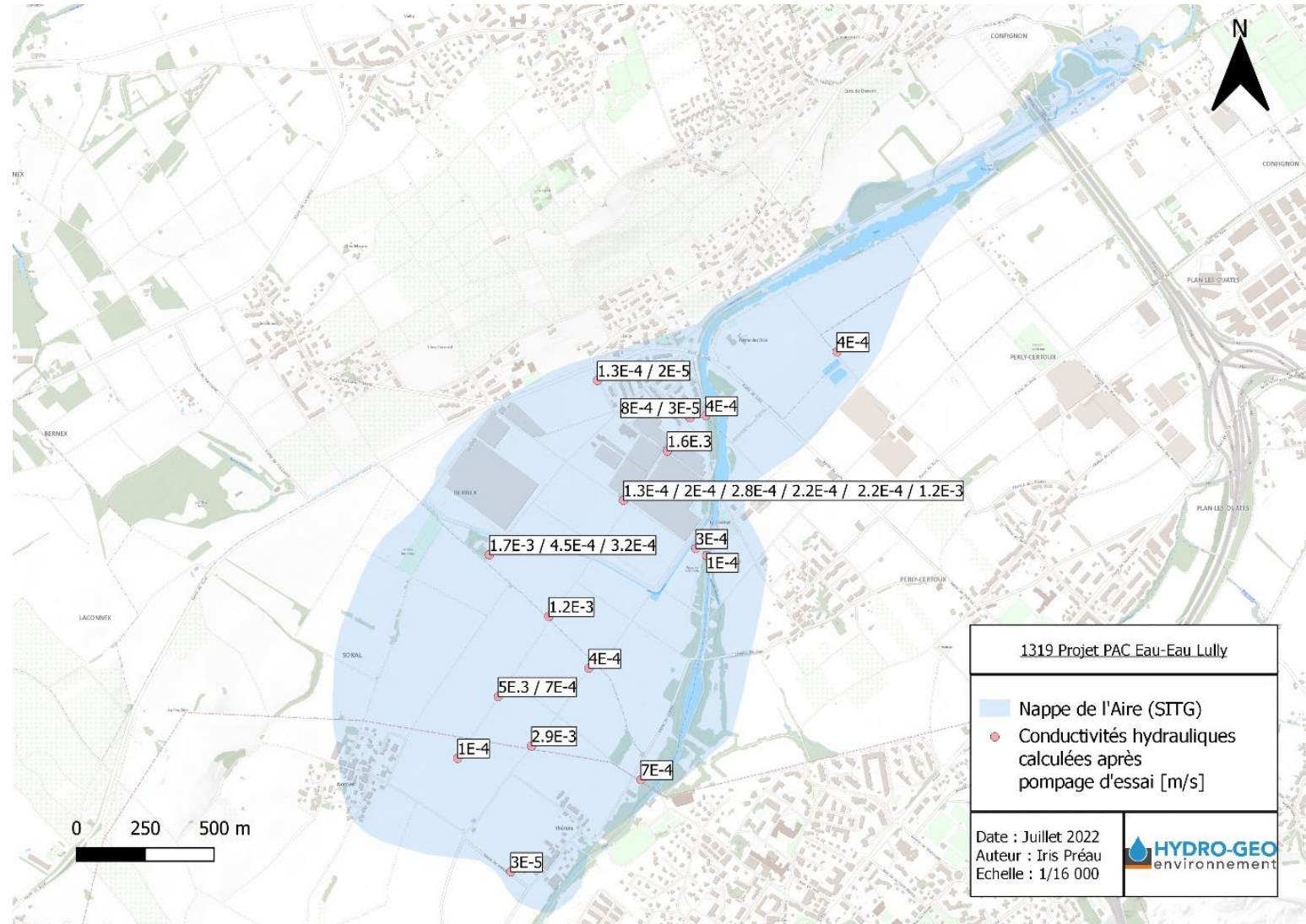


Epaisseurs des alluvions de l'Aire



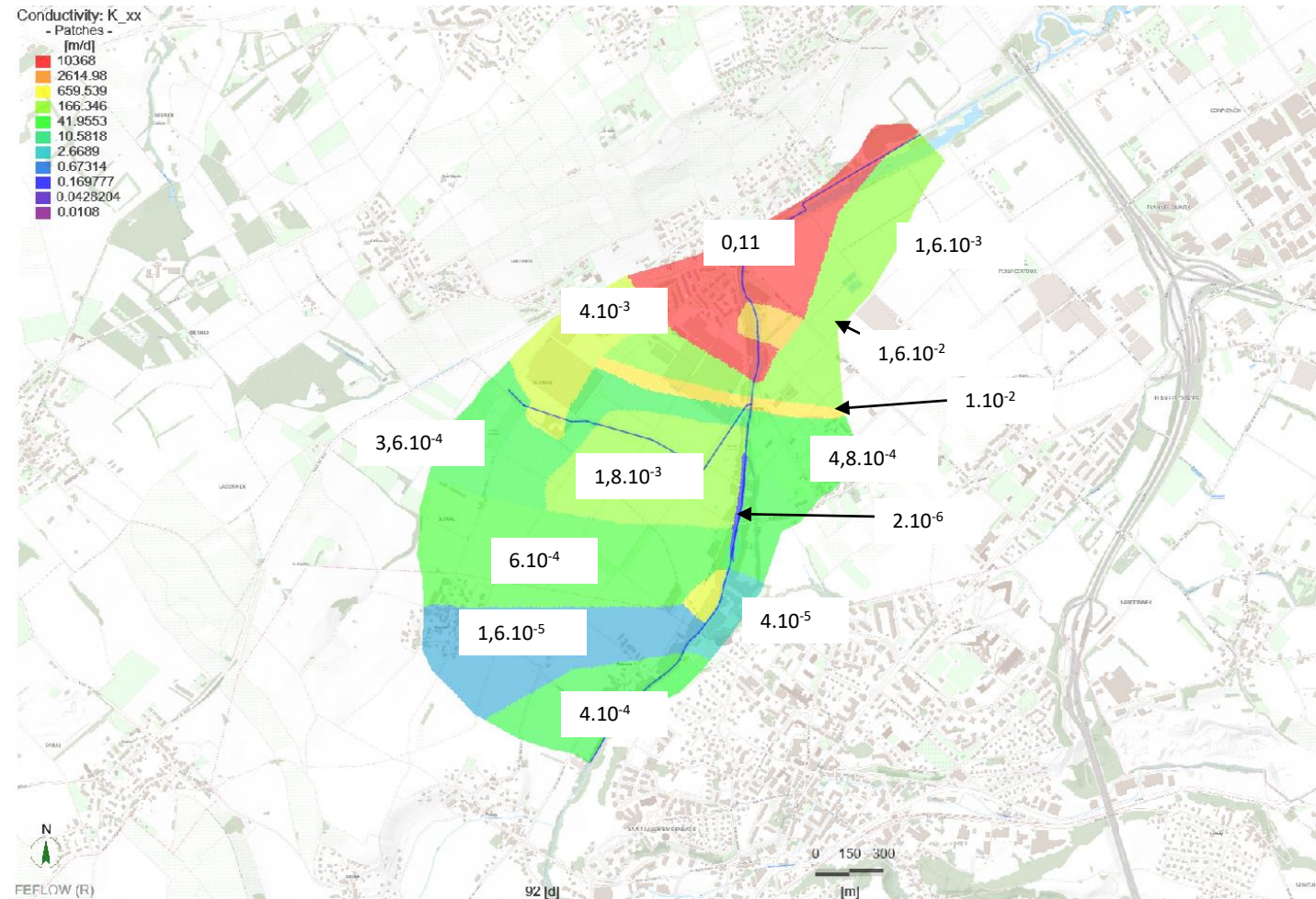
Estimation de la conductivité hydraulique de l'aquifère

- Conductivités hydrauliques évaluées à partir de pompages d'essai.
- Conductivités hydrauliques hétérogènes sur la nappe.
- Conductivités hydrauliques comprises entre $1,2 \cdot 10^{-3}$ et $2,10^{-5}$ m/s.



Conductivités hydrauliques (en m/s)

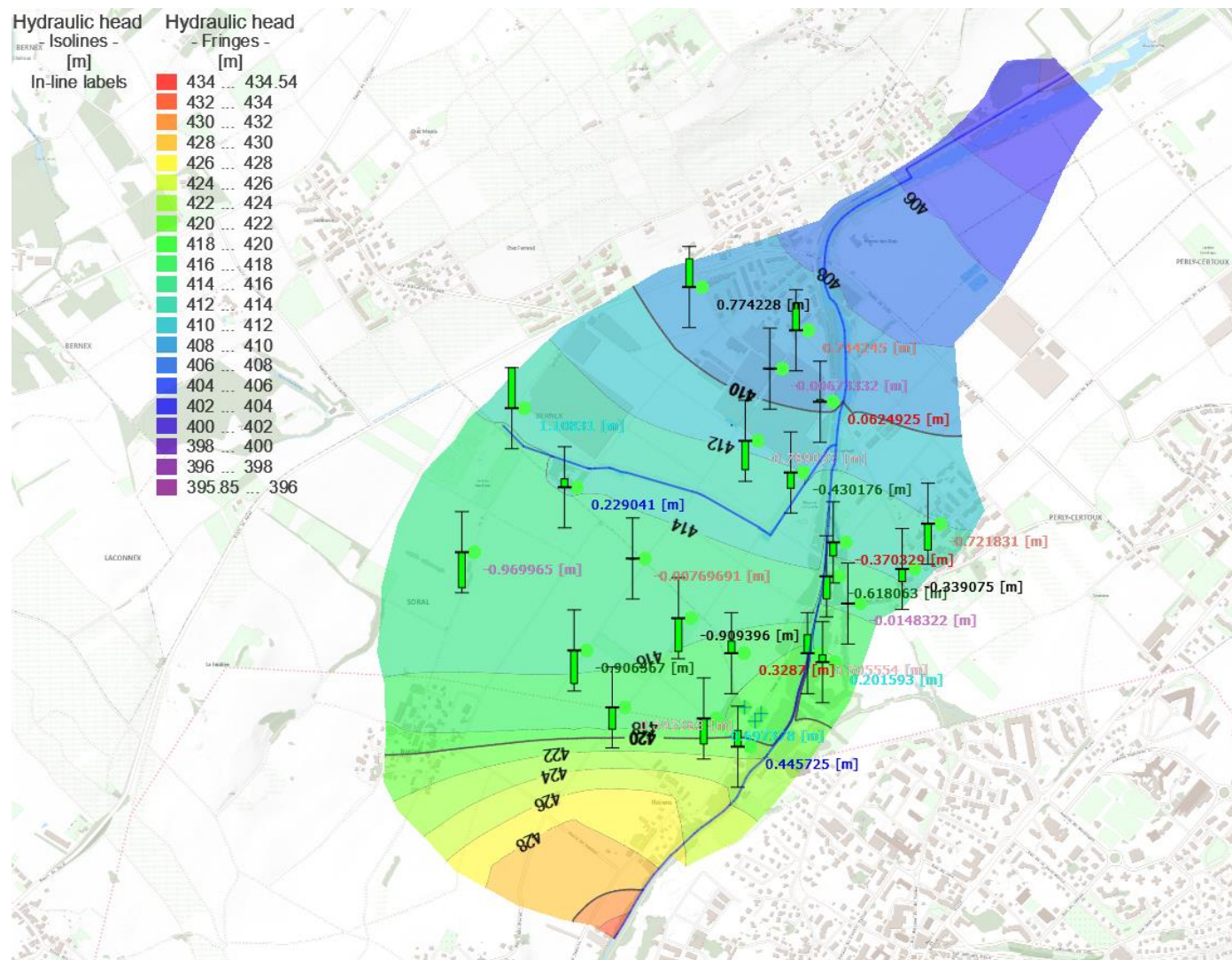
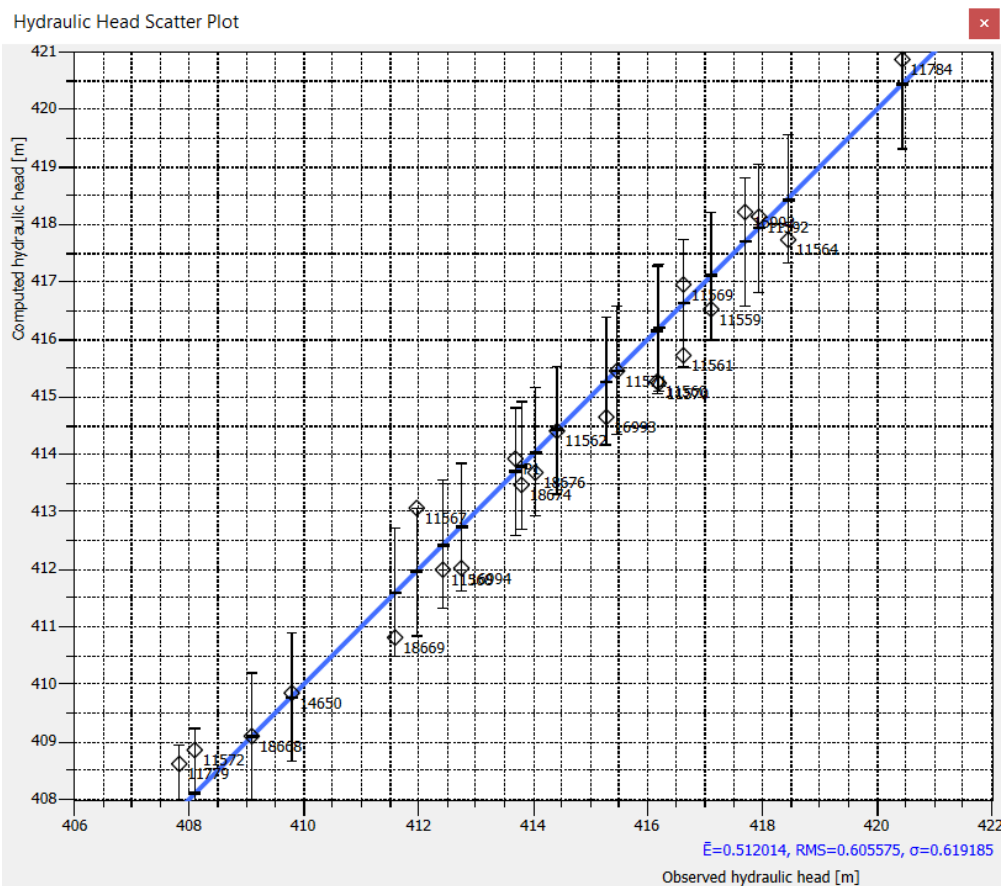
- Conductivités hydrauliques utilisées dans le modèle pour l'ensemble des calages (hautes et basses eaux + tests d'infiltrations)
- $K_x = K_y = 10 * K_z$
- Mise en place d'une bande moins perméable ($2 \cdot 10^{-6}$ m/s) le long de l'aire pour modéliser les pertes de charges observées avec la nappe



Carte des conductivités hydrauliques implémentées au modèle

Modélisation de l'état initial :

A – En permanent hautes eaux : calage sur les mesures piézométriques synchrones (06/02/2022)

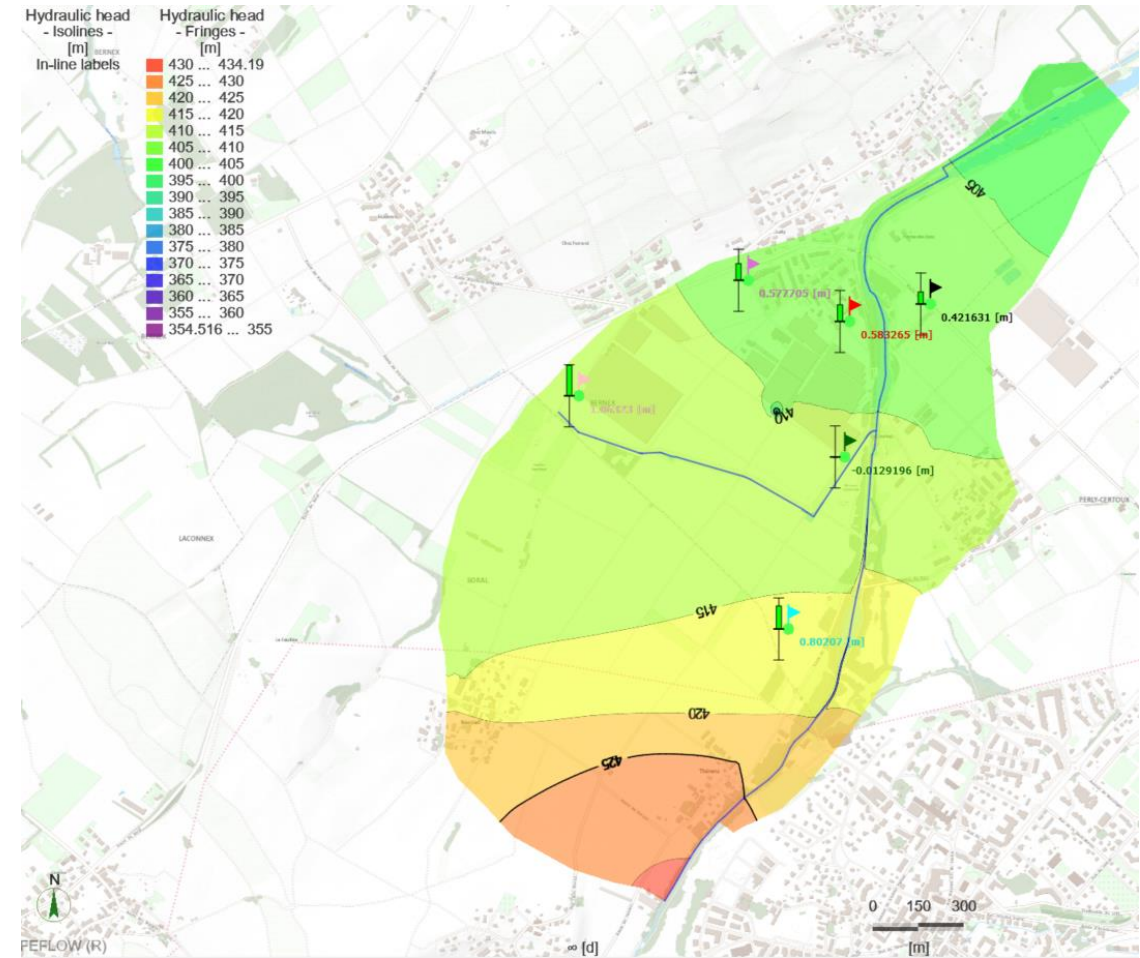
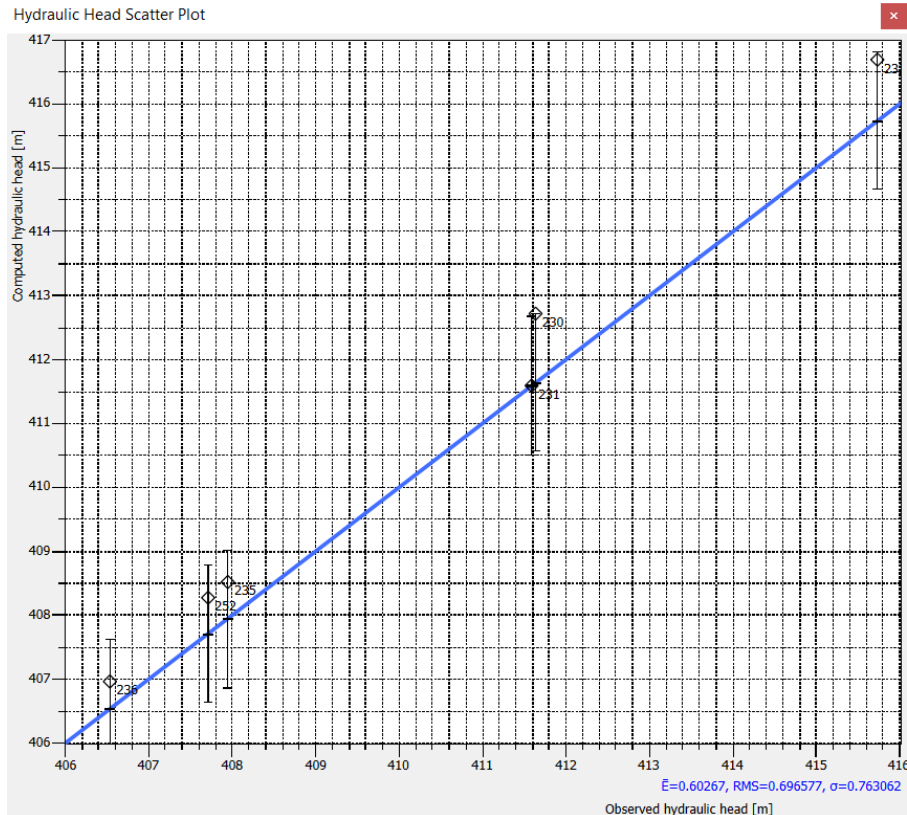


Charges hydrauliques observées vs simulées

Erreur admise entre observées // simulées < 1,10 m - <5 %

Modélisation de l'état initial :

B – En permanent basses eaux : calage sur la campagne piézométrique du 01/09/2022 du GESDEC (pas de campagne de HGE)



Charges hydrauliques observées vs simulées

Erreur admise entre observées // simulées < 1,08 m sur 6 piézomètres

Bilan hydraulique

Hautes eaux	Flux sortant de la nappe			Flux entrant dans la nappe		
	m³/j	L/s	%	m³/j	L/s	%
Nant de Genevrière (Conditions de Dirichlet)	2776,4	32	4	1815,2	21	2
Aire (Conditions de Dirichlet)	64 248	744	95	66 190	766	97
Puits	86,4	1	1			
Recharge				930,28	10,8	1
Total	67 110	777	100	68 935	797	100

- ✓ La principale source d'eau dans le modèle est l'Aire qui l'alimente à hauteur de 97 %.
- ✓ Le Nant de Genevrière draine la nappe à hauteur de de 11 L/s en hautes eaux.

Basses eaux (interm)	Flux sortant de la nappe			Flux entrant dans la nappe		
	m³/j	L/s	%	m³/j	L/s	%
Nant de Genevrière (Conditions de Dirichlet)	2 707,5	31,3	4	1 627,9	18,8	2
Aire (Conditions de Dirichlet)	64 518	746	95	65 352	756,4	98
Puits	354,24	4	1			
Recharge						
Total	67 579	781,3	100	66 979	775	100

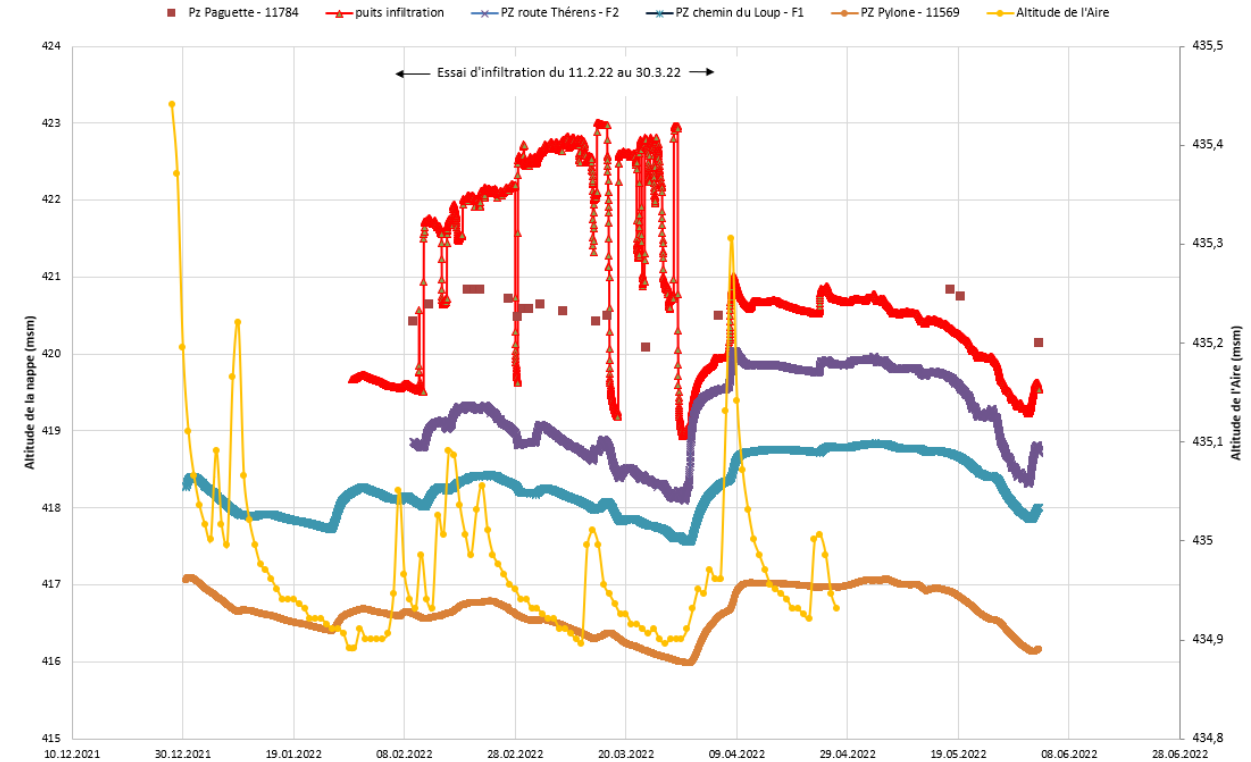
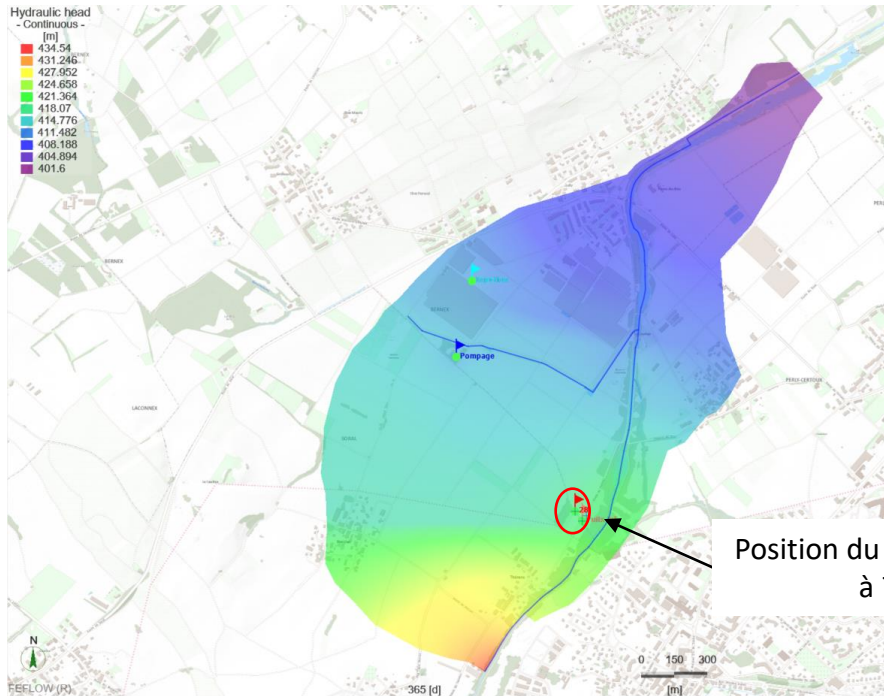


Incohérence avec les observations de terrain

Investigations complémentaires nécessaires afin de mieux comprendre le rôle du Nant sur les niveaux de la nappe

Modélisation de l'état initial :

C – En transitoire : reproduction du test d'infiltration

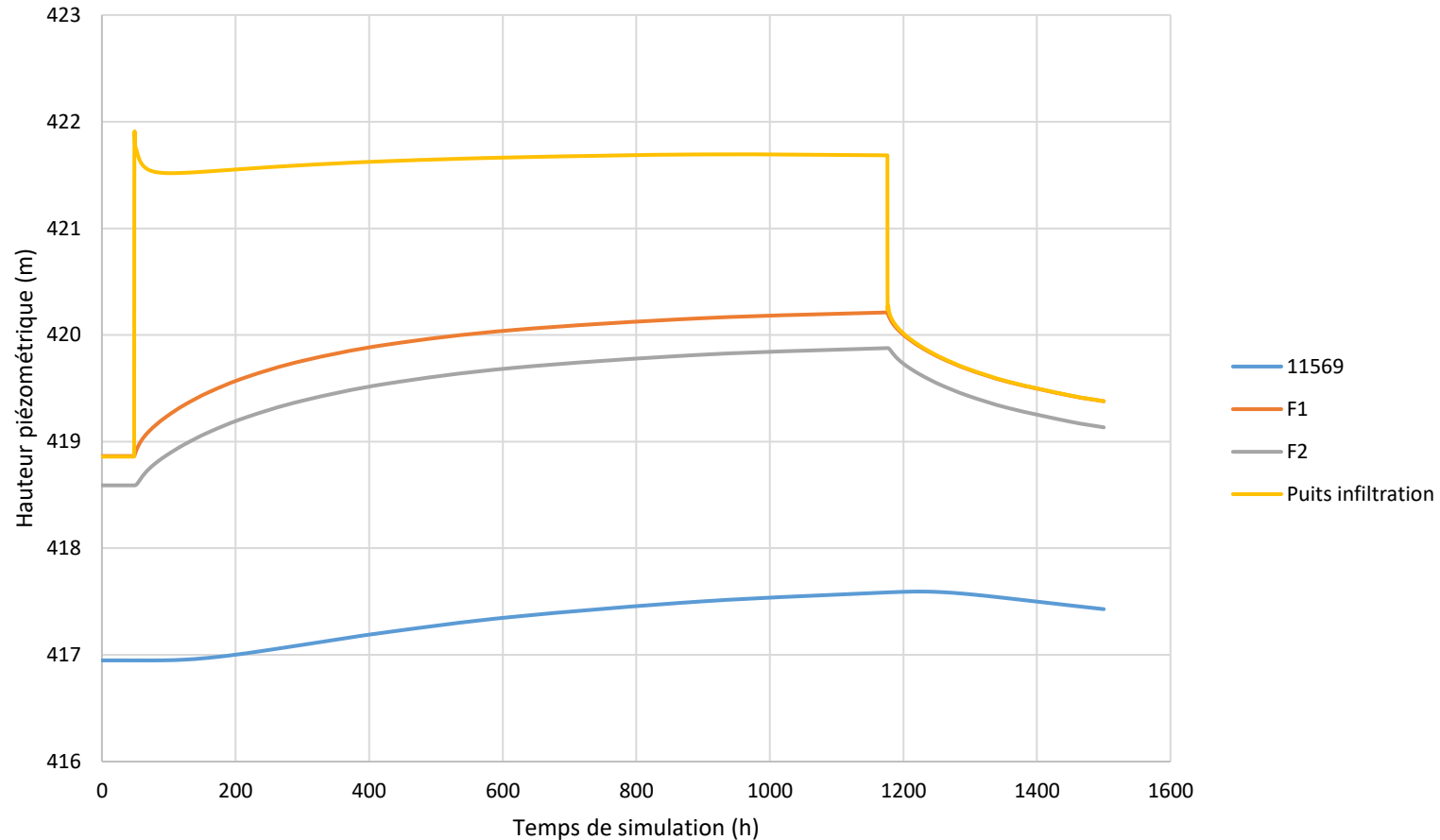


- ✓ Le niveau de la nappe au niveau du puits d'infiltration remonte d'environ 3 m.
 - ✓ Au droit des piézomètres d'observation, le niveau de la nappe suit l'évolution du niveau de l'Aire.
- La nappe est peu influencée par le test d'infiltration.

Modélisation de l'état initial :

C – En transitoire : reproduction du test d'infiltration

- Débit d'infiltration : 10 L/s
- Remontée moyenne mesurée de 3 m sur le terrain , comparable à celle simulée
- Remontées du niveau d'eau mesurées de 50 cm sur les 3 piézomètres suivis. Remontée de 1 m sur la simulation, erreur de 50 cm.
- Le niveau au droit des piézomètres étant principalement influencé par l'Aire, le calage a été effectué uniquement sur le puits d'infiltration.





Injection de la fluorescéine le 18.2.22



Arrivée au P1 le 23.02.22

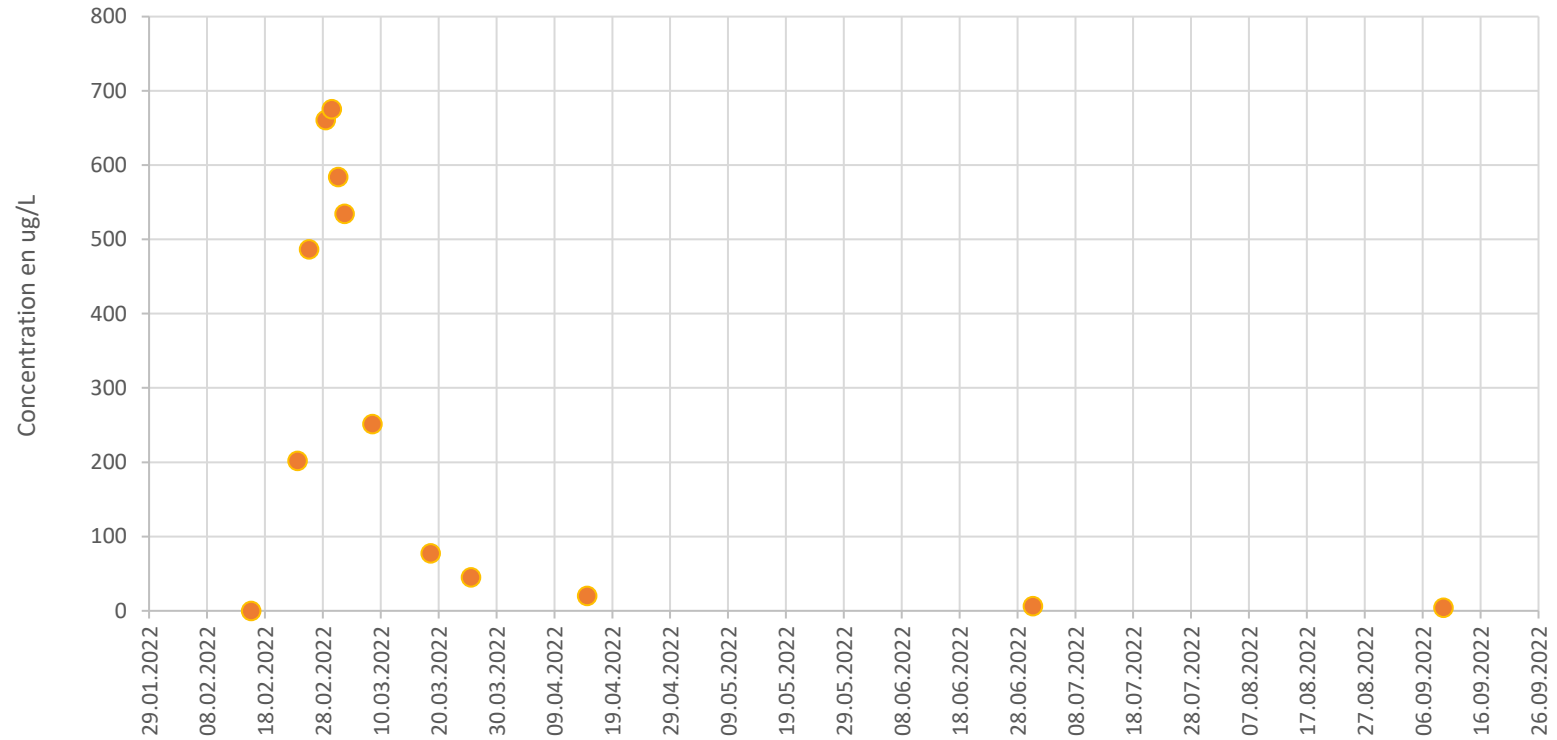
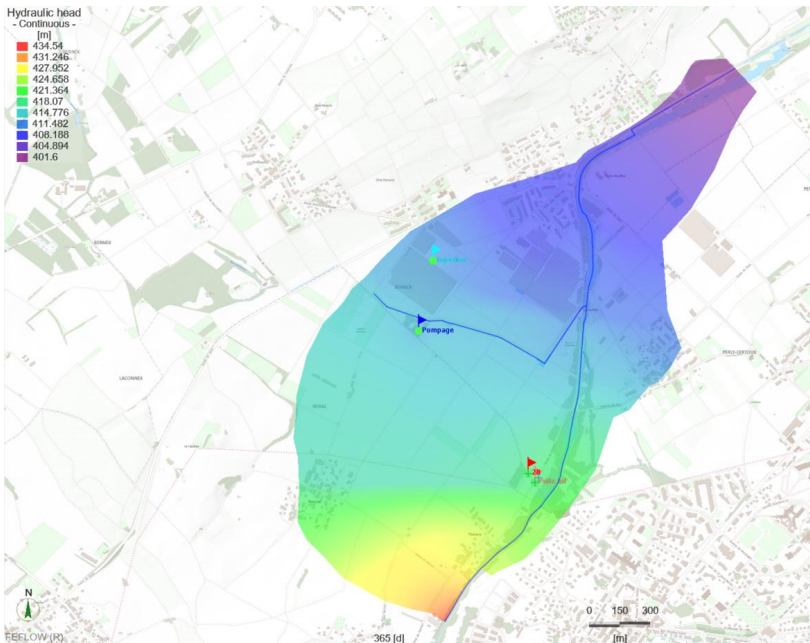
Buts:

- ✓ Déterminer les vitesses de déplacement de la nappe.
- ✓ Calibration dynamique du modèle numérique.

Modélisation de l'état initial en 3 temps :

C – En transitoire : reproduction du traçage

- Débit d'infiltration : 10 L/s
- Injection de la fluorescéine le 18/02/22
- Maximum de concentration le 01/03/22

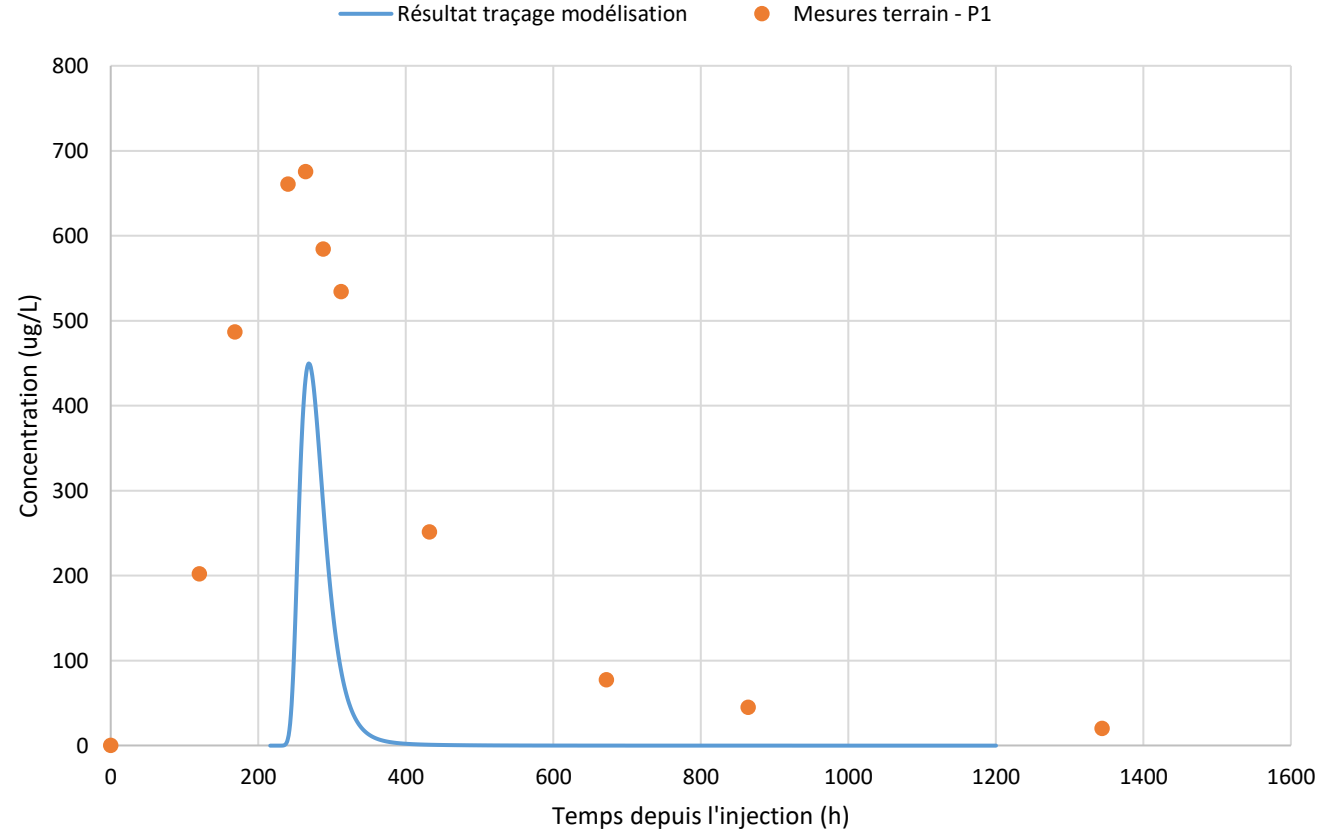


Suivi de la concentration en fluorescéine au puits P1

Modélisation de l'état initial en 3 temps :

C – En transitoire : reproduction du traçage

- 6 kg de fluorescéine injectée à 10 L/s le 18/02/2022
- Traçage calé sur le piézomètre P1 situé à 55 m du puits d'infiltration.
- Echantillonnage ponctuel effectué dans le puits avec des très légères productions
- En raison des conditions d'acquisitions particulières et de la difficulté de reproduction en modélisation numérique, il a été considéré que la simulation du traçage était cohérente avec les concentrations observées sur P1

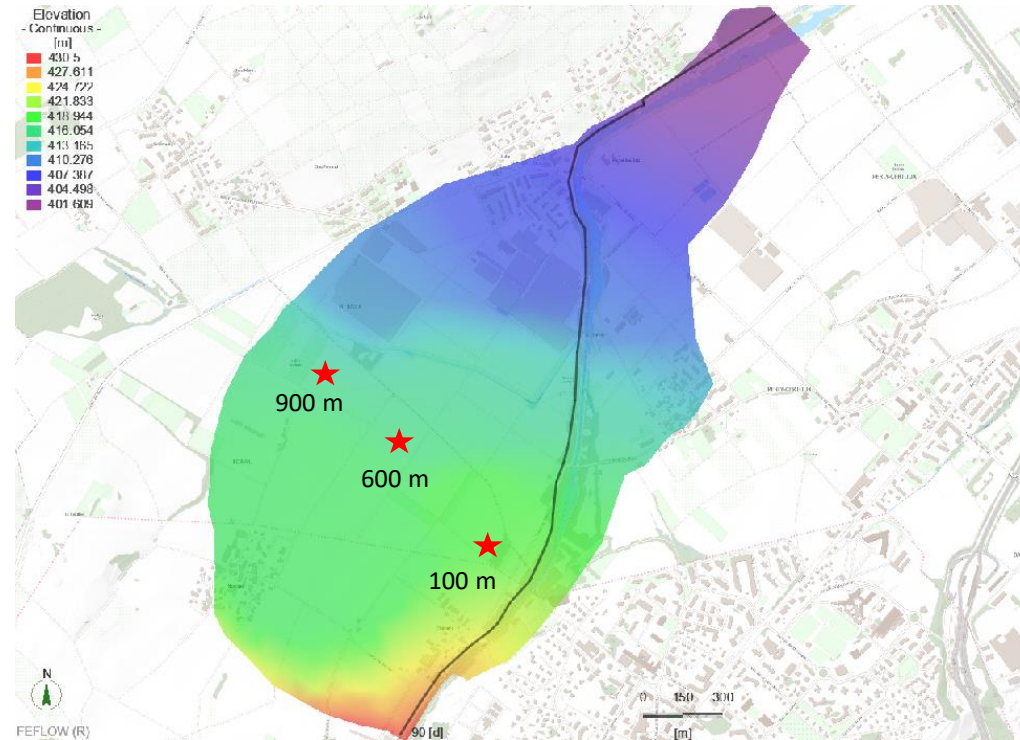


Modélisation de l'essai de traçage sur Feflow

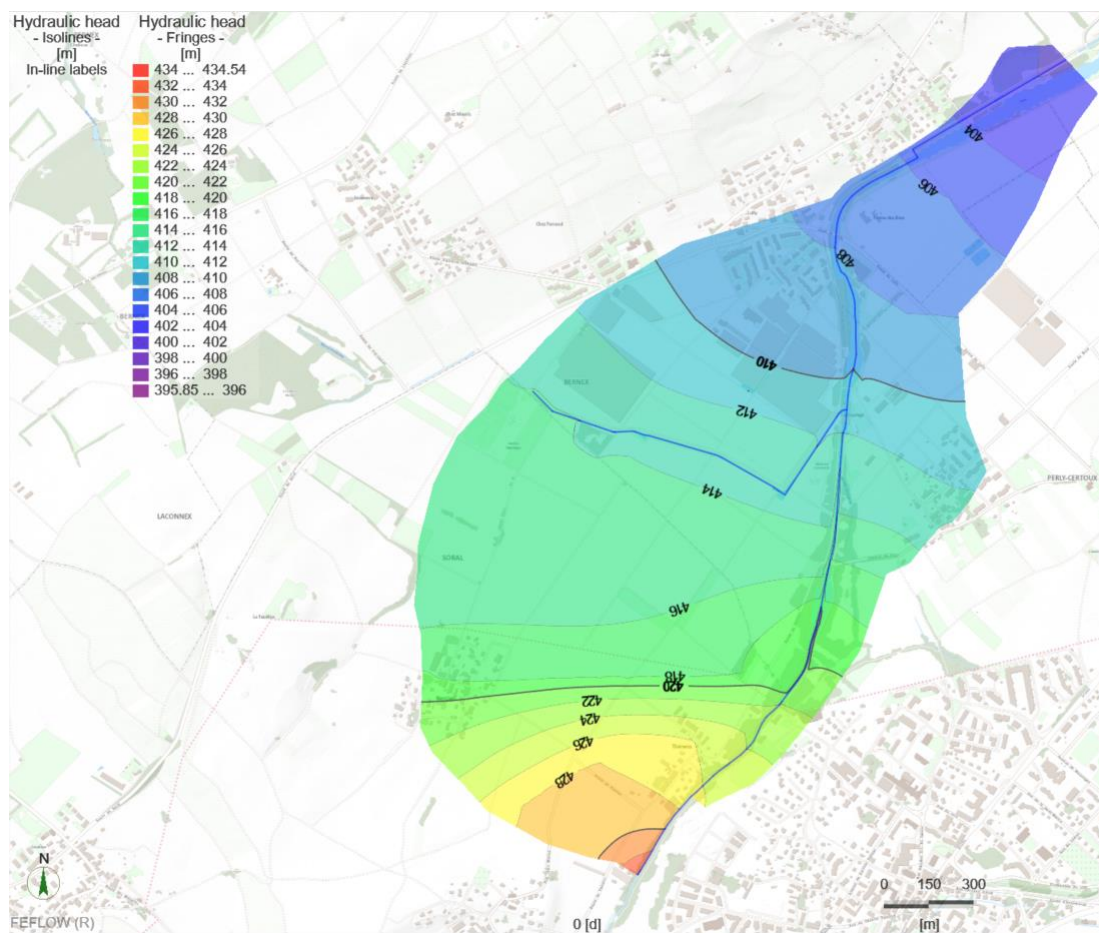
La recharge a été simulée au droit de 3 secteurs différents:

- 100 m de l'Aire (test d'infiltration / traçage)
- 600 m de l'Aire (non présenté ici)
- 900 m de l'Aire (future chaudière CAD Lully)

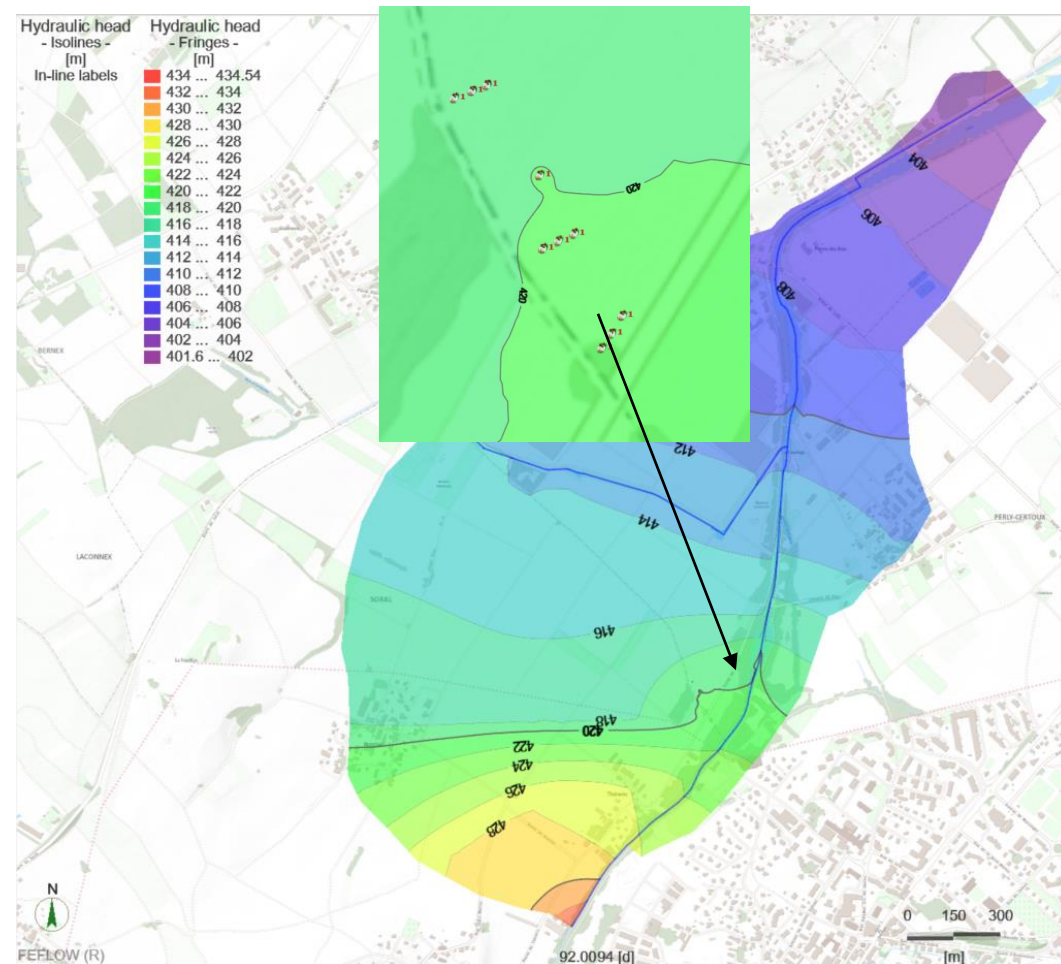
Les simulations ont été effectuées pour des débits de recharge de 10 l/s et 100 l/s



L'infiltration a été effectuée avec 10 puits de 1 L/s, repartis sur une longueur de 100 mètres.



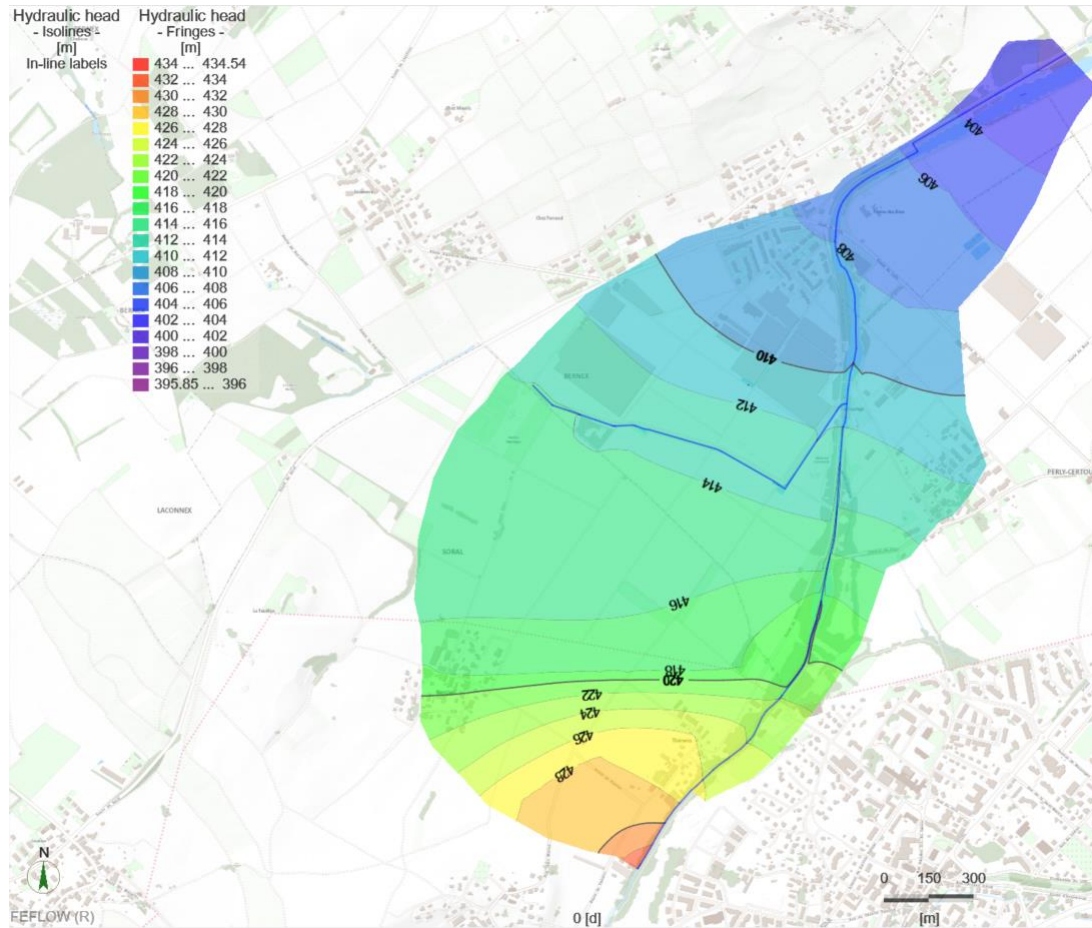
Carte piézométrique à l'état initial en hautes eaux



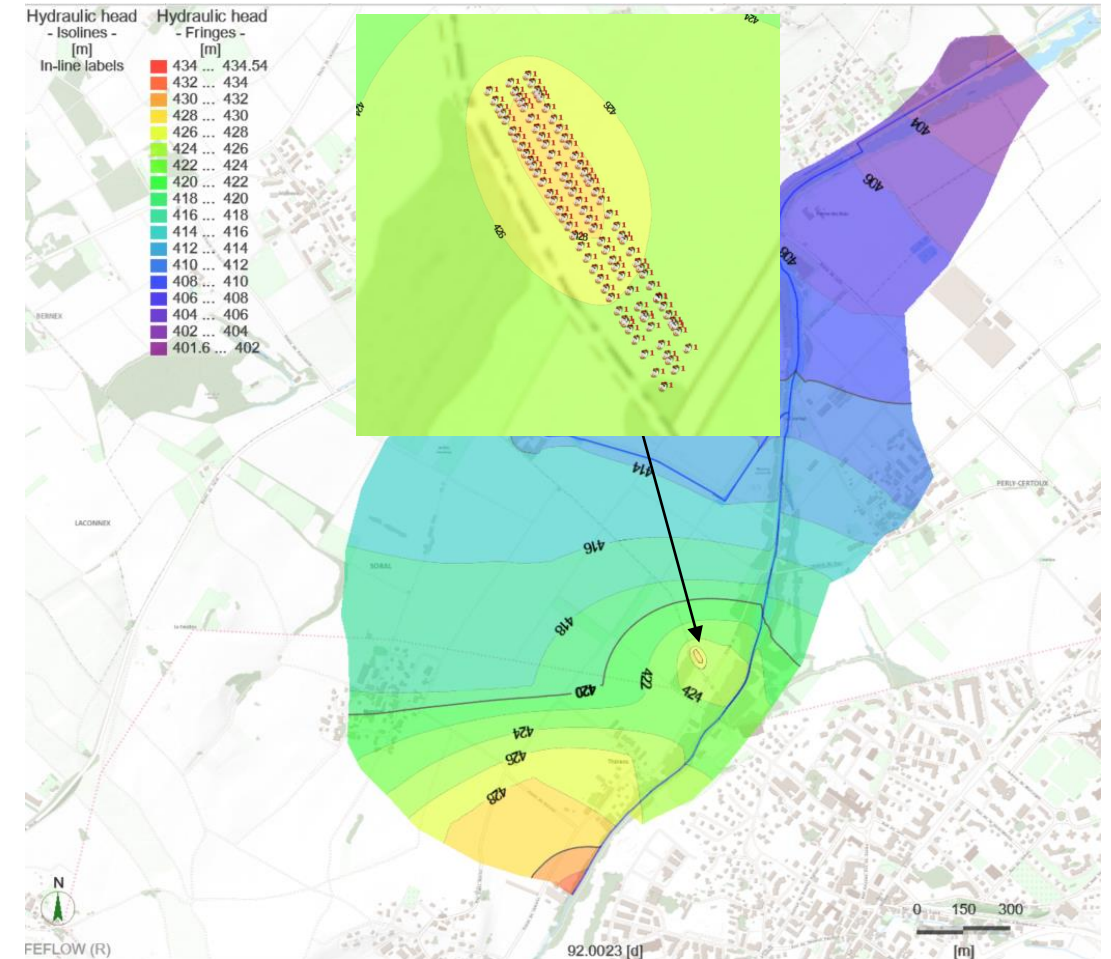
Carte piézométrique après recharge artificielle à un débit de 10 L/s à 100 m de l'Aire après 90 jours d'injection

Volume injecté de 77 760 000 L en 90 jours

L'infiltration a été effectuée avec 100 puits de 1 L/s repartis sur une longueur de 100 mètres.

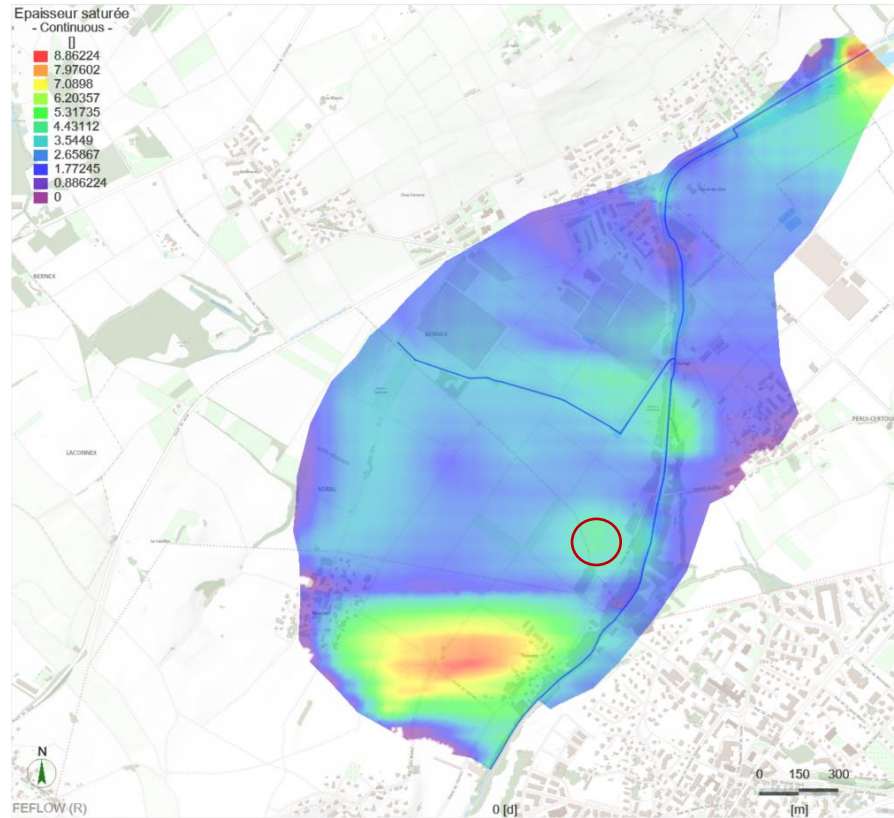


Carte piézométrique à l'état initial en hautes eaux



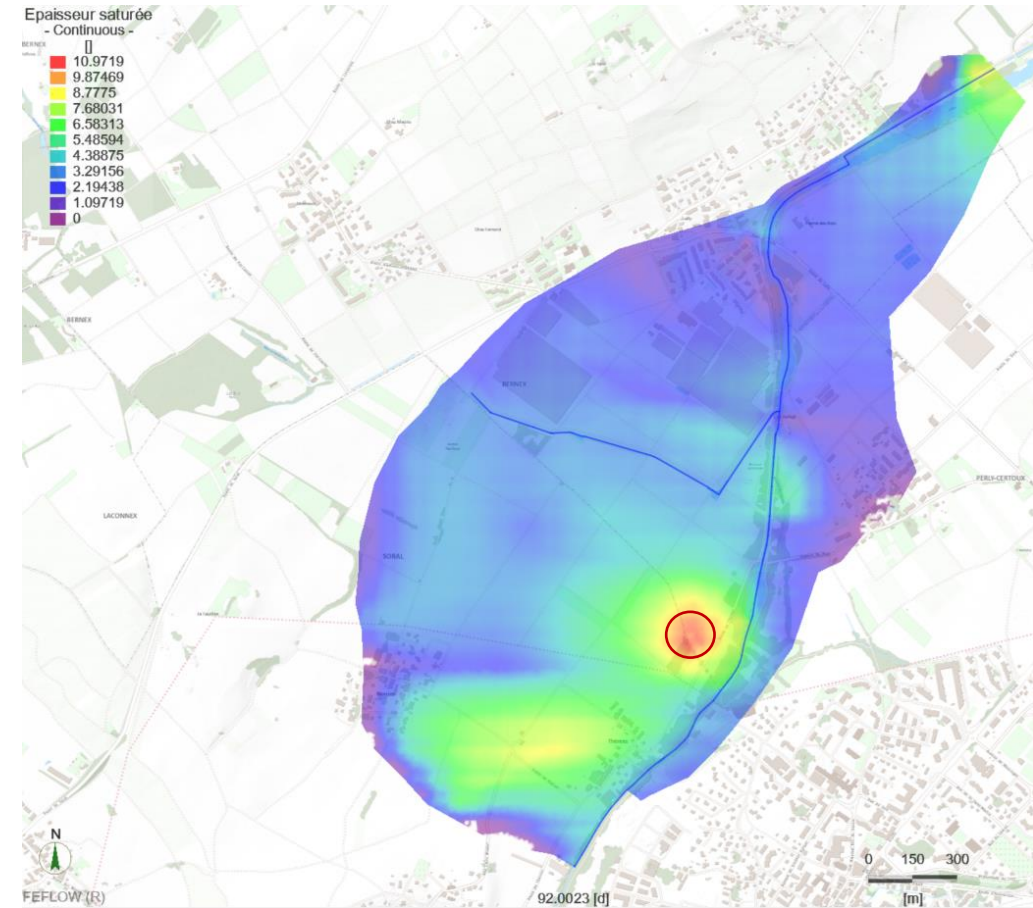
Carte piézométrique après recharge artificielle à un débit de 100 L/s à 100 m de l'Aire après 90 jours d'injection

Volume injecté de 777 600 000 L en 90 jours



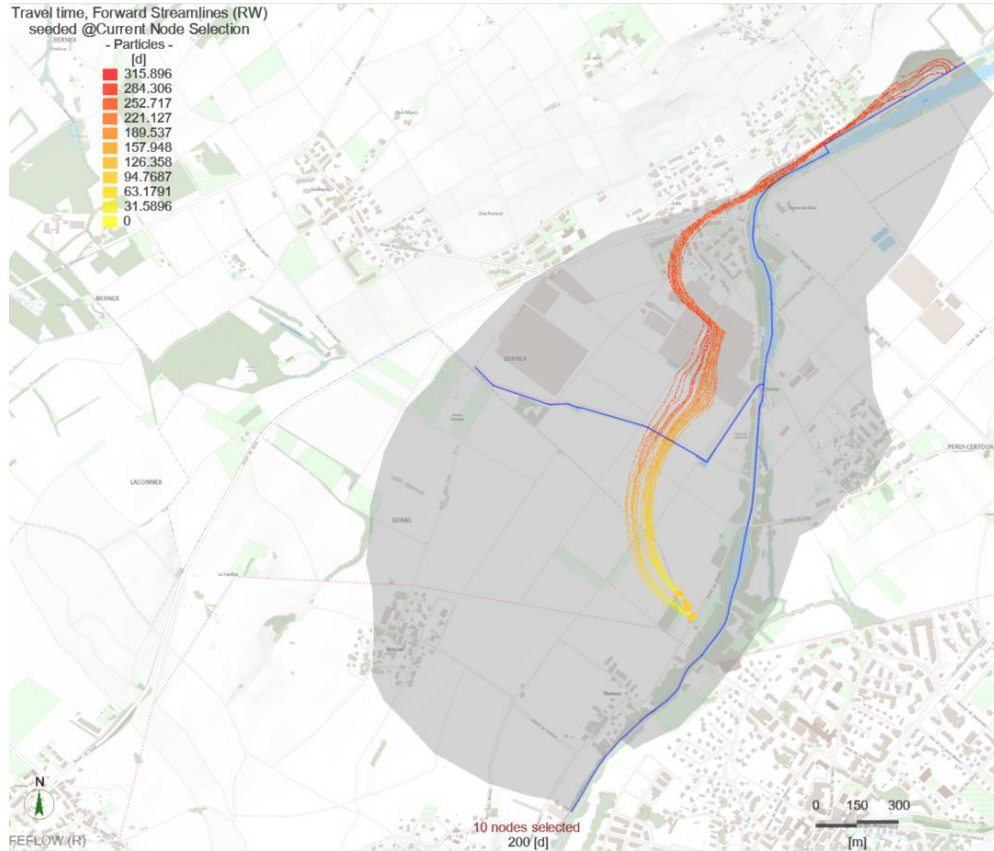
Carte des épaisseurs saturées à l'état initial

Site d'injection ○

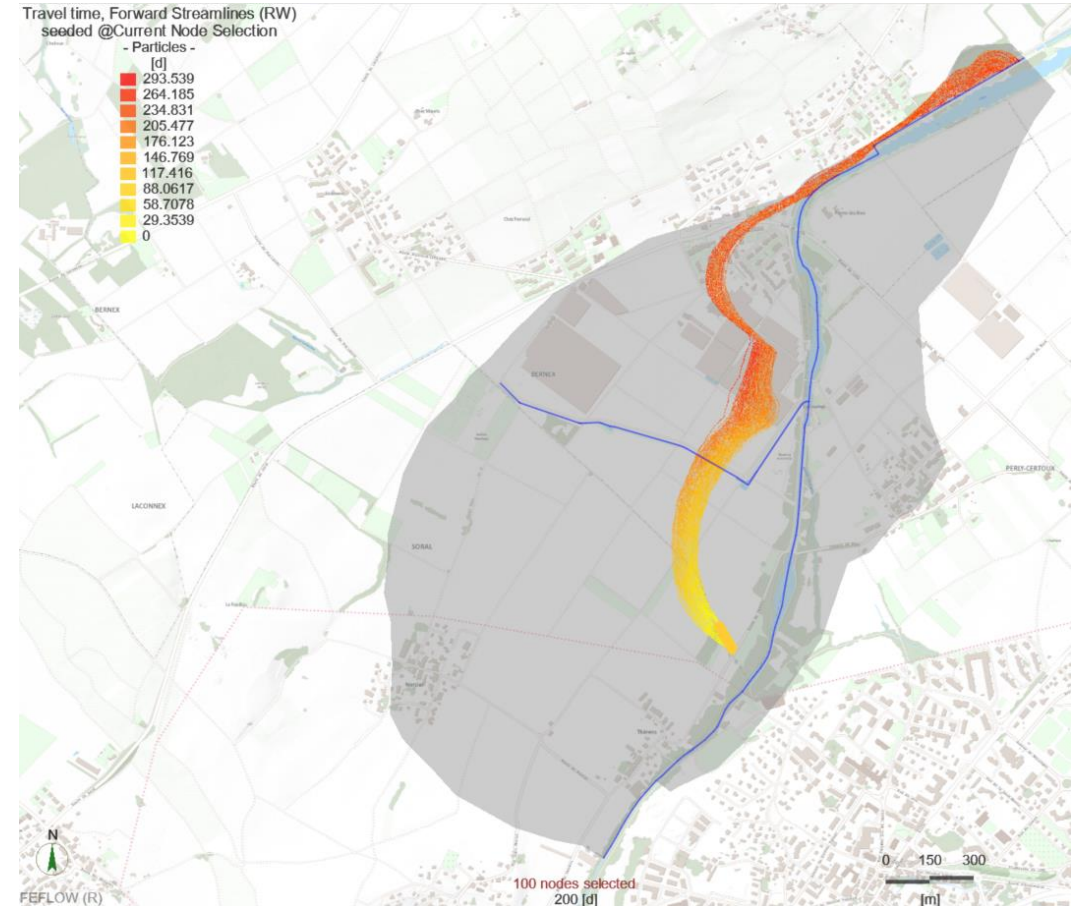


Carte des épaisseurs saturées après 90 jours d'injection à 100 L/s à 100m de l'Aire

- ✓ Augmentation du niveau d'eau d'environ 5 m au niveau de l'injection, par rapport à l'état initial



Trajet d'une particule d'eau après 3 mois d'injection à 10 L/s

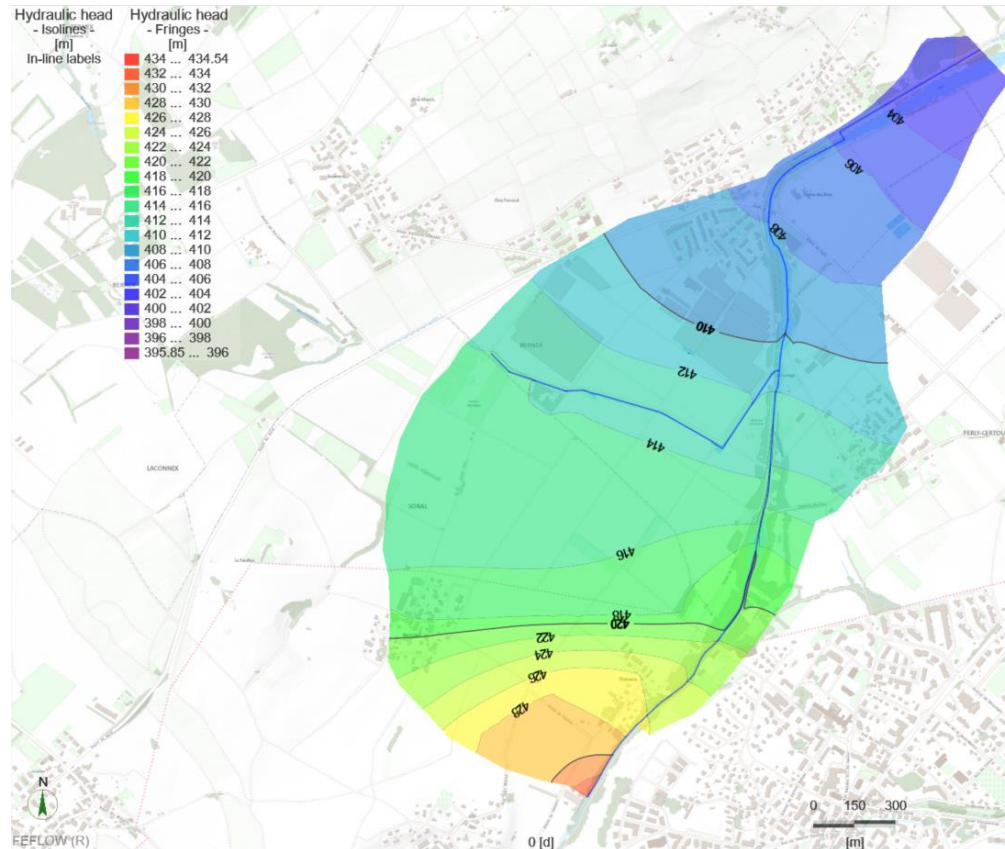


Trajet d'une particule d'eau après 3 mois d'injection à 100 L/s

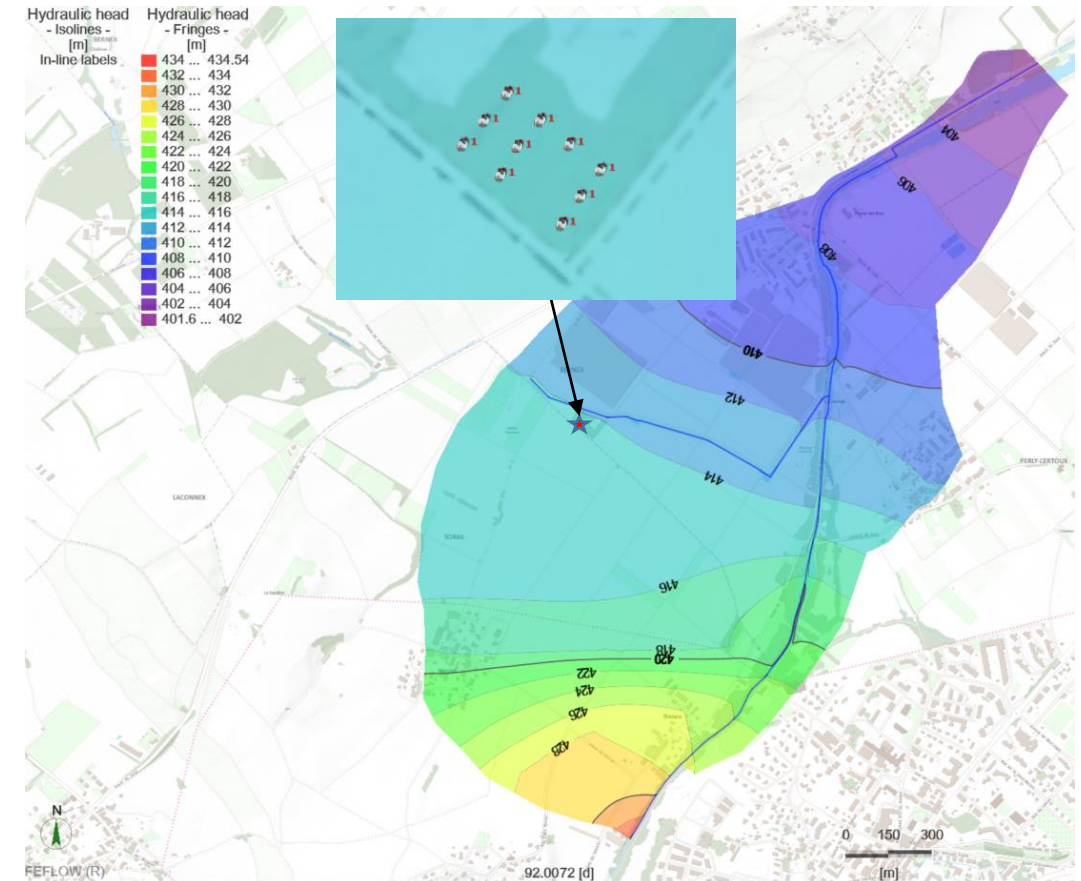
Pour les deux scénarios, indépendamment du débit d'injection:

- Premières arrivées de particules d'eau au niveau du Pont de Lully entre 250 et 300 jours (entre 8 et 10 mois) après l'arrêt de l'injection.
- Au niveau de la passerelle des Bis, les premières particules d'eau arrivent entre 150 et 200 jours (entre 5 et 6 mois).

Volume injecté sur 10 puits à un débit de 1 L/s



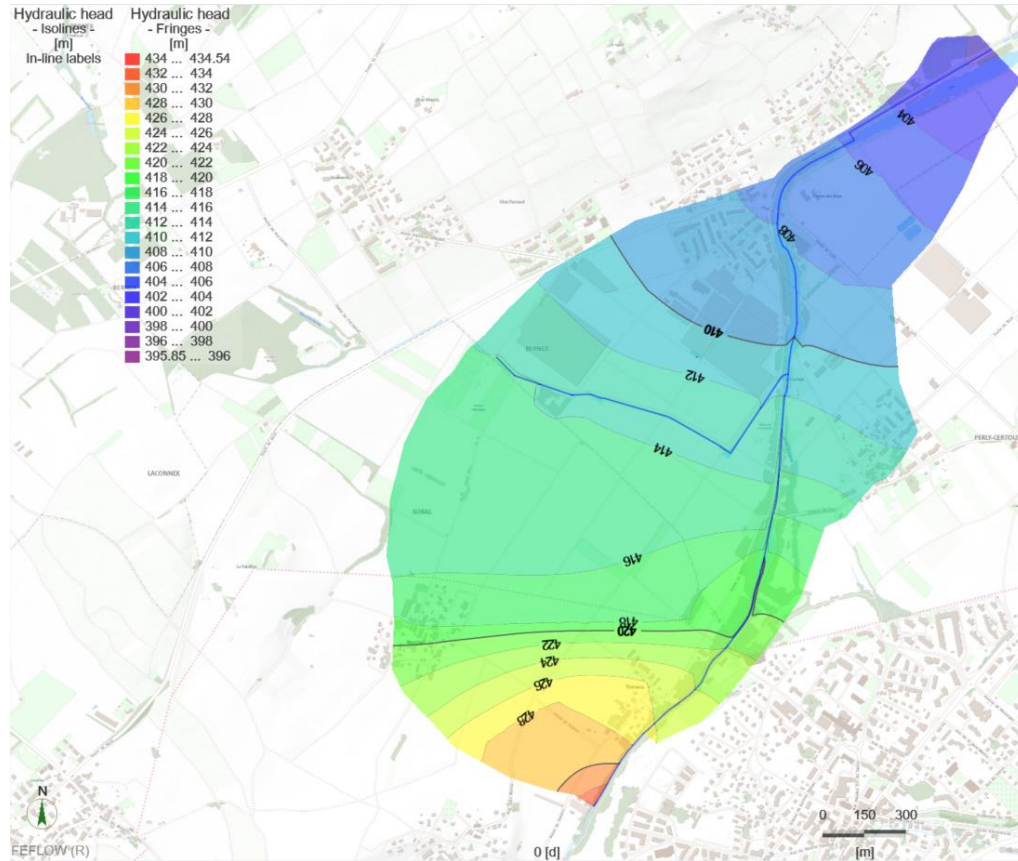
Carte piézométrique à l'état initial en hautes eaux



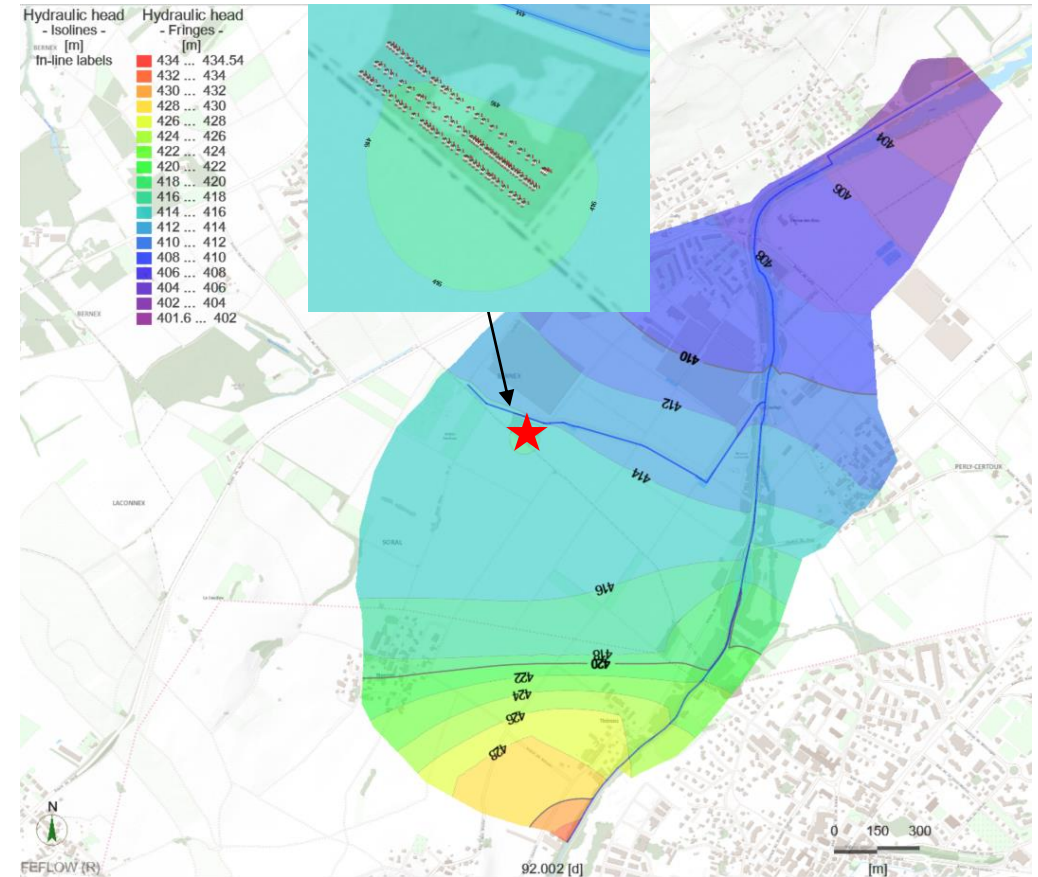
Carte piézométrique après recharge artificielle à 10 L/s à 900 m de l'Aire après 90 jours d'injection

Volume injecté de 77 760 000 L en 90 jours.

L'infiltration a été effectuée avec 100 puits de 1 L/s.

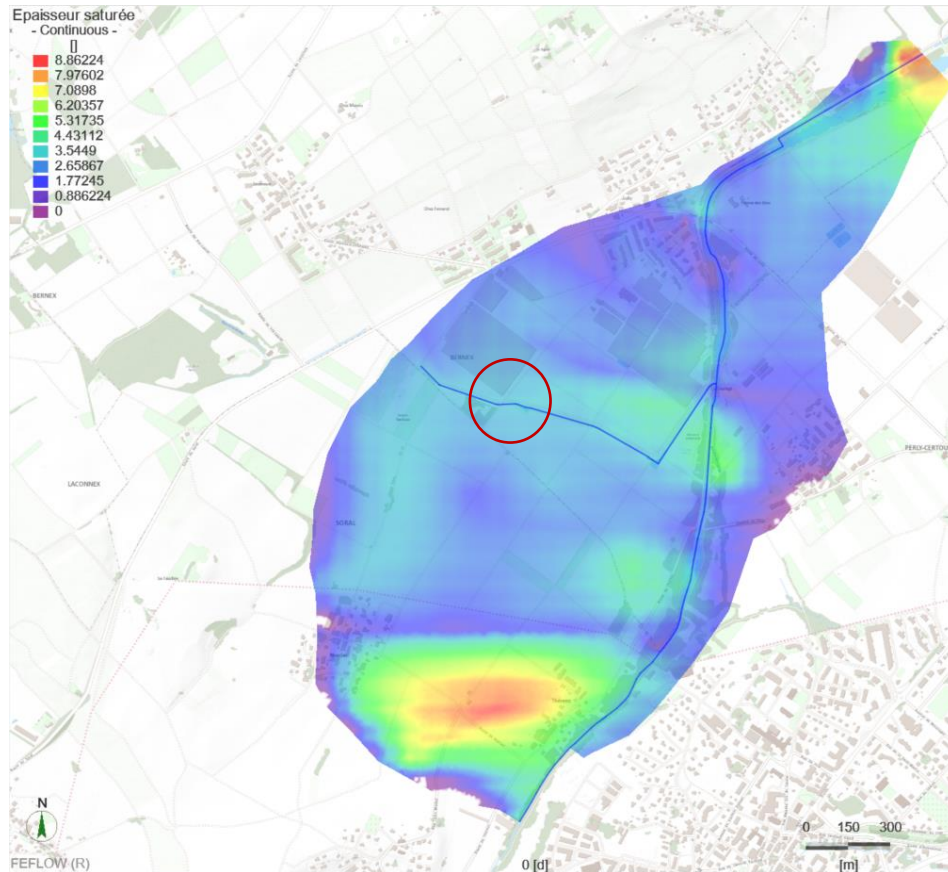


Carte piézométrique à l'état initial en hautes eaux



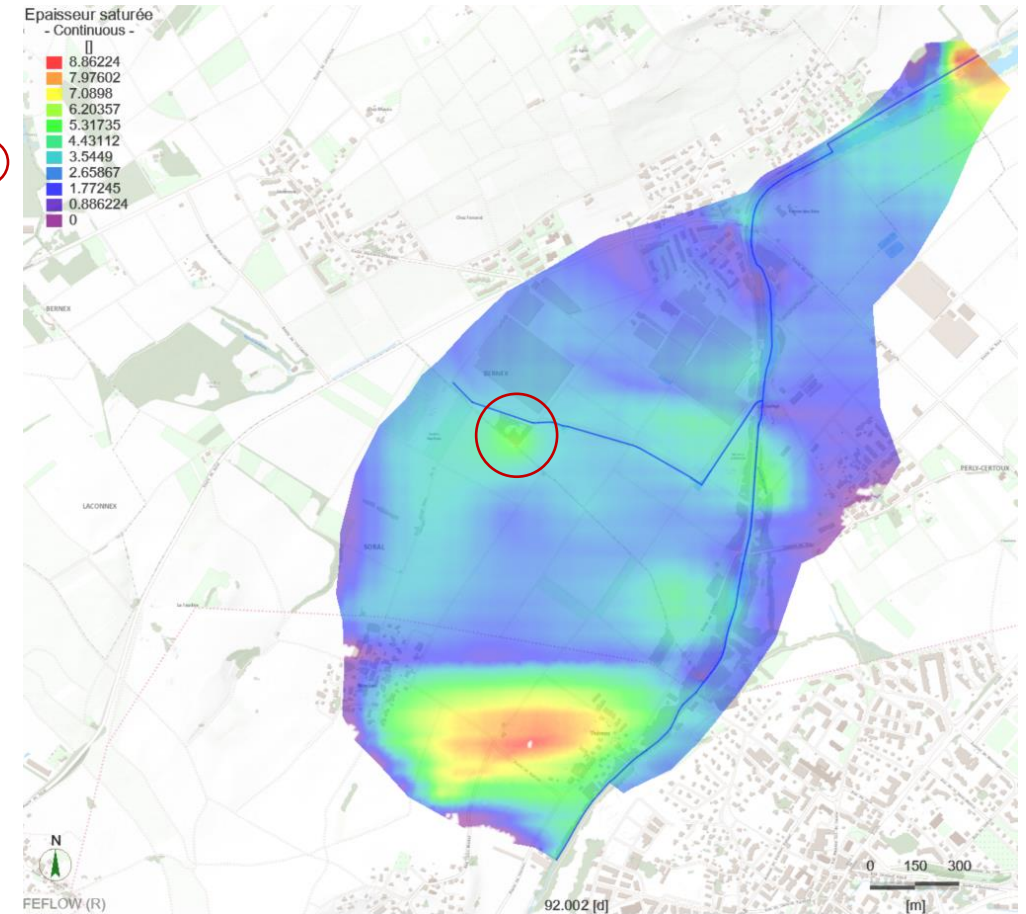
Carte piézométrique après recharge artificielle à un débit de 100 L/s à 900 m de l'Aire après 90 jours d'injection

Volume injecté de 777 600 000 L en 90 jours



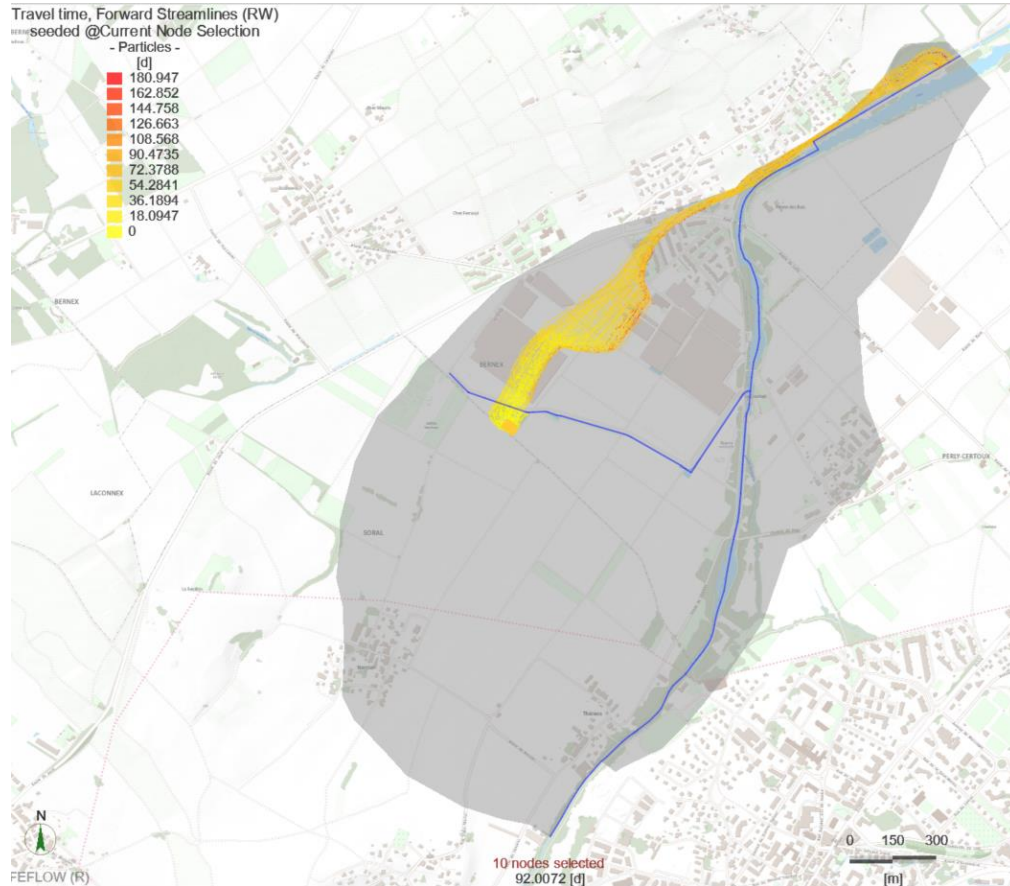
Site d'injection ○

Carte des épaisseurs saturées avant la recharge



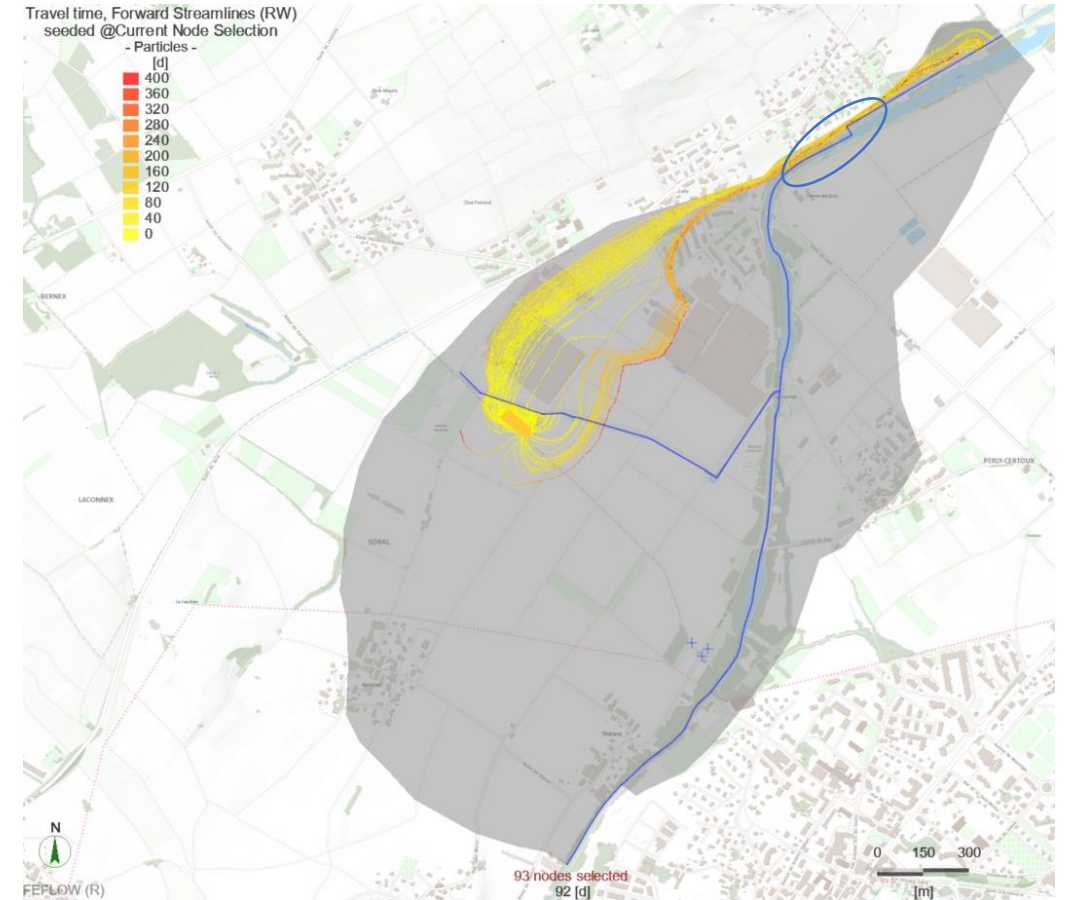
Carte des épaisseurs saturées après 90 jours de recharge à 100 L/s à 900m de l'Aire

✓ Augmentation du niveau d'eau d'environ 3 m au niveau de l'injection, par rapport à l'état initial



Trajet d'une particule d'eau depuis l'injection à 10 L/s

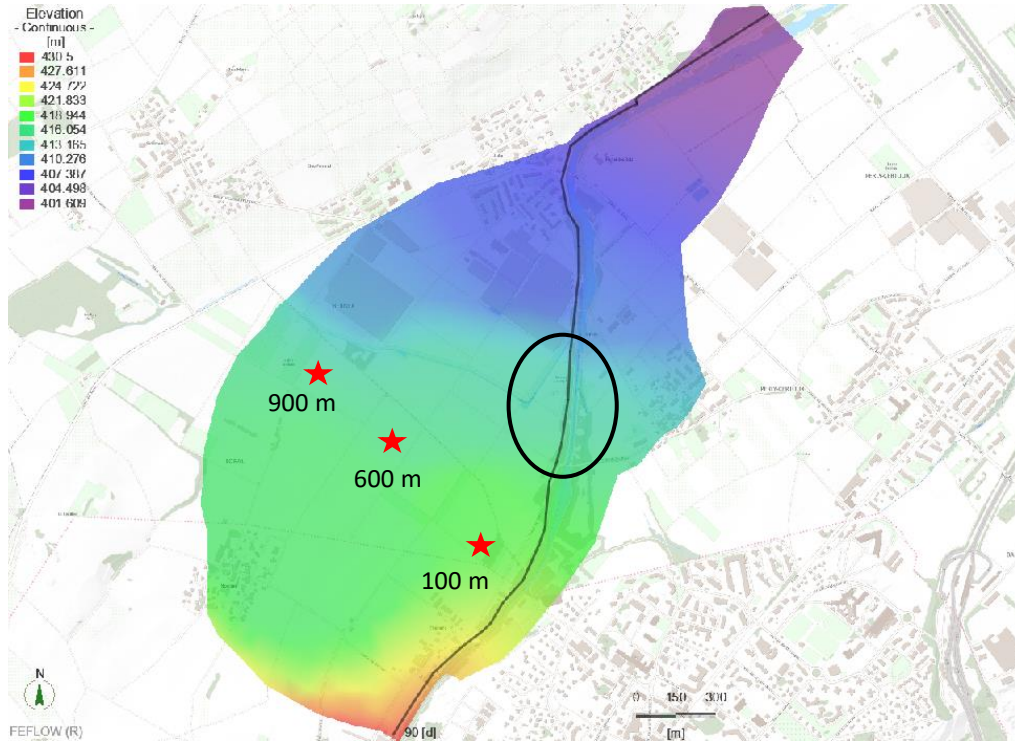
Arrivée des particules au Pont de Lully entre 90 et 125 jours après la fin de l'injection (entre 3 et 4 mois).



Trajet d'une particule d'eau depuis l'injection à 100 L/s

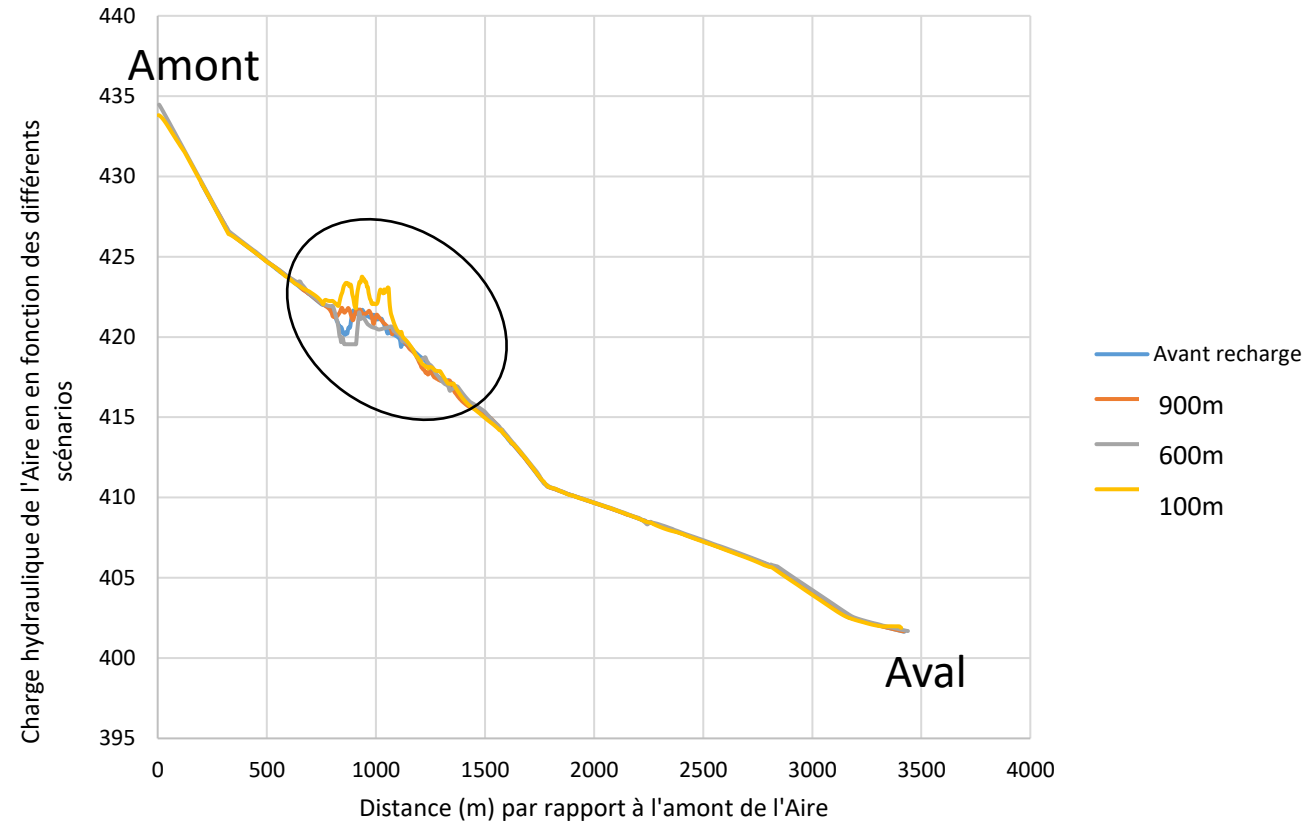
Trajet de l'eau beaucoup plus dispersé et donc plus long, avec des 1ères arrivées de particules d'eau au niveau du Pont de Lully entre 150 et 250 jours après la fin de l'injection (5 à 8 mois).

- ✓ Infiltration à 100 L/s pendant 3 mois avec 3 sites de recharge différents



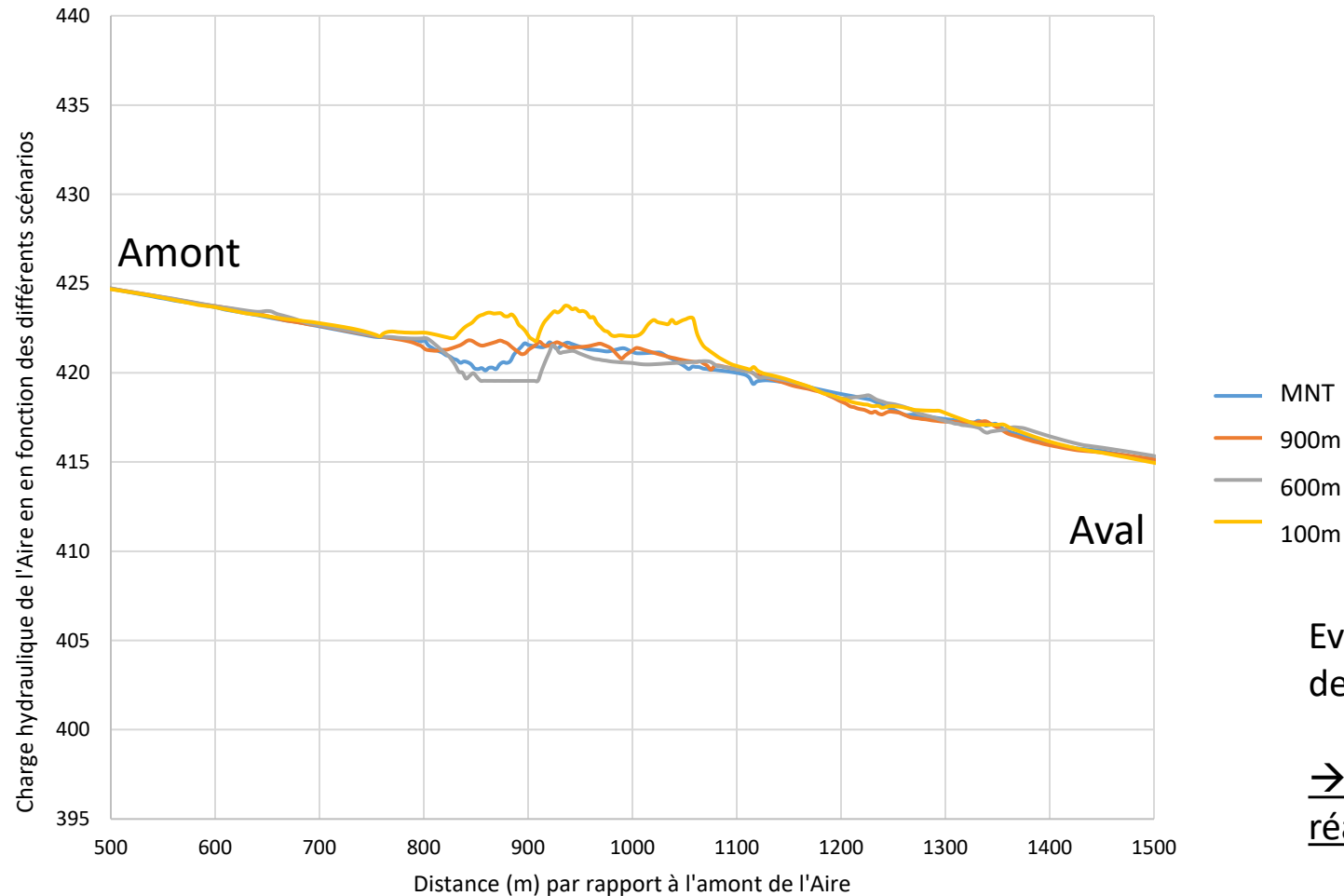
○ Zone de recharge principale de l'Aire selon le modèle

- ✓ Pour les 3 scénarios modélisés, on observe indirectement une exfiltration de la nappe au niveau de la passerelle des Bis



Evolution de la charge hydraulique le long de l'Aire lors de la recharge artificielle

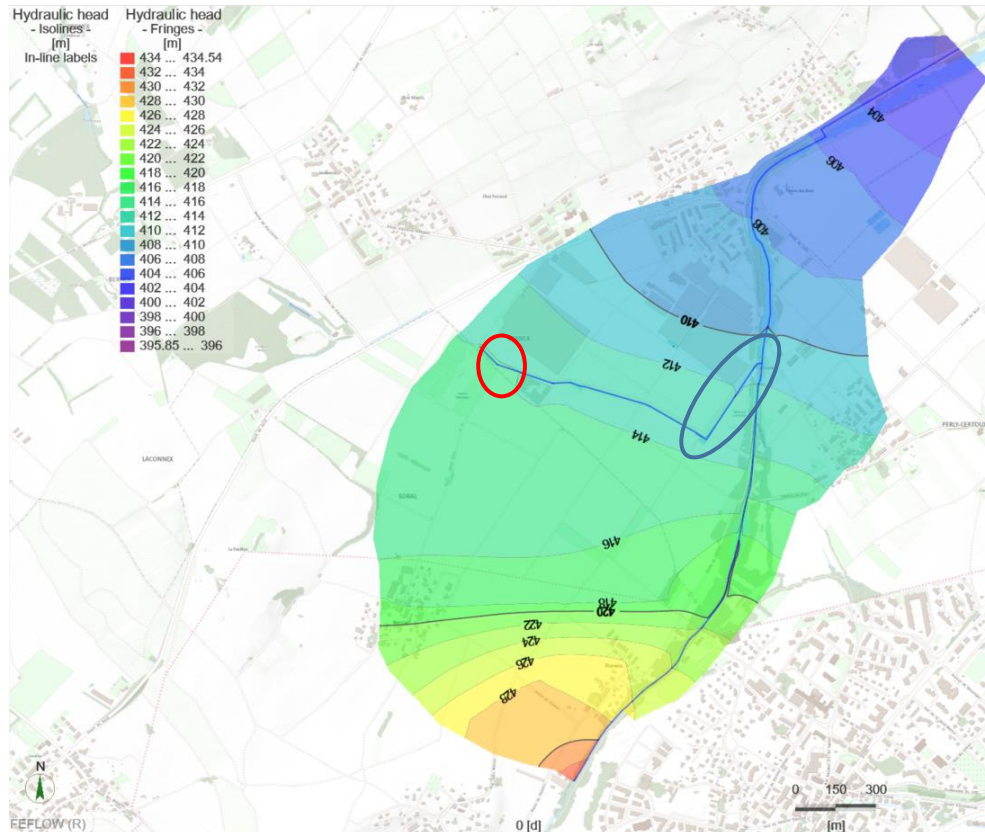
- ✓ Infiltration à 100 L/s pendant 3 mois avec 3 sites de recharge différents



Evolution de la charge hydraulique le long de l'Aire lors de la recharge artificielle

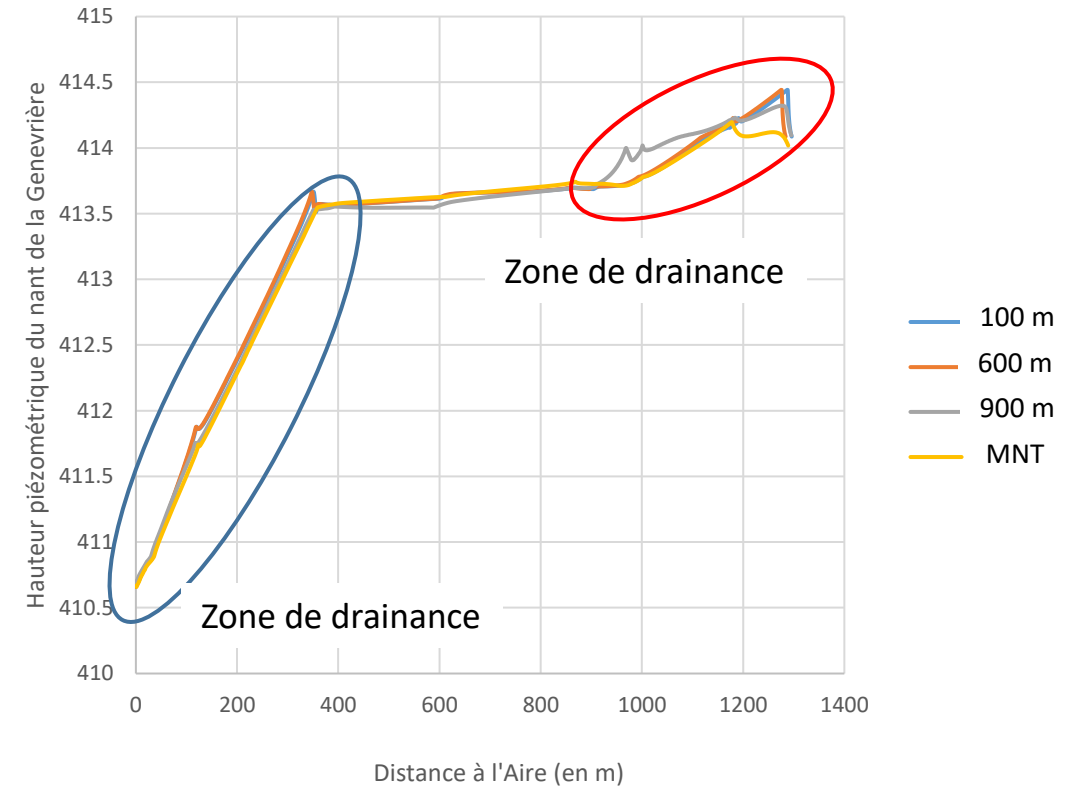
→ Le niveau de la nappe est plus élevé que l'Aire, réalimentation de la rivière

- ✓ Infiltration à 100 L/s pendant 3 mois
- ✓ 2 zones de drainance mises en évidence



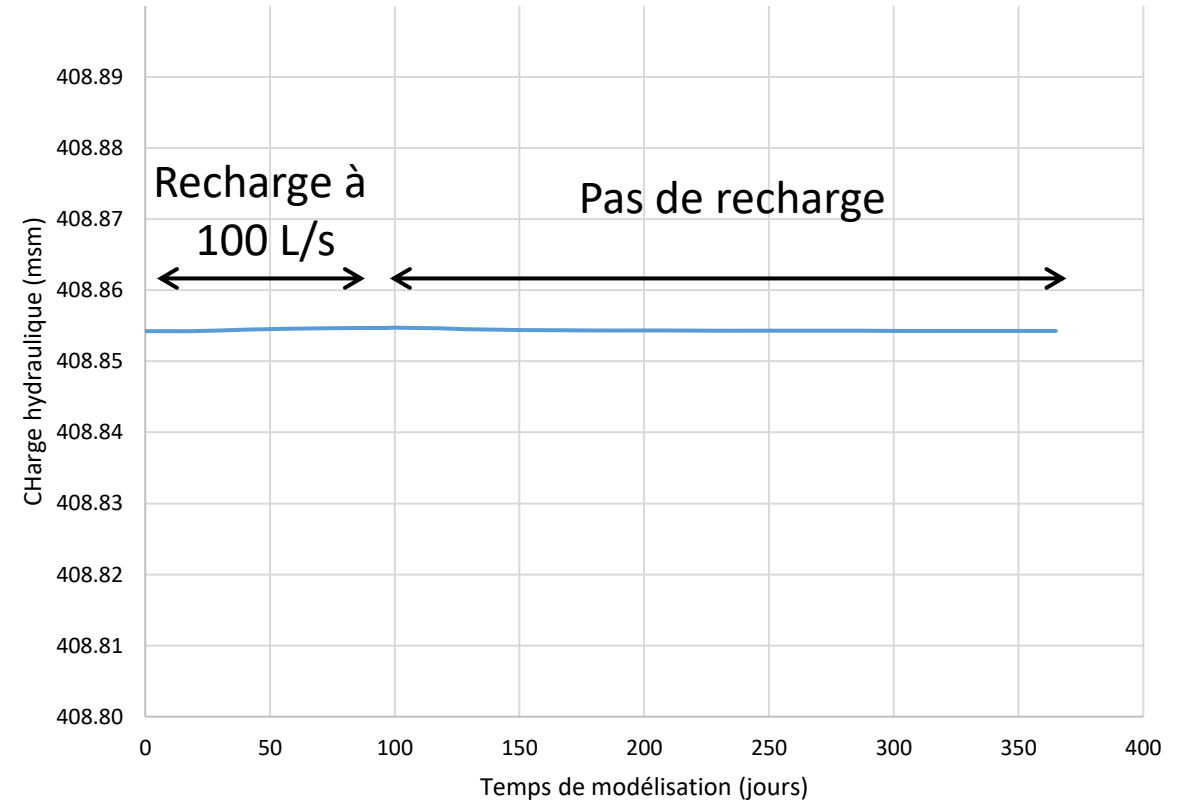
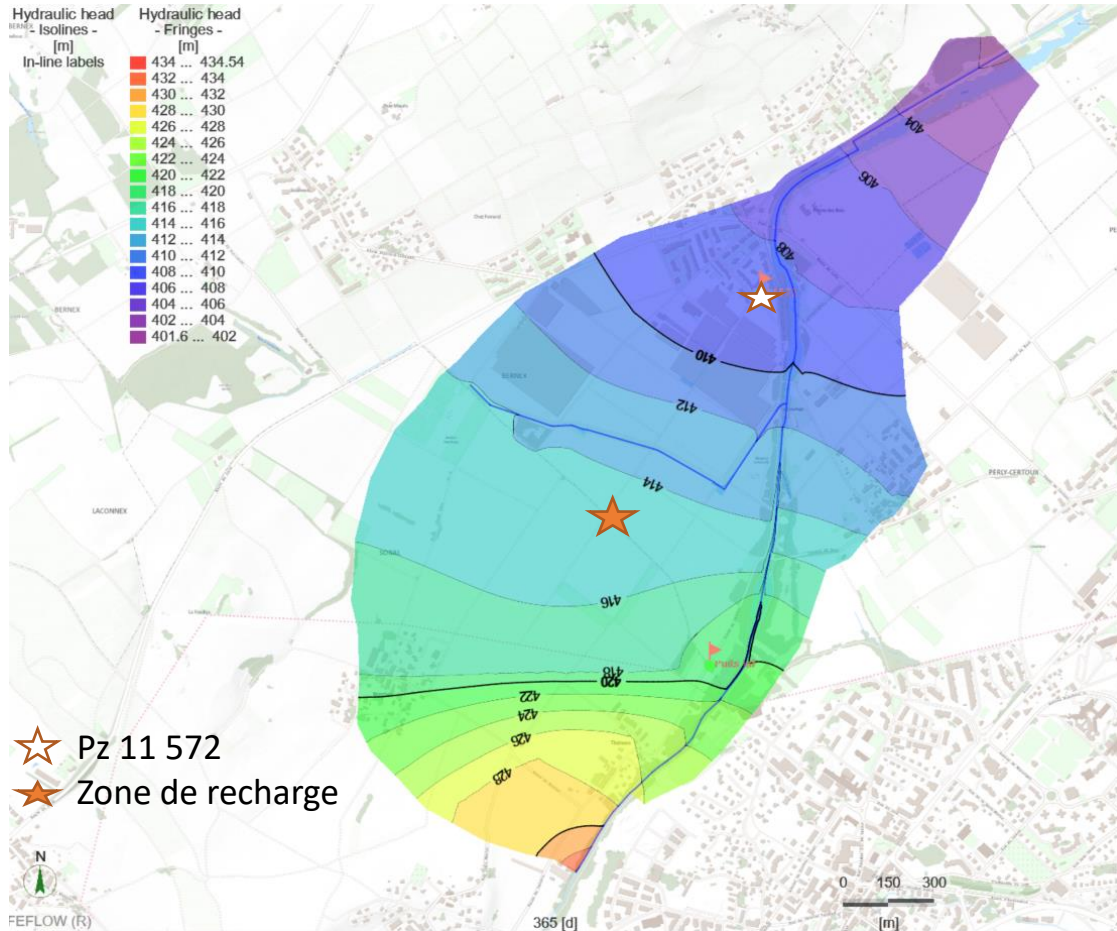
Selon le modèle, le Nant draine la nappe

- ✓ A hauteur de 11 L/s en hautes eaux.



Evolution de la charge hydraulique le long du Nant de la Genévrière lors de la recharge artificielle

→ Le niveau de la nappe est plus élevé que la Nant, réalimentation



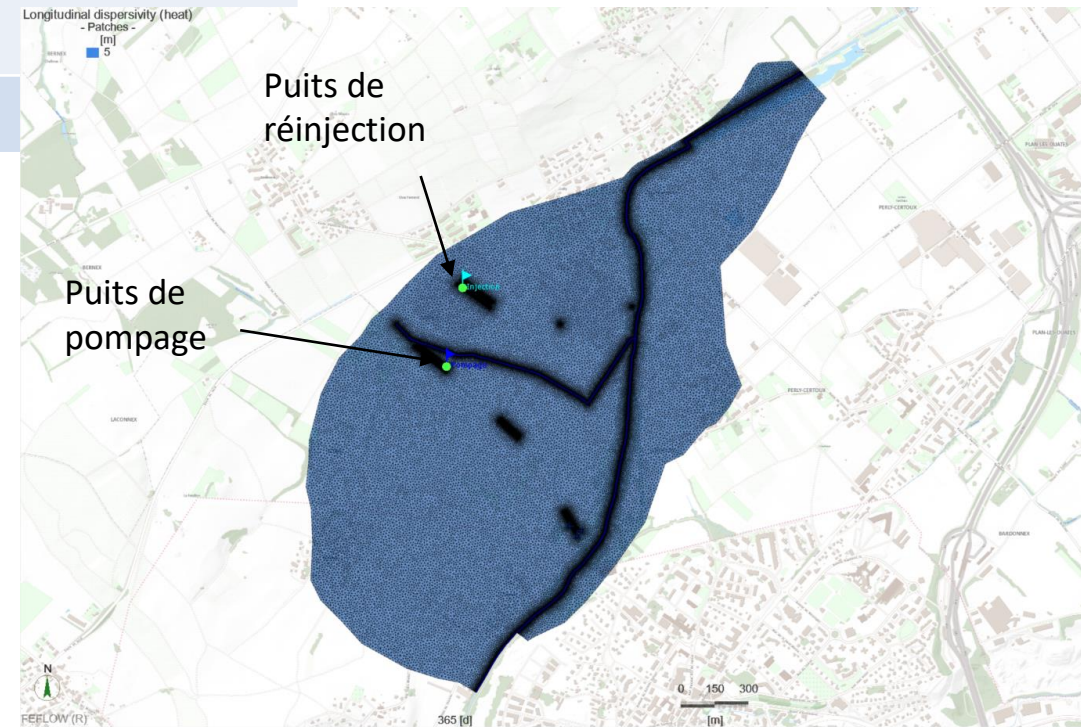
- ✓ Les mois suivant la recharge (100 L/s), la modélisation ne permet pas de mettre en évidence une élévation significative du niveau de la nappe au droit des habitations de Lully

Propriété physique	Valeur	Unité
Capacité calorifique volumique du solide	$2,52.10^6$	$J.m^{-3}.K^{-1}$
Capacité thermique du solide	3	$J.m^{-1}.s^{-1}.K^{-1}$
Capacité thermique du fluide	0,60	$J.m^{-1}.s^{-1}.K^{-1}$
Capacité calorifique volumique du fluide	$4,18.10^6$	$J.m^{-3}.K^{-1}$
Température initiale	11	°C
Dispersivité longitudinale (massique et thermique)	5	m
Dispersivité transversale (massique et thermique)	0,5	m

Description des propriétés physiques attribuées au modèle

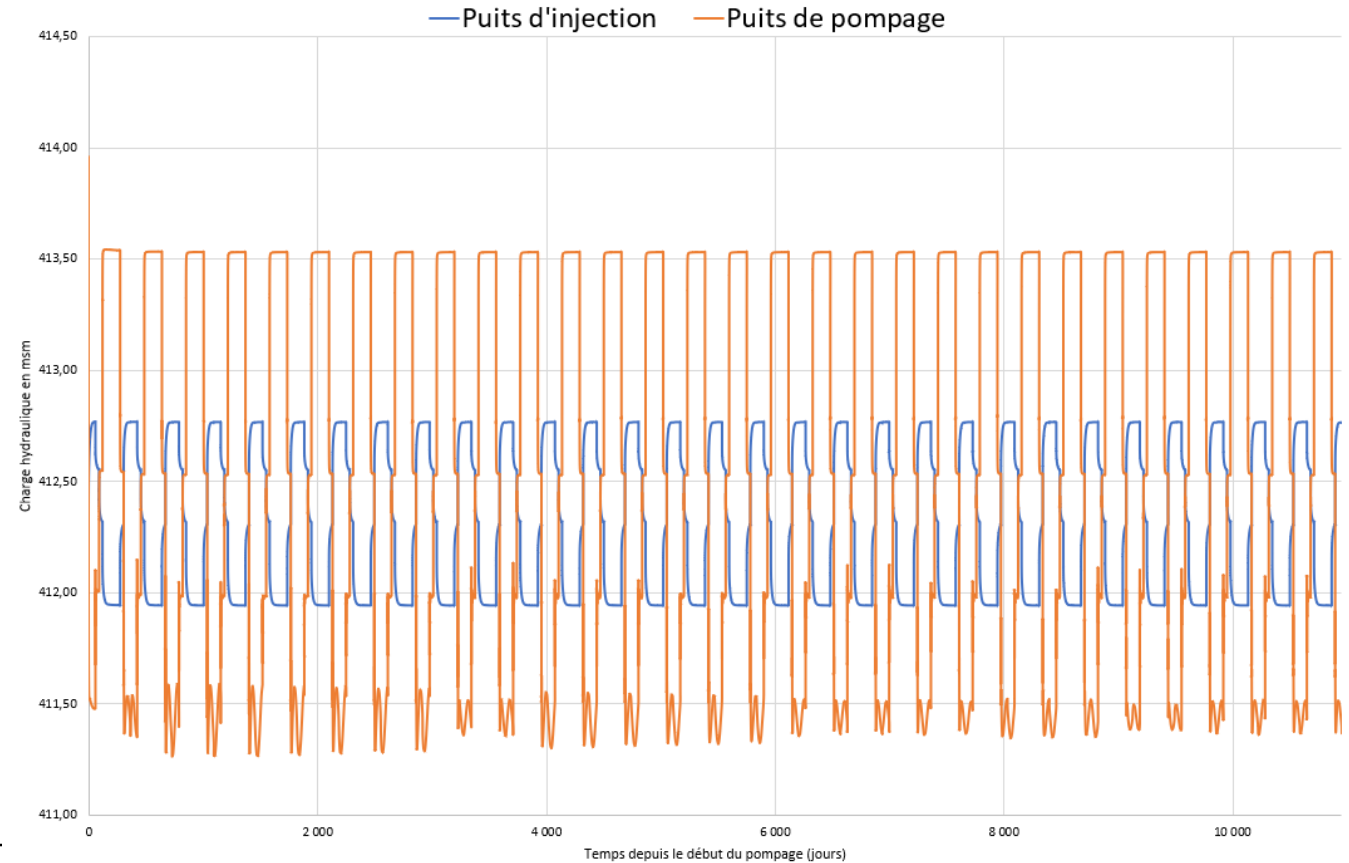
- ✓ Puits écartés de 354 m

Localisation des puits de l'installation thermique



Fonctionnement de la PAC sur 30 ans

	Débit typique logement	Débit hydraulique	ssance de la P	Delta T
Unité	%	L/min	kWh/mois	°C
Janvier	80	640	99517	-3
Février	80	640	89887	-3
Mars	60	480	74638	-3
Avril	40	320	48154	-3
Mai	10	80	12440	-3
Juin	10	80	12038	-3
Juillet	10	80	12440	-3
Août	10	80	12440	-3
Septembre	10	80	12038	-3
Octobre	40	320	49759	-3
Novembre	80	640	96307	-3
Décembre	80	640	99517	-3
Annuel	43	340	622 486	-3

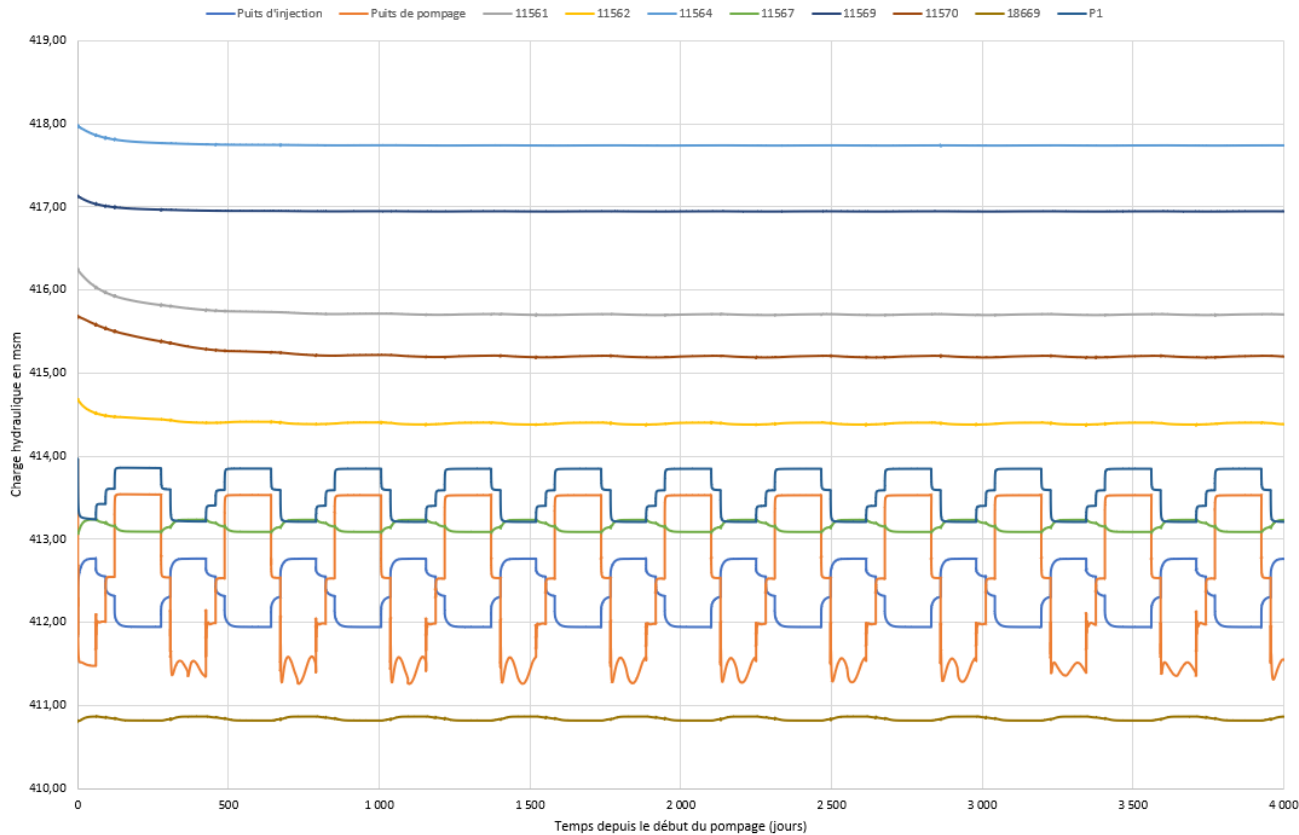
Chronique de débit sur 1 an appliqué au puits de pompage pendant 30 ans

- ✓ Simulation uniquement en fonctionnement de **chauffage**
- ✓ Débit nominal de **800 L/min**
- ✓ Puissance nominale de **167 kW**
- ✓ ΔT de **-3°C** sur toute l'année
- ✓ Fonctionnement de la PAC au moment les plus froids de l'année : de février à mars et de novembre à décembre

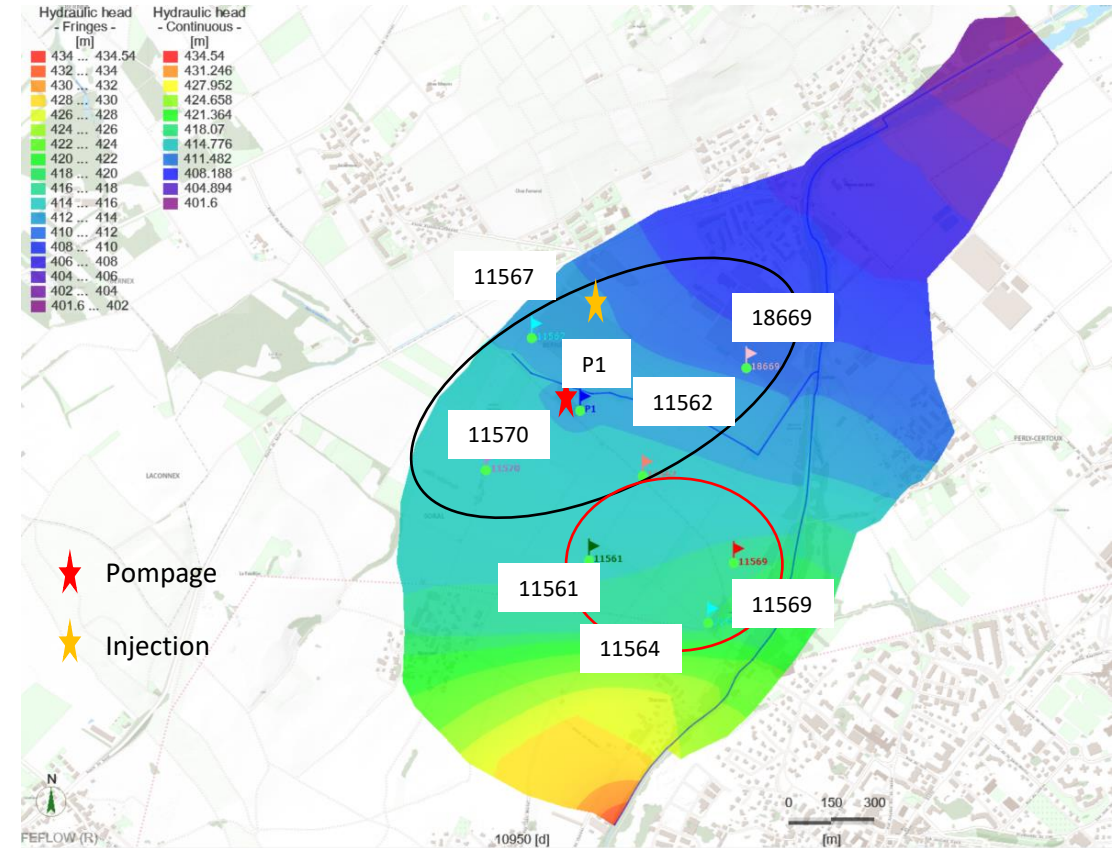
Suivi du niveau de la nappe lors du fonctionnement de la PAC pendant 30 ans

- ✓ Remontée de 0,1 m à 1 m au niveau du puits d'injection
- ✓ Rabattement de 0,40 à 2 m au niveau du puits de pompage

Impact de la PAC sur le niveau de la nappe

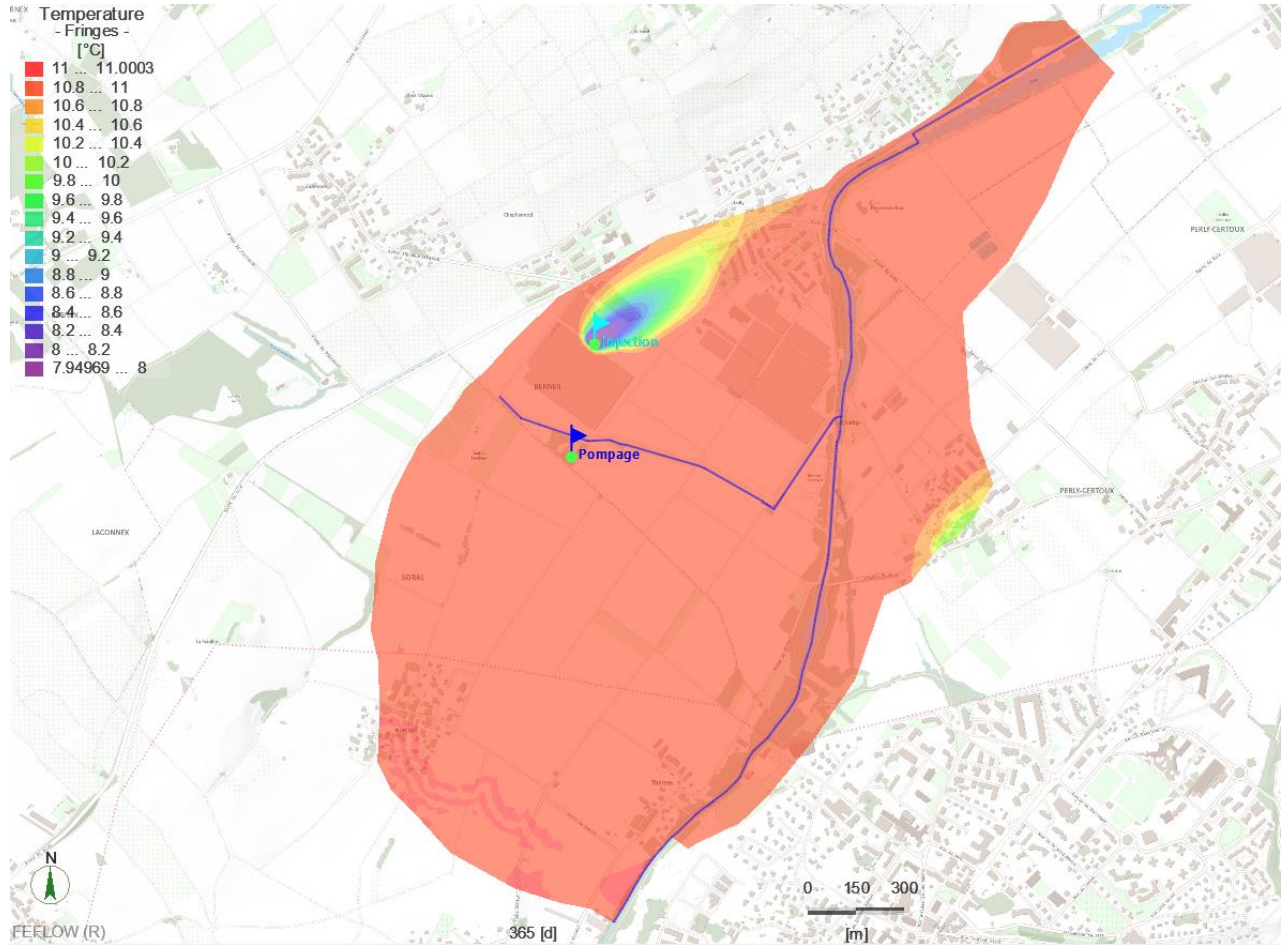


- ✓ Les piézomètres 11562, P1, 11567, 18669 et 11570 montrent une évolution du niveau de nappe qui varie suivant la chronique de réinjection.
- ✓ Le niveau au droit des piézomètres 11564, 11561, 11570 et 11569 baissent de 20 à 40 cm pour atteindre un niveau stable au bout de 1 an.



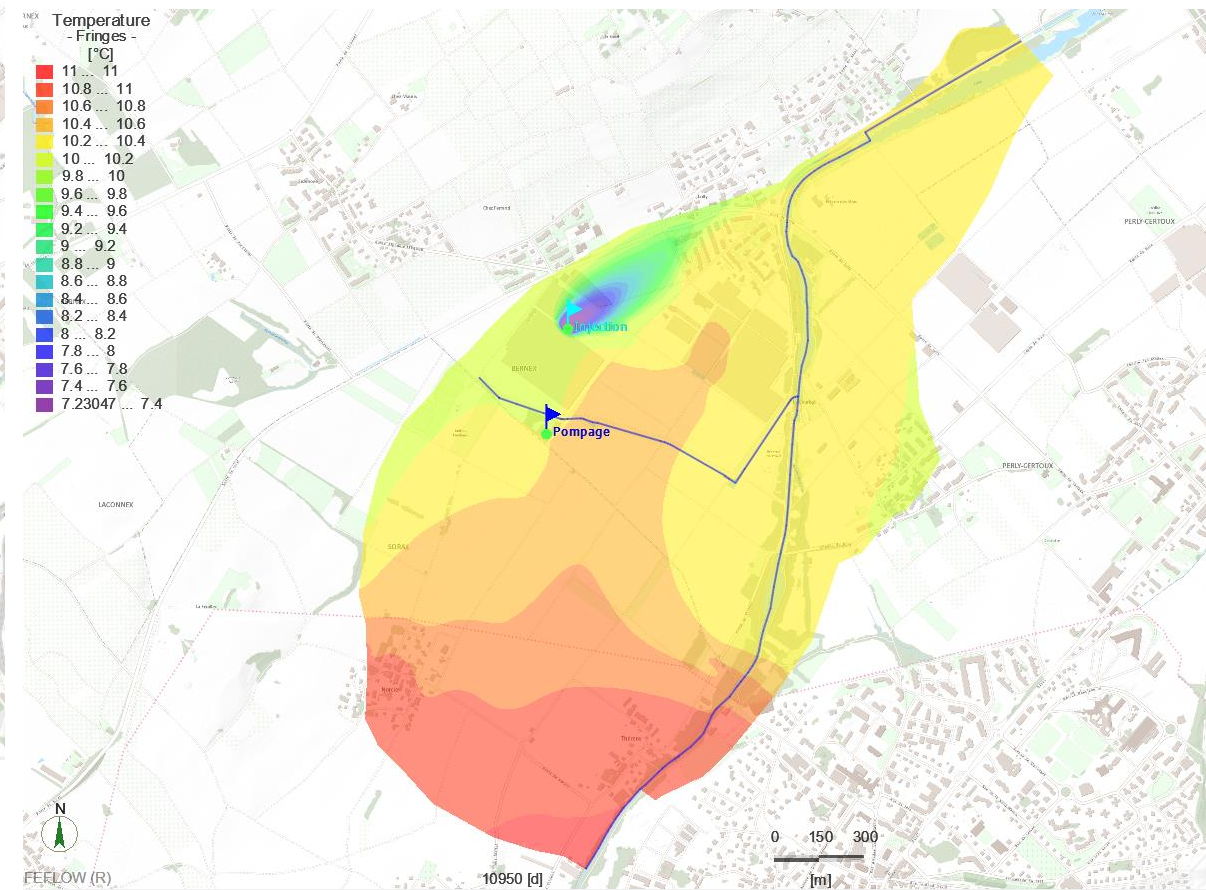
- Zone dont le niveau de la nappe varie de manière annuelle en fonction du débit de réinjection de la PAC durant les 30 ans : 500 m au Nord Est et 300 m au Sud Ouest autour du puits de pompage.
- Zone dont le niveau de la nappe diminue d'une dizaine de centimètres la première année puis se stabilise

Impact de la PAC sur la température de la nappe

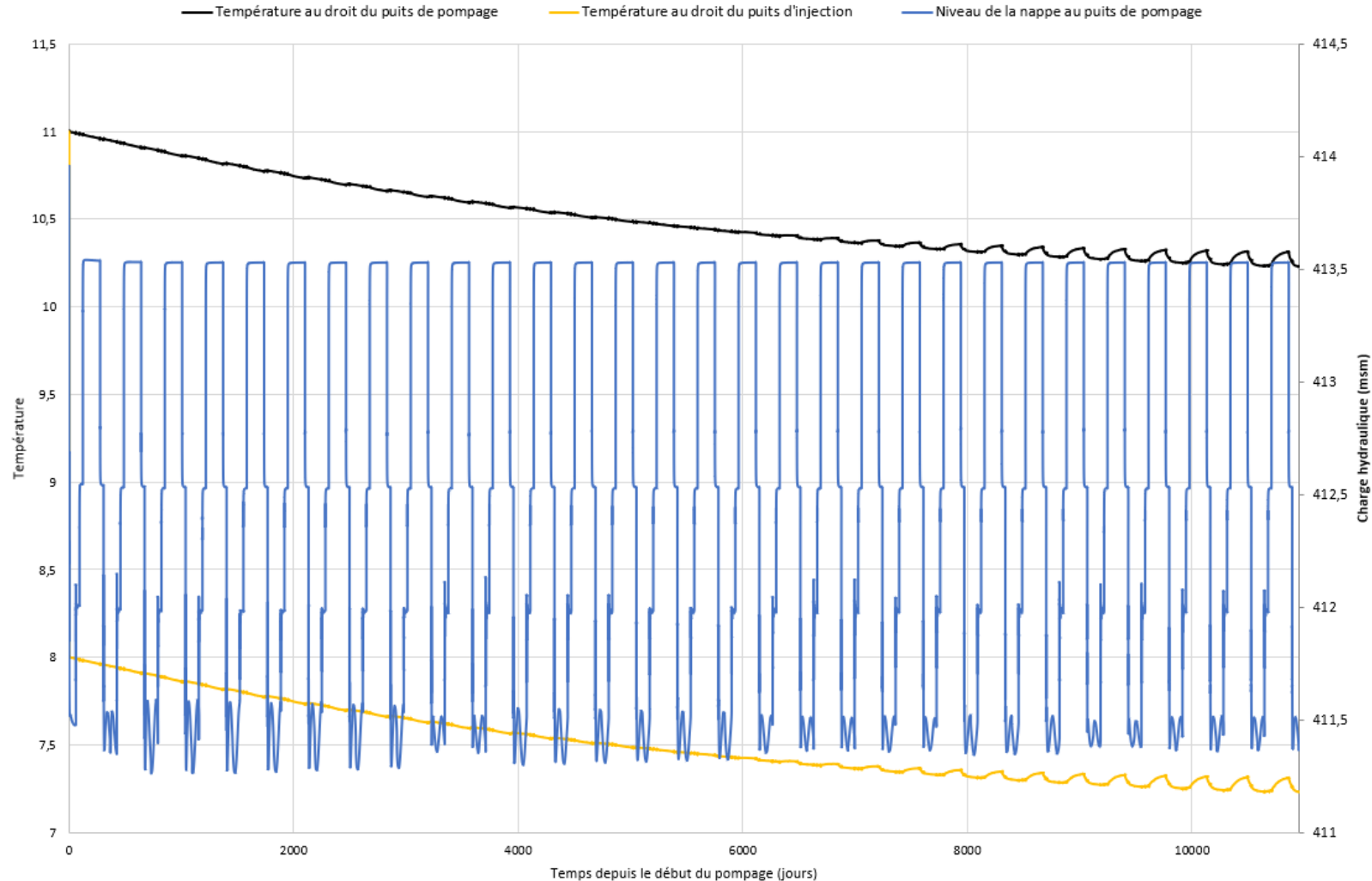


Température de la nappe après 1 an de fonctionnement de la PAC

- ✓ Au bout de 30 ans de fonctionnement de la PAC, la température globale de la nappe diminue de 1°C.
- ✓ Après 30 ans de fonctionnement, la température de l'eau pompée est de 10,3 °C.

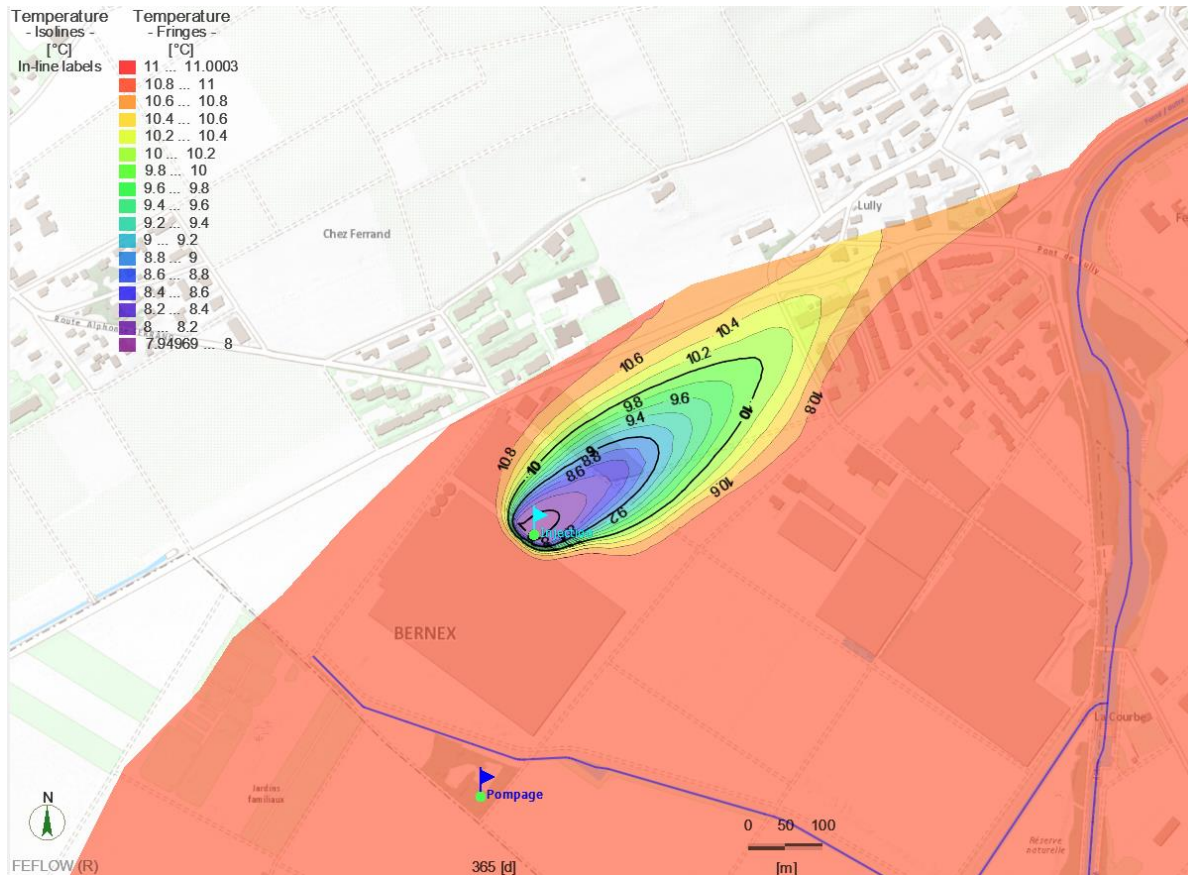


Température de la nappe après 30 ans de fonctionnement de la PAC

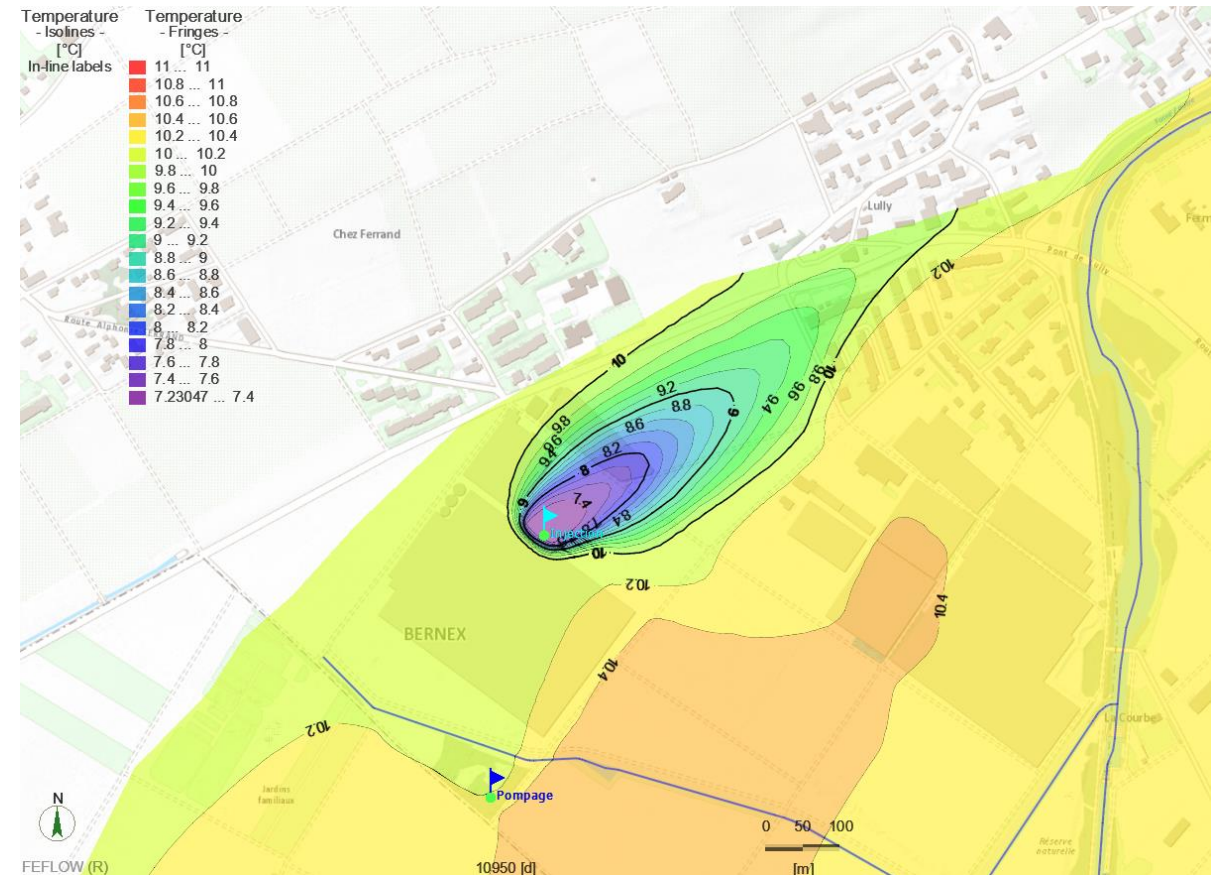


- ✓ La température au droit du puits de pompage diminue de 11°C à 10,3°C en 30 ans.
- ✓ La température au droit du puits d'injection diminue de 11°C à 7,2°C en 30 ans.
- ✓ Au bout de 18 ans la température ne diminue plus linéairement. Des augmentations de la température (0,1°C) sont perceptibles lorsque le débit de pompage diminue.

Evolution de la température de la nappe et du niveau de la nappe pendant 30 ans de fonctionnement de la PAC



Bulle thermique après 1 an de fonctionnement de la PAC



Bulle thermique après 30 ans de fonctionnement de la PAC

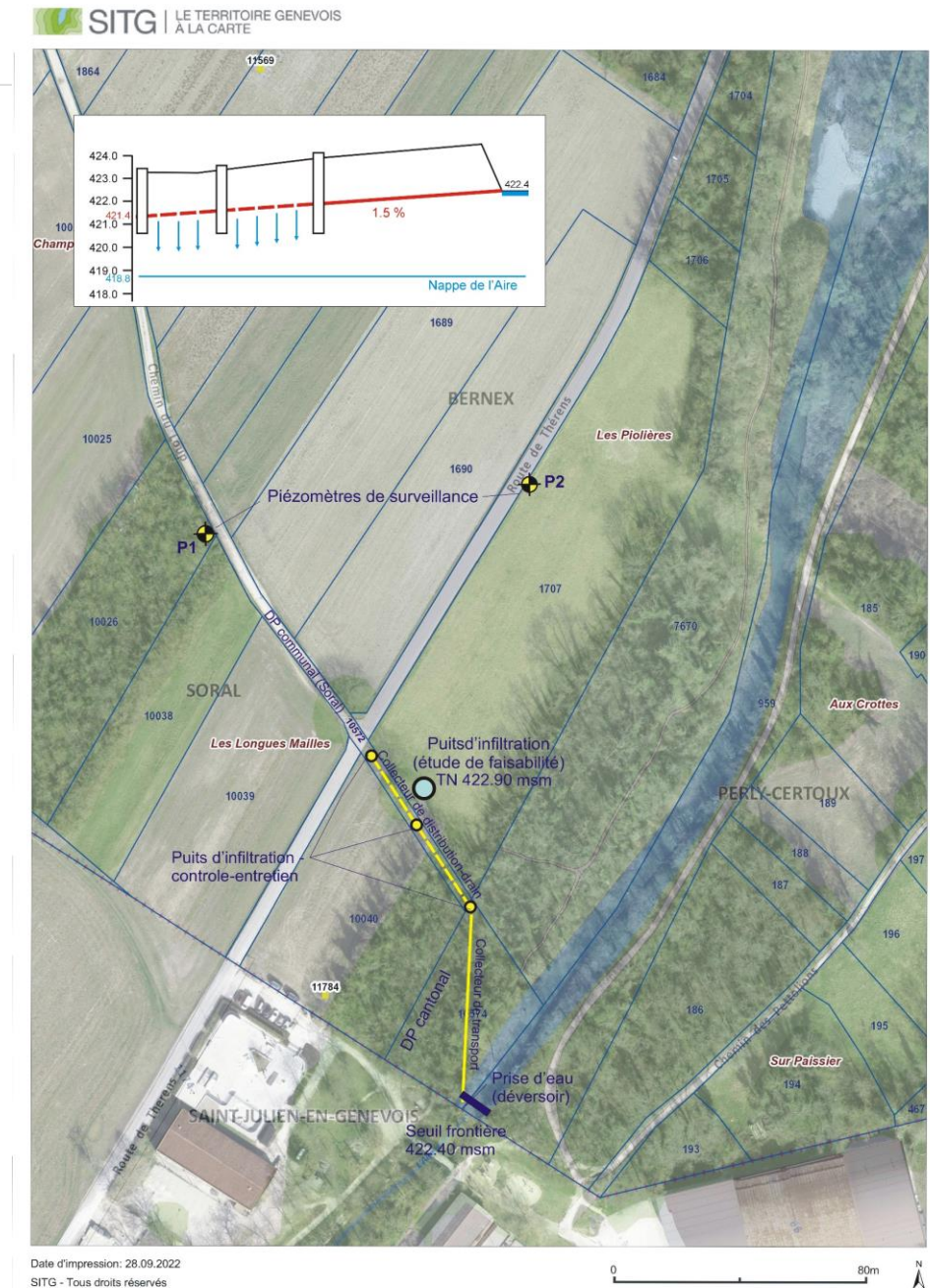
- ✓ Au bout de 10 ans le température au puits de pompage diminue de 0,5°C.
- ✓ La bulle thermique atteint l'Aire après 9 ans de fonctionnement de la PAC (~1° inférieur).

- ✓ Calage du modèle en régime permanent en hautes et basses eaux ainsi qu'en régime transitoire
- ✓ Simulation de **plusieurs scénarios d'injection** afin de quantifier l'impact du débit et de l'emplacement de la recharge sur le niveau de la nappe et donc sur la réalimentation de l'Aire.
 - ❑ Variation du débit d'injection de 10 l/s à 100 l/s
 - ❑ Injection à 100 m, 600 m, 900 m de l'Aire
 - ❑ Simulation des niveaux de la nappe en aval 1, 2, 3, ..., 12 mois après la fin de l'injection → Pas d'influence sur les habitations de Lully
- ✓ Les résultats de modélisation permettent de mettre en évidence plusieurs points sur le comportement de la nappe suite à une injection d'eau de plusieurs mois:
 - ❑ Plus le débit et le temps d'injection sont importants plus le niveau de la nappe est impacté et plus celle-ci peut jouer son rôle d'apport hydraulique lors des périodes d'étiage
 - ❑ Les simulations indiquent un **temps de transfert vers l'Aire** de l'eau injectée de l'ordre de **150 à 250 jours, 5 à 8 mois**.
 - ❑ L'impact de l'injection après son arrêt, est relativement long et pourrait permettre une alimentation plus importante de l'Aire sur certains secteurs
 - ❑ Le **Nant de la Genévrière** draine la nappe en basses et hautes eaux *selon le modèle*, **son rôle n'est pas encore clairement défini et mal contraint par le modèle** → **Investigations complémentaires nécessaires**

- ✓ La modélisation de l'exploitation thermique sur 30 ans a permis de conclure les points suivants :
 - ❑ La réinjection dans le cadre de l'exploitation thermique crée une bulle thermique qui atteint le puits de pompage au bout de 4 ans et l'Aire au bout de 9 ans.
 - ❑ Les températures de cette bulle varient entre 10.3 et 7.2°C.
 - ❑ La température globale de la nappe diminue de 1°C après 30 ans d'exploitation thermique.

- ✓ **En fonction des objectifs (réalimentation de l'Aire, géothermie, ...) il semble nécessaire que la réalimentation de la nappe soit répartie au droit de différents secteurs → homogénéisation des niveaux hydrostatiques**

- ✓ Finalisation de la modélisation → OK
- ✓ Evaluation de l'influence du Nant de la Genévrière sur la nappe → 1^{er} semestre 2023
- ✓ Evaluation des sites de réinjection possibles → 1^{er} semestre 2023
- ✓ Evaluation des dispositifs de réinjection / dérivation possibles → 1^{er} semestre 2023



SITG | LE TERRITOIRE GENEVOIS
À LA CARTE

