

Marais des Hotteaux – La Burbanche (01)

Rapport de suivi annuel

Du 28/06/2021 au 30/08/2022

Installation et suivi de 4 stations hydrométriques et 2 stations piézométriques



Eric Recht
Stéphane Orofino

Julie Buisson

 **HydroServices**

36 rue du Cerf
67350 UBERACH

Tél : +33 (0)3.88.07.50.06

Fax : +33 (0)3.88.07.50.09

Web : www.hydroservices.net



BUGEYSUD
Communauté de communes

Table des matières

1.	Contexte de l'étude	4
2.	Localisation de la zone d'étude	4
2.1.	Emplacement des sites	5
3.	Caractéristiques du matériel de mesure installé	5
4.	Caractéristiques des installations réalisées	7
4.1.	Forage des piézomètres PZ1 et PZ2	7
4.1.1.	Matériels utilisés	7
4.1.2.	Réalizations	7
4.2.	Création des stations limnimétriques	10
4.2.1.	Site A : Furan Amont	11
4.2.2.	Site B : Source principale	12
4.2.3.	Site C : Source secondaire	13
4.2.4.	Site D: Aval Furan	14
4.2.5.	Paramétrage initial des sondes	14
5.	Nivellement des ouvrages	15
6.	Jaugeages et courbes de tarage des stations limnimétriques	15
7.	Restitution des paramètres suivis	17
7.1.	Hauteurs d'eau	17
7.1.1.	Niveaux des eaux souterraines	17
7.1.2.	Niveaux des eaux superficielles	18
7.2.	Températures	20
7.2.1.	Températures des eaux souterraines	20
7.2.2.	Températures des eaux superficielles	21
7.3.	Débits	23
8.	Analyse des résultats et préconisations	23
8.1.	Corrélation des hauteurs d'eau	23
8.2.	Relation Hauteur d'eau / Température	26
8.3.	Variations des débits et alimentation du marais	28

Table des illustrations

Illustration 1 : Localisation de la zone d'étude.....	4
Illustration 2 : Localisation des stations de mesure.....	5
Illustration 3 : Préparation de pistes d'accès aux sites.....	7
Illustration 4 : Fonçage des pointes perdues.....	8
Illustration 5 : Equipement des piézomètres.....	8
Illustration 6 : Extraction de la tige creuse.....	9
Illustration 7 : Réalisation des têtes des piézomètres.....	9
Illustration 8 : Fonçage de pieux dans le lit du Furan.....	10
Illustration 9 : Caractéristiques du Site A.....	11
Illustration 10 : Caractéristiques du Site B.....	12
Illustration 11 : Caractéristiques du Site C.....	13
Illustration 12 : Caractéristiques du Site D.....	14
Illustration 13 : Nivellement des stations de mesure.....	15
Illustration 14 : Jaugeages et courbes de tarage des Sites A, B, C et D.....	16
Illustration 15 : Variations de nappe dans le Pz1.....	17
Illustration 16 : Variations de nappe dans le Pz2.....	17
Illustration 17 : Variations des niveaux du Site A.....	18
Illustration 18 : Variations des niveaux du Site B.....	18
Illustration 19 : Variations des niveaux du Site C.....	19
Illustration 20 : Variations des niveaux du Site D.....	19
Illustration 21 : Variation de la température du Pz1.....	20
Illustration 22 : Variation de la température du Pz2.....	20
Illustration 23 : Variation de la température du Site A.....	21
Illustration 24 : Variation de la température du Site B.....	21
Illustration 25 : Variation de la température du Site C.....	22
Illustration 26 : Variation de la température du Site D.....	22
Illustration 27 : Corrélation des hauteurs des eaux superficielles.....	23
Illustration 28 : Analyse d'une crue sur les eaux superficielles.....	24
Illustration 29 : Comparaison de la piézométrie des rives droite et gauche du Furan.....	24
Illustration 30 : Relation ESU/ESO à l'amont du marais.....	25
Illustration 31 : Relation ESU/ESO à l'aval du marais.....	25
Illustration 32 : Corrélation de la température des eaux souterraines.....	26
Illustration 33 : Corrélations de la température des eaux superficielles.....	26
Illustration 34 : Corrélation Hauteur/Température du Furan.....	27
Illustration 35 : Corrélation Hauteur/Température de la source des Hotteaux.....	28

Indice	Date	Objet	Rédigé	Vérifié
A	15/07/2021	Création du document	AB	ER
B	30/09/2022	Rédaction rapport final	SO	ER

1. Contexte de l'étude

La Communauté de Communes Bugey Sud (CCBS) a mandaté la société HydroServices pour réaliser une étude sur le marais des Hotteaux.

L'étude consiste à mettre en place :

- 4 stations limnimétriques :
 - o 1 en amont du marais sur le Furans : Site A
 - o 2 sur les ruisseaux de la source des Hotteaux : Sites B et C
 - o 1 en aval du marais sur le Furan : Site D
- 2 piézomètres dans le marais :
 - o l'un en rive droite droite du Furan : PZ1
 - o l'autre en rive gauche gauche : PZ2

Le suivi des stations sera accompagné de jaugeages sur les stations limnimétriques pour l'établissement des courbes de tarages (H/Q).

L'objectif de ces mesures est de mettre en évidence le fonctionnement du marais en étudiant les variations de niveaux des eaux souterraines et les débits du Furan et de ses affluents afin de caractériser les conditions d'alimentation du marais, en particulier pendant l'étiage.

2. Localisation de la zone d'étude

Le marais des Hotteaux est localisé sur le Furan, à l'aval du Bourg de la Burbanche (01). L'illustration 1 présente la localisation du projet.

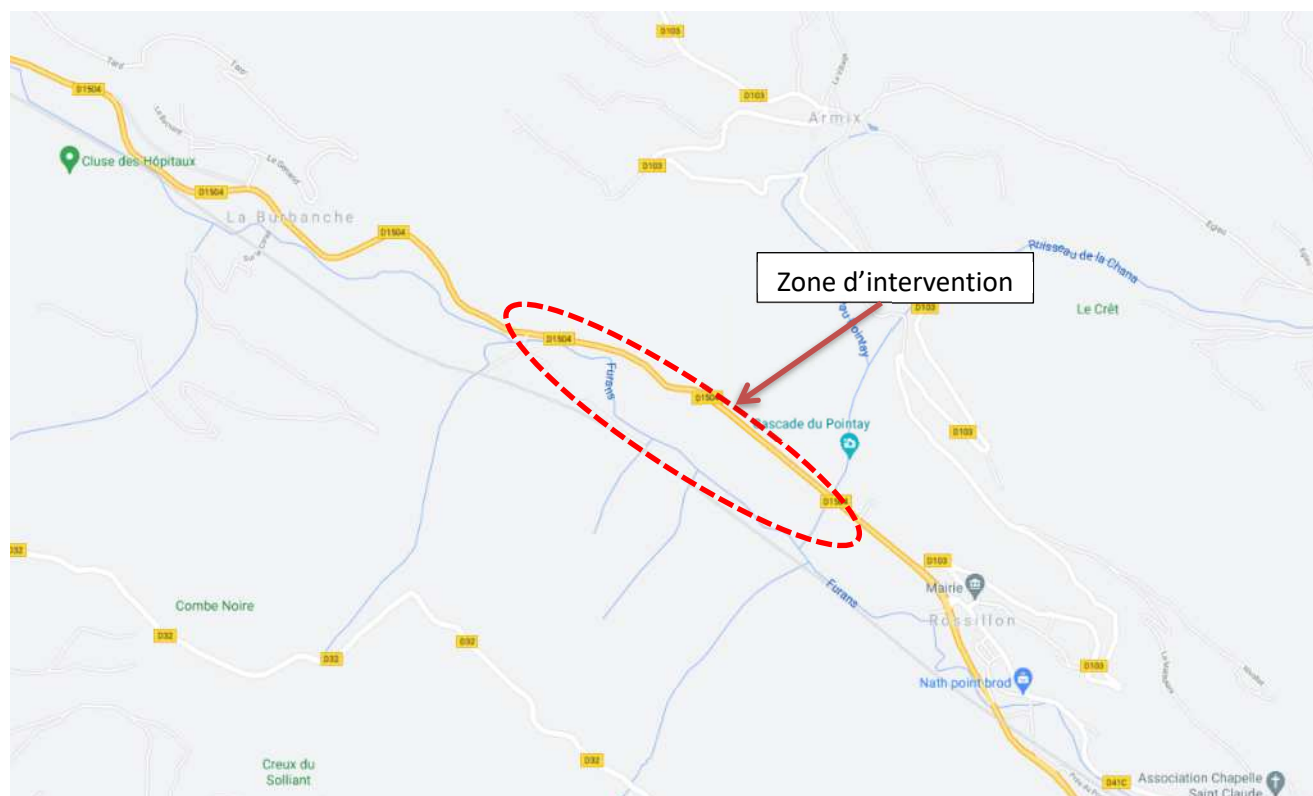


Illustration 1 : Localisation de la zone d'étude

2.1. Emplacement des sites

Les 6 stations de mesure mises en place dans le cadre de ce projet sont localisées sur l'illustration suivante.

Stations limnimétriques : A, B, C, D

Stations piézométriques : PZ1 et PZ2



Illustration 2 : Localisation des stations de mesure

3. Caractéristiques du matériel de mesure installé

Le matériel mis en place pour l'acquisition des niveaux d'eau et de la température est de marque SEBA, modèle Dipper PT.



L'enregistreur autonome **SEBA MDS Dipper PT**, qui a fait ses preuves pour l'enregistrement continu des niveaux d'eaux souterraines et de surfaces, est un système de mesure très robuste et d'une très bonne fiabilité.

La fonction "**Watch-Dog**" intégrée dans le **MDS- Dipper PT** surveille en permanence les activités du microprocesseur et garantit ainsi une haute sécurité d'exploitation. Les états non reconnus du système sont aussitôt détectés et éliminés par la fonction "Watch-Dog".

Le **MDS-Dipper PT** est équipé d'une mémoire flash (**RAM FLASH**). Les valeurs enregistrées sont mémorisées dans une mémoire circulaire et accessible même en cas d'absence d'alimentation dans la mémoire d'archivage.

Le capteur à l'avantage d'être intégré à la centrale d'acquisition formant un tout. L'ensemble est contenu dans un **boîtier robuste en inox, étanche à l'eau (IP68)**, résistant à la pression, avec une haute stabilité chimique à long terme. Il intègre également deux **piles au lithium interchangeable** pour une **durée de vie supérieure à 8 ans** (dépend aussi du cycle de temps choisi).

Quelques caractéristiques techniques

Électronique :

- Microprocesseur 32 Bit
- **Mémoire flash 16 MB (= 1 120 000 mesures)**
- Watch-Dog pour la surveillance des activités du microprocesseur
- Horloge temps réel avec pile de secours
- Température de fonctionnement : -25°C...+70°C

Corps :

- Matériau : Acier inoxydable
- Dimensions : diamètre 22 mm, longueur 300 mm
- Classe de protection : **IP68**

Capteur de pression :

- Capteur de pression en céramique, robuste et stable sur le long terme
- Principe de mesure : capacitif
- Précision de mesure : $\pm 0,05\%$ = 1 cm pour Plage de mesure de 20m
- Stabilité à long terme : $\pm 0,1\%$ / an
- Stabilité de température : $\pm 0,01\%$ / K
- Plages de mesure : 2 / .../ 200 m ou selon souhait
- Résolution : 0,3mm (0-10m) / +/- 0,01%

Sonde de température :

- NTC30 avec linéarisation des polynômes
- Plage de mesure : **-20...+50°C**
- Précision de mesure : +/- 0,1°C (précision augmentée)
- Résolution : +/- 0,002°C

Câble de mesure spécial : Câble rond blindé avec capillaire compensateur de pression (longueur jusqu'à 1000 m max.) comprenant un absorbeur d'humidité, à 2 parties, doté d'une cartouche dessiccative et d'une membrane Gore-Tex

En option, il est possible de coupler la station avec un module **Bluetooth** pour une transmission sans fil.

4. Caractéristiques des installations réalisées

4.1. Forage des piézomètres PZ1 et PZ2

Dans ce contexte environnemental particulier d'un marais rendant difficile l'accès de machines lourdes telles que les foreuses, nous avons réalisé cette prestation à l'aide d'un dispositif de fonçage de **pointes perdues**. Le principe est ici d'utiliser un marteau piqueur pour enfoncer une tige creuse munie d'une pointe en acier maintenue par un joint torique. Une fois la profondeur souhaitée atteinte, l'équipement est descendu dans la tige creuse avant que celle-ci ne soit retirée à l'aide d'un extracteur manuel.

4.1.1. Matériels utilisés

Marteau / batteur à percussion (électrique et pneumatique)

Groupes électrogènes

Tubes de soutènement et système d'extraction



4.1.2. Réalisations

La première opération a consisté en la préparation d'un chemin d'accès aux sites, à l'aide d'une débroussailleuse thermique.



Illustration 3 : Préparation de pistes d'accès aux sites

La seconde action consiste alors en le fonçage du tube guide 2'' à l'aide du marteau piqueur jusqu'à la profondeur souhaitée (5m)



Illustration 4 : Fonçage des pointes perdues

L'équipement du piézomètre peut alors être installé dans la tige creuse : tube crépiné en PEHD diamètre 25/32 mm sur 3 m, surmontés de tubes pleins sur 2 m, massif filtrant sableux en face des crépines, bouchon d'argile et cimentation en tête.

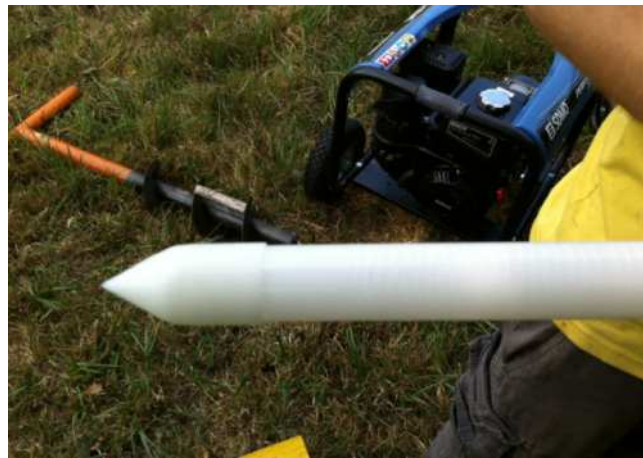


Illustration 5 : Equipement des piézomètres

La tige creuse doit ensuite être extraite du sol à l'aide d'un extracteur manuel.



Illustration 6 : Extraction de la tige creuse

Enfin, il ne reste plus qu'à réaliser la tête de l'ouvrage à l'aide d'un capot PEHD cadenassable, scellé dans un regard béton de 40 cm de côté.



Illustration 7 : Réalisation des têtes des piézomètres

Les sondes d'acquisition sont ensuite installées dans le tubage et la profondeur est calibrée en prenant comme repère de mesure le rebord du capot PEHD Rouge au niveau du cadenas.

Caractéristiques des piézomètres réalisés

PZ1 : Dipper D4L20094

Profondeur totale : 5,96m (référence sommet tube)

Niveau statique : 2,24m (09h30 le 30/06/2021)

PZ2 : Dipper D4L20095

Profondeur totale : 5,84m (référence sommet tube)

Niveau Statique : 1,84m (17h00 le 29/06/2021)

Cadence de mesure : 30 min

Enregistrement : niveau et température

4.2. Création des stations limnimétriques

Les 4 stations limnimétriques ont été mises en place selon le même mode opératoire.

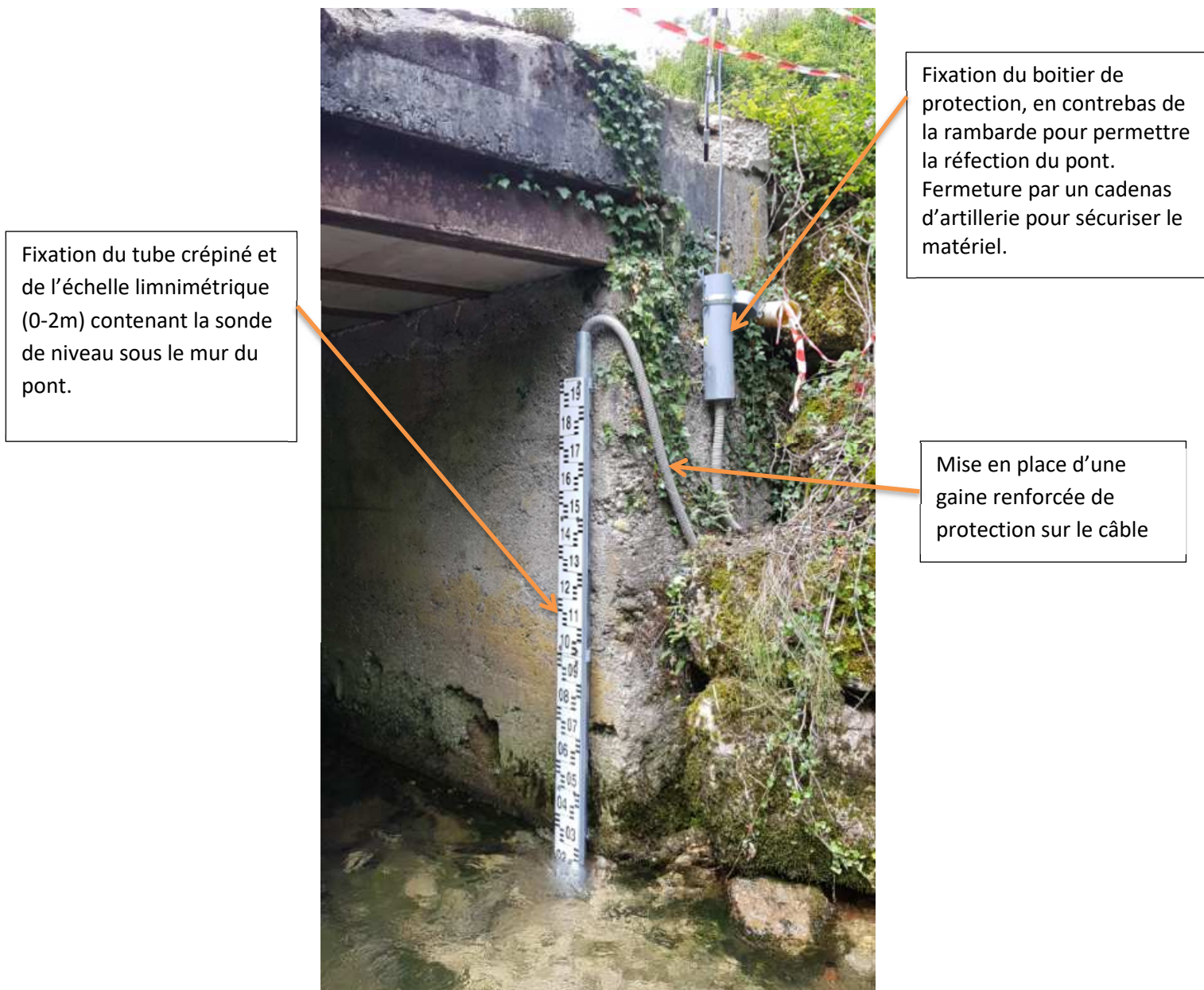
Un pieu en acier galvanisé est battu dans le lit du cours d'eau de manière à pouvoir y fixer une échelle limnimétrique qui permettra de faire des relevés ponctuels de la hauteur d'eau par simple lecture sur l'échelle graduée. Ce pieu est également utilisé pour fixer la sonde d'acquisition, dont le câble électrique est ramené dans un coffret déporté à partir duquel est possible le paramétrage du matériel et la récupération des données enregistrées par la sonde. L'illustration suivante présente différentes étapes de la mise en place des échelles par fonçage dans le lit du cours d'eau.

Après installation de la sonde, la mesure de celle-ci est recalée en enregistrant le niveau lu sur l'échelle qui sert de repère de mesure.



Illustration 8 : Fonçage de pieux dans le lit du Furan

4.2.1. Site A : Furan Amont



Fixation du tube crépiné et de l'échelle limnimétrique (0-2m) contenant la sonde de niveau sous le mur du pont.

Fixation du boîtier de protection, en contrebas de la rambarde pour permettre la réfection du pont. Fermeture par un cadenas d'artillerie pour sécuriser le matériel.

Mise en place d'une gaine renforcée de protection sur le câble

Illustration 9 : Caractéristiques du Site A

4.2.2. Site B : Source principale

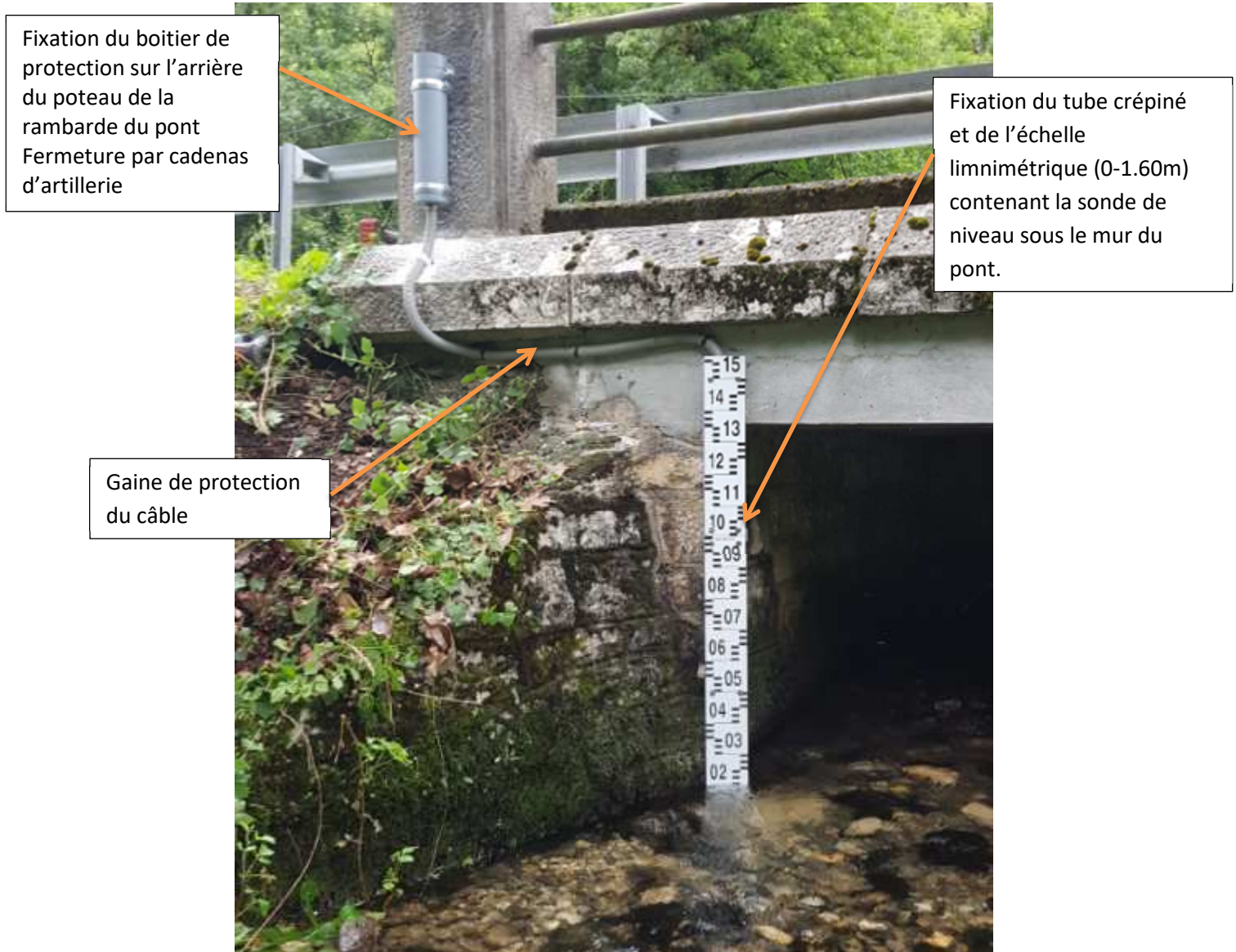
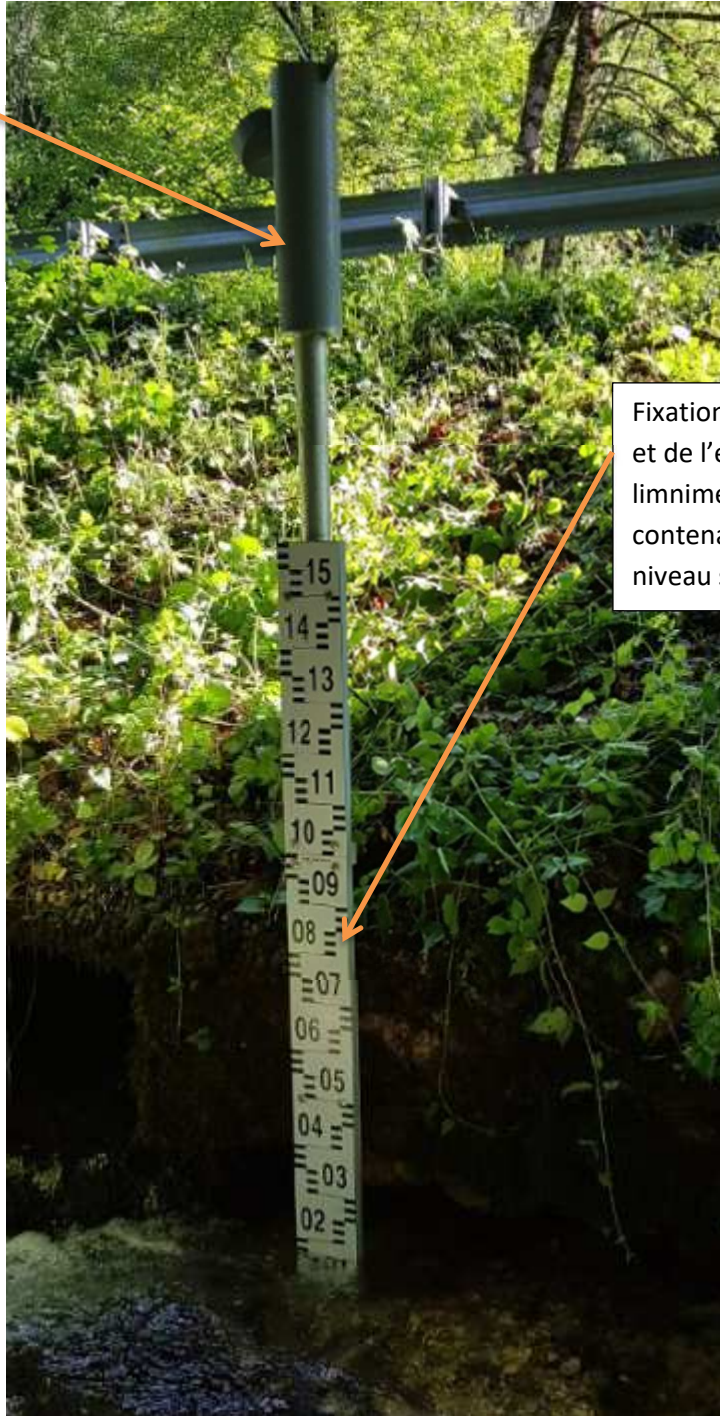


Illustration 10 : Caractéristiques du Site B

4.2.3. Site C : Source secondaire

Soudage du boîtier de protection sur le tube de mesure
Fermeture par cadenas d'artillerie



Fixation du tube crépiné et de l'échelle limnimétrique (0-1.60m) contenant la sonde de niveau sur le mur en pierre

Illustration 11 : Caractéristiques du Site C

4.2.4. Site D: Aval Furan

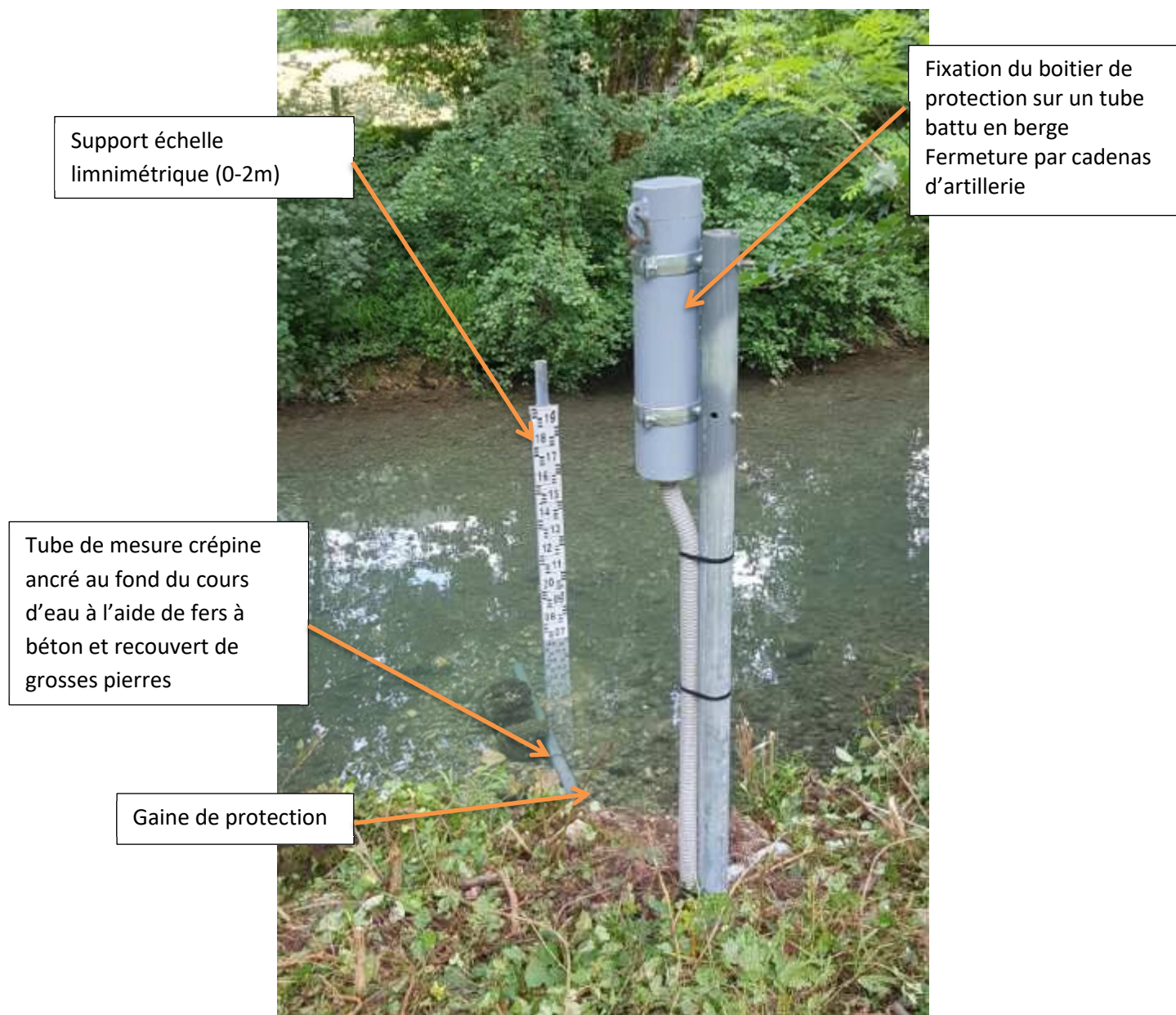


Illustration 12 : Caractéristiques du Site D

4.2.5. Paramétrage initial des sondes

Cadence de mesure : 30 min

Enregistrement : niveau et température

Nom du Site	Numéro de série du Dipper	Mesure en cm le 30/06/2021
A	D4L20092	24
B	D4L20091	20
C	D4L20096	17
D	D4L20093	71

5. Nivellement des ouvrages

Les 6 stations ont fait l'objet d'un nivellement par la CCBS courant août 2022.

Les mesures réalisées sont répertoriées dans le tableau suivant et seront utilisées pour comparer les données acquises sur chaque site.

Nom de la Station	Repère fixe	Nivellement (m NGF)	Repère de mesure	Hauteur du repère de mesure par rapport au repère fixe (m)
Pz1	Margelle béton	333.91	Rebord PEHD Rouge	1.15
Pz2	Margelle béton	333.76	Rebord PEHD Rouge	1.12
Site A	0 de l'échelle limni	333.83	Echelle	0
Site B	0 de l'échelle limni	335.46	Echelle	0
Site C	0 de l'échelle limni	335.18	Echelle	0
Site D	0 de l'échelle limni	331.99	Echelle	0

Illustration 13 : Nivellement des stations de mesure

6. Jaugeages et courbes de tarage des stations limnimétriques

Les 4 sites destinés à suivre les variations de niveaux des eaux superficielles ont fait l'objet de plusieurs campagnes de mesure de débit.

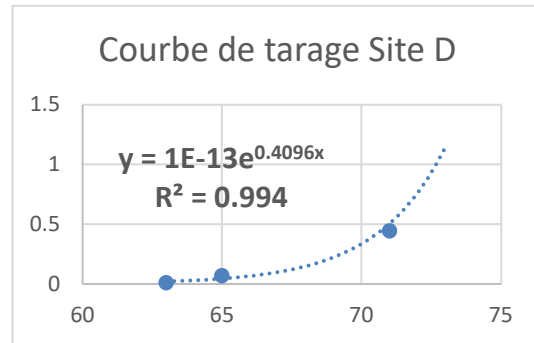
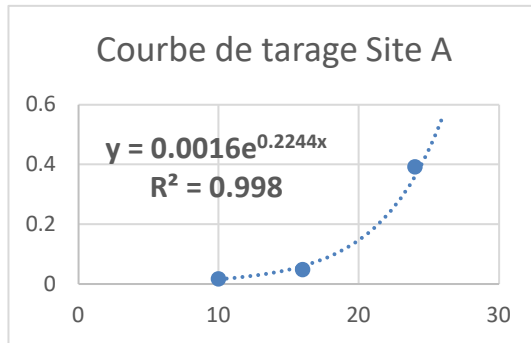
L'objectif est ainsi d'établir une courbe de tarage, formule mathématique permettant de relier la hauteur d'eau à la valeur du débit. Plus le nombre de jaugeages (mesure du débit) est important et plus la précision de la conversion est importante. Dans le cas de ce suivi, seules 2 à 3 campagnes de mesure de débit ont été réalisées. La précision des équations est ainsi trop réduite pour être exploitable, même en la limitant aux périodes d'étiage et de faibles débits. De nouvelles campagnes de mesure devront être réalisées au cours des années à venir afin d'améliorer les relations définies aujourd'hui.

L'illustration suivante présente donc les résultats provisoires des premiers jaugeages ainsi que les courbes de tarage avec les équations permettant de convertir les hauteurs d'eau en débit (loi exponentielle couramment utilisée).

A ce stade, et bien que les coefficients de corrélation semblent satisfaisants, il n'a pas pu être tracé de courbes de débit à partir des chroniques de hauteur d'eau. La conversion des bas débits reste trop peu contrainte du fait du trop faible nombre de mesures de référence et les débits calculés pour les niveaux supérieurs à ceux ayant fait l'objet de jaugeage sont totalement aberrants.

Site A	h cm	Q m ³ /s
30/06/2021	24	0.393
29/09/2021	16	0.0482
21/07/2022	10	0.0175

Site D	h cm	Q m ³ /s
30/06/2021	71	0.446
29/09/2021	65	0.0702
21/07/2022	63	0.0132



Site B	h cm	Q m ³ /s
30/06/2021	20	0.088
29/09/2021	13.5	0.0148

Site C	h cm	Q m ³ /s
30/06/2021	17	0.041
29/09/2021	13	0.0201

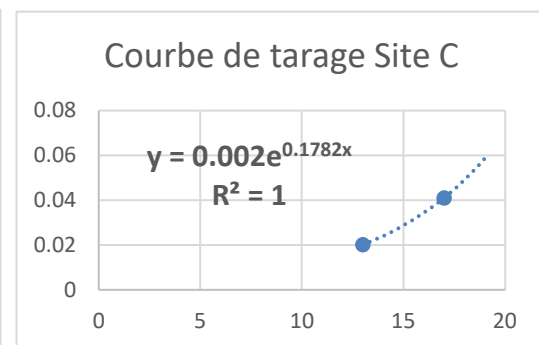
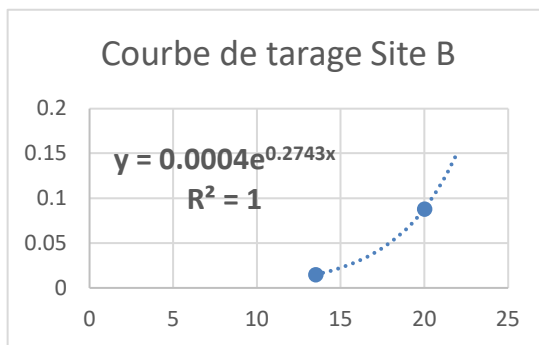


Illustration 14 : Jaugeages et courbes de tarage des Sites A, B, C et D

7. Restitution des paramètres suivis

Les paragraphes suivants s'attacheront à présenter les différentes mesures réalisées au cours de l'année de suivi pour chacun des sites. Ces données seront analysées et commentées dans le dernier chapitre.

Attention : sur certains graphiques, une partie de la chronique peut apparaître en rouge. Ce code couleur vise à informer le lecteur que la donnée a été corrigée. La plupart du temps, la correction provient d'une dérive mineure de la sonde (2 à 3 centimètres) qui a été recalée suite à une vérification lors d'une visite de terrain.

7.1. Hauteurs d'eau

7.1.1. Niveaux des eaux souterraines

Les illustrations suivantes présentent les variations des niveaux de la nappe du marais enregistrées dans les 2 piézomètres réalisés dans le cadre de cette étude.

Pour le Pz1 : les profondeurs varient de 0,45 à 3,32 m par rapport au rebord du tubage. En période de hautes eaux (hiver) les eaux restent hautes, très proche du terrain naturel, et présentent de faibles variations. Quelques crues ont vu le niveau monter de près de 70 cm au-dessus du sol.

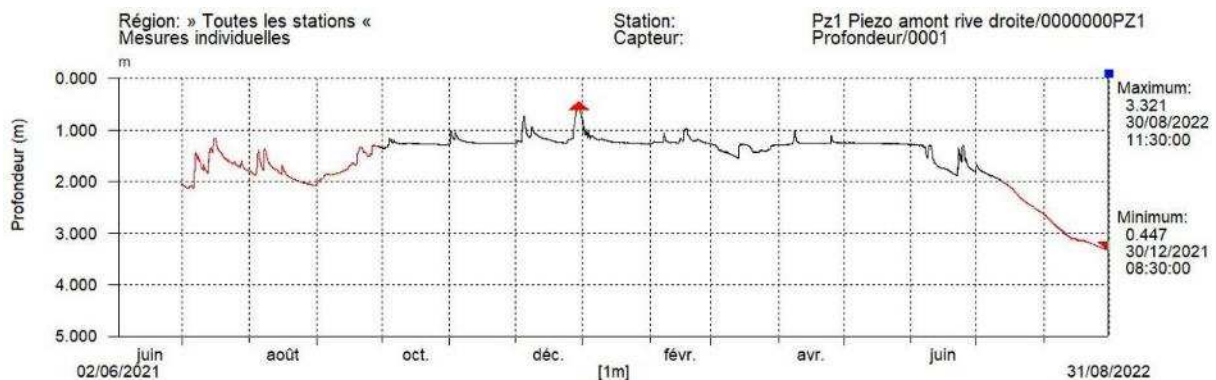


Illustration 15 : Variations de nappe dans le Pz1

Pour le Pz2 : les profondeurs varient de 0,17 à 4,85 m par rapport au rebord du tubage. En période de hautes eaux (hiver) le niveau des eaux fluctue de manière importante entre deux crues (marnage proche de 2 m). Quelques crues ont vu le niveau monter de près de 1 m au-dessus du sol.

Le niveau de fin d'été 2022 est particulièrement bas puisqu'il surpasse 2021 de plus de 1 m.

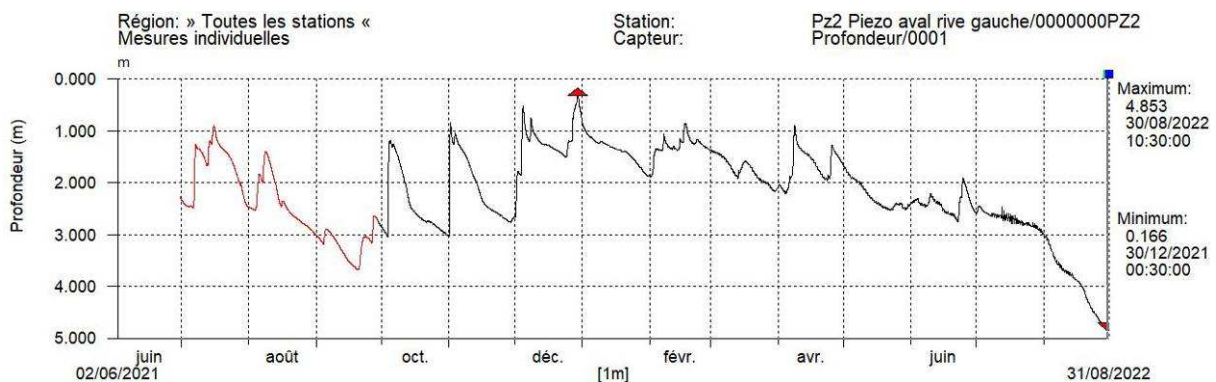


Illustration 16 : Variations de nappe dans le Pz2

7.1.2. Niveaux des eaux superficielles

Les illustrations suivantes présentent les variations des niveaux des eaux superficielles enregistrées au droit des 4 stations limnimétriques mises en place dans le cadre de cette étude.

La réactivité des cours d'eau aux précipitations est caractéristique du comportement de cours d'eau alimentés par une ressource karstique. Les pics de crues sont très nets, avec une montée en charge importante et un retour à l'état initial (décrue) relativement rapide

- Site A – Furan amont : la hauteur d'eau varie entre 0 m lors de l'été 2022 (Furan en assec) et 1,25 m lors de la crue de fin décembre 2021. Le marnage est donc relativement important pour un ruisseau de ce type. Il est difficile d'identifier une période de hautes eaux et une période de basses eaux tant les pics des crues viennent impacter la chronique, aussi bien en été qu'en hiver. On peut cependant identifier un niveau de base qui s'établit autour des 20 cm d'eau.

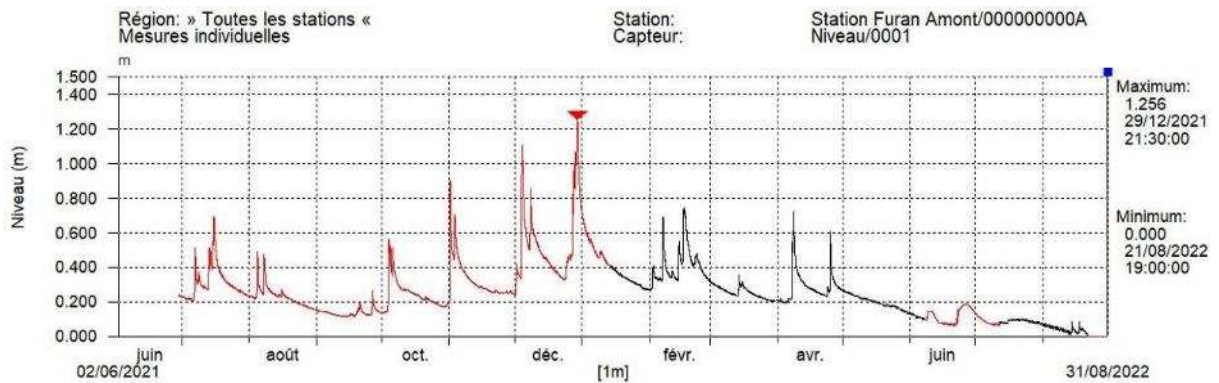


Illustration 17 : Variations des niveaux du Site A

- Site B – Canal amont de la source des Hotteaux : la hauteur d'eau varie entre 5 cm lors de l'été 2022 et 65 cm lors de la crue de fin décembre 2021. Le marnage est donc relativement faible pour cette source canalisée et répartie sur 2 bras. Il est tout aussi difficile d'identifier une période de hautes eaux et une période de basses eaux tant les pics des crues viennent impacter la chronique, aussi bien en été qu'en hiver. On peut cependant identifier un niveau de base qui s'établit autour des 15 cm d'eau en dehors de périodes de crues.

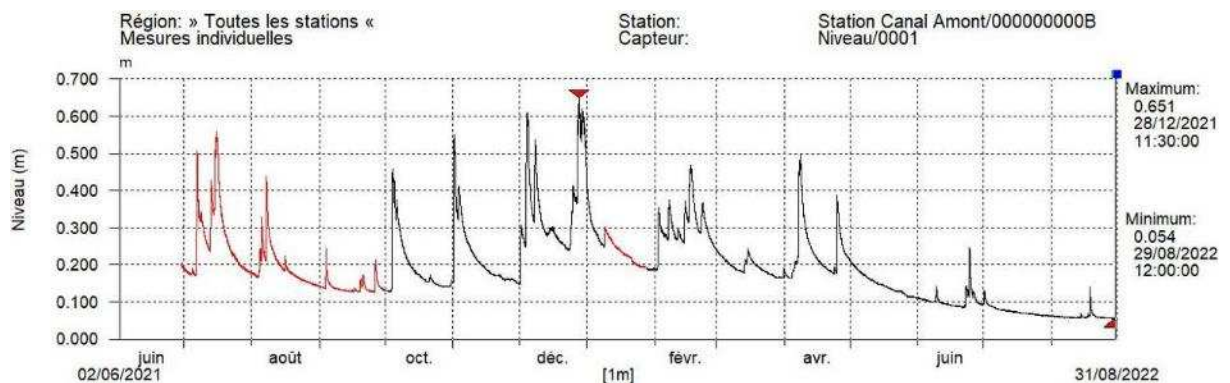


Illustration 18 : Variations des niveaux du Site B

- Site C – Canal Aval de la source des Hotteaux : la hauteur d’eau varie entre 0 m lors de l’été 2022 (Canal en assec, valeur négative mesurable car sonde positionnée sous le niveau des alluvions) et 52 cm lors de la crue de fin décembre 2021. Le marnage est donc relativement faible pour ce canal. Il est également difficile d’identifier une période de hautes eaux et une période de basses eaux même si les pics des crues impactent moins la chronique de cette station, avec une décrue symétrique à la crue, illustrant un fonctionnement de trop plein. On peut cependant identifier un niveau de base qui s’établit autour des 15 cm d’eau.

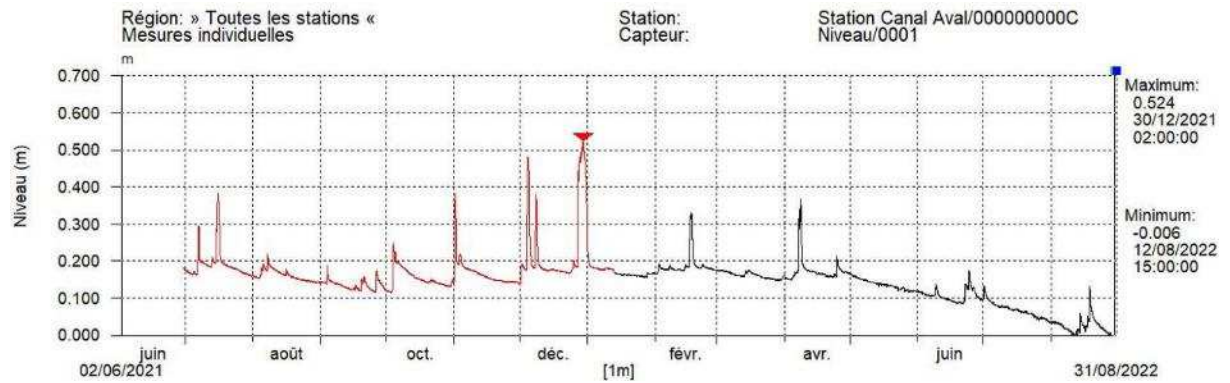


Illustration 19 : Variations des niveaux du Site C

- Site D – Furan aval : la hauteur d’eau varie entre 45 cm lors de l’été 2022 (Furan en assec à l’amont) et 1,95 m lors de la crue de fin décembre 2021. Le marnage est donc relativement important à l’aval du marais. Il est difficile d’identifier une période de hautes eaux et une période de basses eaux tant les pics des crues viennent impacter la chronique, aussi bien en été qu’en hiver. On peut cependant identifier un niveau de base qui s’établit autour des 70 cm d’eau.

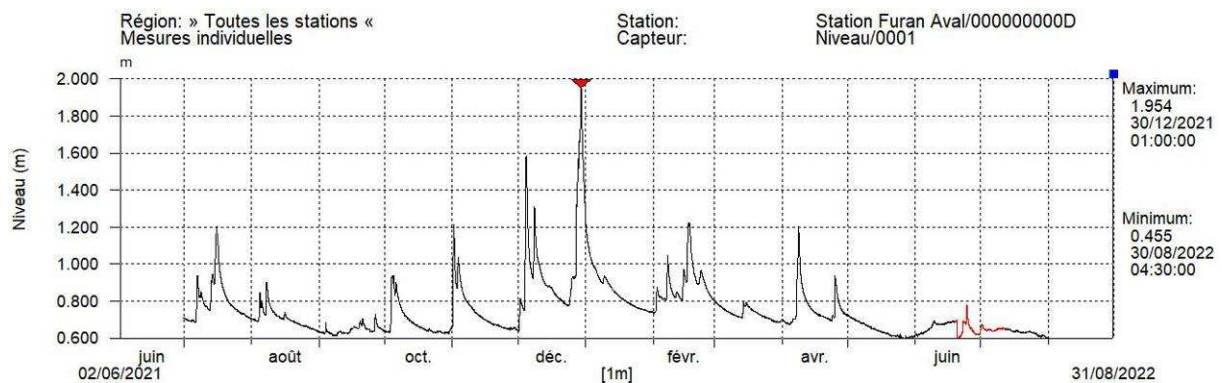


Illustration 20 : Variations des niveaux du Site D

7.2. Températures

7.2.1. Températures des eaux souterraines

Les variations de températures des piézomètres sont caractéristiques d'une nappe phréatique.

La température du Pz1 varie entre 10 et 12,5 °C, avec un véritable cycle annuel présentant des températures plus élevées à la fin octobre (fin de l'étiage) et plus basses à la fin avril.

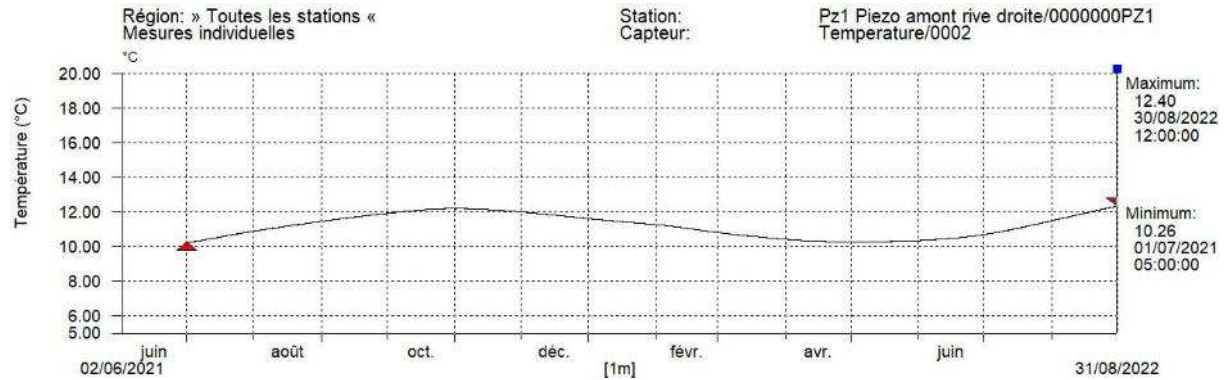


Illustration 21 : Variation de la température du Pz1

La température du Pz2 varie entre 9,5 et 11,5 °C, avec un véritable cycle annuel présentant des températures plus élevées début novembre (fin de l'étiage avec inertie de l'aquifère qui décale les températures hautes dans le temps) et plus basses au mois d'avril.

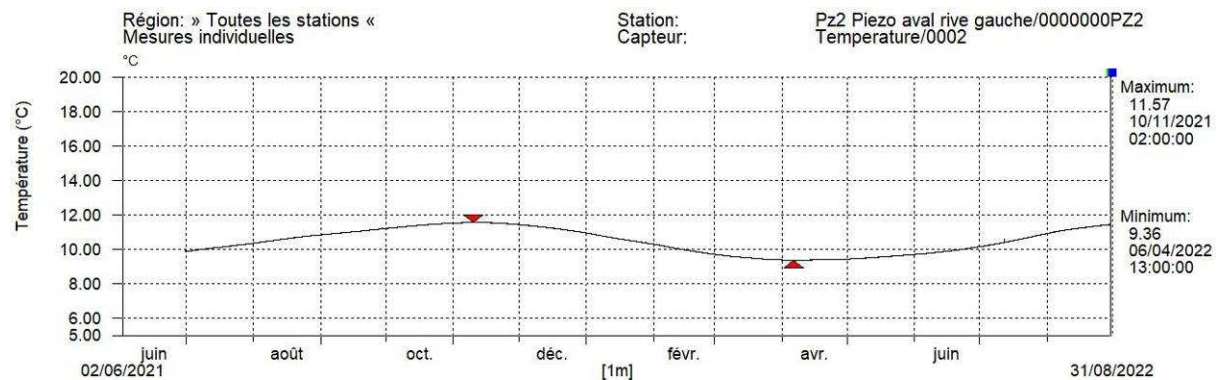


Illustration 22 : Variation de la température du Pz2

7.2.2. Températures des eaux superficielles

- La température des eaux du Furan, Site A, montre un cycle annuel relativement marqué avec une période de hautes températures culminant en août avec 30°C et une période de basses températures avec des extrêmes en février/mars à 7°C. L'amplitude thermique, de 23°C, est donc très importante sur un cycle hydrologique. Les enregistrements au pas de 30 min permettent également d'apprécier les variations journalières de température qui sont de l'ordre de 1°C l'hiver et presque 3°C l'été.

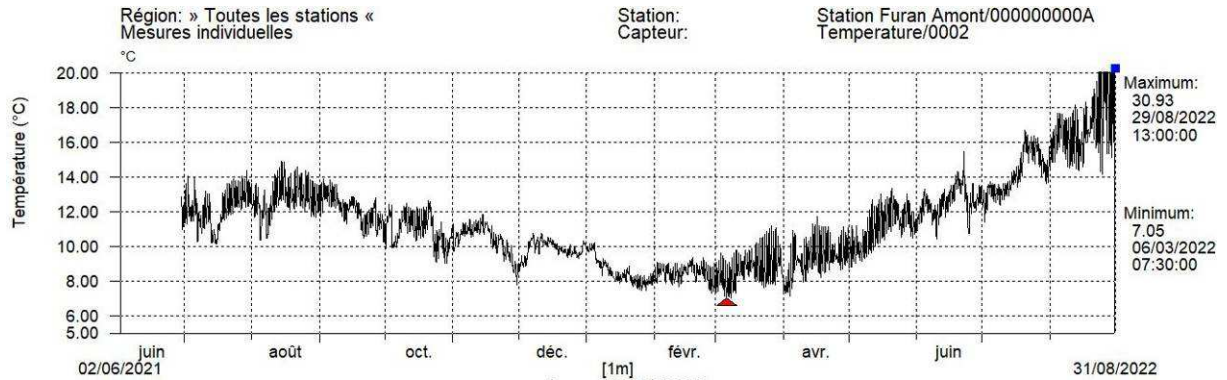


Illustration 23 : Variation de la température du Site A

- La température des eaux du canal amont de la source des Hotteaux, Site B, ne montre pas de véritable cycle annuel. Les températures oscillent entre 9°C l'hiver et 13°C l'été, soit une faible amplitude thermique de moins de 4 °C. Les enregistrements au pas de 30 min permettent également d'apprécier les variations journalières de température qui sont de l'ordre de seulement 0,1°C l'hiver et 1,5°C l'été. Ces données sont caractéristiques de températures d'émergences karstiques. L'amplitude journalière estivale peut être en grande partie imputée aux bas niveaux et au réchauffement du tube guide sonde par le soleil, plus qu'au réchauffement de la source elle-même.

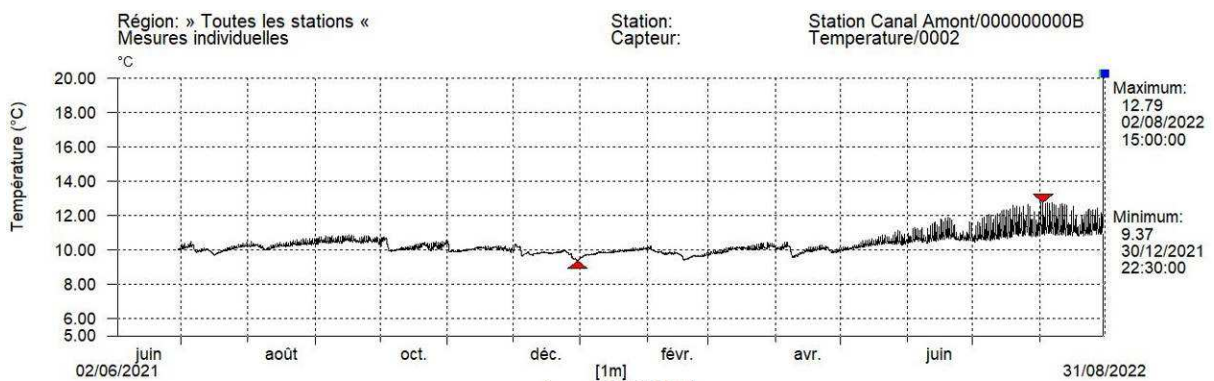


Illustration 24 : Variation de la température du Site B

- La température des eaux du canal aval de la source des Hotteaux, Site C, ne montre pas de véritable cycle annuel. Les températures oscillent entre 9°C l'hiver et presque 16°C l'été, soit une faible amplitude thermique de 7°C. Les enregistrements au pas de 30 min permettent également d'apprécier les variations journalières de température qui sont de l'ordre de seulement 0,2°C l'hiver et de 0,6 à 1,5°C (période probablement en assec) l'été. Ces données sont caractéristiques de températures d'émergences karstiques. L'amplitude journalière estivale peut être imputée aux très bas niveaux et au réchauffement du tube guide sonde par le soleil, plus qu'au réchauffement de la source elle-même.

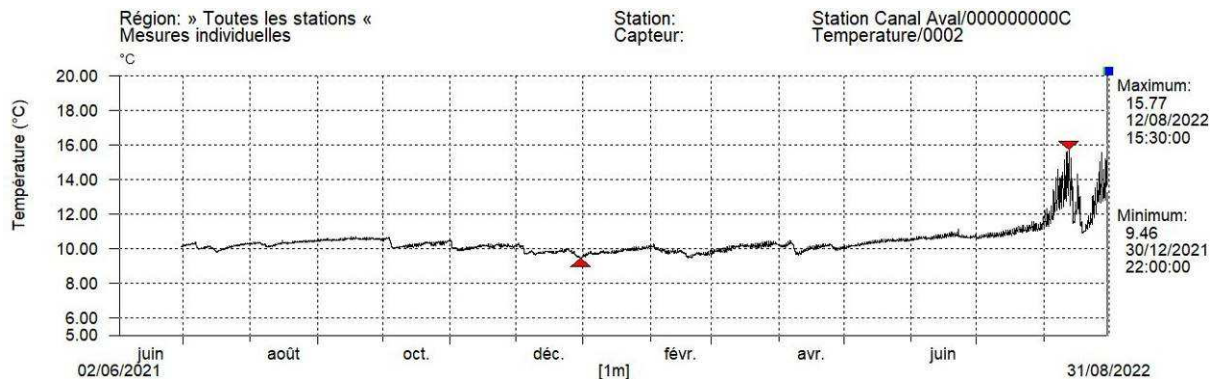


Illustration 25 : Variation de la température du Site C

- La température des eaux du Furan, Site D, montre un cycle annuel relativement marqué avec une période de hautes températures culminant en août avec 19°C et une période de basses températures avec des extrêmes en février/mars à 7°C. L'amplitude thermique, de 12°C, est communément observé sur des eaux superficielles sur un cycle hydrologique. Les enregistrements au pas de 30 min permettent également d'apprécier les variations journalières de température qui sont de l'ordre de 1,5 à 2°C été comme hiver. La variabilité est bien inférieure à celle du site A plus à l'amont du marais du fait des apports importants d'eaux depuis la source des Hotteaux qui vient tamponner les effets météorologiques.

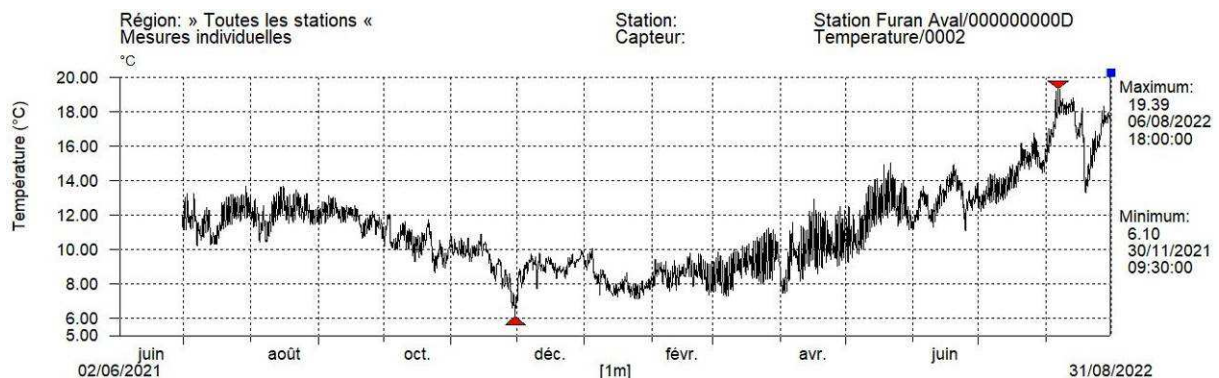


Illustration 26 : Variation de la température du Site D

7.3. Débits

Malheureusement, les débits ne peuvent pas être analysés en l'état du fait d'un nombre trop réduit de jaugeages.

Nous pouvons cependant formuler quelques remarques fondées sur les observations lors des visites de terrain et sur les quelques jaugeages disponibles.

- Sur le Furan : En partie amont, Site A, le Furan peut être en assec. LA section est relativement large mais très sujette aux modifications de profil à cause des crues pouvant modifier le lit sableux de ce secteur. A l'aval du marais, le Site B se comporte un peu différemment avec un profil en travers plus stable et toujours en eau, même si au cours de l'été 2022 les eaux apparaissaient grises, relativement turbides et avec des écoulements très faibles.
- Sur la source des Hotteaux : Le Site B, canal amont de la source, présente un écoulement pérenne même par fort étiage alors que le site C peut se retrouver en assec en période d'étiage sévère comme l'été 2022.

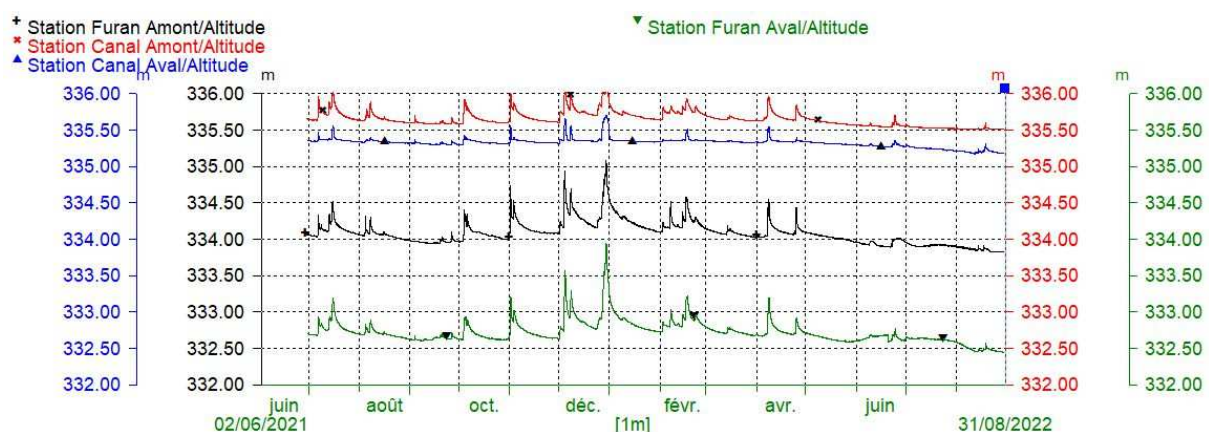
A défaut de pouvoir raisonner sur les valeurs des débits, toutes les observations formulées sur les variations des hauteurs d'eau restent valables.

8. Analyse des résultats et préconisations

Nous attirons l'attention sur le fait que le diagnostic est ici réalisé sur une unique année de suivi qui n'est pas forcément représentative des conditions normales de fonctionnement de l'hydrosystème. Il paraît important de poursuivre le suivi afin d'établir une analyse plus complète dans quelques cycles hydrologiques.

8.1. Corrélation des hauteurs d'eau

L'illustration suivante présente les variations de hauteur d'eau des différentes stations localisées sur les eaux superficielles du marais. Nous noterons ici la parfaite synchronisation des différents signaux enregistrés. Le graphique représente les altitudes en NGF, permettant ainsi de distinguer nettement les Sites B et C suivant la source des Hotteaux perchées au-dessus de la vallée du Furan de près de 2 m. Malgré les quelques différences évoquées précédemment sur les pics des crues des différents sites, il est important de noter que la parfaite corrélation des 4 chroniques révèle des conditions d'alimentation homogène de ces 2 ressources distinctes.



En s'intéressant plus particulièrement à une crue « classique » de novembre 2021, nous pouvons caractériser le déphasage entre les Sites et ainsi classer leur réactivité respective aux événements météorologiques. Ainsi on s'aperçoit que le pic de crue apparaît en premier sur le Furan (Site A). La montée est très rapide et la décrue apparaît dans les 2h qui suivent. Le pic de crue sur la source des Hotteaux (Sites B et C) arrive près de 3h après celui du Furan et affiche une décrue moins rapide. Le cumul des signaux se retrouve sur le Site D, sur le Furan aval, où on peut observer une crue à double pic, cumulant les arrivées du Furan et de la source.

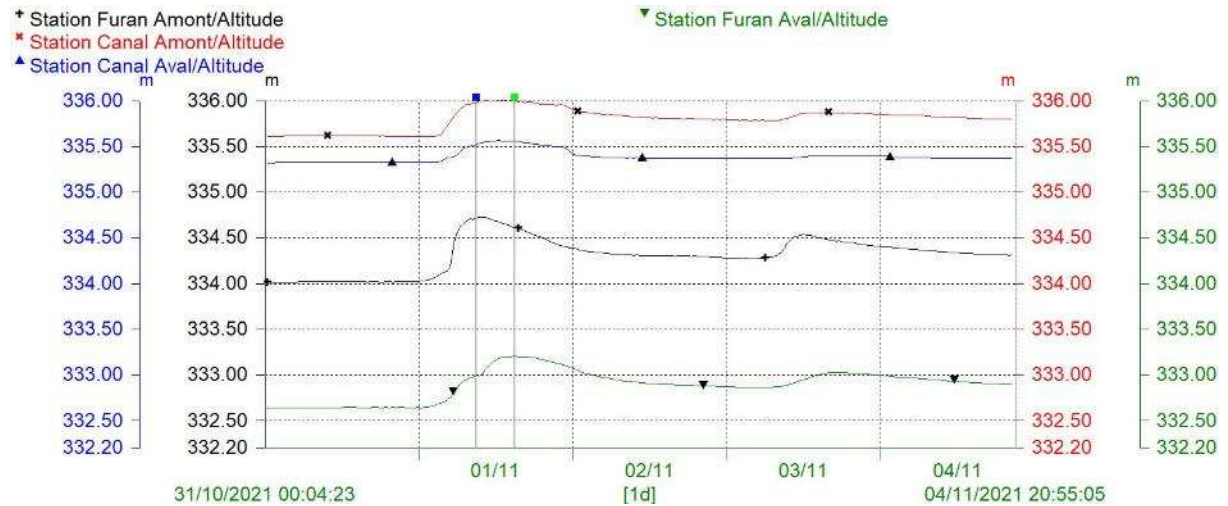


Illustration 28 : Analyse d'une crue sur les eaux superficielles

Les ondes de crues sont également observables sur les eaux souterraines. Les chroniques piézométriques des ouvrages Pz1 et Pz2 sont tracées en parallèle sur l'illustration suivante. LE comportement de la nappe est relativement différent selon qu'on se trouve à l'amont en rive droite (Pz1) ou à l'aval en rive gauche (Pz2) du Furan. En effet, si les pics sont synchrones et semblables en termes de montée et descente, ce qui est le plus notable est la différence d'amplitude des pics. Alors que le nivellement à montrer que les 2 ouvrages sont situés à une altitude équivalente (à 15 cm près), le Pz1 affiche des pics d'une amplitude d'une dizaine de centimètres quand la même crue génère un pic sur le Pz2 qui tend vers les 2 m. Les niveaux de la nappe d'accompagnement du Furan ne sont donc pas contrôlés de la même manière partout.

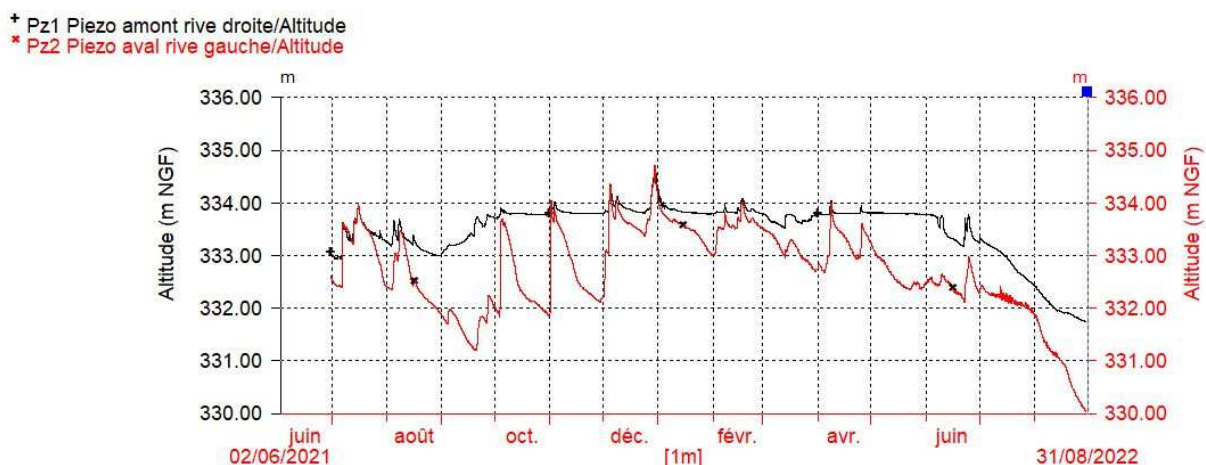


Illustration 29 : Comparaison de la piézométrie des rives droite et gauche du Furan

Tracer en parallèle les chroniques des niveaux du Pz1 et du Furan amont (Site A) permet de mettre en évidence plusieurs points intéressants :

- Le Furan apparaît légèrement plus haut que le piézomètre (30 à 40 cm) mais ceci est uniquement dû à la position plus à l’amont du Site A. En pratique, la nappe du marais est directement reliée au Furan et celle-ci est en équilibre avec les eaux superficielles.
- L’amplitude des pics de crues hivernales est la même sur la rivière et sur la nappe d’accompagnement.
- Le déphasage entre les ondes de crues sur le Furan et la nappe est de l’ordre de 9 à 10 h. Ceci démontre une légère inertie des eaux souterraines qui réagissent plus lentement.
- En période d’été prononcé comme août 2021 et dès juillet 2022, la nappe arrive à décrocher de la rivière et son niveau s’effondre. A ce stade, la nappe ne peut plus soutenir l’été du cours d’eau.

† Station Furan Amont/Altitude
 * Pz1 Piezo amont rive droite/Altitude

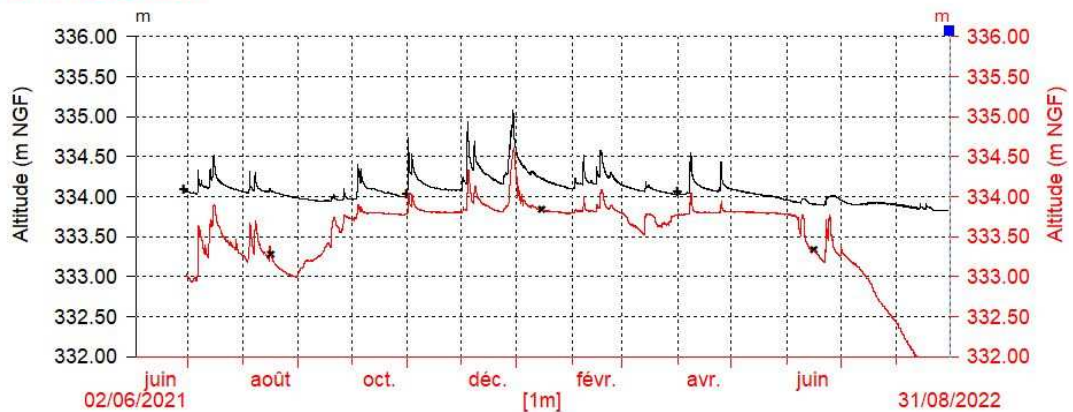


Illustration 30 : Relation ESU/ESO à l’amont du marais

Si on compare le piézomètre le plus à l’aval du site, Pz2, avec la station du Site D (aval du marais), on s’aperçoit que l’amplitude des crues varie en fonction des conditions hydrologiques :

- En période de hautes eaux (décembre à avril 2021), l’amplitude des variations de la nappe est assez proche de celle du cours d’eau.
- En période de basses eaux (été 2021 et 2022), la nappe réagit de manière beaucoup plus importante que le cours d’eau. Une petite crue du Furan fin juin 2022 provoque ainsi une variation de l’ordre de 1 m sur la nappe qui remonte fortement pour replonger aussitôt sous le niveau du cours d’eau.
- Alors que le PZ2 est situé au-dessus du Site D, le niveau piézométrique peut plonger sous le niveau du Furan de près de 2 m pendant les forts étiages. Dans ces conditions, la nappe ne peut pas soutenir le débit du cours d’eau et pourrait même plutôt contribuer à drainer le cours d’eau. Compte tenu des observations, des forts rabattements de nappe et des pertes du Furan, le débit d’alimentation.

† Station Furan Aval/Altitude
 * Pz2 Piezo aval rive gauche/Altitude

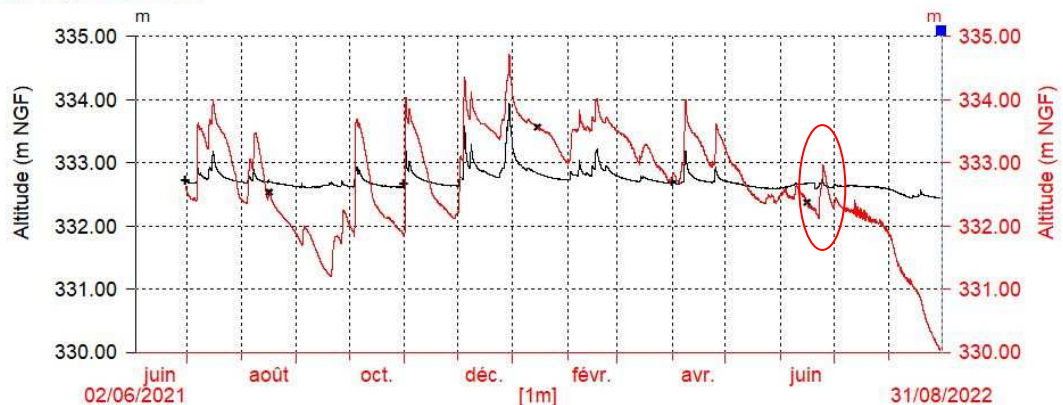


Illustration 31 : Relation ESU/ESO à l’aval du marais

Ces observations laissent entrevoir un double comportement de la nappe en fonction du « degré de remplissage » de celle-ci. Ainsi, en période de hautes eaux, la partie superficielle des terrains (de l'aquifère) est sollicité et la nappe est plutôt libre et réagit comme les eaux du Furan. En période de basses eaux, la partie plus profonde des terrains est sollicitée et les amplitudes sont beaucoup plus importantes, présentant un comportement caractéristique d'une nappe captive. Nous pouvons ainsi supposer que l'horizon plus profond est plus argileux que l'horizon tourbeux superficiel.

8.2. Relation Hauteur d'eau / Température

La température de la nappe présente un cycle annuel classique avec une amplitude de l'ordre de 2°C, observé sur les 2 ouvrages. Néanmoins, il apparaît que la température du Pz2 est systématiquement plus froide de moins de 1 °C. Cette différence pourrait s'expliquer par une différence de mesure des capteurs de température des 2 sondes et il pourrait être intéressant de les permuter d'ouvrage afin de s'en assurer. Plus finement, nous pouvons aussi mettre en évidence une différence temporelle d'apparition des extrêmes : en effet, la température maximale est atteinte plus tardivement sur le Pz2 en fin d'été alors que le minimum est atteint plus tôt que sur le Pz1 au début du printemps. Ces éléments peuvent résulter d'une contribution d'apport latéraux d'eau plus tempérés (source des Hotteaux par exemple).

+ Pz1 Piezo amont rive droite/Température
* Pz2 Piezo aval rive gauche/Température

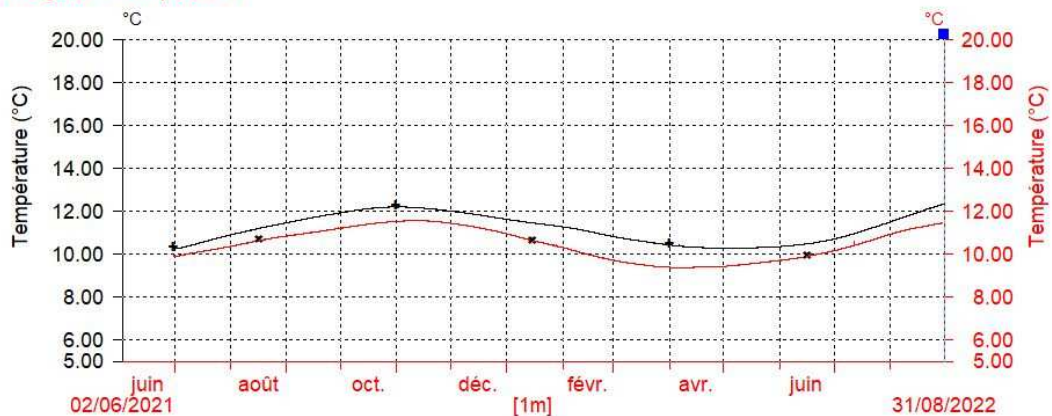


Illustration 32 : Corrélation de la température des eaux souterraines

L'illustration suivante nous permet d'établir les différences thermiques entre le Furan et la source des Hotteaux. En effet, si un cycle annuel peut être mis en évidence sur le Furan, il apparaît que la température de la source est beaucoup plus constante (période d'assec ou de presque assec de l'été 2022 mis à part).

+ Station Furan Amont/Température
* Station Canal Amont/Température
▲ Station Canal Aval/Température

▼ Station Furan Aval/Température

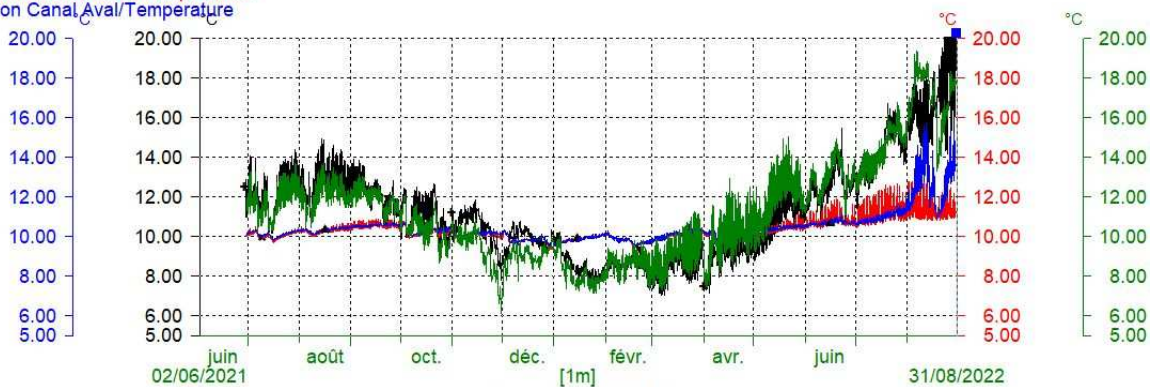
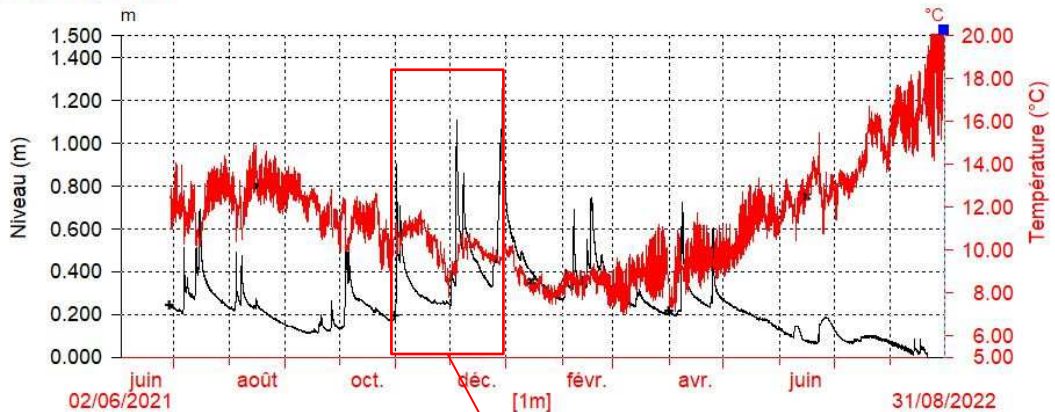


Illustration 33 : Corrélations de la température des eaux superficielles

Il peut être intéressant de comparer les variations de températures aux variations de niveaux du Furan. Alors que le signal des températures semblait varier aléatoirement dans le temps, nous pouvons noter ici que chaque crue du Furan vient impacter la chronique de température. Ainsi, sur les crues hivernales, il apparaît que chaque cycle crue-décruie provoque une courbe en cloche de variation de température, ceci pouvant indiquer l'origine de l'eau mobilisée dans le karst pour contribuer au débit du Furan : pendant la première moitié du cycle, la température de l'eau monte, indiquant que l'eau mobilisée provient progressivement du karst saturé (eau « réchauffée » dans le terrain) puis la température redescend au cours de la deuxième moitié du cycle de la crue, indiquant que l'eau qui arrive est plus récente et à moins séjourné dans le karst. En période hivernale, en générale, la température mesurée en fin de crue est inférieure à celle mesurée en début de crue : on assiste ainsi à une diminution globale de la température par les crues successives.

Ce fonctionnement pourrait illustrer un important stockage de l'eau précipitée au niveau du système karstique.

+ Station Furan Amont/Niveau
 * Station Furan Amont/Température



+ Station Furan Amont/Niveau
 * Station Furan Amont/Température

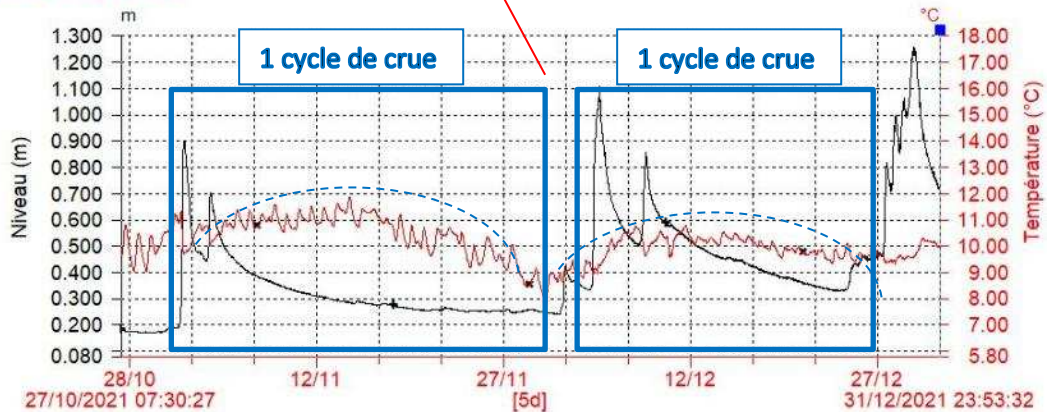
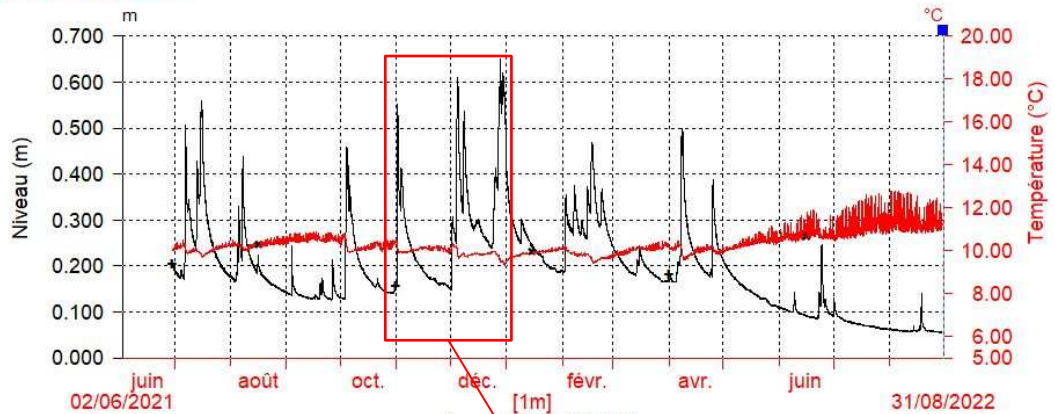


Illustration 34 : Corrélation Hauteur/Température du Furan

Les conditions de variation de la température au niveau de la source des Hotteaux semblent un peu différente. En premier lieu, la température est beaucoup moins fluctuante au cours du temps. En hiver (exemples sur novembre à décembre 2021), la baisse de température se fait immédiatement avec l'arrivée de la crue puis la température tend à remonter au cours de la décrue. C'est l'enchaînement de crues qui provoquera la diminution globale de température. Le comportement thermique de la source laisse ici penser à des circulations rapides des eaux froides précipités qui arrivent massivement avec le pic de la crue. Nous pouvons donc imaginer une réserve d'eau minimaliste dans le karst, permettant les arrivées rapides d'eaux froides qui se réchauffent au fil du temps passé dans le système karstique.

+ Station Canal Amont/Niveau
* Station Canal Amont/Température



+ Station Canal Amont/Niveau
* Station Canal Amont/Température

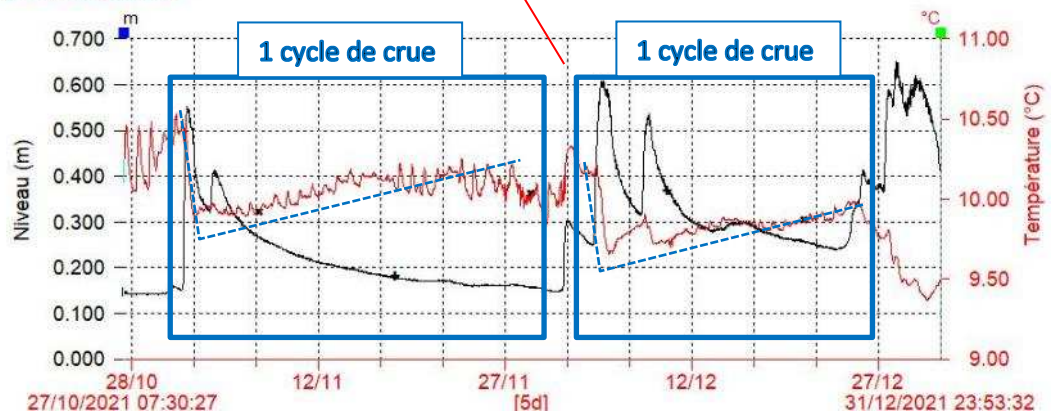


Illustration 35 : Corrélation Hauteur/Température de la source des Hotteaux

8.3. Variations des débits et alimentation du marais

Comme dit précédemment, nous ne pourrions pas raisonner sur les chroniques de variations de débit dans le cadre de cette première analyse. Il apparaît néanmoins certains éléments qui pourraient confirmer les premières hypothèses formulées dans les paragraphes précédents.

Trois campagnes de jaugeage ont été réalisées au cours des étiages 2021 et 2022. Ces périodes correspondent à des niveaux hydrologiques relativement bas puisque les niveaux du Pz2 se trouvent alors sous ceux du Furan. Nous émettions alors l'hypothèse d'un possible drainage de la rivière par nappe. Cet élément pourrait être confirmé par les mesures de débit effectuées puisque pour chaque campagne, la somme des débits des 3 stations A, B et C (débits entrants dans le marais) est systématiquement supérieure de quelques dizaines de l/s au débit mesuré sur le Site D du Furan à l'aval du marais. Ces éléments laissent penser à une perte d'eau au niveau du marais qui, si on exclut l'évapotranspiration, pourrait consister en une forme de stockage dans les eaux souterraines par alimentation de la nappe.

Un suivi plus long du réseau de mesure, complété par de multiples jaugeages couvrant différentes périodes de l'année, pourraient permettre d'améliorer le diagnostic réalisé après cette première année.