



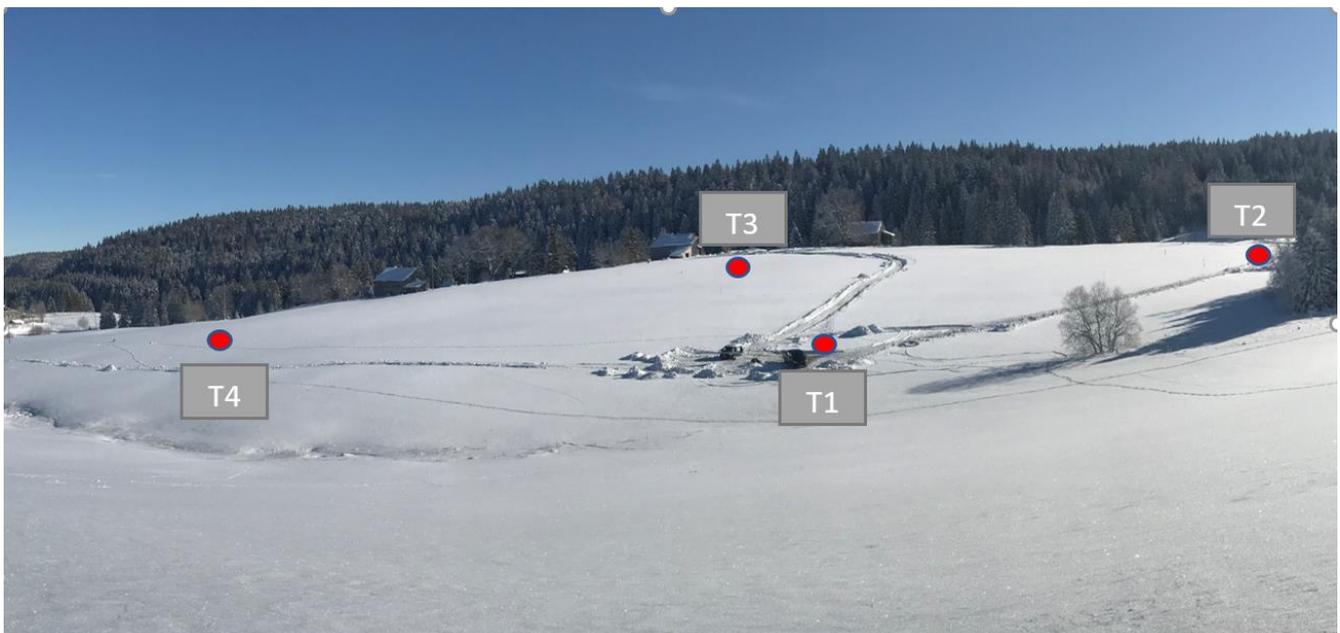
20 rue Paul Gauguin  
39170 SAINT-LUPICIN (France)  
Tél : +33(0) 3.84.42.07.08  
[www.ideeseaux.com](http://www.ideeseaux.com)  
Email : contact@ideeseaux.com



23 rue Paul Gauguin  
39170 SAINT-LUPICIN (France)  
Tél : +33(0) 607503624  
[www.interface-eau.com](http://www.interface-eau.com)  
Email : g.faure@interface-eau.com

## 39370 LES BOUCHOUX SIE du Haut Jura Sud 5 sur la Place

**ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DE L'AQUIFERE  
MOLASSIQUE – SITE DU TALONARD  
COMMUNE DE PESSE (39)  
RAPPORT DE SYNTHÈSE – AVRIL 2021**



## TABLE DES MATIERES

I. Résumé.....	7
II. Préambule .....	12
III. Phase 1- BE CAILLE (2015 – 2018) – Réalisation des forages et d'un pompage de longue durée	14
3.1. Synthèse sur les forages réalisés (Figure 1) .....	14
3.2. Campagne de reconnaissance géophysique électrique au Talonard (Mai 2017) : 18	
3.3. Acidification du Talonard 1 - Réalisation de 3 forages de reconnaissance au Talonard - Traçage de la tourbière Sud et du Talonard 2 (Octobre Novembre 2017).....	18
IV. PHASE 2 – IDEES-EAUX – INTERFACE-EAU – Retubage forage – Mesures préalables - Pompage de longue durée .....	22
4.1. Retubage des forages - Mesures préalables au pompage.....	22
4.2. Mesures préalables au pompage .....	28
4.2.1. Préambule .....	28
4.2.2. Données piézométriques .....	28
4.2.3. Influence des précipitations .....	37
4.3. Pompage de longue durée (18 septembre – 9 décembre 2021).....	42
4.3.1. Déroulement des essais .....	42
4.3.2. Représentation synthétique de la période d'essai (Figure 25, Figure 26)	43
4.3.3. Résultats obtenus.....	46
4.4. D'un point de vue physico-chimique .....	68
4.4.1. Résultats des analyses en laboratoire.....	68
4.4.2. Interprétations .....	70
4.4.3. Suivi en long de certains paramètres .....	73
4.5. D'un point de vue isotopique.....	77
4.5.1. Préambule .....	77
4.5.2. Méthodologie employée .....	77
4.5.3. Isotopes stables de la molécule d'eau (oxygène-18, deutérium) : .....	77
4.5.4. Isotopes stables de la molécule d'hydrogène (Tritium).....	79
4.6. Impact sur le milieu superficiel .....	81
4.6.1. Source Mermet.....	81

---

4.6.2.	Tourbière Nord et tourbière témoin .....	84
4.6.3.	Le regard Durrafourg .....	90
4.6.4.	Durrafourg tourbière .....	92
4.6.5.	Tourbière Sud .....	96
4.7.	Traçage .....	102
4.7.1.	Utilité d'un traçage en hydrogéologie.....	102
4.7.2.	Intérêt dans le cadre des forages du Talonard .....	102
4.7.3.	Résultats .....	104
V.	Interprétation.....	114
5.1.	D'un point de vue géologique .....	114
5.1.1.	Histoire géologique du site d'étude .....	114
5.1.2.	La carte géologique du site d'étude.....	115
5.1.3.	Coupes géologiques du site.....	117
5.1.4.	Prospection géophysique .....	118
5.1.5.	Données forages.....	121
5.2.	D'un point de vue hydrogéologique.....	124
5.3.	D'un point de vue hydrochimique.....	126
5.4.	Proposition d'un modèle de fonctionnement conceptuel.....	126
VI.	Conclusions – préconisations .....	130
6.1.	Conclusions.....	130
6.1.1.	D'un point de vue quantitatif .....	130
6.1.2.	D'un point de vue qualitatif .....	131
6.2.	Préconisations .....	131
6.2.1.	D'un point de vue quantitatif .....	132
6.2.2.	D'un point de vue qualitatif .....	132
6.2.3.	D'un point de vue technique.....	132
6.2.4.	D'un point de vue plus général .....	133

## Listes des Figures

Figure 1 : Localisation géographique de l'ensemble des points de mesure (fond orthophotoplan).....	9
Figure 2 : Localisation géographique de l'ensemble des points de mesure (cartes géologiques) .....	10
Figure 3 : Localisation géographique de l'ensemble des points de mesure (fond LIDAR - relief).....	11
Figure 4 : Position des 6 forages de reconnaissance réalisés (BE CAILLE) .....	15
Figure 5 : Tableau des débits moyens de pompage (extrait rapport BE CAILLE) .....	19
Figure 6 : Influence hydrogéologique entre les différents ouvrages – avant isolation des eaux superficielles .....	20
Figure 7 : Schéma de principe du retubage des forages et de l'isolation de la nappe superficielle .....	23
Figure 5 : Résultats des diagraphies pour le positionnement des joints d'étanchéité	25
Figure 6 : Installation des tubages acier .....	26
Figure 7 : Illustration de la mesure du niveau d'eau des 2 nappes sur les forages du Talonard .....	27
Figure 8 : Position des niveaux d'eau entre forage .....	27
Figure 12 : Suivi du niveau d'eau du T1 (en bleue) et des précipitations (en rouge) – en statique.....	29
Figure 13 : Comparatif entre le niveau de la nappe de surface (en vert) et la nappe profonde (en bleue) sur le T1 en statique – la pluviométrie journalière est représentée en rouge .....	29
Figure 14 : Suivi du niveau d'eau du T2 en statique (nappe de surface en vert et nappe profonde en bleue) – la pluviométrie journalière est représentée en rouge .....	30
Figure 15 : Suivi du niveau d'eau du T3 en statique (eau de surface en vert et nappe profonde en bleue) – la pluviométrie journalière est représentée en rouge.....	31
Figure 16 : Suivi du niveau d'eau du T4 (en bleue) et des précipitations (en rouge) – en statique.....	33
Figure 17 : Comparatif entre le niveau de la nappe de surface (en vert) et la nappe profonde (en bleue) sur le T4 en statique – la pluviométrie journalière est représentée en rouge .....	33
Figure 18 : incertitudes à la base des tubages .....	34
Figure 19 : Suivi piézométrique des différents forages – en statique.....	35
Figure 20 : Influence des précipitations sur le niveau d'eau des différents forages – février 2020 .....	37
Figure 21 : Influence des précipitations sur le niveau d'eau des différents forages – mars 2020.....	38
Figure 22 : Influence des précipitations sur le niveau d'eau des différents forages – mai 2020.....	39
Figure 23 : Influence des précipitations sur le niveau d'eau des différents forages – juin 2020.....	40
Figure 24 : relation pluies niveau d'eau sur les forages.....	41
Figure 25 : Suivi du niveau piézométrique des différents forages en pompage.....	44

Figure 26 : Débit de pompage total.....	45
Figure 27 : Suivi du niveau d'eau du T1 (en bleue), des précipitations (en rouge) et du débit indiqué en orange – en dynamique .....	46
Figure 28 : Courbe caractéristique du T1 .....	47
Figure 29 : Méthode de Jacob – courbe de descente .....	48
Figure 30 : Méthode de Jacob – courbe de remontée.....	48
Figure 31 : Suivi du niveau piézométrique sur le T3 et T4 après démarrage du T1.....	49
Figure 32 : Rayon d'action du T1 .....	50
Figure 33 : Suivi du niveau d'eau du T2 (nappe de surface en vert et nappe profonde en bleue), des précipitations (en rouge) et du débit indiqué en abscisse .....	51
Figure 34 : Effet de la pluie du 22/10/2020 au 03/11/2020 sur le niveau d'eau du T2 en pompage.....	52
Figure 35 : Courbe caractéristique du forage T2.....	52
Figure 36 : Méthode de Jacob – courbe de descente du Forage T2 .....	53
Figure 37 : Méthode de Jacob – courbe de remontée du forage T2 .....	53
Figure 38 : Suivi du niveau d'eau du T3 (nappe de surface en vert et nappe profonde en bleue), des précipitations (en rouge) et du débit indiqué en orange – en dynamique.....	54
Figure 39 : Effet de la pluie du 22/10/2020 au 03/11/2020 sur le niveau d'eau du T355	
Figure 40 : Courbe caractéristique – Forage T3 .....	56
Figure 41 : Méthode de Jacob – courbe de descente forage T3 .....	57
Figure 42 : Méthode de Jacob – courbe de remontée du forage T3 .....	57
Figure 43 : Suivi du niveau d'eau du T4 (nappe profonde en bleue), des précipitations (en rouge) et du débit indiqué en orange .....	58
Figure 44 : Courbe caractéristique forage T4.....	59
Figure 45 : Méthode de Jacob – courbe de descente du forage T4.....	60
Figure 46 : Méthode de Jacob – courbe de remontée du forage T4 .....	60
Figure 47 : influence des pompage T1 – T2 sur les autres forages .....	62
Figure 48 influence des pompages T2 et T3 sur les autres forages .....	62
Figure 49 : influence du pompage T1 .....	63
Figure 50 : Comparaison des courbes de remontée des différents forages .....	65
Figure 51 : Modèle schématique de représentation de la remontée .....	66
Figure 52 : Suivi du niveau d'eau durant la remontée sur les forages (semi-log) .....	67
Figure 53 : représentation de la chimie des points d'eau sur la zone Talonard .....	70
Figure 54 : Bac de répartition Pré Reverchon .....	72
Figure 55 : relation température – profondeur des forages du Talonard .....	74
Figure 56 : Comparaison de la température des eaux souterraines par rapport à l'altitude de recharge .....	76
Figure 57 : Position des forages de la Pesse par rapport à la droite météoritique mondiale.....	78
Figure 58 : Suivi du débit de la source de Mermet (en bleue) avec les précipitations (en rouge).....	82
Figure 59 : Suivi du niveau d'eau du T3 (nappe de surface en vert et nappe profonde en gris) et du débit de la source Denis Mermet en bleue – en début de pompage .....	82
Figure 60 : Suivi du débit de la source de Denis Mermet (en bleue) avec les eaux de surface du T3 (en gris).....	83
Figure 61 : Bassin d'alimentation de la source Mermet .....	83

Figure 62 : Suivi du débit de la tourbière Nord (en bleue) et de la pluviométrie (en rouge) .....	84
Figure 63 : Suivi du débit de la tourbière Nord (en bleue) et de la tourbière témoin (en orange) .....	86
Figure 64 : Suivi du débit de la tourbière Nord (en bleue) et de la tourbière témoin (en orange) au démarrage du pompage .....	87
Figure 65 : Localisation du bief/fossé reliant la source Denis Mermet à l'exutoire de la tourbière Nord .....	88
Figure 66 : Etendue du bassin d'alimentation possible pour la tourbière Nord.....	89
Figure 67 : Suivi du niveau d'eau de la source Durrafourg regard en bleue – précipitations en rouge .....	90
Figure 68 : Suivi du niveau d'eau de la source Durrafourg tourbière en bleue – précipitations en rouge .....	92
Figure 69 : Etendue possible du bassin d'alimentation de la tourbière Durrafourg....	94
Figure 70 : Suivi du niveau d'eau de la tourbière Sud (en bleue) et des précipitations (en rouge) .....	96
Figure 71 : Bassin d'alimentation théorique de la tourbière Sud .....	98
Figure 72 : Conductivité des eaux de la tourbière sud.....	99
Figure 73 : Les différents bassins d'alimentation des eaux superficielles (MNT) .....	100
Figure 74 : Les différents bassins d'alimentation des eaux superficielles (orthophoto) .....	101
Figure 75 : Carte de localisation des points de suivi du traçage hydrogéologique....	103
Figure 76 : Restitution du traceur et niveau d'eau au niveau de la source du Flumen .....	105
Figure 77 : Fluocapteurs de la source de la cascade dans le Flumen.....	106
Figure 78 : Fluocapteur de la cascade du Gendarme sur toute la durée de suivi.....	106
Figure 79 : Fluocapteurs du Bief Noir sur toute la durée de suivi.....	107
Figure 80 : Fluocapteurs des forages du Talonard en pompage .....	108
Figure 81 : Interprétation des résultats de traçage entre la perte et le forage T2 ....	109
Figure 82 : Hauteur d'eau dans la perte du Talonard et suivi de la pluviométrie .....	112
Figure 83 : Plan d'eau dans la perte le 23/02/2021 .....	113
Figure 84 : Localisation des lambeaux molassique secteur jura sud (coloré en jaune) .....	115
Figure 85 : Carte géologique de la zone d'étude .....	116
Figure 86 : coupe schématique (d'après rapport BE CAILLE) .....	117
Figure 87 : coupe schématique (d'après Jean CHAROLLAIS).....	117
Figure 88 : localisation des panneaux électriques réalisés .....	118
Figure 89 : profil interprété par Dr. Anna Sommaruga* .....	120
Figure 90 : Localisation des venues d'eau au niveau des forages (BE CAILLE).....	121
Figure 91 : Coupe synthétique des éléments de la zone de sub-surface.....	123
Figure 92 : Modèle conceptuel de fonctionnement du bassin sédimentaire du Talonard .....	127
Figure 93 : bassin d'alimentation des forages du Talonard .....	129

## I. RESUME

Le présent rapport détaille les résultats d'un pompage d'essai et les mesures complémentaires associées, de l'étude hydrogéologique de l'aquifère molassique du synclinal de La Pesse. Les 4 forages réalisés sur ce site, au lieu-dit du Talonard, ont pour objectif final d'être utilisés pour l'alimentation en eau potable du SIE du Haut Jura Sud en remplacement de la station de pompage actuelle de l'Embouteilleux. Cette station est vieillissante, onéreuse en fonctionnement et complexe d'un point de vue technique pour un résultat qualitatif peu satisfaisant.

### **Les objectifs de cette étude et des mesures associées sont multiples :**

- Finaliser l'équipement technique de ces 4 forages ;
- Proposer un débit d'exploitation par forage ;
- Quantifier l'impact sur le milieu humide superficiel (sources et tourbières), et plus particulièrement, lors des périodes d'étiage sévères qui semblent se dessiner dans le futur ;
- Apprécier la réalimentation de cet aquifère et son fonctionnement.

### **Pour atteindre ces objectifs les mesures suivantes ont été réalisées :**

- Retubage des forages pour isoler les eaux superficielles des eaux de l'aquifère molassique ;
- Suivi « en continu » pendant plus de 12 mois de la pluviométrie et du niveau d'eau sur 9 points (forages, sources, tourbières) ;
- Pompage d'essai de longue durée (2 mois), et quantification de l'impact sur le milieu superficiel (sources et tourbières) ;
- Traçages hydrogéologiques pour mieux comprendre le fonctionnement des circulations souterraines.

### **Les résultats sont détaillés dans ce rapport et on peut les résumer ainsi :**

Les mesures ont montré un contexte géologique particulièrement complexe avec des circulations d'eau à plusieurs niveaux (tourbière, sources, molasse, calcaires) et une compartimentation de l'aquifère molassique. Cette hétérogénéité du complexe structural confère des réponses hydrogéologiques différentes sur les quatre forages qui ont été réalisés.

**D'un point de vue quantitatif**, les forages ont permis d'approcher voire d'atteindre le débit d'exploitation souhaité par le syndicat, mais avec très peu de marge de manœuvre. Pour une exploitation à long terme se substituant en totalité à l'ancienne ressource et en visant une totale autonomie, il paraît indispensable de pouvoir sécuriser le volet quantitatif au travers de nouveaux forages. Le pompage de 2 mois sur l'ensemble de forages a montré un impact quasi exclusif au niveau de la source Mermet, qui devrait disparaître à terme de façon presque définitive et irréversible tant que les pompes fonctionneront. A l'inverse, les zones de tourbières constituent des réserves autonomes.

**D'un point de vue qualitatif**, toutes les analyses effectuées sont conformes. Les premières mesures permettant de dater ces eaux tendent à montrer qu'il s'agit d'eau en grande partie ancienne (avant 2000). Le fonctionnement conceptuel que nous avons proposé à partir de toutes les mesures est particulièrement incitatif pour prolonger les recherches. Cette ressource peut être, d'après les données qualités à disposition, exploitée sans avoir besoin d'aucun traitement, si ce n'est ceux imposés à toutes les eaux de distribution pour la consommation humaine.

**D'un point de vue technique** : Les forages, même s'ils peuvent paraître profonds (100 à 300 m), sont en réalité relativement simple à réaliser et leur exploitation restera facile en captant une eau équilibrée (peu incrustante ou corrosive), sans élément péjoratif. Il est important de préciser que lors des 2 mois de pompage, ces forages n'étaient pas tubés au niveau de la partie aquifère (entre 20 m et le fond de l'ouvrage) et aucun problème de turbidité n'a été noté, excepté sur le T2 au démarrage lors des premiers paliers.

Nous avons reporté la zone d'étude et les points d'eau qui ont été suivis pendant cette étude sur les Figure 1, Figure 2, Figure 3.

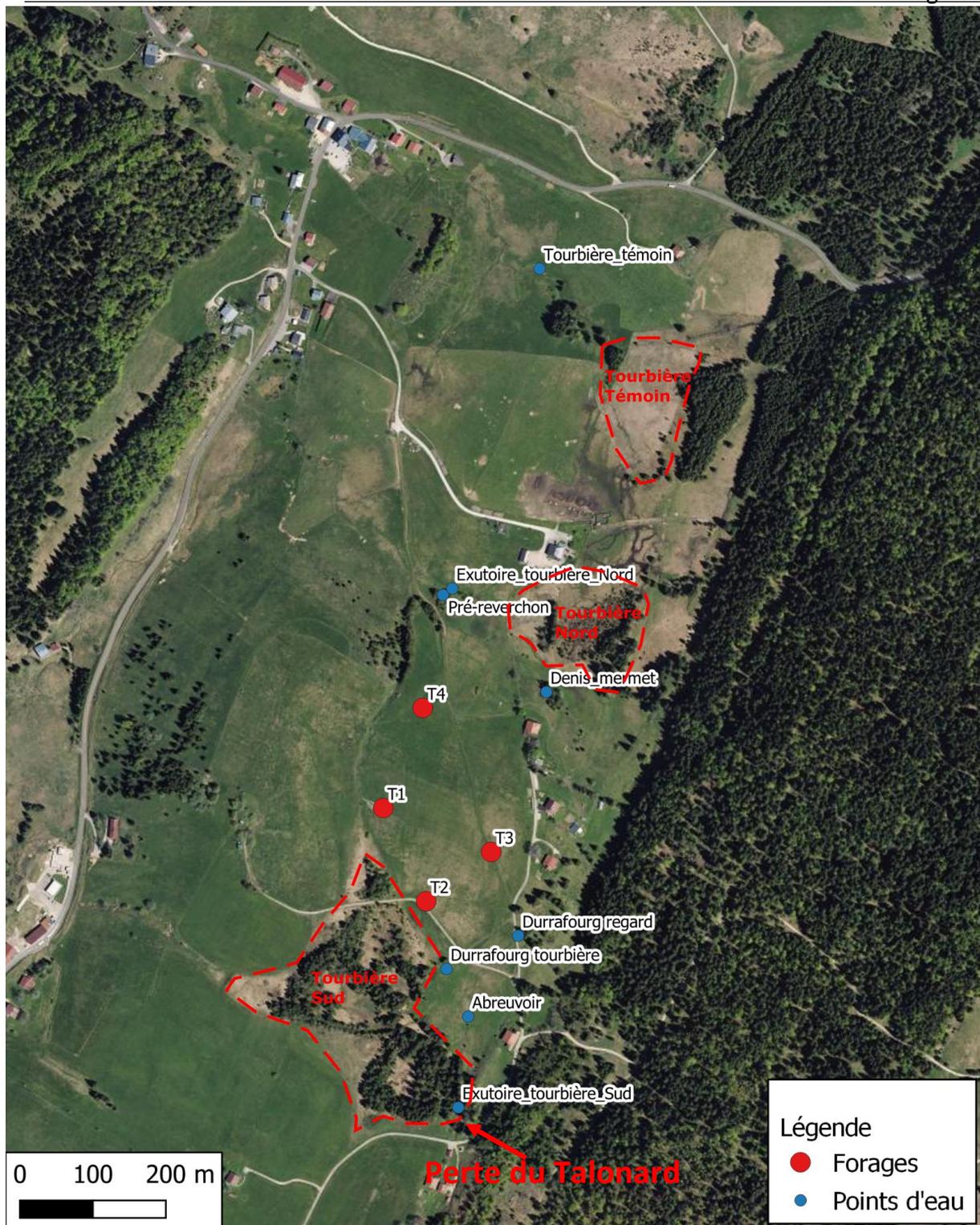


Figure 1 : Localisation géographique de l'ensemble des points de mesure (fond orthophotoplan)

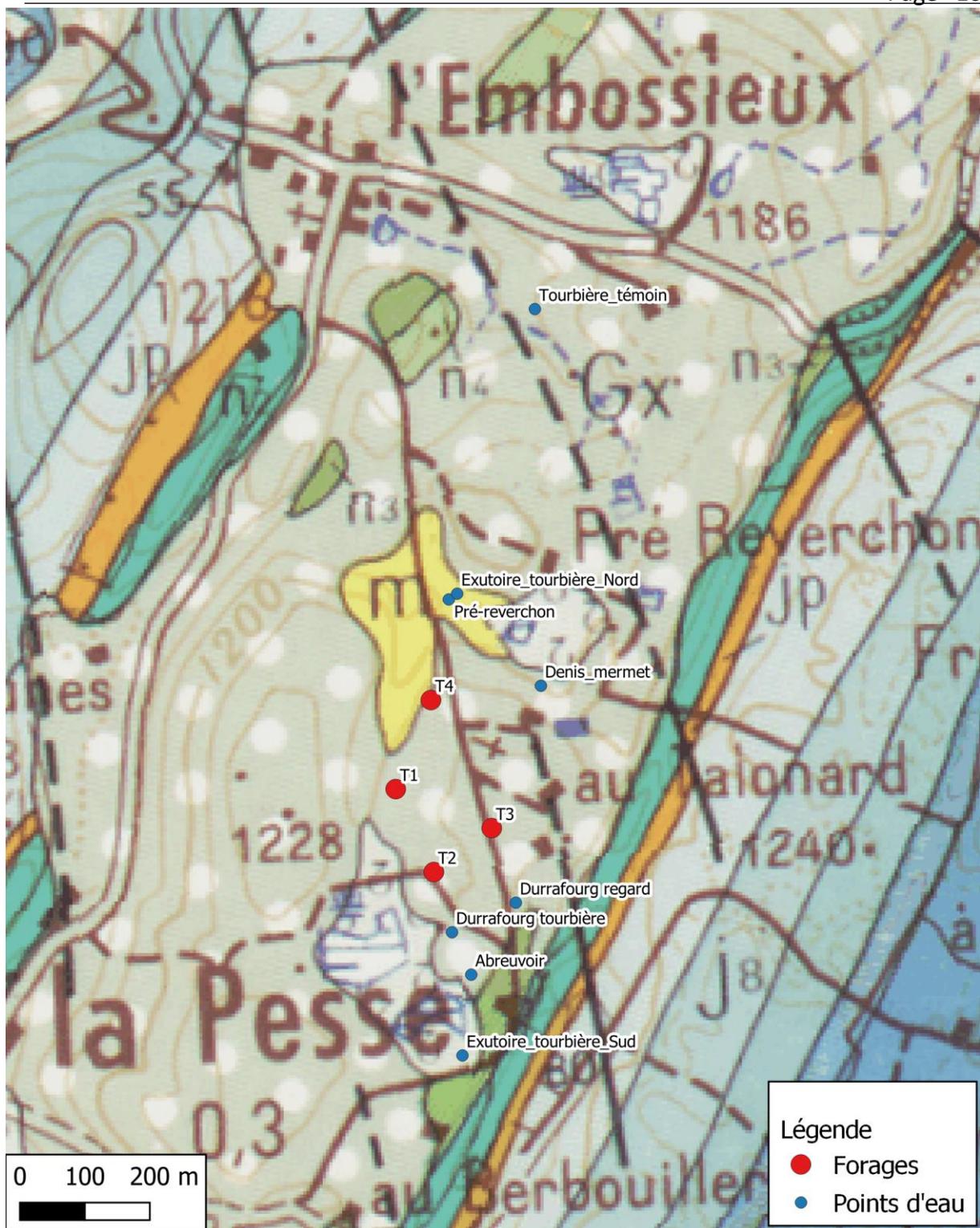


Figure 2 : Localisation géographique de l'ensemble des points de mesure (cartes géologiques)

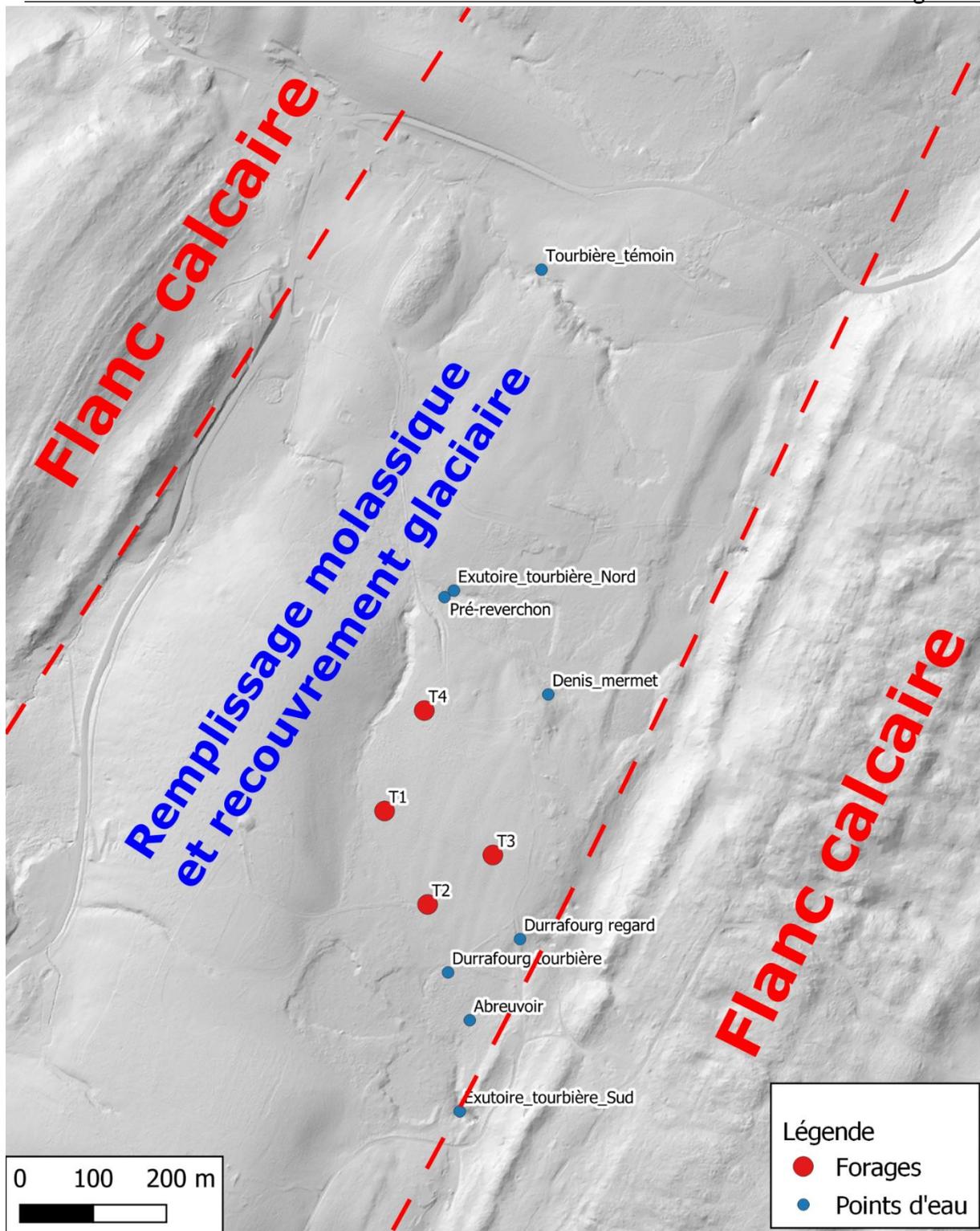


Figure 3 : Localisation géographique de l'ensemble des points de mesure (fond LIDAR - relief)

## II. PREAMBULE

Le SIE du Haut Jura Sud exploite pour son alimentation en eau potable un lac artificiel situé au lieu-dit l'Embouteilleux sur la commune de La Pesse. Il a été mis en exploitation en 1987. **Les prélèvements moyens sont de 340 m<sup>3</sup>/jour et les débits maximums sont estimés à 400 m<sup>3</sup>/h.** Cette ressource présente une qualité relativement médiocre avec une concentration en COT (carbone organique total) au-delà de la limite de qualité des eaux de distribution (2 mg/l) et une concentration en fer, qui nécessite un traitement complexe.

De ce fait, le SIE a missionné le BE CAILLE, début 2015, afin de proposer différents scénarios alternatifs pour compléter, diversifier, voire si possible remplacer le système actuel. Un des scénarios fut de réaliser des forages de reconnaissance, afin de pouvoir accéder à une nouvelle ressource. Entre 2016 et 2017, 3 forages ont été créés (2 au lieu-dit de l'Embouteilleux et 1 au lieu-dit du Talonard). Suite à la réalisation de ces forages, des inspections caméra, des mesures diagraphiques et des pompages d'essai ont démontré que les calcaires du Jurassique (à 300m de profondeur) étaient improductifs et que ceux recoupant l'aquifère molassique l'étaient faiblement, mais pouvaient, en les multipliant, arriver à fournir un débit intéressant et être en adéquation avec les besoins du syndicat. Il a donc été décidé de réaliser 3 nouveaux forages sur le site du Talonard.

Le besoin en eau du syndicat étant de l'ordre de 400 m<sup>3</sup>/jour, un pompage d'essai en simultané sur les 4 forages du Talonard a été conduit au cours de l'étiage 2018 sur une durée de 1 mois. Le but était de caractériser la productivité de l'aquifère et sa réponse hydrogéologique à un pompage de longue durée. Au cours de l'essai, le débit moyen de pompage (sur l'ensemble des 4 ouvrages) était de l'ordre de 15 m<sup>3</sup>/h. Néanmoins, à proximité de ces ouvrages, on note la présence de 4 sources (sur des terrains privés) qui ont ou auraient été plus ou moins impactées au cours des pompages. Le débit de ces différentes sources a été mesuré ponctuellement au cours de l'essai, mais n'a pas été suivi en continu. Etant donné l'absence de ces données, il n'est pas possible d'affirmer si l'assèchement des sources était directement lié au pompage ou bien la conséquence d'une période d'étiage particulièrement sévère.

Cela étant, les propriétaires des terrains où ont été implantés les forages et des zones d'émergence des sources se sont mobilisés, afin d'avoir un second avis hydrogéologique sur les résultats obtenus et ont demandé de réaliser un second pompage avec un suivi en continu du débit des différentes sources. De plus, à proximité de ces forages, il existe 2 zones de tourbières. L'administration a par conséquent demandé de réaliser des mesures pour apprécier de façon plus précise l'impact du pompage sur ces milieux humides sensibles et protégés.

Nos bureaux d'études (IDEES-EAUX ET INTERFACE-EAU) ont été retenus par le syndicat pour poursuivre l'étude et notre proposition du 23 avril 2019 a été acceptée (offre JB-Ju1819070).

Le présent compte rendu détaille l'ensemble des résultats à savoir :

- Une synthèse des résultats du BE Caille (historique) ;
- Les travaux et mesures réalisées par nos bureaux :

- 
- Le retubage des forages et l'isolation des eaux de surface ;
  - Le suivi en long des paramètres (débits, niveaux des différents points d'eau) avant et après pompage ;
  - Le résultat du pompage de longue durée réalisé à la fin de l'automne 2020 ;
  - Les traçages ;
  - Les analyses physico-chimiques.
- Les conclusions ;
  - Les préconisations.

### III. PHASE 1- BE CAILLE (2015 – 2018) – REALISATION DES FORAGES ET D'UN POMPAGE DE LONGUE DUREE

#### **3.1. Synthèse sur les forages réalisés (Figure 4)**

L'étude de la recherche en eau sur la commune de La Pesse s'est déroulée dans une première phase entre 2015 et 2018. Les principaux résultats obtenus pendant cette période sont listés ci-dessous dans l'ordre chronologique de leurs réalisations. Le Tableau 2 résume les différentes étapes de ce dossier. Ces résultats découlent de l'étude de l'ensemble des rapports et données fournies par le BE CAILLE. L'ensemble des figures (graphiques, schéma) associés aux forages sont présentés en annexe.

A noter qu'au cours de l'étude, le nom de certains forages a « changé ». Initialement, les forages ont été nommés (dans l'ordre de leur réalisation) F1, F2, F3... Puis, il a été décidé de les renommer en fonction de leur localisation géographique, Embossieux 2 à Embossieux 3 et Talonard 1 à Talonard 4 (Tableau 1). De ce fait, pour éviter toute confusion nous utiliserons systématiquement les noms actuels des différents ouvrages.

A savoir aussi que les deux forages du site de l'Embossieux ont été rebouchés et il ne reste que les 4 forages du Talonard.

**Tableau 1 : Noms anciens et actuels des forages**

<b>Ancien Nom</b>	<b>Nom Actuel</b>
F1	Talonard 1 – T1
F2	Embossieux 2
F3	Embossieux 3
F4	Talonard 4- T4
F5	Talonard 3 – T3
F6	Talonard 2- T2

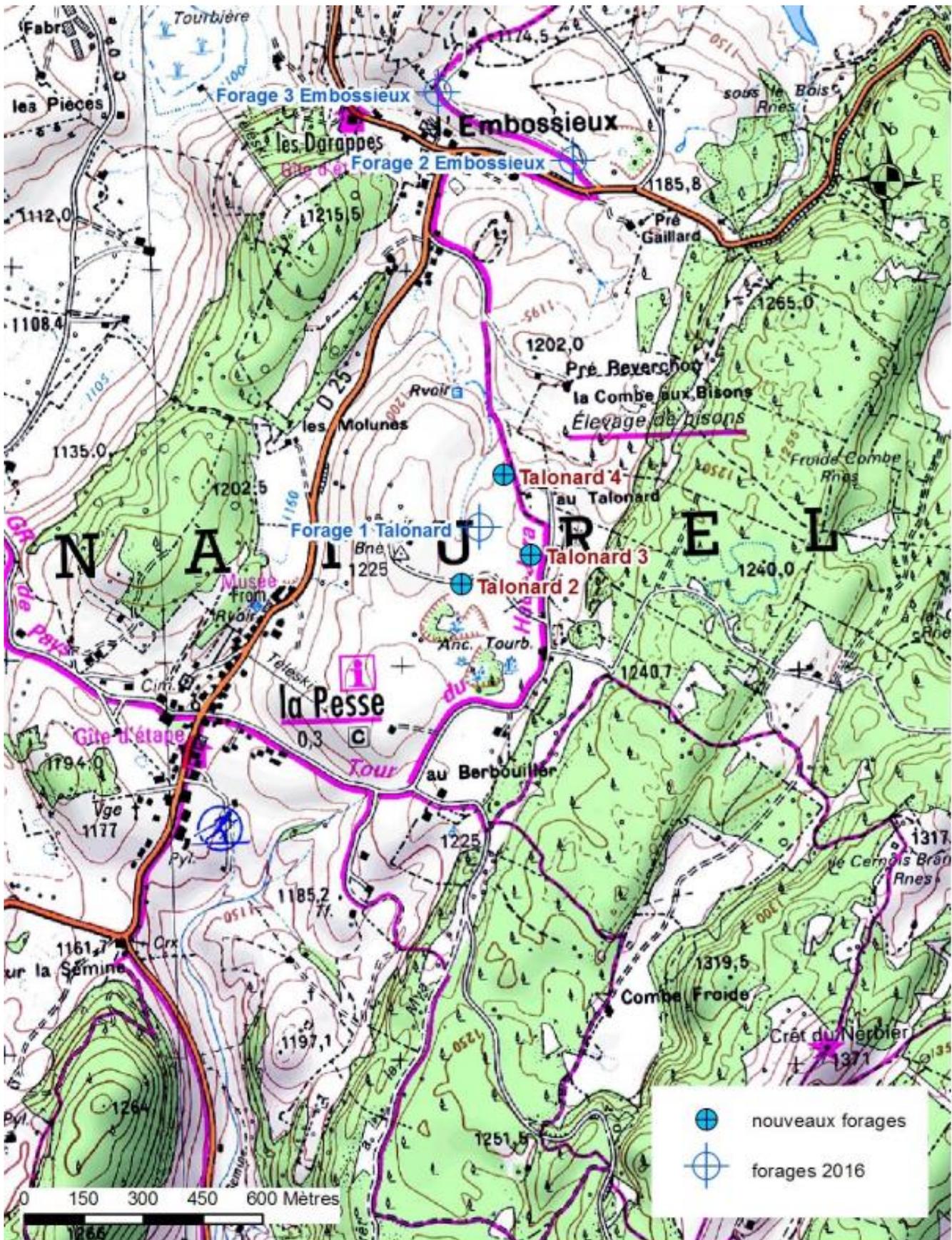


Figure 4 : Position des 6 forages de reconnaissance réalisés (BE CAILLE)

**Tableau 2 : Tableau récapitulatif de l'ensemble des travaux réalisés dans le cadre de la recherche en eaux sur la commune de La Pesse par le BE Caille**

Date	Nom du rapport	Résultats / Remarques
Janvier 2015	Recherche d'une ressource de substitution	Lac d'Embouteilleux (mauvaise qualité) => 4 scénarios proposés pour ressource alternative
Octobre 2015	Reconnaissance du synclinal par sismique réflexion	Délimitation de l'encaissant difficile du fait de la verticalité des couches
Octobre - Novembre 2016	Réalisation de 3 forages de reconnaissance sur la commune de La Pesse et pompage d'essai sur le Talonard 1	Talonard 1 ( <b>254m</b> ) / Forage 2 Embossieux ( <b>305m</b> ) / Forage 3 Embossieux ( <b>305m</b> )
Octobre Novembre 2016	Diagnostic des forages de reconnaissance Talonard 1 / Embossieux 2 / Embossieux 3	Pompages / Diagraphies / Caméra
Mai 2017	Campagne de reconnaissance Géophysique électrique au Talonard	Localisation des zones à forte résistivité électrique (fractures) : positionnement de 3 nouveaux forages
Décembre 2017	Réalisation de 3 forages de reconnaissance au Talonard / Talonard 2 ( <b>73m</b> ) Talonard 3 ( <b>151m</b> ) Talonard 4 ( <b>167m</b> )	Acidification du Talonard 1 / Foration et pompages sur les Talonard 2, 3 et 4 / Traçage de la tourbière Sud et du Talonard 2
Juin 2018	Diagnostic des forages de reconnaissance Talonard 2, 3 et 4	Diagraphies / Camera
Novembre 2018	Réalisation de pompage simultané de longue durée dans les 4 forages du Talonard sur une durée de 1 mois	Rabattements importants, pas de stabilisation du niveau d'eau (importantes variations de débit) / Assèchement de la source Mermet / Impact sur d'autres sources non quantifié

➤ **Talonard 1 :**

Le forage Talonard 1 a été réalisé du 26/09/2016 au 23/11/2016 et présente une profondeur de 254 m. D'après les données foreurs, l'ouvrage a recoupé uniquement des terrains calcaires à marno-calcaires. Le 06/10/2016, le forage était, à priori, éboulé à 141,2 m de profondeur. Les arrivées d'eau identifiées en cours de foration étaient positionnées à : 36 m ( $6\text{m}^3/\text{h}$ ) ; 89 m ( $10\text{m}^3/\text{h}$ ) et 126 m ( $20\text{m}^3/\text{h}$ ).

Au vu de ces résultats, un pompage d'essai a été réalisé sur le Talonard 1 par les équipes de la société Vauthrin Forages.

Le 26/10/2016, le niveau d'eau statique était à 18,57m/tubage.

Le débit était de l'ordre de  $8\text{m}^3/\text{h}$  au début de l'essai, puis a progressivement diminué pour atteindre  $6,6\text{m}^3/\text{h}$  à la fin de l'essai. Ce pompage a engendré un rabattement de 67,3 m, soit un débit spécifique d'environ  $0,1\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ .

➤ **Embossieux 2 :**

Le forage Embossieux 2 a été réalisé du 10/10/2016 au 20/10/2016 et présentait une profondeur de 306 m. D'après les données foreurs, l'ouvrage a recoupé majoritairement des terrains marneux. Les arrivées d'eau identifiées en cours de foration étaient positionnées à : 85 m ( $1\text{m}^3/\text{h}$ ) et 255 m ( $3\text{m}^3/\text{h}$ ). Au vu de ces résultats, cet ouvrage a été rebouché.

➤ **Embossieux 3 :**

Le forage Embossieux 3 a été réalisé du 24/10/2016 au 08/11/2016 et présentait une profondeur de 303 m. D'après les données des foreurs, l'ouvrage a recoupé uniquement les terrains calcaires du Jurassique sans qu'aucune arrivée d'eau ne soit identifiée. Au vu de ces résultats, cet ouvrage a aussi été rebouché.

*A noter que l'ouvrage non rebouché – T1 - a été équipé d'un tube provisoire acier sur environ 12 mètres ; mais il n'a pas été cimenté.*

Ces premiers résultats n'étant pas suffisants, en termes de productivité, pour les besoins du syndicat le BE a proposé de réaliser de nouveaux ouvrages, dont l'implantation a été retenue suite à l'étude géophysique.

### **3.2. Campagne de reconnaissance géophysique électrique au Talonard (Mai 2017) :**

4 profils ont été réalisés au niveau du lieu-dit du Talonard (voir compte rendu géophysique en document annexe).

Au vu de ces résultats, il a été décidé de réaliser **3 nouveaux forages et d'acidifier le premier.**

### **3.3. Acidification du Talonard 1 - Réalisation de 3 forages de reconnaissance au Talonard - Traçage de la tourbière Sud et du Talonard 2 (Octobre Novembre 2017)**

*Les travaux se sont déroulés du 05/10/2017 au 17/11/2017.*

#### **➤ Acidification du Talonard 1 :**

L'acidification s'est déroulée par l'injection de 2 tonnes d'acide chlorhydrique.

Pour le BE CAILLE, le gain de productivité après acidification a été estimé à environ 10 m de rabattement au palier de 8 m<sup>3</sup>/h. Toutefois, ce gain correspondait à une durée de pompage plus réduite. S'il y a eu gain, il a été minime et limité dans le temps.

#### **➤ Talonard 4 :**

Le forage Talonard 4 a été réalisé du 16/10/2017 au 27/10/2017 et présente une profondeur de 157 m. Le niveau d'eau statique était de 16,33 m/tubage.

Un pompage par paliers croissants et enchaînés de 4 débits différents (entre 2,5 à 5,1 m<sup>3</sup>/h) a été effectué et le BE CAILLE a proposé un débit d'exploitation proche de 5 m<sup>3</sup>/h.

#### **➤ Talonard 3 :**

Le forage Talonard 3 a été réalisé du 18/10/2017 au 03/11/2017 et présente une profondeur de 151 m. Le niveau d'eau statique était de 12,26 m/tubage.

La courbe caractéristique montre un débit critique de l'ouvrage compris entre 8 et 10 m<sup>3</sup>/h, avec un net décrochement lors du dernier palier. Le BE CAILLE précise que la source « Mermet » située au Nord du forage s'est asséchée au cours du pompage de longue durée au niveau du Talonard 3. Elle aurait retrouvé son débit environ 3 jours après l'arrêt du pompage.

➤ **Talonard 2 :**

Le forage Talonard 2 a été réalisé du 01/11/2017 au 17/11/2017 et présente une profondeur de 73 m. D'après les données foreurs, l'ouvrage a recoupé les formations gréseuses jusqu'à 39 m, puis un niveau de marnes jusqu'à 44 m avant de recouper des calcaires fracturés avec deux fractures majeures : la première entre 51 et 52 m et la seconde vers 60 m.

Pour un débit de prélèvement de 8 m<sup>3</sup>/h, le rabattement maximum obtenu était de 43 m. Néanmoins, aucune stabilisation ou pseudo-stabilisation du niveau dynamique n'a été atteinte.

➤ **Synthèse :**

	Débit moyen (m <sup>3</sup> /h)	Rabattement maximum (m)
Talonard 1	5	80
Talonard 2	3,5	46
Talonard 3	3,2	35
Talonard 4	3,2	74

*Figure 5 : Tableau des débits moyens de pompage (extrait rapport BE CAILLE)*

Soit un total de 14,9 m<sup>3</sup>/h.

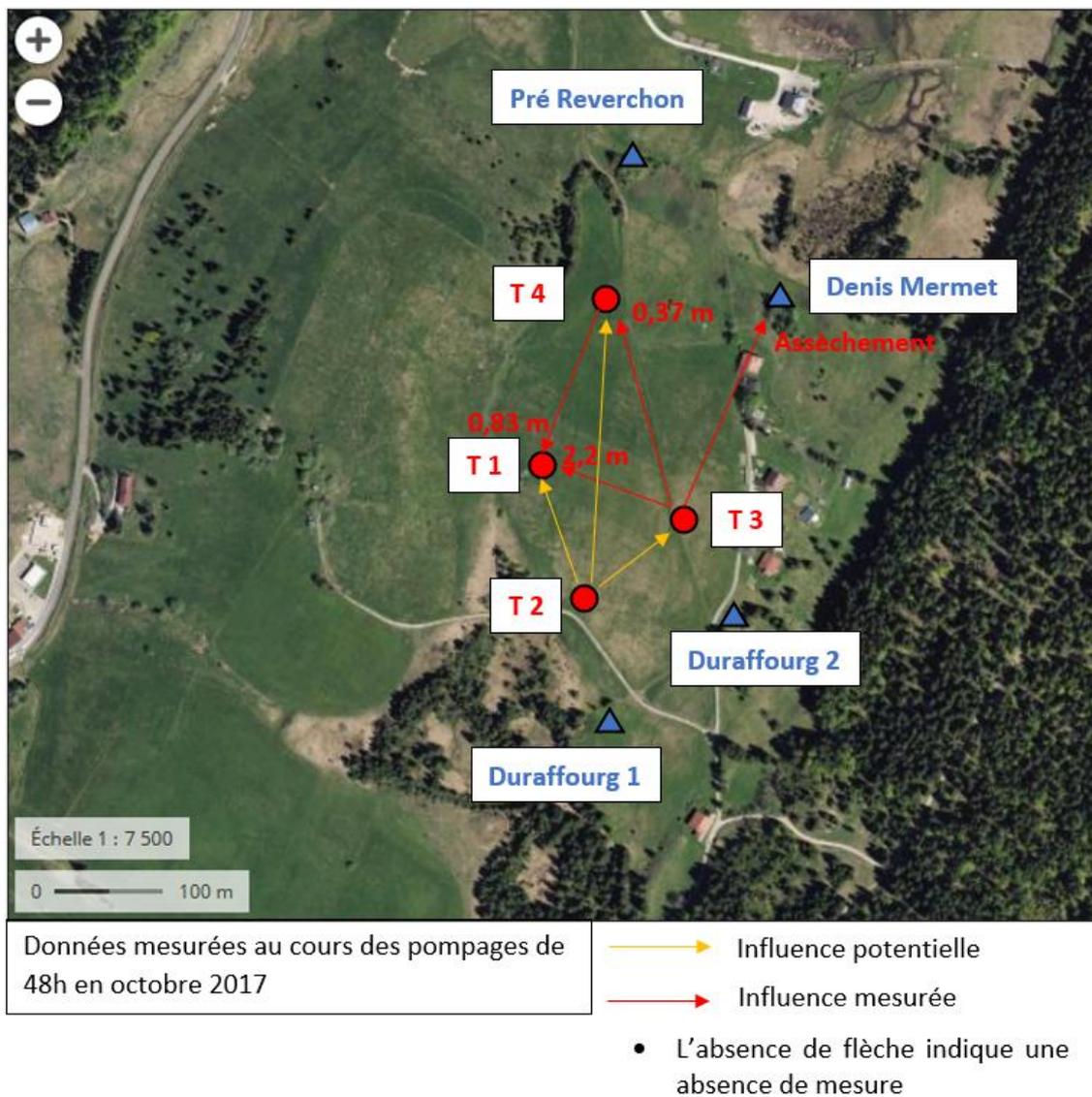
L'influence hydrogéologique entre les différents ouvrages est résumée ci-dessous. La représentation sous forme d'une carte est présentée à la Figure 6 :

- Talonard 1 influencé par Talonard 4 (baisse de 0,83 m après 48 h de pompage) ;
- Talonard 1 influencé par Talonard 3 (baisse de 2,2 m après 48 h de pompage) ;
- Talonard 4 influencé par Talonard 3 (baisse de 0,37 m après 48 h de pompage) ;
- Source Denis Mermet asséché par Talonard 3 ;
- Talonard 1, potentiellement influencé par Talonard 2 ;
- Talonard 3, potentiellement influencé par Talonard 2 ;
- Talonard 4, potentiellement influencé par Talonard 2.

***Il faut dans tous les cas être circonspect sur ces résultats car il y a mise en communication au niveau entre les eaux superficielles et les eaux profondes.***

.

+



**Figure 6 : Influence hydrogéologique entre les différents ouvrages – avant isolation des eaux superficielles**

➤ **Analyses :**

Des prélèvements d'eau pour analyse en laboratoire ont été réalisés à la fin du pompage de longue durée pour l'ensemble des forages. Les principaux résultats, sont présentés dans le Tableau 15.

➤ **Mesures diverses :**

- Deux traçages ont été réalisés en novembre 2017, afin de mieux comprendre les relations entre les eaux de surface et les eaux souterraines. (Voir rapport BE CAILLE).
- Une inspection caméra et une diagraphie gamma-ray, température, conductivité (régime statique) ont été réalisées en juin 2018 sur les forages du Talonard 2, 3 et 4 par la société Idées Eaux. (Voir CR IDEES-EAUX).
- Réalisation de pompage simultané de longue durée dans les 4 forages du Talonard (Septembre - Octobre 2018) :

Un pompage de longue durée et en simultané sur l'ensemble des 4 forages du Talonard (30 jours de pompage en continu) a été conduit entre le mois de septembre et octobre 2018. Le débit de pompage sur les différents ouvrages a été défini en fonction des résultats obtenus lors des précédents pompages. L'essai s'est déroulé de la façon suivante :

- Du 01/11/2017 au 07/09/2018 : Suivi en continu du niveau d'eau dans le Talonard 1 (sans pompage) ;
- A partir du 07/09/2018 et pour une durée de 30 à 42 jours : Pompage en continu et en simultané sur les 4 forages du Talonard ;
- Du 04/11/2018 au 27/11/2018 : Suivi de la remontée sur les 4 forages.

L'ensemble des résultats obtenu tend à démontrer que les 4 forages sont difficilement en mesure de pouvoir assurer de manière pérenne un débit d'exploitation de 400 m<sup>3</sup>/jour. La productivité des 4 forages du Talonard est globalement similaire avec des valeurs de transmissivité de l'ordre de 5\*10<sup>-5</sup>m<sup>2</sup>/s. L'aquifère capté correspondant aux grès du Miocène semble présenter une perméabilité dite secondaire ; le milieu semble particulièrement hétérogène avec des circulations d'eau via un réseau de petites fractures/fissures.

#### IV. PHASE 2 – IDEES-EAUX – INTERFACE-EAU – RETUBAGE FORAGE – MESURES PREALABLES - POMPAGE DE LONGUE DUREE

##### **4.1. Retubage des forages - Mesures préalables au pompage**

Dans une majorité du secteur de Talonard, il y a, reposant sur la molasse, soit une zone de tourbière, soit des dépôts morainiques ou fluvio-glaciaires. Ce seraient ces formations de quelques mètres d'épaisseur (coupes forages), qui conduisent aux petites émergences locales (source Mermet, source de Pré Reverchon, sorties des tourbières...).

Lors de la réalisation des forages profonds, il y avait eu la pose d'un tubage acier sur quelques mètres, mais pas de cimentation permettant d'assurer une bonne séparation entre ces petites circulations d'eau de surface et l'aquifère molassique. De ce fait, l'ensemble des mesures de niveau intégrait un mélange de ces eaux. Il était donc essentiel de commencer par isoler la zone du pied du tubage acier par où pouvait transiter les eaux de surface (Figure 7).

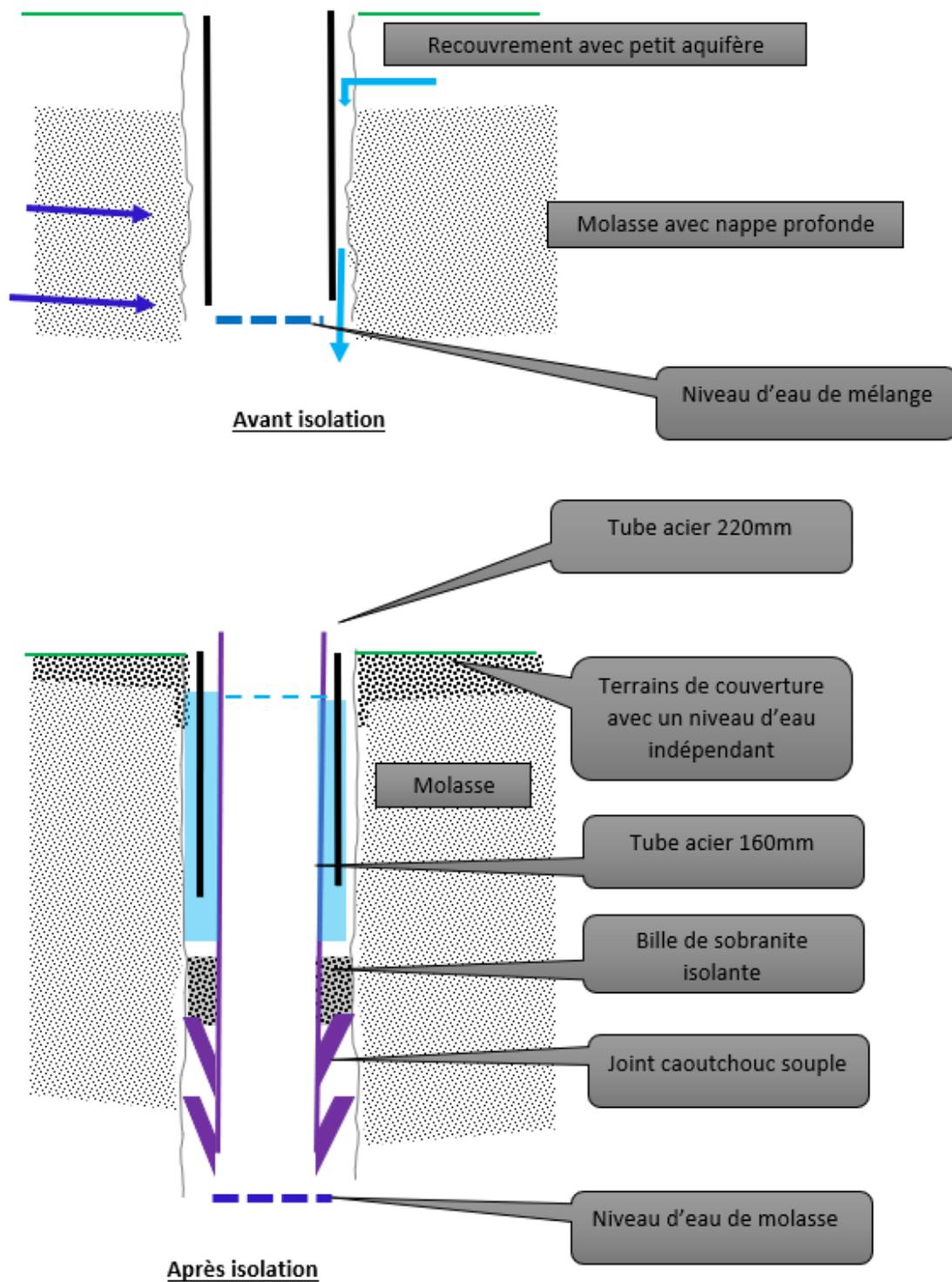


Figure 7 : Schéma de principe du retubage des forages et de l'isolation de la nappe superficielle

N'ayant aucune donnée des venues d'eau de sub-surface dans les coupes des foreurs, nous avons quelques incertitudes sur la profondeur à devoir isoler.

Nous nous sommes basés sur les données diagraphiques, qui avaient été réalisées par le BE IDEES-EAUX lors de la phase de foration. Nous avons pris comme critère de choix :

- La position du tubage acier existant ;
- Les données de la diagraphie « diamètreur » en positionnant notre joint dans une zone la plus cohérente géologiquement de façon à ce que le joint se plaque le mieux possible et assure la meilleure étanchéité ;
- Les données de la diagraphie gamma ray localisant les zones argileuses plus tendres et ayant subi des variations de diamètre lors de la foration et ne permettant pas ainsi d'avoir une zone de contact la plus parfaite possible au niveau du joint d'étanchéité.

Nous avons donc posé les tubages acier en 168/5mm avec à la base une partie de 50 cm en 150 mm supportant pour chaque tube deux joints d'étanchéité NORHAM au diamètre 160 mm.

**Tableau 3 : Longueur du tubage interne pour les différents forages**

Forage	T1	T2	T3	T4
Tubage acier (m)	20	20	20	23

Au-dessus des joints, nous avons descendu des argiles gonflantes (peltonite) sur une hauteur d'environ 2 m. Nous n'avons pas cimenté la partie supérieure, afin de pouvoir continuer à suivre les niveaux d'eau à l'extérieur du tube acier et donc les fluctuations de ces écoulements de surface. La cimentation sera faite lors de l'équipement définitif.

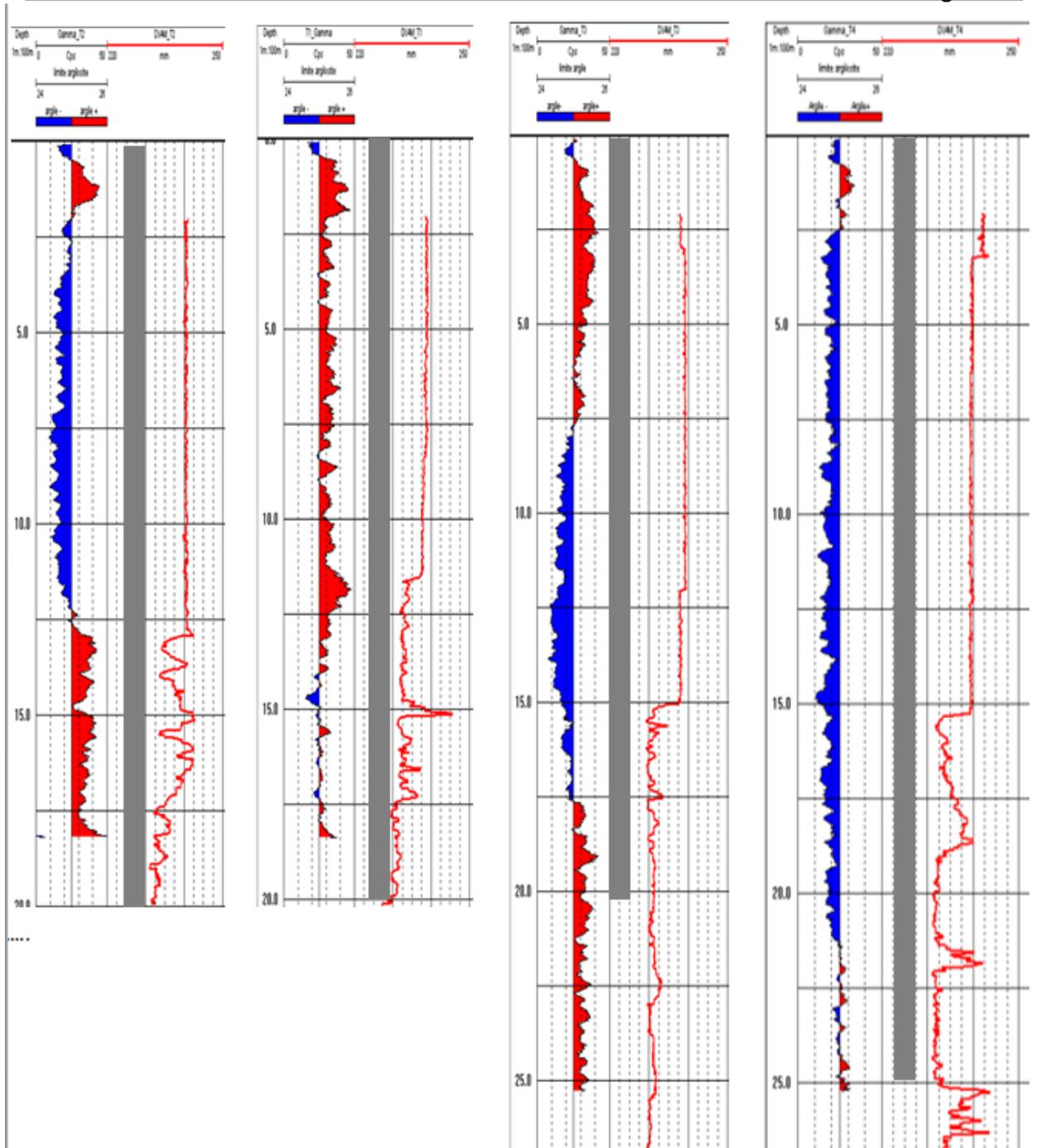


Figure 8 : Résultats des diagraphies pour le positionnement des joints d'étanchéité



**Figure 9 : Installation des tubages acier**

Les travaux se sont déroulés les 5 et 6 novembre 2019. Dès la mise en place du bouchon d'argile, le niveau d'eau entre le tubage intérieur (nappe profonde) et le tubage extérieur (écoulements de surface) a montré une importante différence mettant en évidence deux des niveaux d'eau distincts et à priori indépendants. Dès la fin des travaux, nous avons effectué des mesures de contrôle de niveau entre l'intérieur et l'extérieur du tube acier 160mm, afin de nous assurer de l'efficacité de l'étanchéité du bouchon d'argile.

La configuration actuelle des ouvrages lors des essais, nous a aussi permis de suivre le niveau piézométrique au droit de chaque forage (Figure 10) pendant toute la durée de l'étude. La différence de niveau entre ces deux nappes varie en fonction des forages et en fonction de la période hydrogéologique. Cette différence est comprise (sans pompage) entre quelques dizaines de centimètres pour le T2 à plus de 10 mètres pour le T1 et T4.

L'ensemble des mesures manuelles du niveau d'eau effectuées après tubage est présenté Figure 11. S'il existe bien des niveaux indépendants, on constate que l'écart est faible (de 1 à 2 m pour T2 et T3) et important (de l'ordre de 10m) pour T1 et T4. On constate aussi qu'il ne semble pas y avoir de continuité piézométrique aussi bien pour les circulations de surface que pour l'aquifère profond.



Figure 10 : Illustration de la mesure du niveau d'eau des 2 nappes sur les forages du Talonard

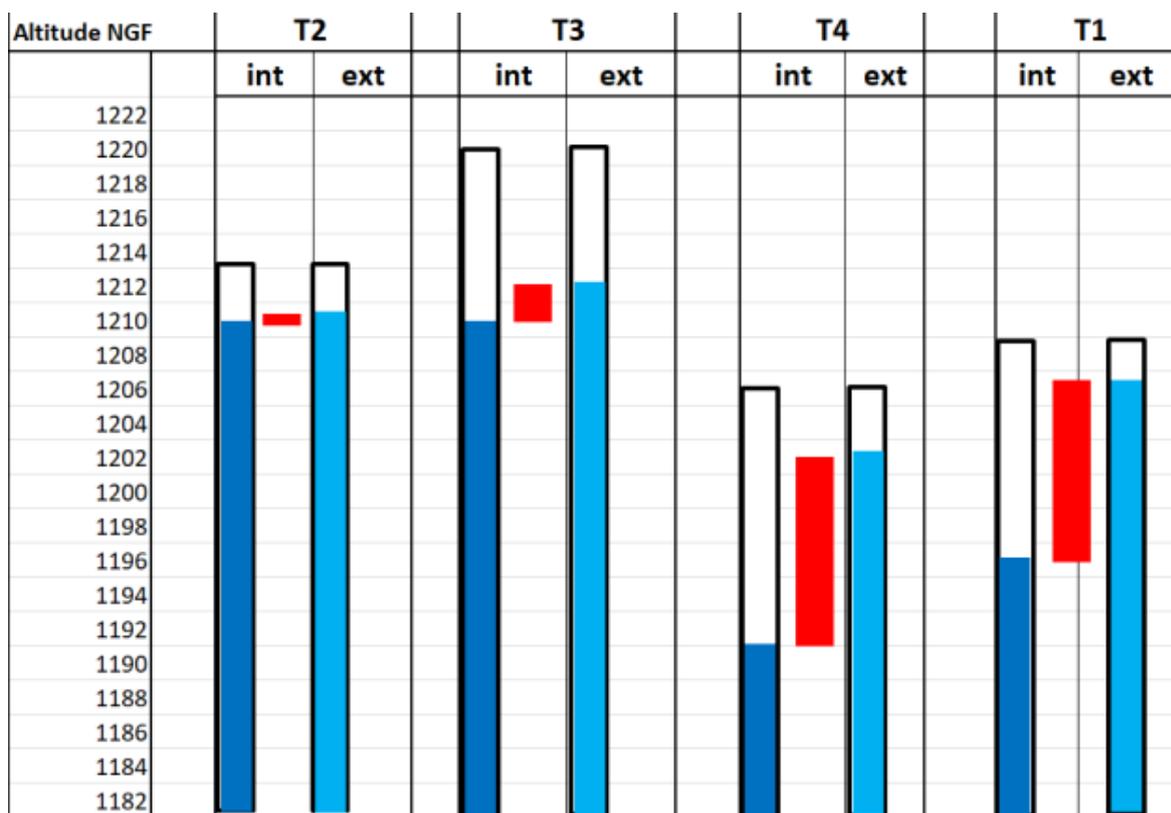


Figure 11 : Position des niveaux d'eau entre forage

## **4.2. Mesures préalables au pompage**

### **4.2.1. Préambule**

Préalablement aux pompages d'essai, le niveau d'eau de la « nappe miocène » a finalement été suivi en continu pendant 10 mois, au niveau des 4 forages. Cette chronique de données permet de mieux appréhender le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère et les variations cycliques entre les hautes eaux (novembre à mars d'une façon générale) et basses eaux (avril à octobre), périodes qui paraissent évoluer fortement avec le changement climatique. Le niveau d'eau des « écoulements de surface » a été mesuré ponctuellement lors des campagnes de terrain, seuls ceux de surface du T3 ont été suivis en continu avec la mise en place d'un capteur.

En même temps il a été effectué un suivi en continu des points d'eau suivants :

- Source Mermet ;
- Regard et Tourbière Durrafourg ;
- Tourbière Sud ;
- Tourbière Nord ;
- Tourbière témoin ;
- La source Pré Reverchon a été pratiquement sèche pendant toute la période de l'étude.

**Soit un total de 11 points de suivi en continu qui était prévu initialement pour une durée de 2 mois avant et après les pompages et qui finalement aura duré quasiment une année. Ces chroniques piézométriques étant indispensables pour mieux intégrer le fonctionnement hydrogéologique du site.**

*La localisation des différents points de suivi est précisée sur les **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** à **Erreur ! Source du renvoi introuvable.***

### **4.2.2. Données piézométriques**

#### **4.2.2.1. Forage T1 (Figure 12 - Figure 13)**

Les mesures de suivi ont été reportées sur les Figure 11 et Figure 12. Nous y avons ajouté les données des précipitations.

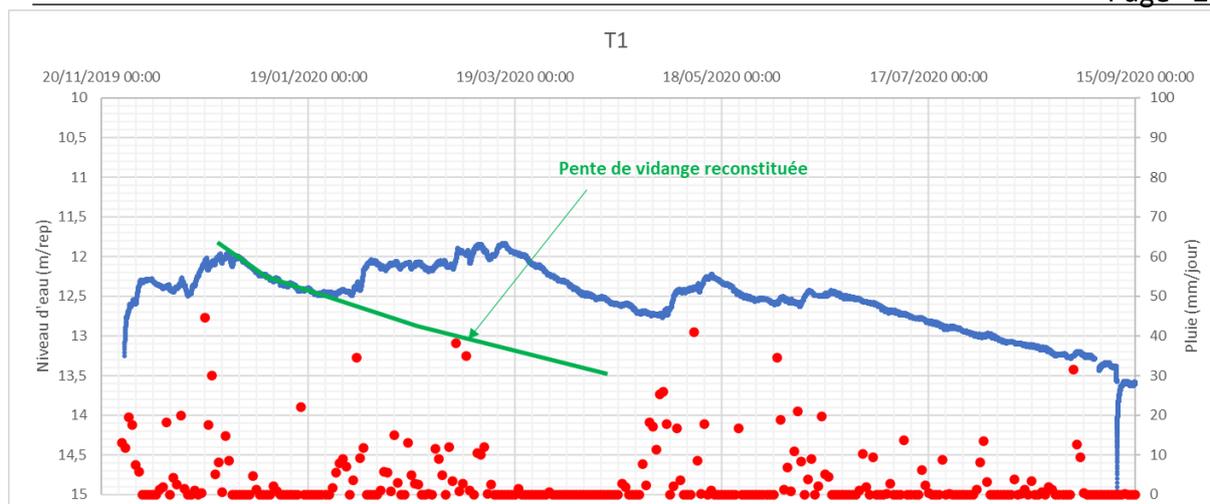


Figure 12 : Suivi du niveau d'eau du T1 (en bleue) et des précipitations (en rouge) – en statique

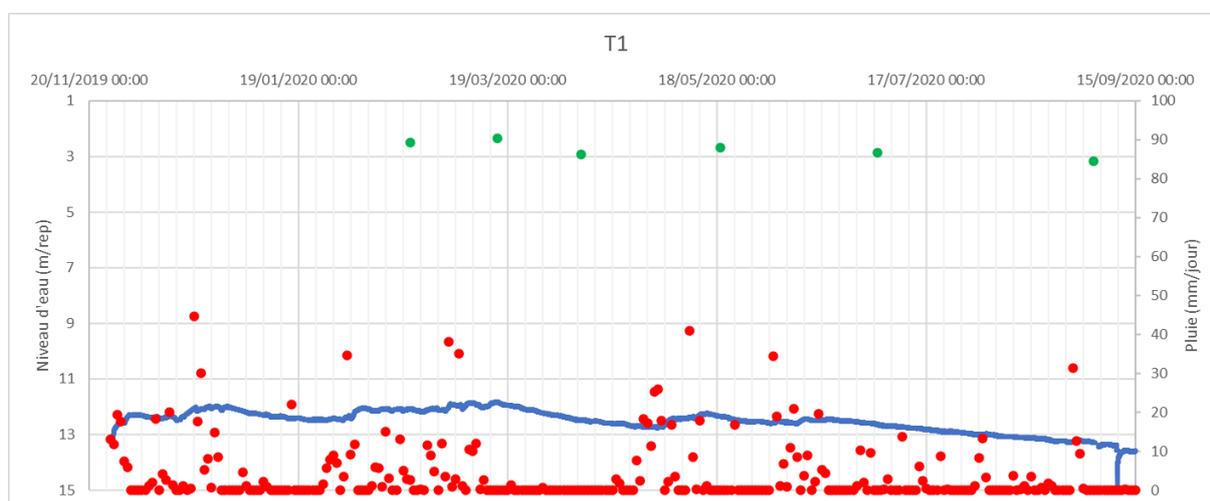


Figure 13 : Comparatif entre le niveau de la nappe de surface (en vert) et la nappe profonde (en bleue) sur le T1 en statique – la pluviométrie journalière est représentée en rouge

En l'absence de pompage, le niveau d'eau de l'aquifère sur le forage T1 a été mesuré entre 11,8 et 13,5 mètres de profondeur, soit **un battement de nappe d'environ 1,7 mètres sur la période de suivi**. Ces niveaux correspondent à une cote piézométrique de 1197,52 à 1199,22 m NGF.

Les variations de niveau d'eau se corrèlent de façon significative, mais pas de façon instantanée avec la pluviométrie. Le maximum de remplissage est atteint, pour cette période de suivi, vers la mi-mars 2020. Inversement, lors des périodes sans précipitations, l'aquifère se vidange progressivement avec une baisse du niveau d'eau continue et des pentes quelques peu différentes, mais sans vraiment de tendance à la stabilisation. Ces pentes varient entre 0,07 et 0,1 m/semaine. Que ce soit pour l'alimentation ou pour la vidange l'effet des précipitations doit être analysé de façon cumulative : la pente est maximale de mi-mars à fin avril pendant une période sans pluie, elle est plus faible de juillet à septembre certainement

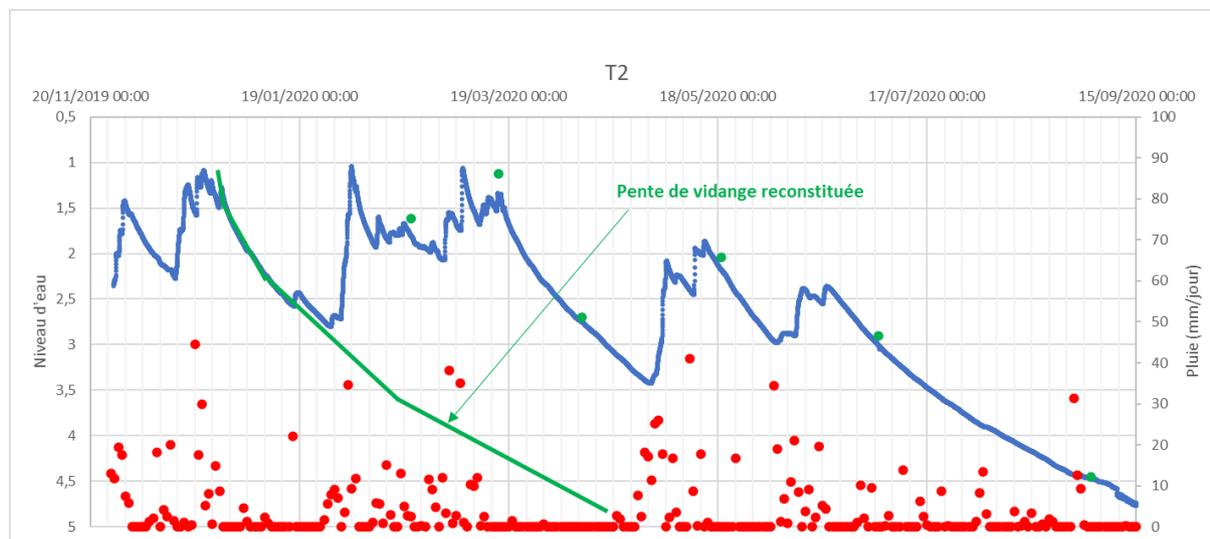
vis-à-vis des nombreuses pluies, qui si elles ne font pas remonter le niveau limitent la vidange. Il n'y a pas de réponse immédiate de remontée du niveau d'eau faisant suite à des précipitations, même importantes. **Ce qui atteste d'un aquifère sans communication directe avec les eaux de surface.**

Au niveau du T1, les eaux de surface, pour les mesures effectuées, se situent en dessous de 2 m (la coupe forage donne un recouvrement de 2.4 m d'épaisseur), ce qui signifie que la tranche d'eau est extrêmement réduite. L'eau de la nappe de la molasse a été mesurée toujours 10 m plus bas **confirmant sa totale déconnexion des eaux de surface.** (Figure 13).

**Tableau 4 : Caractéristiques piézométriques du T1 – en statique du 20/11/19 au 15/09/21**

T1	
Cote piézométrique maximale	1199,22
Cote piézométrique minimale	1197,52
Hauteur de battement de nappe	1,7 m
Vitesse de descente	Entre 0,07 et 0,1 m/semaine

#### 4.2.2.2. Forage T2 (Figure 14)



**Figure 14 : Suivi du niveau d'eau du T2 en statique (nappe de surface en vert et nappe profonde en bleue) – la pluviométrie journalière est représentée en rouge**

En l'absence de pompage, le niveau d'eau de l'aquifère sur le forage T2 est compris entre 1 et 5 mètres de profondeur, soit un **battement de nappe d'environ 4 mètres** (plus du double de celui mesuré sur T1). Ces niveaux correspondent à une cote piézométrique de 1209,87 à 1213,87 m. NGF.

Les variations de niveau d'eau se corrèlent avec la pluviométrie avec une réponse hydrogéologique marquée, mais certainement aussi cumulative. En effet, l'impact de la pluie

du 18 janvier de 20 mm occasionne une remontée du niveau d'environ 10 cm et celle de 34 mm du 3 mars une remontée de 1,80m. De la même façon les pluies de mi-août n'entraînent pas de remontée, mais une simple inflexion de la pente.

**Il semblerait donc que le signal des pluies par les eaux de surface et une infiltration locale n'agit pas, comme pour le T1, directement sur le niveau de l'aquifère molassique. Il pourrait y avoir un effet tampon dû à la neige en hiver, mais aussi une alimentation possible par les calcaires et nous y reviendrons ultérieurement.**

Le niveau d'eau maximal est atteint le 02/02/2020 et le 05/03/2020, à la suite d'importantes précipitations.

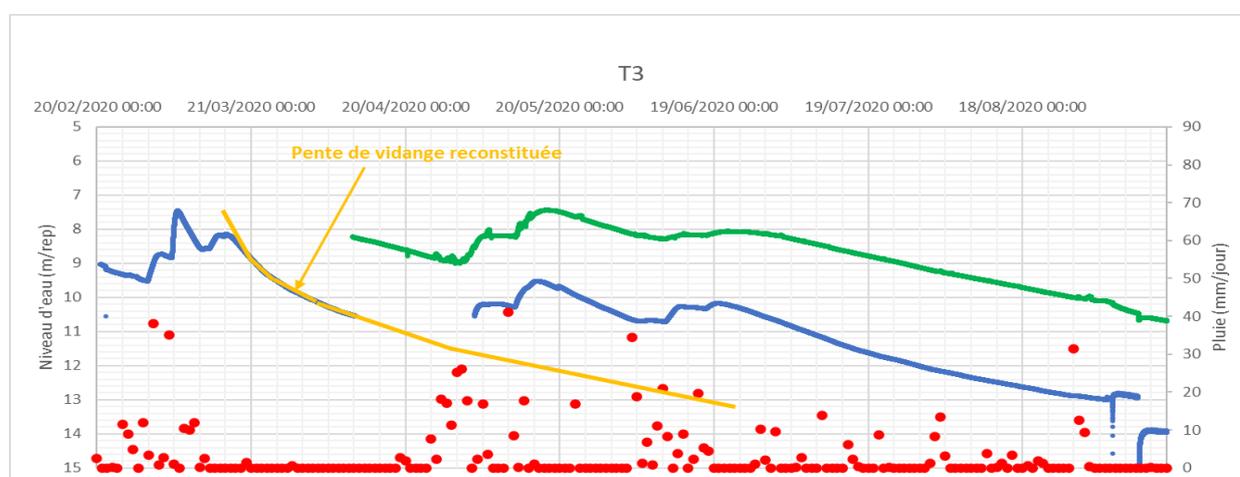
Lors des périodes sans précipitations, l'aquifère se vidange progressivement avec des pentes différentes et comprises entre 0,16 et 0,39 m/semaine, soit là aussi plus du double que celles mesurées pour T1.

La coupe géologique du foreur donne une épaisseur des terrains de recouvrement de 1m reposant sur des calcaires argileux réputés imperméables. La potentialité aquifère du recouvrement ne peut être que quasiment nulle. Son niveau apparait systématiquement au-dessus de celui de la nappe miocène. Toutefois, les écarts de niveau sont relativement faibles, il est d'environ 30 cm en hautes eaux, puis se réduit à 5 cm en basses eaux.

**Tableau 5 : Caractéristiques piézométriques du T2 – en statique du 20/11/19 au 15/09/21**

T2	
Cote piézométrique maximale	1213,87 m NGF
Cote piézométrique minimale	1209,87 m NGF
Hauteur de battement de nappe	4 m
Vitesse de descente	Entre 0,16 et 0,39 m/semaine

#### 4.2.2.3. Forage T3 (Figure 15)



**Figure 15 : Suivi du niveau d'eau du T3 en statique (eau de surface en vert et nappe profonde en bleue) – la pluviométrie journalière est représentée en rouge**

Sur cet ouvrage, nous avons pu effectuer un suivi en continu des eaux de surface et des eaux profondes. La coupe foreur donne une épaisseur de formation de recouvrement de 3,5 m composés d'argile sableuses (la perméabilité dépendant du rapport argile sable) et reposant sur des grès calcaires dont la première venue d'eau est notée à 34 m. **Il n'y aurait donc pas de communication possible entre les eaux de surface et l'aquifère molassique profond.**

En l'absence de pompage, le niveau d'eau de l'aquifère molassique est compris entre 7,5 et 13 mètres de profondeur, soit un battement de nappe d'environ 5,5 mètres supérieur à celui mesuré sur T2. Ces niveaux correspondent à une cote piézométrique de 1208,83 à 1214,3 m. NGF.

Les variations de niveau d'eau se corrèlent avec la pluviométrie de façon similaire au T2. Le niveau d'eau maximal est atteint le 07/03/2020, à la suite d'importantes précipitations. Lors des périodes sans précipitations, l'aquifère se vidange progressivement avec une baisse du niveau d'eau du forage T3 compris entre 0,23 et 0,42 m/semaine, valeurs similaires à celles du T2.

Le niveau des eaux de surface suit quasi parfaitement celui de la nappe profonde avec toutefois un écart positif de niveau compris entre 1,8 et 3 m.

Par contre, le niveau de ces eaux de surface se situe entre 7,5 et 10 m ; valeur étonnamment basse par rapport à l'épaisseur du recouvrement. Cela nous conduit à avoir un doute sur l'étanchéité du tubage que nous avons mis en place. Il semblerait que la communication existe encore et que les pertes de charge créées entraînent ce décalage entre les niveaux. Lors de la finalisation de l'équipement nous supprimerons définitivement cette communication, qui pourrait occasionner une moindre influence au niveau de la source Mermet.

**Tableau 6 : Caractéristiques piézométriques du T3 – en statique du 20/11/19 au 15/09/21**

T3	
Cote piézométrique maximale	1214,33 m NGF
Cote piézométrique minimale	1208,83 m NGF
Hauteur de battement de nappe	5,5 m
Vitesse de descente	Entre 0,23 et 0,42 m/semaine

#### 4.2.2.4. Forage T4 (Figure 16)

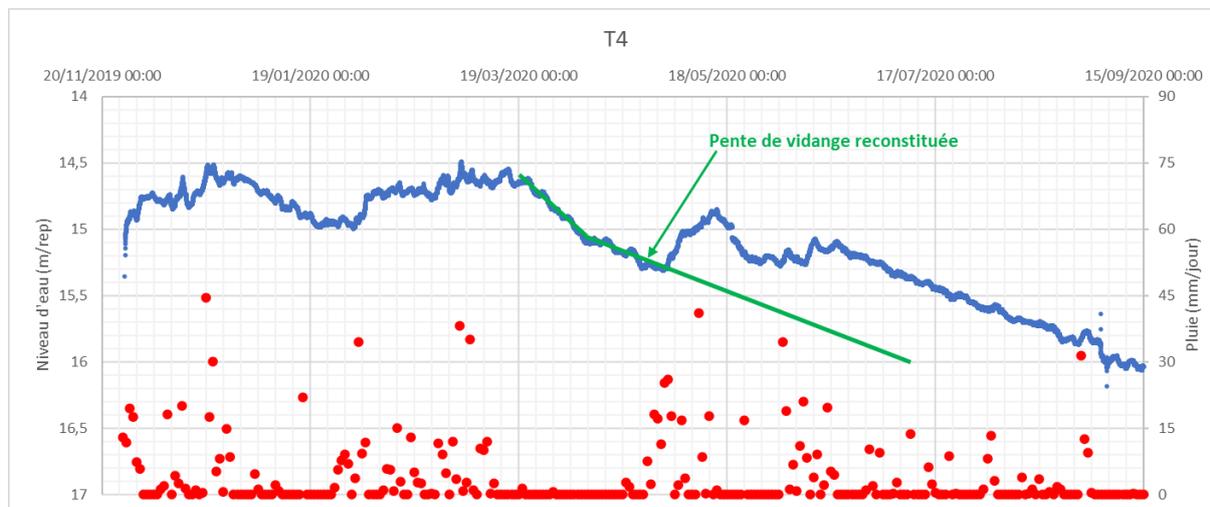


Figure 16 : Suivi du niveau d'eau du T4 (en bleue) et des précipitations (en rouge) – en statique

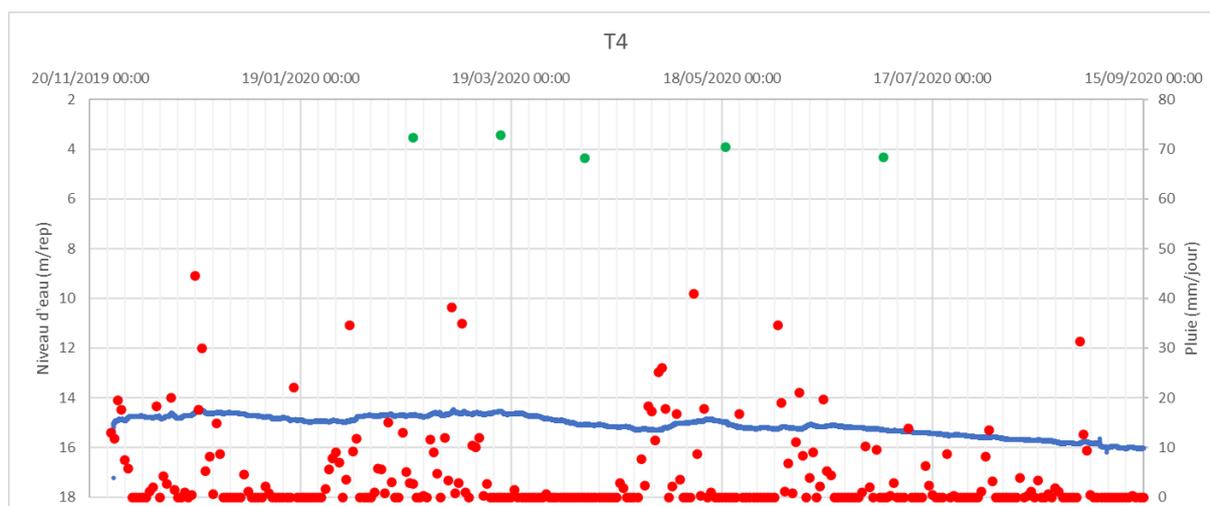


Figure 17 : Comparatif entre le niveau de la nappe de surface (en vert) et la nappe profonde (en bleue) sur le T4 en statique – la pluviométrie journalière est représentée en rouge

En l'absence de pompage, le niveau d'eau de l'aquifère sur le forage T4 est compris entre 14,5 et 16,1 mètres de profondeur, **soit un battement de nappe d'environ 1,6 m sur la période de suivi**. Fluctuations comparables à celles mesurées sur T1. Ces niveaux correspondent à une cote piézométrique de 1193,38 à 1194,98 m NGF.

Les variations de niveau d'eau se corrént avec la pluviométrie de façon quasi identique à celles sur le T1. Le maximum de remplissage est atteint vers la mi-mars 2020 à la fin de la période de hautes eaux. Lors des périodes sans précipitation, l'aquifère se vidange progressivement avec une baisse du niveau d'eau du forage T4 d'environ 0,08 m/semaine.

Concernant les circulations d'eau en surface. La coupe foreur montre que le recouvrement a une épaisseur de 2 m sans en préciser la nature et qu'ils reposent sur un grès fin, dont la première venue d'eau est notée vers 34 m. Le niveau d'eau que nous avons mesuré se situe toujours en-dessous de 2 m montrant soit que cette limite des terrains de recouvrement n'est pas assez précise, soit qu'une partie, aussi faible soit-elle, s'écoule vers l'aquifère molassique (pseudo-perméabilité au niveau du joint) Figure 18.

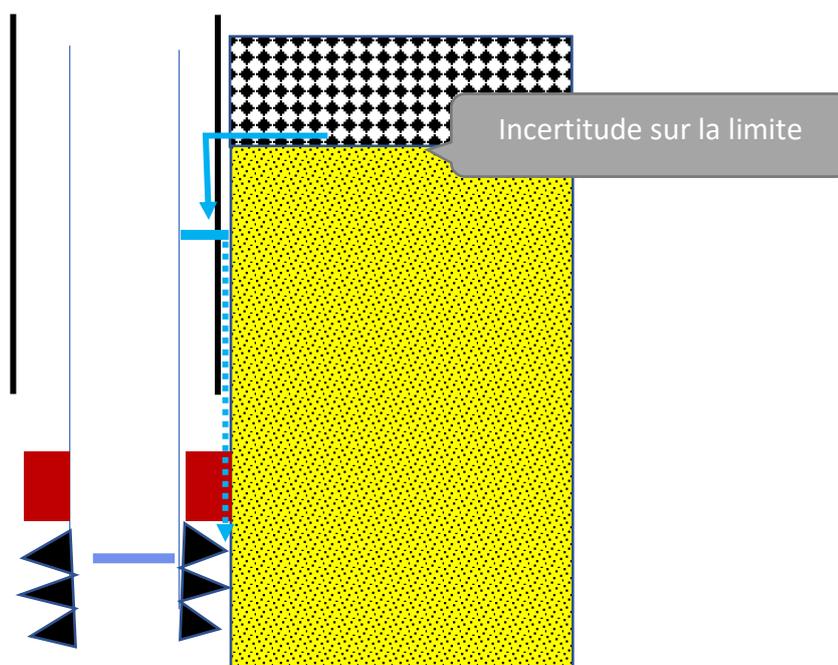


Figure 18 : incertitudes à la base des tubages

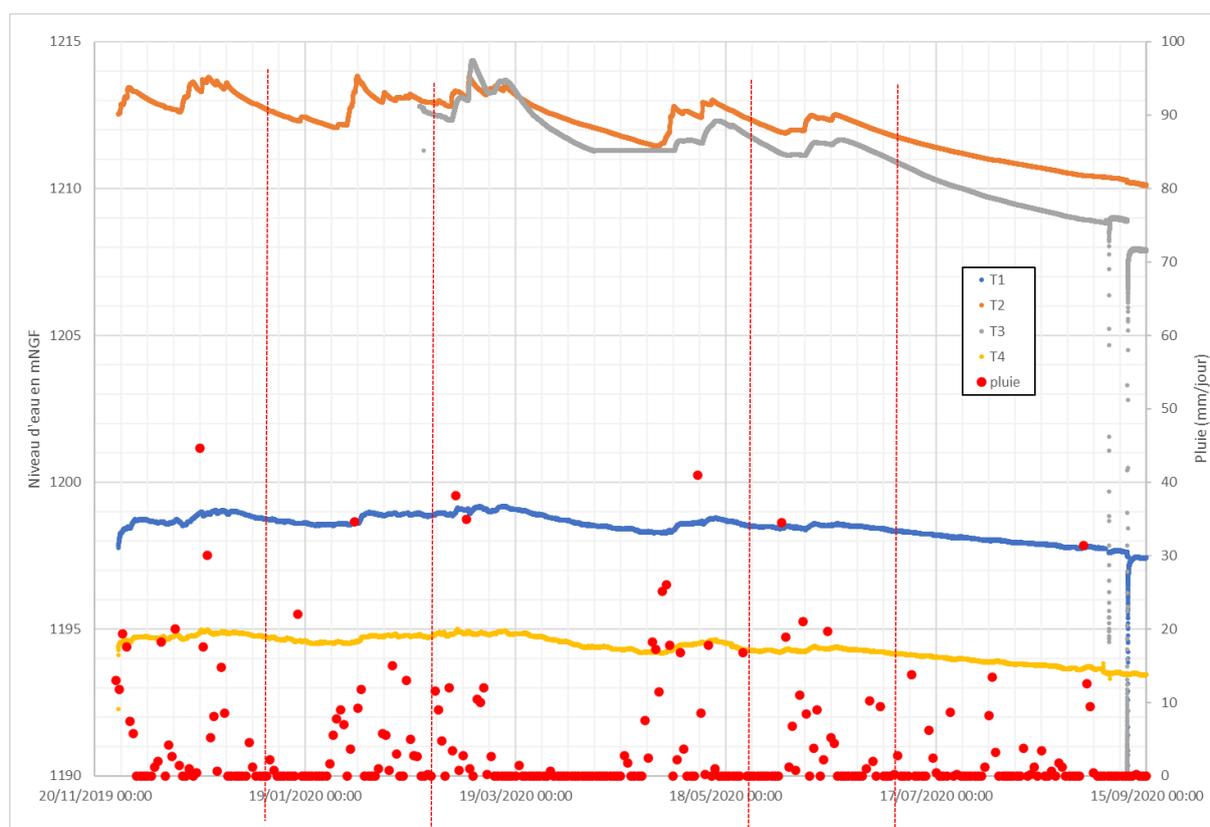
Dans tous les cas, cette communication avec les eaux de surface ne peut-être qu'extrêmement réduite, sinon il n'y aurait qu'un seul niveau.

Tableau 7 : Caractéristiques piézométriques du T4 – en statique

T4	
Cote piézométrique maximale	1194,98 m NGF
Cote piézométrique minimale	1193,38 m NGF
Hauteur de battement de nappe	1,6 m
Vitesse de descente	0,07 et 0,1 m/semaine

#### 4.2.2.5. Interprétation de la piézométrie en statique (Figure 19)

La Figure 19 représente sur un même graphique, l'altitude piézométrique des 4 forages sans pompage.



**Figure 19 : Suivi piézométrique des différents forages – en statique**

Cette représentation permet de visualiser clairement la différence d'altitude piézométrique mesurée entre les différents forages, ainsi qu'une compartimentation entre un « compartiment amont » représenté par T2 et T3 et un « compartiment aval » représenté par T1 et T4. La différence d'altitude de niveau d'eau entre ces deux secteurs est voisine de 12 m avec T1 et 16 m avec T4 :

- Le « compartiment amont », représenté par T2 et T3, présente une altitude piézométrique beaucoup plus élevée. Le signal piézométrique mesuré sur ces deux forages est très similaire avec des réactions plus rapides et des amplitudes nettement plus marquées vis-à-vis des précipitations avec un battement de nappe de l'ordre de 4 à 5,5 m de hauteur sur la durée d'observation ;
- Le « compartiment aval », représenté par T1 et T4, présente une altitude piézométrique plus basse. Le signal piézométrique mesuré sur ces deux forages est relativement similaire, avec toutefois une différence d'altitude d'environ 4 m. Le niveau d'eau de l'aquifère réagit aux précipitations, avec un signal décalé (proche de 5 jours) et fortement amorti. La hauteur de battement de la nappe est d'environ 1,6 m sur la période d'observation, soit environ trois fois plus faibles.

En complément de ces données quantitatives, et nous y reviendrons ultérieurement, les analyses chimiques menées lors des pompages ont également montré que les eaux du groupe aval apparaissait légèrement plus minéralisées que celles du groupe amont. Ces éléments confirment le fait d'une circulation souterraine plus longue dans la durée pour les eaux du groupe aval vis-à-vis du groupe amont.

Ainsi, les forages T2 et T3 se rechargent et se vidangent rapidement à la suite des précipitations. Au contraire, les forages T1 et T4 du compartiment aval (signal amorti, piézométrie plus basse et plus forte minéralisation) traduisent une eau plus ancienne qui a circulé plus longtemps au sein du complexe aquifère. Malgré la faible distance entre les forages du compartiment amont et aval, la signature hydrogéologique est complètement différente traduisant une discontinuité de l'aquifère induisant une « barrière hydrogéologique ». L'origine de cette limite n'est pas clairement identifiée. Néanmoins, les données de géophysique électrique avaient montré un niveau de plus faible résistivité pouvant traduire la présence d'un niveau potentiellement plus argileux. D'un point de vue structural, le plissement synsédimentaire subit par les formations molassiques (lors du soulèvement du Jura) a nécessairement induit une imbrication structurale particulièrement complexe et difficile à appréhender, entre plissement, slumping pour finir par des fissures, voire des fractures après la diagénèse qui a grésifié cette série sédimentaire.

**Tableau 8 : Comparatif des caractéristiques piézométriques entre les différents compartiments – en statique**

	<b>Compartiment amont (T2 / T3)</b>	<b>Compartiment aval (T1 / T4)</b>
Altitude piézométrique	Entre 1208,83 et 1214,33 m NGF	Entre 1193,38 et 1199,22 m NGF
Hauteur de battement de nappe	Entre 4 et 5,5 m	Entre 1,6 et 1,7 m
Réaction aux précipitations	Rapide mais de façon irrégulière	Faible – signal amorti
Minéralisation	250 à 300 µs/cm	350 à 400 µs/cm

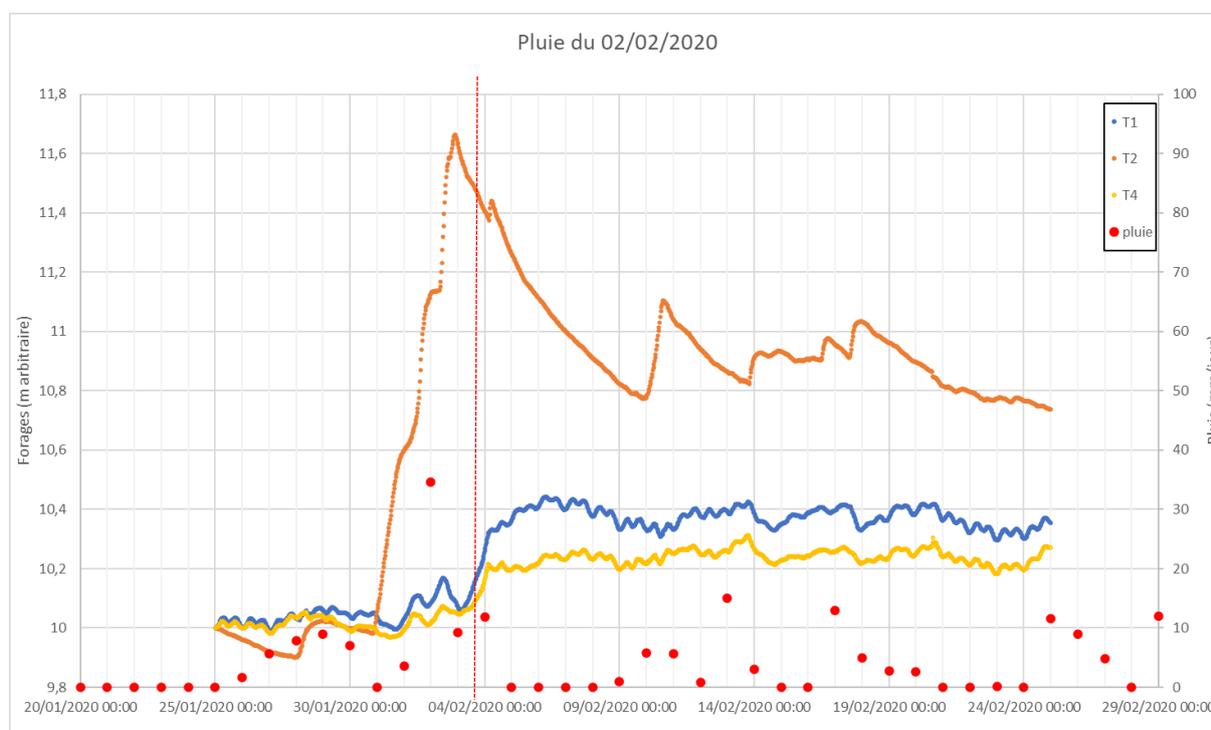
**Tableau 9 : Comparatif du battement de nappe et de la pente de vidange maximale pour les différents forages**

<b>Forage</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>
Delta fluctuation (m)	1.7	4	5.5	1.6
Pente maximale (cm/semaine)	0,1	0,39	0,42	0,1

### 4.2.3. Influence des précipitations

Pour mieux appréhender l'influence des précipitations sur les variations du niveau d'eau des différents forages, nous avons fait des « zoom » sur les épisodes de pluies intenses. Néanmoins, les variations du niveau d'eau sont relativement faibles (quelques dizaines de centimètres) au regard de la différence d'altitude entre les différents forages. Par conséquent, nous avons fixé arbitrairement une profondeur de niveau d'eau arbitraire de 10 m au début de chaque chronique. Ainsi, les graphiques suivants ne doivent pas être interprétés comme une altitude piézométrique, mais comme une variation de pente de la courbe de donnée et permettre ainsi de mieux visualiser la propagation du signal piézométrique au travers du milieu aquifère.

#### 4.2.3.1. Pluie du 2 février 2020 (Figure 20)



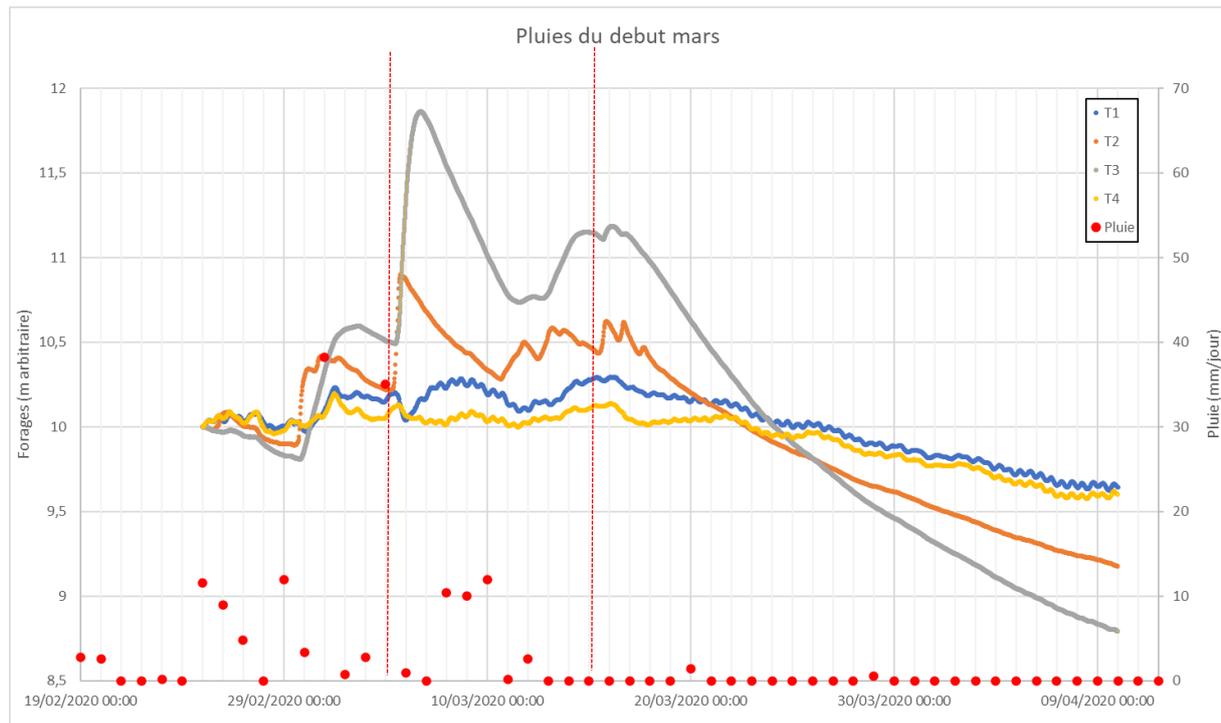
**Figure 20 : Influence des précipitations sur le niveau d'eau des différents forages – février 2020**

Ce pic de précipitation se caractérise par une lame d'eau précipitée de 34,6 mm le 02/02/2020 précédée de 32 mm de pluie cumulée au cours des 7 jours précédents. L'infiltration des eaux dans le milieu aquifère a entraîné dans un premier temps une remontée du niveau d'eau du T2 (groupe amont), puis une remontée du groupe aval. Le décalage du signal entre ces secteurs est d'environ 3,2 jours accompagné d'un amortissement du pic d'environ 75 % (atténuation de la remontée du niveau d'eau).

Par contre, la pluie de 15 mm du 10 et 11 février n'occasionne qu'une remontée de 30 cm et celle de 15 mm du 15 simplement 10 cm.

Cela montre qu'il existe bien une relation nette, mais qu'il est difficile d'en déduire un lien de proportionnalité.

#### 4.2.3.2. Pluie du début mars (Figure 21)

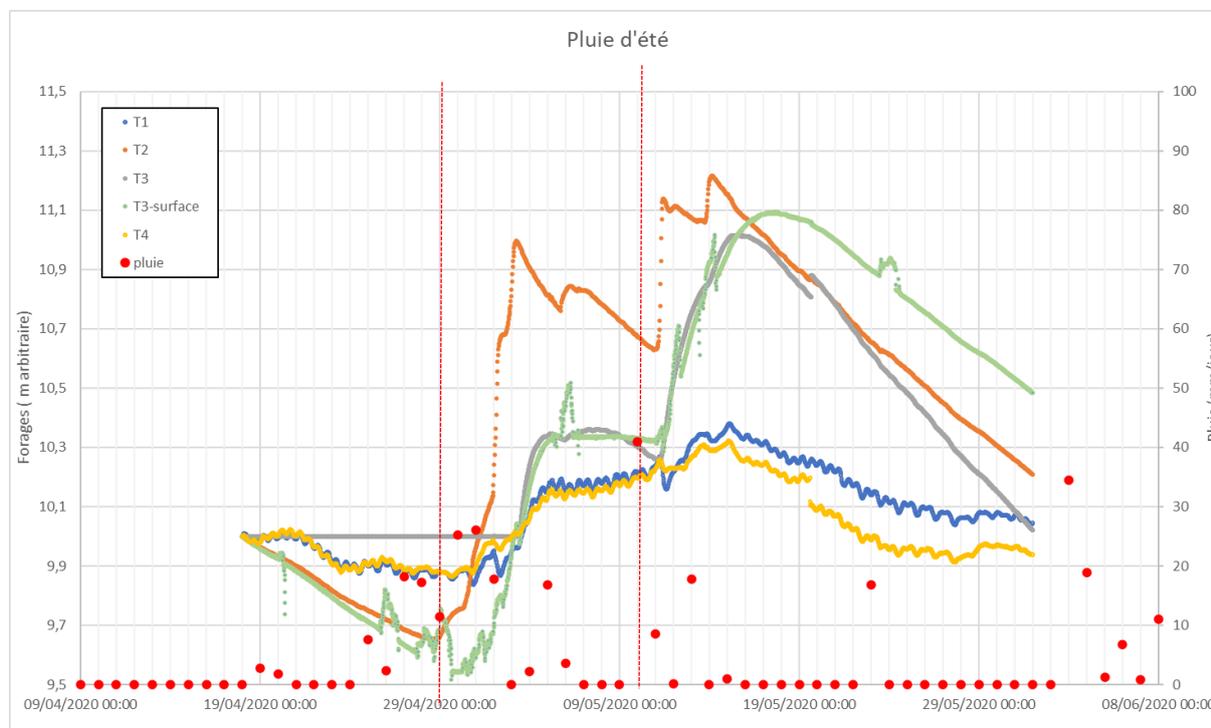


**Figure 21 : Influence des précipitations sur le niveau d'eau des différents forages – mars 2020**

Entre-le 25/02/2020 et le 10/03/2020, on enregistre un cumul de 151 mm de précipitation. La remontée du niveau d'eau est d'abord enregistrée de façon brusque dans le T2, puis dans le T3 après environ 2h30, puis 1 journée plus tard et de façon beaucoup plus amortie sur les T1 et T4. Ici encore et de façon inexplicable, les pluies 7 au 9 mars affectent les niveaux avec beaucoup moins d'impact.

On constate que l'effet des pluies n'est pas totalement corrélé avec les niveaux d'eau des différents forages aussi bien au niveau du temps de latence qu'au niveau de la proportionnalité des signaux. Il sera intéressant de pouvoir intégrer d'autres paramètres comme par exemple le débit d'entrée au niveau de la perte dans les calcaires provenant des eaux de la tourbière sud.

#### 4.2.3.3. Pluie d'été – début mai (Figure 22)



**Figure 22 : Influence des précipitations sur le niveau d'eau des différents forages – mai 2020**

Au début du mois de mai 2020, on enregistre 148 mm de pluie cumulée entre le 25/04/2020 et le 06/05/2020 (12 jours), qui ont induit une remontée de 1,60 m sur T2, puis les 41 mm de pluie de la journée du 10/05/2020 une remontée de 0,45 m sur T2 avec une certaine proportionnalité. De la même façon, la recharge de l'aquifère est enregistrée dans un premier temps par le compartiment amont, puis dans le compartiment aval. Le décalage temporel est d'environ 3,5 jours et un amortissement du pic d'environ 65 % (atténuation de la remontée du niveau d'eau).

#### 4.2.3.4. Pluie d'été – mi-juin (Figure 23)



**Figure 23 : Influence des précipitations sur le niveau d'eau des différents forages – juin 2020**

Au cours de la première moitié du mois de juin 2020, on enregistre un cumul de 147 mm de pluie en 16 jours. La recharge de l'aquifère se fait de la même manière, avec une montée préalable du compartiment amont puis du compartiment aval, avec un décalage temporel variable d'environ 24 heures pour le début de la remontée et un décalage d'environ 3,5 jours en comparant le pic du signal.

#### 4.2.3.5. Synthèse

##### ➤ **Relation précipitations – niveaux**

Sur la Figure 24, nous avons mis en relation les précipitations avec les remontées de niveau d'eau dans les 4 forages. Nous l'avons fait uniquement dans le cas où l'impact est bien marqué et pour un délai inférieur à 2 à 3 jours.

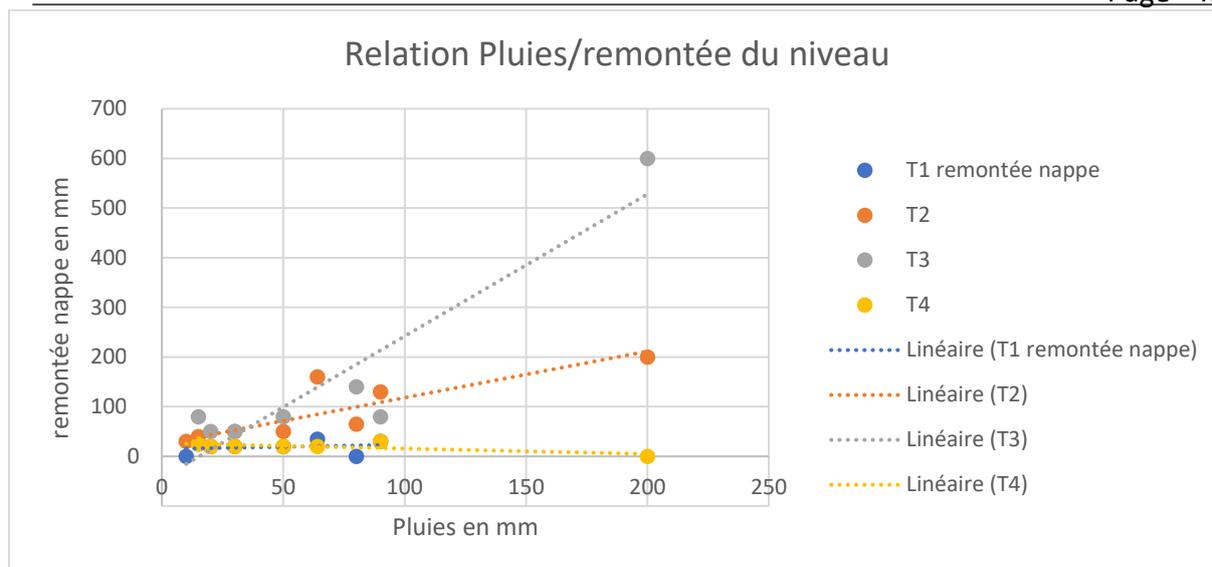


Figure 24 : relation pluies niveau d'eau sur les forages

On constate que les niveaux des forages fluctuent de façon totalement différente vis-à-vis des précipitations avec :

- T1 et T4 qui réagissent avec un tel décalage qu'une corrélation (courbe de tendance) n'est quasiment pas identifiable ;
- T2 et T3 qui réagissent très rapidement. La courbe de tendance montre l'écart de proportionnalité qu'il existe entre les 2 forages, mais elle masque les disparités (64 mm de pluie le 20 février sur T2 avec une remontée de 1,60 m, puis début mai pour 90 mm de pluie la remontée n'est que de 1,3 m) entre les précipitations et les remontées.

On peut supposer que d'autres critères rentrent en ligne de compte :

- Eau stockée sous forme de neige ;
- Mise en charge des calcaires directement par les pluies, mais aussi par la perte du Talonard dont il faudrait pouvoir suivre le débit entrant ainsi que son niveau en continu.

Si on prend en compte le décalage entre les précipitations et la remontée de la nappe, on peut résumer les choses ainsi :

	T1	T2	T3	T4
Delta du temps de latence par rapport à un début de précipitation	4/5 jours	Dans la journée	Dans la journée	4/5 jours

➤ **Sens et direction de l'aquifère**

Contrairement à la grande majorité des aquifères qui s'écoulent d'une zone d'alimentation vers un exutoire avec un gradient, les niveaux sont ici totalement disparates et

nécessitent d'envisager un fonctionnement différent et peu habituel mais en lien avec le cadre géologique.

Nous aurions pu imaginer que l'eau de cet aquifère se dirige soit vers le nord, soit vers le sud en suivant le sens de ces lambeaux molassiques, qui seraient en continuité hydraulique. Il n'en est rien et on peut donc supposer que chacun de ces petits bassins sédimentaires sont indépendants et que les circulations d'eau internes se font directement avec l'encaissant. Cela étant acquis comme une base de travail, nous y reviendrons ultérieurement ainsi que dans la proposition du modèle de fonctionnement conceptuel.

➤ **Divers**

On constate sur les suivis des niveaux des oscillations journalières de l'ordre de 2 à 4 cm et cela uniquement sur T1 et T4. Ces variations sont totalement synchrones et extrêmement régulières. S'agit-il d'effets similaires à celui des marées dans un aquifère fortement captif ? Pour l'instant nous n'avons pas de propositions apportant plus de certitudes. L'importance n'est pas capitale et elle ne fait que confirmer le fonctionnement différent entre T1/T4 et T2/T3.

### **4.3. Pompage de longue durée (18 septembre – 9 décembre 2021)**

#### **4.3.1. Déroulement des essais**

**Le pompage d'essai a débuté sur le T1 le 18/09/2020, au cours de la période d'étiage. Les autres pompes ont été lancées entre le 21 et le 28/09/2020.**

*Tout au long de ce pompage, nous avons dû résoudre plusieurs interruptions sur un ou plusieurs ouvrages d'origine bien différentes.*

- Les premiers jours du pompage ont été perturbés par des pluies importantes générant des arrêts des pompes liées à la sensibilité des protections différentielles au niveau des différentes armoires.
- Rapidement l'assèchement de la source Mermet a aussi, par voie de conséquence, causé l'arrêt de l'alimentation en eau des roulottes de la ferme des bisons. Cela nous a conduit à stopper momentanément les pompages le 01/10/2020.

Après discussion avec M. Denis Mermet et les locataires de la ferme des bisons, un accord a été trouvé en dérivant l'eau prélevée sur le T4 pour alimenter artificiellement les roulottes et garantir l'alimentation en eau. Le pompage a ainsi pu reprendre le 09/10/2020.

- Le 09/10/2020 : le pompage démarre sur le T2, T3 et T4. Le T1 reste à l'arrêt du fait d'une panne de la pompe en place. Cette dernière sera remplacée et le pompage redémarrera sur le T1 le 22/10/2020
- Le 22/10/2020 : la pompe du forage T4 tombe en panne en lien probable avec une surtension électrique au moment de la remise en fonctionnement du T1. La pompe du T4 sera remplacée et le pompage redémarrera le 11/11/2020. Un rejet des eaux est effectué au niveau de la source de Denis Mermet ;
- Le 07/12/2020 : le pompage est arrêté sur le T1, T2 et T3 ;
- Le 09/12/2020 : le pompage est arrêté sur le T4.

#### 4.3.2. Représentation synthétique de la période d'essai (Figure 25, Figure 26)

Le débit total de pompage est représenté sur la Figure 26. A l'exception du début du pompage (démarrage progressif des forages), le débit de prélèvement total est compris entre 9 et 14 m<sup>3</sup>/h - Figure 26). Ces fluctuations sont le reflet du déroulement des essais avec des perturbations ayant occasionnées des périodes d'arrêt et cela plus particulièrement le premier mois. Ensuite le déroulement a été beaucoup plus régulier avec un débit continu compris entre 9 et 14 m<sup>3</sup>/h.

Au final, la durée du pompage prévue initialement d'une durée de 2 mois s'est étalée sur presque 3 mois.

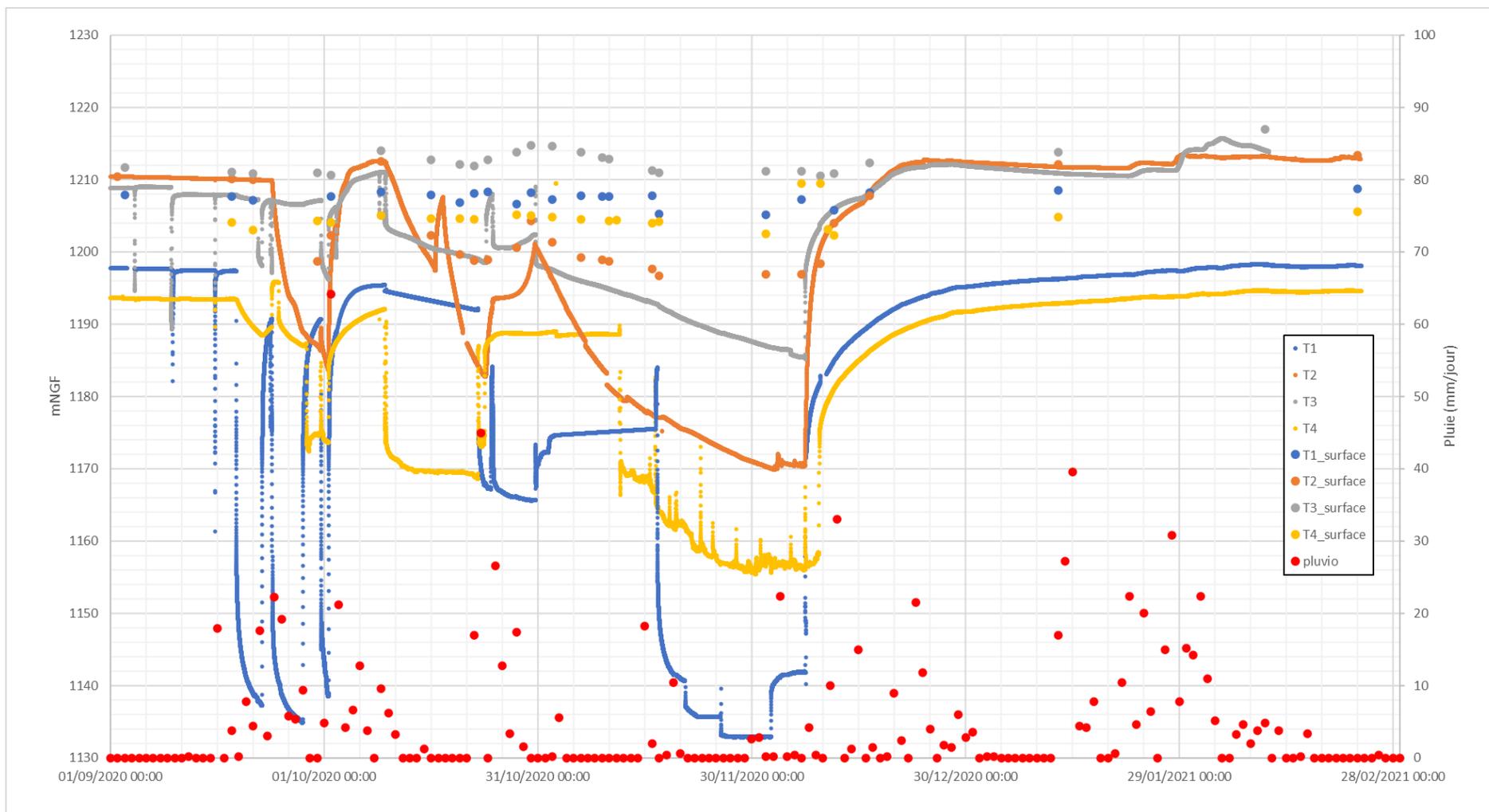


Figure 25 : Suivi du niveau piézométrique des différents forages en pompage

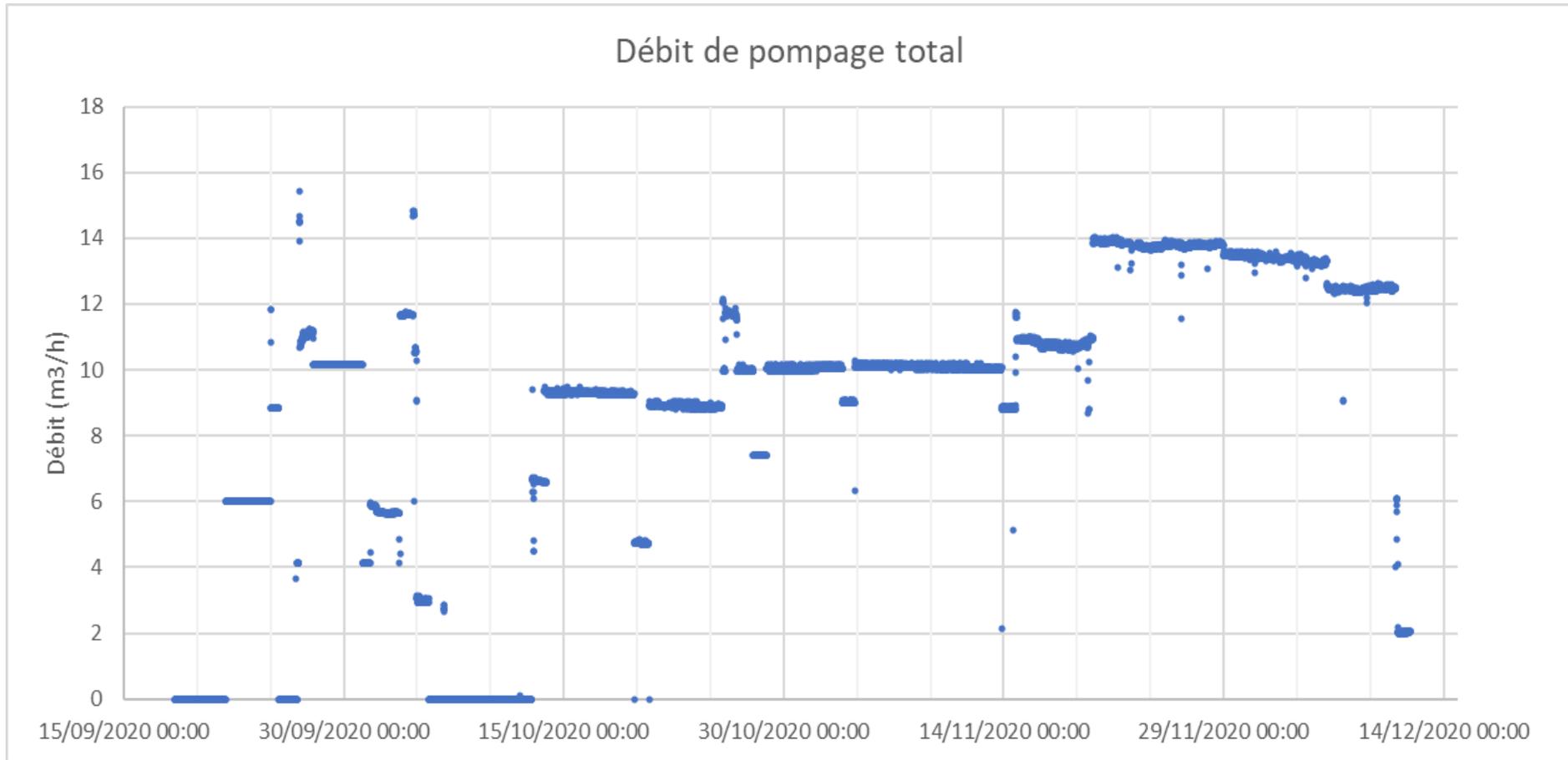
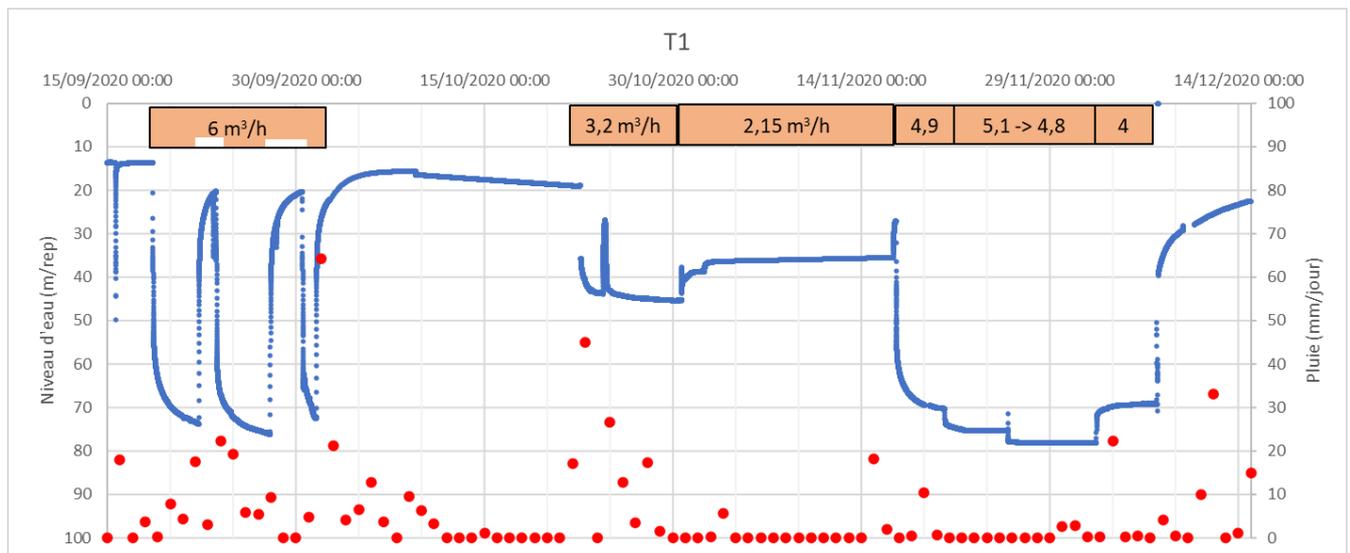


Figure 26 : Débit de pompage total

### 4.3.3. Résultats obtenus

#### 4.3.3.1. Forage T1 (Figure 27)

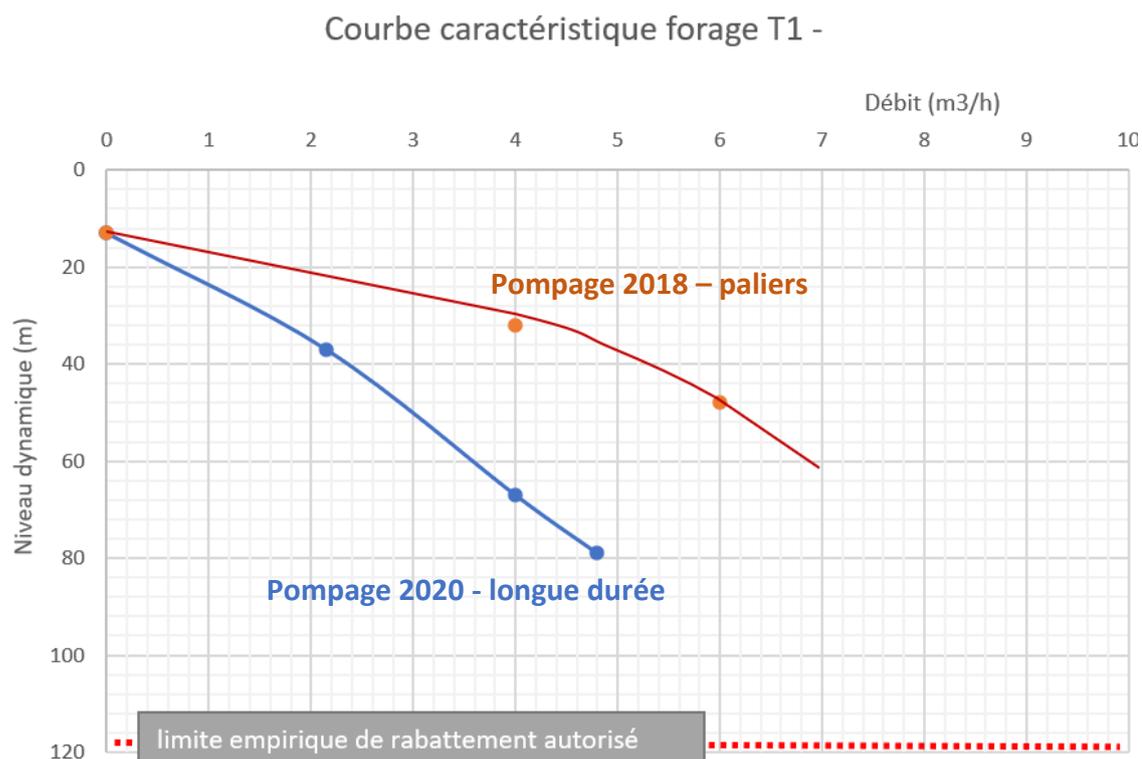


**Figure 27 : Suivi du niveau d'eau du T1 (en bleue), des précipitations (en rouge) et du débit indiqué en orange – en dynamique**

Comme on peut le constater sur ce diagramme de pompage les arrêts, les changements de débits, les différentes influences des autres pompages rendent la lecture peu aisée.

Avant d'entrer dans le détail, les informations suivantes peuvent être déduites :

- Pour chaque débit pompé on constate que la stabilisation se fait bien témoignant d'une bonne réalimentation ;
- **Courbes caractéristiques** : A partir des différents débits de pompage et en tenant compte de l'incidence des autres pompages nous avons pu tracer l'esquisse d'une courbe caractéristique (Figure 28). Nous y avons aussi ajouté en rouge la courbe tracée par le BE CAILLE (pompage 2018). Tracer cette courbe est importante, car elle permet de donner un débit maximum théorique d'exploitation. Pour cela, nous prenons en compte les paramètres suivants :
  - Débit critique : point d'inflexion majeur de la droite/courbe (non identifié pour cet ouvrage) ;
  - Limite empirique égal ou peu différent de 50% de la hauteur aquifère, soit  $240\text{m}/2 = 120\text{ m}$ .



**Figure 28 : Courbe caractéristique du T1**

La courbe initiale tracée à partir des tests de courte durée (2018) ne peut être utilisée en l'état, car il est important de travailler sur des données de pompage de longue durée permettant d'atteindre une pseudo-stabilisation intégrant également les effets cumulatifs des pompages sur les différents forages.

Cette courbe de 2020 nous permet de calculer un débit spécifique :  $Q/S = 0,07 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ , soit on en déduit une transmissivité  $T = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Le débit critique n'a pas été atteint, mais par extrapolation du niveau dynamique (jusqu'à 110 m) celui-ci pourrait être proche de  $6 \text{ m}^3/\text{h}$ .

- **Paramètres hydrodynamiques** : Pour calculer les paramètres hydrodynamiques d'un aquifère captif ou semi-captif, il est possible d'utiliser la méthode de Jacob. Elle permet de déterminer graphiquement la transmissivité de l'aquifère recoupé en représentant sur un graphique semi-logarithmique le rabattement en fonction du temps. La pente de la droite, ainsi obtenue, permet de calculer la transmissivité de l'aquifère à l'aide de la formule suivante :

$T$  : la transmissivité en  $\text{m}^2/\text{s}$

$Q$  : le débit en  $\text{m}^3/\text{s}$

$\Delta S$  : le rabattement en m entre deux cycles log

Cette méthode s'applique en régime transitoire et peut être utilisée sur la descente (début du pompage) et sur la remontée (arrêt du pompage).

Pour le graphique de la remontée, l'échelle temporelle est représentée par la formule «  $1+tp/tr$  », avec  $tp$  le temps total de pompage et  $tr$  le temps écoulé depuis l'arrêt des pompes. Ainsi, la courbe de remontée se lit de droite à gauche.

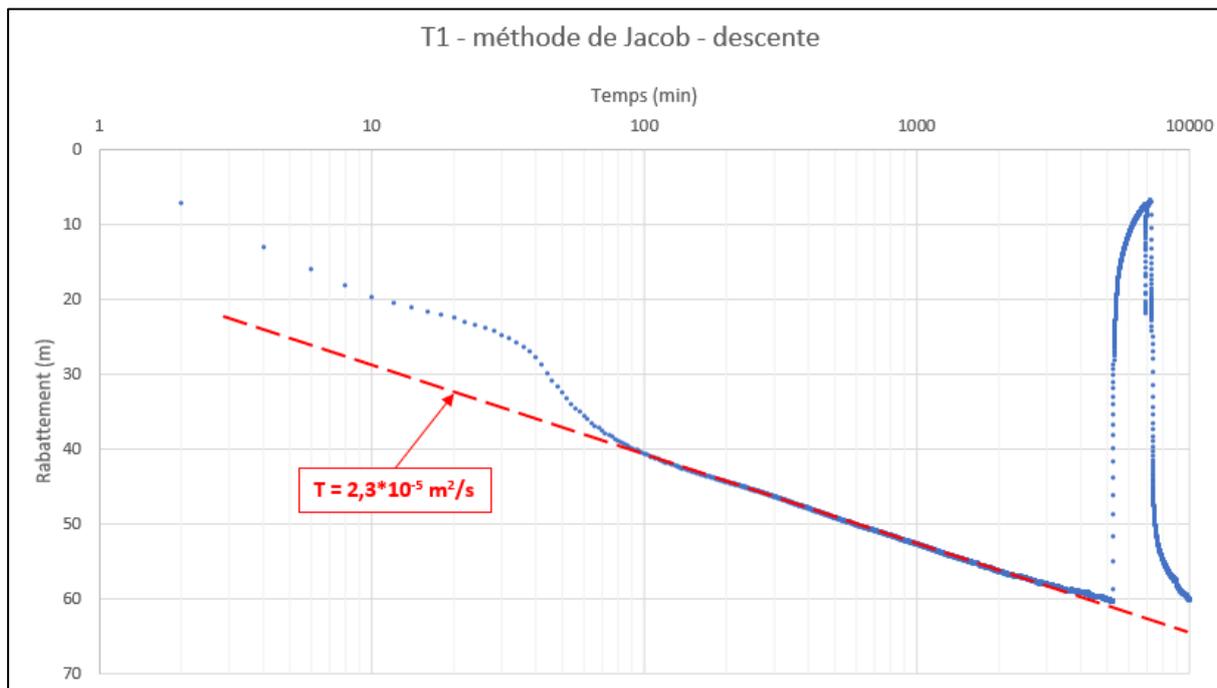


Figure 29 : Méthode de Jacob – courbe de descente

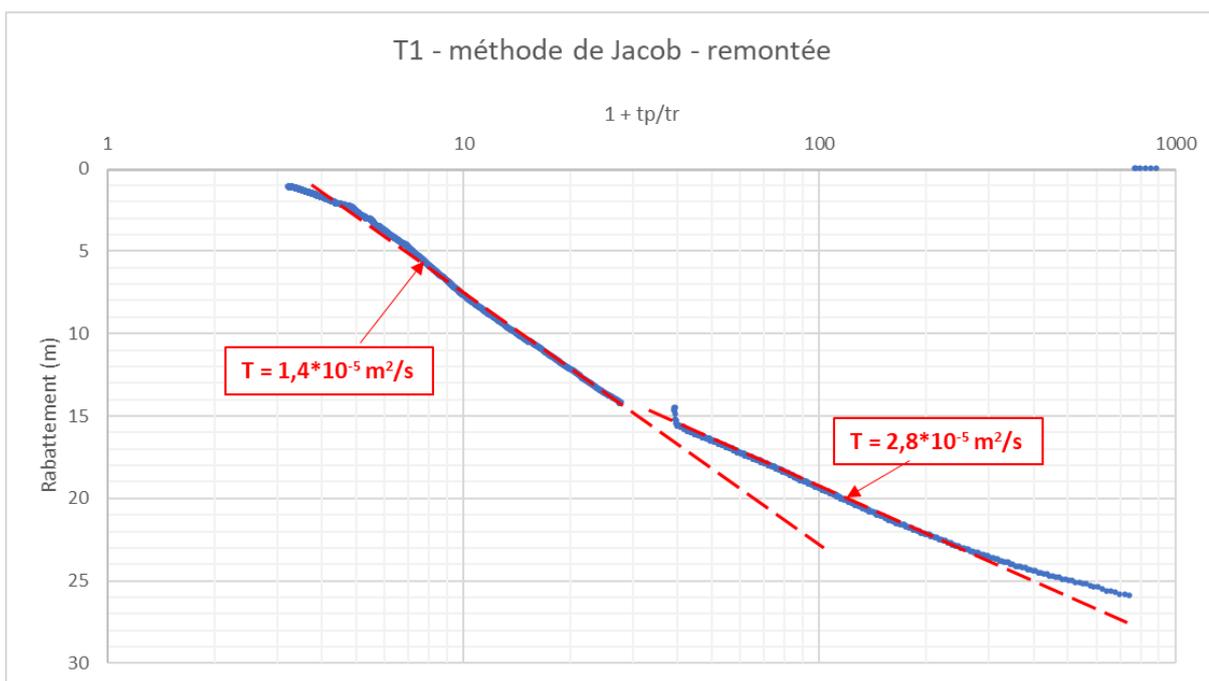


Figure 30 : Méthode de Jacob – courbe de remontée

La transmissivité calculée avec cette méthode est de  $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  à la descente et de  $2,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  à la remontée. Ces valeurs sont cohérentes avec celle calculée par équivalence au débit spécifique.

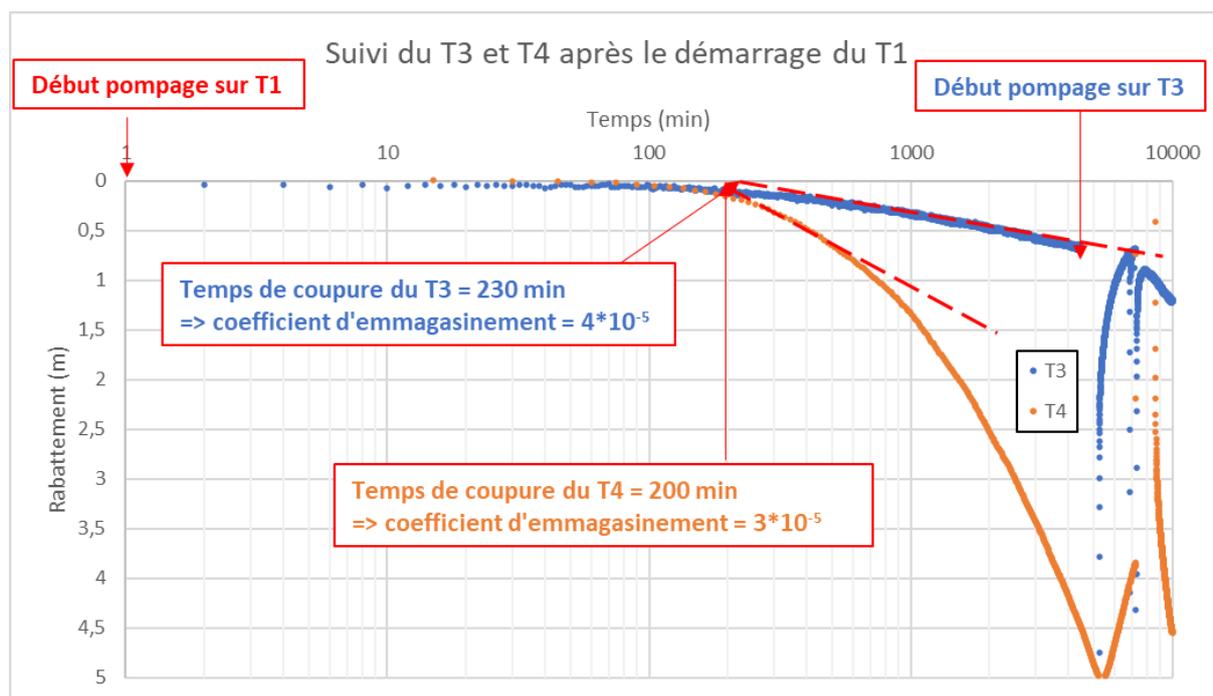
- **Influence sur les autres ouvrages** : Le pompage sur le T1 a généré une baisse du niveau d'eau au niveau de T4 et de T3 (le T2 n'a pas été impacté). La représentation de leur niveau d'eau sur un graphique semi-logarithmique permet de déterminer le coefficient

**d'emmagasinement** de l'aquifère capté (Figure 31). Ce paramètre traduit le pourcentage de volume d'eau obtenu pour une baisse de 1 m du niveau piézométrique. Les valeurs d'emmagasinement obtenus sont :

- ❖  $Coeff S (T1 \Rightarrow T4) = 2,25 T \cdot t_o / R^2 = 2.25 \cdot 2.5 \cdot 10^{-5} \cdot 200 \cdot 60 / 22500 = 3 \cdot 10^{-5} = 0,003\%$
- ❖  $Coeff S (T1 \Rightarrow T3) = 2,25 T \cdot t_o / R^2 = 2.25 \cdot 2.5 \cdot 10^{-5} \cdot 230 \cdot 60 / 22500 = 4 \cdot 10^{-5} = 0,004\%$

Ces valeurs sont totalement en accord avec un aquifère captif. La réaction du pompage se propage très rapidement au loin par une baisse de pression au sein de cet aquifère.

A noter que ces valeurs sont à interpréter avec précaution du fait de l'hétérogénéité du système aquifère. En effet, ces valeurs sont une moyenne obtenue entre le forage de pompage (T1) et les forages de contrôle (T3 et T4).



**Figure 31 : Suivi du niveau piézométrique sur le T3 et T4 après démarrage du T1**

- **Le rayon d'action** a été calculé dès le début du pompage par méthode graphique reliant la distance au forage et le rabattement mesuré sur le T3 et T4 (Figure 32). D'après ces données, le cône de rabattement induit par le pompage sur le T1 s'étend sur environ 300 m en direction du T4 et sur environ 150 m en direction du T3 ; valeurs non stabilisées et pouvant encore évoluer et augmenter. Cette différence s'explique par le fait que le milieu aquifère est hétérogène. Ainsi, le cône de rabattement du T1, pompant dans le compartiment aval se propage majoritairement au sein de ce même compartiment avec un impact plus limité sur les forages amont (T2 et T3).

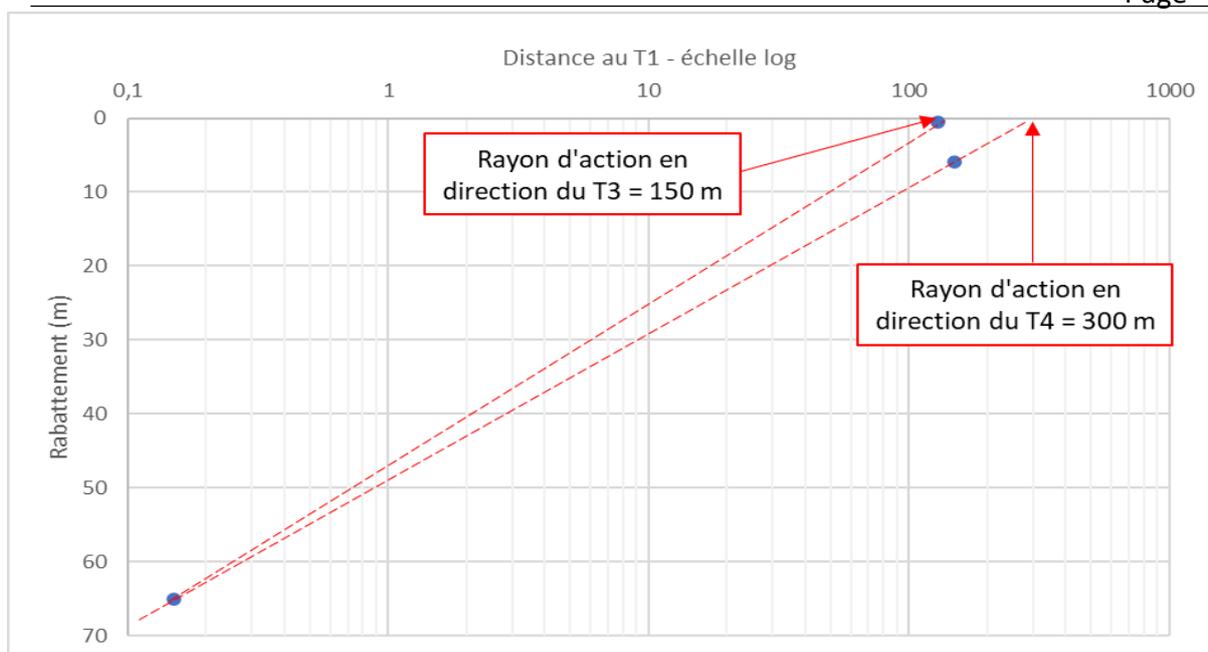


Figure 32 : Rayon d'action du T1

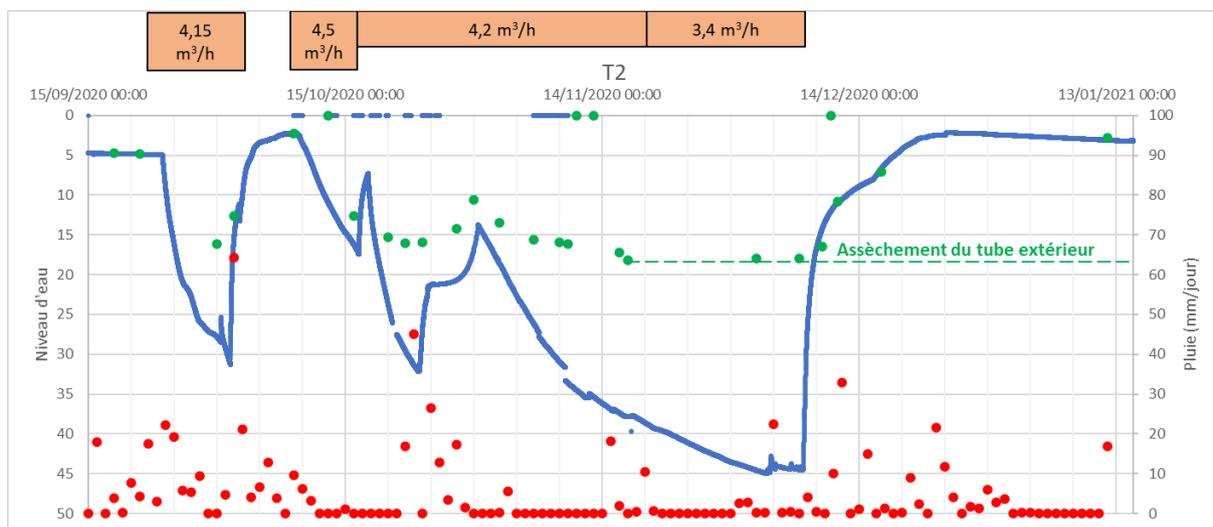
• **Les circulations d'eau en surface** au niveau du T1 ne sont pas (ou très peu) influencées par les prélèvements d'eau dans la nappe profonde. Les valeurs mesurées en cours de pompage sont résumées dans le Tableau 10. On constate au final que la valeur avant pompage de 3,32 est proche de celle mesurée juste avant l'arrêt de la pompe, 3 mois plus tard.

Tableau 10 : Mesures du niveau d'eau de la nappe de surface du T1 en pompage

Date	Niveau d'eau (m)
18/09/2020 (Mesure faite avant le démarrage du pompage)	3,32
21/09/2020	3,84
02/10/2020	3,32
09/10/2020	2,73
16/10/2020	3,18
20/10/2020	4,22
22/10/2020	2,88
24/10/2020	2,72
28/10/2020	4,37
30/10/2020	2,77
02/11/2020	3,79
06/11/2020	3,2
09/11/2020	3,39
10/11/2020	3,32
16/11/2020	3,27
17/11/2020	5,77
02/12/2020	5,8
07/12/2020 (avant l'arrêt du pompage)	3,72

### 4.3.3.2. Forage T2

Les données de pompage concernant ce forage sont portées sur la Figure 33. Il est nécessaire aussi de préciser que l'essai réalisé en 2017 par le BE CAILLE n'a pas permis d'atteindre un débit stabilisé. De 40 m<sup>3</sup>/h au départ, le débit a chuté de façon continue malgré la réduction du débit jusqu'à 6 m<sup>3</sup>/h. A partir de ce résultat, nous avons démarré à un débit inférieur. Comme le montre la Figure 33, on constate que l'on a une pseudo stabilisation au palier de 3.4 m<sup>3</sup>/h pendant une période sans précipitation et en pompant en simultanément sur les autres forages. Cette configuration peut correspondre à celle, qui est prévue lors de la mise en route de cet ensemble d'ouvrages par le syndicat.



**Figure 33 : Suivi du niveau d'eau du T2 (nappe de surface en vert et nappe profonde en bleue), des précipitations (en rouge) et du débit indiqué en abscisse**

L'effet des précipitations sur cet ouvrage est indéniable. En effet, entre le 22/10/2020 et le 03/11/2020, on enregistre 129,6 mm de pluie cumulée. La remontée du niveau de l'aquifère est estimée à environ 17 m par le prolongement graphique de la courbe avant l'influence des précipitations (Figure 34). Inversement, cette période de pluie n'avait eu aucune incidence notable sur T1. Ce battement n'était que de 4 m lors de la période de suivi avant pompage. Ce fonctionnement très particulier pourrait presque s'apparenter à un régime de type karstique. Comme si l'ouvrage réagissait rapidement à une mise en charge des calcaires provoquée par les fortes pluies.

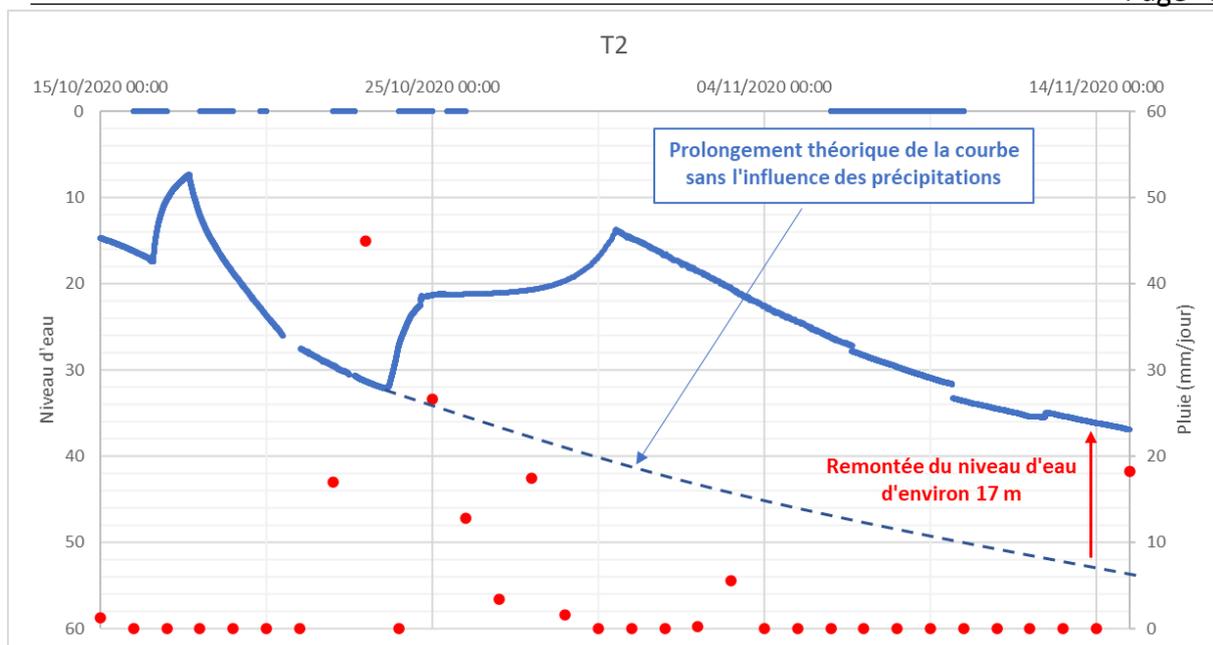


Figure 34 : Effet de la pluie du 22/10/2020 au 03/11/2020 sur le niveau d'eau du T2 en pompage

A partir de la seule donnée considérée comme pseudo-stabilisé, nous avons tracé une esquisse de courbe caractéristique (Figure 35).

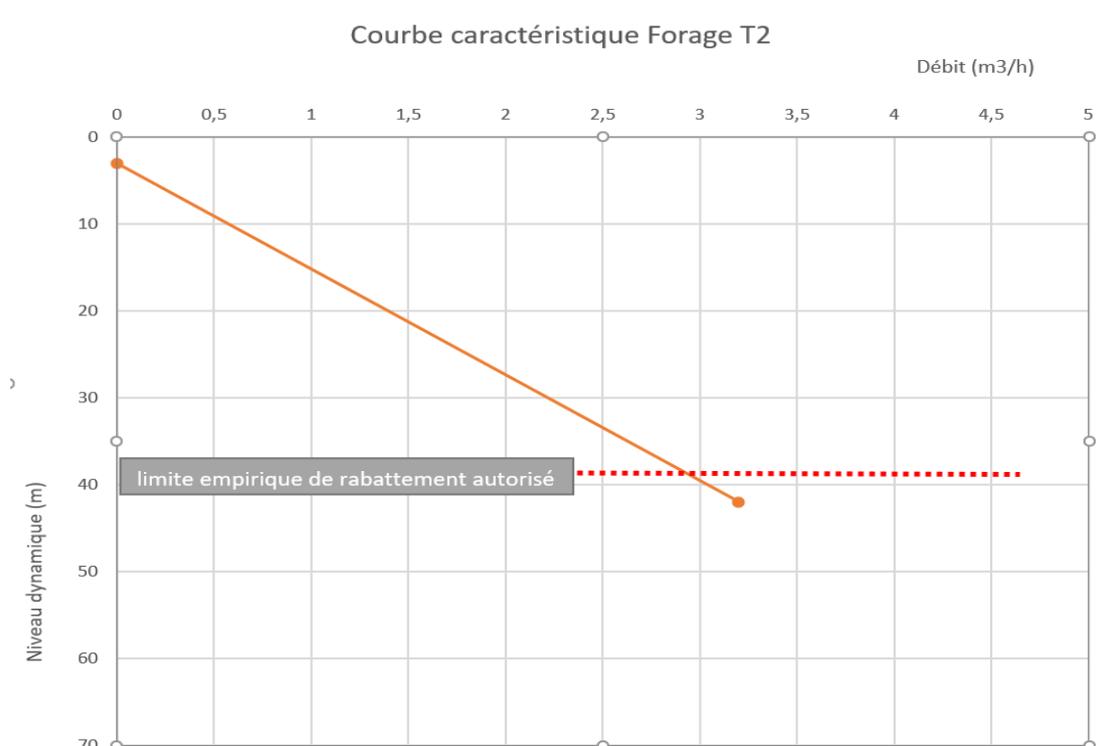


Figure 35 : Courbe caractéristique du forage T2

Si l'on considère un rabattement de 40 m à ce débit de 3,4 m<sup>3</sup>/h, on obtient un débit spécifique de 0,075m<sup>3</sup>/h/m, soit par équivalence une transmissivité de 2\*10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s.

Sans possibilité d'avoir un débit critique, on prendra un débit maximum de pompage de 4 m<sup>3</sup>/h dans le contexte des 4 ouvrages en pompage simultané.

Si l'on interprète les courbes de pompage à partir des équations de Theiss/Jacob dans la partie peu influencée par les pluies et les autres pompages (Figure 36 et Figure 37), il est possible d'obtenir une valeur de transmissivité voisine de  $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Ces résultats obtenus sont concordants entre eux et homogènes.

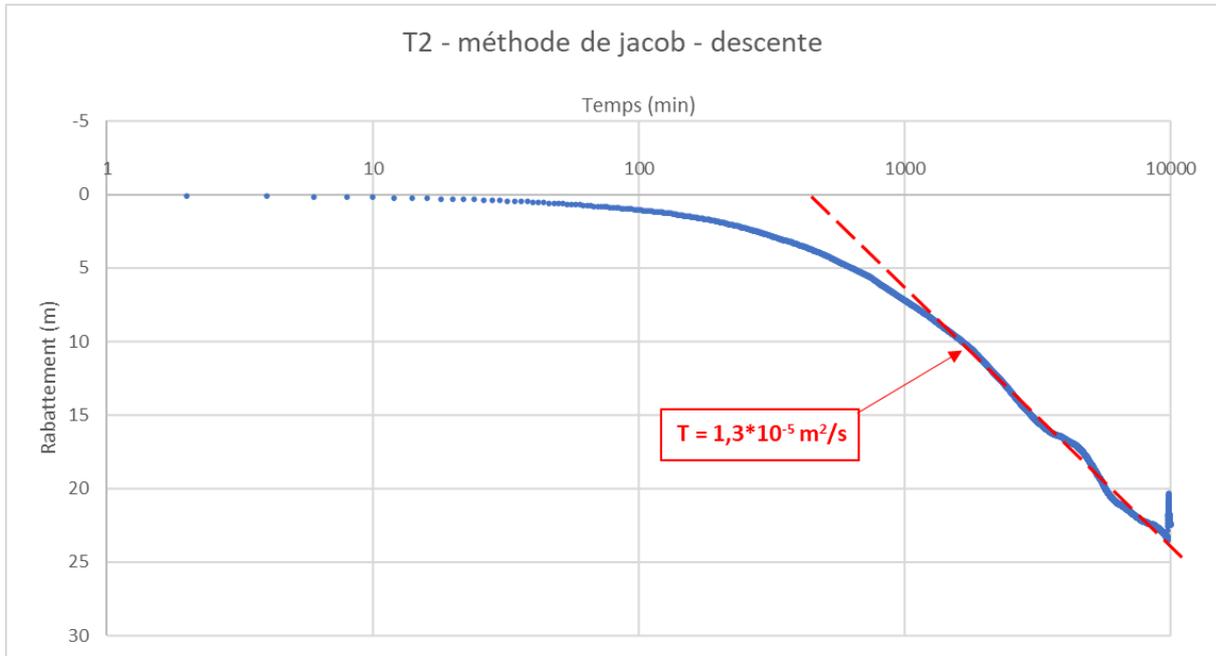


Figure 36 : Méthode de Jacob – courbe de descente du Forage T2

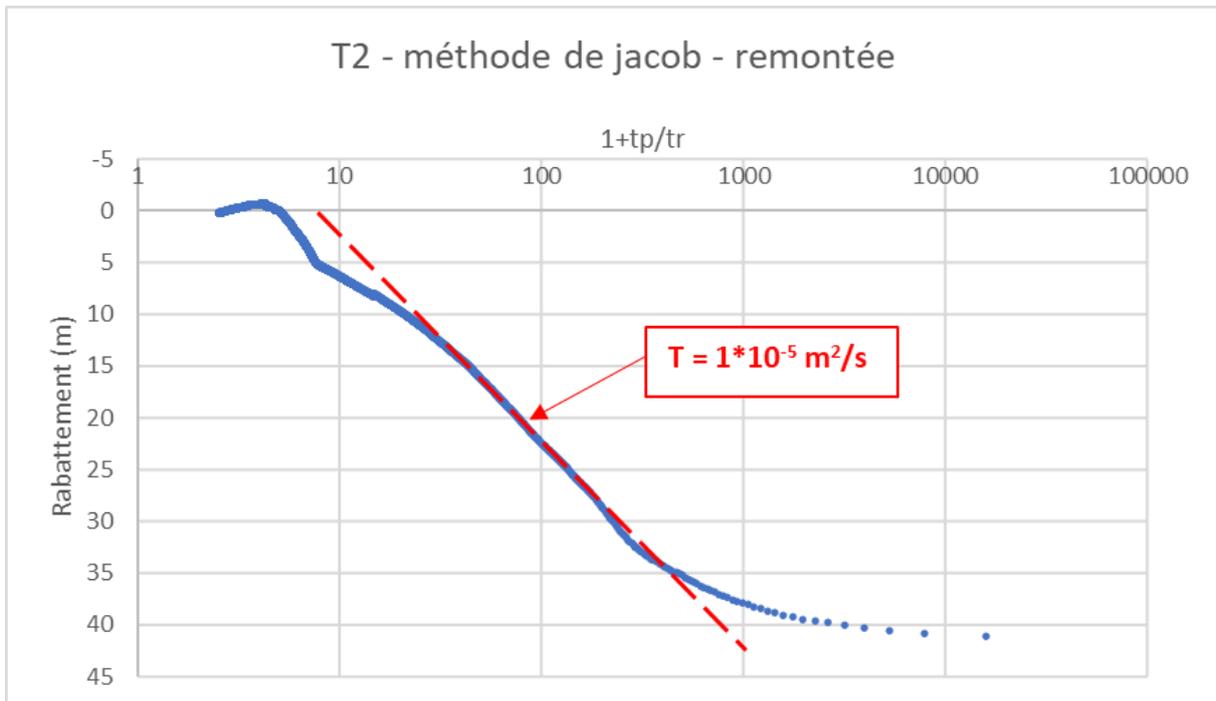
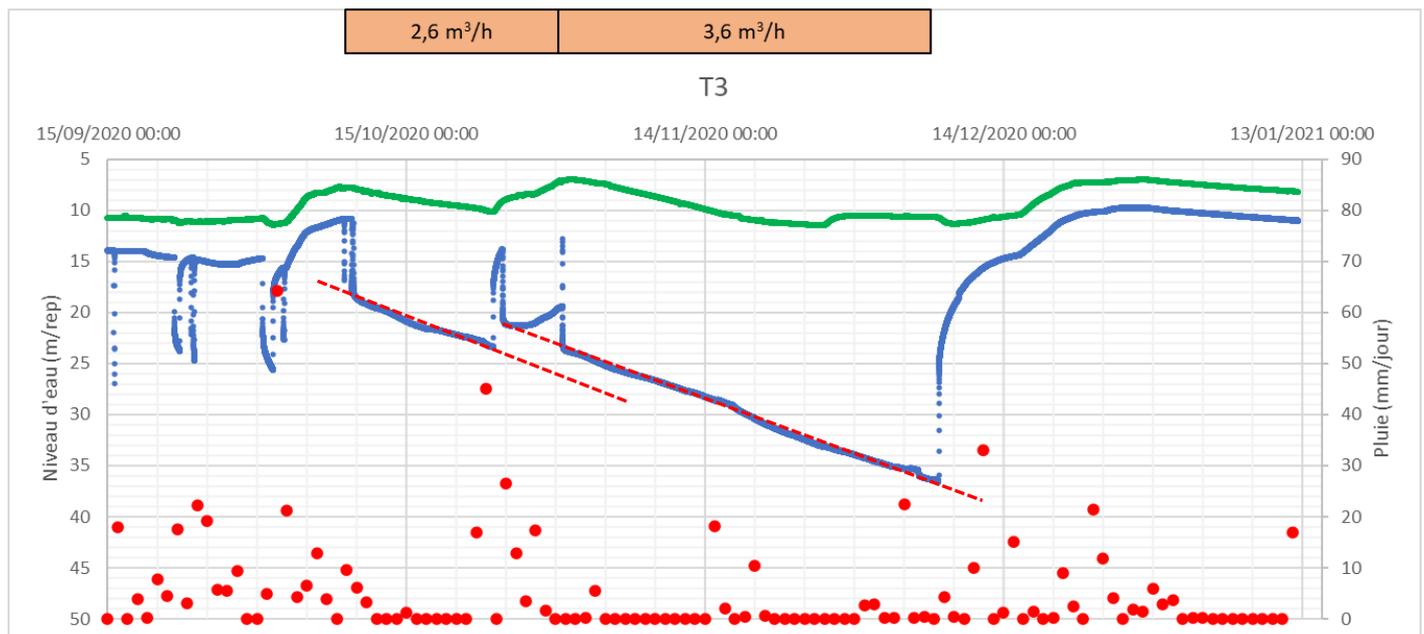


Figure 37 : Méthode de Jacob – courbe de remontée du forage T2

Pour ce qui concerne les circulations d'eau de surface après plus de 7 jours de pompage, on constate qu'elles ont été complètement asséchées à partir de la seconde moitié du mois de novembre. Lors de l'arrêt du pompage, la remontée du niveau d'eau de la nappe profonde a été temporairement au-dessus de celui de la nappe de surface avec une alimentation potentielle de la nappe profonde vers la nappe de surface (à proximité du T2).

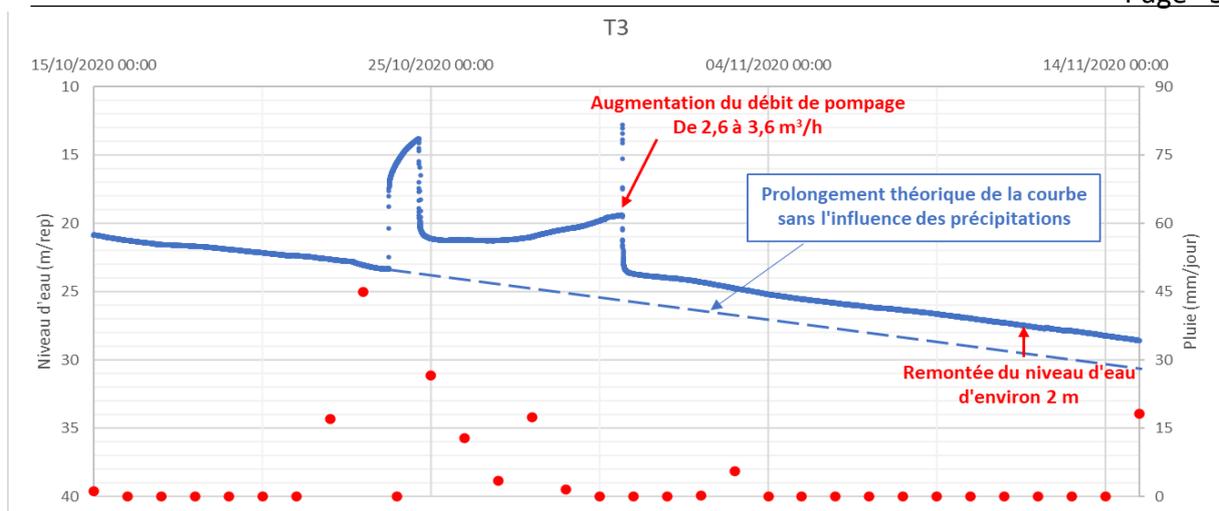
#### 4.3.3.3. Forage T3 (Figure 38)

La courbe de pompage est présentée à la Figure 38.



**Figure 38 : Suivi du niveau d'eau du T3 (nappe de surface en vert et nappe profonde en bleu), des précipitations (en rouge) et du débit indiqué en orange – en dynamique**

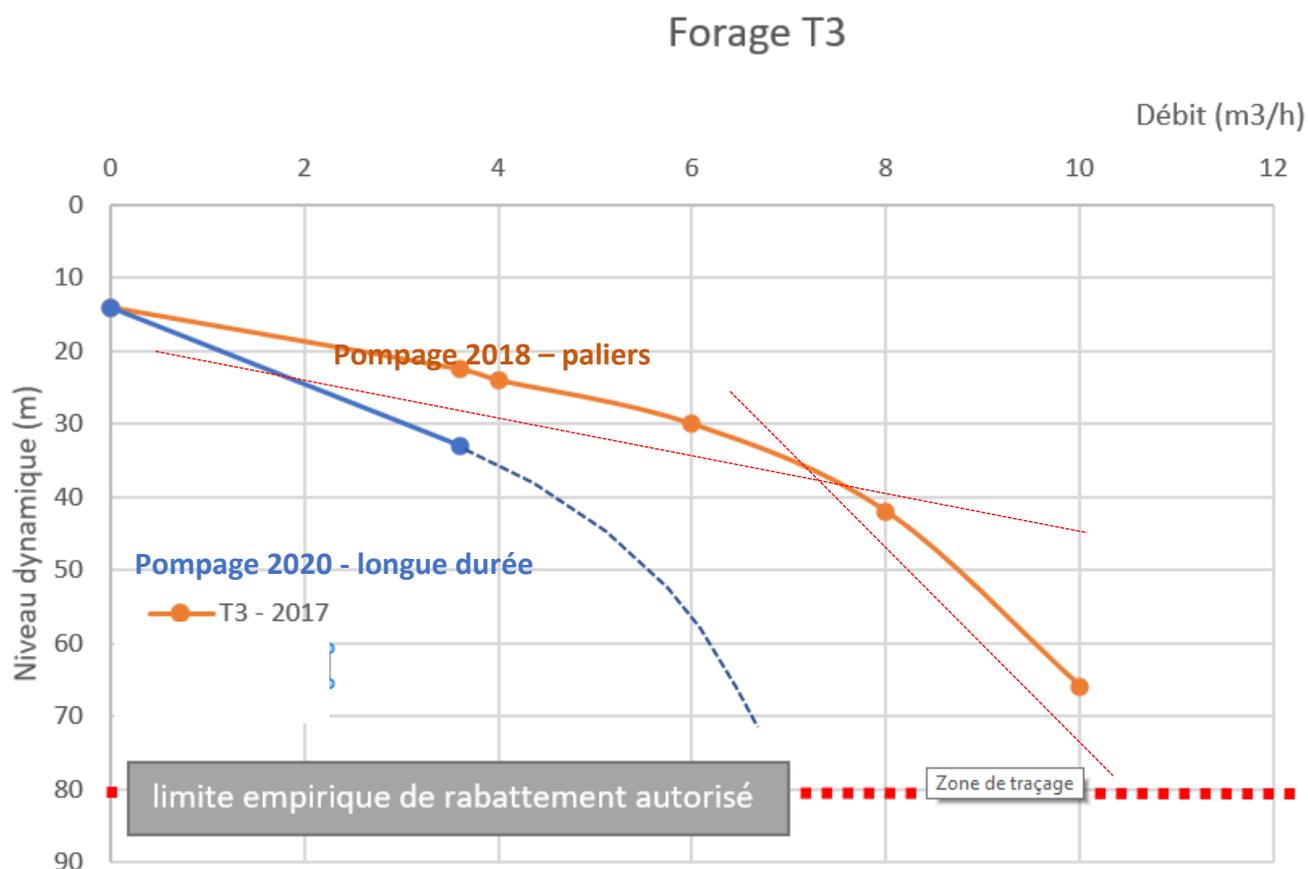
Sur cet ouvrage, nous avons pu pomper en continu pendant une longue période. Mais chose assez étonnante, le rabattement pour 3,6 m<sup>3</sup>/h est comparable à celui de 2,6 m<sup>3</sup>/h avec des pentes quasi identiques (en pointillé rouge). Est-ce en lien avec la période de pluie qui a causé une remontée de plus de 10m ? On peut le supposer et nous n'avons pas d'autres réponses évidentes à proposer.



**Figure 39 : Effet de la pluie du 22/10/2020 au 03/11/2020 sur le niveau d'eau du T3**

En ne conservant que cette valeur de 3,6 m<sup>3</sup>/h et en la reportant sur la Figure 40 et en y ajoutant aussi les données du BE CAILLE, on peut conclure :

- Que l'on distingue l'amorce d'un débit critique vers 7,5 m<sup>3</sup>/h (avec le pompage par paliers) ;
- Que le niveau dynamique autorisé en continu pourrait permettre un rabattement s'approchant de 6,5 m<sup>3</sup>/h, donc une augmentation de près de 3 m<sup>3</sup>/h par rapport au débit que nous avons pompé lors de cet essai. C'est une marge de manœuvre intéressante qu'il sera toutefois nécessaire de tester.
- Le débit spécifique pour 3.6 m<sup>3</sup>/h est de l'ordre de 0,1 m<sup>3</sup>/h/m, soit par équivalence une valeur de transmissivité de 3\*10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s.



**Figure 40 : Courbe caractéristique – Forage T3**

Si l'on interprète les courbes de pompage à partir de la méthode de Jacob durant la période peu influencée par les pluies et les autres pompages (Figure 41, Figure 42), il est possible de calculer une valeur de la transmissivité moyenne de  $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Ces résultats obtenus sont toujours concordants entre eux et homogènes.

Nous ne reviendrons pas sur les fluctuations des eaux de surface, que nous avons évoquées précédemment et pour lequel nous n'avons pas d'autres explications à proposer.

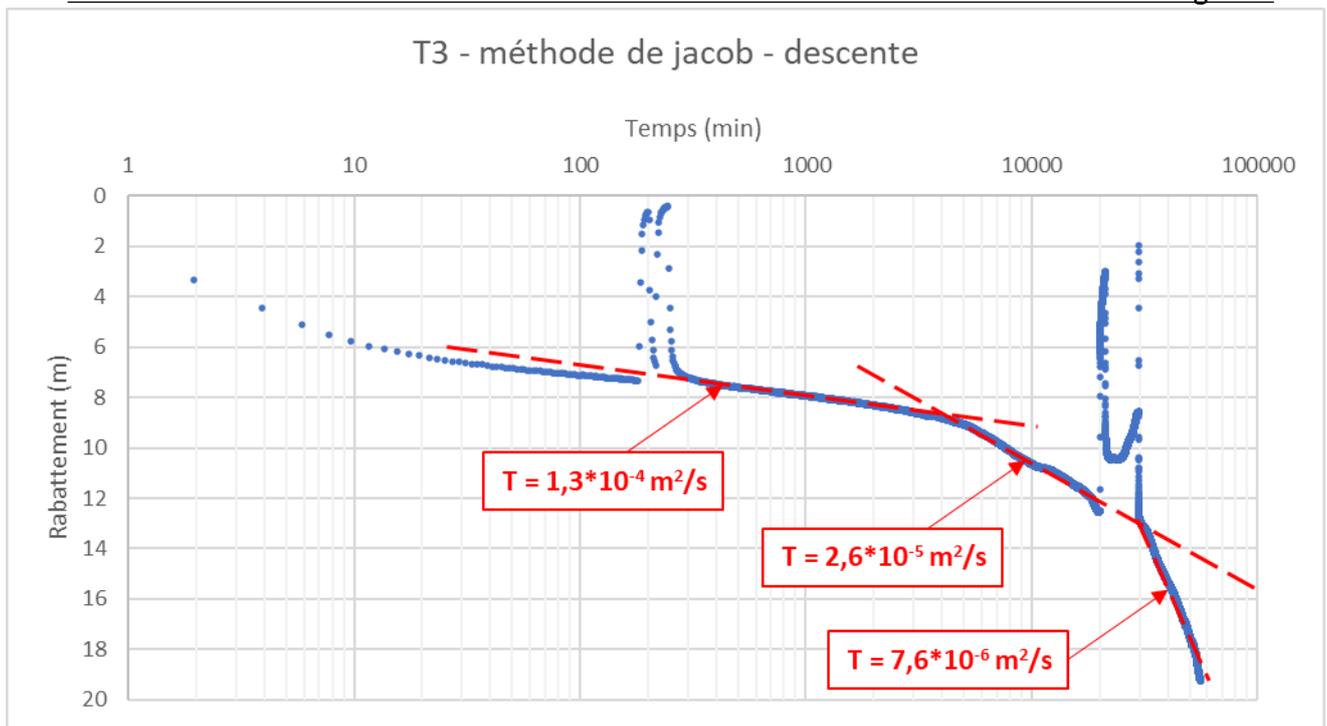


Figure 41 : Méthode de Jacob – courbe de descente forage T3

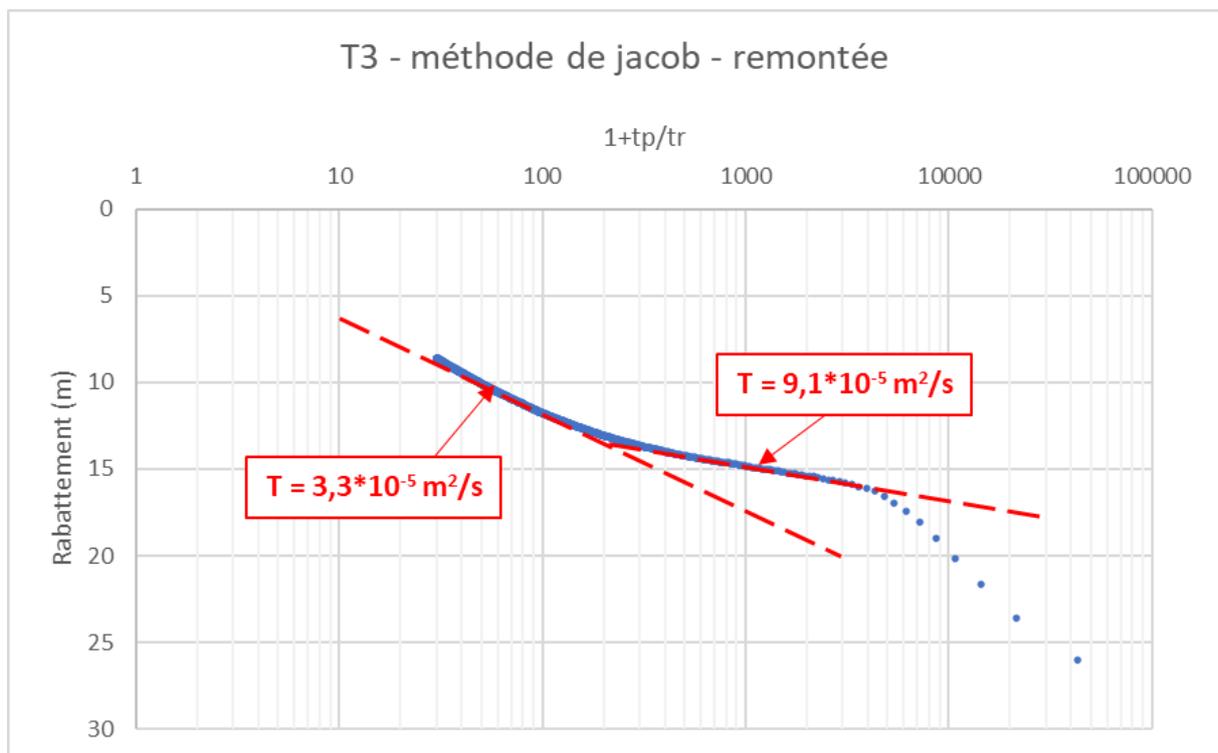
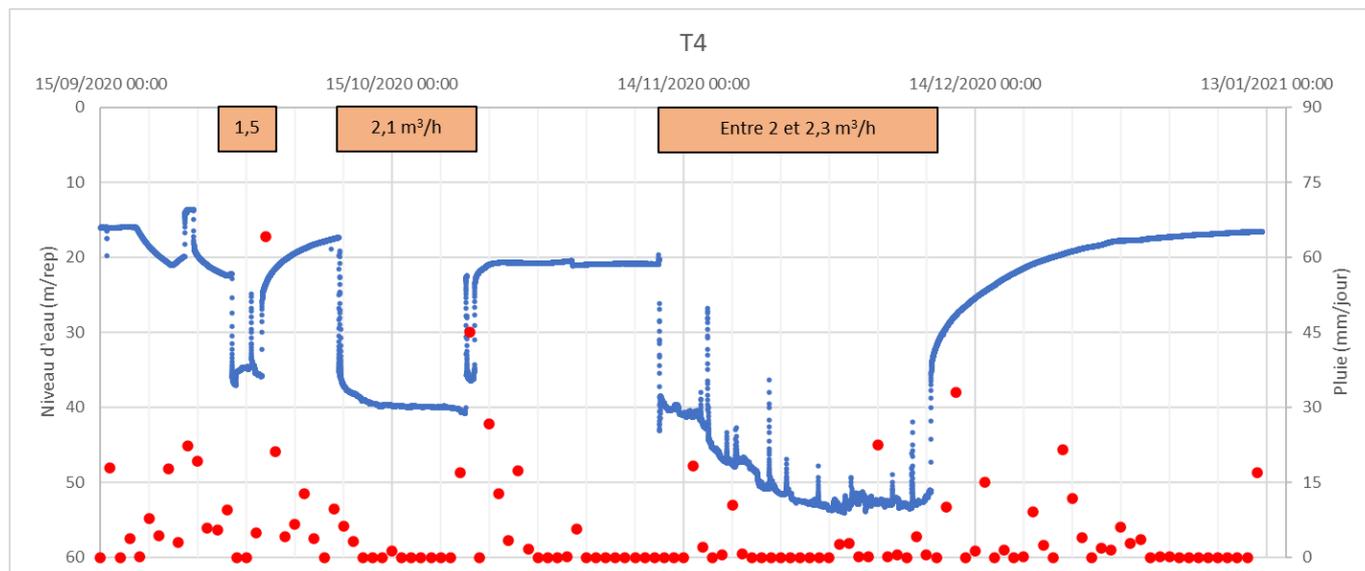


Figure 42 : Méthode de Jacob – courbe de remontée du forage T3

#### 4.3.3.4. Forage T4

La courbe de pompage est présentée à la Figure 43.



**Figure 43 : Suivi du niveau d'eau du T4 (nappe profonde en bleu), des précipitations (en rouge) et du débit indiqué en orange**

Ces données, si elles sont séparées des autres, c'est pour avoir une meilleure lisibilité, mais l'interprétation a été réalisée en tenant compte de l'ensemble des mesures.

Sur ce graphique, on constate que le palier à 2.1 m<sup>3</sup>/h montre une stabilisation, alors que T3 et T2 sont en pompage et donc peu influencé par ces ouvrages (T1 était à l'arrêt).

Par la suite entre 2 et 2,3 m<sup>3</sup>/h, le pompage sur T1 a été ajouté et le sur-rabatement est proche de 15 m (les petites oscillations de niveau sont liées aux fluctuations de débit). Ce sera cette valeur que nous allons faire ressortir dans la courbe caractéristique sur laquelle nous avons aussi reporté les données du BE CAILLE lors du pompage par paliers (Figure 44).

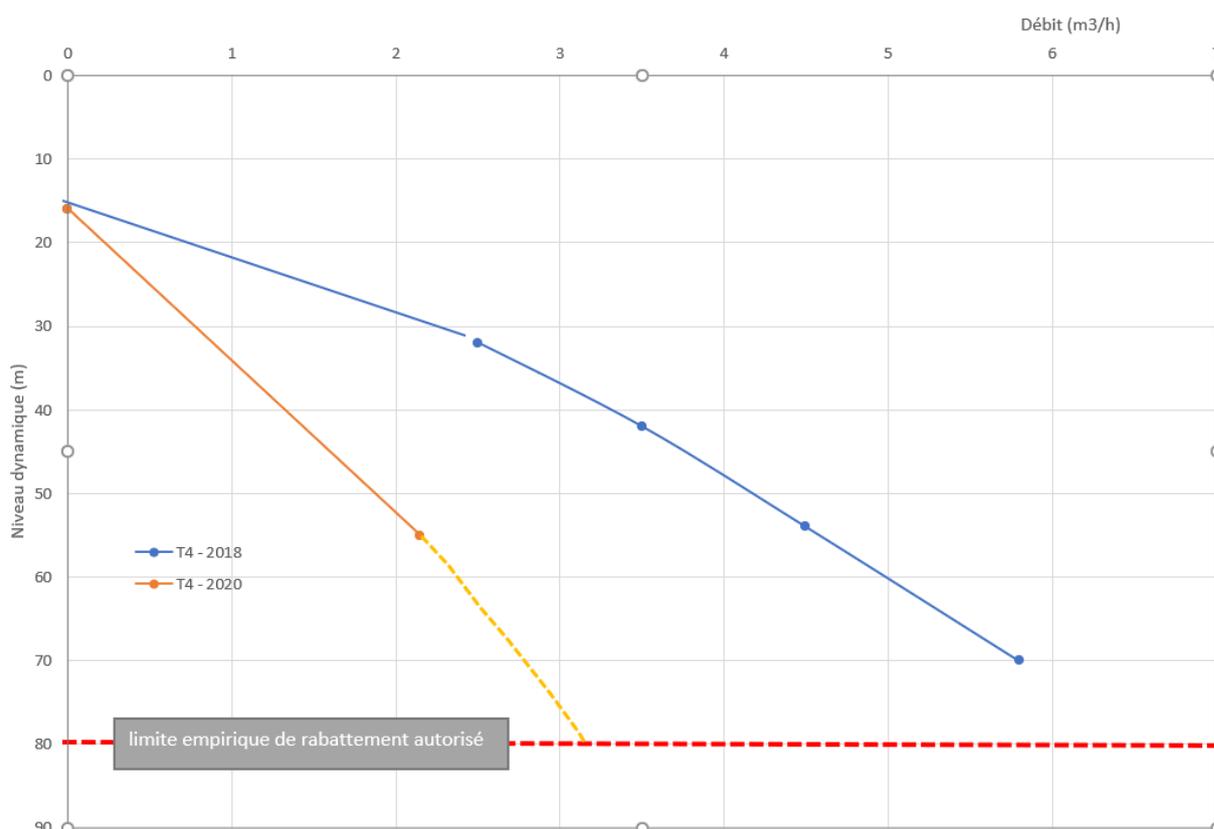


Figure 44 : Courbe caractéristique forage T4

Pour un débit de pompage régulier à 2,1 m³/h, le niveau dynamique apparait stabilisé avec un rabattement de 39 m, soit un débit spécifique de l'ordre de 0,06 m³/h/m, et une transmissivité équivalente d'environ  $1,6 \cdot 10^{-5}$  m²/s.

La méthode de Jacob permet à partir des courbes de descente et de remontée d'avoir des valeurs assez disparates entre elles et comprises entre  $7,9 \cdot 10^{-6}$  et  $3,5 \cdot 10^{-5}$  m²/s, mais du même ordre de grandeur que celles mesurées sur les autres forages.

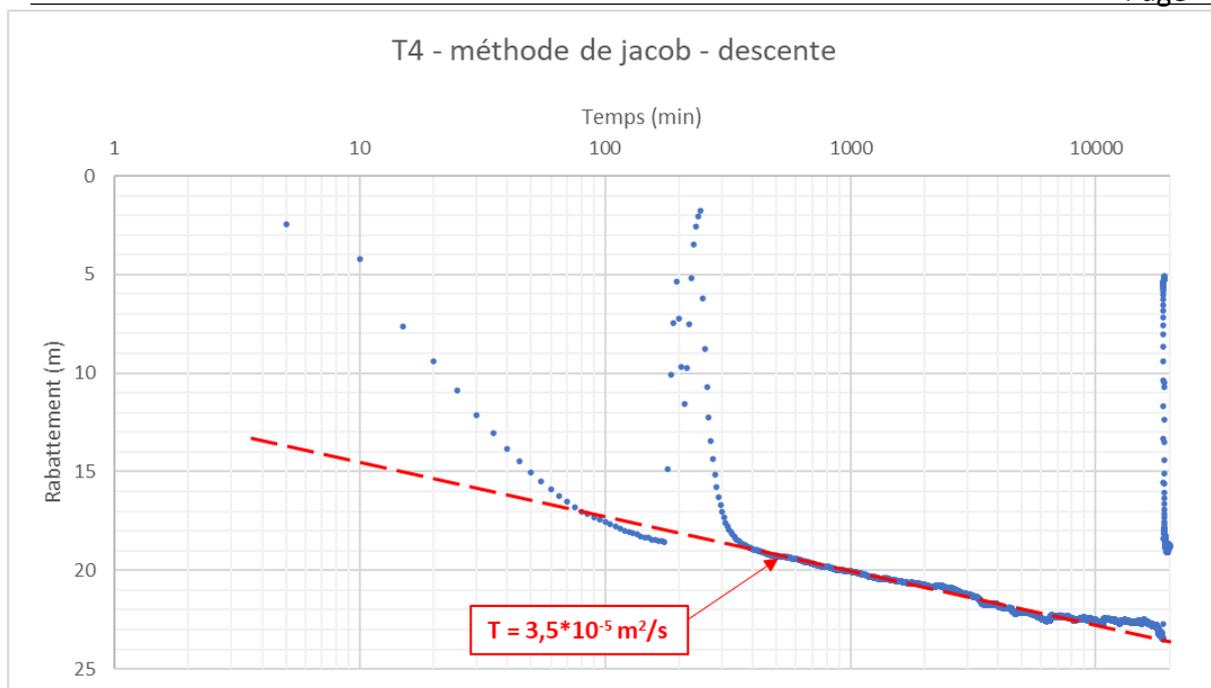


Figure 45 : Méthode de Jacob – courbe de descente du forage T4

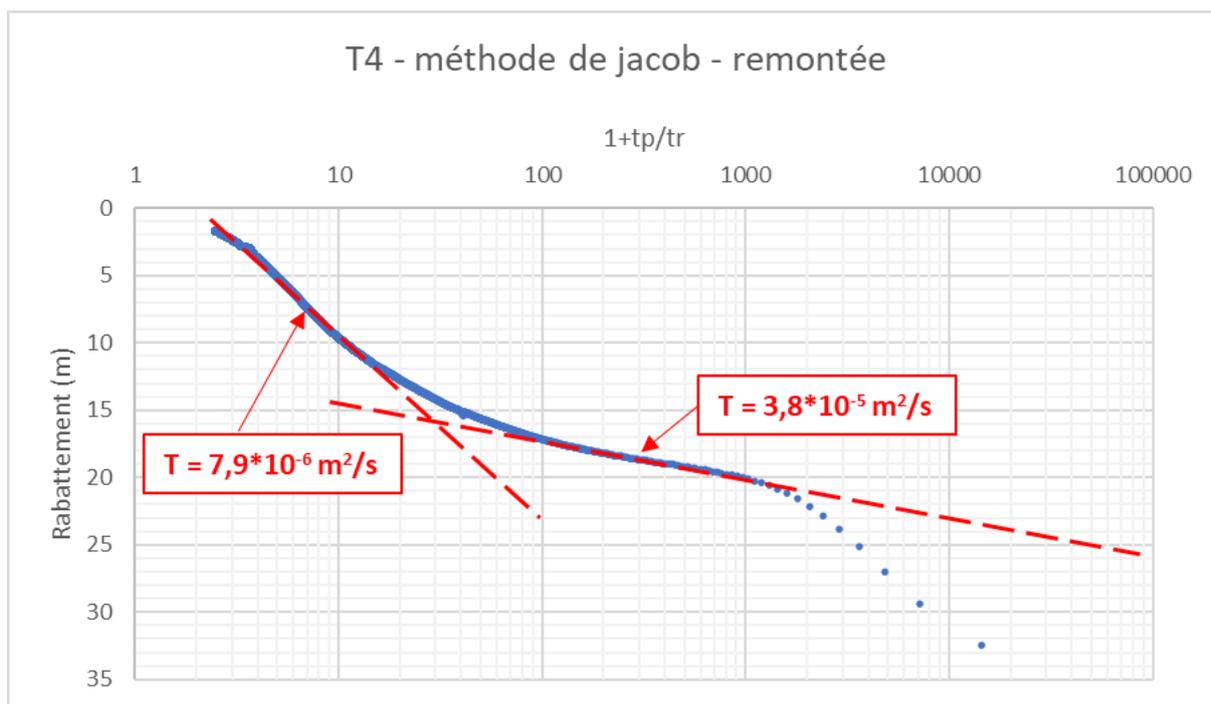


Figure 46 : Méthode de Jacob – courbe de remontée du forage T4

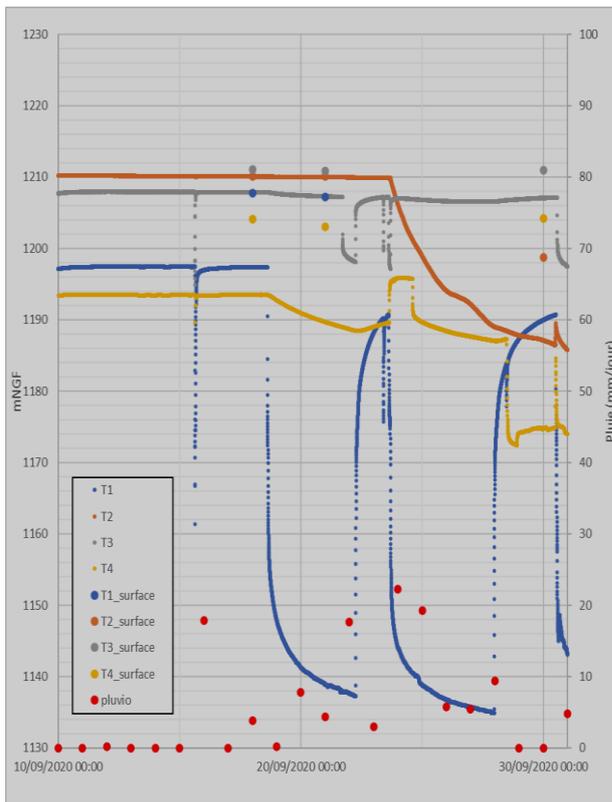
Les circulations d'eau de surface au niveau du T4 ne sont pas (ou très peu – non mesurable) influencées par les prélèvements d'eau dans la nappe profonde. Les valeurs mesurées, en cours de pompage, sont résumés dans le Tableau 11. D'après ces données, le niveau d'eau le plus bas mesuré est de 7,03 m, soit environ 1,7 m en-dessous de ce qui a été mesuré en statique. Cette profondeur est liée au prolongement de la période d'étiage, sans précipitations.

Tableau 11 : Mesures du niveau d'eau de la nappe de surface du T4 en pompage

Date	Niveau d'eau (m)
18/09/2020 (avant le démarrage du pompage)	5,37
21/09/2020	6,5
30/09/2020	5,23
02/10/2020	5,35
09/10/2020	4,44
16/10/2020	4,83
20/10/2020	4,88
22/10/2020	4,97
28/10/2020	4,33
30/10/2020	4,43
02/11/2020	4,64
06/11/2020	4,93
10/11/2020	5,18
11/11/2020	5,13
16/11/2020	5,48
17/11/2020	5,28
02/12/2020	7,03
10/12/2020 (Après l'arrêt du pompage)	6,3

#### 4.3.3.5. Relation entre forages

Nous avons déjà exposé que l'aquifère était compartimenté en deux grandes zones et qu'ils sont interdépendants, mais nous allons détailler de façon plus précise leurs relations. Cela a pour but de nous renseigner ensuite sur le mode d'exploitation future.



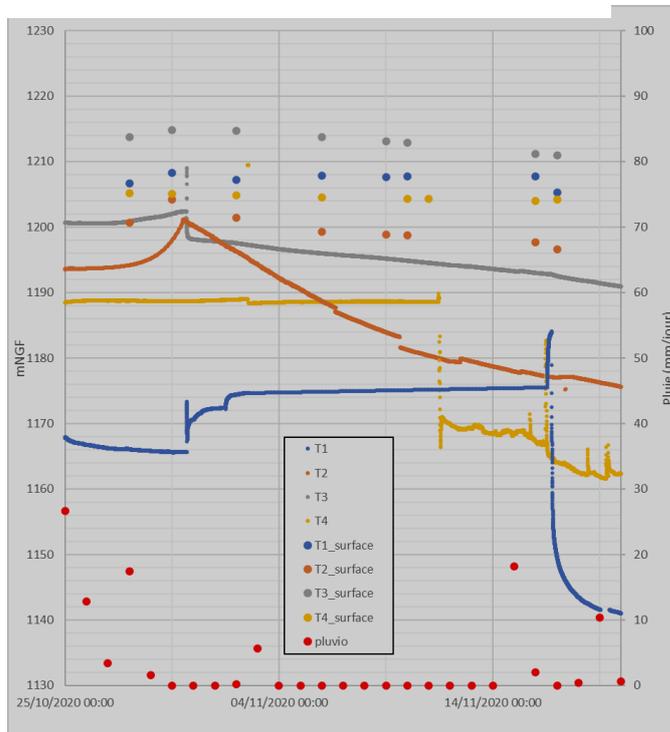
Les deux démarrages successifs du pompage sur T1 à 6m<sup>3</sup>/h entraînent une baisse de niveau :

- Insignifiante sur T2 ;
- De l'ordre de 0.5 m sur T3 ;
- De l'ordre de 8 à 10 m sur T4.

On observe aussi que le démarrage sur T2 qui se produit en même temps que le second démarrage sur T1 entraîne une baisse de niveau :

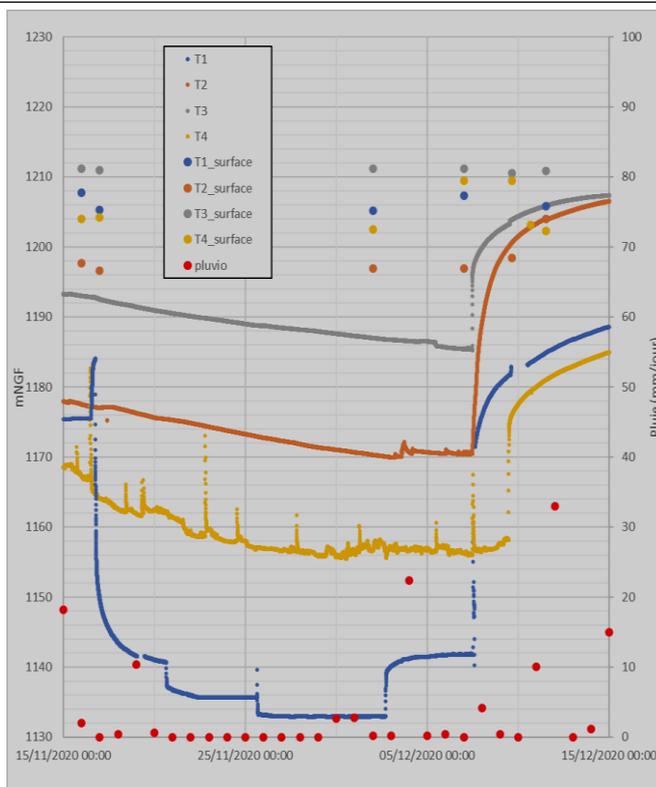
- Peu significative sur T3 (# 50 cm) ;
- Peu significative sur T4 ;
- Peu significative sur T1.

**Figure 47 : influence des pompes T1 – T2 sur les autres forages**



Les démarrages sur T2 et T3 en simultané n'impactent ni T1, ni T4.

**Figure 48 influence des pompes T2 et T3 sur les autres forages**



Le démarrage sur T1 à 5 m<sup>3</sup>/h entraîne une baisse de niveau :

- Non visible sur T2 ;
- Quelques 10<sup>aine</sup> de cm sur T3 ;
- Plus de 10 m sur T4.

Figure 49 : influence du pompage T1

Ces résultats ne font que confirmer que :

- Les forages T1 et T4 sont dépendants l'un de l'autre et qu'il faudra les considérer comme une sorte de couple de fonctionnement ;
- Le forage T3 et le forage T2 paraissent beaucoup plus autonomes et indépendants dans leur fonctionnement.

Il sera toutefois nécessaire de prolonger cette analyse au travers du suivi en continu, qu'il est prévu de mettre en place quand ces ouvrages seront mis en exploitation.

#### 4.3.3.6. Conclusions hydrodynamiques du pompage

Le comportement hydrogéologique en pompage confirme celui identifié en statique avec deux compartiments indépendants : les forages en amont hydrogéologique (T2 et T3) et les forages en aval (T1 et T4).

Concernant les circulations d'eau de surface, elles sont peu affectées par les pompes exceptés au niveau de la source Mermet, qui correspond toutefois à l'exutoire majeur de ces circulations.

L'ensemble des résultats est porté sur le Tableau 12.

**Tableau 12 : Récapitulatif des données des différents forages – en pompage**

	Compartiment Amont		Compartiment Aval	
	T2	T3	T1	T4
<b>Type de nappe</b>	Semi-captif	Semi-captif	Captif	Captif
<b>Débit de pompage (m<sup>3</sup>/h)</b>	Entre 2,7 et 4,5	Entre 2,6 et 3,6	Entre 2,15 et 6	Entre 2 et 2,3
<b>Transmissivité (m<sup>2</sup>/s)</b>	1,2*10 <sup>-5</sup>	2*10 <sup>-5</sup>	2*10 <sup>-5</sup>	1.5*10 <sup>-5</sup>
<b>Emmagasinement (%)</b>			0.03%	
<b>Rayon d'action (m)</b>			150/300	
<b>Dynamique aquifère</b>	Pas de stabilisation du niveau d'eau Vitesse de descente d'environ 0,5 m/jour	Pas de stabilisation du niveau d'eau Vitesse de descente d'environ 0,35 m/jour	Pseudo-stabilisation du niveau d'eau avec une vitesse de descente de 0.07 à 0.1m/J	Pseudo-stabilisation du niveau d'eau avec une vitesse de descente de 0.07 à 0.1m/J
<b>Recharge par les précipitations</b>	Très rapide	Rapide	Amortie	Amortie
<b>Impact sur les eaux superficielles</b>	Réaction avec baisse simultanée entre ouvrages mais pas sur les sources	Pour l'instant l'impact est majeur par la baisse de la source Mermet	Pas d'impact	Pas d'impact
<b>Débit d'exploitation moyen</b>	4	3	5	2.5
<b>Débit de pointe (Selon niveau dynamique)</b>	6	6 (Après test)	6	3

#### 4.3.3.7. Arrêt du pompage – recharge de la nappe

Le pompage a été arrêté le 07/12/2020 pour les forages T1, T2 et T3, puis le 09/12/2020 pour le T4.

L'ensemble des résultats est porté sur les différents diagrammes de la Figure 50.

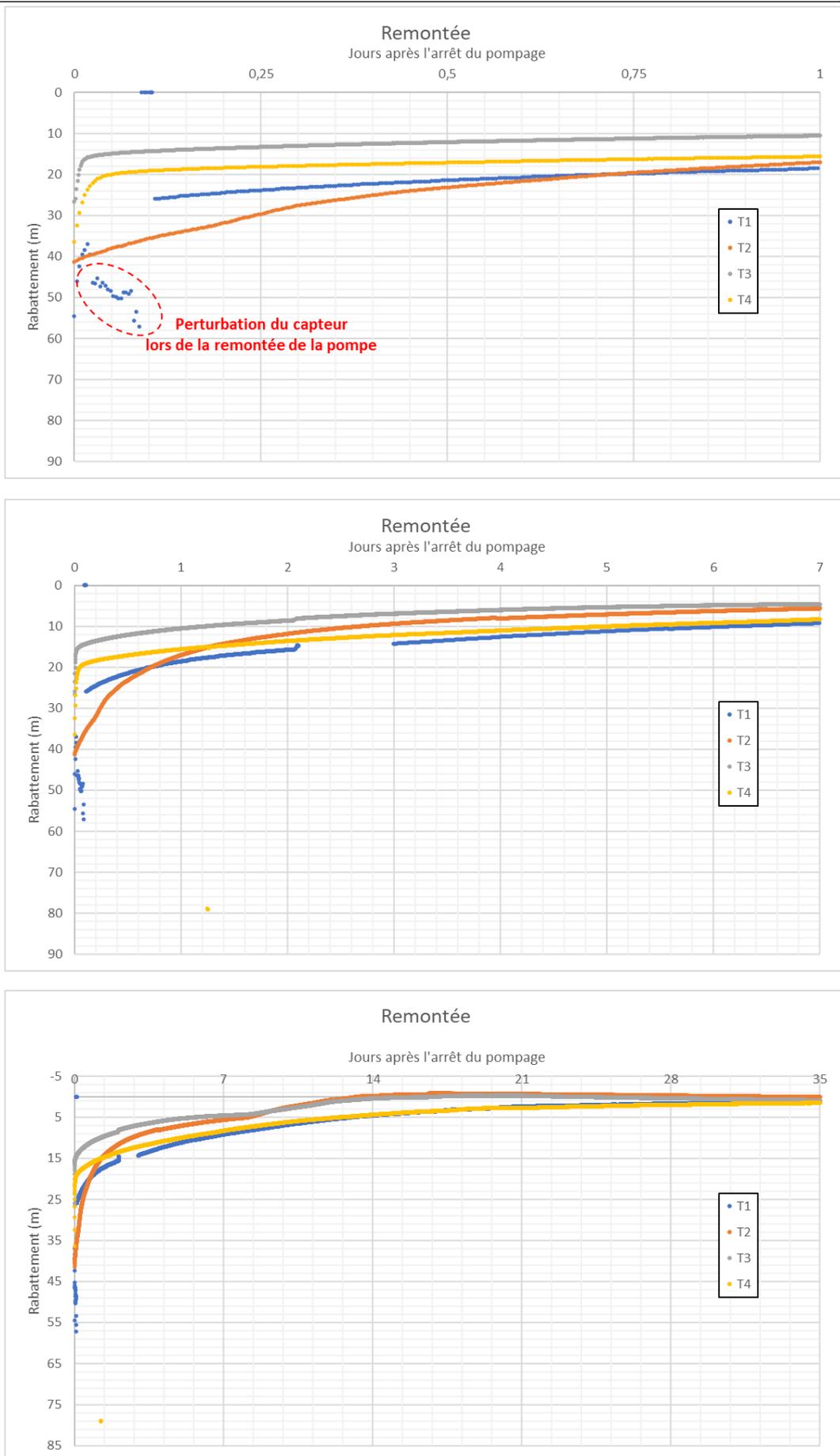


Figure 50 : Comparaison des courbes de remontée des différents forages

On peut représenter cette remontée par le modèle schématisé Figure 51.

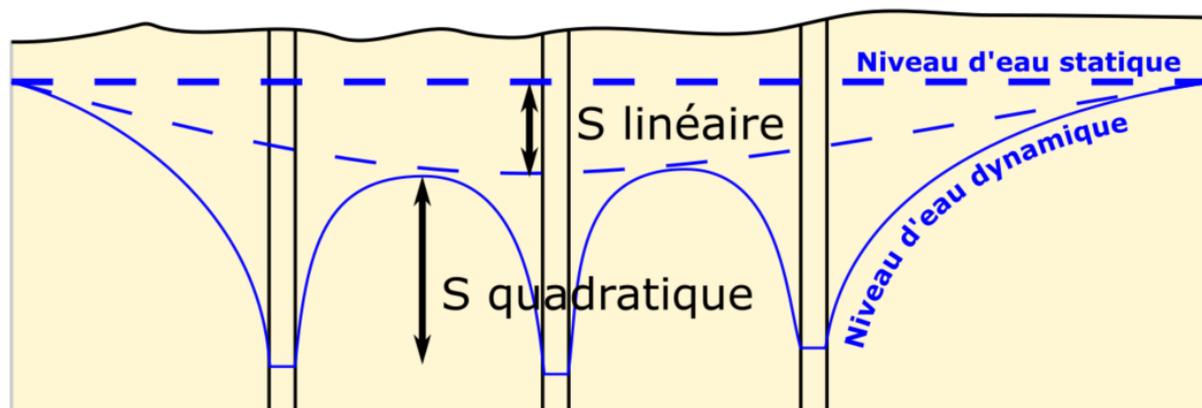


Figure 51 : Modèle schématisé de représentation de la remontée

Les remontées se font très rapidement par décompression (aquifère captif) excepté pour le forage T2, où elle est nettement plus progressive du fait d'un phénomène de capacité induit par la cavité recoupée par le forage, qui tamponne la remontée du niveau d'eau.

Lors de cette période de remontée on constate qu'il y a eu de fortes précipitations impactant de façon très différentes la remontée pour chacun des forages :

- Celles du 10 décembre et du 23 ne paraissent pas avoir eu d'incidence sur les 4 ouvrages ;
- Par contre, celles du 15 décembre relativement plus faibles en intensité est bien marquée uniquement sur T2 et T3.

On peut supposer que les précipitations se sont faites en partie sous forme de neige avec une réalimentation en partie stockée et différée.

Le Tableau 13 décrit les principales valeurs de rabattement résiduel en début de remontée.

Tableau 13 : Tableau comparatif des rabattements résiduels après l'arrêt du pompage d'essai

	T1	T2	T3	T4
Rabattement en fin de pompage	54,5 m	41,4 m	26,6 m	36,3 m
1 heure après l'arrêt du pompage	25,9 m (2heures30 après l'arrêt du pompage)	28,5 m	15 m	20,3 m
1 jour après l'arrêt du pompage	18,5 m	17 m	10,5 m	15,6 m
1 semaine après l'arrêt du pompage	9,2 m	5,6 m	4,6	8,3 m

Après 8 jours de remontée, la pente s'accélère pour le T2 et T3 (compartiment amont) en lien avec la recharge de l'aquifère. Ainsi, après 11 jours sans pompage, le niveau statique de l'aquifère a été dépassé.

Pour les forages du compartiment aval (T1 et T4), la remontée de la pente s'accélère après environ 21 jours, du fait du déphasage du signal de recharge pour ces forages. Le niveau statique sera retrouvé après environ 28 jours en lien avec une augmentation des précipitations.

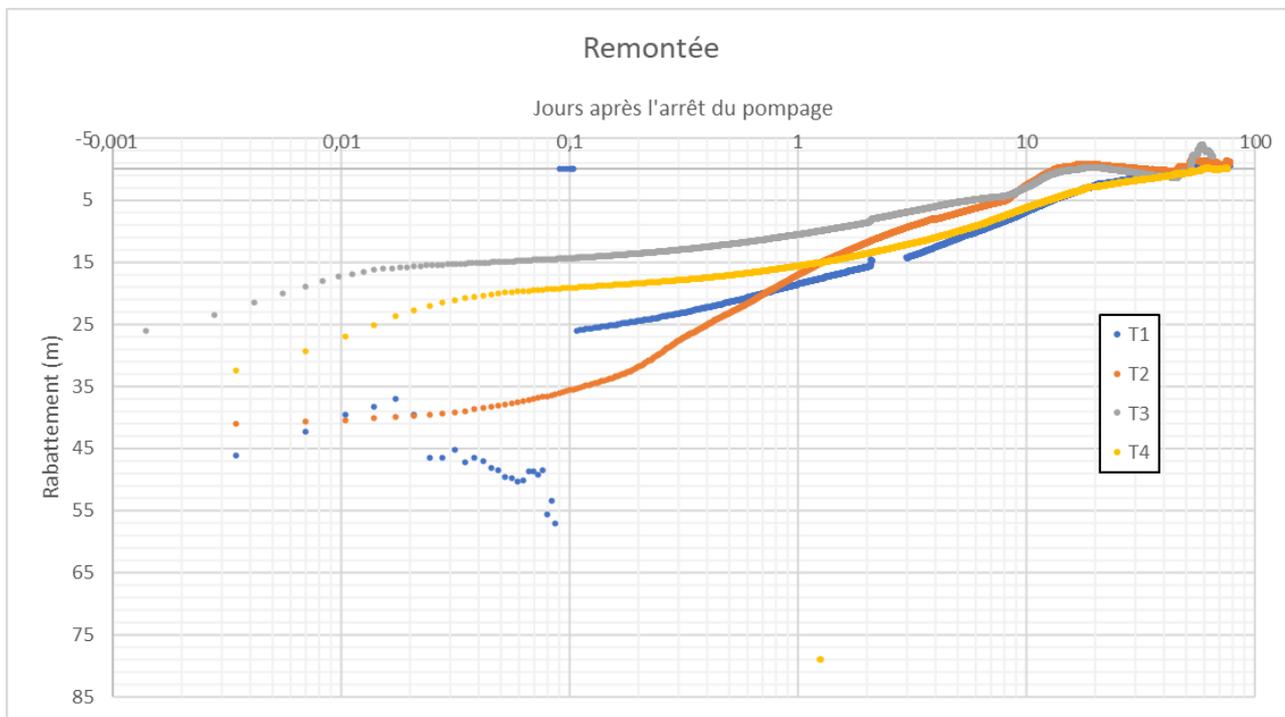
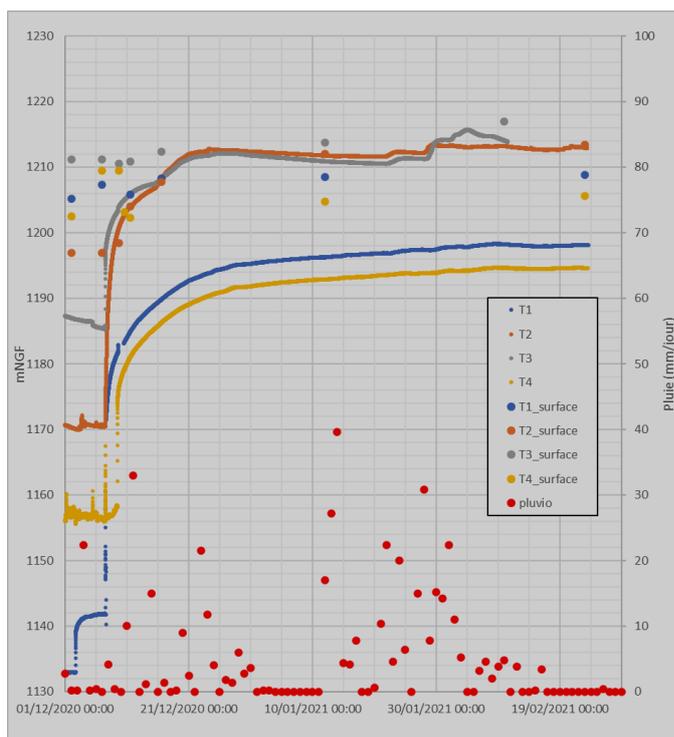


Figure 52 : Suivi du niveau d'eau durant la remontée sur les forages (semi-log)



Sur cette figure, on constate bien que les fortes pluies n'impactent pas la remontée de T1 et T4.

Pour T2 et T3, le niveau remonte puis commence à baisser à partir du 21 janvier (vidange). Ensuite, il recommence à monter par à coups sans lien direct avec les précipitations, dont on sait qu'une partie était sous forme de neige. Ces deux ouvrages sont donc très sensibles à la façon dont se fait la recharge : pluie – neige- infiltration par le ruisseau au niveau de la perte.

#### 4.4. D'un point de vue physico-chimique

##### 4.4.1. Résultats des analyses en laboratoire

Les données de départ avant pompage et datant de décembre 2017 sont résumées dans le Tableau 14. Elles peuvent correspondre à un mélange entre les eaux superficielles (de façon réduite) et celles majoritaires provenant de la nappe des grés miocènes. Les cellules identifiées en bleu et vert illustrent les principaux éléments chimiques, qui différencient qualitativement l'eau du « compartiment amont » du « compartiment aval ». En rouge est souligné la valeur élevée du manganèse pour le T2, qui correspond aussi aux fortes valeurs identifiées dans la tourbière Durrafourg.

**Tableau 14 : Principaux résultats de la chimie des eaux des forages**

	Unité	Talonard 1	Talonard 2	Talonard 3	Talonard 4
Conductivité	µS/cm	350	275	283	405
pH		8	7,75	7,99	7,81
Turbidité	NTU	0.3	25	0.19	0.19
Hydrogénocarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/l	231	176	178	262
Calcium	mg/l	26,9	50,1	42,9	46,7
Chlorures	mg/l	0,6	0,7	0,6	0,7
Magnésium	mg/l	29,36	4,13	9,54	23,08
Potassium	mg/l	0,6	<0,5	0,6	0,8
Sodium	mg/l	3,6	1,7	1,8	2,9
Sulfates	mg/l	6	2	3,7	5,1
Nitrates	mg/l	0,1	1,6	1,1	< 0,5
Fer	µg/l	<10	<10	<10	<10
Manganèse	µg/l	<10	201	<10	<10

Une analyse de première adduction a été effectuée en décembre 2016 sur le forage T1 (Prélèvement N°00074334). L'eau a été déclarée conforme aux limites de qualité en vigueur pour l'ensemble des paramètres mesurés.

Pour les 3 autres forages T2 – T3 – T4, il a été analysé en décembre 2017 un certain nombre d'autres paramètres (Ref. 00077933 – 77958 – 78152) concluant à chaque fois à une

eau conforme pour les paramètres analysés. Seul, le T2 montrait une turbidité élevée (voir explication plus avant) et du manganèse. Ce dépassement peut être comparé aux valeurs très fortes en manganèse trouvée sur la Tourbière Durrafourg proche du forage T2, dont l'isolation avec les eaux de surface n'avait pas encore été réalisée à cette époque.

Lors du pompage de 2020, il a été fait des analyses assez similaires sur les autres points d'eau (Tableau 15).

**Tableau 15 : Principaux résultats de la chimie des eaux des autres points d'eau**

	Unité	Tourbière Nord	Tourbière Dur.	Regard Dur.	Source Mermet
<b>Conductivité</b>	<b>µS/cm</b>	314	292	332	273
<b>Calcium</b>	<b>mg/l</b>	57	63	46	52
<b>Chlorures</b>	<b>mg/l</b>	1.5	1	1,6	1
<b>Magnésium</b>	<b>mg/l</b>	3.9	1.5	4.5	1.8
<b>Potassium</b>	<b>mg/l</b>	0.8	0.9	0,6	0,8
<b>Sodium</b>	<b>mg/l</b>	1.9	1.1	4.5	1.2
<b>Sulfates</b>	<b>mg/l</b>	3.1	3.4	2.7	2,1
<b>Nitrates</b>	<b>mg/l</b>	0,92	1,6	2	0.81
<b>Fer</b>	<b>µg/l</b>	39	720	36	1
<b>Manganèse</b>	<b>µg/l</b>	5.5	1500	11	3

Nous avons reporté ces données sur un digramme de PIPER en utilisant le logiciel de Roland SIMLER (Laboratoire d'hydrogéologie - Université d'Avignon).

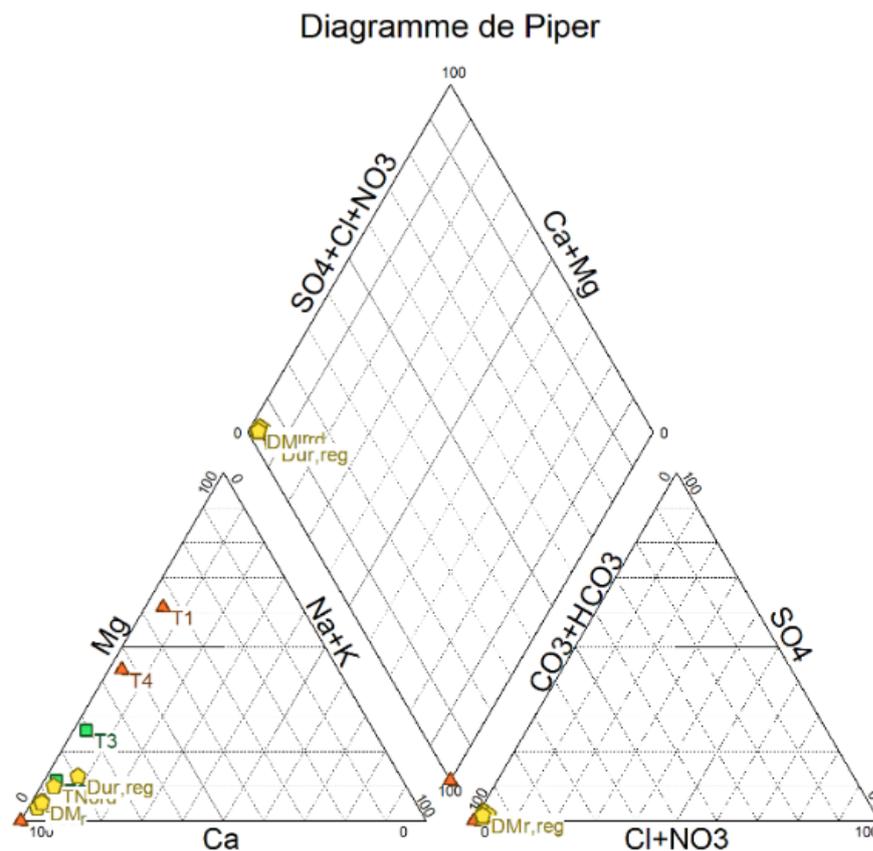


Figure 53 : représentation de la chimie des points d'eau sur la zone Talonard

#### 4.4.2. Interprétations

Au vu des résultats ci-avant, les premières conclusions sont les suivantes :

➤ **Concernant les forages :**

- Toutes les eaux sont de type bicarbonaté calcique ;
- On distingue toutefois nettement une évolution des eaux des forages T3, T4 et T1 vers un pôle magnésien qui pourrait correspondre à un temps de transit plus ou moins long pendant lequel s'effectuerait des échanges de base (Ca par Mg), échanges associés à une dissolution des carbonates ;
- D'un point de vue de la conductivité, on peut séparer les forages T1 et T4 dont les conductivités sont comprises entre 350 et 400  $\mu\text{s}/\text{cm}$  des forages T2 et T3 qui ont des valeurs plus faibles et comprises entre 250 et 300  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Cette minéralisation plus forte nous conforte vis-à-vis de ce temps de circulation plus long au sein d'un grès très cimenté donnant ainsi ces eaux au faciès bicarbonaté calcique ;
- Les autres ions majeurs sont en quantité insignifiante ;
- Le forage T2 (décembre 2017) donne une valeur de turbidité dépassant la norme de qualité. Lors du pompage en continu pendant l'automne 2020, nous n'avons pas constaté d'anomalie. Sachant qu'il y a une zone de fracture entre 52 et 55 m, qui peut fournir des argiles et alimenter cette turbidité. Il a été décidé que

lors de l'équipement final, cet ouvrage serait tubé et gravillonné avec un sable siliceux calibré 1-2.5mm.

➤ **Concernant les tourbières et sources :**

- Toutes ces eaux sont aussi de facies bicarbonaté calcique, exceptée la tourbière sud dans sa partie distale ;
- On note la présence de fer et manganèse spécialement au niveau de la tourbière Durrafourg - manganèse que l'on a retrouvé au niveau du forage T4 avant qu'il ne soit tubé.
- L'eau de la source du Pré Reverchon n'a pas été analysée, car pendant toute la période de notre étude elle a été soit sèche, soit avec un débit extrêmement réduit (quelques litres/h). Les données inscrites ci-dessous dans le CR du BE CAILLE (Tableau 16) montrent aussi que les débits sont faibles avec un maximum de 1,9 m<sup>3</sup>/h le 27 septembre, puis passant à zéro 15 jours plus tard montrant ainsi sa très faible réserve.

**Tableau 16 : Suivi de la source Pré-Reverchon en 2018**

Source Pré Reverchon		
13/09/2018	0,75	m3/h
17/09/2018	0,23	m3/h
19/09/2018	0,62	m3/h
27/09/2018	1,9	m3/h
04/10/2018	1,3	m3/h
08/10/2018	0	m3/h
10/10/2018	0,57	m3/h
17/10/2018	0	m3/h
19/10/2018	0	m3/h
08/11/2018	3,6	m3/h
27/11/2018	1,8	m3/h



Figure 54 : Bac de répartition Pré Reverchon

### 4.4.3. Suivi en long de certains paramètres

#### 4.4.3.1. Généralités

Pendant la durée de l'étude nous avons pu effectuer des mesures de suivi en semi-continu des deux paramètres suivants : conductivité et température.

#### 4.4.3.2. Données sur les forages

##### ➤ Mesures manuelles de suivi en continu

Les données insérées dans le Tableau 17 : sont assez stables pour chaque forage et montrent bien les

**Tableau 17 : mesures de terrain**

date/forage	T1		T2		T3		T4	
	cond	temp	cond	temp	cond	temp	cond	temp
01/11/2016	350,00							
01/11/2017			275,00		283,00		405,00	
Décembre 2017	350		275		283		405	
06/11/2020	410,00	9,70	320,00	9,00	260,00	8,90		
10/11/2020	410,00	9,00			270,00		390,00	8,50
21/11/2020	380,00	8,40	340,00	8,40	270,00	8,20	410,00	8,60
25/11/2020	380,00		330,00	8,50	270,00	8,00	410,00	8,10
30/11/2020	370,00	8,10	340,00	7,40	280,00	6,90	400,00	8,20
2/12/20	370,00		360,00		280,00		390,00	
Moyenne terrain	378	9	320	8	275	8	345	8,35
Valeur labo	350		275		283		405	
<b>Moyenne générale</b>	<b>364</b>		<b>297</b>		<b>279</b>		<b>375</b>	

Pour les conductivités les moyennes des différentes analyses montrent que les eaux des forages T1 et T4 ont une minéralisation proche de 80 $\mu$ s/cm supérieure à celles des forages T2 et T3.

Concernant la température les forages nous les avons reportés en fonction de leur profondeur (Figure 55). Plusieurs conclusions peuvent en être tirées :

- Les forages T3 et T2 qui ont des températures similaires mais des profondeurs différentes ont une alimentation provenant en partie des calcaires crétacés de façon latérale sans qu'intervienne la profondeur
- Les forages T1 et T4 s'alignent avec un gradient de 0,8°C/100m soit bien inférieur au gradient géothermique moyen qui est de 3°C/100m. La aussi on

peut suspecter une alimentation par les calcaires avec toutefois une participation de la profondeur.

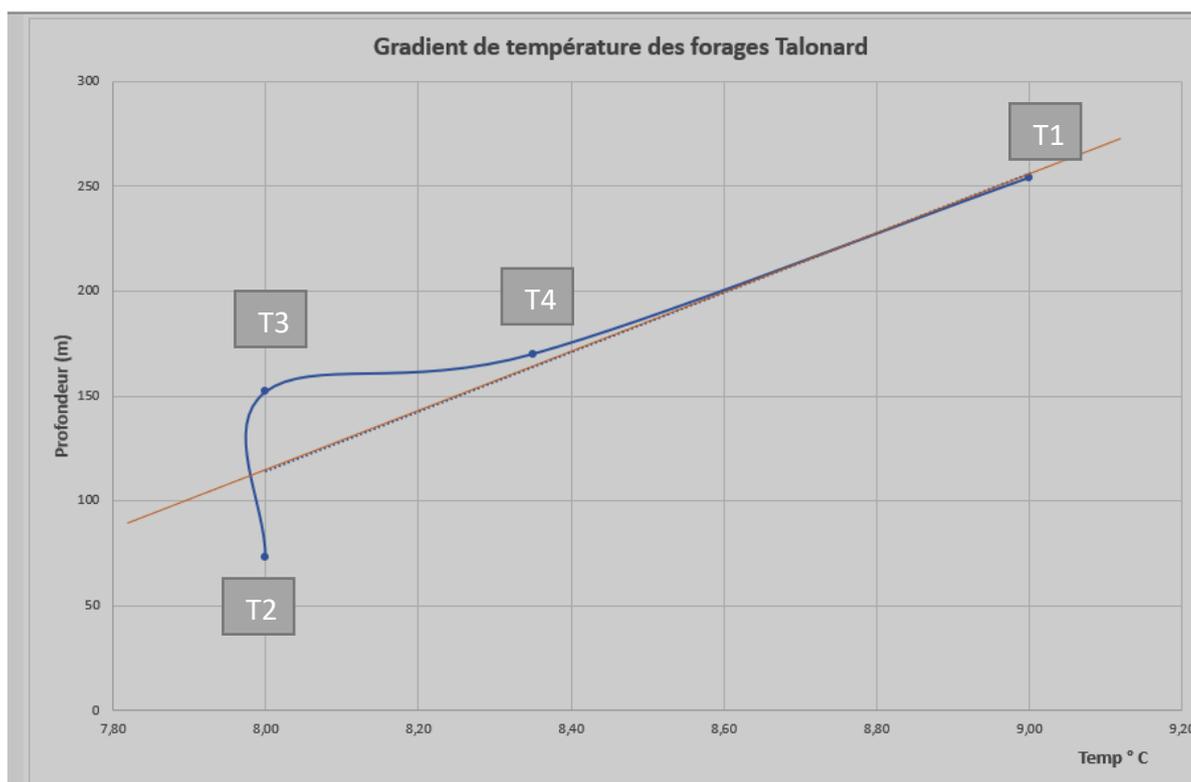


Figure 55 : relation température – profondeur des forages du Talonard

### ➤ D'un point de vue bactériologique

Les résultats d'analyses sont résumés dans le tableau suivant et confirment les analyses faites par le BE CAILLE lors des premiers prélèvements.

Eléments	T1 (11/16)	T2(11/17)	T3(11/17)	T4(11/17)	Mélange (12/20)
Entérocoque	<1	<1	<1	<1	<1
Escherichia Coli	<1	<1	<1	<1	<1
Spore anaérobie					<1
Microorganisme à 36°C					>300
Microorganisme à 22°C					>300
Coliforme totaux					<1

Tableau 18 : données bactériologiques des 4 forages

Les résultats sont conformes à la législation et en accord avec la protection naturelle de la ressource : eaux profondes avec un temps de parcours long et aussi avec le contexte environnemental dont le bassin d'alimentation de cette ressource est dénué de toutes pollutions anthropiques.

Le seul apport se fait au niveau des champs entourant le forage par du fumier. Cet apport manifestement n'a pas d'effet sur la qualité avec des eaux, dont la concentration en nitrates reste inférieure ou voisine de 1. Il n'est d'ailleurs pas impossible que la partie la plus importante du bassin d'alimentation soit extérieure au périmètre entourant les forages.

#### 4.4.3.3. Interprétation :

A part le forage T2, dont la conductivité est un peu moins élevée lors de l'analyse en 2017, les autres valeurs restent :

- Voisines entre 2020 et 2017 ;
- Relativement stable pendant toute la durée du pompage. Cette stabilité est un élément important, c'est un gage d'un aquifère bien tamponné et peu influencé par les eaux de surface.

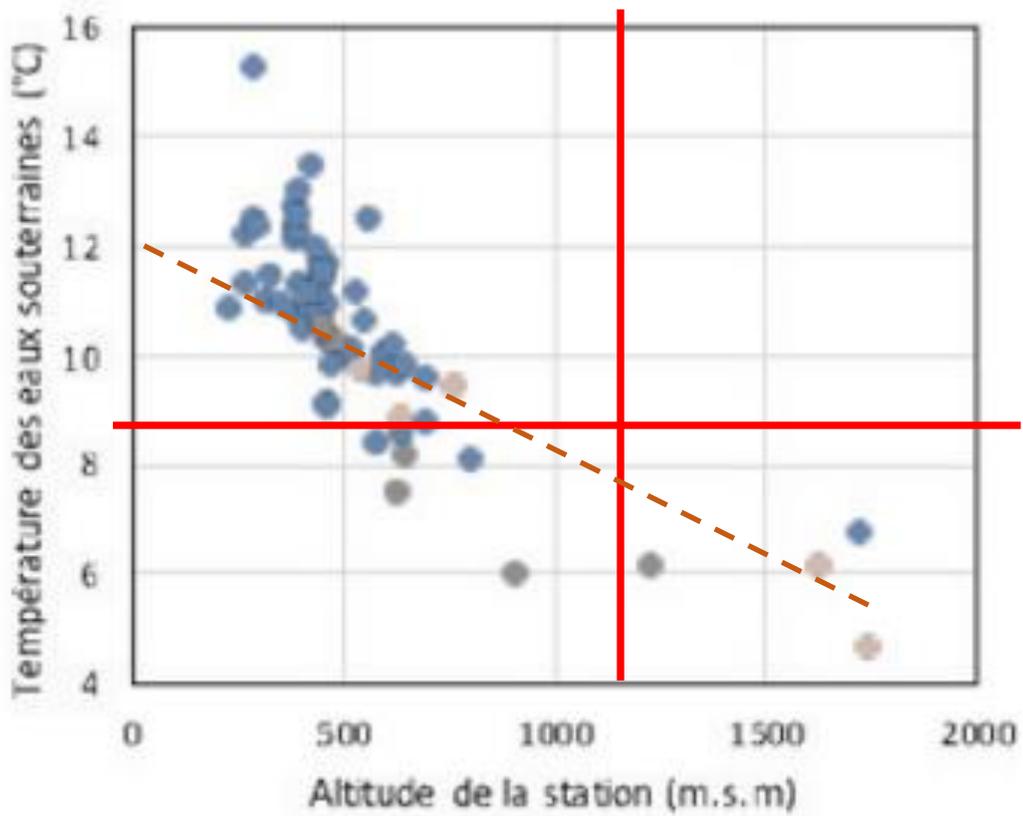
Les différences peuvent être dues à l'appareillage : avec pas toujours le même appareil de mesure et avec les calibrations qui ne sont pas renouvelées à chaque nouvelle phase de mesure.

Concernant les valeurs de température, elles sont d'une part relativement basse ne dépassant pas 10°C et semblent avoir tendance à baisser avec l'hiver. Mais il est aussi possible que les mesures avec un appareil extérieur intègrent les variations de température de l'air et des parties dans lesquelles circulent l'eau pour arriver à la vanne et au robinet de prélèvement.

Dans l'étude sur les eaux souterraines faite de 2000 à 2016 en suisse par :

*Marc Schürch\**; *Monica Bulgheroni*; *Michael Sinreich*, *Oÿce fédéral de l'environnement OFEV, Division Hydrologie*

On constate sur le schéma, ci-après, qu'à une altitude de 1200 m, la température pour une roche fissurée serait proche de 7,5°C. Pour avoir une température de 9°C, on devrait être plus près de 900 m. On peut donc présager d'une circulation profonde de ces eaux dans ce synclinal dont on sait qu'il a plus de 300 m d'épaisseur.



- Aquifère roche meuble
- Aquifère fissuré
- Aquifère karstique

*Figure 56 : Comparaison de la température des eaux souterraines par rapport à l'altitude de recharge*

## **4.5. D'un point de vue isotopique**

### **4.5.1. Préambule**

Ces mesures isotopiques n'avaient pas été prévues dans les études complémentaires lors de notre chiffrage initial ; mais au fil des mois et en rassemblant les différentes pièces de notre puzzle sur le fonctionnement de cet aquifère nous avons pensé qu'il serait intéressant d'avoir des données sur les isotopes permettant de renseigner d'une part sur l'âge de l'eau pompée et d'autre part sur l'altitude du bassin d'alimentation, siège des précipitations.

Nous avons donc effectué 4 prélèvements : un sur chaque forage pour analyser le tritium, l'oxygène 18 et le Deutérium.

Les analyses ont été faite par le LHA (laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon) et la première phase d'interprétation par Yves Travi (Professeur émérite à l'université d'Avignon).

### **4.5.2. Méthodologie employée**

L'usage des isotopes des ions des molécules d'eau : Oxygène et hydrogène est devenue plus couramment utilisé depuis quelques décennies et permet de nous renseigner sur le bassin d'alimentation et sur le temps de circulation (temps écoulé depuis l'infiltration des eaux de pluie).

### **4.5.3. Isotopes stables de la molécule d'eau (oxygène-18, deutérium) :**

#### **4.5.3.1. Généralités**

**Méthode analytique** : Spectrométrie laser. Résultats exprimés en d ‰ V-SMOW.

De manière générale, les teneurs en isotopes stables s'appauvrissent suite à la vidange d'un nuage et les pluies suivent le mouvement. La masse nuageuse ayant le plus souvent pour origine l'océan, cette évolution correspond à un effet de continentalité. Ce phénomène sera d'autant plus important que la température est basse, entraînant une condensation plus intense. C'est pourquoi la montée en altitude de la masse nuageuse accentue l'effet de continentalité et permet d'identifier un effet d'altitude. Le gradient observé en <sup>18</sup>O est en général compris entre 0.3 à 0.45 ‰ pour 100 m sur les versants exposés à l'arrivée des masses d'air. Lorsqu'on se trouve sur le versant opposé ou à l'intérieur d'un massif la relation est parfois beaucoup moins nette.

L'excès en deutérium est caractéristique du corps d'eau et des conditions d'évaporation (température, humidité) à l'origine de la vapeur responsable des précipitations. Pour les précipitations d'origine océanique, il est en moyenne voisin de 10, mais présente des variations saisonnières (plus élevé en hiver). Il peut être plus élevé pour des vapeurs d'origine continentale (lacs ou zones forestières denses) ou pour des mers présentant des conditions évaporatoires plus intenses (Méditerranée par exemple).

La diagramme «  $^{18}\text{O}$  vs  $^2\text{H}$  », représenté sur la Figure 57 permet de situer en valeur absolue les concentrations des différents échantillons analysés et leurs excès en deutérium par rapport à la DMM (Droite Météorique Mondiale).

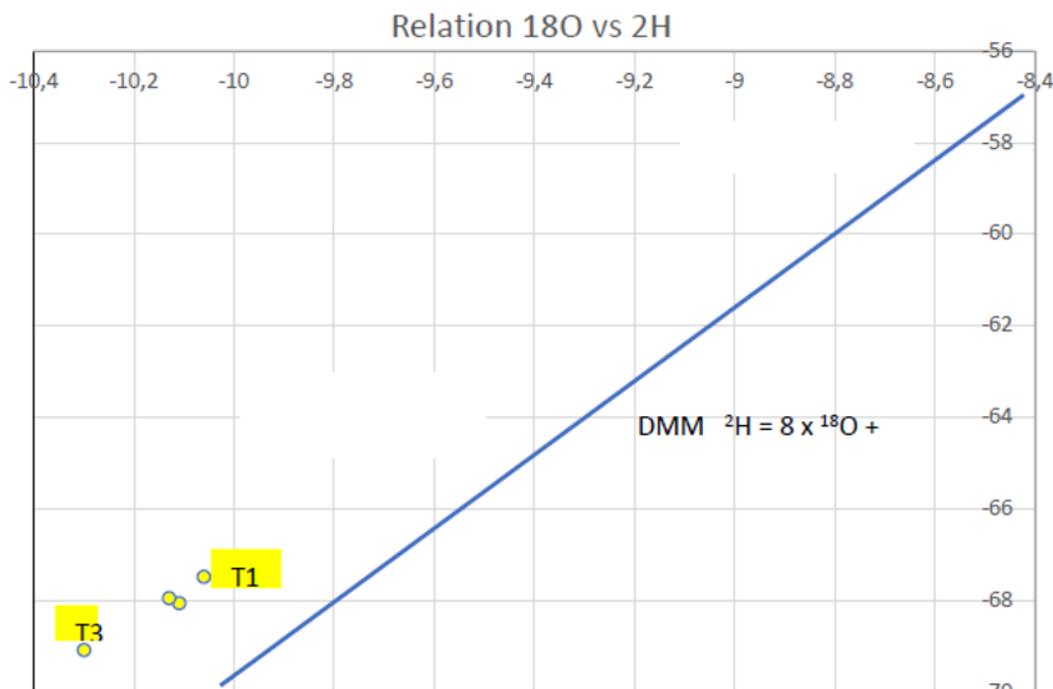


Figure 57 : Position des forages de la Pesse par rapport à la droite météorique mondiale

#### 4.5.3.2. Résultats :

Les résultats des données isotopiques sont fournies ci-après

Nom	Ouvrage	Altitude	Activité UT	D $^{18}\text{O}$	D $^2\text{H}$	NO <sub>3</sub>	Géologie
<b>La Pesse T1</b>	Forage 250m	1210	1,8 +/-0,1	-10,06	-67,48	0.1	Miocène gréseux situé dans une combe synclinale reposant de façon chevauchante sur les calcaires crétacés
<b>La Pesse T2</b>	Forage 70m	1214	4 +/-0,4	-10,11	-68,06	1.6	
<b>La Pesse T3</b>	Forage 150m	1221	4,5 +/-0,7	-10,3	-69,08	1.1	
<b>La Pesse T4</b>	Forage 150m	1208	4,3 +/-0,2	-10,13	-67,95	<0.5	

Tableau 19 : résultats des analyses isotopiques

#### 4.5.3.3. Interprétation hors contexte géologique (Y Travi)

Les données sur les forages de La Pesse appellent trois remarques :

- Quel que soit la profondeur, tous les forages sont alimentés par la même zone de recharge (pas de gradient d'altitude), ( $D^{18}O$  compris entre -10.06 et -10.3) ;
- L'oxygène-18 présente des valeurs relativement hautes, qui correspondent à des altitudes de 800 à 1000 m si on se réfère à ce qui est observé ailleurs dans le Jura (thèse Mudry) ou sur le bassin d'Evian. Considérant l'altitude et la profondeur des ouvrages cette évaluation ne peut pas être correcte. L'explication possible est, soit une erreur sur l'altitude des ouvrages (1220 m), soit des conditions morphologiques locales responsables d'un gradient adiabatique plus faible ;
- Les excès en deutérium sont nettement supérieurs à 10. Hors influence méditerranéenne, on peut y voir l'influence prépondérante des précipitations hivernales (fonte des neiges) dans la recharge de l'aquifère. Mais, on ne peut pas exclure non plus l'influence de vapeurs locales issues des grands lacs voisins. Cette dernière hypothèse est cependant moins probable, car on n'observe pas la même chose à la station de Thonon en bordure du lac Léman. Pour trancher, une analyse des conditions météo et en particulier l'origine des masses d'air responsables des précipitations, est nécessaire.

#### 4.5.4. Isotopes stables de la molécule d'hydrogène (Tritium)

##### 4.5.4.1. Généralités

**Méthode analytique** : compteur à scintillation après enrichissement électrolytique. Résultats exprimés en UT.

Généralement, l'interprétation repose essentiellement sur la comparaison des valeurs mesurées pour les points échantillonnés, avec la courbe des valeurs atmosphériques (pluie) obtenues après les essais thermonucléaires en atmosphère, corrigée pour la décroissance radioactive intervenue à la date du prélèvement. La valeur ainsi obtenue n'a une signification absolue seulement si on considère un transfert « piston ». Comme ce n'est pas tout à fait le cas pour des systèmes hydro dispersifs, comme dans les aquifères analysés, on doit considérer les valeurs obtenues comme des âges moyens. Enfin, pour être à jour des interprétations, à l'époque actuelle, on doit aussi considérer deux éléments complémentaires :

- Les eaux antérieures aux premiers essais nucléaires (1953) ont maintenant une teneur de l'ordre de 0,2 UT, donc dans la marge d'erreur analytique ;
- L'influence des essais nucléaires dans les précipitations a quasiment disparu vers le début des années 2000. Donc depuis une cette date et donc une vingtaine d'années, il est possible de faire un calcul d'âge directement à partir de la décroissance radioactive du tritium.

##### 4.5.4.2. Résultats

Les résultats obtenus montrent 2 familles d'eau :

- Famille 1 : T2, T3, T4 avec des teneurs comprises entre 3,5 et 4,5 UT ;
- Famille 2 : T1 avec respectivement une teneur de 1,8 UT.

Sur la base des teneurs observées à la station de Thonon, pour la période actuelle, la première famille correspond à des eaux de la période 2003-2005. Compte tenu de l'incertitude sur la date exacte du retour aux concentrations naturelles dans les précipitations, et de la possibilité de circulations rapides, on peut faire intervenir des eaux des années 90 et un mélange sur plusieurs années. En tout état de cause, on peut considérer que la période d'infiltration n'excède pas 30 ans avec un maximum au début des années 2000.

La deuxième correspond à des eaux infiltrées, dans leur grande majorité, avant 1952. Elles comportent probablement une petite quantité d'eau infiltrée après les premiers essais thermonucléaires (< 10%). Il est possible aussi que la présence d'un peu de tritium soit liée à des infiltrations récentes.

Si on intègre ces données dans leur contexte local on pourrait envisager que :

- Pour les eaux des forages T2 et T3, il existe un mélange entre des eaux anciennes plusieurs dizaines d'année et des eaux plus récentes provenant soit des eaux par drainance depuis l'aquifère superficiel, soit des eaux des calcaires situés à proximité (crétacé) ;
- Pour les eaux du forage T1 : la part des eaux anciennes (avant 1952) serait prépondérante et il pourrait y avoir une très petite part des eaux depuis la nappe de surface par drainance ;
- Pour T4, le résultat n'est pas en totale adéquation avec notre modèle conceptuel et nous devons refaire une seconde analyse pour vérification et si besoin revoir notre modèle.

## 4.6. Impact sur le milieu superficiel

### 4.6.1. Source Mermet

Tableau 20 : Planche photographique de la source Mermet



Source avant aménagement

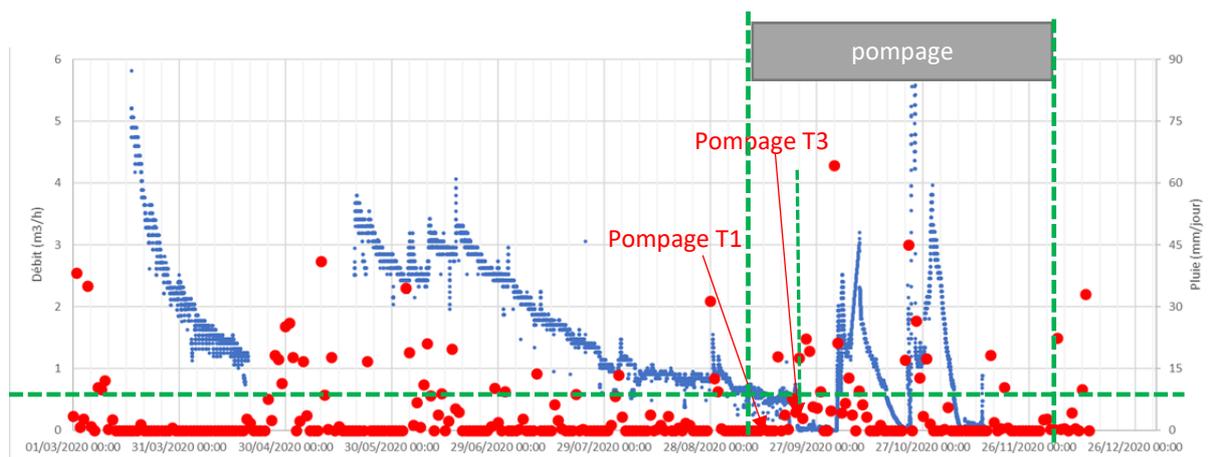


Source aménagée



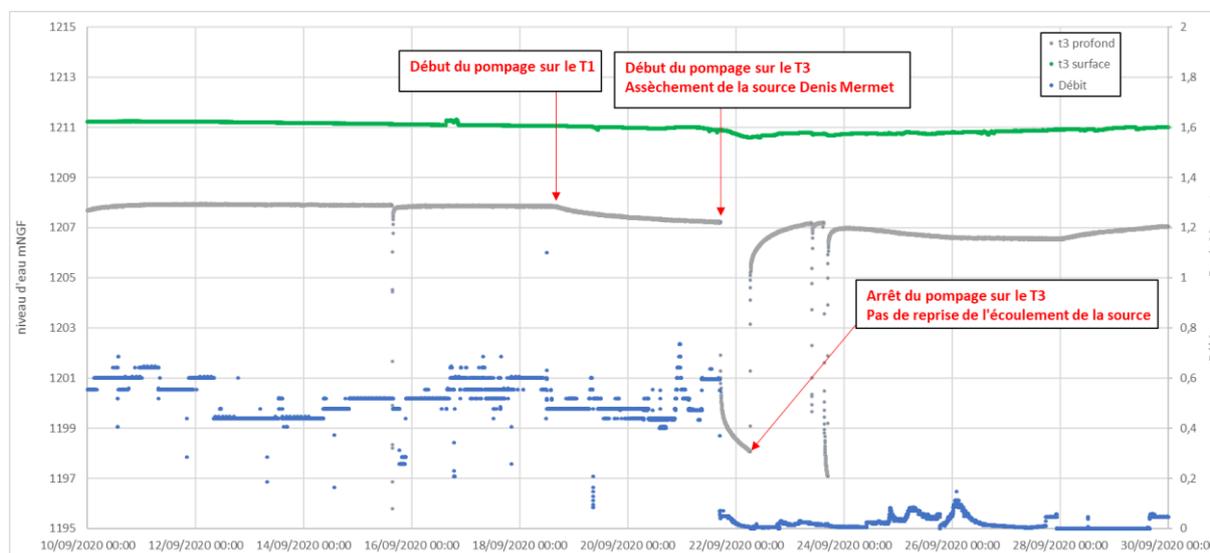
Intérieur du captage

Sans pompage, la source Mermet s'écoule avec un débit variant entre 5,5 m<sup>3</sup>/h en période de hautes eaux et 0,41 m<sup>3</sup>/h en période d'étiage (débit le plus bas mesuré avant le pompage longue durée de 2021). La source est réactive aux précipitations avec des augmentations de débit assez nettes. La vidange du réservoir alimentant la source se fait progressivement avec une baisse du débit d'environ 0,05 m<sup>3</sup>/h/jour. Lorsque le débit de la source est inférieur à 1 m<sup>3</sup>/h, le débit tend à une pseudo-stabilisation sur une durée (sans pluie) d'environ 25 jours. Après ce délai (correspondant à la date du 30/08/2020), la source accuse une baisse progressive de son débit avec une vitesse d'environ 0,025 m<sup>3</sup>/h/jour sur une période de 14 jours jusqu'à atteindre une seconde pseudo-stabilisation aux alentours de 0,45 m<sup>3</sup>/h.



**Figure 58 : Suivi du débit de la source de Mermet (en bleu) avec les précipitations (en rouge)**

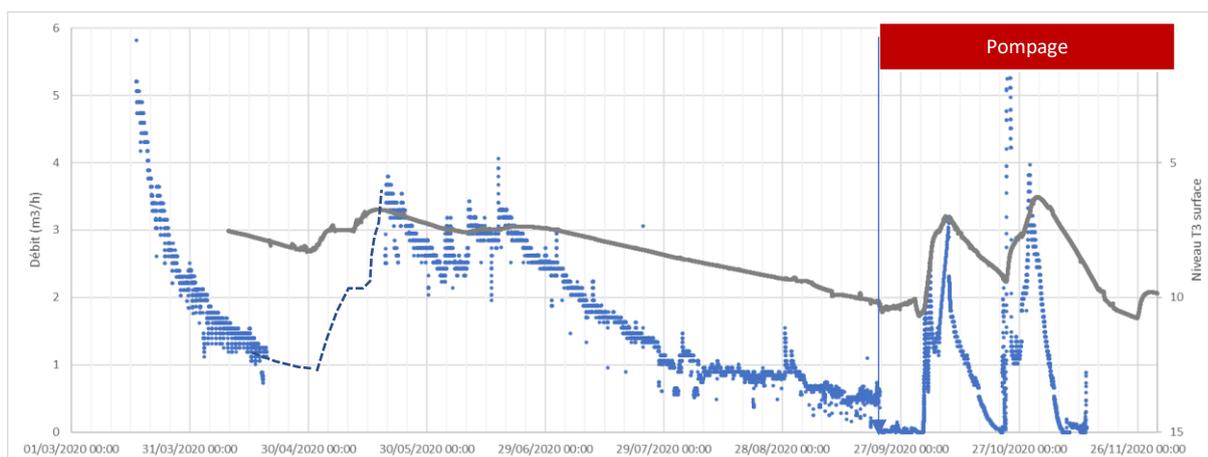
Comme on peut le voir sur la Figure 58, le pompage sur T1 n’a pas eu d’influence sur la source, mais dès le démarrage du T3, la source a été fortement et rapidement impactée. Après 1 heure de pompage, le débit a chuté à 0,07 m³/h. La source a été complètement asséchée après 10 heures de pompage. En cette période particulièrement sèche, malgré un arrêt momentané de la pompe du T3 le 22/09/2020, la source ne retrouve pas d’écoulement. On enregistre quelques écoulements d’eau temporaires de la source à la suite d’importantes précipitations, mais qui s’achèveront systématiquement par un assèchement en lien avec les prélèvements d’eau.



**Figure 59 : Suivi du niveau d’eau du T3 (nappe de surface en vert et nappe profonde en gris) et du débit de la source Denis Mermet en bleue – en début de pompage**

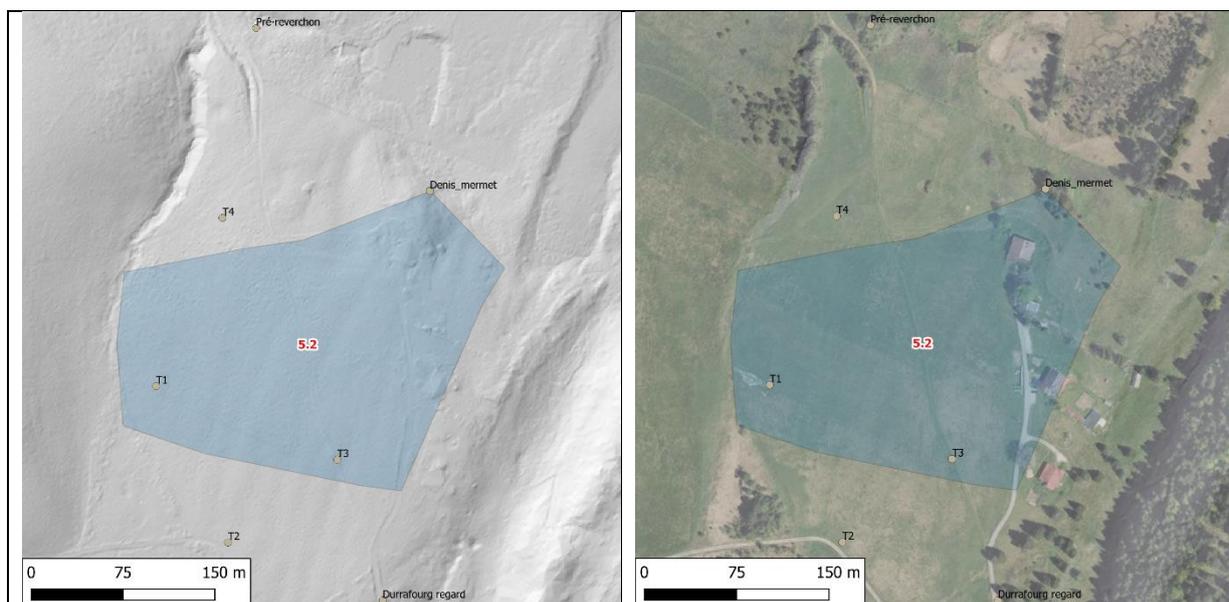
Les variations de débit de la source Mermet se corrélient avec les variations de niveau des eaux de surface au niveau du T3. L’impact du pompage de la nappe profonde sur la source Mermet se fait toutefois par l’intermédiaire des eaux de surface, qui drainent une grande partie des eaux du bassin versant de la zone molassique qui s’écoulent vers cette source Mermet. (II

faudrait aussi, dans l'absolu, enlever pendant la période de l'étude le volume d'eau écoulé vers Pré Reverchon, nous l'avons considéré dans notre estimatif comme insignifiant).



**Figure 60 : Suivi du débit de la source de Denis Mermet (en bleue) avec les eaux de surface du T3 (en gris)**

Si l'on considère dans un premier temps le bassin d'alimentation de la source d'une surface de l'ordre de 51 000m<sup>2</sup> (Figure 61), nous arrivons au bilan suivant :



**Figure 61 : Bassin d'alimentation de la source Mermet**

Sur la période avant pompage, du 17/03/2020 au 13/09/2020, on enregistre un volume d'eau écoulé à la source cumulé de 8 244 m<sup>3</sup>, soit une moyenne de 2 m<sup>3</sup>/h.

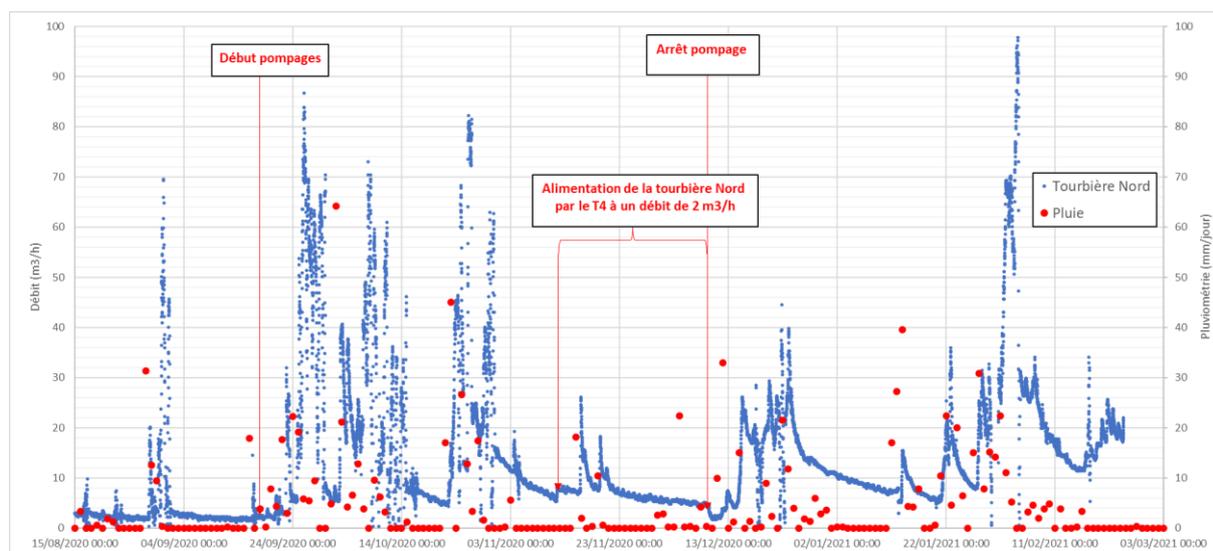
Durant cette période de suivi la lame d'eau précipitée a été de 536,9 mm. Si l'on considère une valeur théorique de ruissellement de 50 % (qu'il faudra calculer plus précisément à partir de mesures sur le site) à laquelle on ajoute l'évapotranspiration estimée à 20% (qu'il faudra aussi évaluer par des calculs de façon plus précise), on arrive à un volume potentiel infiltré de l'ordre de  $0.537 * 30\% * 51\ 000 = 8\ 216\text{m}^3$ .

Cette simulation montre une très bonne concordance entre les volume infiltrés et les débits de l'émergence ; toutefois il existe de nombreuses incertitudes et nous devons tenter d'ajuster ces données par des mesures et des calculs un peu moins basés sur des estimations.

Cela montre tout de même que la part des eaux de pluie tombant au niveau des forages (bassin d'alimentation de la source Mermet) pour alimenter ou ne serait-ce que participer à l'alimentation du bassin molassique est quasiment nulle.

#### 4.6.2. Tourbière Nord et tourbière témoin

Les mesures de suivi de cette source Tourbière Nord sont reportées sur Figure 62.



**Figure 62 : Suivi du débit de la tourbière Nord (en bleu) et de la pluviométrie (en rouge)**

Le Tableau 21 permet de visualiser les aménagements qui ont été réalisés pour suivre ces différentes sources en continu.

**Tableau 21 : Planche photographique de la tourbière Nord et Tourbière témoin**



Nous avons aussi fait des mesures manuelles de façon régulières, afin de pouvoir établir la courbe de calibration. Le débit de cette tourbière Nord a été mesuré manuellement avec un maximum de 20 m<sup>3</sup>/h et un minimum de 2,5 m<sup>3</sup>/h.

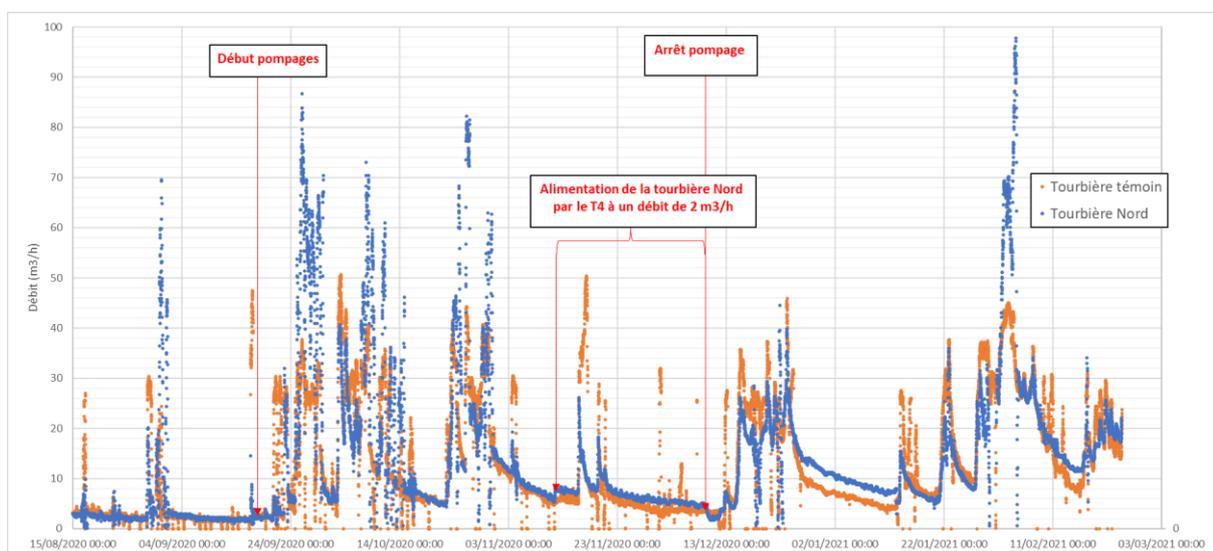
Au cours de l'été 2020, avant le démarrage du pompage, le débit en sortie de la tourbière était stable avec une valeur d'environ 2,5 m<sup>3</sup>/h. Son débit réagit de manière rapide aux précipitations avec un signal sous forme de courbe en cloche un peu asymétrique (courbe de Gauss). Autrement dit, après une pluie le débit augmente de manière brusque avant de redescendre à peine moins rapidement.

Cette tourbière, ou tout au moins sa partie la plus distale, est alimentée par la source Mermet. Le pourcentage que représente le débit d'alimentation de cette source par rapport au débit total de la tourbière varie en fonction des pluies. Dans tous les cas, il reste inférieur à 25 %.

Le plus faible débit de cette tourbière a été de 2 m<sup>3</sup>/h. Il a été mesuré pendant la période estivale août/septembre et avant le démarrage du pompage.

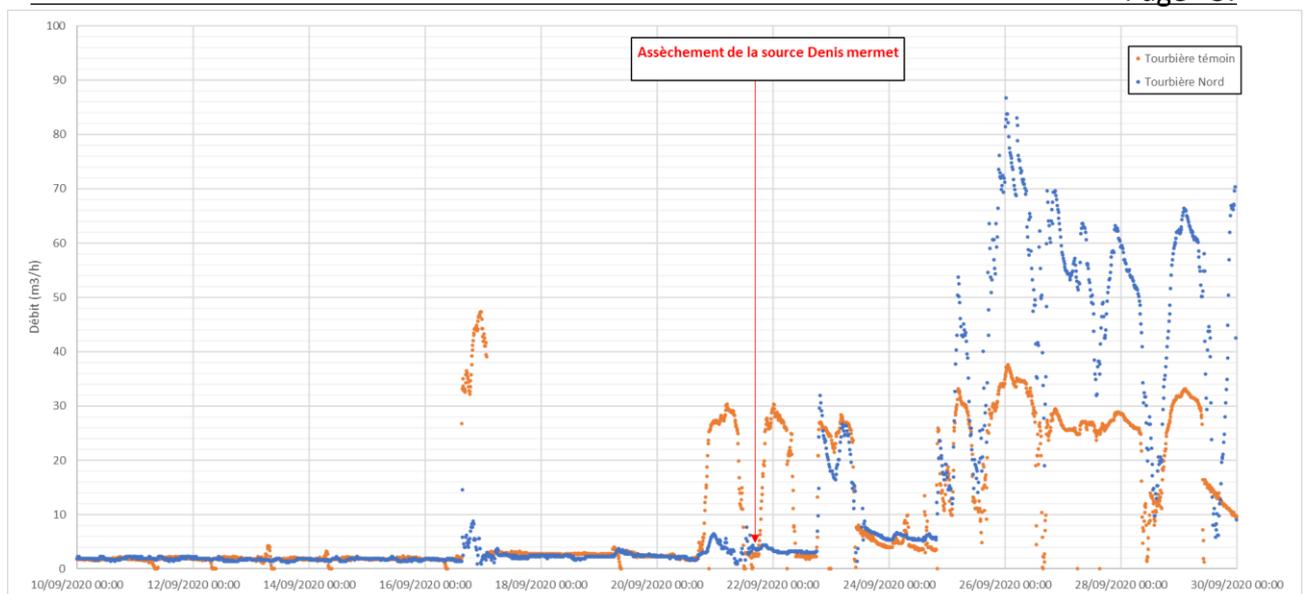
Si l'impact des pluies est immédiat, le pompage sur l'ensemble des forages n'engendre aucune baisse détectable ni au moment du démarrage, ni une remontée du débit au moment de l'arrêt.

D'autre part et pour mieux appréhender les variations du signal de la tourbière Nord au regard des pompages, nous avons proposé de suivre le débit d'une tourbière dénommée « témoin », afin de comparer les variations des différents signaux et ainsi pouvoir séparer ce qui pouvait être lié au pompage. Ces tourbières sont suffisamment rapprochées pour avoir le même signal d'entrée (pluie) et d'étendue comparable pour avoir un débit d'exutoire du même ordre de grandeur. Le suivi (Figure 63) a montré que le signal est particulièrement comparable, notamment pour les débits inférieurs à 20 m<sup>3</sup>/h. Au-delà de 20 m<sup>3</sup>/h, l'incertitude liée aux mesures de débit et à l'extrapolation de la courbe fait que l'on observe à la suite d'importantes périodes pluvieuses un décrochement du signal entre ces deux tourbières avec parfois un débit plus important sur la tourbière Nord et parfois un débit plus important sur la tourbière témoin.



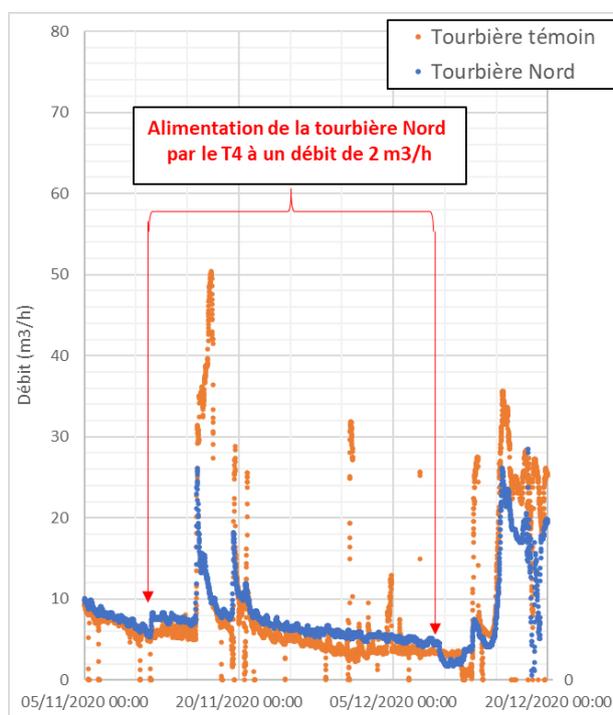
**Figure 63 : Suivi du débit de la tourbière Nord (en bleue) et de la tourbière témoin (en orange)**

Lors du démarrage du pompage, le signal du débit en sortie de la tourbière n'apparaît pas impacté par le prélèvement d'eau. L'assèchement de la source Mermet (réduisant de 0,41 m<sup>3</sup>/h le débit d'alimentation n'est pas identifiable dans le suivi du débit à l'exutoire de la tourbière Figure 64). En effet, le débit enregistré est de 3,5 m<sup>3</sup>/h après l'assèchement de la source. Cette augmentation est liée aux 17,9 mm de pluie enregistrée le 16/09/2021, qui doit « gommer » la légère baisse de débit induit par l'assèchement de la source Mermet.



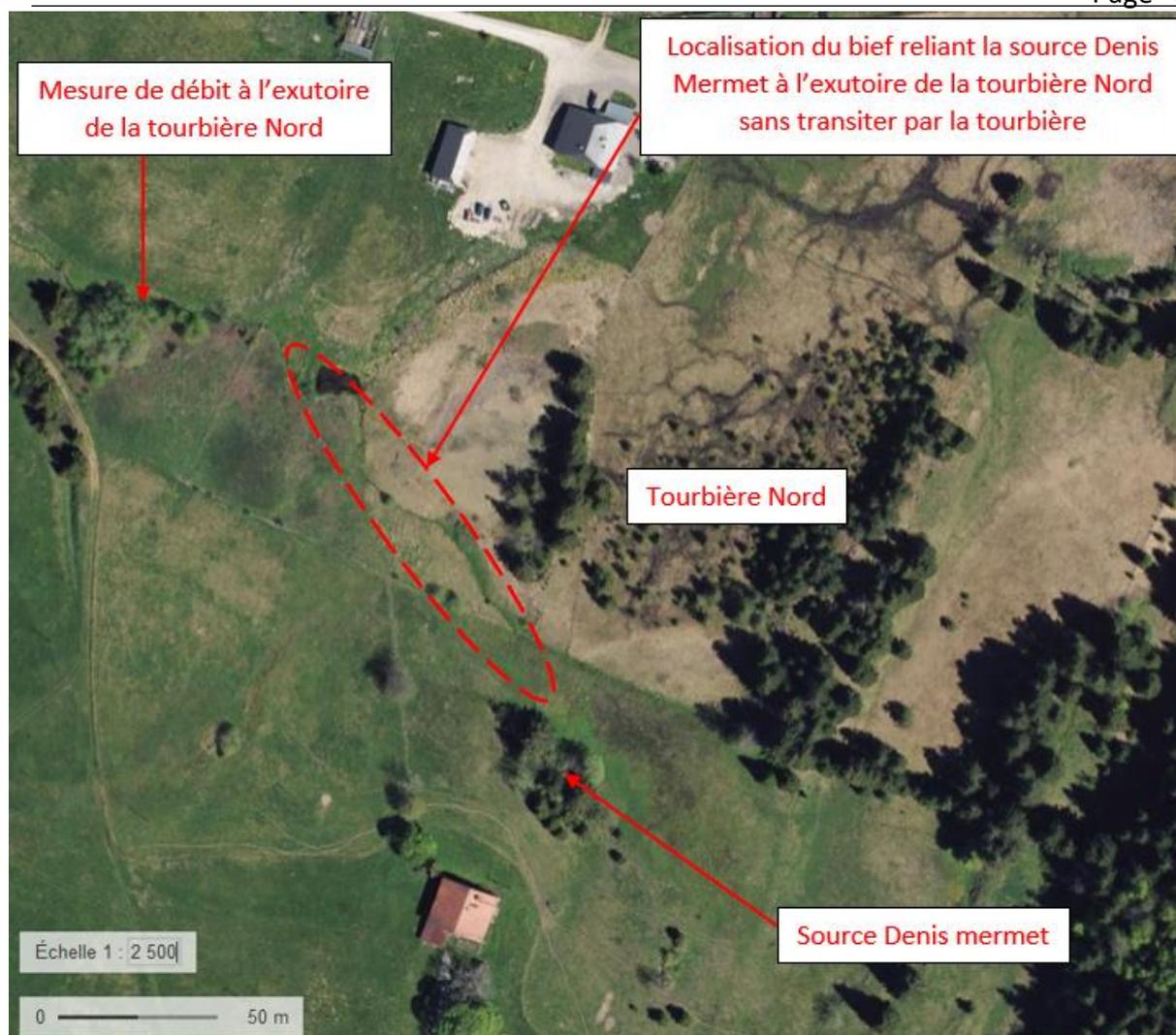
**Figure 64 : Suivi du débit de la tourbière Nord (en bleue) et de la tourbière témoin (en orange) au démarrage du pompage**

La comparaison du signal entre les deux tourbières (tourbière Nord et tourbière témoin) permet de confirmer le fait que le pompage n'a pas d'effet notable sur le volume d'eau évacué par la tourbière Nord.



Entre le 11/11/2020 et le 09/12/2020, on enregistre une augmentation du débit de la tourbière Nord d'environ 2 m<sup>3</sup>/h par rapport au débit mesuré sur la tourbière témoin. Cette augmentation est causée par le détournement de l'eau de pompage du T4 en direction de la source Mermet. Ce rejet d'eau est clairement identifiable avec un décalage temporel d'environ 40 minutes. Ce délai apparaît particulièrement court et ne semble pas attester d'un effet tampon de la tourbière. Cela pourrait s'expliquer par un « contournement » de l'eau de la source Mermet, qui ne transite pas au travers de la tourbière. En effet, un « fossé » est visible sur les photographies aériennes, il relie la source Mermet au bief à l'exutoire de la tourbière

(Figure 65). La distance linéaire de ce fossé étant d'environ 250 m, la vitesse de circulation moyenne de l'eau serait d'environ 6 m/minutes.



**Figure 65 : Localisation du bief/fossé reliant la source Denis Mermet à l'exutoire de la tourbière Nord**

Entre le 14/08/2020 et 16/12/2020, on enregistre un volume cumulé de **32 864 m<sup>3</sup>** évacué à l'exutoire de la tourbière Nord. Le volume est réduit à **31 125 m<sup>3</sup>** si l'on déduit le volume d'eau en provenance du pompage sur le T4 et de la source Denis Mermet, soit une moyenne de 10,5 m<sup>3</sup>/h. On notera toutefois, que ce volume est possiblement légèrement surestimé du fait de l'erreur de mesure sur les forts débits.

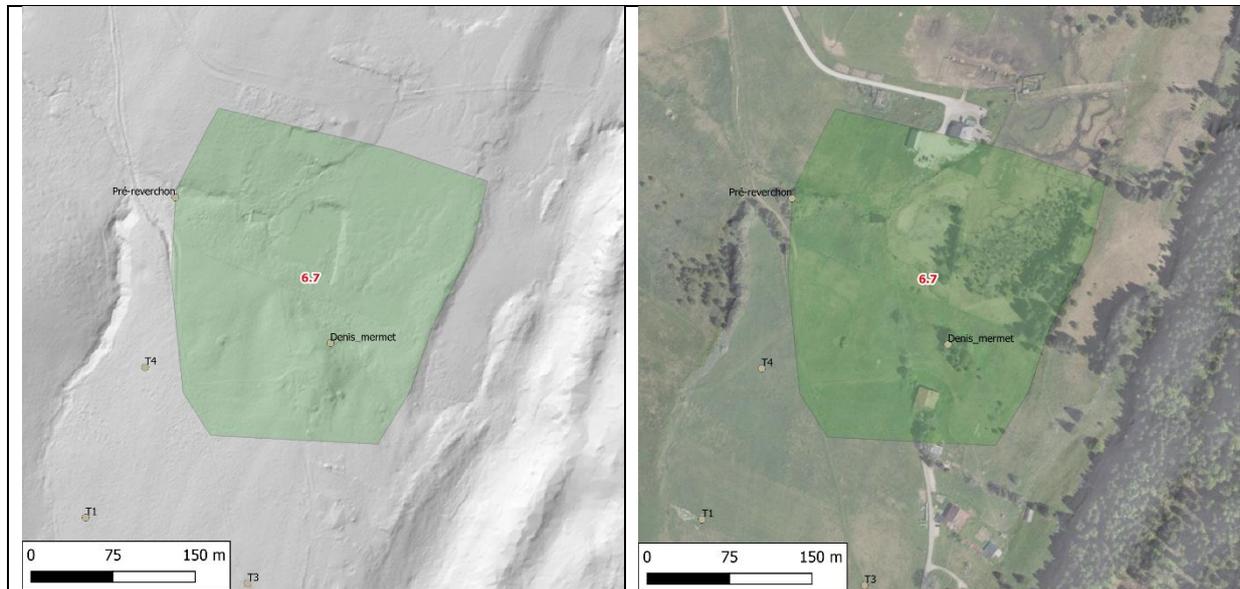
En considérant que le substratum de la tourbière est composé d'éléments imperméables comme pour ce que nous avons identifié par carottage sur la tourbière sud, il est probable que l'eau précipitée directement sur la tourbière ne s'infiltré pas ou très peu en profondeur et qu'elle atteint en quasi-totalité l'exutoire de la tourbière.

La seule « perte » d'eau correspondrait au phénomène d'évapotranspiration. La lame d'eau ainsi évaporée n'est pas connue et particulièrement difficile à estimer. Toutefois, pour effectuer les calculs, nous prendrons une valeur moyenne de 20 % évaporée (comme pour la source Mermet).

Sur la période définie, la lame d'eau précipitée cumulée est de 570,5 mm, ce qui correspond à une superficie du bassin d'alimentation de l'ordre de 6,8 hectares. Cette superficie correspond à l'étendue de la tourbière Nord, ainsi que des apports d'eau de ruissèlement sur

les versants calcaires. Cette étendue latérale du bassin d'alimentation de la tourbière permet d'expliquer la minéralisation de ses eaux et la présence d'éléments chimiques (notamment le calcium).

Volume entrant de  $0.456 \text{ m} \cdot 84\,000 \text{ m}^2 = 38\,395 \text{ m}^3$

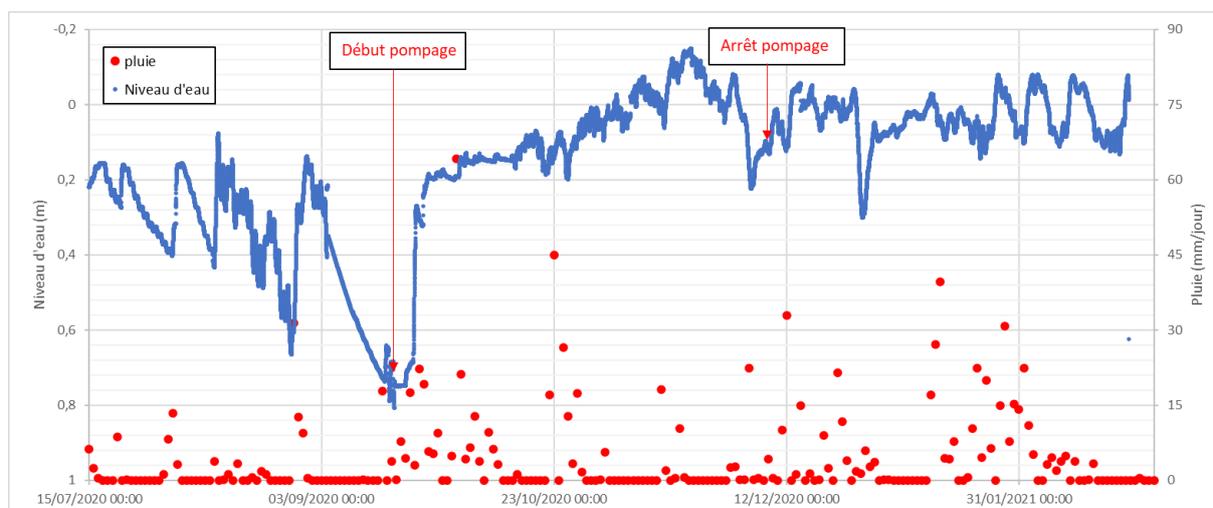


**Figure 66 : Etendue du bassin d'alimentation possible pour la tourbière Nord**

La corrélation entre le volume entrant et sortant est concordante et nous serons à même de travailler sur des mesures et des calculs plus précis pour les paramètres suivants : évapotranspiration et limite du bassin d'alimentation.

### 4.6.3. Le regard Durrafourg

Les mesures de suivi de cette source sont reportées sur la Figure 67.



**Figure 67 : Suivi du niveau d'eau de la source Durrafourg regard en bleue – précipitations en rouge**

Le Tableau 22 permet de visualiser le contexte et l'aménagement de ce point d'eau.

**Tableau 22 : Planche photographique du regard Durrafourg**



Les fluctuations du niveau d'eau de la pseudo-source « Regard Durrafourg » sont présentées à la Figure 67. Le point 0 correspond au sommet du regard et le fond du regard est situé à 0,75 m de profondeur. Le débit réel de la source n'est pas mesurable, car elle s'écoule en surface et en partie de manière diffuse au travers d'un tuyau annelé cassé, fuyant et en partie selon le propriétaire par le fond du regard par le biais d'un tuyau en 20 mm environ. Le débit ne peut, dans les conditions actuelles, être mesuré précisément, mais visuellement il ne devrait pas dépasser quelques dizaines de litres par heure.

Ce regard doit normalement alimenter le puits Durrafourg, mais à ce jour cette alimentation est non fonctionnelle. Nous avons effectivement vidé cet ouvrage et constaté que le tuyau restait improductif, mais également que le niveau du puits ne remontait pas. Seules, les précipitations semblent le remplir actuellement.

A la suite de précipitations (Figure 67), le niveau d'eau dans le regard monte d'environ 2 cm/heure (soit environ 7l/h), valeur en accord avec le débit observé visuellement.

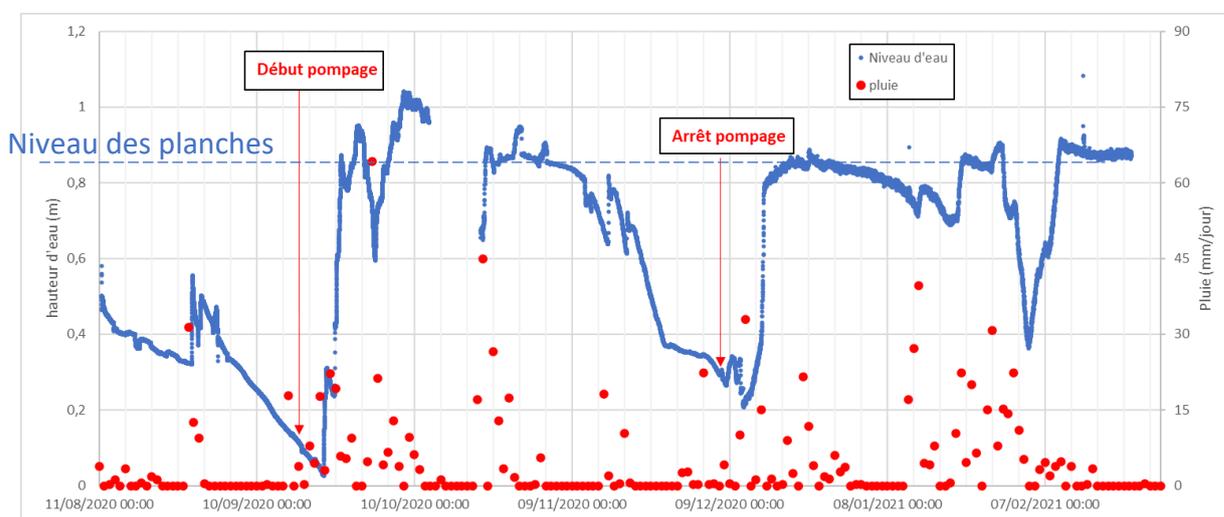
Ainsi, lorsque le pompage sur les forages a démarré le « Regard Durrafourg » était d'ores et déjà asséché. Le 22/09/2020, on enregistre une importante remontée du niveau d'eau en lien avec de fortes précipitations. Sur toute la durée de l'essai, le niveau d'eau est resté particulièrement haut jusqu'à « déborder » du regard, ce qui confirme que le pompage n'a pas eu d'influence sur ce point d'eau. Les variations du niveau d'eau ne corrèlent pas non plus avec les variations de la nappe de surface mesurées sur le T3.

Cette pseudo-source, semble plutôt alimentée par une petite « poche aquifère » perchée en altitude et déconnectée des circulations d'eau de surface localisées au niveau du T3. En effet, l'altitude de sortie de l'eau de ce regard présente un niveau d'eau la plupart du temps supérieur à celui de la nappe de surface du T3. Son altitude est de 1218,62 m NGF (sommet du regard), ce qui correspond à une profondeur de niveau de 3,21 m sur le T3. Ce niveau a été atteint uniquement en février 2021 (sur la période de suivi) après de grosses pluies.

Ainsi, cette « poche aquifère perchée » alimentant ce regard apparait déconnectée hydrogéologiquement des autres points d'eau. Elle contient un volume d'eau et une étendue très limitée.

#### 4.6.4. Durrafourg tourbière

Les mesures de suivi de cette source sont reportées sur la Figure 68.



**Figure 68 : Suivi du niveau d'eau de la source Durrafourg tourbière en bleu – précipitations en rouge**

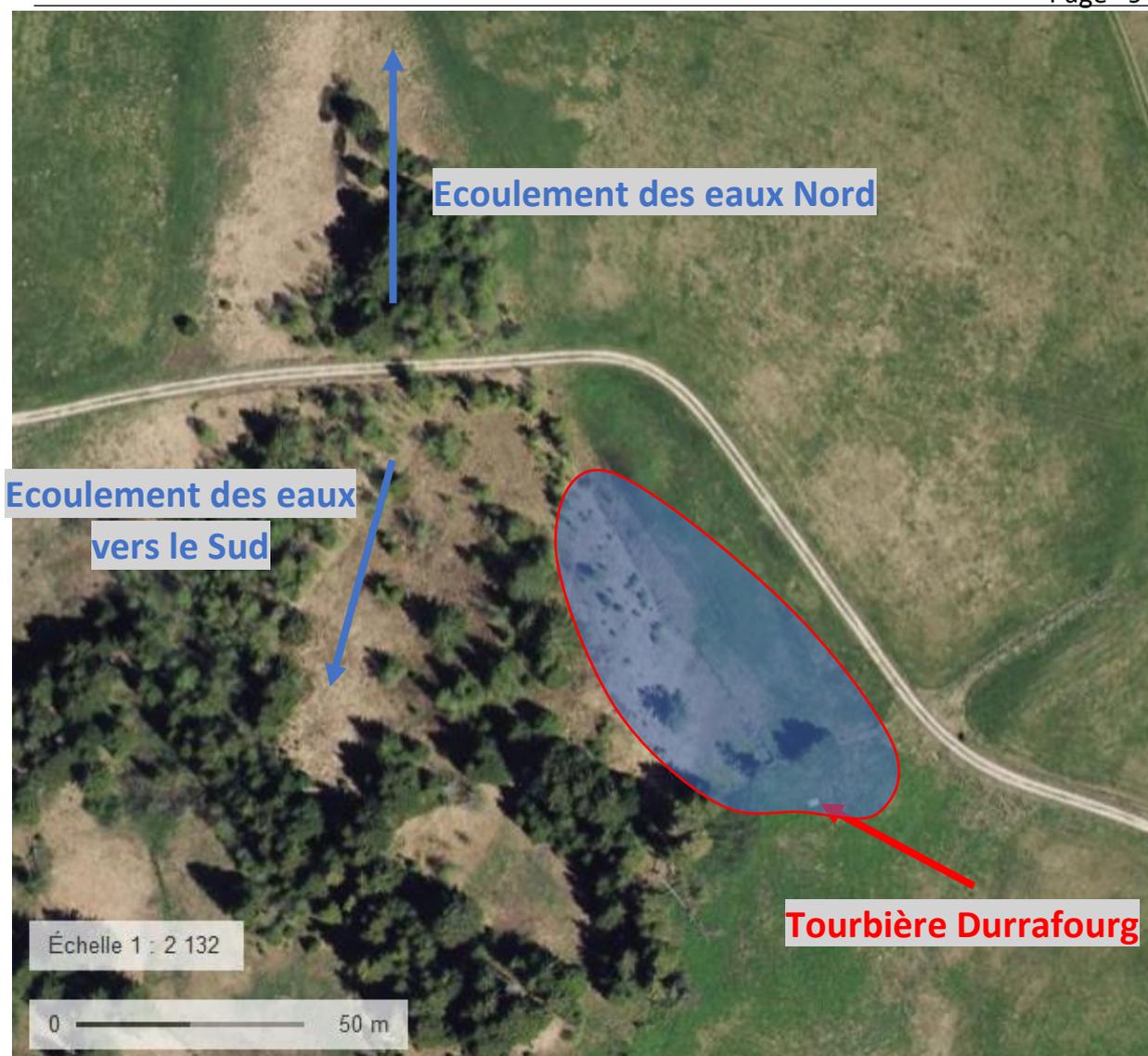
Le Tableau 23 permet de visualiser le contexte et l'aménagement de ce point d'eau. Il s'agit d'un regard creusé vraisemblablement à la main de 80 cm de profondeur et de 1m\*1m, soit une réserve proche de 1 m<sup>3</sup>.

**Tableau 23 : Planche photographique de la tourbière Durrafourg**



Si l'on regarde la position de ce point d'eau dans la topographie et en reprenant les sondages que nous avons réalisés à la tarière, on peut conclure que :

- L'épaisseur de la tourbe est très réduite avec 80cm reposant sur des argiles vertes étanches et sans communication possible avec les niveaux géologiques sous-jacents ;
- La distance de ce point d'eau jusqu'à la limite du bassin versant, qui s'écoule vers le nord ne peut dépasser 50 m pour une surface de l'ordre de 1 500m<sup>2</sup>. Le volume théorique maximum de tourbière est donc inférieur à 1500 m<sup>3</sup> ; ce qui, pour une porosité maximale de 30 %, correspondrait à 500 m<sup>3</sup> de réserve d'eau et à raison d'un débit de fuite (abreuvoir et ruisseau de 1 à 2 m<sup>3</sup>/h) donnerait une réserve maximale de 10 à 20 jours. On constate que la vidange est beaucoup plus lente, phénomène que l'on peut expliquer par des apports latéraux en provenance du coteau. Cette solution est corroborée par la conductivité mesurée de l'ordre de 300 µs/cm (eaux bicarbonatées calciques).



**Figure 69 : Etendue possible du bassin d'alimentation de la tourbière Durrafourg**

Les variations de niveau d'eau mesurées dans la tourbière Durrafourg sont présentées à la Figure 68. Le graphique est présenté en hauteur d'eau avec le fond du regard à 0 m et le sommet (niveau du terrain naturel) à + 80 cm.

Le signal piézométrique de ce point de suivi est comparable à ce qui a été mesuré au niveau du point « Regard Durrafourg ». En effet, on enregistre une remontée rapide du niveau d'eau à la suite des précipitations (vitesse de remontée pouvant atteindre 0,5 cm/heure), puis une vidange progressive et régulière avec une vitesse de descente variable :

- Lorsque le niveau d'eau dans le regard est élevé (au-delà de 0,5 m de hauteur d'eau), la vitesse de vidange peut atteindre des vitesses maximales de 10 cm/jour. Ces fortes vitesses sont en partie liées à l'évacuation de l'eau au travers du tuyau alimentant l'abreuvoir Durrafourg (débit maximum mesuré de 1 m<sup>3</sup>/h à l'abreuvoir – sans compter les fuites potentielles le long du tuyau enterré) ;

- Lorsque le niveau d'eau dans la tourbière est bas (inférieur à 0,5 m de hauteur d'eau) la vitesse de descente se réduit à 1,75 cm/jour. Ainsi, après une longue période sans recharge, la tourbière se vidange jusqu'à s'assécher totalement.

Lors du démarrage du pompage, Le regard de la tourbière Durrafourg était presque asséché avec une hauteur d'eau résiduelle inférieure à 10 cm. Le démarrage du pompage n'a pas eu d'impact direct sur le niveau de la tourbière, qui a continué d'accuser une baisse suivant la même vitesse de vidange. A partir du 22/09/2020, le niveau d'eau de la tourbière est rapidement remonté, en lien avec les fortes précipitations, jusqu'à atteindre le niveau du sol. Le niveau est resté particulièrement haut jusqu'au milieu du mois de novembre. Ce niveau a été maintenu par les précipitations successives, qui ont constamment rechargé la tourbière.

A partir du 22/11/2020, la tourbière n'étant plus réalimenté par les précipitations, elle se vidange progressivement à une vitesse régulière de 5 cm/jour jusqu'à se stabiliser sur un plateau correspondant à une hauteur d'eau d'environ +0,38 cm. Cette rupture de pente indique une vidange réduite de la tourbière en-dessous de ce niveau d'eau que l'on peut faire correspondre à l'arrêt de l'alimentation de l'abreuvoir, qui se fait gravitairement.

Les débits mesurés à l'abreuvoir sont résumés dans le Tableau 24.

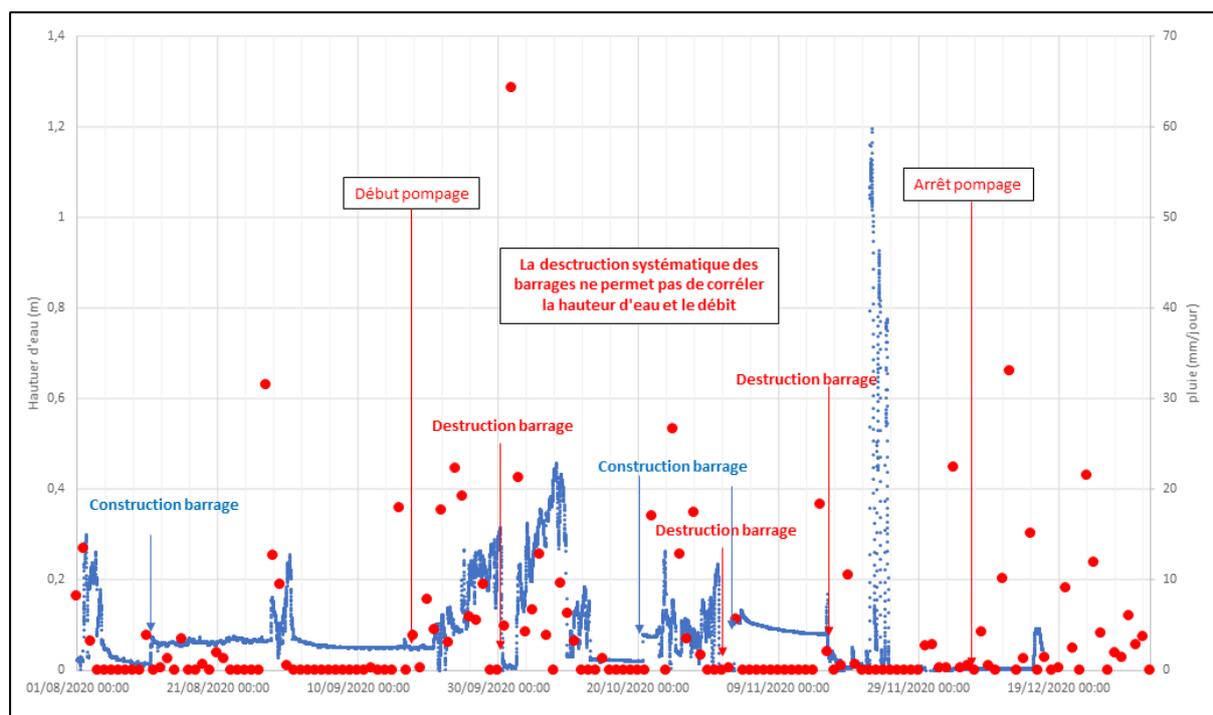
**Tableau 24 : Valeurs de débit mesuré à l'abreuvoir Durrafourg**

Date	Débit (m <sup>3</sup> /h)
19/05/2020	0,5
03/07/2020	0,6
09/07/2020	0,97
23/07/2020	1
11/08/2020	0,72
30/09/2020	0,409
16/10/2020	0,8
20/10/2020	0,418
22/10/2020	0,35
02/11/2020	0,19
06/11/2020	0,264
10/11/2020	0,3

Le pompage n'a pas eu d'effet de vidange sur la tourbière. En effet, malgré l'assèchement de la nappe de surface au niveau de T2, le niveau d'eau de la tourbière a été constamment maintenu et rechargé par les précipitations. Toutefois, à la suite d'une période sans précipitation la tourbière peut s'assécher progressivement, indépendamment des prélèvements d'eau sur la nappe profonde. Ainsi, le niveau argileux identifié sous 80 centimètres de tourbe, lors de la réalisation des tarières, permet d'assurer une déconnexion hydrogéologique entre l'eau contenue au sein de la tourbière et les circulations d'eau de surface et profondes.

### 4.6.5. Tourbière Sud

Les mesures de suivi de cette source sont reportées sur la Figure 70.



**Figure 70 : Suivi du niveau d'eau de la tourbière Sud (en bleu) et des précipitations (en rouge)**

Le Tableau 25 permet de visualiser le contexte et l'aménagement de ce point d'eau.

**Tableau 25 : Planche photographique du point de suivi de la tourbière Sud**



Aménagement pour « petit débit »



Aménagement pour « gros débit »

Pour le suivi de l'exutoire de la tourbière Sud, un ensemble de difficultés ont fortement perturbé le suivi et biaisé les résultats obtenus :

- Dans un premier temps, la mise en place du tube PVC de 300 mm de diamètre et 3 m de long installé par Mr. Gilles Gros a disparu après quelques mois de fonctionnement ; et cela de façon inexplicable ;
- Son remplacement avec un tube similaire s'est trouvé être trop important pour mesurer les faibles débits de la période d'étiage et a été remplacé par un tube de 125 mm de diamètre avec la réalisation d'un barrage pour canaliser les eaux dans le tube ;
- La destruction récurrente du barrage après chaque orage et le remplissage du tuyau par des branches, du sable et divers matériaux obstruant plus ou moins le tube (lié à de violentes augmentations du débit) entraînaient à chaque épisode pluvieux une déviation de l'eau, qui ne passait plus dans le tube PVC. Ainsi, le capteur de niveau se retrouvait hors de l'eau sans enregistrement possible du niveau d'eau.

Le suivi du niveau d'eau de l'exutoire de la tourbière est présenté sur la Figure 70. Nous y avons indiqué les périodes, où le barrage était détruit et donc sans enregistrement de données.

Les variations de débit se présentent sous la forme de courbe en cloche avec des augmentations spectaculaires du débit à la suite de fortes pluies, suivi d'une baisse également rapide conduisant un débit très faible. Le débit maximum mesuré lors de nos campagnes de terrain était d'environ 30 m<sup>3</sup>/h. Néanmoins, au vu de la hauteur d'eau enregistrée par le capteur (jusqu'à + 1,2 m) le débit maximum apparaît conséquent, mais il n'est pas possible de l'estimer. Ces augmentations soudaines sont à l'origine de la destruction répétée des barrages. Cette tourbière a donc un effet de rétention d'eau relativement limité et « tamponne » peu le signal de pluie en entrée. L'eau de pluie est très rapidement drainée vers l'exutoire de la tourbière.

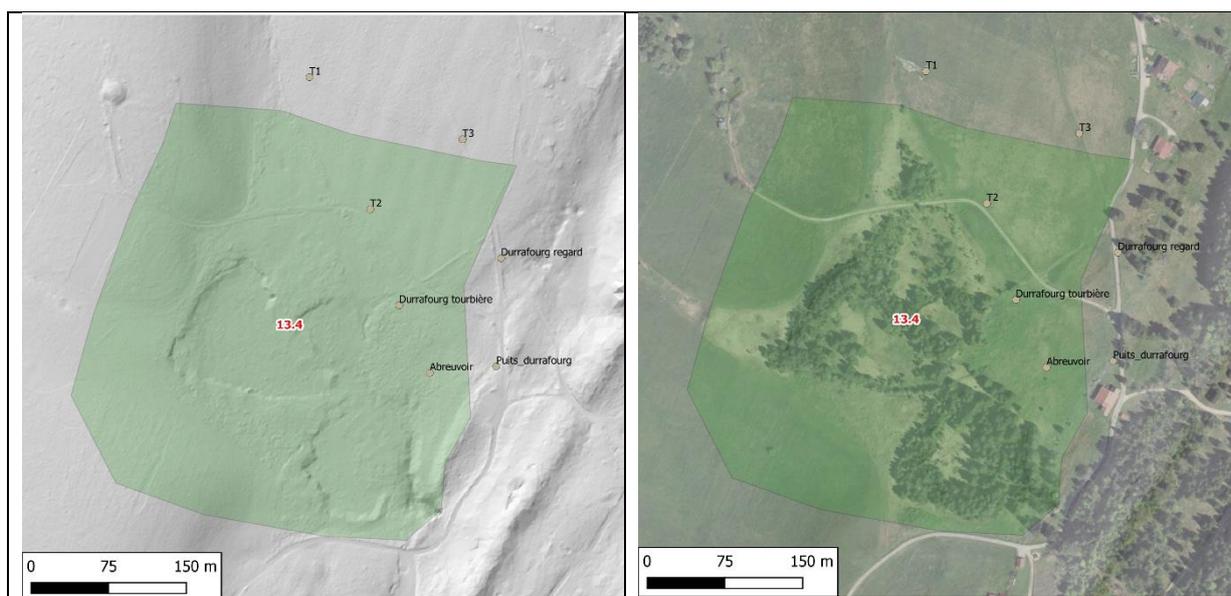
Les mesures ponctuelles de débit menées à l'exutoire de la tourbière Sud sont résumées dans le Tableau 26.

**Tableau 26 : Mesures de débit ponctuelles – tourbière Sud**

Date	Débit mesuré (m <sup>3</sup> /h)
09/07/2020	0,3
11/08/2020	0,58
04/09/2020	0,7
30/09/2020	20
9/10/2020	6
16/10/2020	5
22/10/2020	2,09
24/10/2020	30
30/10/2020	12
02/11/2020	4,2
06/11/2020	12
19/11/2020	2,3
21/11/2020	3,5
30/11/2020	1
16/12/2020	10

L'ensemble des données enregistrées en continu ne permet pas d'estimer convenablement l'impact du pompage sur l'exutoire de la tourbière. Toutefois, au vu du fonctionnement hydrogéologique de cette tourbière (ruissèlement rapide des eaux de pluie et faible phénomène de rétention), le pompage ne semble pas avoir eu d'impact identifiable sur cette tourbière. En effet, même en période d'étiage, un écoulement d'eau a systématiquement été mesuré à l'exutoire de la tourbière. De plus, l'absence d'influence du pompage sur le niveau d'eau dans la tourbière mesurée plus en amont (tourbière Durrafourg) conforte cette hypothèse.

Au vu de la topographie du site, le bassin d'alimentation théorique de la tourbière Sud est d'environ 13,4 hectares.



**Figure 71 : Bassin d'alimentation théorique de la tourbière Sud**

Enfin si l'on regarde les conductivités des eaux et qu'on les reporte à la Figure 72, on constate que la minéralisation chute. Ceci signifie que la grande part des eaux provient de la partie Ouest et Sud-Ouest tamponnant les arrivées d'eau au nord.

La constatation principale est la faible conductivité des eaux de la tourbière sud par rapport à toutes les autres eaux de surface, mais aussi par rapport aux eaux des forages avec des conductivités proches de  $150 \mu\text{s}/\text{cm}$ , soit quasiment la moitié moins minéralisée alors que la partie amont de la tourbière a des eaux voisines de  $300 \mu\text{s}/\text{cm}$ .



**Figure 72 : Conductivité des eaux de la tourbière sud**

#### 4.6.5.1. Synthèse :

Les différents bassins d'alimentation décrits ci-dessus sont résumés à la Figure 73 et Figure 74. Les paramètres physico-chimiques sont présentés dans le Tableau 27.

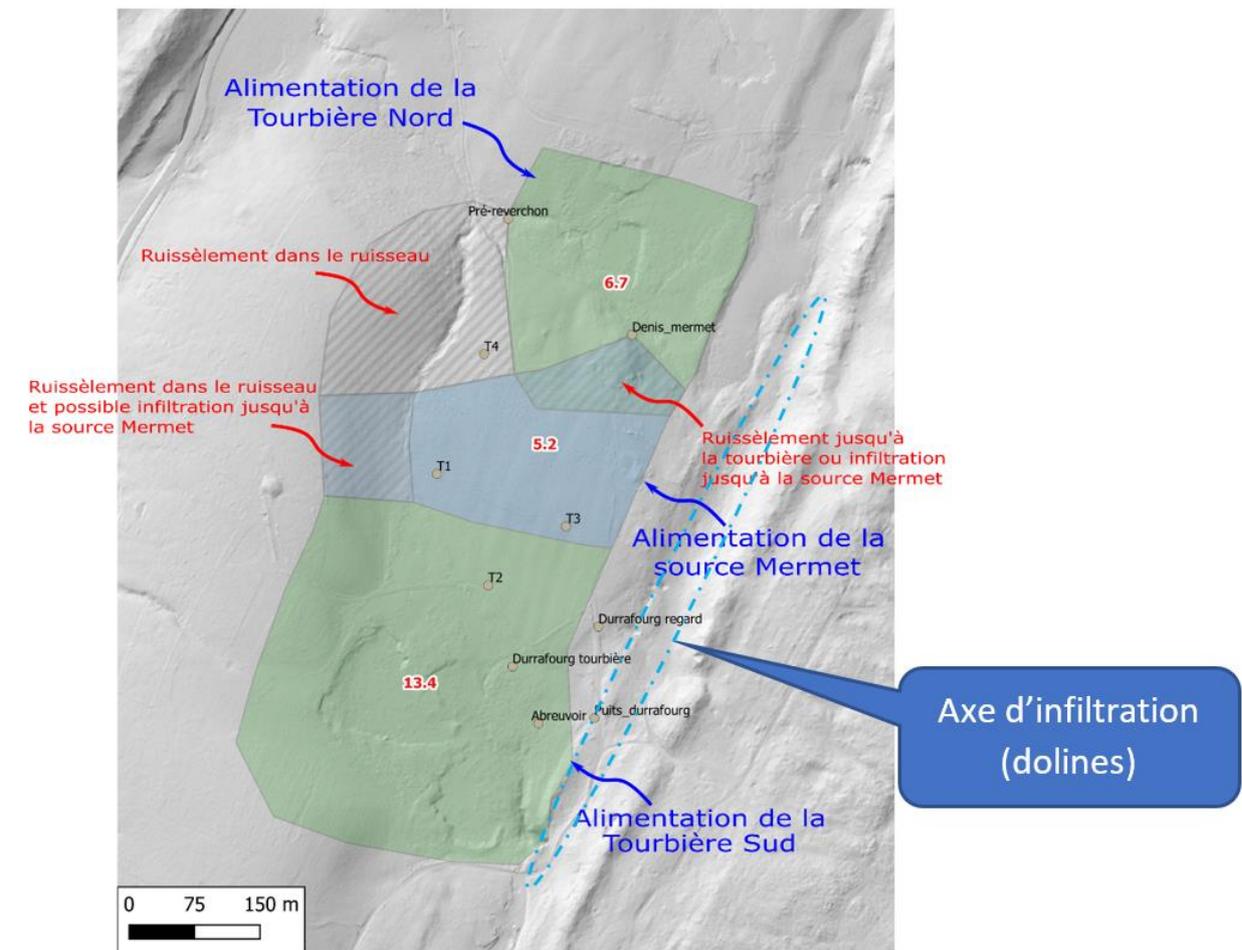


Figure 73 : Les différents bassins d'alimentation des eaux superficielles (MNT)

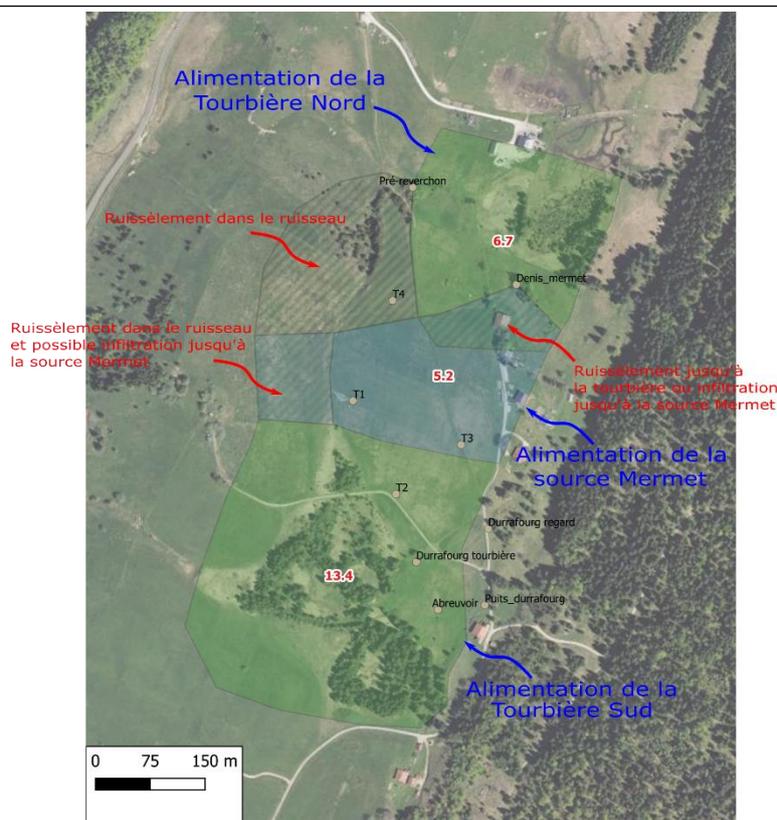
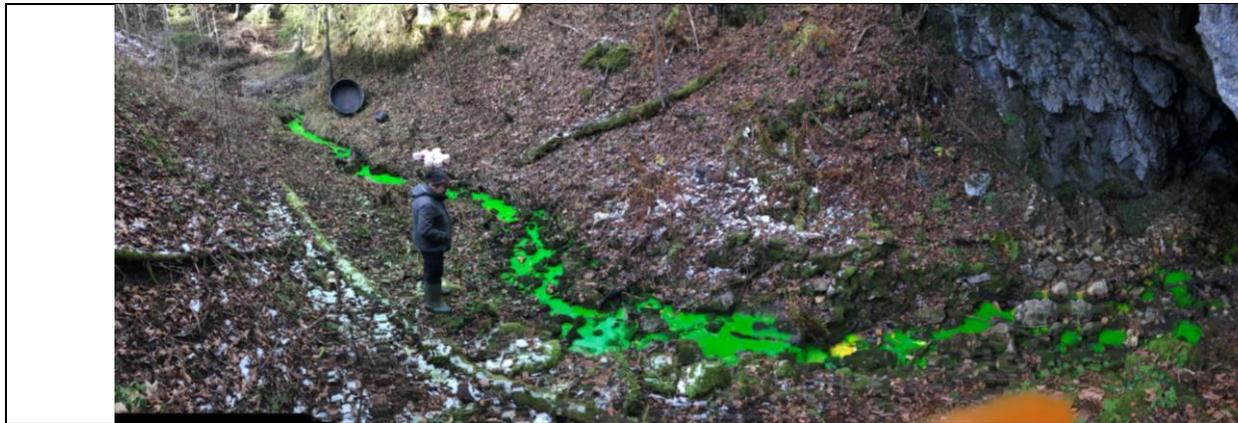


Figure 74 : Les différents bassins d'alimentation des eaux superficielles (orthophoto)

Tableau 27 : Paramètre physico-chimiques des différents points d'eau de surface

date/forage	Tourbière Nord		Tourbière Sud		Tourbière Témoin		Tourbière Duraufourg		Regard Duraufourg		D. Mermet	
	cond	temp	cond	temp	cond	temp	cond	temp	cond	temp	cond	temp
04/09/2020	314,00						292,00		330,00		273,00	
06/11/2020	290,00	7,80	150,00	6,80	280,00	7,80						
21/11/2020	300,00		130,00				280,00		360,00			
30/11/2020	340,00		180,00		290,00		290,00					
Moyenne	311,00		153,33		285,00		287,33		345,00		273,00	

## 4.7. Traçage



Injection du traceur au niveau de la perte côté sud du bassin

### 4.7.1. Utilité d'un traçage en hydrogéologie

Le traçage hydrogéologique a pour objectif de préciser l'écoulement des eaux souterraines entre un point d'injection et les divers points de sortie potentiels (sources, forages, cours d'eau).

Pour mesurer la restitution du colorant sur les différents points de suivi préalablement sélectionnés, différents modes de suivi existent :

- **Fluorimètre** : appareil permettant de mesurer en continu la concentration en colorant dans les eaux souterraines – mis en place dans la source de la cascade du Flumen ;
- **Fluocapteur** : charbon actif filtrant l'eau et fixant le colorant. L'identification de la fluorescéine se fait par analyse en laboratoire, l'ensemble des points de suivi ont été équipés de fluocapteur et changés régulièrement pour la source de la cascade.

### 4.7.2. Intérêt dans le cadre des forages du Talonard

Plusieurs traçages avaient déjà été réalisés par le BE CAILLE. Ils avaient montré que l'eau de la tourbière sud, qui s'infiltrait dans les calcaires au niveau du contact chevauchant sur son versant Est était ressortie au niveau de la cascade du Flumen.

Nous avons quelques interrogations vis-à-vis de ce résultat : comment expliquer que l'eau des calcaires s'infiltrant au niveau du site le Talonard ressorte 700 m plus bas au niveau du Flumen et puisse alimenter en même temps la molasse sans que celle-ci ne s'y vidange ?

Pour cela nous avons besoin de refaire cette mesure et de connaître le temps de trajet et la quantité restituée au niveau du Flumen, c'est pourquoi un fluorimètre (permettant une

mesure en continu) a été installé au niveau de ce point de suivi. En complément, nous avons aussi équipé l'ensemble des forages de fluocapteurs. De plus, ce traçage a été mené simultanément au pompage d'essai, afin d'identifier si une partie de l'eau infiltrée dans les calcaires pouvait alimenter l'aquifère molassique recoupé par les forages du Talonard (car comment imaginer que la molasse puisse communiquer et se vidanger dans les calcaires sans être alimentés par eux).

**Tableau 28 : Caractéristiques techniques du traçage**

<b>Date d'injection</b>	25/11/2020
<b>Quantité injectée</b>	8 kg de fluorescéine injectée dans la perte du Talonard
<b>Période de suivi</b>	Du 25/11/2020 au 19/11/2021
<b>Points de restitution suivi</b>	Voir Figure 75
<b>Méthode de suivi</b>	Fluorimètre et fluocapteurs



**Figure 75 : Carte de localisation des points de suivi du traçage hydrogéologique**

### 4.7.3. Résultats

Le colorant a été détecté sur différents points de suivi. Les résultats obtenus sont décrits ci-dessous :

**Tableau 29 : Planche photographique des points de restitution**



➤ **Source de la cascade (gorges du Flumen) :**

Le colorant a été détecté à la source du Flumen le 16/12/2020, soit 21 jours et 3 heures après l'injection. Le pic de restitution est atteint après 22 jours et 20 heures, soit 17 heures après le début de l'apparition du traceur. La vitesse minimum d'écoulement (moyennée sur la distance du traçage) est de 15 m/heure. Ces résultats sont cohérents avec les mesures réalisées lors du traçage effectué par le BE CAILLE.

La courbe de restitution présente une forme relativement resserrée au vu de la distance parcourue. Elle présente deux parties distinctes. La majeure partie du colorant est restitué sur les 5 premiers jours, avec une concentration qui peut atteindre 38 µg/l. Ce pic resserré

traduirait un écoulement rapide des eaux souterraines au travers de « boyaux karstiques » ou bien de zones plus ou moins bien fracturés. Après ce délai, la concentration en colorant diminue progressivement traduisant un écoulement d'eau plus long et dispersé au travers du réseau de microfissures secondaires aux boyaux karstiques. De la fluorescéine est détectée jusqu'au 12/01/2021, soit 27 jours après l'apparition du traceur.

La saturation en colorant sur les différents fluocapteurs successifs permet de visualiser la baisse progressive de la teneur en fluorescéine de l'eau de la source en confirmant les résultats du fluorimètre (Figure 76).

Le niveau d'eau à la sortie de l'émergence a été suivi (3 mesures de débit ont été effectuées). Le débit d'écoulement mesuré est compris entre 495 m<sup>3</sup>/h et jusqu'à plus de 4 000 m<sup>3</sup>/h. Pour cette dernière, le débit du bief était si important qu'il n'a pas été possible pour des raisons de sécurité de mesurer le débit précisément. La mesure a pu être effectuée sur environ la moitié du ruisseau de sortie avec un débit mesuré nettement supérieur à 2 000 m<sup>3</sup>/h. Cette incertitude sur le débit de la source ne permet donc pas de calculer de manière précise la quantité de fluorescéine restituée à la source.

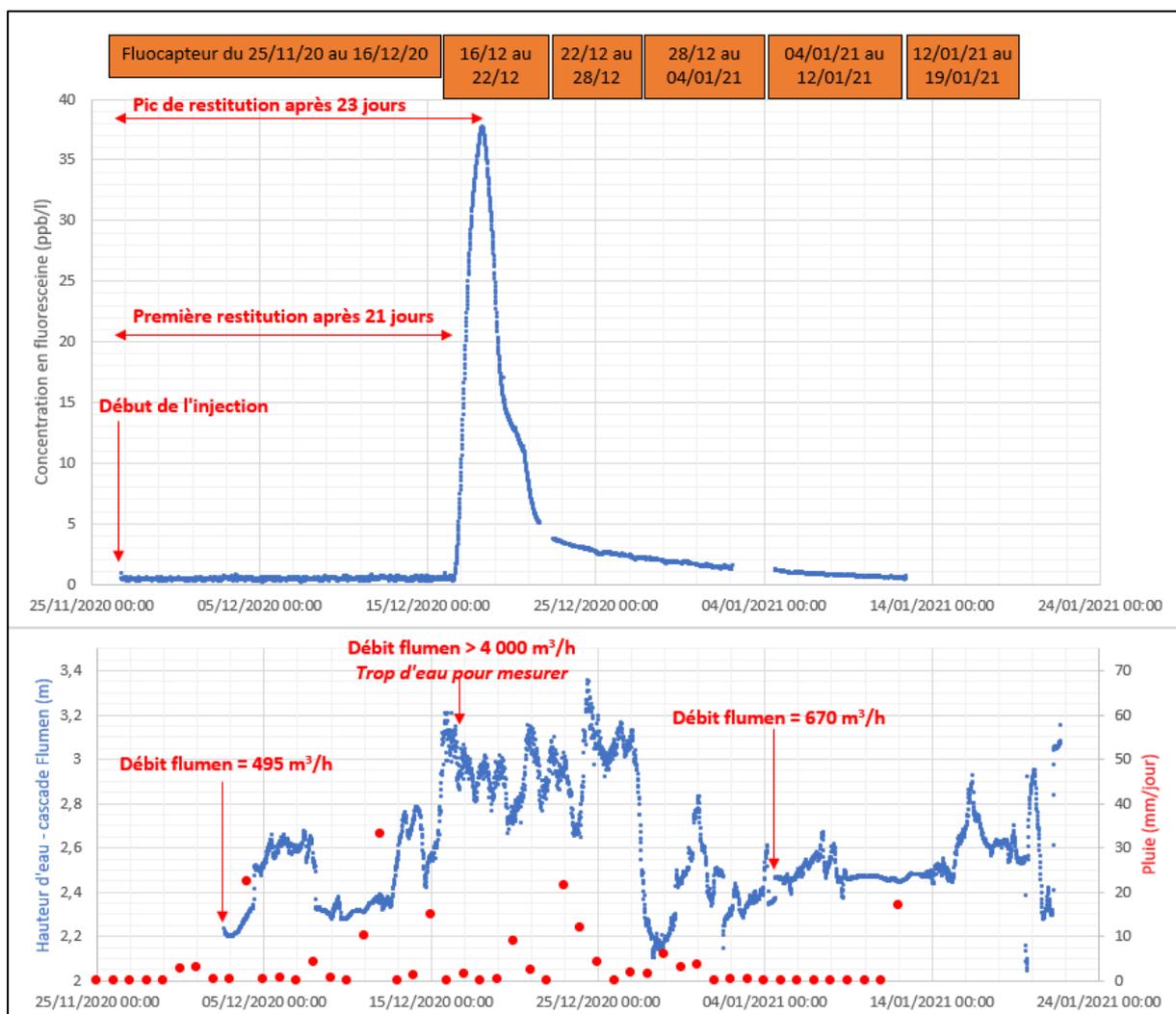


Figure 76 : Restitution du traceur et niveau d'eau au niveau de la source du Flumen

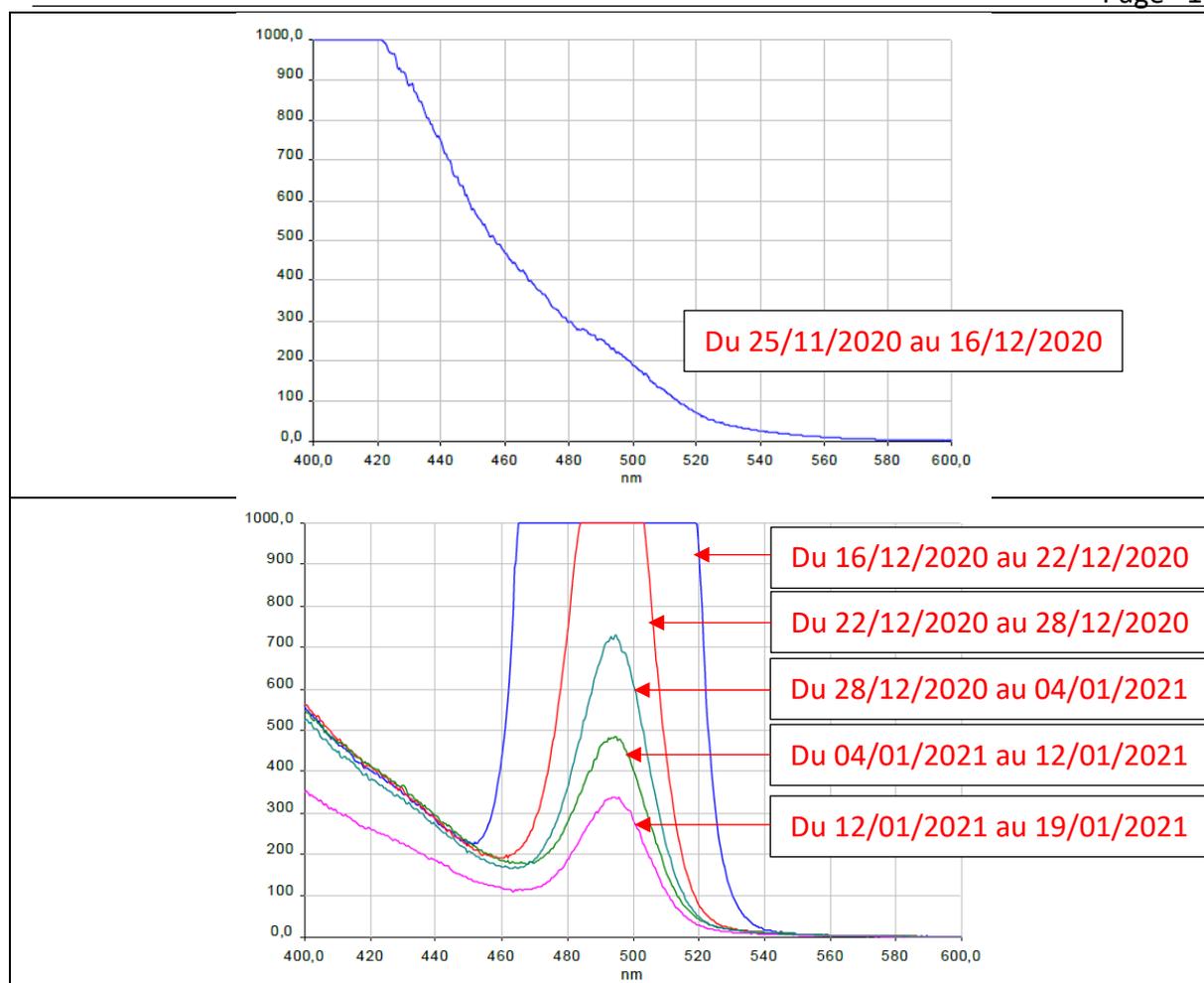


Figure 77 : Fluorimètres de la source de la cascade dans le Flumen

➤ **Cascade du Gendarme (gorges du Flumen) :**

Le fluorimètre de la cascade du gendarme montre un pic de fluorescéine. Ce résultat montre qu'une partie des eaux de la cascade du gendarme est alimentée par le synclinal calcaire de la Pesse.

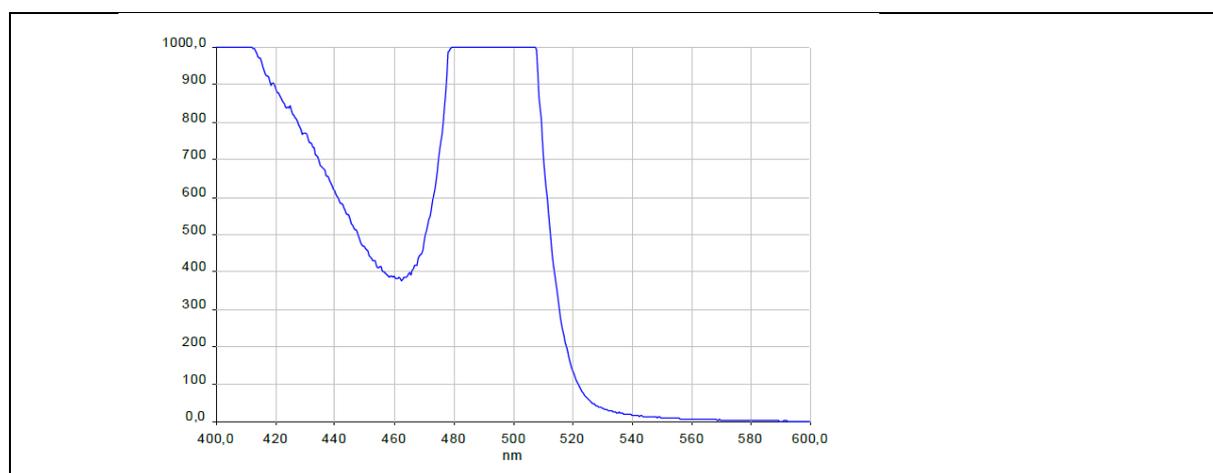


Figure 78 : Fluorimètre de la cascade du Gendarme sur toute la durée de suivi

➤ **Bief noir :**

Le Bief noir ne montre pas de présence de fluorescéine. Ce bief présente un débit plus faible au regard des autres points de suivi traduisant un bassin d'alimentation plus restreint, qui n'apparaît pas être en communication hydrogéologique avec le synclinal calcaire du massif de la pesse.

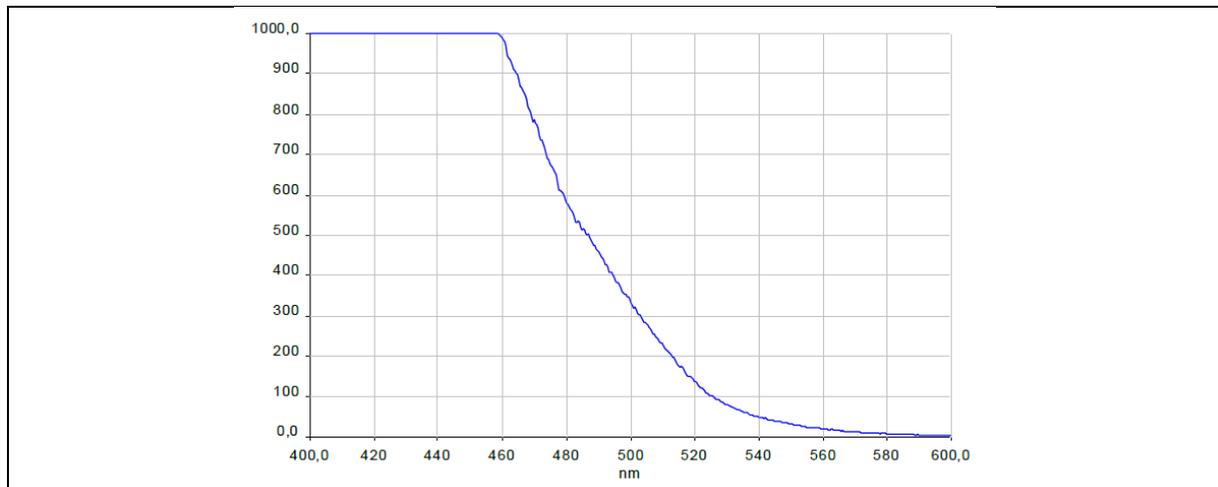


Figure 79 : Fluocapteurs du Bief Noir sur toute la durée de suivi

➤ **Source de la Douveraine et de la Semine :**

Pour ces deux points de suivi, le charbon actif a été arraché du fluocapteur ce qui ne permet pas de connaître la présence éventuelle de colorant sur ces points de restitution. Ce phénomène est directement lié à une augmentation du débit des cours d'eau de surface à la suite d'importantes précipitations, qui ont induit une augmentation considérable des vitesses d'écoulement de l'eau de surface en pulvérisant le charbon actif.

Lors du traçage en 2004 le BE Caille n'avait pas retrouvé de colorant se dirigeant vers le sud.

➤ **Forages du Talonard :**

Pour rappel, la présente opération de traçage a été menée conjointement au pompage d'essai sur les 4 forages du Talonard. Ainsi, les mesures de suivi ont aussi été faites sur les eaux de pompage des différents forages. Après l'injection du colorant, le pompage sur les forages a été poursuivi sur 11 jours. Le traçage a été réalisé à la fin du pompage d'essai pour permettre d'avoir un cône de rabattement le plus étendu possible et donc d'intercepter au mieux de traceur.

Le colorant a été détecté uniquement sur le T2 (Figure 80). Ce forage est apparenté au « groupe amont » avec une altitude piézométrique plus élevée et une réaction rapide aux précipitations.

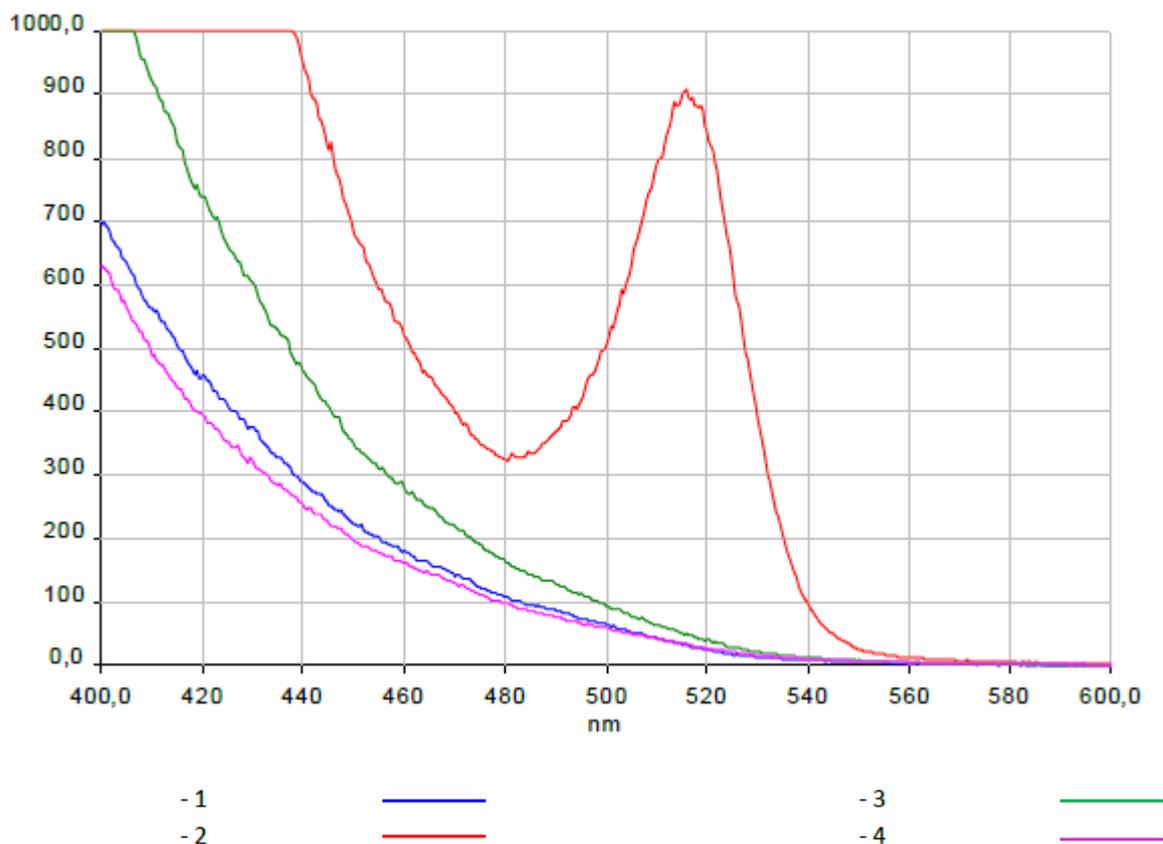
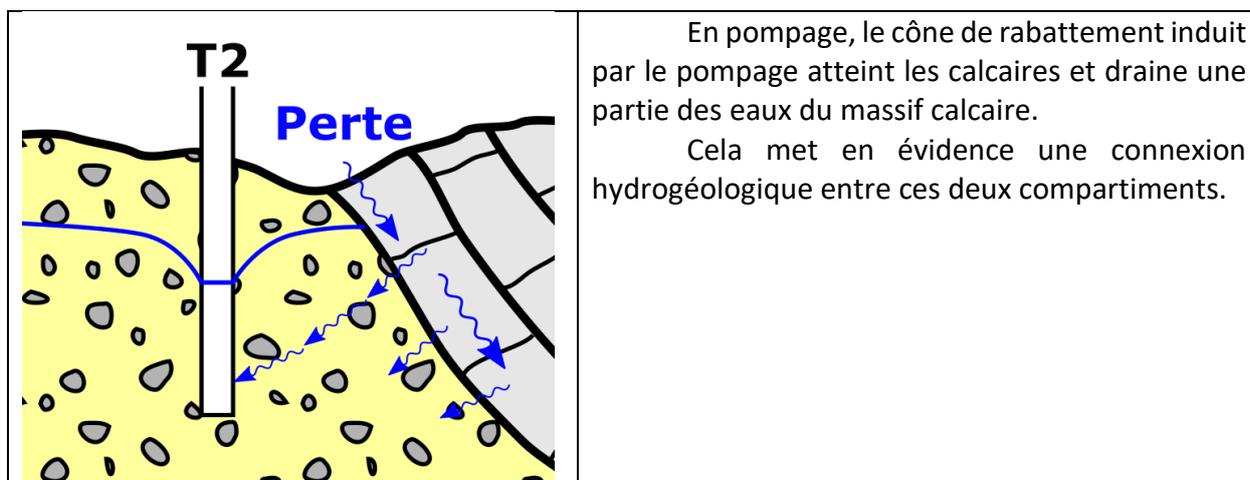


Figure 80 : Fluocapteurs des forages du Talonard en pompage

Ces résultats permettent de montrer qu'une connexion hydrogéologique existe entre le massif calcaire du synclinal de La Pesse et l'aquifère molassique recoupé par les forages. Cette information complémentaire permet de proposer un modèle de fonctionnement, comme présenté à la Figure 81.



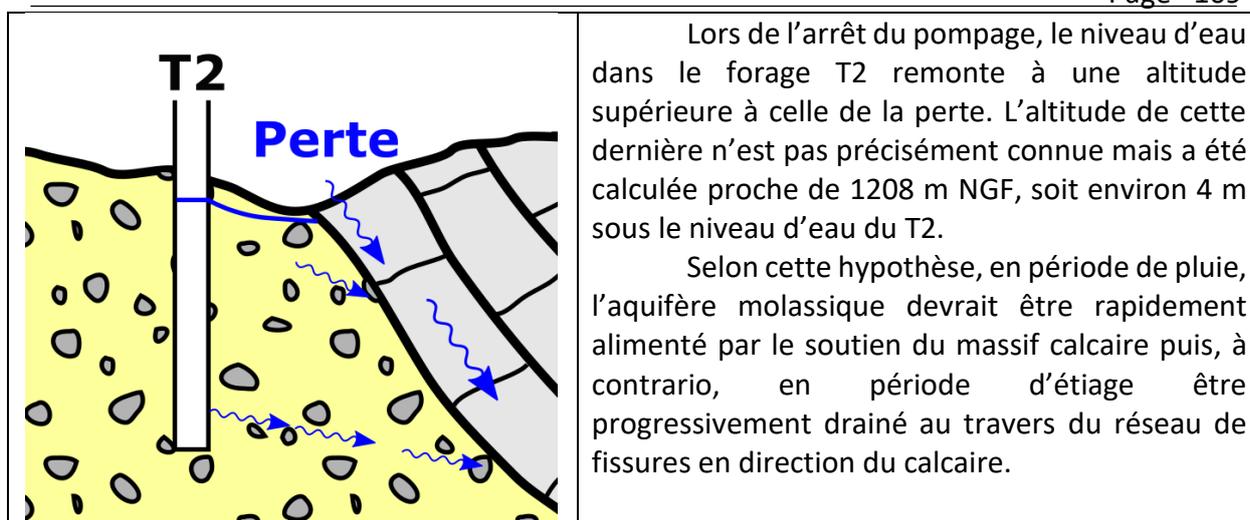


Figure 81 : Interprétation des résultats de traçage entre la perte et le forage T2

Pour confirmer l'hypothèse de vidange de l'aquifère molassique durant les périodes sans pompage, une mesure complémentaire a été menée le 23 mars 2021.

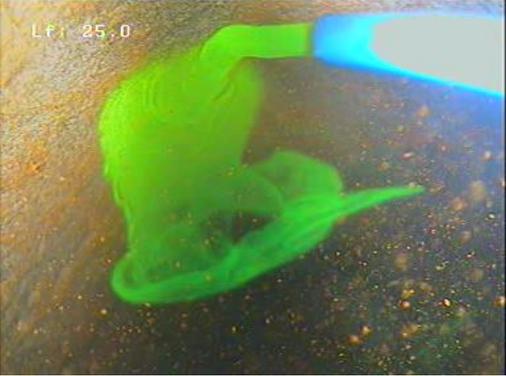
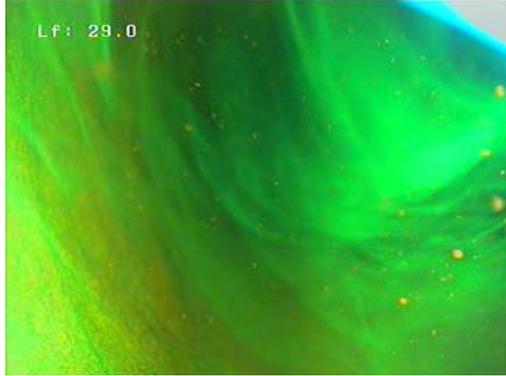
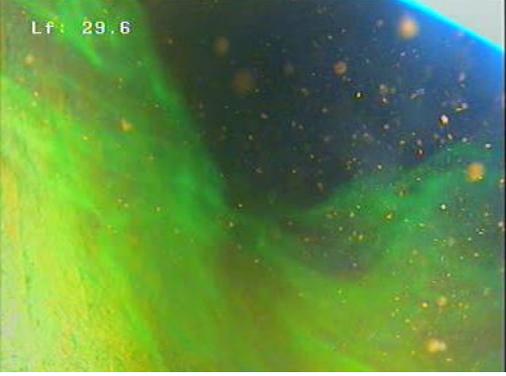
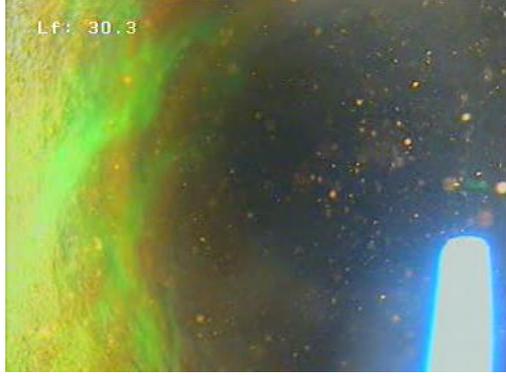
Pour cela, après avoir testé des mesures diagraphiques « heatpulse » peu concluante vis-à-vis des vitesses de sensibilité vraisemblablement trop faibles, nous avons descendu une caméra et en parallèle un tuyau rilsan permettant d'injecter de manière localisée quelques gouttes de colorant (fluorescéine) et de suivre visuellement le mouvement du colorant à l'intérieur du forage :

- Une première injection a été effectuée à 25 m de profondeur, correspondant à la base du tubage acier ;
- Une seconde injection a été effectuée à 65 m de profondeur, correspondant à la zone fracturée.

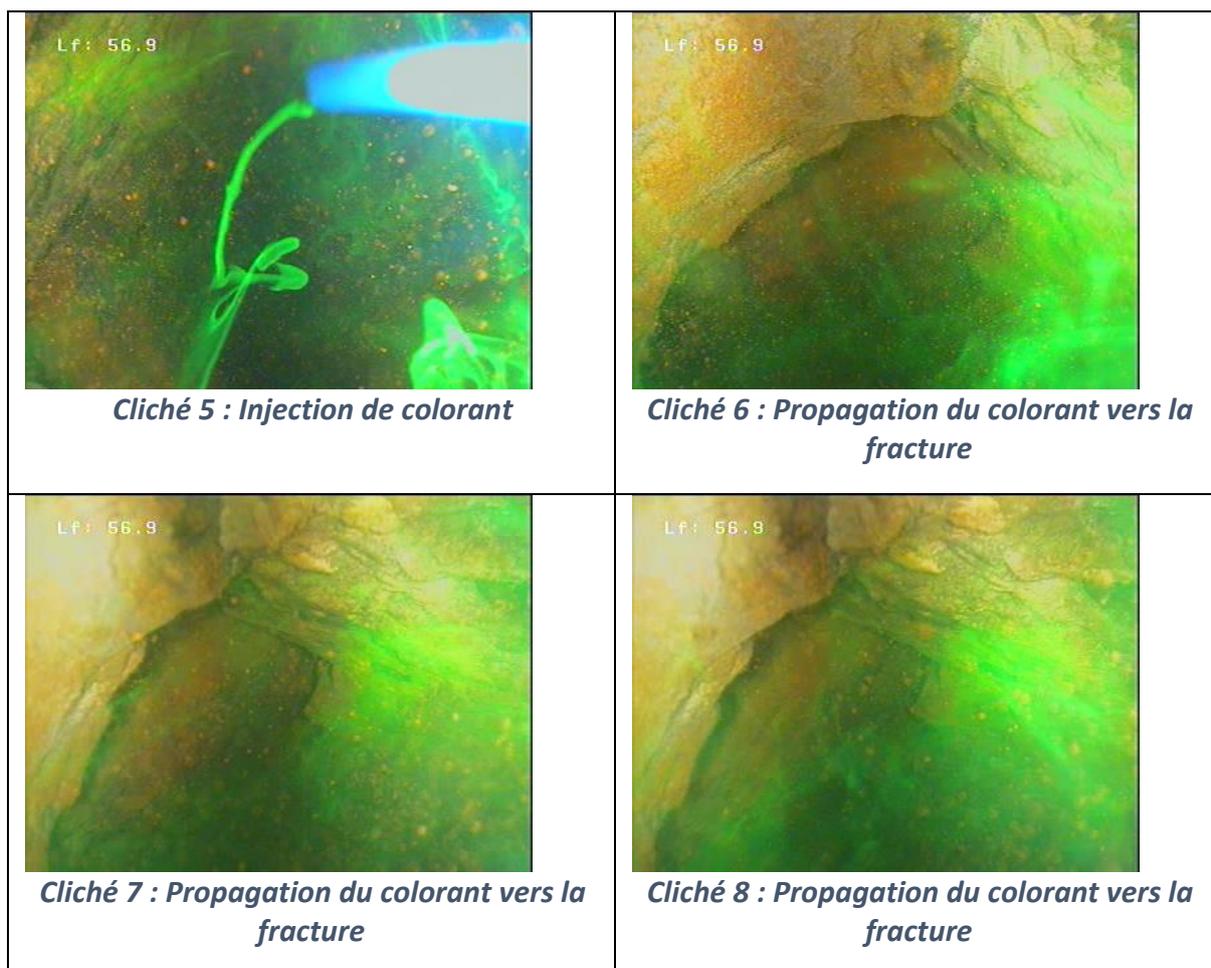
A 25 m de profondeur, nous avons pu mesurer que le colorant descendait à une vitesse de 5 mètres pour 18 minutes, soit une vitesse de descente d'environ 0,28 m/min. Le diamètre du forage étant de 0,16 m, le débit de vidange naturel de l'aquifère (« infiltration profonde ») est estimé 0,3 m<sup>3</sup>/h au niveau du forage T2 (Tableau 30). Si on transforme ces valeurs en transmissivité pour une hauteur de 1 m perméable (zone fissurée), on obtient une valeur moyenne de l'ordre de 8.10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s. Cette valeur est assez comparable à celles calculées en pompage.

A 56,9 m de profondeur, le colorant injecté apparaît naturellement « aspiré » au travers des fractures, ce qui confirme l'hypothèse décrite ci-dessus découlant des résultats de traçage en cours du pompage et la comparaison des altitudes piézométriques statique entre le T2 et la perte (Tableau 31).

**Tableau 30 : Clichés de l'injection de colorant dans le T2 à 25 m de profondeur**

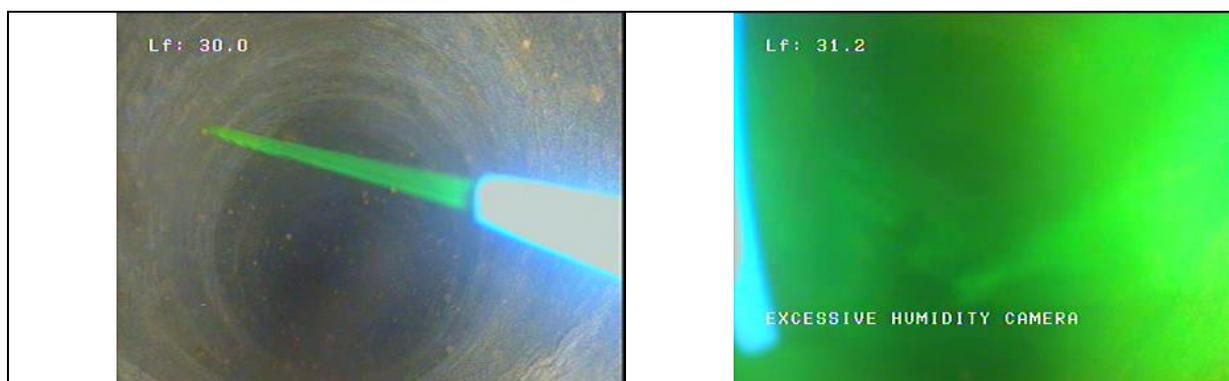
 <p><b>Cliché 1 : Début l'injection du colorant</b></p>	 <p><b>Cliché 2 : Après 18 minutes – descente de la caméra – présence de colorant</b></p>
 <p><b>Cliché 3 : Après 18 minutes – descente de la caméra – présence de colorant</b></p>	 <p><b>Cliché 4 : Après 18 minutes – descente de la caméra – limite basse du colorant</b></p>

**Tableau 31 : Clichés de l'injection de colorant dans le T2 à 56,9 m de profondeur**



La même opération a été réalisée dans le T4, afin de comparer le fonctionnement hydrogéologique avec un forage du « compartiment aval ». Une injection de colorant a été menée à 30 m de profondeur. La circulation d'eau étant négligeable dans le T4, le colorant a eu tendance à s'accumuler au niveau de la profondeur d'injection sans montrer de dispersion ou de migration franche. Après environ 1h30 d'attente, le colorant a montré une baisse d'environ 8 m, soit un débit de circulation inférieur à 0,1 m<sup>3</sup>/h.

**Tableau 32 : Clichés de l'injection de colorant dans le T4 à 30 m de profondeur**



Suite à ces mesures restait encore une énigme à résoudre : pour que le système soit à l'équilibre, il fallait que l'alimentation puisse se faire par les calcaires et que donc la vidange de ceux-ci ne soit pas instantanée. Nous avons donc envisagé de suivre le niveau d'eau au niveau de la perte de la tourbière sud. Le 23/02/2021, lors du retrait des derniers capteurs de suivi en place, nous avons pu constater la présence d'un niveau d'eau. Nous avons donc équipé cette perte d'un capteur, afin de comprendre son fonctionnement.

Les résultats sont présentés à la Figure 82. On constate qu'après 7 jours sans pluies la baisse est lente est continue mais il n'y a pas une vidange brutale. Cela confirme qu'il s'agirait du niveau piézométrique des calcaires crétacés.

On constate aussi qu'il n'y a pas de relation pluie/niveau. Par exemple, mi-mars on enregistre 58 mm de pluie sur 5 jours causant une remontée de 1 m du niveau d'eau de la perte. Puis, le 26/03/2021, on enregistre 14,6 mm de pluie qui a engendré une remontée de 1,4 m du niveau d'eau. Les pluies n'étant pas le facteur direct gérant les fluctuations de niveau, on peut penser qu'elles seraient en lien avec le débit de la tourbière nord, qui fait tampon aux précipitations et les régule. Nous envisagerons donc de suivre de façon plus précise l'une des principales d'entrée de l'eau dans le synclinal.

Les oscillations du niveau d'eau d'environ 20 cm avec une périodicité journalière restent à ce jour inexplicées.

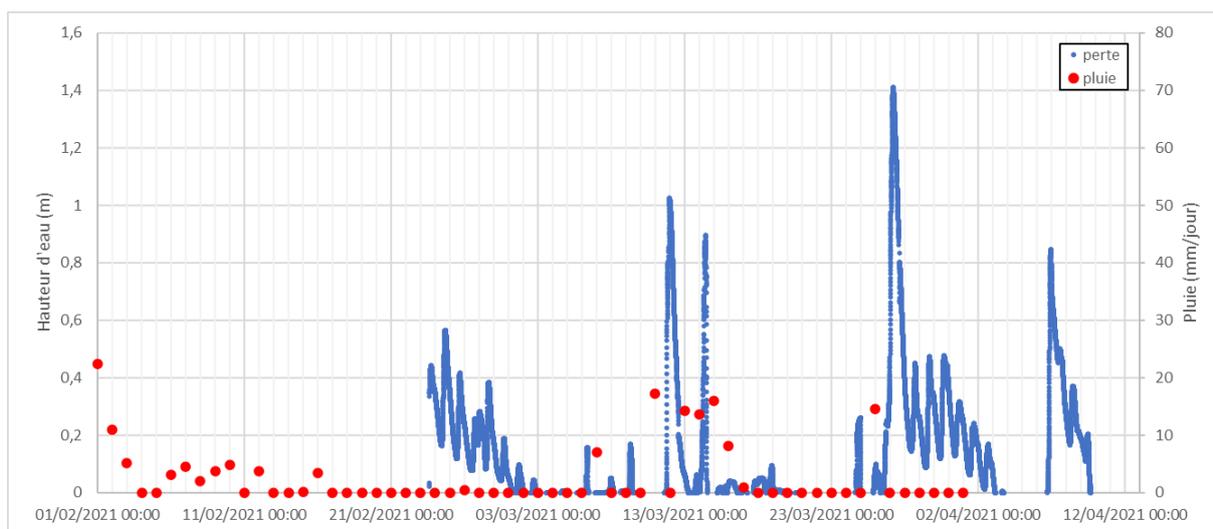


Figure 82 : Hauteur d'eau dans la perte du Talonard et suivi de la pluviométrie



*Figure 83 : Plan d'eau dans la perte le 23/02/2021*

## V. INTERPRETATION

### 5.1. D'un point de vue géologique

#### 5.1.1. Histoire géologique du site d'étude

L'histoire géologique du site peut se résumer en quelques lignes :

- Du trias, il y a plus de 250 M.A., en passant par le jurassique, le crétacé pour s'arrêter au tertiaire à la période du miocène il y a environ 25 M.A., les alpes et le jura étaient un territoire marin.
- Puis il y a 25 M.A., la plaque africaine est venue entrer en collision avec la plaque européenne conduisant au début de la formation des alpes. Au démarrage la surrection et l'émersion de cette chaîne de montagne a été concomitante avec des dépôts importants dans ce que l'on appelle la « mer miocène » - dépôts de type sables, argiles, graviers, galets selon la proximité de la zone d'apport.
- La surrection s'est prolongée pendant tout le miocène, puis le pliocène et continue encore de nos jours. Cette phase tectonique s'est accompagnée de plissements, de failles, de chevauchements selon le type de roche et l'intensité des périodes de compression.
- Cette mer a fini par se combler et, au niveau du jura, la surrection de ces sédiments s'est prolongée jusqu'à plus de 1200 m d'altitude. L'érosion par les pluies, puis les glaciers lors de la phase glaciaire a remodelé le paysage et a fait que l'on ne retrouve à ce jour plus que des lambeaux de ces sédiments à l'affleurement au sein de ces combes synclinales perchées qui s'alignent selon un axe Nord/Sud. On va retrouver ces sédiments dans toute la zone bordant l'arc alpin : en Autriche, en Suisse et en France depuis le jura et sur tout le secteur correspondant à l'axe de la vallée du Rhône actuelle (Figure 84).
- Aujourd'hui cette longue histoire géologique conduit au fonctionnement hydrodynamique actuel des eaux souterraines et c'est en juxtaposant toutes les pièces de ce puzzle, dont nous disposons que nous allons proposer un modèle conceptuel qui nous semble cohérent.

Les pièces du puzzle sont constituées par :

- Les données géologiques (carte géologique, sédiments à l'affleurement...);
- Les résultats des prospections géophysiques ;
- Les analyses physico-chimiques ;
- Les données obtenues à partir des forages de reconnaissance : coupe géologique, pompage, suivi des niveaux, analyses ;
- Les datations.

### 5.1.2. La carte géologique du site d'étude

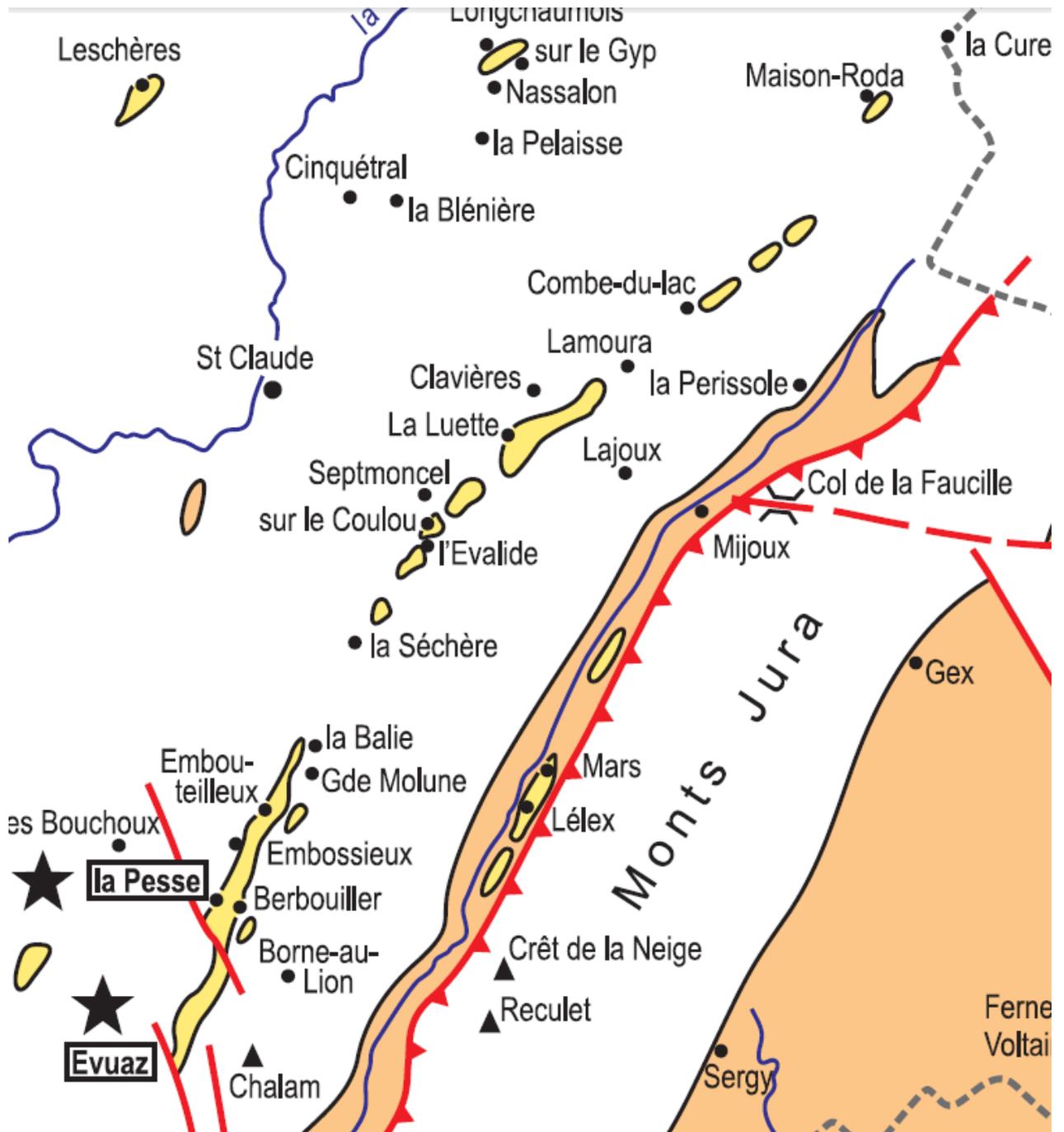
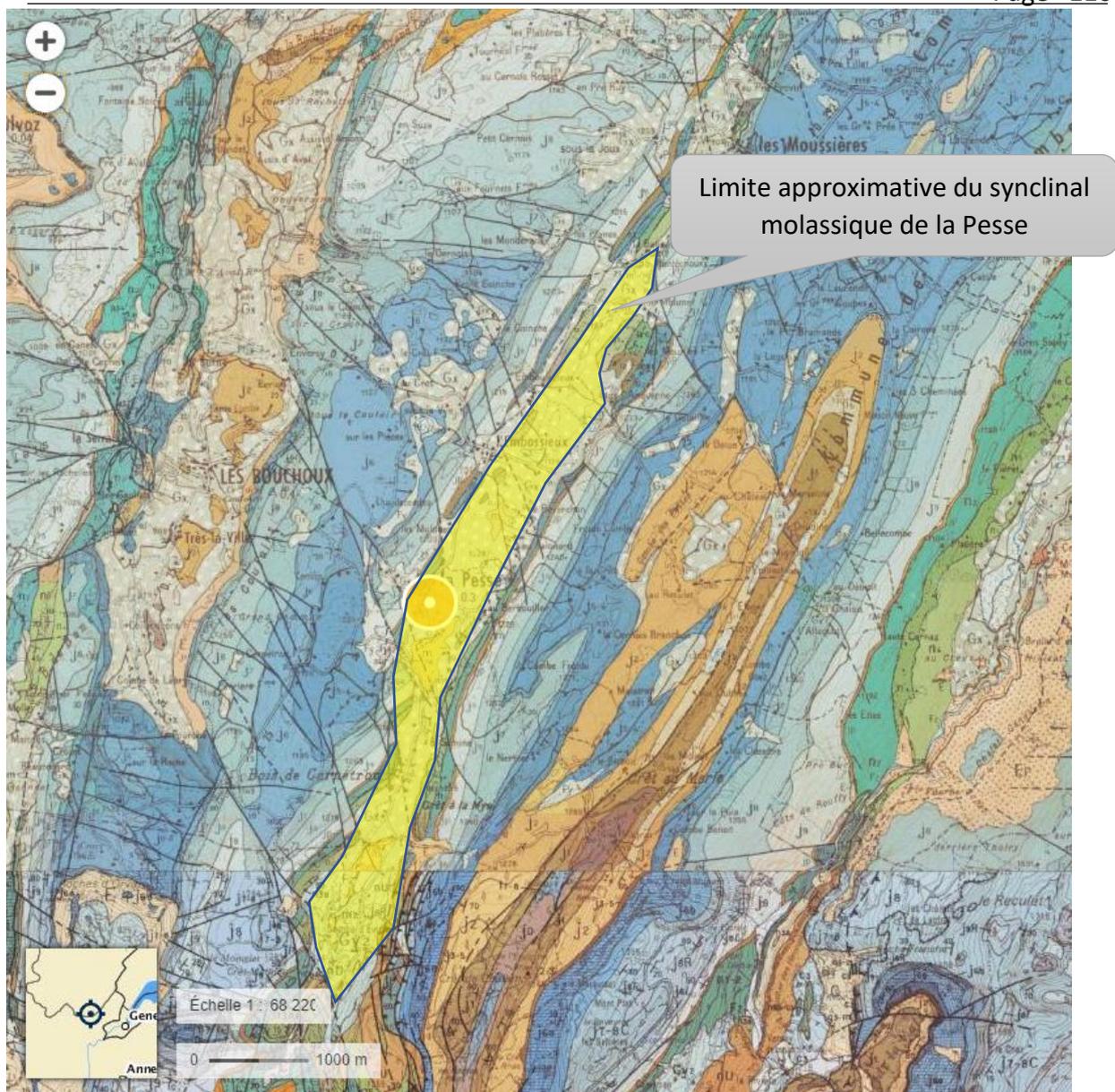


Figure 84 : Localisation des lambeaux molassique secteur jura sud (coloré en jaune)



**Figure 85 : Carte géologique de la zone d'étude**

Sur cette carte, nous avons plus ou moins délimité la zone où se sont déposées les formations de type molassique (sables argileux plus ou moins grésifiés).

### 5.1.3. Coupes géologiques du site

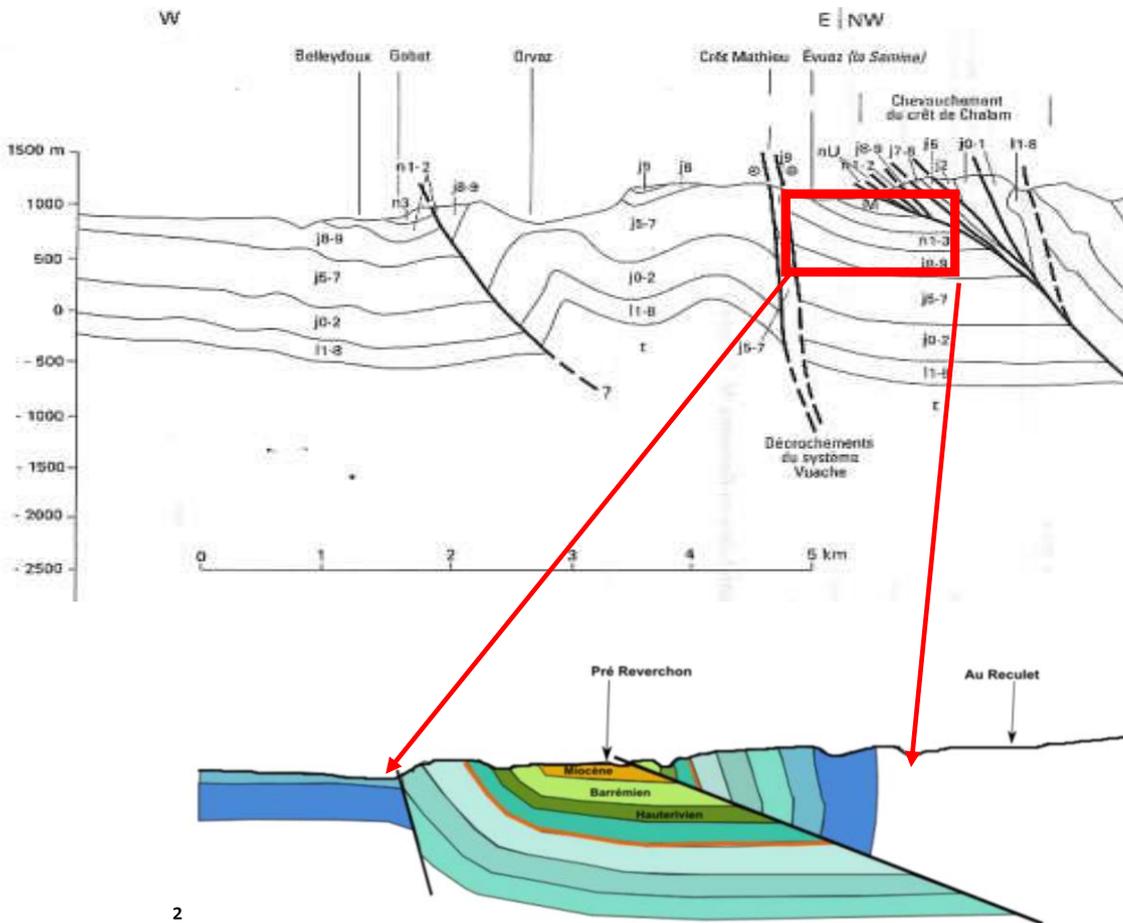


Figure 86 : coupe schématique (d'après rapport BE CAILLE)

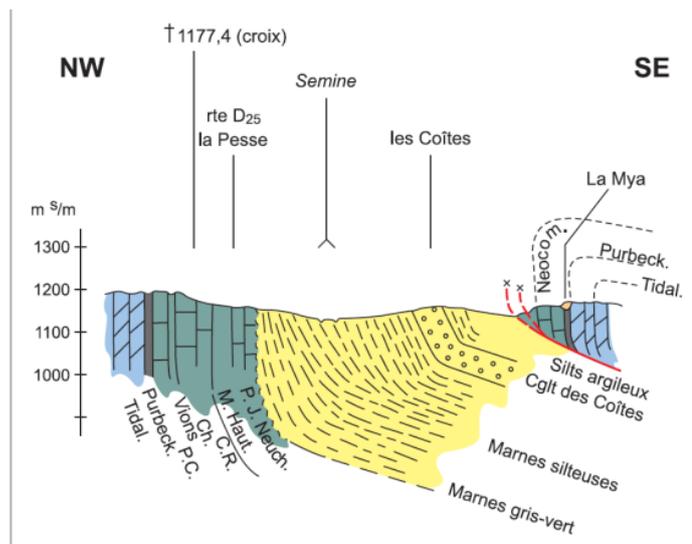


Figure 87 : coupe schématique (d'après Jean CHAROLLAIS)

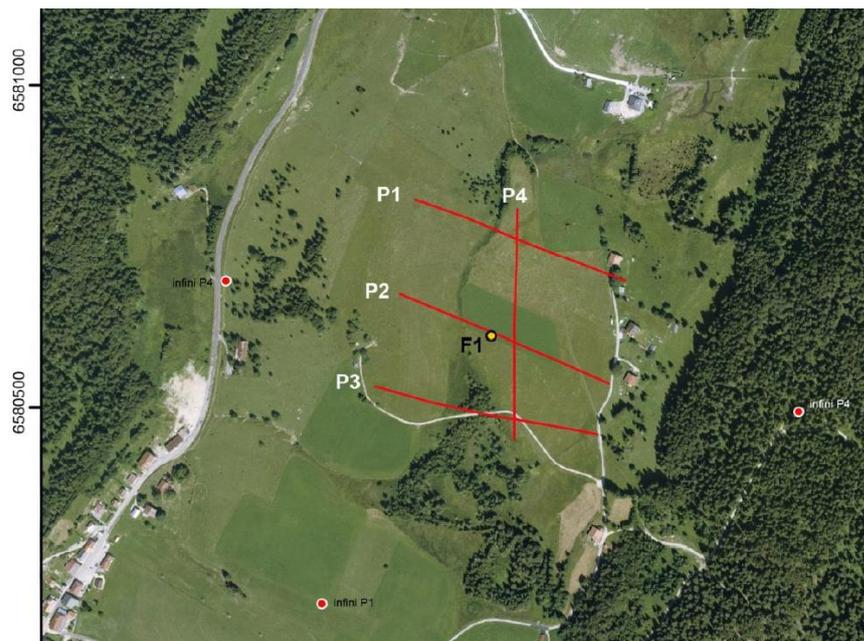
La zone cible de prospection pour la recherche en eau a été ces formations molassiques et il était donc naturel de tenter d'en connaître l'épaisseur et la nature. C'est donc la raison qui

a conduit le BE CAILLE à mettre en œuvre une double prospection : géophysique électrique et sismique réflexion.

## 5.1.4. Prospection géophysique

### 5.1.4.1. Géophysique électrique

Le BE CAILLE a fait réaliser 4 panneaux électriques (Figure 88).



**Figure 88 : localisation des panneaux électriques réalisés**

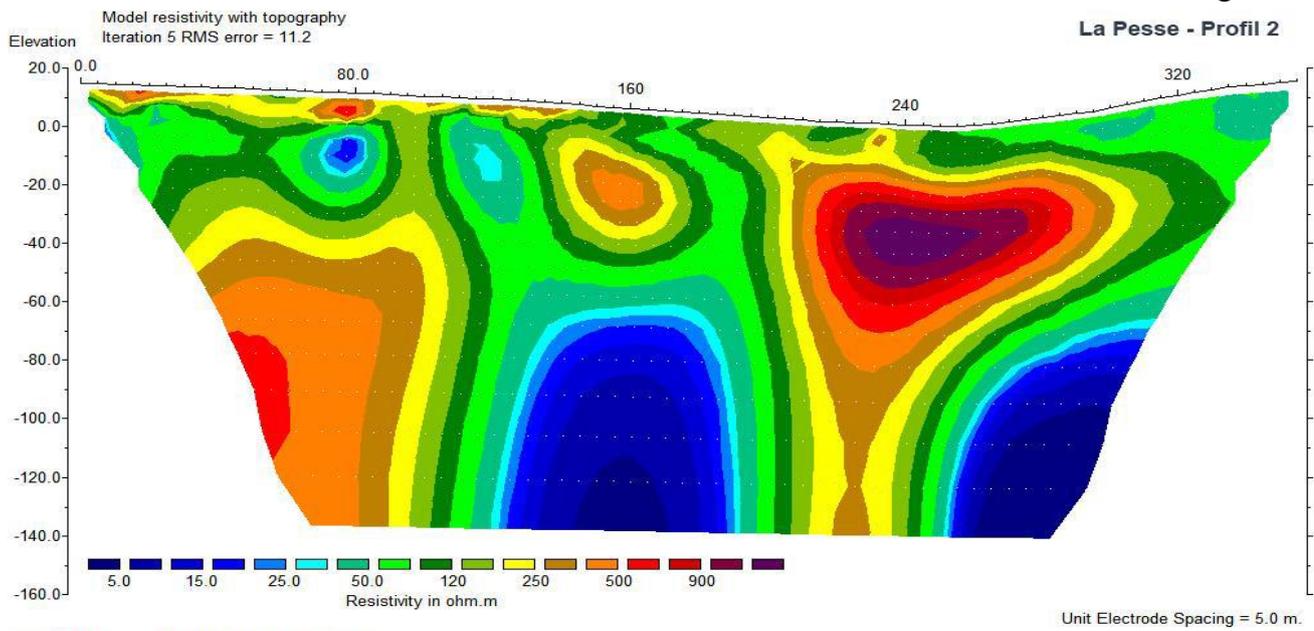
Les 4 profils étant positionnés dans le synclinal molassique, ils n'ont pas permis de matérialiser en termes de résistivité l'interface entre la molasse et les calcaires tout particulièrement au niveau du chevauchement.

De plus la limite de prospection en profondeur est limitée à 140 m, ce qui ne permet pas non plus de pouvoir évaluer l'épaisseur de cette formation dont on savait qu'elle pouvait dépasser une ou plusieurs centaines de mètres.

Nous analyserons seulement les données du profil 2 en y intégrant de façon schématique le contexte géologique.

Concernant les résistivités, on note au centre une zone massive avec de très faibles valeurs (50ohm.m) devant correspondre à un faciès essentiellement argileux et donc peu perméable et latéralement deux horizons fortement résistants avec des valeurs de 500 ohm.m pouvant être attribuées aux grès miocènes. Cette épaisse couche serait de nature à cloisonner ce bassin sédimentaire en deux parties plus ou moins indépendantes

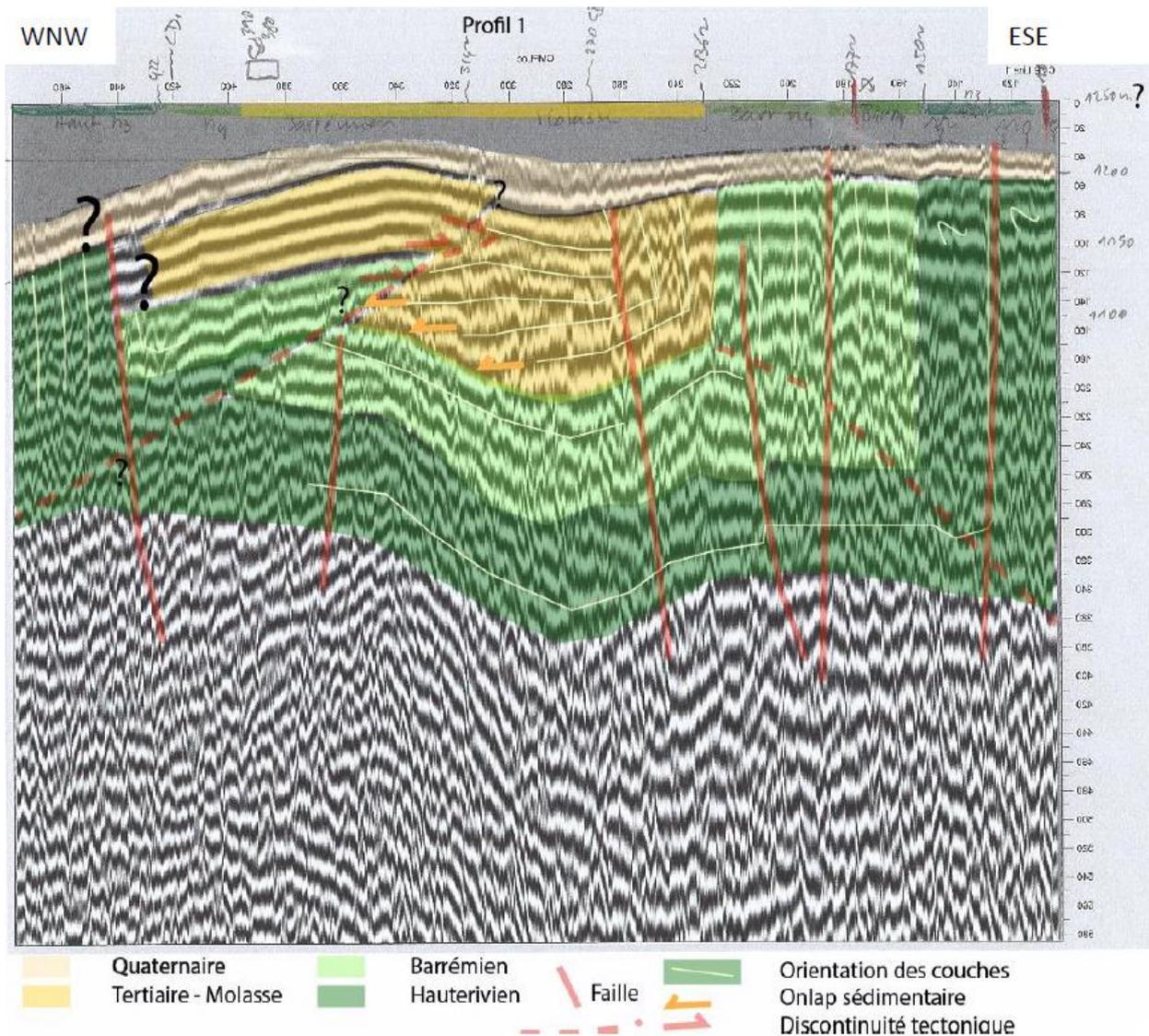
Les argiles étant par nature peu perméables, il faudra donc plutôt rechercher les grés au travers d'une porosité de fracture.



#### 5.1.4.2. Géophysique sismique

Deux profils ont été réalisés et nous reporterons le seul profil sud situé au niveau de la zone du Talonard.





**Figure 89 : profil interprété par Dr. Anna Sommaruga\***

(\* Université Fribourg Département de Géosciences / Unité des Sciences de la Terre)

Cette interprétation ne peut correspondre en termes de profondeur sachant que le forage T1 recoupe la molasse sur 300 m sans rencontrer les calcaires ? Elle serait donc à reprendre avec les données des forages actualisés.

### 5.1.5. Données forages

Les coupes géologiques des différents ouvrages ont été fournies par le BE CAILLE avec une quasi-impossibilité d'établir des corrélations géologiques entre les 4 ouvrages (Annexe).

La multiplication du nombre de faciès : partant des grès et en passant par les grès calcaires, les grès calcaires gris clairs, les grès gris verdâtres, les calcaires gréseux, montre à l'évidence qu'il n'existe pas de formations bien caractérisées et facilement identifiables mais plutôt une infinité d'horizons passant progressivement de l'un à l'autre.

D'autre part, il n'a pas été rencontré de faciès franchement argileux. D'une façon générale ce sont plutôt des formations consolidées sans porosité mais parcourus par quelques fractures ou fissures, voire des marnes plus ou moins indurées. Cela est confirmé par les caméras, qui ont été réalisées mais aussi par les pompages qui ont été effectués sans tubage et pour lequel l'eau a toujours été indemne de toute turbidité ou venue de particules grossières.

Cette déduction est confirmée par la coupe transversale établie par le BE CAILLE, où sont représentées les venues d'eau sur chaque forage.

Pour la localisation des coupes voir Figure 21.

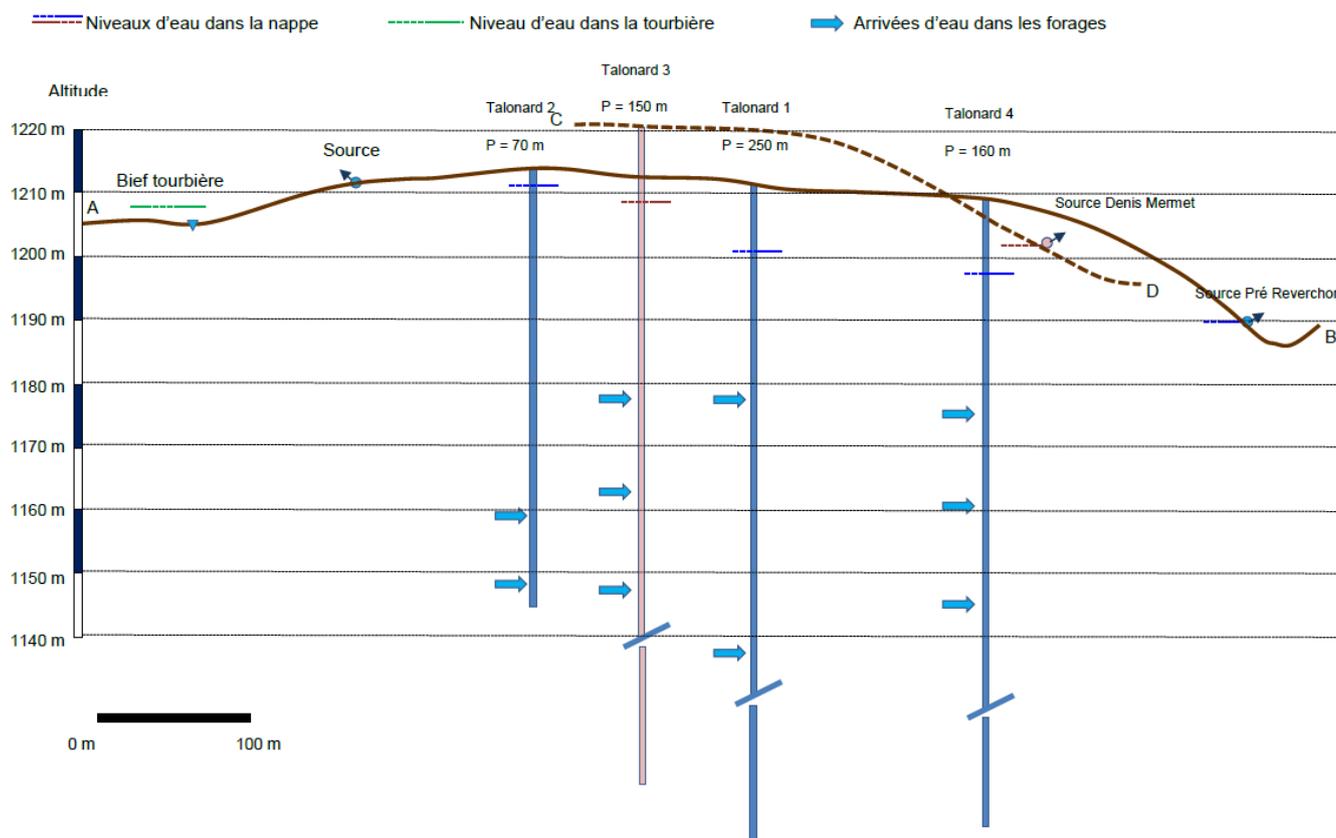


Figure 90 : Localisation des venues d'eau au niveau des forages (BE CAILLE)

Ces venues sont toutes situées au-delà de 30m de profondeur, au-delà de toutes communications directes et rapides avec l'aquifère superficiel.

Si on reprend les coupes des 4 forages fournies par le BE CAILLE uniquement pour la partie supérieure, on a pu tracer une coupe transversale (Figure 91). Nous y avons aussi positionné les niveaux statiques de chaque aquifère ou pseudo-aquifère et les venues d'eau de l'aquifère molassique notée par le foreur et en gris foncé la partie étanche à l'extrados du tube acier. Cela nous permet d'avancer quelques conclusions :

- Le remplissage recouvrant la molasse est irrégulier et d'une faible épaisseur. Il serait de quelques mètres (1 à 3m ?) et globalement constitué d'une argile plus ou moins sableuse peu perméable. L'entreprise de forage, lors de la foration rapide de cet horizon n'a pas noté la présence d'eau.
- Nous n'avons pas de limite très précise de cette interface de recouvrement avec la molasse. Les tubages acier posés par l'entreprise de forage sont de l'ordre de 10 à 14 m de longueur, chose un peu étonnante pour un recouvrement de 1 à 3m d'épaisseur. Ce tubage n'avait pas été cimenté confirmant que l'entreprise n'avait pas noté la présence d'eau mais qu'elle l'avait installé plutôt par sécurité.
- La description géologique de la partie molassique supérieure est : grés fins – grés calcaires – calcaires argileux – marno-calcaires. Soit des roches imperméables.
- Les premières venues d'eau sont situées au plus tôt à plus de 20 m de profondeur et toujours bien en-dessous du niveau statique montrant que cet aquifère est toujours captif.
- Il n'y a aucune relation entre les niveaux de la nappe de la molasse et les niveaux des circulations d'eau superficielles.

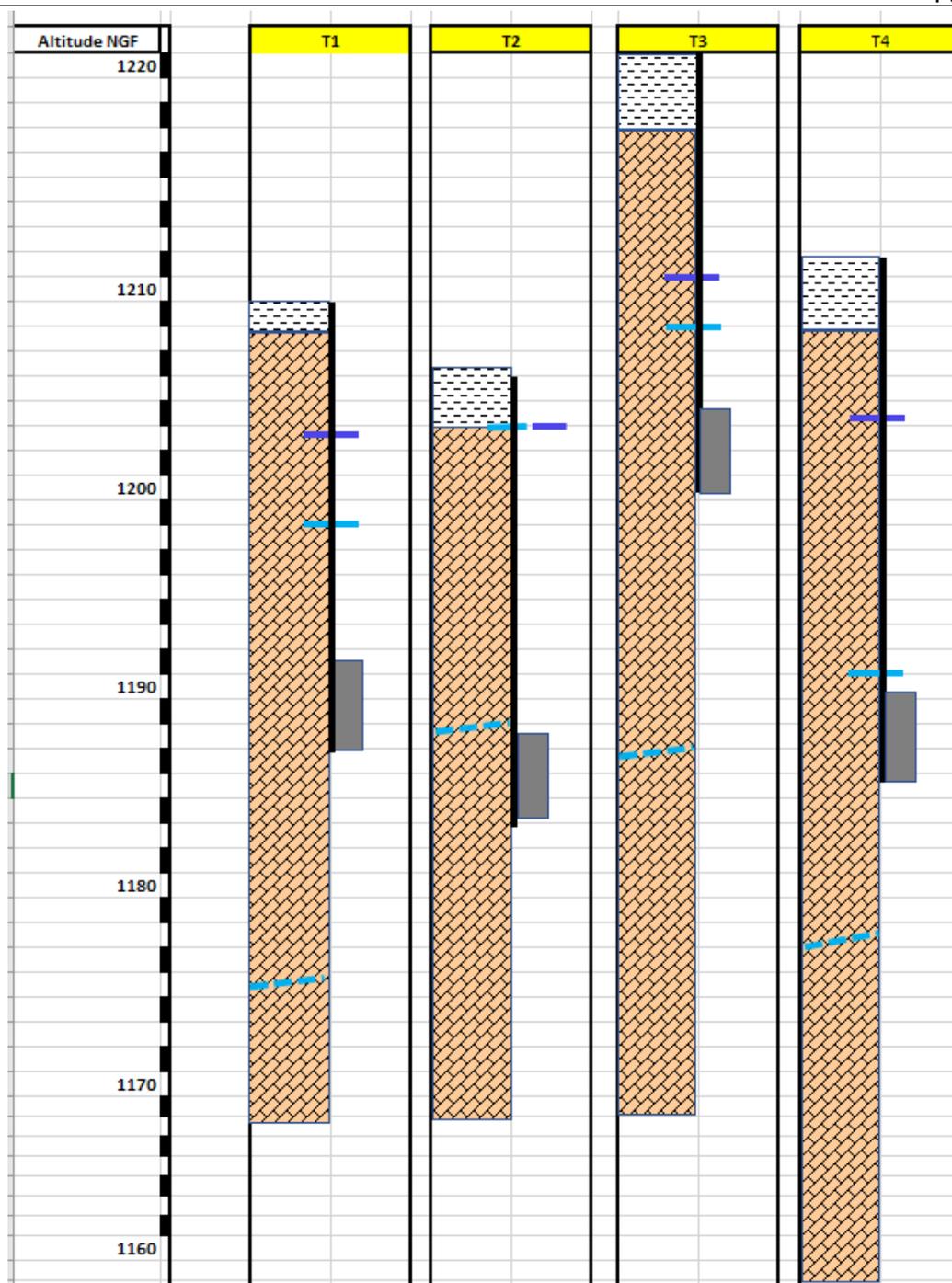


Figure 91 : Coupe synthétique des éléments de la zone de sub-surface

D'un point de vue géologique, la formation aquifère correspond à de la molasse contenue au sein d'un synclinal (chevauchant ? coffré ?) calcaire.

Par-dessus, un recouvrement morainique glaciaire coiffe latéralement les formations molassiques.

Au cœur du synclinal des formations fluvio-glaciaires se sont déposées et sont à l'origine de zones d'émergence des différentes sources (source Mermet et source Pré-reverchon).

Sur le flanc Est de la bordure molassique, on note un certain nombre de dolines alignées selon l'axe Nord/Sud traduisant le développement d'un réseau karstique. Réseau qui draine les

eaux de ruissèlement et plus particulièrement celles issues de la tourbière sud au niveau de la perte.

Enfin deux tourbières se sont développées sur un substratum argileux imperméable, résidus de l'époque glaciaire.

## **5.2. D'un point de vue hydrogéologique**

D'un point de vue hydrogéologique, le site du Talonard se compose :

- **De circulations d'eau** contenue dans les formations de recouvrements glaciaires et alimentant l'ensemble des sources superficielles (Mermet, Pré-reverchon et Durrafourg Regard). Seule, la source Mermet présente un intérêt par son débit et par sa pérennité. Les autres ont montré qu'elles n'étaient pas pérennes en période d'étiage et cela sans qu'il y ait de relations avec les prélèvements sur l'aquifère molassique ;
- **De zones de tourbières** formant de petites réserves qui sont alimentées par les pluies, mais aussi par les bassins d'alimentation calcaire de bordure. Leurs fonctionnements sont différents, mais nous avons pu montrer que les prélèvements au niveau de la molasse n'avaient pas d'impact quantifiables. Leur principal intérêt est de servir de réserve tampon et de permettre que les petits ruisseaux qui en sortent ait actuellement une pérennité tout au long de l'année ;
- **Un ou deux aquifères au niveau des calcaires** crétacés et jurassiques (nous pensons qu'ils peuvent être plus ou moins indépendants). Nous pourrions suivre celui du crétacé au niveau de la perte.
- **La nappe profonde** contenue dans les formations molassiques ? C'est cette dernière qui pourra être utilisée pour l'alimentation en eau potable du syndicat.

*Lors de la réalisation des essais, nous avons suivi de façon plus ou moins continu l'ensemble de ces différents systèmes.*

Les circulations qui se font au travers des terrains de recouvrement restent discontinues. A ce jour, seul la source Mermet a montré sa pérennité. Pour les autres :

- Pré-Reverchon n'a jamais coulé pendant toute la durée de l'étude, si ce n'est quelques suintements qui sont apparus fin décembre ;
- Le Regard et la tourbière Durrafourg étaient secs avant le démarrage du pompage.

L'alimentation se fait principalement par les précipitations, de façon accessoire et diffuse par la butte morainique qui pourrait emmagasiner l'eau dans quelques petits horizons perméables et la restitue ensuite (comme cela doit se faire au niveau de la Tourbière Durrafourg dont l'eau montre une conductivité de 300  $\mu\text{s/cm}$  ; bien différente de l'eau de pluie). Elle pourrait également se faire par drainance depuis la molasse en charge. Si c'est le cas, cela resterait de façon extrêmement réduite au travers de petites fissures comme l'ont montré la quasi-totalité des mesures effectuées.

Un point n'a toujours pas été élucidé. Il s'agit de la relation existante entre le démarrage du pompage sur T3 et la baisse de débit quasi instantanée de la source Mermet. La finalisation

de l'équipement de ce forage (cimentation jusqu'en surface) et un traçage par injection d'un colorant depuis la surface à proximité du forage T3, en périphérie de l'ouvrage, permettrait de savoir s'il y a une communication rapide et nous aider dans la compréhension du système local.

La **nappe miocène** présente un fonctionnement hydrogéologique complexe matérialisé :

- Par le fait que les niveaux piézométriques des 4 forages en statique ne semblent pas avoir un gradient régulier et homogène ;
- Par l'absence de fluctuations synchrones. Les forages T1 et T4 fonctionnent de façon différente des forages T2 et T3 ;
- Par le fait qu'il n'y a pas de pseudo stabilisation du niveau de l'aquifère (tendant vers un équilibre), mais inversement soit des périodes de remplissage (suite aux pluies), soit des périodes de vidange (dès que les pluies - donc l'alimentation - s'arrête).

Au-delà de ces pseudo-anomalies », il reste des paramètres plus classiques tels que :

- Une transmissivité des différents forages compris entre 1 et  $2 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s correspondant à un aquifère gréseux peu productif. L'eau contenue au sein de cet aquifère semble circuler de façon préférentielle au travers des petites fissures et peut-être de façon anecdotique par la porosité matricielle de la roche ;
- Un rayon d'action de 150 à 300 m ;
- Un coefficient d'emmagasinement de l'ordre de 0,003 %.

D'un point de vue fonctionnement hydrogéologique général, nous sommes arrivés à la conclusion que cet aquifère se différencie en deux compartiments, séparés par une « barrière hydrogéologique semi-étanche ».

- Le compartiment amont, représenté par les ouvrages T2 et T3, est situé proche du versant calcaire au Sud. Ce dernier présente une altitude piézométrique relativement élevée et une bonne réactivité aux précipitations, ce qui conduit à imaginer ; puis à vérifier qu'il y a une communication avec les calcaires crétacés de bordure en période de pompage quand le niveau d'eau sur le forage est beaucoup plus bas que celui de la perte.
- Le compartiment aval est représenté par les forages T1 et T4. Il présente une altitude piézométrique plus basse et des variations décalées et amorties par rapport aux précipitations. Cela traduit un temps de circulation des eaux souterraines plus long ou tout au moins avec des pertes de charges supérieures pour recharger ce compartiment.

La continuité hydrogéologique entre ces deux compartiments existe malgré tout et elle a été mise en évidence en pompage. Néanmoins, l'interface schématisé par la « barrière hydrogéologique » freine l'écoulement des eaux du compartiment amont vers le compartiment aval induisant un fort gradient hydraulique expliquant cette différence d'altitude piézométrique et les différences quantitatives et qualitatives des eaux captées.

Les différents résultats obtenus sont reportés sur le Tableau 33.

Forage	T1	T2	T3	T4
Profondeur (m)	254	73	152	170
Transmissivité	$2 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$

**Tableau 33 : Données hydrogéologiques synthétiques des 4 forages**

Il y a assez peu d'écart et il semblerait que malgré les gros écarts de profondeurs entre ces forages les différences de débit spécifique sont faibles comme si les principales venues d'eau (zones fissurées) étaient situées dans la partie moyenne (30 à 150 m ?).

### **5.3. D'un point de vue hydrochimique**

Nous avons pu séparer différents types d'eau :

- Les eaux des forages T1 et T4 bicarbonatée calcique et magnésien ;
- Les eaux des forages T2 et T3 qui sont bicarbonatées calcique.

Les eaux des forages T2 et T3 seraient anciennes (une à plusieurs dizaines d'années) avec peut-être une faible part provenant d'eau de surface. Mais il reste encore quelques incertitudes sur cette relation eau de surface – eau profonde.

Les eaux du T1 serait plus ancienne et d'avant 1952 (origine des premiers tirs atomiques).

Les eaux du T4 nécessiteront quelques compléments d'analyse isotopique.

- Les eaux des tourbières sont un mélange provenant d'origine différente avec des conductivité plus variables.
- Les eaux de source sont comme pour les tourbières un mélange de provenances diverses.

### **5.4. Proposition d'un modèle de fonctionnement conceptuel**

Pour présenter ce modèle, nous nous sommes appuyés sur les différentes pièces du puzzle que constitue :

- Le cadre géologique ;
- Les données géophysiques ;
- Les résultats des pompages d'essai ;
- Le suivi en long de tous les points d'eau (pendant une année) ;
- Les analyses physico-chimiques ;
- Les données de datation ;
- La coupe schématique réalisée par ISSKA sur le bassin de Morteau et que nous avons trouvé en bonne adéquation avec notre bassin.

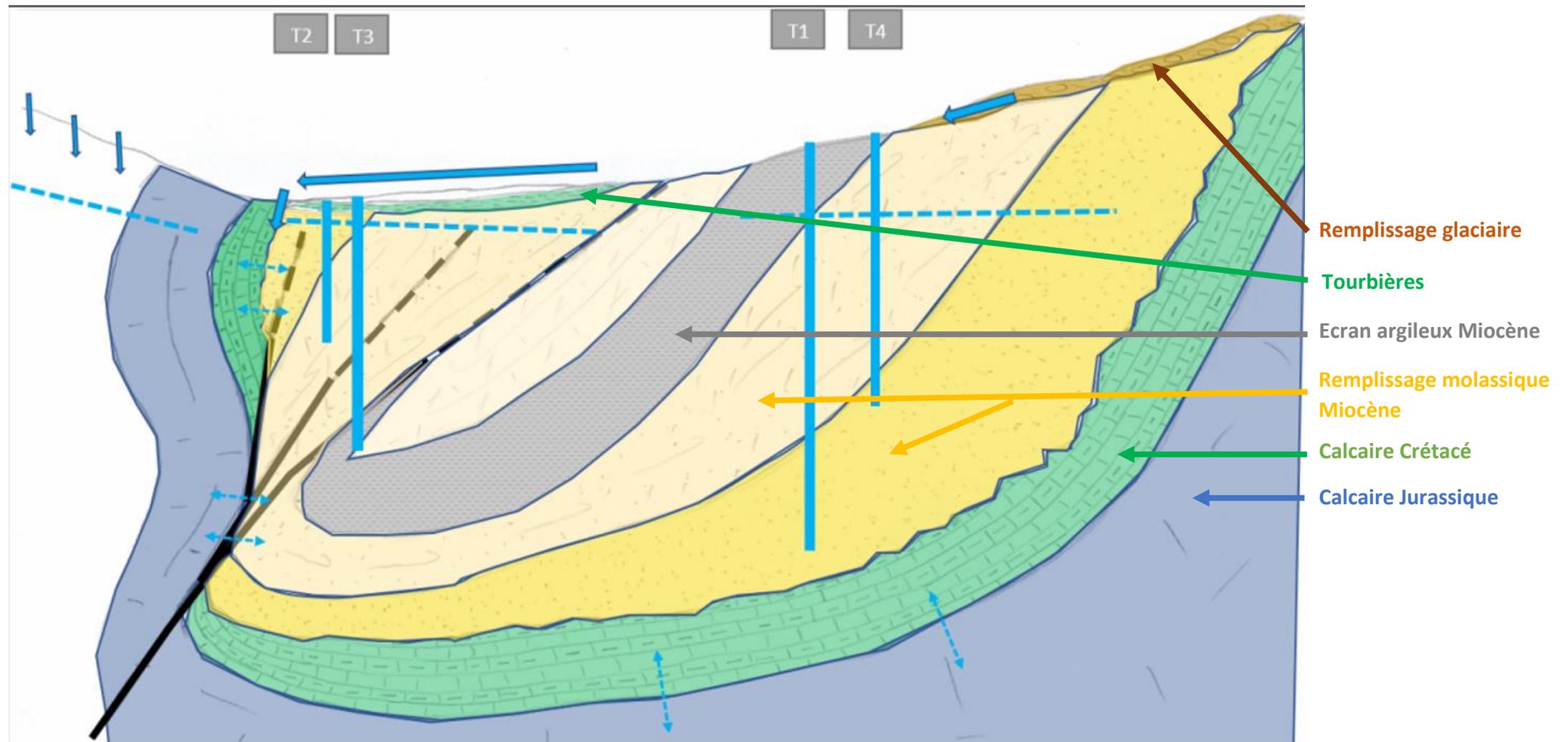


Figure 92 : Modèle conceptuel de fonctionnement du bassin sédimentaire du Talonard

Sur ce schéma conceptuel, l'aquifère est représenté en coupe et de façon perpendiculaire aux structures géologiques. Toutefois, pour bien comprendre le fonctionnement global du site, il est essentiel d'avoir une conception en 3 dimensions du site en considérant que les écoulements d'eau peuvent de faire de manière « perpendiculaire à la feuille », le long de la gouttière synclinale au niveau du contact entre la molasse miocène et les calcaires crétacés.

On sait, par les données à l'affleurement mais aussi par les coupes des forages le recoupant le synclinal, que les calcaires crétacés sont composés de nombreuses intercalations argileuses le rendant peu perméable. Par contre, il semble qu'au contact du chevauchement cette série soit localement et par les fractures le siège d'écoulement importants (dolines bien visuelles le long du contact avec la molasse). Ces écoulements suivent la pente naturelle qui les conduit vers le Flumen. Ils peuvent se faire de façon indépendante des circulations avec les calcaires du Jurassique.

Les strates molassiques déposées de manière horizontale avant la surrection du Jura présentent vraisemblablement actuellement une forme plissée voire écrasée en suivant plus ou moins la forme de l'encaissant calcaire. La déformation et l'écrasement de ces formations gréseuses combiné à un niveau potentiellement plus argileux forme une interface peu perméable, schématisée par une « barrière hydraulique ». Cette dernière est représentée sous une forme lenticulaire dans le sens du plissement. L'étendue réelle de ce niveau apparaît nécessairement plus complexe avec une étendue non connue précisément, mais qui se dessine en partie haute sur les profils de géophysique électrique. C'est cet écran qui cloisonne la série et engendrent les différences de comportement hydrodynamiques entre les 4 forages et qui leur donne aussi ces écarts dans la composition chimique.

Enfin et c'est aussi un des éléments le plus important, la réalimentation de cet aquifère que l'on pouvait supposer se faire par les précipitations locales se fait en réalité de façon quasi exclusive au travers des circulations par l'encaissant. Il y a un équilibre entre les niveaux d'eau dans les calcaires (crétacés et on peut le supposer aussi ceux du jurassique) avec la série molassique. Quand il pleut, le karst se met en charge et la molasse se remplit rapidement pour T2 et T3 et plus lentement pour T1 et T4 et pendant les périodes de sécheresse la molasse se vidange dans les calcaires avec un amortissement de cette vidange quand les niveaux baissent. **On peut donc voir cet aquifère comme une sorte de bassine perchée qui forme comme un réservoir d'eau faisant tampon et dont l'exploitation ne modifiera que peu son fonctionnement actuel.** Le bassin d'alimentation étant en très grande partie située sur la partie Est du bassin mais aussi par la perte du Talonard et donc le tout le petit bassin versant qui l'alimente (Figure 93).

Les eaux de surface de leur côté alimentent les tourbières et les petits points d'eau locaux. Reste la source Mermet qui est impacté, sans que l'on sache à ce jour si c'est encore par l'étanchéité non totale du T3 ou par une fracture autour du T3. La cimentation finale et le traçage au niveau du T3 permettront, nous l'espérons, d'arriver à mieux comprendre comment fonctionne cet ensemble.

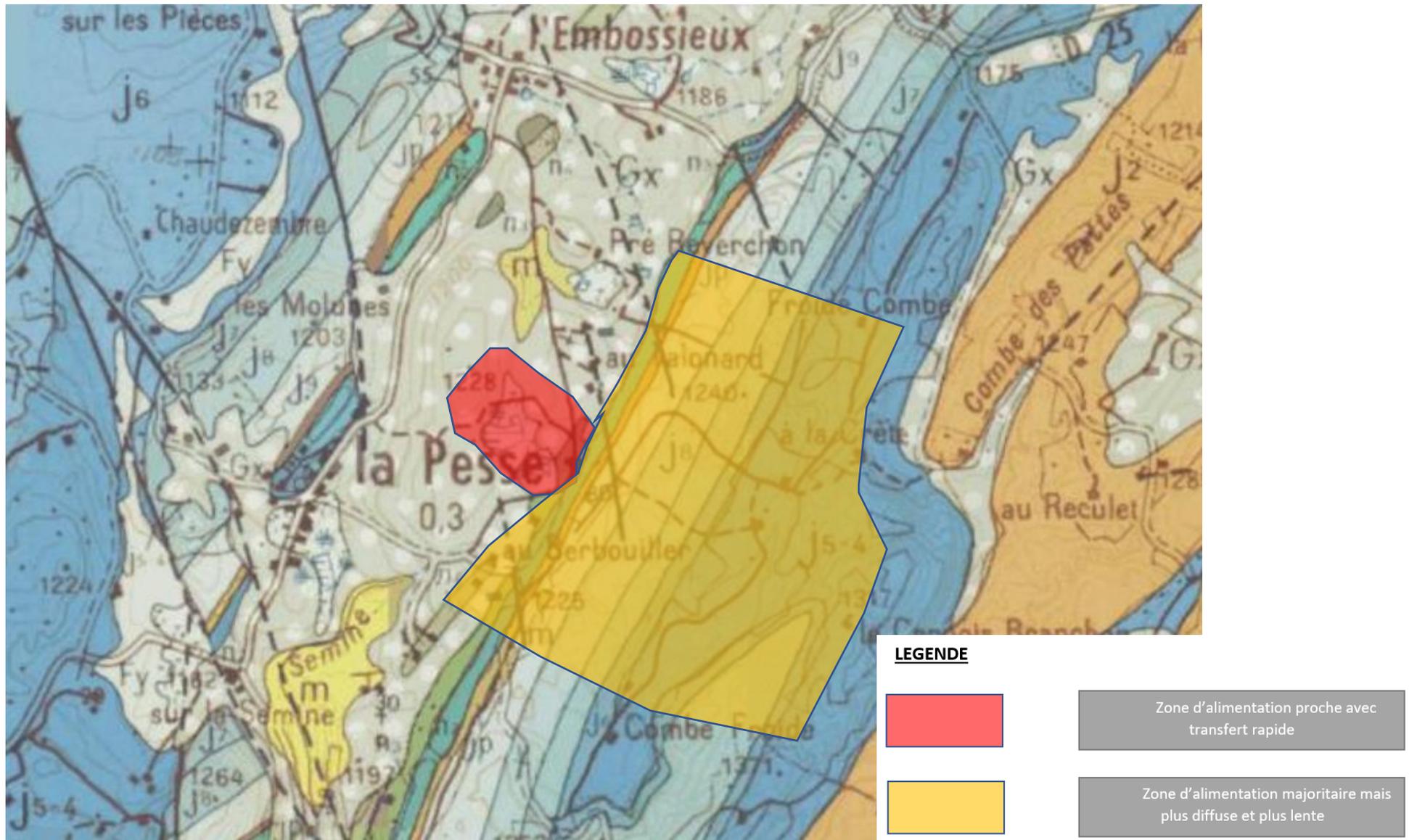


Figure 93 : bassin d'alimentation des forages du Talonard

## VI. CONCLUSIONS – PRECONISATIONS

### 6.1. Conclusions

#### 6.1.1. D'un point de vue quantitatif

Nous avons résumé les résultats dans le Tableau 34. Il présente les quantités utilisables actuellement pour chaque forage.

Forage	T1	T2	T3	T4	Total m3/h	Total m3/jour
Niveau dynamique maximum préconisé	100	45	80	80		
Débit maximum (20h/jour de pompage)	5	4	3	2.5	14.5	290
Débit de pointe (selon niveau dynamique)	6	6	6	3	21	

*Tableau 34 : Débits utilisable par forage*

Ces débits sont légèrement en dessous des besoins du syndicat, qui nous le rappelons sont voisins de 400 m<sup>3</sup>/jour.

De plus, nous manquons de données sur l'évolution des niveaux en période d'étiage (réalimentation) sur une longue période comme par exemple 2 à 3 mois sans aucune précipitation. A savoir que le changement climatique, selon les prévisions météorologiques, pourrait nous conduire vers cette éventualité. Toutefois, les simulations que l'on peut faire sont plutôt favorables, car cette réalimentation qui se fait au travers des formations calcaires situées sur toute la partie Est de ce bassin a une très grande extension et donc emmagasine des quantités d'eau conséquentes permettant de soutenir le remplissage de l'aquifère molassique.

Enfin, nous préconisons d'utiliser le forage T3 uniquement en dernier secours afin, autant que faire se peut, de conserver la source Mermet.

Ces débits d'exploitation ne tiennent pas compte non plus de problèmes techniques sur un des forages, par exemple avec une mise en arrêt pendant quelques jours à quelques semaines.

Les tourbières forment un système quasiment totalement indépendant et il ne devrait pas y avoir de changement sur leurs fonctionnements. Ces formations de surface sont des réserves en eau et tamponnent les précipitations. **Elles seront d'autant plus utiles dans le futur**, si les précipitations se font de façon plus violentes et moins régulières (orage).

### **6.1.2. D'un point de vue qualitatif**

Les premiers résultats sont très favorables aussi bien d'un point de vue chimique que bactériologique. Les eaux pompées sont de type bicarbonaté calcique pour T2 et T3 et un faciès plus magnésien pour les T1 et T4.

Les teneurs en nitrates sont proches de zéro et on note aussi l'absence de pesticides.

Le modèle conceptuel de fonctionnement proposé conduisant à une proposition de délimitation d'un bassin versant est extrêmement favorable à l'utilisation de cette ressource, dont les apports anthropiques sont quasiment inexistantes sur toute la surface et ne devraient pas évoluer de façon péjorative dans l'avenir.

Reste la « perte active » qui fait partie du système, même si sa contribution reste faible elle intervient directement dans l'alimentation du T2 et cela d'autant plus que l'ouvrage sera exploité. La tourbière sud qui alimente la perte devra donc faire partie de la zone à protéger.

## **6.2. Préconisations**

### 6.2.1. D'un point de vue quantitatif

Le but serait de réaliser 2 à 3 nouveaux forages sur un nouveau site, où se sont déposées les formations molassiques. Pour s'approcher d'un débit total de 20 m<sup>3</sup>/h pour les besoins en période de pointe et sécuriser l'alimentation par le nouveau champ captant, voire de disposer d'une réserve, car les possibilités de diversifications sont extrêmement réduites. Le captage actuel de l'Embouteilleux fourni des eaux de qualité médiocre, il n'est pas facile à exploiter et a un coût de fonctionnement élevé. Le but serait donc de le fermer au plus tôt.

Pour cela des prospections seront conduites en restant toujours sur la commune de la Pesse.

Nous avons acquis beaucoup de données pendant cette année sur la dynamique des aquifères. Il s'agira de prolonger ces acquisitions (niveaux – débits – conductivités – température - ..) qui permettront d'assurer au mieux une gestion de cette ressource sur le long terme. Le but étant de ne pas surexploiter la ressource et de ne pas causer des effets néfastes environnementaux. Chaque année ces données seront récupérées et analysées et feront l'objet d'un compte rendu détaillé.

### 6.2.2. D'un point de vue qualitatif

Nous suivrons les résultats analytiques qui seront effectués par l'ARS et les premiers résultats permettront de les ajouter au compte rendu annuel.

### 6.2.3. D'un point de vue technique

Le rechemisage de ces forages est prévu comme suit :

- 1- Complément par du ciment entre les tubes acier en 219 et 168 mm ;
- 2- Sur T1 – T3 – T4 : Pose d'un PVC 126/140mm de 0 à 110 m crépiné sur 20 m et centré servant à protéger la pompe immergée ;
- 3- Sur T2 pose d'un PVC 126/140mm jusqu'à la base de l'ouvrage avec massif filtrant siliceux pour limiter la turbidité au démarrage.

#### 6.2.4. D'un point de vue plus général

Les premiers résultats de datation demandent des compléments et une étude pourrait être réalisée avec l'appui de l'Université d'Avignon.

D'autre part au niveau de ce bassin, nous n'avons pas ou peu de connaissances sur comment se répartissent les eaux de pluies au niveau du petit bassin molassique entre :

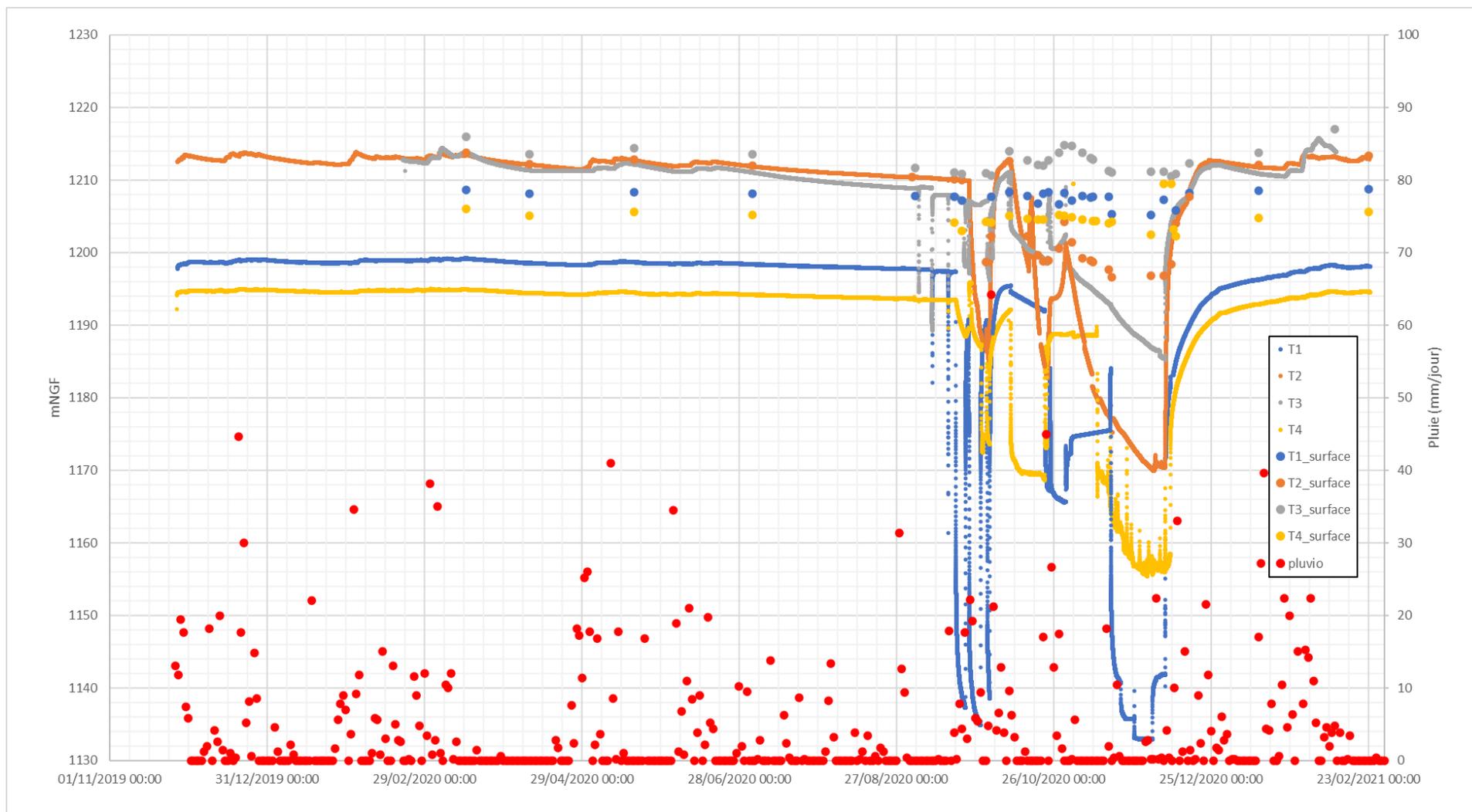
- Le ruissèlement ;
- L'évapotranspiration ;
- L'infiltration.

Pour arriver à obtenir ces données nous proposerons des compléments d'étude que nous avons d'ores et déjà plus ou moins envisagé avec :

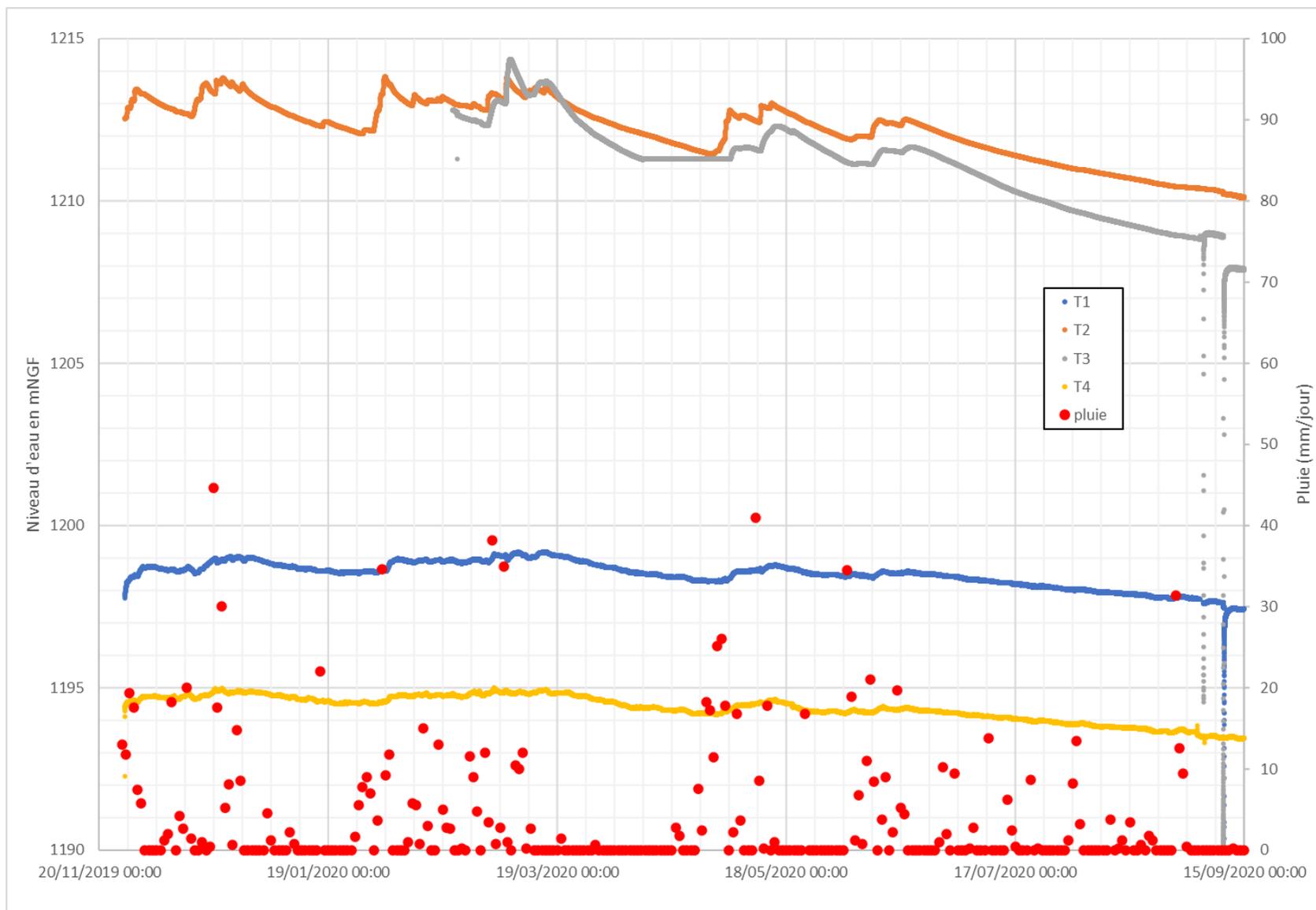
- Un traçage depuis les eaux des forages ;
- Un suivi des eaux précis de la tourbière sud au niveau de la perte en lien avec les précipitations et le niveau d'équilibre dans le karst crétacé.

Ces différentes études pourraient s'intégrer dans le cadre d'un stage d'un étudiant en MASTER par exemple.

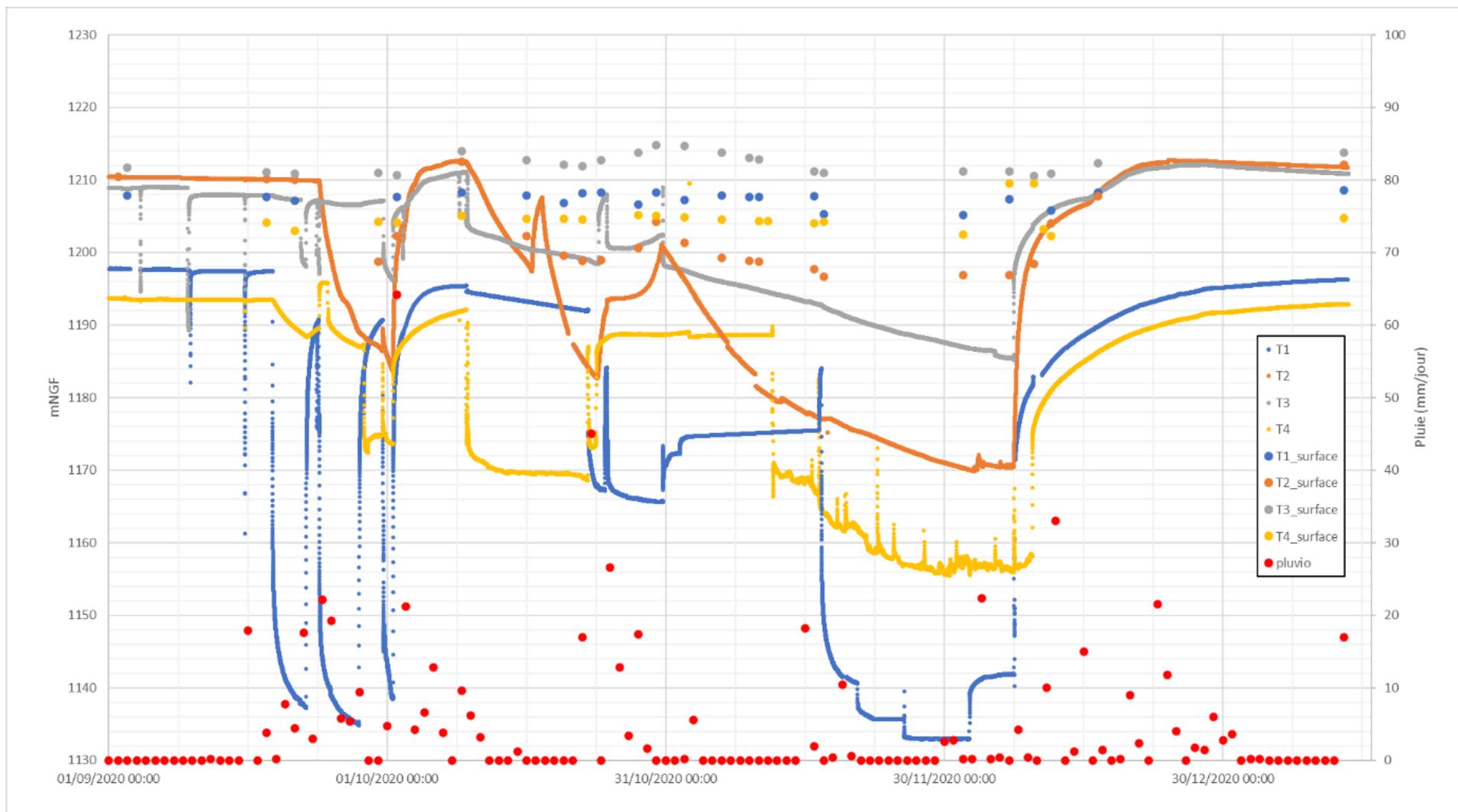
# **ANNEXES**



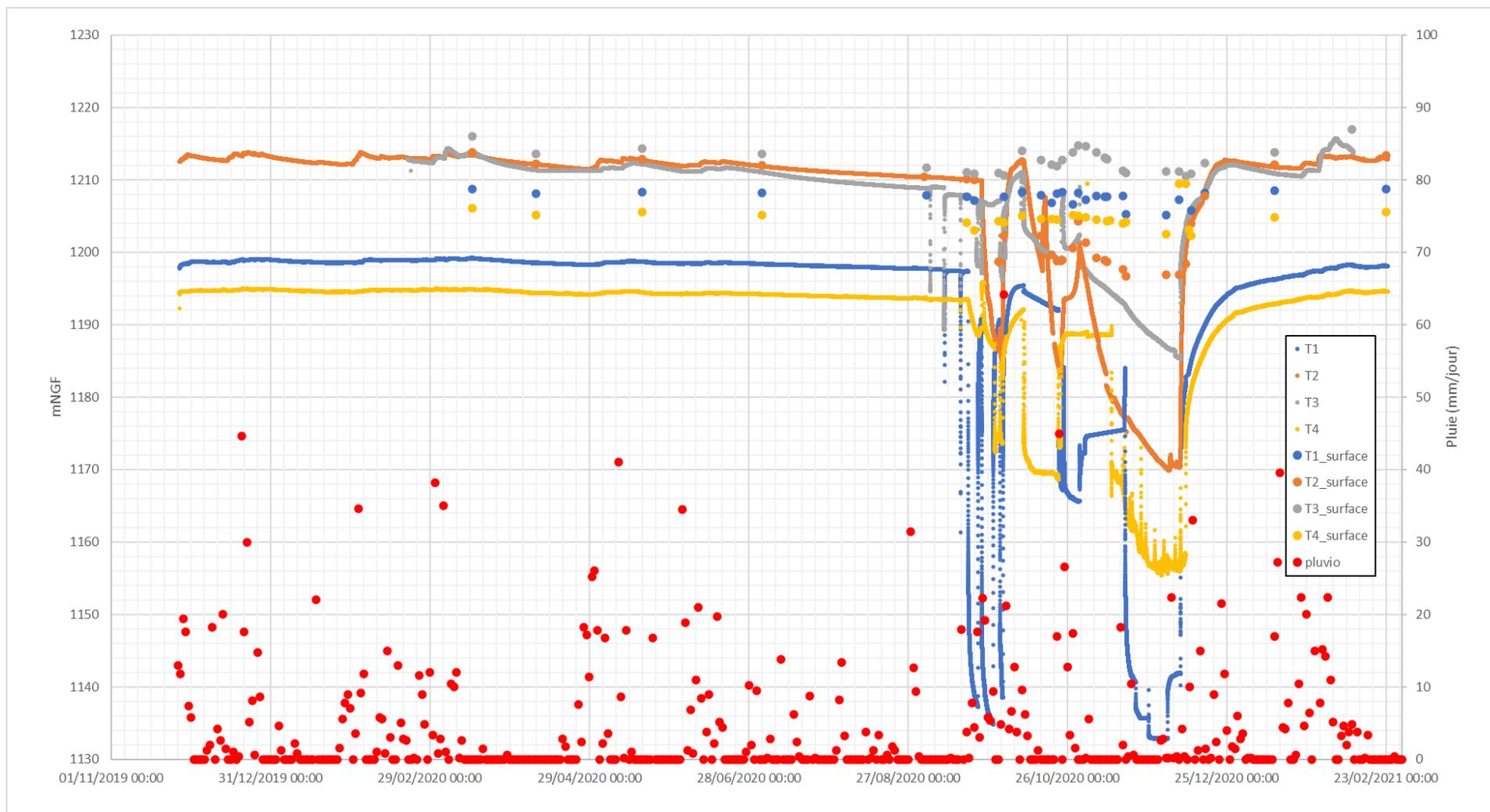
**Annexe 1 : Ensemble du suivi piézométrique du 26/11/2019 au 23/02/2021**



Annexe 1 : Suivi du niveau piézométrique en statique sur les différents forages



Annexe 2 : Suivi du niveau piézométrique en pompage sur les différents forages



Annexe 3 : Suivi du niveau piézométrique sur l'ensemble de la période de suivi

**Annexe 4 : Tableau de mesures manuelles réalisés sur les forages du Talonard**

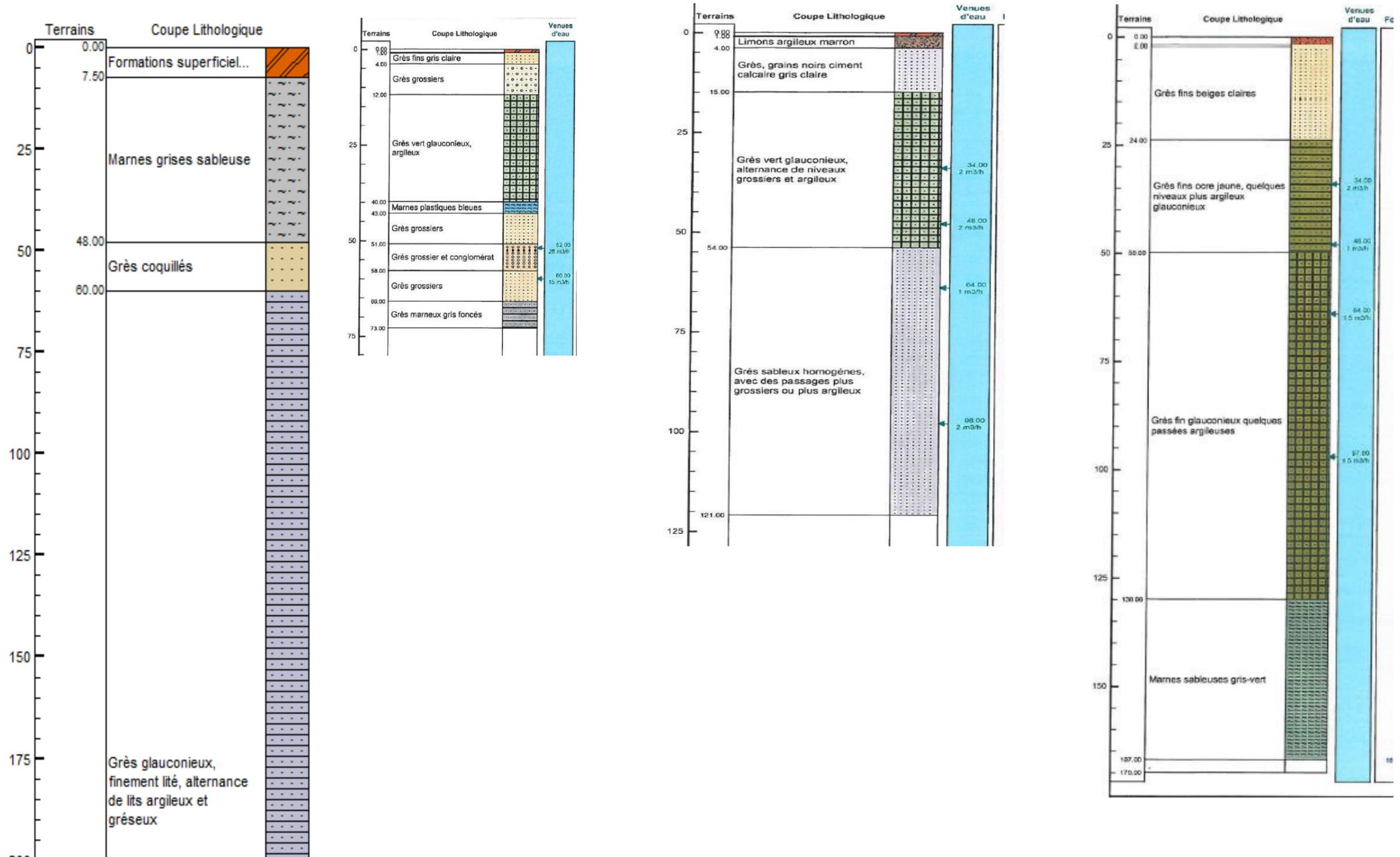
	T1 (rep=0,63m/TN)			T2 (rep=0,74 m/TN)			T3 (rep=0,7m/TN)			T4 (rep=0,98m/TN)		
	Interne (forage)	Externe (surface)	Débit de pompage (m <sup>3</sup> /h)	Interne (forage)	Externe (surface)	Débit de pompage (m <sup>3</sup> /h)	Interne (forage)	Externe (surface)	Débit de pompage (m <sup>3</sup> /h)	Interne (forage)	Externe (surface)	Débit de pompage (m <sup>3</sup> /h)
13/01/2020	12,32			2,47			9,83			14,84		
20/02/2020	12,08	2,51		1,9	1,61		9,01	9,03		14,75	3,55	
16/03/2020	11,9	2,33		1,39	1,12		8,1	5,84		14,7	3,43	
09/04/2020	12,5	2,92		2,85	2,7		10,44	8,22		15,11	4,36	
19/05/2020	12,36	2,69		2,27	2,04		9,67	7,47		15,06	3,92	
03/07/2020	12,66	2,85		3,08	2,9		10,8	8,24		15,3	4,34	
02/09/2020				4,55	4,45							
03/09/2020	13,29	3,18					13	10,11				
18/09/2020	13,71	3,32	6,8	4,84	4,75		13,03	10,77		15,98	5,37	
21/09/2020	81	3,84	5,6	4,94	4,82		13,65	10,94	2,9	20,41	6,5	
30/09/2020		+0,27	5,8	27,34	16,15	4,15	21,8	10,88	3	34,9	5,23	1,7
02/10/2020	22,11	3,32		11,95	12,58		21,55	11,2		22,55	5,35	
09/10/2020	15,6	2,73	5,8	2,36	2,3	4,8	9,88	7,86	2,6	18,1	4,44	2,3
13/10/2020						4,5			2,6			
16/10/2020	17,28	3,18	0	17,2	12,62	4,28	20,55	9,13	2,63	40,6	4,83	2,1
20/10/2020	17,7	4,22	0	26,35	15,26	4,23	21,41	9,73	2,6	40,63	4,88	2,09
22/10/2020	17,91	2,88	0	30,5	16,04	?	21,87	9,89	?	41,18	4,97	2,4
24/10/2020	27,58	2,72	0,7	24,47	15,95	4,5		9,08	0	?	?	0
28/10/2020	45,8	4,37	3,07	20,53	14,25	4,7	19,75	8,08	2,6	21,38	4,33	0
30/10/2020	43,55	2,77	3 à 5	13,95	10,62	5,07	19,05	7,03	3,6	21,55	4,43	0
02/11/2020	37,06	3,79	2,15	20,32	13,49	4,6	23,62	7,16	3,65	21,18	4,64	0
06/11/2020	36,53	3,2	2,77	27,85	15,59	4,09	25,09	8,04	3,63	20,87	4,93	0
09/11/2020	36,36	3,39	2,1	31,68	15,98	3,8	25,92	8,74	3,6	20,87	?	0
10/11/2020	36,4	3,32	2,1	32,75	16,12	3,8	26,28	8,99	3,67	20,88	5,18	0

11/11/2020			2,1			3,75			3,6	20,87	5,13	3,2
13/11/2020			2,1									2,1
16/11/2020	27	3,27	0	38,6	17,2	3,4	28,11	10,61	3,48	45,18	5,48	2,25
17/11/2020	68,76	5,77	5,1	37,7	18,22	3,4	28,71	10,83	3,45	46,52	5,28	2,25
02/12/2020	>75m	5,85	4	44,84	18	2,7	34,2	10,63	3,33	54,25	7,03	2,1
07/12/2020	70,76	3,72	4,02	44,39	18	5,3	35,56	10,63	3,34	pas de mesures avant arrêt (disjoncteur)		
09/12/2020 16:00				15,05	16,47	0	17,55	11,28	0			
10/12/2020 16:00										30,85	6,3	0
11/12/2020 12:00	26,28	5,22		10,99	10,84		15,45	10,96		29,3	7,23	
16/12/2020 14:00	21,15	2,77			7,12		12,97	9,53				
12/01/2021	14,77	2,48		2,94	2,79		10,42	8,08		17,3	4,7	
10/02/2021								4,83				
23/02/2021	12,95	2,25		1,75	1,5					15,67	3,87	

**Annexe 5 : Tableau de mesures manuelles réalisés sur les différents points de suivi**

	Source Denis Mermet		Durrafourg - tourbière	Durrafourg - abreuvoir	Durrafourg - regard	Source pré- reverchon	Tourbière - Nord	Tourbière - Sud	Tourbière - Témoin
	Niveau d'eau (m/muret)	Débit seau (m3/h)	Niveau d'eau (m/planche)	Débit seau (m3/h)	Niveau d'eau (m/sommet)	Débit seau (m3/h)	Débit seau (m3/h)	Débit seau (m3/h)	Débit seau (m3/h)
16/03/2020	0,39	5,5							
09/04/2020	0,415	2,1							
19/05/2020	0,405	3		0,5					
03/07/2020		2,25	0,72	0,6		0,15	7,8		3,97
09/07/2020		1,8		0,97				0,3	2,4
23/07/2020	0,425	1,3		1					1,42
11/08/2020	0,435	0,76		0,72	0,4			0,58	
14/08/2020							3,75		
02/09/2020		0,64					3,8		
03/09/2020	0,44	0,64					3,8		0,46
04/09/2020		0,608			0,39	sec	3,48	0,7	
18/09/2020	0,44	0,48			0,73		2,5		
21/09/2020	0,435	0,41							
30/09/2020				0,409	0,19		7,2	20	5,4
09/10/2020	0,405	3,27							
16/10/2020		0,55		0,8	0,15	environ 100 l/h	7,7	0,87	5
20/10/2020		0,162		0,418	0,17	goutte a goutte	5,65		
22/10/2020	0,46	0	0,12	0,35			5,7	2,09	
24/10/2020		2,25						30	
28/10/2020		2,7							
30/10/2020		3,5					trop d'eau	12	25

02/11/2020	0,42	1,7		0,19	0,12		14,2	4,2	11,25
06/11/2020		0		0,264	0,13	sec	9	12	7,5
09/11/2020		0,18			0,14	environ 100 l/h	7,8	2,3	
10/11/2020	0,45	0,105	+0,05	0,3	0,14		8		
11/11/2020		0,12							
13/11/2020									4
10/12/2020			0,53						
11/12/2020			0,5						
16/12/2020	0,43	1,8			0,1		20	10	15
23/02/2021	0,4	5	+0,05						



T1	T2	T3	T4
----	----	----	----

Annexe 6 : Coupes géologiques des 4 forages du Talonard

