

BEG SA



Géologie & Environnement

BEG Fribourg
Z.I.: Le Vivier 22
CH 1690 Villaz-Saint-Pierre

+41 26 653 26 15
beg@beg-geol.ch
www.beg-geol.ch

Centre de recherche sur l'environnement alpin

Rue de l'Industrie 45
CH 1950 Sion

+41 27 607 11 80
www.crealp.ch

Maître de l'ouvrage

Service de l'environnement du canton de Fribourg SEn

Lieu

Canton de Fribourg

Projet

**Etude hydrogéologique pour le suivi et la gestion des
eaux souterraines intégrant les effets du changement**

Objet

Phase 2.3 : indicateurs

N° mandat

9021

Auteurs

Marie Arnoux, Antoine Carron et Marion Cochand

Date

28.10.2025

Version 2 finale

1 Contexte et objectif

1.1 Contexte

Le canton de Fribourg a adopté en juin 2021 un plan climat cantonal qui propose 115 mesures destinées à atténuer et permettre l'adaptation au changement climatique. Les mesures *W 1.3 Suivi et gestion des eaux souterraines intégrant les effets des changements climatiques* et *W 1.5 Surveillance des paramètres climatiques des eaux souterraines* ont pour objectif d'évaluer les implications des scénarios d'évolution climatique pour les eaux souterraines du canton. Dans ce cadre, le SEN du canton de Fribourg pilote un programme d'études hydrogéologiques qui portent sur le suivi et la gestion des eaux souterraines intégrant les effets du changement climatique. Ces études sont financées par le canton et réalisées par des mandataires. Elles sont organisées en trois phases : phase 1 – Synthèse des données existantes, état des lieux et définition de la démarche générale, phase 2 – Mise en place des programmes de suivi des eaux souterraines dans les captages/piézomètres sélectionnés et définition du cahier des charges pour la phase 3 des études et phase 3 – Investigations détaillées dans les différents lots pour évaluer les principaux impacts du changement climatique sur les eaux souterraines.

1.2 Projet : Phase 2

C'est dans ce cadre que le BEG SA – Géologie & Environnement (BEG) et le Centre de recherche sur l'environnement alpin (CREALP) ont été mandatés par le Service de l'Environnement du canton de Fribourg (SEn) pour la réalisation de la phase 2. Cette étude a été réalisée entre octobre 2024 et octobre 2025. Elle est désignée dans la suite sous le terme « Phase 2 ».

La démarche poursuivie dans le cadre de la Phase 2 suit le cahier des charges établi. Elle a permis :

1. D'intégrer les analyses complémentaires sur les sources karstiques Sandli et Kappelboden (intégrées au rapport phase 1 ; phase 2.1)
2. Le déploiement et la maintenance du réseau hydrogéologique cantonal (partie décrite dans le rapport d'installation, phase 2.2)
3. Récupération, traitement et valorisation des données (partie décrite dans le présent rapport ; phase 2.3).

1.3 Objectifs

Du point de vue opérationnel, la phase 2.3 avait pour objectifs :

- la récolte des données préexistantes sur les sites d'intérêt ;
- l'identification, le choix, le développement et le calcul des indicateurs permettant d'évaluer la sensibilité des ressources aux sécheresses ;
- l'étude de la faisabilité d'une modélisation de l'effet du changement climatique sur les ressources et, le cas échéant, la formulation de pistes de travail pour la réaliser.

La démarche poursuivie ainsi que la synthèse des résultats obtenus sont détaillées dans le présent rapport.

2 Récolte, traitement et correction des données

2.1 Récolte des données

A l'issue de la Phase 1, 21 captages ont été identifiés comme étant intéressant à suivre et à documenter. Pour ces captages, les organismes en charge de la gestion et de l'exploitation de la ressource en eau (distributeurs d'eau) ont été sollicités. Il leur a été demandé de fournir l'ensemble des données de suivi de la ressource, et plus particulièrement les paramètres suivis en continu.

Cette étape a montré que l'extraction des données depuis des systèmes de gestion opérationnel peut être une tâche complexe (outil ou procédure complexe, nécessité de compétences spécifiques, etc.). D'autre part, les données ne sont pas partout historisées et archivées (mémoire circulaire, limité à une plage de temps...).

Sur les 21 sites d'intérêt identifiés à l'issue de la Phase 1, 13 sites pour lesquels des données sont disponibles ont été identifiés. Sur ces 13 sites, 18 séries de données ont été reçues et analysées (7 sources, 6 puits et 5 piézomètres d'observation), tel que résumé en Tableau 1.

Nom site	Type de point d'eau des données	Données récoltées	Paramètres disponibles des séries	Débit ou niveaux d'eau sélectionnés	Périodes couvertes par les débits et niveaux d'eau sélectionnés
Villard Bony Supérieur	Source	Oui	Débit	Oui	22.06.2021-31.03.2025
Fin de la Porta	Puit et piézomètres (PZ1,2,3)	Oui	Niveau d'eau	Oui	29.01.2008-19.05.2019
Les Marais	Sources	Oui	Débit	Non	01.02.2024-01.12.2024
Sandeli		Non			
Kappelboden		Non			
Frassettes	Source	Oui	Débit, conductivité électrique, température	Oui	24.11.2016-24.10.2024
La Châtelaine	Source	Oui	Débit	Non	01.10.2022-30.04.2025
Käserli		Non			
Tuffière	Source	Oui	Débit, conductivité électrique, température	Oui	02.01.2017-19.06.2024
Hofmatt	Puits	Oui	Débit pompé, conductivité électrique, niveau d'eau, turbidité	Non	01.01.2017-19.06.2024
Danaïdes		Non			
Hänisried		Non			
En Cudré		Non			
les Ouches	Puit et Piézomètre DF3	Oui	Niveau d'eau	Oui	24.02.2021-14.11.2024
Horia	Puits	Oui	Niveau d'eau, conductivité électrique, température	Non	01.01.2004-31.12.2024
Flamatt	Puit et Piézomètre (Neuenegg)	Oui	Niveau d'eau	Oui	01.01.1994-31.12.2023
Vau de Praz	Puits	Oui	Débit pompé, turbidité	Non	13.02.2023-20.03.2025
Les Mettraux	Source	Oui	Débit	Non	26.04.2021-04.04.2025
Hangbüel	Source	Oui	Débit, conductivité électrique, température, turbidité	Oui	5.11.2003-01.01.2025
Closels		Non			
21	18	13		7	

Tableau 1. Description des séries

2.2 Traitement et correction des données

Sur chacune des 18 séries, un travail de prétraitement des jeux de données a été réalisé au pas de temps des données brutes. Celui-ci repose sur les étapes suivantes :

1. inventaire et identification des mesures existantes
2. identification des périodes manquantes,
3. correction des artéfacts
4. standardisation des fichiers
5. rééchantillonnage des séries temporelles pour obtenir un pas de temps régulier

Concernant les jeux de données issus des puits de pompage, une analyse exploratoire approfondie a été nécessaire pour évaluer l'influence du pompage sur le niveau d'eau naturel. En effet, lorsque la mesure de la charge hydraulique est réalisée dans l'ouvrage pompé lui-même, la charge hydraulique mesurée représente la somme de deux influences : l'évolution du niveau piézométrique naturel, et l'effet du pompage. Pour estimer l'évolution naturelle de la charge hydraulique (hors pompage), il est nécessaire de séparer les deux composantes. Parmi différentes solutions possibles, une analyse fréquentielle des signaux piézométriques a été mise en œuvre ainsi qu'une observation manuelle des cycles de pompage. Malgré cela, il s'est avéré impossible de poursuivre plus loin la démarche sans disposer de mesures du débit pompé. Quand cela a été possible, des jeux de données issus de piézomètres d'observation situés à proximité des puits de pompage ont été intégrés à l'analyse. Il est cependant important de noter que ces piézomètres peuvent être dans l'influence du cône de rabattement du pompage mais l'effet du puit n'est plus visible.

2.3 Sélection des séries exploitables

Une première sélection des séries repose sur des éléments descriptifs des séries temporelles (volumétrie, fenêtre temporelle, fréquence, complétion, impact visuel du pompage). Cette étape a considéré les 13 sites dont les séries ont été prétraitées afin de mener cette analyse (Tableau 2). A l'issue de cette étape, 7 sites ont été retenus pour la suite de l'analyse, tel que résumé en Tableau 2.

Ainsi, l'analyse des sources Marais 1, La Châtelaine et Vau de Praz n'a pas été poursuivie en raison d'un pas de temps mensuel, de la présence d'artefacts ou d'une série trop courte. Les séries des puits Fin de la Porta P1, Hoffmatt Puits 1, Les Mettraux, Horia et Flamatt sont influencées par le pompage. Pour Hoffmatt Puits 1 et Les Mettraux 2 les séries sont trop courtes pour aller plus loin mais pour Horia, Fin de la Porta P1 et Flamatt, l'effet du pompage pourrait potentiellement être corrigé via le traitement du signal si des données de pompage de bonne qualité étaient disponibles, ce qui n'est pas le cas. Les séries prétraitées mais non retenues sont illustrées en Annexe 6.

Ce processus de sélection et de prétraitement ne doit pas être sous-estimé dans le cadre de cette analyse. Il constitue la base fondamentale d'une étude rigoureuse, reposant exclusivement sur des données fiables et représentatives de la ressource. Pour finir 7 sites ont été retenus pour la suite de l'analyse : 4 sources (Hangbüel, Villard-Bony supérieur, Tuffière 5-Ouest et Frassettes) et 3 sites de pompage possédant des piézomètres d'observation (Grandvillard/Fin de la Porta avec PZ1, PZ2, PZ3, les Ouches avec DF3 et Flamatt avec le piézomètre de Neuenegg situé sur le canton de Bern (Figure 1).

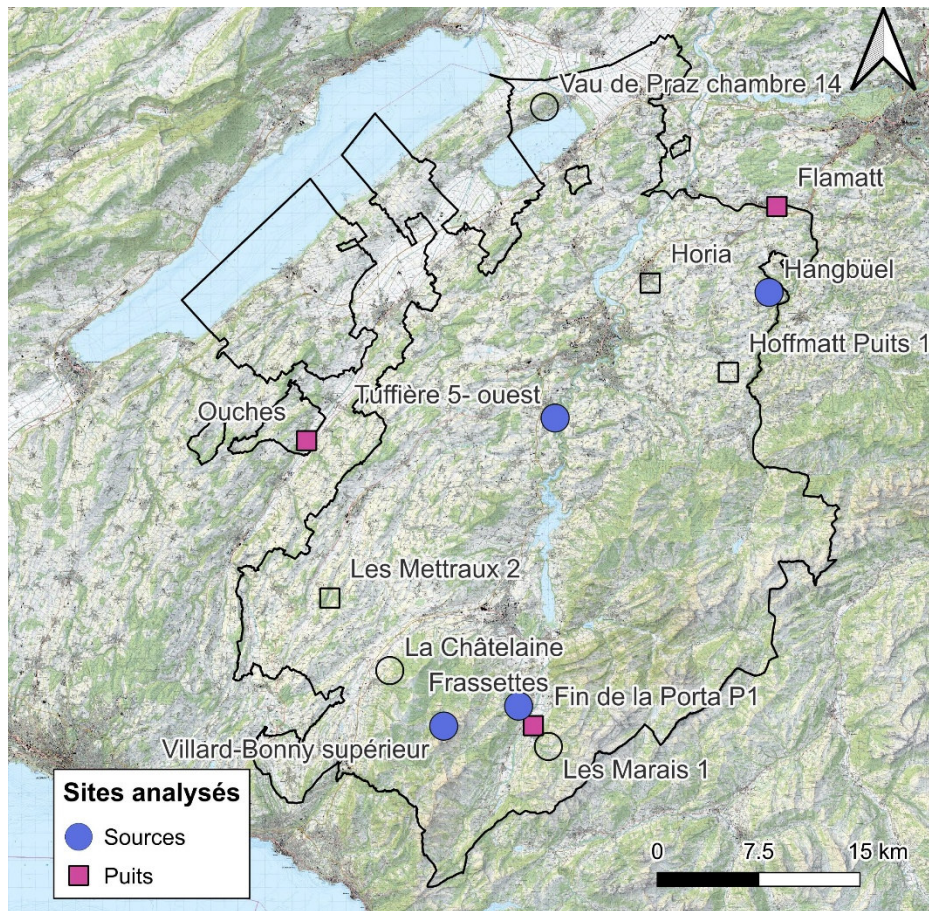


Figure 1 : Ensemble des 13 points de mesure possédant des données qui ont été identifiés avec, en couleur, les sources et puits dont les données ont pu être prétraités (point sans couleur) et/ou analysées (point avec couleur) dans le cadre de cette étude.

Nom	Type	Critères de sélection					Etat du traitement	Intégré pour le calcul des indicateurs (suite de l'étude)
		Pas de temps	Continuité	Qualité	Représentatif	Historique (années)		
Villard-Bony supérieur	Source	Bon (Journalier)	Très bon	Très bon	OUI	Court (3.8)	Analysées	O
Fin de la Porta (PZ1,2,3)	Piézomètre	Très bon (Horaire)	Moyen	Bon	OUI	Moyen (11.3)	Analysées	O
Les Marais 1	Source	Mauvais (Mensuel)	Mauvais	Mauvais	OUI	Très court (0.8)	Prétraitées	N
Frassettes	Source	Très bon (Horaire)	Très bon	Très bon	OUI	Moyen (7.9)	Analysées	O
La Châtelaine	Source	Bon (Journalier)	Moyen	Mauvais	OUI	Court (2.61)	Prétraitées	N
Tuffière 5- ouest	Source	Bon (Journalier)	Très bon	Bon	OUI	Moyen (7.5)	Analysées	O
Hoffmatt Puits 1	Puits	Bon (Journalier)	Mauvais	Très bon	NON	Très court (1.7)	Prétraitées	N
les Ouches (DF3)	Piézomètre	Très bon (Horaire)	Moyens	Moyen	OUI	Court (3.7)	Analysées	O
Horia	Puits	Très bon (horaire)	Très bon	Très bon	NON	Long (20.3)	Prétraitées	N
Flamatt (Neuenegg)	Piézomètre	Bon (Journalier)	Très bon	Très bon	OUI	Très long (30)	Analysées	O
Vau de Praz	Puits	Très bon (Horaire)	Mauvais	Mauvais	OUI	Court (2.1)	Prétraitées	N
Les Mettraux 2	Source	Très bon (seconde)	Bon	Très bon	NON	Court (3.9)	Prétraitées	N
Hangbüel	Source	Très bon (Horaire)	Bon	Très bon	OUI	Long (21.2)	Analysées	O

Tableau 2 : Résumé des séries de données prétraitées et des critères de sélection.

3 Méthode : analyse des séries et indicateurs calculés

3.1 Traitement des données préalable au calcul d'indicateurs

Un des objectifs de la Phase 2 est le calcul d'indicateurs de sensibilité de la ressource en eau. Ces indicateurs reposent sur l'analyse des données. Pour pouvoir mettre en œuvre le calcul d'indicateurs, il existe des prérequis (autre l'existence des données) qui doivent être satisfaits. Ces prérequis sont détaillés dans le paragraphe suivant.

3.1.1 Conditions sur les séries

Les indicateurs qui ont été calculés dépendent de certaines caractéristiques des séries temporelles (soit qu'ils ne peuvent être calculés, soit que le résultat produit est influencé). En effet la structure des signaux conditionne la façon dont ils peuvent être analysés par la suite.

Nous avons procédé en deux étapes :

- l'élaboration d'une liste de caractéristiques des signaux puis leur calcul, tels que résumées au Tableau 3
- sur cette base, la sélection des séries éligibles au calcul des indicateurs

Ainsi la qualité du dispositif a été définie à partir des connaissances des sites et des influences anthropiques connues ou supposée (par exemple, l'influence d'un pompage identifiable sur le signal).

La longueur de l'historique de suivi constitue souvent une limite importante. Un jeu de données trop court permet le calcul mathématique d'un indicateur, mais n'en garantit pas la fiabilité statistique. Afin de préciser les durées minimales nécessaires, un ordre de grandeur de la plage temporelle requise pour assurer la pertinence statistique de chaque indicateur est présenté en Annexe 8. Lorsque la durée d'une série était inférieure à cette limite, l'indicateur n'a pas été calculé, ou seulement à titre indicatif si la longueur observée était proche du seuil requis.

Concernant les critères d'indépendance et de stationnarité, les séries ont été analysées à l'aide de critères vérifiant les conditions d'application d'une approche probabiliste (Tableau 3). Notons que ces tests ont été réalisés sur les moyennes, minimums et maximums annuels.

La significativité des tendances a été évaluée à l'aide de tests de régression linéaire et du test de Mann-Kendall, en retenant un seuil de significativité de 0,05 (p-value), valeur couramment utilisée. Ainsi, une série peut présenter une pente visuellement marquée mais rester non significative statistiquement, notamment en cas de fortes fluctuations ou d'un nombre limité de mesures.

Type de Méthode	Méthode	Caractéristique recherchée
Méthodes basées sur l'expertises	Analyse qualitative du signal	Qualité du dispositif (absence d'effet de pompage, cohérence du signal etc.)
		Longueur de l'historique de suivi
Méthodes basées sur des tests statistiques (réalisés sur les débits annuels minimums, moyens et maximums)	Phillips–Perron, KPSS, ADF	Stationnarité
	Ljung–Box	Indépendance
	Pettitt	Rupture
	Méthode des moindres carrés (OLS) et test de Mann-Kendall	Tendance

Tableau 3 : Tests réalisés pour évaluer les séries en vue du calcul des indicateurs décrits ci-après.

L'analyse préalable des séries temporelles a permis :

- d'identifier les signaux présentant des biais, des ruptures, des anomalies,
- de vérifier la stationnarité, la présence de rupture et/ou de tendance des données,
- et de sélectionner, pour chaque point, les indicateurs applicables avec un niveau de confiance satisfaisant.

Cette étape garantit la cohérence méthodologique et la pertinence des indicateurs utilisés pour la caractérisation hydrologique et l'identification de la sensibilité des systèmes hydrogéologiques aux sécheresses.

3.1.2 Uniformisation des pas de temps

Les données récoltées auprès des différents producteurs présentent des pas de temps et des longueurs variées. Dans le but de travailler sur des séries temporelles les plus uniformes et les plus longues possibles, le pas de temps journalier a été choisi comme base de travail. Cette fréquence de mesure, à partir d'un pas de temps plus fin, est en effet bien adaptée pour les phénomènes physiques que nous cherchons à documenter, de plus cela limite l'effet des cycles de pompage et est plus facile à manipuler. Dans cette optique, lorsque les données étaient fournies à des pas de temps plus fin, la moyenne journalière a été calculée. Dans le cas de jour incomplet (moins que 24 mesures par jour), la moyenne journalière a été également calculée.

Cela introduit un biais très faible, mais ce choix a été préféré à la suppression de données entières, qui aurait eu un impact estimé plus important sur les analyses. Ce traitement est justifié car les données manquantes sont relativement rares à l'échelle d'une journée, et aucune rupture anormale n'a été observée après ce rééchantillonnage.

3.1.3 Sources et piézomètres

Dans la suite du rapport, les sources et les piézomètres sont traités séparément. Bien qu'ils soient tous deux liés à la même ressource souterraine, les variables mesurées (débits pour les sources, niveaux d'eau pour les piézomètres) ne peuvent pas toujours être analysées de manière identique. D'autre part, ces deux types de points d'observation ne documentent pas les mêmes influences. Les sources représentent un exutoire possible de l'aquifère, aux endroits où la charge hydraulique dépasse l'altitude du sol. Les piézomètres permettent de mesurer la charge hydraulique en tout point du système, ils fournissent une mesure même si la charge hydraulique est inférieure à la côte du sol.

3.2 Indicateurs calculés

Les paragraphes suivants présentent la liste des indicateurs sélectionnés et calculés pour le présent mandat.

3.2.1 Caractéristiques et régimes hydrogéologiques

Les statistiques descriptives (débit moyen annuel, débit moyen mensuel, etc.) permettent de synthétiser l'ensemble des années de suivi et de caractériser le régime hydrogéologique des systèmes (Aschwanden & Weingartner, 1985), et ainsi d'identifier les périodes de hautes et de basses eaux. Cela permet également de comparer visuellement une année spécifique à la moyenne du système hydrogéologique au niveau du point de mesure.

3.2.2 Indicateurs liés aux valeurs extrêmes

Les indicateurs fondés sur les valeurs extrêmes reposent sur les débits minimaux, la moyenne des débits les plus faibles sur une période de sept jours sur une année ou le percentile 5.

Winter flow index (WFI)

Le WFI (OFEV, 2024), calculé pour les sources, s'obtient tel que :

$$WFI = \frac{Q_{NM7}}{Q_{mean}} \quad (1)$$

Q_{mean} : Débit moyen / Q_{NM7} : Moyenne des débits minimums annuels moyens sur 7 jours consécutifs

Cet indicateur reflète la capacité du système hydrogéologique à réguler le débit sortant face à des apports déficitaires. Plus sa valeur se rapproche de 1, moins les bas débits sont faibles par rapport aux débits moyens de la source, et ainsi plus le système est inertiel. Cet indicateur est surtout utilisé pour les sources en régime nival.

Indicateur de résistance à la sécheresse développé sur les aquifères karstiques (IRSAK)

L'IRSAK, également calculé pour les sources, s'obtient à partir du débit minimal annuel moyen divisé par la moyenne des débits minimums annuels moyens sur 7 jours consécutifs (Q_{NM7} ; BRGM, 2015b) :

$$IRSAK = \frac{Q_{min}}{Q_{NM7}}$$

Q_{min} : Débit minimal / Q_{NM7} : Moyenne des débits le plus faible en moyenne sur 7 jours sur 1 an

Cet indicateur a l'avantage d'être peu sensible à l'absence de données, notamment en période de hautes eaux. Cela le rendant particulièrement utile pour des séries tronquées (présence d'un trop-plein). Il reflète la capacité du système hydrogéologique à réguler le débit sortant face à des apports déficitaires. Plus sa valeur se rapproche de 1, plus le système hydrogéologique présente une forte inertie, et donc une meilleure résistance aux sécheresses.

Q347 ou H347

Le Q347 et H347 correspondent respectivement au débit et au niveau d'eau dépassés en moyenne 347 jours par an. Ces indicateurs sont établis sur le calcul du 5^e percentile des débits ou des hauteurs d'eau pour mettre en évidence la valeur des débits ou hauteur extrêmement basses.

Temps de retour

Le temps de retour permet d'estimer la grandeur d'un débit ou d'un niveau d'eau extrême, c'est-à-dire la valeur minimale d'étiage, associée à une probabilité de dépassement donnée. Il se calcule à partir des minimums de la série temporelle des années hydrologiques, grâce à l'ajustement d'une loi de probabilité appropriée. Par exemple, un débit/niveau d'eau associé à un temps de retour de 100 ans a 1 % de probabilité d'être dépassé chaque année.

A noter que pour les très faibles débits, l'analyse statistique devient moins fiable car une valeur de zéro ne peut être considérée et donc l'assèchement d'une source qui se déconnecte du système n'est pas prise en compte. De la même manière pour le niveau d'eau, l'altitude du toit de la formation imperméable est inconnue et n'est donc pas prise en compte.

3.2.3 Indicateurs de récession, vitesse de vidange des systèmes

En dehors des périodes de recharge, la charge hydraulique est contrôlée par le drainage de l'aquifère, c'est une période de vidange de l'aquifère. La forme des courbes de vidange est caractéristique d'un aquifère donné et renseigne sur sa dynamique (inertiel vs réactif).

Coefficient de récession (α)

Le coefficient α est déterminé en ajustant au mieux un modèle exponentiel sur les données observées lors de ces phases de vidange. Pour ce faire, les segments de récession sont individualisés puis regroupés selon une approche inspirée de la méthode IRS (Individual Recession Segments ; BRGM, 2015a), mais en utilisant les débits du segment le plus long comme référence. Une loi exponentielle est ensuite ajustée aux données combinées pour caractériser la récession du débit des sources (ou du niveau d'eau) :

$$Q(t) = Q_0 e^{-\alpha t} + Q_1 \quad (3)$$

Q_0 : Débit initial (Début de la période de récession) / Q_1 : Débit de base à la fin de la période de récession / α : Coefficient de tarissement

Un coefficient α élevé indique un système qui se vide plus vite, et donc plus réactif, alors qu'un α faible indique un tarissement plus lent et donc un système plus inertiel. Un système avec un coefficient α élevé aura donc une meilleure résistance à une période de sécheresse prolongée.

Temps de demi-décroissance

Cet indicateur repose également sur l'analyse du dynamisme de tarissement et décrit le temps moyen nécessaire pour que le débit ou niveau diminue de moitié. Il est calculé à partir du paramètre d'ajustement du modèle exponentiel de récession.

Pour les sources, cet indicateur intègre, sous forme de ratio, le rapport entre le débit initial et le débit de base. Le temps de décroissance correspond ici au moment effectif où le débit mesuré atteint la moitié de sa valeur initiale. La formulation empirique pour calculer ce temps de décroissance du débit d'une source est la suivante :

$$T_{1/2} = -\frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{1}{2} - \frac{Q_0}{2Q_1} \right)$$

Q_0 : Débit initial / Q_1 : Débit de base ou résiduel / α : coefficient de tarissement

Pour le niveau d'eau, une autre formulation est utilisée. Le temps de décroissance ne correspond donc pas au moment où l'altitude est divisée par deux, mais plutôt au temps théorique lié à la diminution du stock d'eau selon le modèle exponentiel. La formulation du temps de décroissance pour le niveau d'eau est la suivante :

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\alpha}$$

α : coefficient de tarissement

Cet indicateur permet d'évaluer la vitesse de vidange de l'aquifère drainé lors de l'absence d'apport d'eau et ainsi d'illustrer sa résistance à un déficit pluviométrique. Le temps $T_{1/2}$ est également indicateur de l'inertie du système et donc de sa réactivité au manque d'apport : plus il est élevé, plus l'aquifère est inertiel et donc résistant à un déficit de recharge et inversement.

3.2.4 Indicateurs d'analyse du signal hydrogéologique

Les indicateurs et caractéristiques temporelles permettent d'évaluer l'évolution des mesures. Ils offrent la possibilité de comparer les valeurs à l'historique des données, de les mettre en relation avec les conditions moyennes, ou, dans le cas d'indicateur standardisé, de classer les valeurs standardisées selon des catégories de sécheresse.

Normalisation par Z score

La normalisation par z-score transforme une série de données en une distribution dont la moyenne est 0 et l'écart type 1, ce qui permet de comparer des séries dont les gammes de variation de valeurs sont d'échelles différentes.

$$z = (v - \mu) / \sigma$$

v : valeur / μ : moyenne des valeurs / σ : écart-type des valeurs

Cette approche met en évidence la variabilité relative plutôt que l'amplitude absolue. Elle facilite l'analyse de la temporalité des débits ou des niveaux d'eau supérieurs ou inférieurs à la moyenne. Cependant, le z-score indique uniquement si une valeur est au-dessus ou en dessous de la moyenne et ne tient pas compte de la fréquence à laquelle un niveau ou un débit est atteint. Ainsi, un débit/niveau considéré comme « légèrement inférieur à la moyenne » peut correspondre à un débit/niveau rarement observé ou, au contraire, très souvent atteint, dépendamment de la distribution des valeurs. Cette information diffère de celles données avec des indicateurs standardisés qui classifient les événements selon leur rareté.

Indicateur de position

L'indice de position (IP) est une mesure statistique qui exprime la position relative d'une observation au sein d'une distribution de données historiques au pas de temps mensuel (BRGM, 2016a).

$$IP = ((moy_{mois} - min_{serie}) / (max_{serie} - min_{serie})) * 100$$

moy_{mois} : moyenne mensuelle / min_{serie} : minimum de la série / max_{serie} : maximum de la série

Un IP proche de 0 indique que la valeur observée est parmi les plus faibles de la série, tandis qu'un IP proche de 100 signifie qu'elle est parmi les plus élevées. Il a pour avantage de classer, relativement à la série, la position d'une valeur donnée, sans nécessiter l'ajustement préalable d'une loi de probabilité. Cela le rend utile pour des jeux de données dont l'historique est relativement restreint.

Indicateur standardisé

Les indicateurs Standardized Streamflow Index (SSFI) et Standardized Piezometric Level Index (SPLI), dérivés du Standardized Precipitation Index (OMM, 2012), reposent sur l'ajustement d'une loi de probabilité aux débits ou hauteurs d'eau, puis sur leur projection sur une distribution normale centrée-réduite (BRGM, 2016b). Un indice égal à 0 correspond à la valeur médiane de référence. Les valeurs négatives traduisent une sécheresse hydrologique, plus sévère lorsque l'indice est bas, tandis que les valeurs positives indiquent des conditions excédentaires. Contrairement au z-score, le SSFI et le SPLI intègrent la distribution statistique sur le long terme, permettant de classer les événements selon leur rareté. Ces indices sont ainsi les mieux adaptés à l'analyse des tendances climatiques et des anomalies hydrologiques mais nécessitent une longue série de données (normalement >30 ans et non calculable en dessous de 15 ans ; Annexe 8). Ces indicateurs sont

dépendants de la longueur de la série (deux séries de périodes différentes ne sont pas comparables) et peuvent être calculés sur plusieurs périodes de temps. Dans cette étude ils ont été calculés à deux pas de temps :

- mensuel, ce qui permet de détecter des sécheresses ou excédents rapides et ponctuels, utiles pour la gestion à court terme des ressources en eau ;
- annuel, ce qui permet d'analyser des tendances hydrologiques durables et les sécheresses prolongées.

3.2.5 Indicateur physico-chimique

L'indicateur physico chimique de vulnérabilité des sources (vulnerability Estimator for Spring Protection Area ; VESPA) évalue la vulnérabilité d'une source en combinant les variations de débit, de température et de conductivité électrique (Galleani et al., 2011). Il se calcule à partir du facteur de corrélation entre débit et conductivité électrique, d'un facteur de variabilité de température et du coefficient de corrélation entre le débit et la conductivité électrique, selon la formule :

$$V = c(\rho) \beta$$

c(ρ) : facteur de corrélation entre débit et conductivité électrique | ρ : coefficient de corrélation entre le débit et la conductivité électrique | β : facteur de variabilité de température

Ainsi, un indice élevé traduit une source très vulnérable, sensible aux perturbations et aux contaminations, tandis qu'un indice faible indique une source peu vulnérable. Les classes de résistance sont présentées en Annexe 1.

4 Résultats : Indicateurs de sensibilité aux sécheresses

Pour chaque point de mesure, une vérification des conditions nécessaires au calcul des indicateurs a été réalisée, telle que décrite en 3.1. Sur cette base, une série d'indicateurs a été calculé pour chaque point d'eau, tel que décrit en Tableau 4. Les classes associées à chaque point de mesure sont issues de différentes classifications, présentées dans les annexes : VESPA (Annexe 1), IRSAK (Annexe 2) et la classification liée aux temps de demi-décroissance (Annexe 3). Concernant le coefficient de récession, les ajustements du modèle exponentiel aux données sont présentés sous forme de graphiques en Annexe 12, afin d'illustrer la qualité de l'ajustement. Pour le calcul des temps de retour, les modèles statistiques utilisés pour l'ajustement aux données sont également présentés en Annexe 13. Les séries ont été classées selon leurs régimes, d'après la classification proposée par Aschwanden & Weingartner (1985).

Il est important de noter qu'en raison du faible nombre de jeux de données issus de situations comparables (p. ex. même type de captage au sein d'un même régime sur la même période de suivi), il est difficile d'établir une comparaison directe entre les sites. Chaque site est donc décrit individuellement dans la suite de l'analyse.

Nom	Indicateurs liés aux valeurs extrêmes			Indicateurs de récession		Indicateurs temporels			
	WFI	IRSAK	Q347/H347	Coefficient de récession	Temps de demi-décroissance	Temps de retour	Z-score	Indicateur de position	Indicateur standardisé
Villard-Bony supérieur	Indicatif	Indicatif	Indicatif	OUI	OUI	NON	Indicatif	NON	NON
Fin de la Porta (PZ1,2,3)	NON	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NON
Frassettes	OUI	OUI	Indicatif	OUI	OUI	Indicatif	OUI	OUI	NON
Tuffière 5- ouest	OUI	OUI	Indicatif	OUI	OUI	Indicatif	OUI	OUI	NON
les Ouches (DF3)	NON	NON	Indicatif	OUI	OUI	NON	Indicatif	NON	NON
Flamatt (Neuenegg)	NON	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	OUI
Hangbüel	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	OUI

Tableau 4 : Résumé des indicateurs calculés par jeu de données : « Oui » indique que l'indicateur a été calculé et que les conditions de son application sont en grande partie respectées. « Non » signifie que l'indicateur n'a pas été calculé car les conditions nécessaires à son utilisation ne sont pas remplies. « Indicatif » correspond à un indicateur calculé, mais dont les conditions d'application ne sont pas entièrement satisfaites, notamment en ce qui concerne la durée d'observation. S'il est possible de calculer l'indicateur standardisé, l'indicateur de position n'est pas calculé.

4.1 Régime pluvial

4.1.1 Source de Hangbüel

Le jeu de données de la source de Hangbüel, couvre la période du 5 novembre 2003 au 1^{er} janvier 2025, soit 21.2 années d'observations continues. Seule la mesure du 20 février 2016 fait défaut (Figure 2).

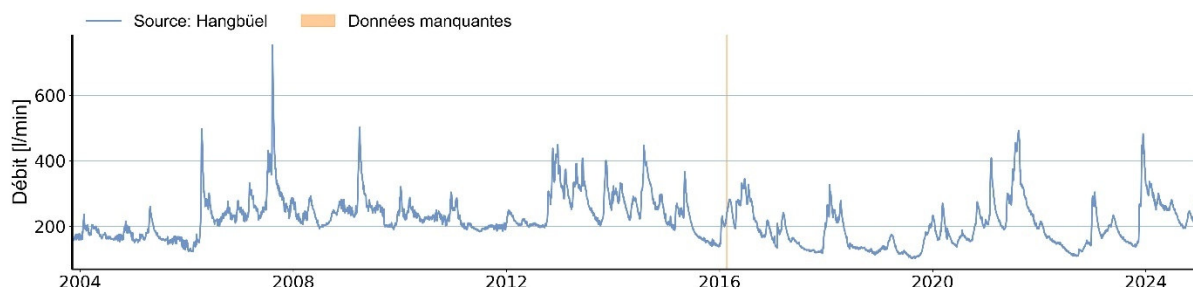


Figure 2 : Évolution journalière du débit [L/min] de la source de Hangbüel avec indication des données manquantes (trait jaune).

L'analyse des débits annuels minimums, moyens et maximums montrent que les mesures sont indépendantes et stationnaires et que les pentes des régressions linéaires sont très faibles et statistiquement non significatives (Figure 3).

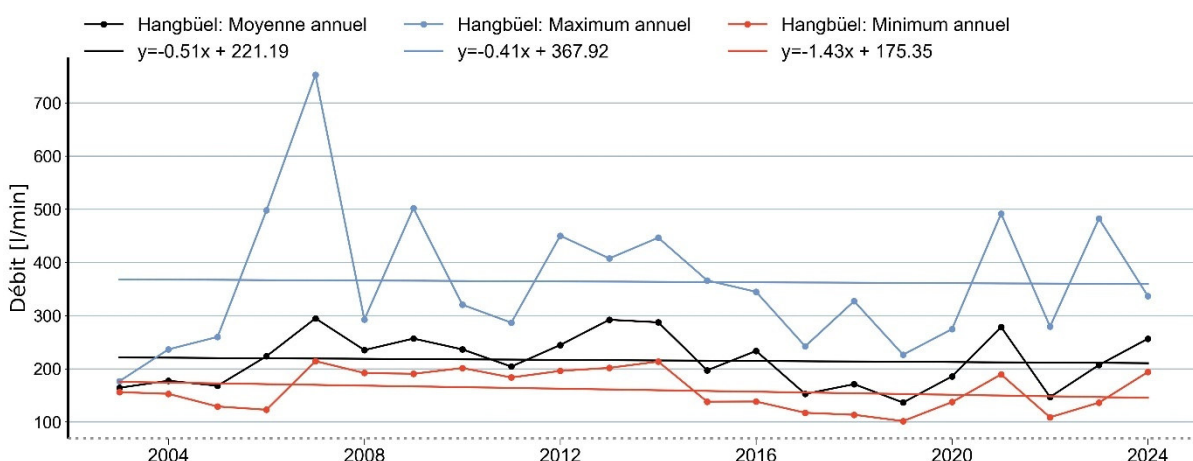


Figure 3 : Évolution annuelle des débits minimum, moyen et maximum à la station de Hangbüel.

L'analyse du régime hydrologique de la source Hangbüel montre que le débit médian est très légèrement supérieur durant la période hivernale et printanière (230 L/min en janvier à 221 L/min en mai) et inférieur à la période estivale et automnale (210 L/min en juin à 199 L/min en octobre). Ainsi les hautes eaux apparaissent plutôt en hiver et les basses eaux en été, confirmant le régime pluvial de cette source, illustré en Figure 4. Ce cycle annuel est perceptible mais les variations ponctuelles liées aux événements de pluie le prédominent, comme illustré par l'année 2007 comparativement à la médiane.

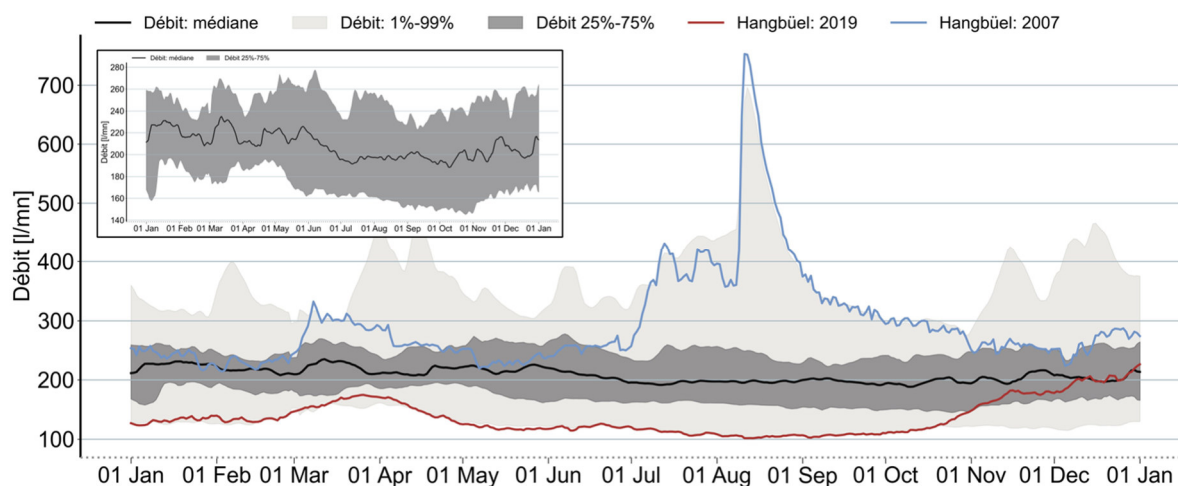


Figure 4 : Comparaison pluriannuelle de l'évolution du débit de la source de Hangbüel (moyenne mobile sur 5 jours).

L'analyse du débit normalisé de la source de Hangbüel met en évidence de fortes disparités entre les années (Figure 5 et Figure 6). Sur la période étudiée, l'année 2019 présente le débit moyen annuel le plus faible (136 L/min) tandis que l'année 2007 correspond à l'année avec le débit moyen le plus élevé (295 L/min ; Figure 5). Les années 2007, 2013, 2014 ressortent, avec un débit plus élevé que la moyenne, et 2017, 2019 et 2022, ressortent également mais avec un débit moins élevé que la moyenne. Les dernières années (2017-2023) semblent plus propices aux débits plus bas que la moyenne que les années 2006-2016. La visualisation *heatmap* mensuelle de z-score (Figure 6) permet d'illustrer la variabilité pluriannuelle. Elle montre peu de valeurs supérieures à la moyenne sur les 10 dernières années excepté en 2021 et 2023. Cela illustre également la forte hétérogénéité saisonnière des débits dû à la forte influence des précipitations. En accord avec cette réponse rapide aux précipitations, les différents indicateurs de sensibilité aux sécheresses suggèrent que la source a une résistance faible (VESPA) à moyenne (IRSAK et T1/2) aux sécheresses (Tableau 5).

L'analyse de la fréquence d'apparition des valeurs minimales annuelles indique une prédominance durant les saisons automnales et hivernales avec 75% des minimaux (23 mesures). Pour les valeurs maximales, l'hiver se distingue également avec 49% des maximaux annuels. La distribution qui représente le mieux les débits minimums est la GEV, elle permet d'estimer les temps de retour des faibles débits présentés au Tableau 6. Au-delà de 10 ans, ces estimations sont peu fiables en raison du nombre limité d'années de suivi, qui ne permet pas un ajustement précis. Ainsi pour un temps de retour de 10 ans on obtient un débit minimal de 110 L/min.

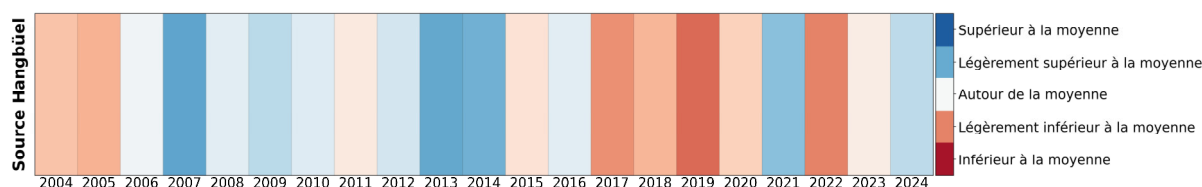


Figure 5 : Représentation en heatmap des variations du débit moyen annuel normalisé (z-score). Le classement de l'année 2003 est biaisé, car l'année n'est pas complète.

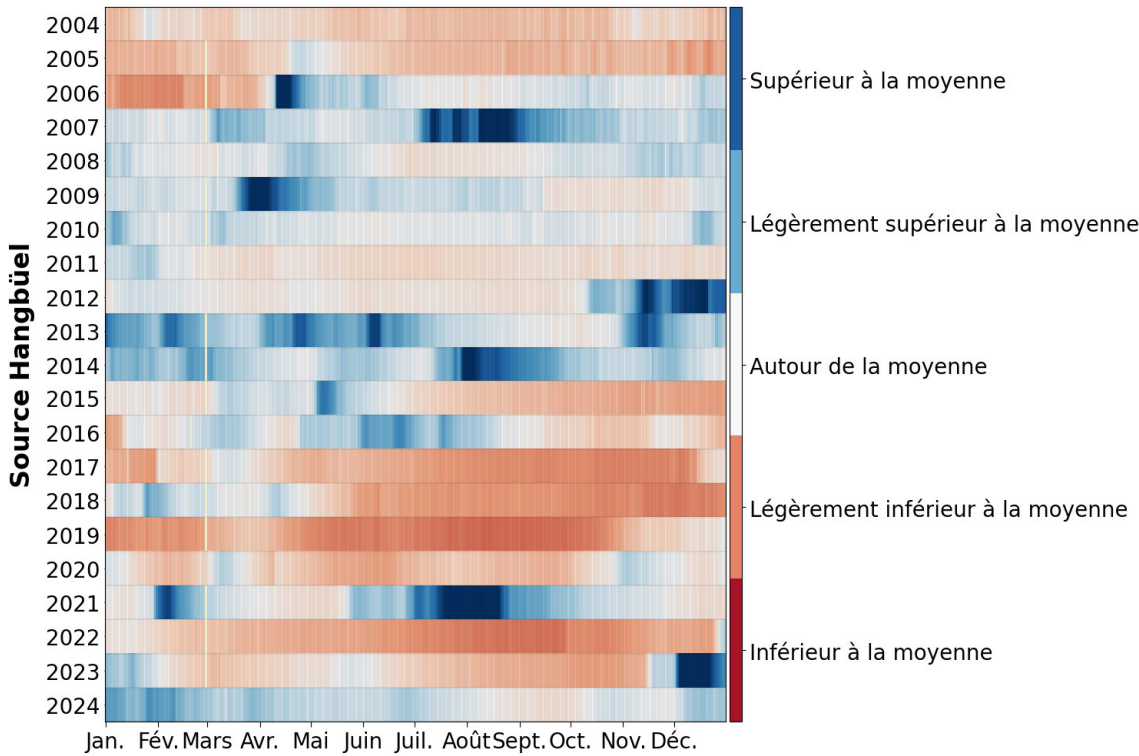


Figure 6 : Heatmap des variations journalières du débit normalisé (z-score). Les zones en jaune indiquent des données manquantes.

Indicateur	Indicateur physico-chimique	Indicateur valeur extrême		Indicateur de récession	
	VESPA	WFI	IRSAK	α [j ⁻¹]	T1/2 [j]
Valeur	9.5	0.74	0.63	0.0098	86
Classe de résistance	Faible	-	Moyen	-	Moyen

Tableau 5 : Récapitulatif de la signature de la source de Hangbüel

Temps de retour des minimaux (ans)	Débits (L/min)
2	151
5	122
10	110
20	101 (forte incertitude)

Tableau 6 : Temps de retour des minimums annuels issus de la distribution GEV

Le suivi à long terme de la source de Hangbüel permet le calcul du SSFI à partir des données disponibles. La Figure 7 présente le résultat du SSFI calculé sur une période de 1 mois, tandis que la Figure 8 illustre le SSFI calculé sur une période de 12 mois. On observe une forte variabilité interannuelle du SSFI, avec une alternance de phases humides et sèches. Entre 2006 et 2017, les valeurs de l’indice se situent majoritairement autour ou au-dessus de la normale, traduisant une période favorable à la recharge. À partir de 2017, plusieurs épisodes de déficit marqués apparaissent, notamment en 2018–2019 et 2022–2023, où le SSFI atteint des valeurs inférieures à -2, indiquant des conditions de sécheresse hydrologique prononcées. Ces épisodes coïncident

avec des années caractérisées par une recharge hivernale déficitaire et des étés particulièrement secs. Depuis 2023, une légère remontée du SSFI suggère une remontée temporaire du débit. Cette évolution met en évidence la sensibilité de la source Hangbüel aux fluctuations de la recharge et aux épisodes de sécheresse prolongés observés ces dernières années. Le SSFI mensuel révèle que les étés de 2017, 2018, 2019, 2022 et 2023 ont été particulièrement secs, avec un déficit maximal en août 2019.

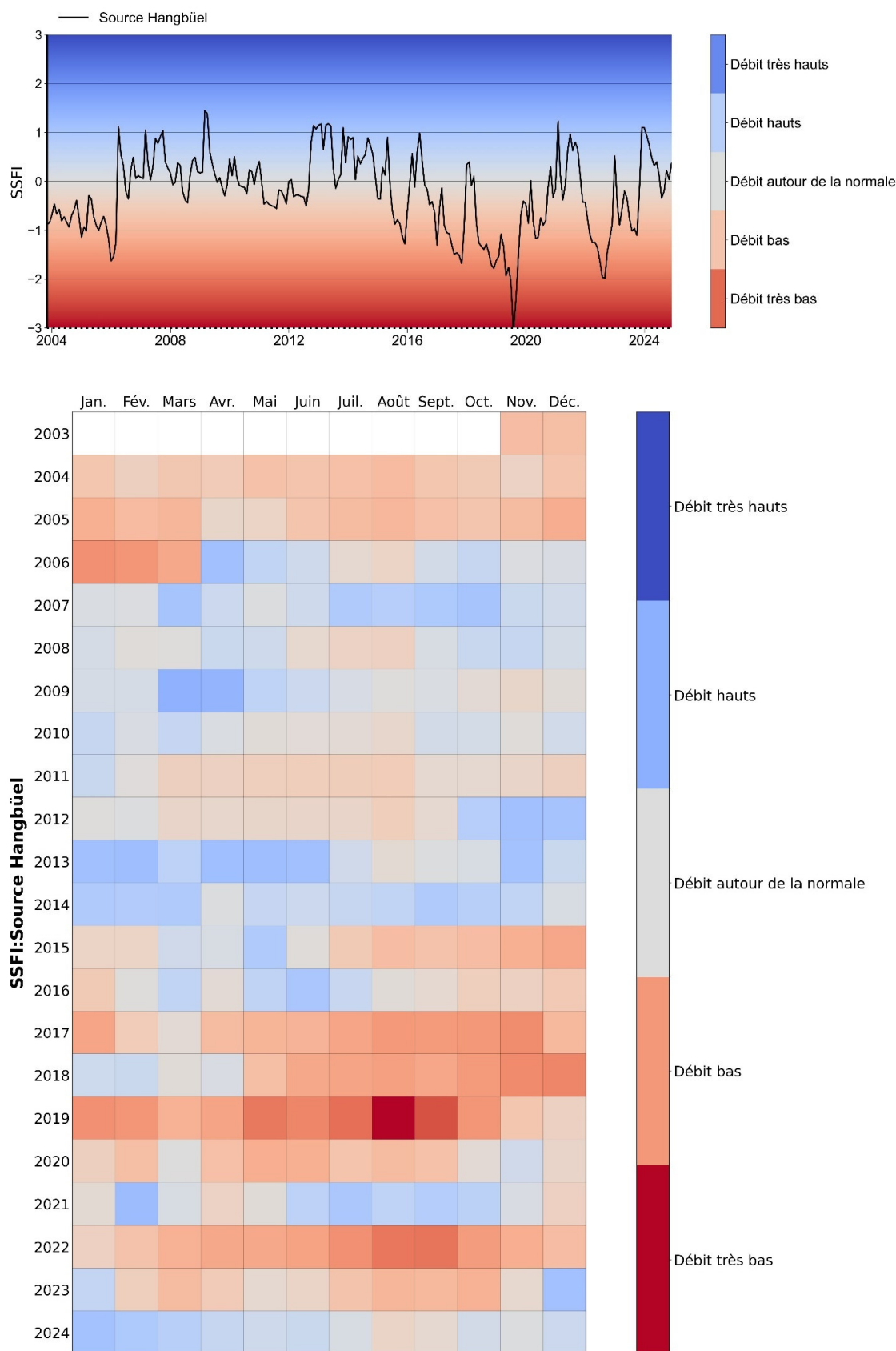


Figure 7 : Évolution de l'index SSFI sur 1 mois. Le graphique supérieur montre la dynamique de l'indicateur dans le temps. Le graphique inférieur présente le classement mensuel des valeurs sous forme de heatmap (valeur pas classée). Les zones en blanc indiquent des données manquantes.

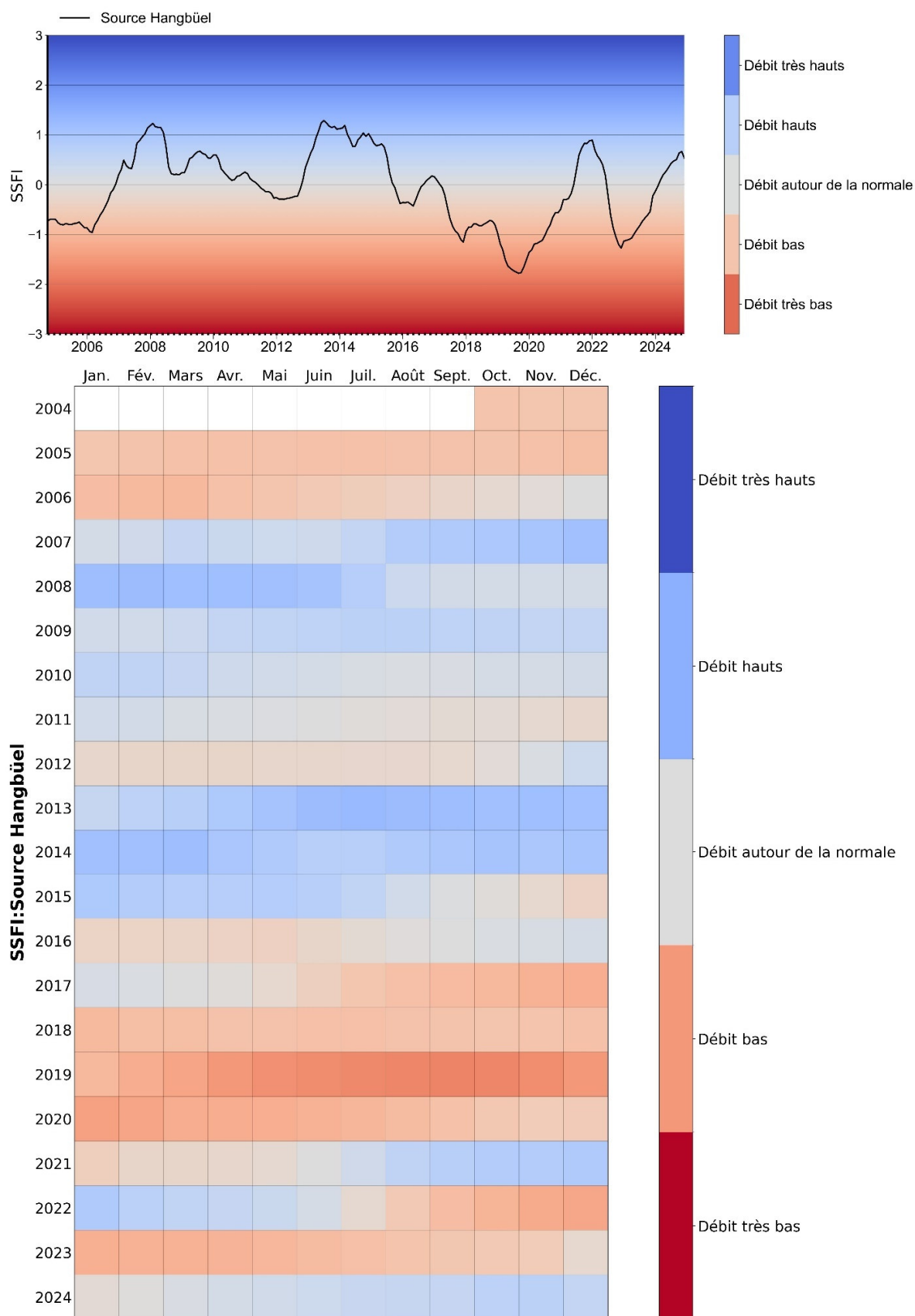


Figure 8 : Évolution de l'index SSFI sur 12 mois. Le graphique supérieur montre la dynamique de l'indicateur dans le temps. Le graphique inférieur présente le classement mensuel des valeurs sous forme de heatmap (valeur par classe). Les zones en blanc indiquent des données manquantes.

Les Ouches : piézomètre FD3

Le jeu de données du piézomètre FD3 couvre la période du 24 février 2021 au 14 novembre 2024, soit 3.7 années d'observations continues, à l'exception des périodes comprises entre le 21 mai 2022 et le 8 juillet 2022, ainsi qu'entre le 24 mars 2023 et le 10 août 2023 (Figure 9).

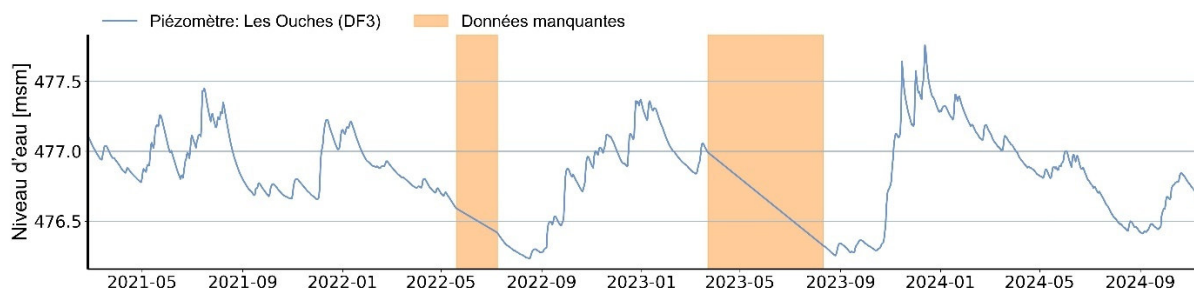


Figure 9 : Évolution du niveau de la nappe [msm] dans le piézomètre d'observation DF3 à proximité du puits d'exploitation des Ouches avec indication des données manquantes (trait jaune)

L'analyse des niveaux annuels minimums, moyens et maximums de la série du piézomètre indique que les mesures sont indépendantes et stationnaires. Les résultats fournissent des indications sur son fonctionnement hydrogéologique, mais la courte durée des données limite la fiabilité de l'analyse. En raison de la faible longueur de série, les tendances et les indicateurs temporels ne sont pas calculés, seul le z-score a été représenté à titre indicatif.

L'analyse du cycle hydrogéologique du piézomètre des Ouches (DF3) montre que le niveau médian mensuel est supérieur durant la période hivernale (hauteur médiane maximale en janvier : 477.244 msm) et atteint un niveau médian minimal fin de la période estivale (hauteur médiane minimale en août : 476.440 msm). Ainsi les hautes eaux apparaissent plutôt en hiver et les basses eaux en été, ce qui confirme le régime pluvial du piézomètre.

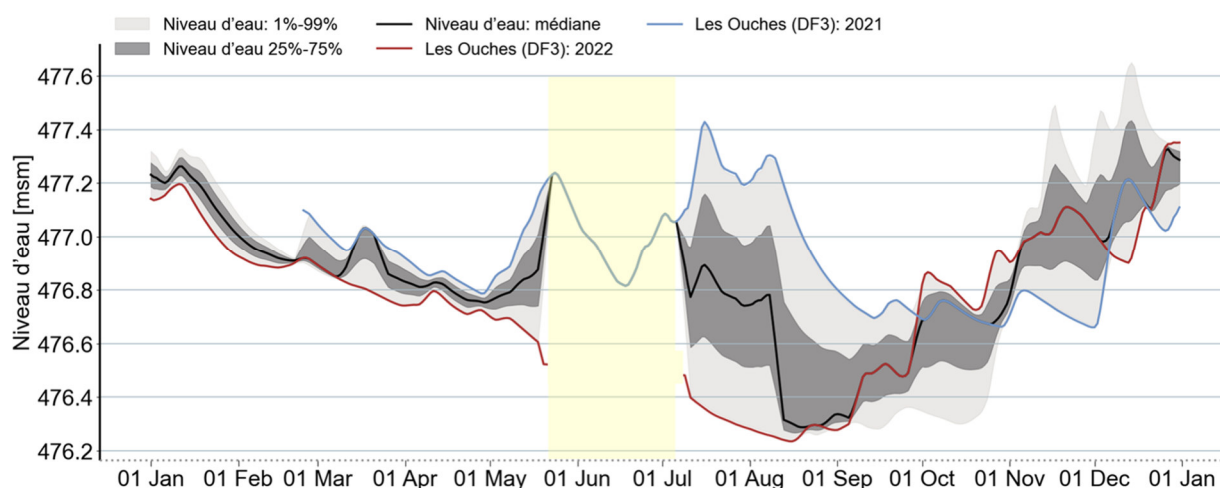


Figure 10 : Comparaison pluriannuelle de l'évolution du niveau du piézomètre des Ouches (DF3) (moyenne mobile sur 5 jours). Les données de 2022 sont absentes sur la zone en jaune.

L'analyse du débit normalisé met en évidence que, sur la période étudiée, l'année 2022 présente le niveau moyen le plus faible (476.758 msm), tandis que l'année 2021 correspond à celle où le niveau moyen est le plus élevé (476.937 msm ; Figure 11). La représentation sous forme de *heatmap* mensuelle du z-score (Figure 12) illustre la variabilité pluriannuelle des niveaux. Elle montre une certaine régularité interannuelle, avec des périodes de plus bas niveaux généralement observées en été et en fin d'été, alors que les périodes les plus humides se concentrent en hiver. Les années 2022 et 2023 se distinguent par des étés secs, avec des niveaux inférieurs à la moyenne qui, en 2023, se prolongent jusqu'au mois de novembre. Cette dernière année présente néanmoins un niveau moyen annuel proche de la normale, en raison d'une recharge particulièrement marquée en novembre et décembre.

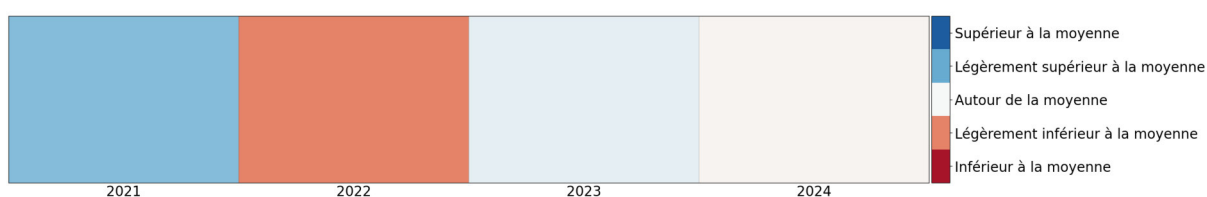


Figure 11 : Représentation en heatmap des variations du niveau moyen annuel normalisé (z-score).
Notons que les valeurs des années sont biaisées, car ces années ne sont pas complètes.

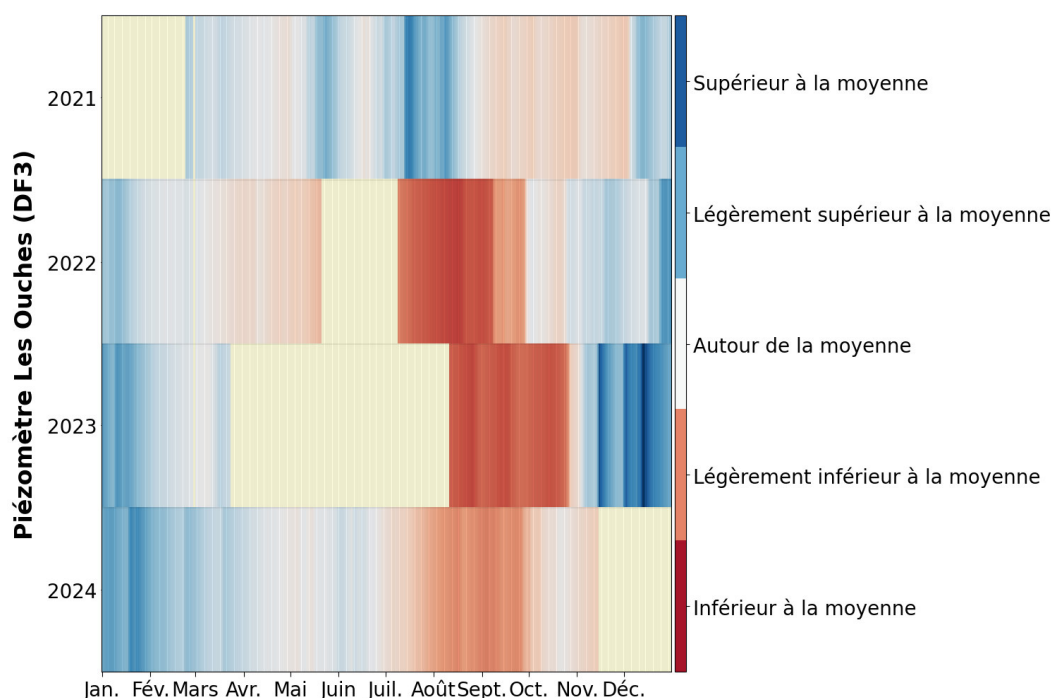


Figure 12 : Heatmap des variations journalières du niveau normalisé (z-score). Les zones en jaune indiquent des données manquantes.

Les indicateurs de sensibilité aux sécheresses pouvant être calculés sont seulement les indicateurs de récession, ils suggèrent que le système hydrogéologique possède une résistance faible moyenne aux sécheresses (Tableau 7).

Indicateur	Indicateur de récession	
	α [j ⁻¹]	T1/2 [j]
Valeur	0.0102	68
Classe de résistance	-	Moyenne

Tableau 7 : Récapitulatif des indicateurs de résistance pour le piézomètre des Ouches (df3)

L'analyse de la fréquence des valeurs annuelles minimales met en évidence une prédominance durant les saisons automnale et début hivernale, avec 75 % des minimums (soit 4 mesures) observés entre août et septembre. Les valeurs maximales apparaissent principalement en période hivernale, avec 75 % des maxima enregistrés durant l'hiver (4 mesures). La période de suivi du niveau du piézomètre des Ouches (DF3) est trop courte pour permettre d'analyser les valeurs extrêmes, les tendances dans les données ou encore pour le calcul de l'indicateur standardisé ou de position.

4.1.2 Source des Frassettes

Le jeu de données de la source de Frassettes couvre la période du 24 novembre 2016 au 24 octobre 2024, soit 7.9 années d'observations continues. Seules les mesures des 20 et 21 novembre 2018 font défaut au pas de temps journalier (Figure 13).

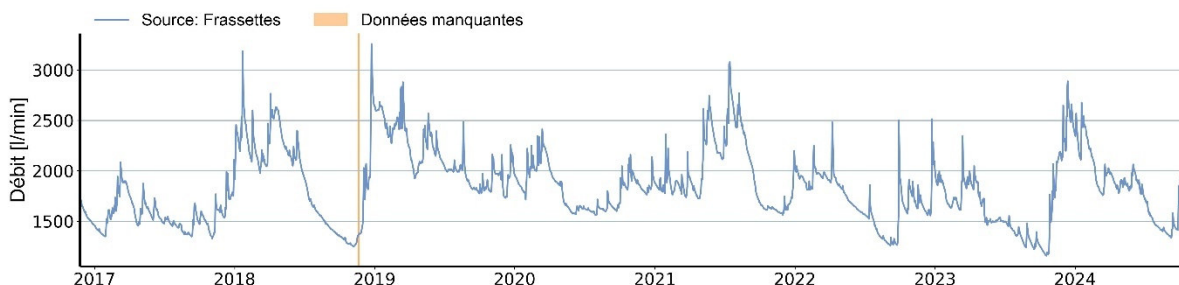


Figure 13 : Chronique journalière du débit [L/min] de la source de Frassettes avec indication des données manquantes (trait jaune)

L'analyse des débits annuels minimums, moyens et maximums montrent que les mesures sont indépendantes et stationnaires. Les débits minimums et maximums montrent des tendances opposées (pentes positives pour les débits moyens et maximums, négatives pour les minimums ; Figure 14) mais ces tendances ne sont pas statistiquement significatives, en raison du faible nombre d'années de suivi et de la forte variabilité des mesures.

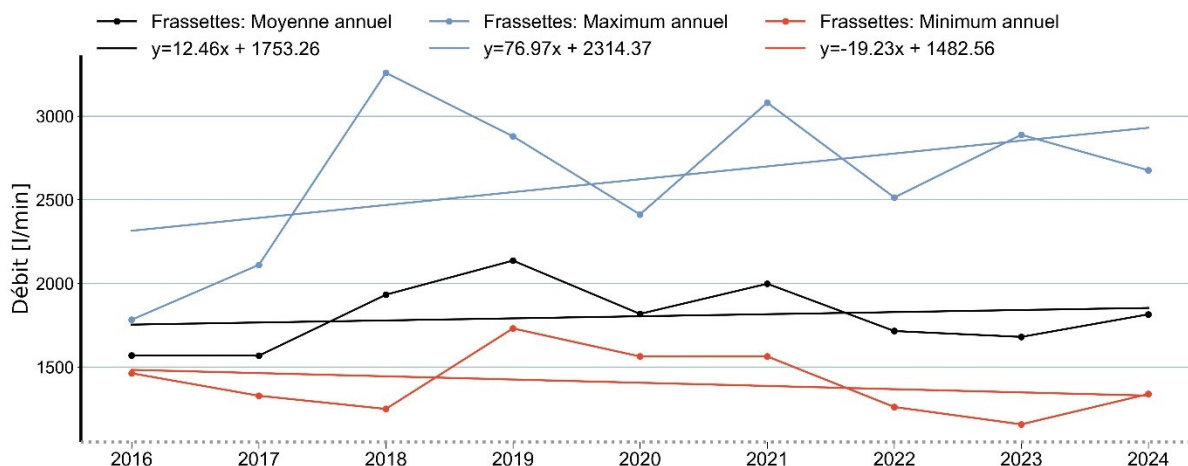


Figure 14 : Évolution annuelle des débits minimum, moyen et maximum à la station de Frassettes

L'analyse du régime hydrologique montre que le débit médian mensuel est supérieur durant la période hivernale (1704.2 L/min en novembre, 1998.0 L/min en février) et est plus faible en début d'automne (débit médian minimal de 1459.0 L/min en septembre). Ainsi les hautes eaux apparaissent plutôt en hiver et les basses eaux en été, indiquant un régime pluvial pour cette source même si certaines années semblent encore influencées par la recharge issue des apports de fonte de neige. En effet, l'analyse du débit normalisé de la source des Frassettes met en évidence de fortes disparités entre les années (Figure 17). Sur la période étudiée, l'année 2017 présente le débit moyen le plus faible (1567.6 L/min) avec un faible débit toute l'année, alors que l'année 2019 correspond à l'année avec le débit moyen le plus élevé (2135.9 L/min) (Figure 16). On remarque également que les années 2022 et 2023 apparaissent également plus sèches avec des débits faibles qui s'étendent jusqu'en octobre en 2022 et jusqu'en novembre en 2023 (Figure 16 et Figure 17).

Les indicateurs de sensibilité aux sécheresses indiquent que le système hydrogéologique possède une résistance moyenne (VESPA) à bonne (IRSAK et T1/2) aux sécheresses (Tableau 8). L'analyse de la fréquence d'apparition des valeurs annuelles minimales indique une prédominance durant les saisons automnale et début hivernale avec 88% des minimums (8 mesures) mesurés entre septembre et décembre. Pour les valeurs maximales, la période hivernale et le début du printemps se distinguent également avec 77% (7 mesures) de maximaux qui ont lieu entre novembre et mars. La distribution qui représente le mieux les débits minimums est celle de Gumbel, elle permet d'estimer les temps de retour des faibles débits présentés au Tableau 9. Au-delà de 8 ans, ces estimations sont peu fiables en raison du nombre limité d'années de suivi, qui ne permet pas un ajustement précis. Pour un temps de retour de 5 ans on obtient un débit minimal de 1260 L/min.

La période de suivi de la source de Frassettes est trop courte pour permettre le calcul d'un indicateur standardisé. Néanmoins, l'indice de position est présenté ici afin de classer les mois d'observation en fonction de leur débit mensuel (Figure 18). Cet indicateur met en évidence des mois particulièrement secs en octobre et novembre 2018, en août et septembre 2022, ainsi qu'entre août et octobre 2023. Le mois de juillet 2021 a été le plus humide de toute la série, suivi par le moi de janvier 2019.

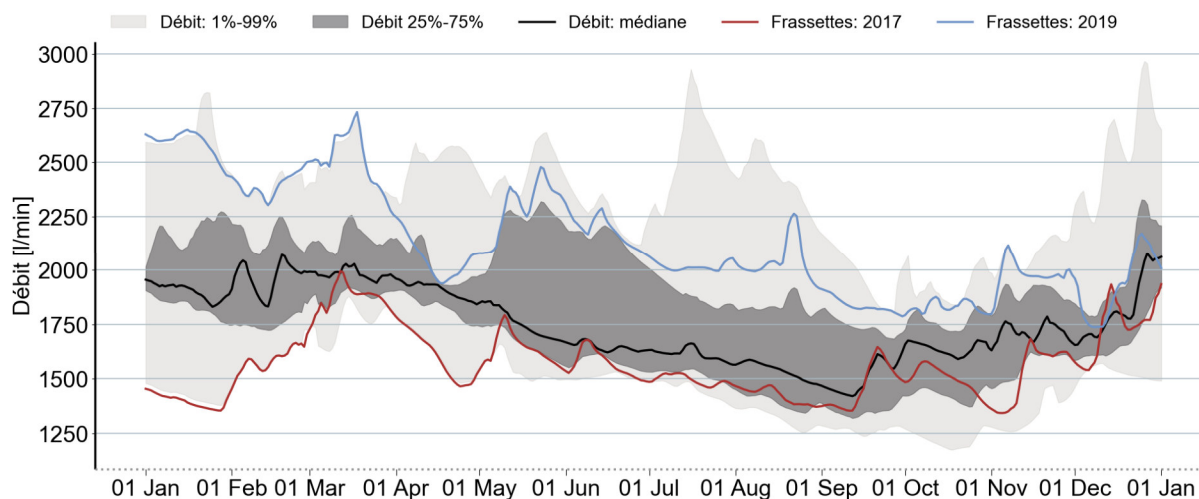


Figure 15 : Comparaison pluriannuelle de l'évolution du débit de la source de Frassettes (moyenne mobile sur 5 jours).

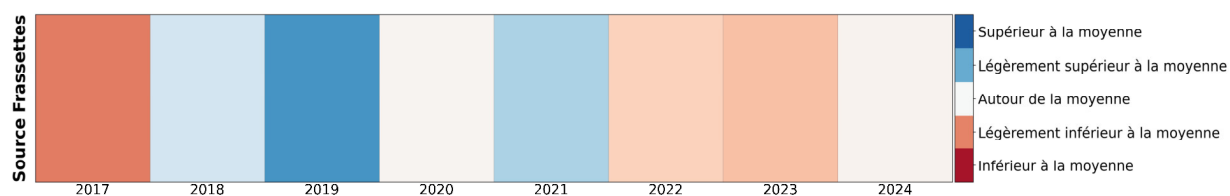


Figure 16 : Représentation en heatmap des variations du débit moyen annuel normalisé (z-score).
Notons que la valeur de 2024 est légèrement biaisée, car il manque un peu plus de 2 mois de données

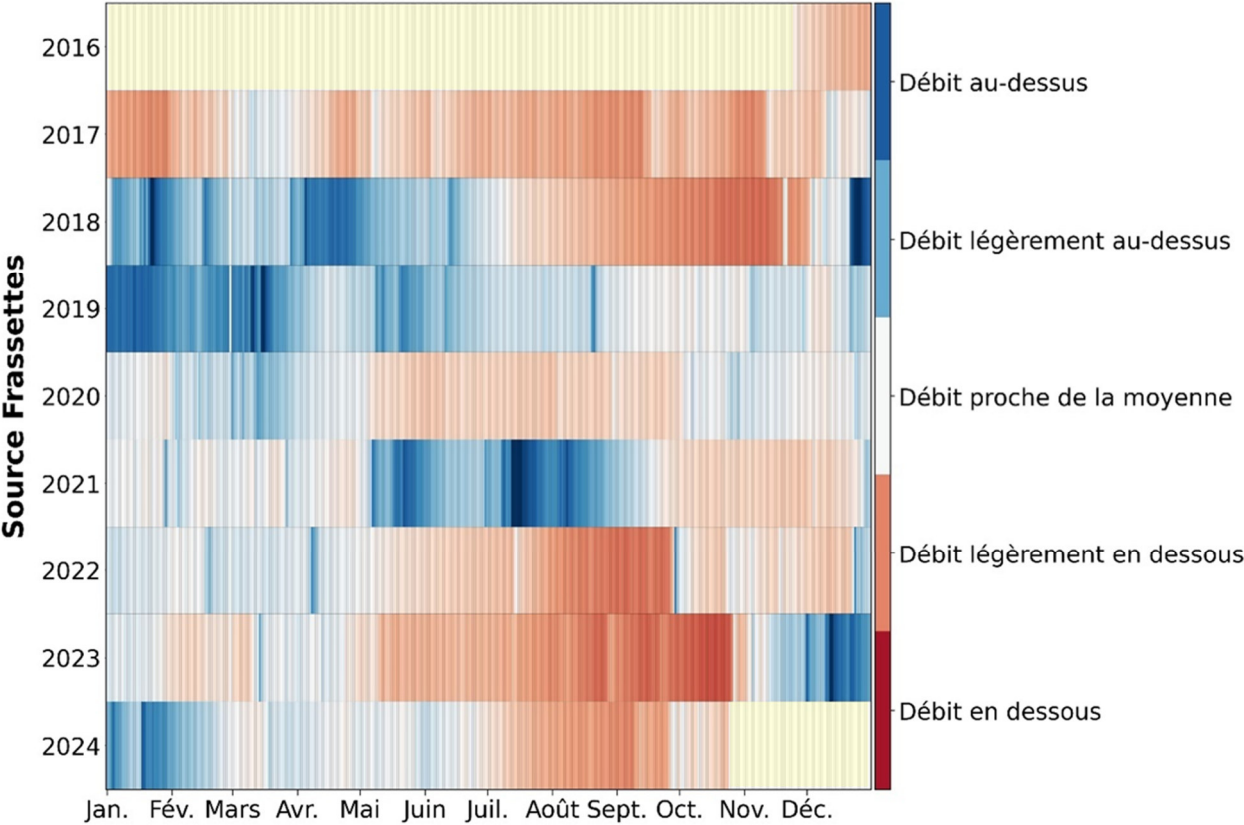


Figure 17 : Heatmap des variations journalières du débit normalisé (z-score). Les zones en jaune indiquent des données manquantes.

Indicateur	Indicateur physico-chimique	Indicateur valeur extrême		Indicateur de récession	
	VESPA	WFI	IRSAK	α [j ⁻¹]	T1/2 [j]
Valeur	0.61	0.76	0.83	0.018	114
Classe de résistance	Moyenne		Bonne	-	Bonne

Tableau 8 : Récapitulatif des indicateurs de résistance pour la source de Frassettes

Temps de retour des minimaux	Débits (L/min)
2 ans	1422
5 ans	1260
10 ans	1172 (forte incertitude)
25 ans	1098 (à titre indicatif)

Tableau 9 : Temps de retour des minimums annuels issus de loi de distribution de Gumbel

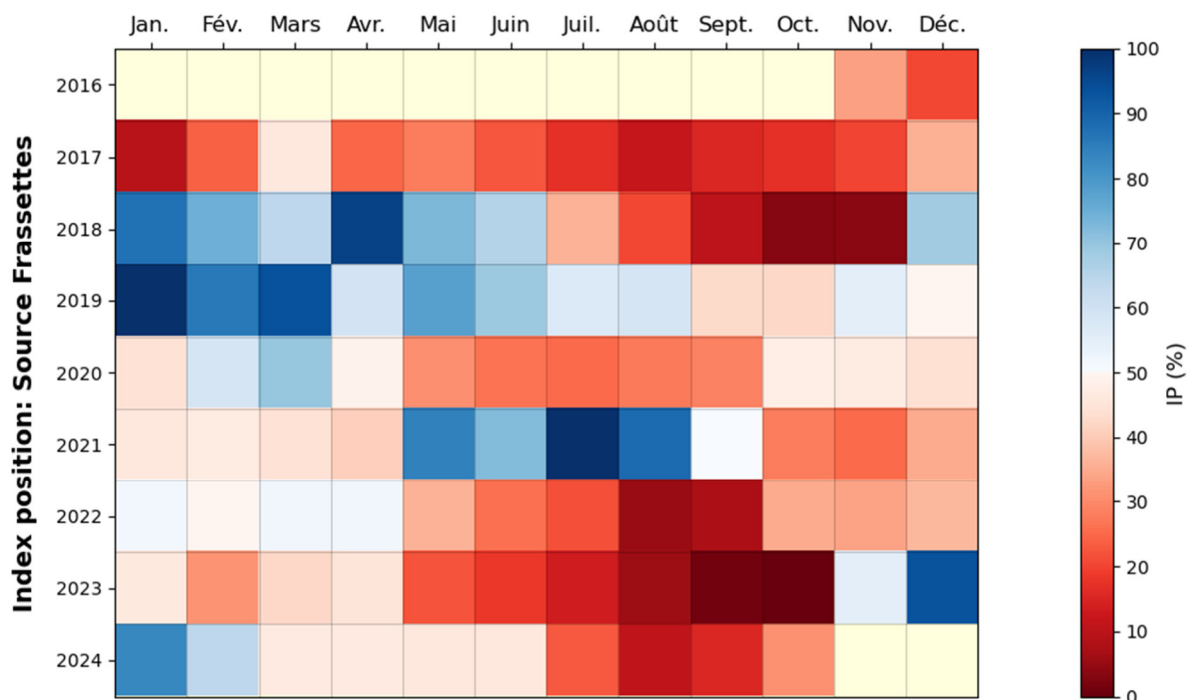


Figure 18 : Débits mensuels de la source de Frassettes exprimés sous forme d'indice de position. Chaque barre représente la position relative du débit moyen du mois dans la série observée. Les zones en jaune indiquent des données manquantes.

4.2 Régime Régime nivo-pluvial

4.2.1 Source de Villard-Bony supérieur

Le jeu de données de la source de Villard-Bony couvre la période du 22 juin 2021 au 31 mars 2025, soit 3.8 années d'observations continues sans valeur aberrante ou manquante (Figure 19).

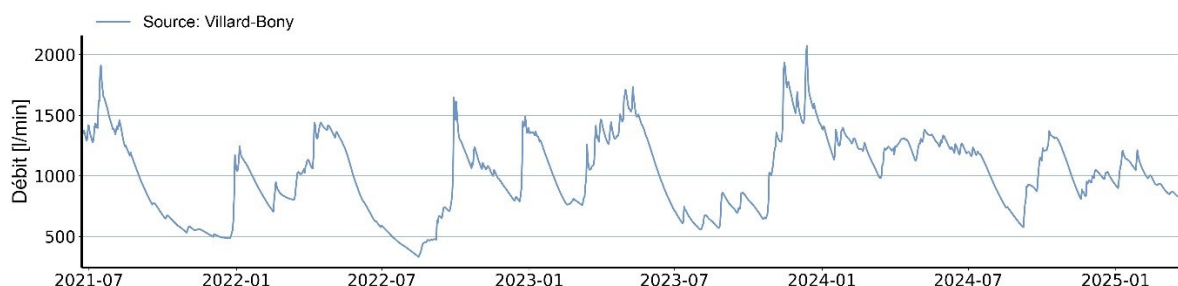


Figure 19 : Chronique journalière du débit [L/min] de la source de Villard-Bony supérieur

L'analyse des débits annuels minimums, moyens et maximums de Villard-Bony Supérieur n'a pas permis d'évaluer statistiquement l'indépendance et la stationnarité des données en raison du nombre très limité d'années de suivi. Ainsi le calcul des indicateurs ci-après fournissent des indications sur le fonctionnement de la source mais cette courte durée de suivi limite la fiabilité de l'analyse.

L'analyse du régime hydrologique de la source Villard-Bony supérieur, présentée en Figure 20, montre que le débit médian est légèrement supérieur durant la période de début d'hiver et au printemps avec un premier pic de débit mi-hiver (débit médian maximal de 1130 L/min en janvier) et un second pic au printemps. Le débit est inférieur à la médiane durant la période estivale (débit minimal de 674 L/min en août). La période de hautes eaux semble être au printemps et celle de basses eaux plutôt en été et en fin d'hiver indiquant plutôt un régime nivo-pluvial.

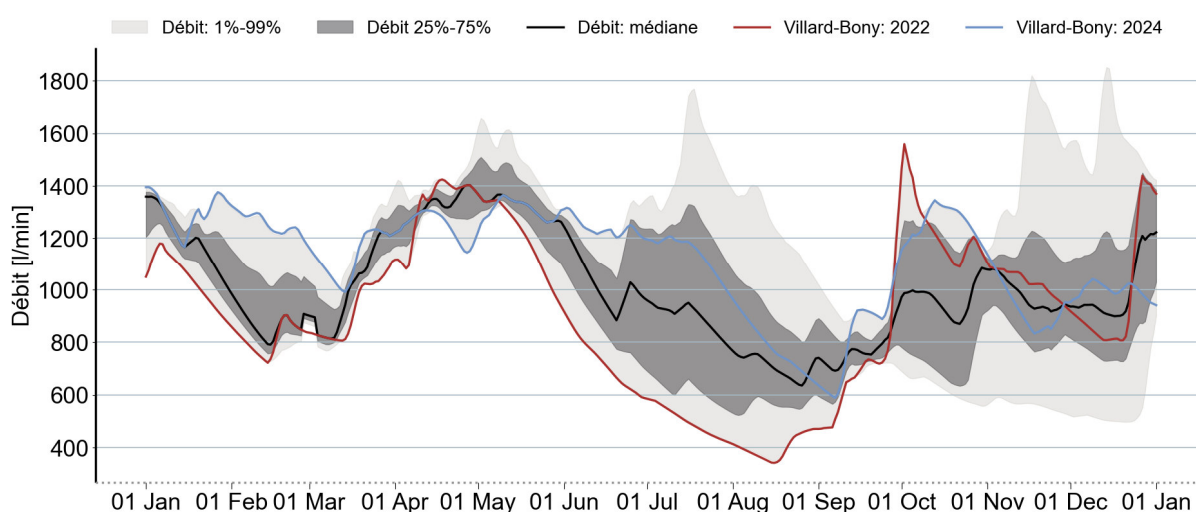


Figure 20 : Comparaison pluriannuelle de l'évolution du débit de la source de Villard-Bony supérieur (moyenne mobile sur 5 jours).

L'analyse du débit normalisé met en évidence que, sur la période étudiée, l'année 2022 présente le débit moyen le plus faible (907.02 L/min), tandis que l'année 2021 correspond à celle où le débit moyen est le plus élevé (1117.30 L/min; Figure 21). La représentation sous forme de *heatmap* mensuelle du z-score (Figure 22) illustre la variabilité pluriannuelle des niveaux. Elle montre une certaine irrégularité interannuelle, avec des périodes de débit en dessous de la moyenne généralement observées en été et en fin d'été, alors que les périodes au-dessus de la moyenne sont plutôt en hiver et printemps, mais dépendamment des années. Les années 2021 et 2022 se distinguent par des périodes sèches, avec des débits inférieurs à la moyenne qui, en 2021 ont lieu de septembre à décembre alors qu'en 2022 c'est plutôt la période de juin à septembre qui est plus sèche.

Sur la période restreinte 2021-2025, l'analyse de la fréquence des valeurs annuelles minimales met en évidence une prédominance durant août-septembre avec 60 % des minimums (5 mesures). Les valeurs maximales apparaissent principalement en période hivernale, avec 60% des maxima enregistrés durant l'hiver (5 mesures). La période de suivi est trop courte pour permettre d'analyser les valeurs extrêmes, les tendances dans les données ou encore pour le calcul de l'indicateur standardisé ou de position. Les indicateurs de sensibilité aux sécheresses pouvant être calculés suggèrent que le système hydrogéologique possède une résistance moyenne aux sécheresses (Tableau 10).



Figure 21 : Représentation en heatmap des variations du débit moyen annuel normalisé (z-score).

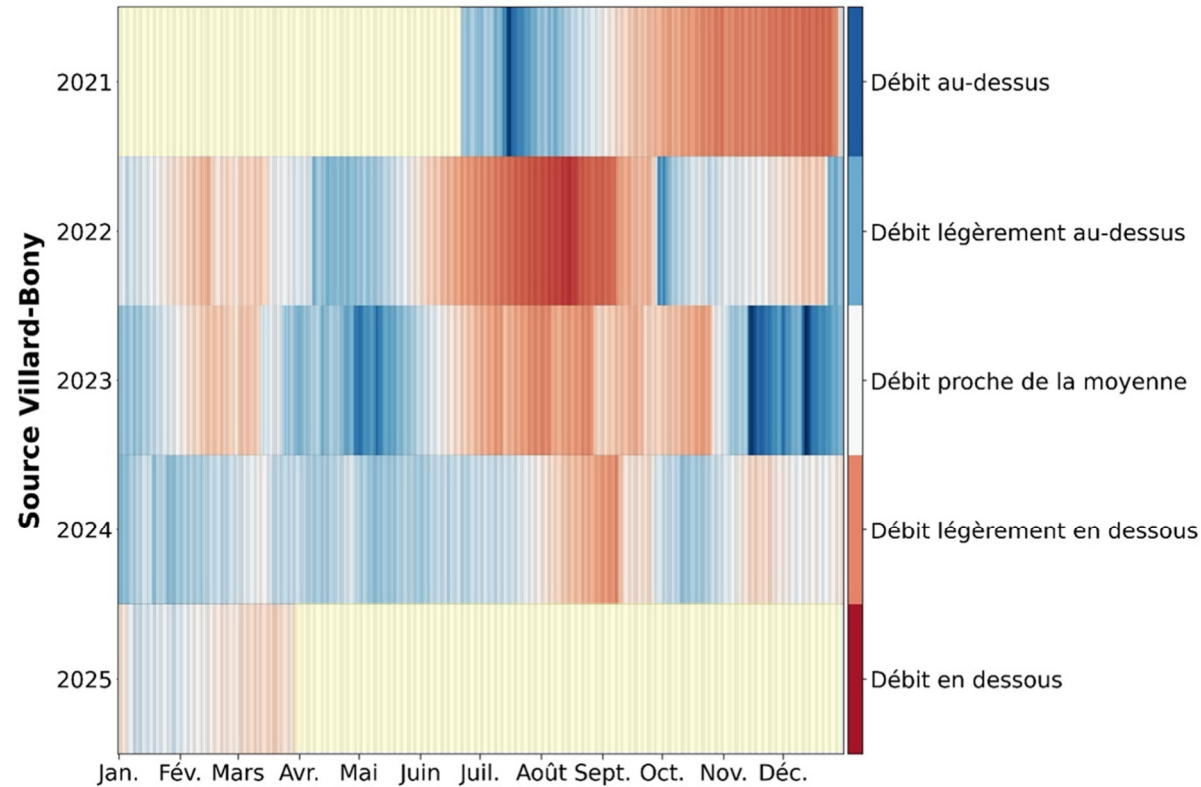


Figure 22 : Heatmap des variations journalières du débit normalisé (z-score). En jaune : données manquantes.

Indicateur	Indicateur physico-chimique	Indicateur valeur extrême		Indicateur de récession	
	VESPA	WFI	IRSAK	α [j ⁻¹]	T1/2 [j]
Valeur	-	0.61	0.54	0.013	50
Classe de résistance	-	-	Moyenne	-	Moyenne

Tableau 10 : Récapitulatif de la signature de la source de Villard-Bony supérieur

4.2.2 Flamatt : piézomètre de Neueneegg

Le jeu de données du piézomètre de Neueneegg (canton de Bern) couvre la période du 1^{er} janvier 1994 au 31 décembre 2023, soit 30 années d'observations continues (Figure 23).

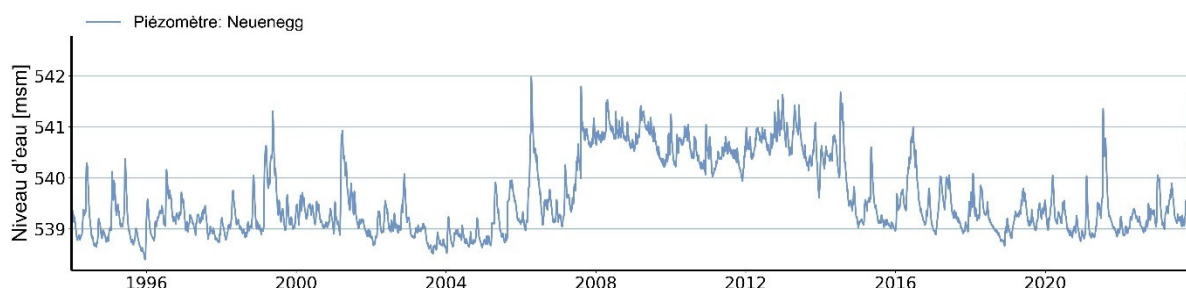


Figure 23 : Évolution du niveau de la nappe [msm] dans le piézomètre d'observation de Neueneegg (BE) à proximité du puits d'exploitation de Flamatt

L'analyse des débits annuels minimums, moyens et maximums des 30 ans de mesure du piézomètre de Neueneegg (BE) montre que les données ne sont ni indépendantes, ni stationnaires et qu'elles présentent des ruptures. Cette rupture a eu lieu en 2007, elle pourrait être due à un changement de fonctionnement lié à des événements météorologiques et hydrologiques spécifiques (par exemple la crue de la Singine d'août 2007) ou encore à des influences anthropiques (par exemple un changement de régime d'exploitation entraîne une remontée de nappe). Cette non-stationnarité pose des soucis d'analyse, c'est pourquoi il a été décidé d'analyser conjointement les niveaux d'eau sur 30 ans qui offre un suivi rare par sa longueur et sur les 10 dernières années, soit la période de 2014-2024. Sur cette période 2014-2024, les séries de débits annuels minimums, moyens et maximums sont indépendants et partiellement stationnaires (deux tests validés sur trois). De plus aucune rupture n'est détectée sur la série de débit 2014 - 2024.

Les niveaux annuels minimaux, moyen et maximal montrent des tendances opposées (pentes positives pour les maximums, négatives pour les minimums ; Figure 24). Ces tendances ne sont toutefois pas statistiquement significatives et pourraient être induites par l'événement de rupture de 2007. Sur la période de 2014 à 2024, aucune tendance significative n'est observée (Figure 25).

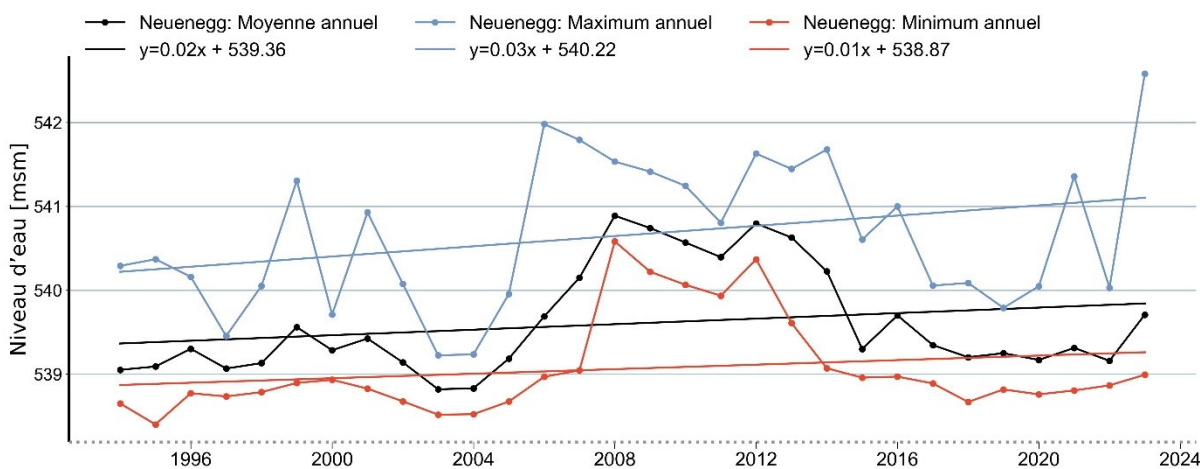


Figure 24 : Évolution annuelle du niveau minimal, moyen et maximal du niveau au piézomètre de Neueneegg(1994-2024)

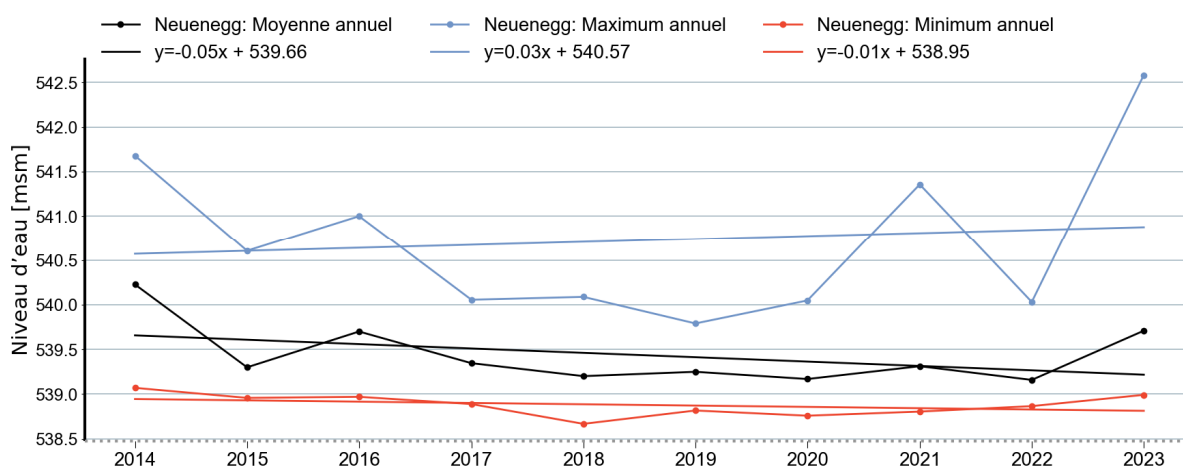


Figure 25 : Évolution annuelle du niveau minimal, moyen et maximal du niveau au piézomètre de Neuenegg(2014-2024)

L'analyse du cycle hydrogéologique du piézomètre de Neuenegg (Figure 26 et Figure 27) montre que le niveau médian mensuel est plus élevé de mars à juillet (hauteur médiane maximale de 539.59 msm en mai) et plus faible septembre-octobre (hauteur médiane minimale de 539.16 msm en septembre). La période de hautes eaux coïncide avec la fonte des neiges. Il est possible que ce piézomètre soit influencé par des apports de fonte de neige via sa connexion avec la Singine. Le régime hydrogéologique est plutôt de type pluvio-nival.

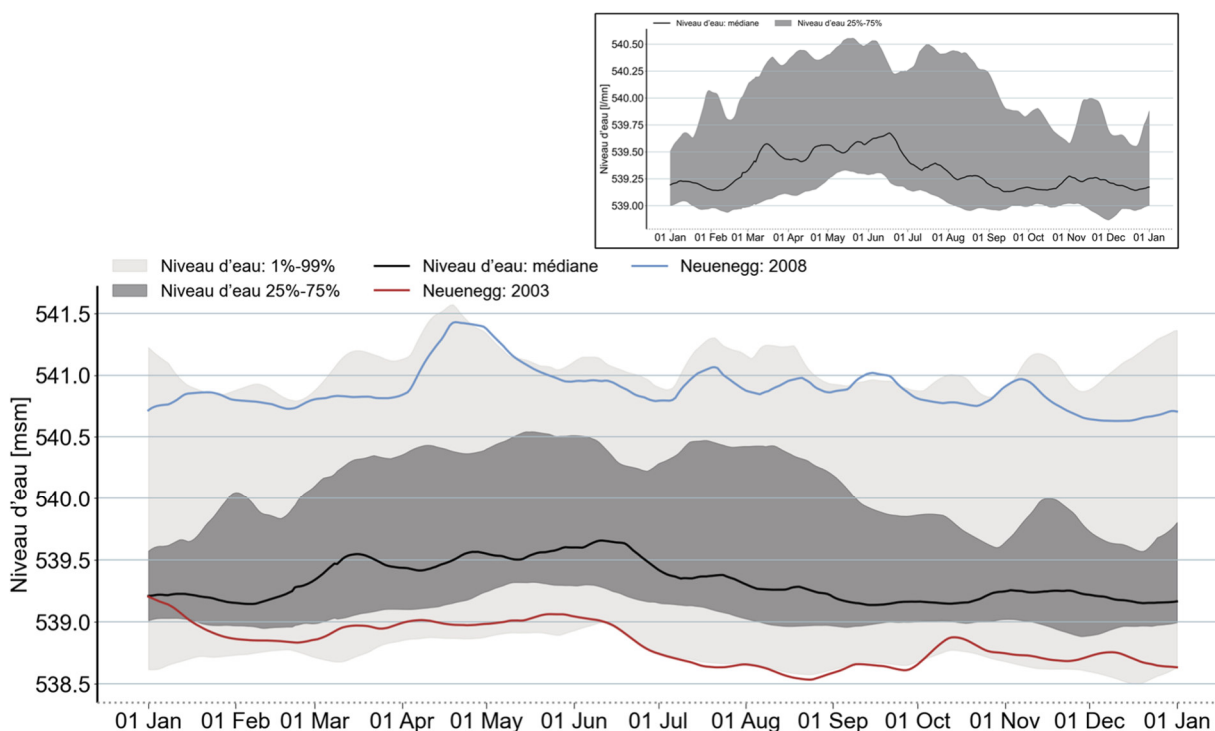


Figure 26 : Comparaison pluriannuelle de l'évolution du niveau du piézomètre Neuenegg (moyenne mobile sur 5 jours ; 1994-2024)

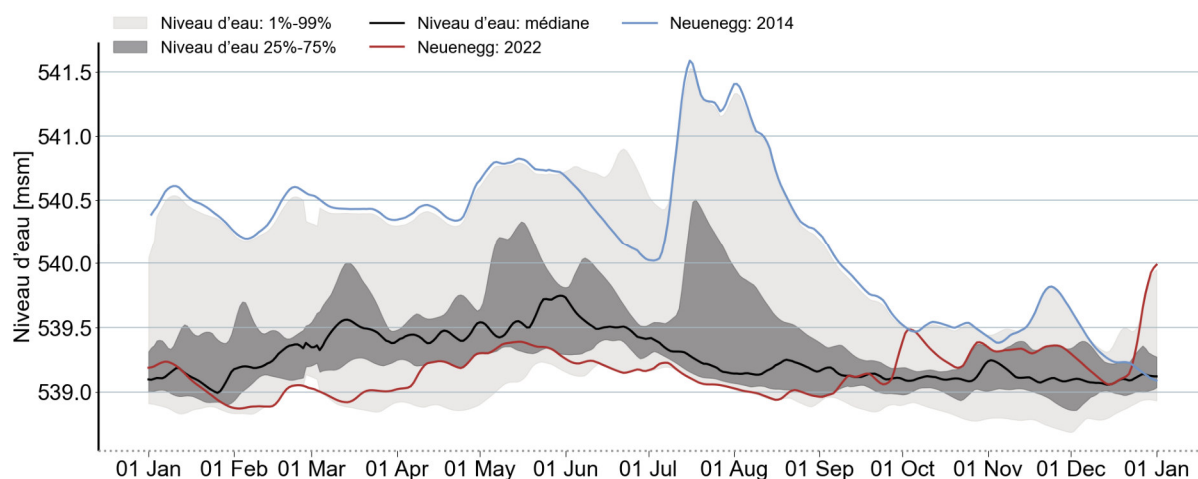


Figure 27 : Comparaison pluriannuelle de l'évolution du niveau du piézomètre Neueneegg (moyenne mobile sur 5 jours) (2014-2024)

Sur la période de 1994 à 2024, l'année 2003 présente le niveau moyen le plus faible (538.82 msm). L'année 2008 correspond à l'année avec le niveau moyen le plus élevé (540.89 msm ; Figure 26). Pour la période de 2014-2024, l'année 2022 présente le niveau moyen annuel le plus faible (2022 : 538.87 msm). L'analyse du niveau normalisé du piézomètre de Neueneegg met en évidence de fortes disparités entre les années (Figure 29). Cette analyse révèle également une rupture notable survenue en août 2007, avec des débits qui restent anormalement élevés (dans les teintes bleues) jusqu'à fin 2014.

Les indicateurs de sensibilité aux sécheresses pouvant être calculés sont seulement les indicateurs de récession, ils suggèrent que le système hydrogéologique possède une résistance moyenne aux sécheresses (T1/2 ; Tableau 11).

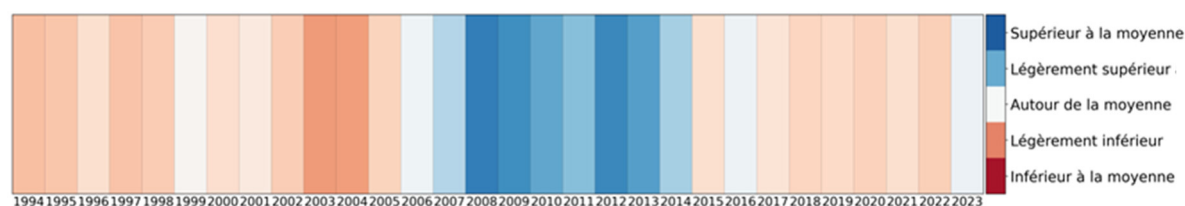


Figure 28 : Représentation en heatmap des variations du niveau moyen annuel normalisé (1994-2024)

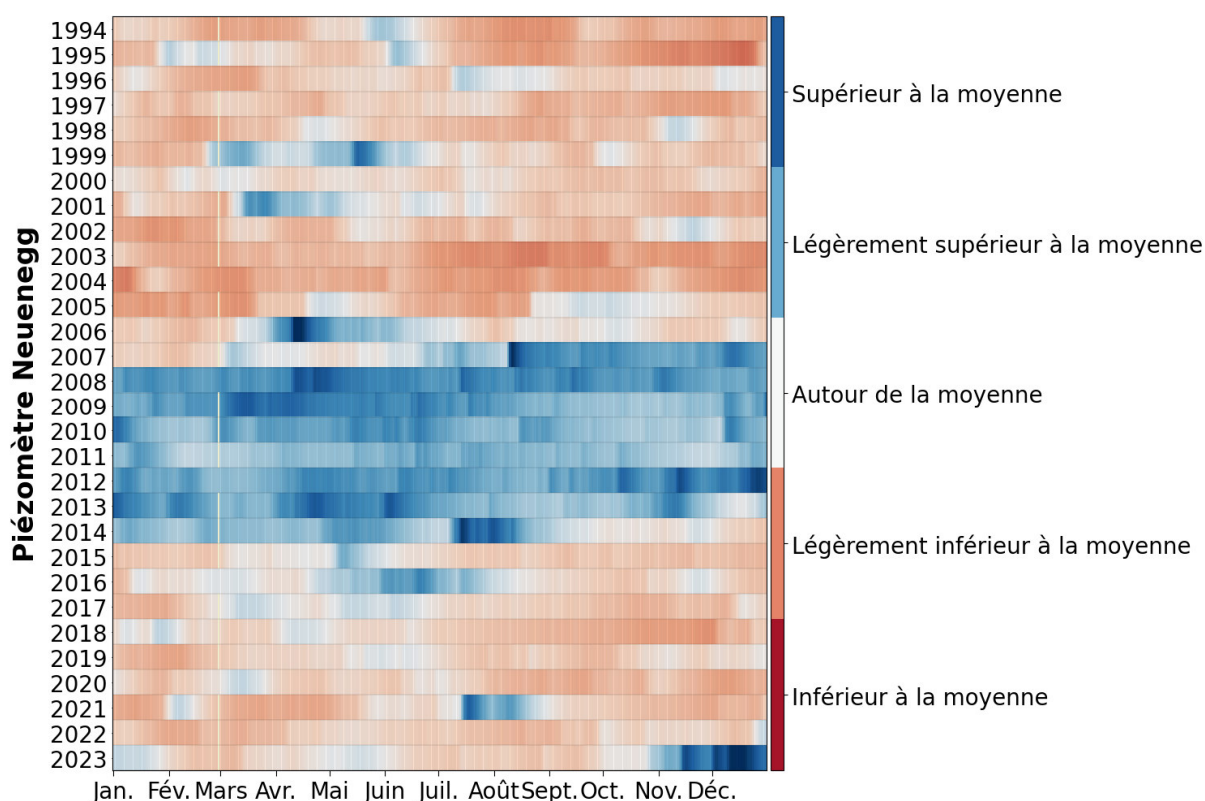


Figure 29 : Heatmap des variations journalières du niveau normalisé (1994-2024)

Indicateur	Indicateur de récession	
	α [j ⁻¹]	T1/2 [j]
Valeur	0.0155	45
Classe de résistance	-	Moyenne

Tableau 11 : Récapitulatif de la signature du piézomètre de Neueneegg (1994-2024)

Pour la période 2014-2024 (Figure 31), on observe le même pattern qu'avant 2007, avec des augmentations brusques de débit en juillet 2014, juin 2016, juillet 2021 et novembre-décembre 2023, suivies de diminutions plus étalées et progressives. L'année 2014 correspond à l'année avec le niveau moyen le plus élevée (2014 : 539.070 msm) (Figure 27).

L'analyse des fréquences des minima annuels a été réalisée seulement sur la période 2014-2024. Elle ne met pas en évidence de période spécifique dominante. La période automnale est cependant peu représentée, avec seulement 10% des occurrences (3 valeurs). En revanche, les valeurs maximales surviennent principalement durant la période hivernale, avec 88% des valeurs enregistrées (24 valeurs).

La distribution qui représente le mieux les débits minimums est la distribution de Gumbel, elle permet d'estimer les temps de retour des faibles débit présentés au Tableau 9. Au-delà de 10 ans, ces estimations sont peu fiables en raison du nombre limité d'années de suivi qui ne permet pas un ajustement précis. Ainsi pour un temps de retour de 10 ans on obtient un niveau minimal de 538.695 msm.

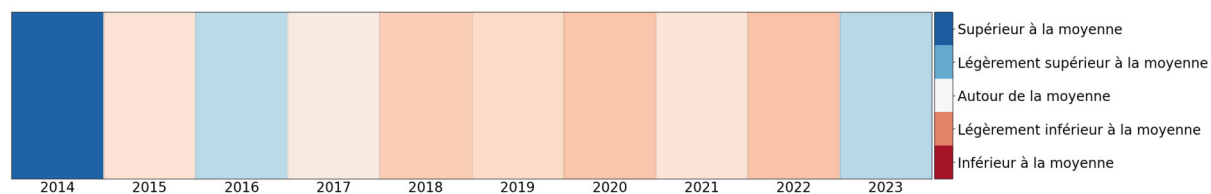


Figure 30 : Représentation en heatmap des variations du niveau moyen annuel normalisé (2014-2024)

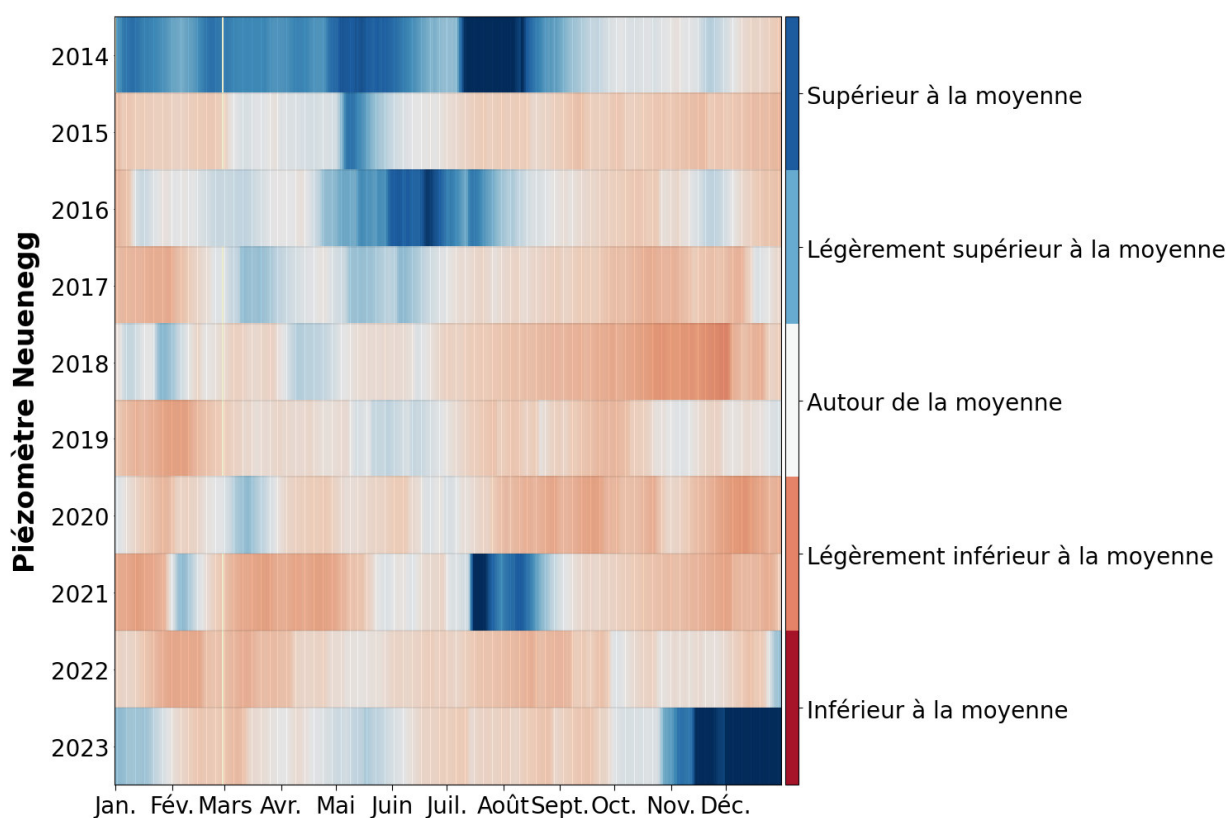


Figure 31 : Heatmap des variations journalières du niveau normalisé (2014-2024)

Temps de retour des minimaux (ans)	Valeur du model
2	538.914
5	538.782
10	538.695
20	538.611 (à titre indicatif)

Tableau 12 : Temps de retour des minimums annuels issus de la loi de Gumbel sur la période de 2014 à 2024.

La période de suivi du niveau du piézomètre de Neueneegg est une référence en qualité de données. Elle permet l'utilisation d'indicateurs standardisés SPLI (Figure 32). Cependant, la présence d'une rupture compromet l'homogénéité des données sur l'ensemble de la période, limitant ainsi leur usage pour comparer avec des événements passés. Les résultats ont donc été montré à titre indicatifs mais ne peuvent être interprétés.

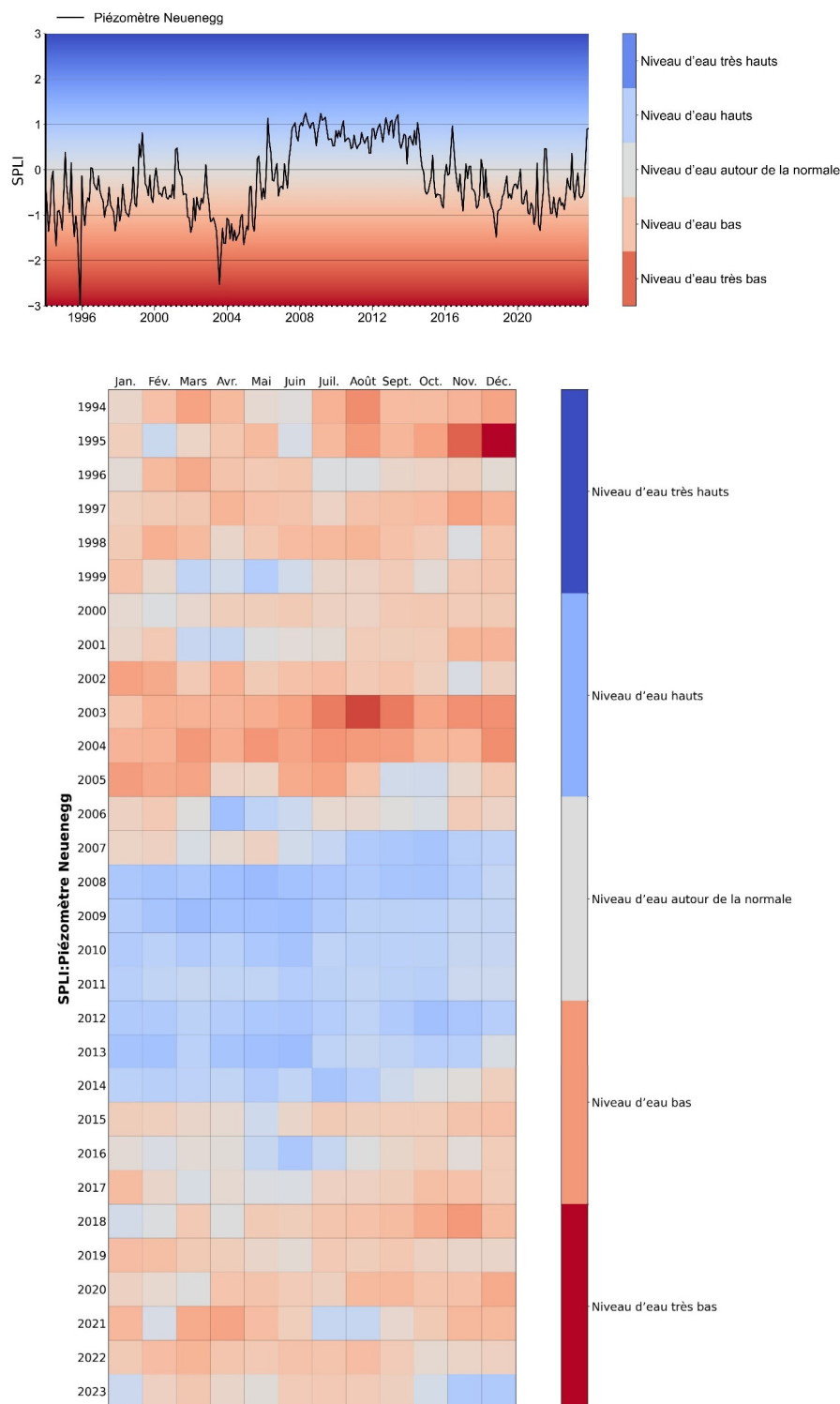


Figure 32 : Évolution du SPLI sur 1 mois (1994-2024). Le graphique supérieur montre la dynamique de l'indicateur dans le temps. Le graphique inférieur présente le classement mensuel des valeurs sous forme de heatmap (valeur par classe). Les zones en jaune indiquent des données manquantes.

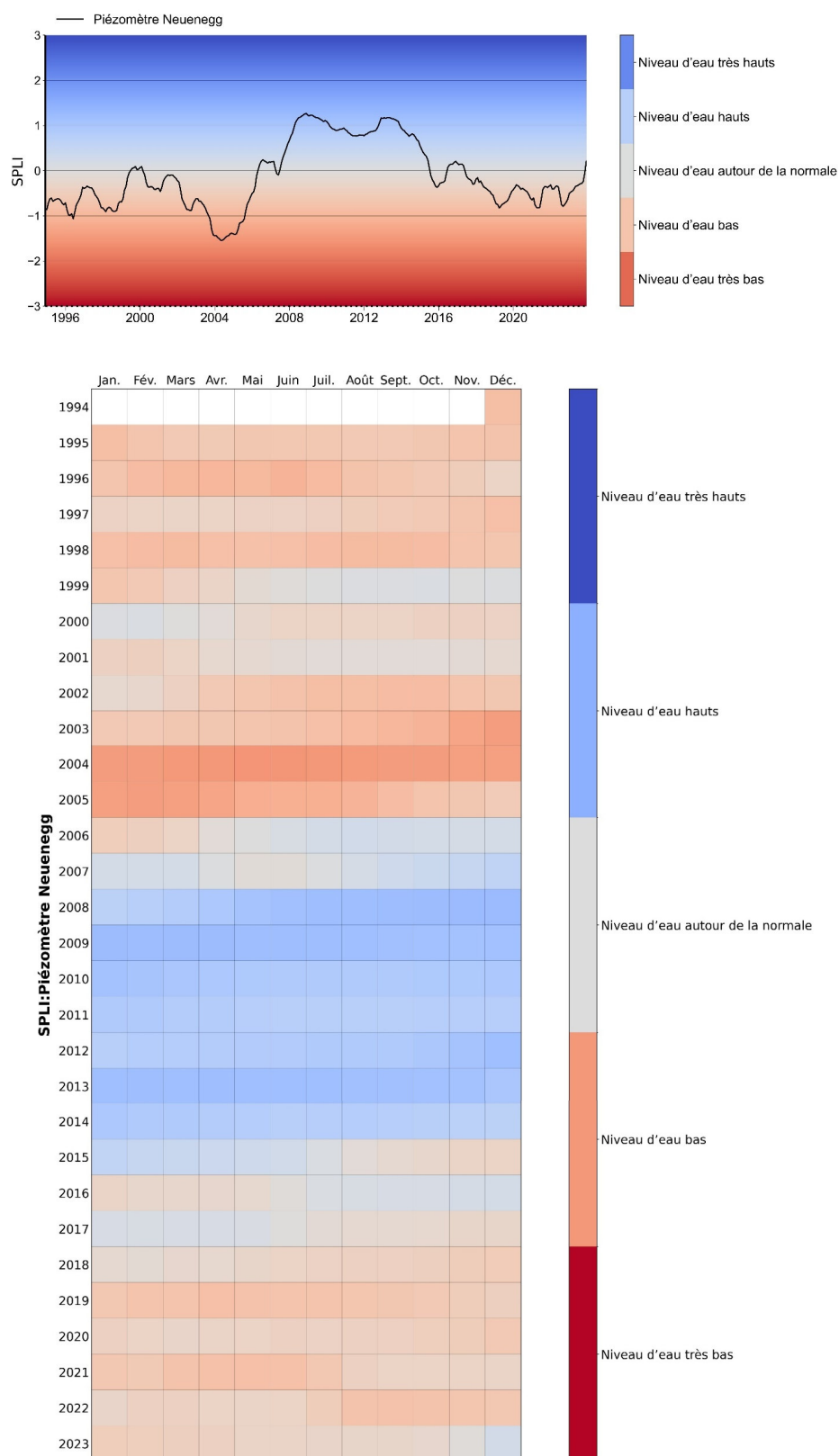


Figure 33 : Évolution du SPLI sur 12 mois. Le graphique supérieur montre la dynamique de l'indicateur dans le temps. Le graphique inférieur présente le classement mensuel des valeurs sous forme de heatmap continue (valeur pas classe). Les zones en blanc indiquent des données manquantes.

4.2.3 Grandvillard/Fin de la Porta : piézomètre PZ2

Le jeu de données des piézomètres de PZ1, PZ2 et PZ3 couvre la période du 29 janvier 2008 au 19 mai 2019, soit 11.31 années d'observations continues. Pour la suite, le PZ2 a été choisi car il semble être le moins impacté par d'éventuels pompages. Sur ce point, les mesures du 31 décembre 2015 au 12 janvier, du 31 décembre 2016, et 1 juillet 2017 au 9 janvier 2018 font défaut (Figure 34). Les séries de PZ1 et PZ3 sont disponibles en Annexe 14.

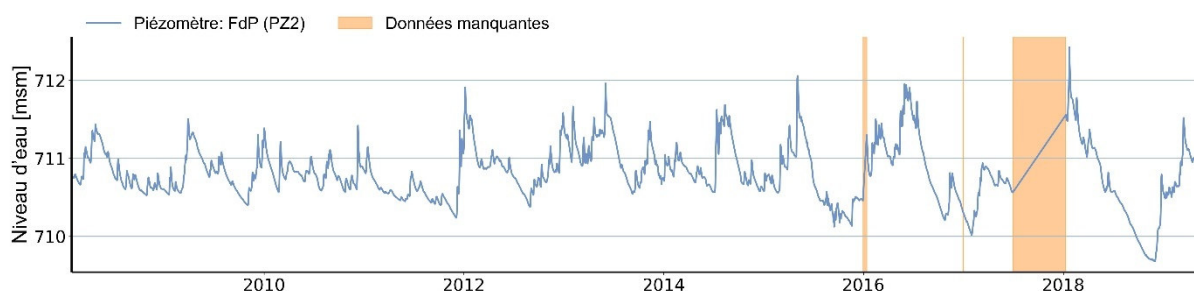


Figure 34 : Évolution du niveau de la nappe [msm] dans les trois piézomètres d'observation (PZ1, PZ2, PZ3) à proximité du puits d'exploitation de Grandvillard (Fin de la Porta) avec indication des données manquantes (trait jaune)

L'analyse des niveaux annuels minimums, moyens et maximums du piézomètre PZ2 indique que les mesures sont indépendantes et stationnaires. Les niveaux annuels minimums, moyens et maximums montrent des tendances opposées (pentes positives pour les maximums, négatives pour les moyennes et minimums). La tendance des débits minimaux est statistiquement significative (Figure 35). Cette baisse peut être due à une intensification et donc une influence des pompages dans les puits à proximité ou à une évolution climatique liée à une baisse de recharge en été. D'avantage d'investigations seraient nécessaires pour l'évaluer.

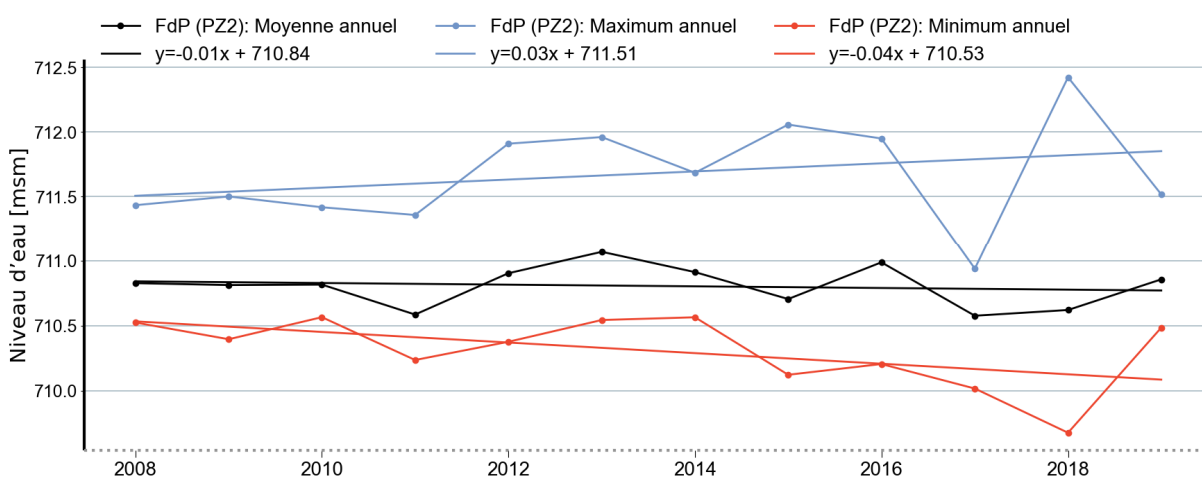


Figure 35 : Évolution annuelle du niveau minimal, moyen et maximal du niveau au piézomètre PZ2 de la Fin de la Porta.

L'analyse du cycle hydrogéologique du piézomètre PZ2 de Fin de la Porta montre que le niveau médian mensuel est supérieur durant la période hivernale et début du printemps (hauteur maximale de 711.01 msm en avril) et plus faible dès le mi-printemps avec un niveau médian minimal en automne (hauteur minimale de 710.53 msm en octobre). Le régime hydrogéologique est plutôt de type pluvio-nival avec des niveaux plutôt élevés au printemps et plus bas en hivers et été.

Sur la période étudiée, l'année complète avec le niveau moyen le plus bas est 2011 (710.58 m.s.m.). L'année 2013 correspond à celle avec le niveau moyen le plus élevé (711.07 msm) (Figure 37 et Figure 36). Les années sèches sont 2011, 2017 et 2018 et les années humides sont 2013 et 2016 (Figure 37). L'analyse du niveau normalisé du piézomètre PZ2 de la Fin de la Porta met en évidence de fortes disparités entre les années (Figure 38) avec une année 2018 extrême qui présente des niveaux inférieurs à la moyenne d'août jusqu'en décembre. Le niveau d'eau en hiver 2017 a également été plus bas que la moyenne.

Les indicateurs de sensibilité aux sécheresses pouvant être calculés sont les indicateurs de récession, le T1/2 indique que le système hydrogéologique possède une résistance moyenne aux sécheresses (Tableau 8).

L'analyse de la fréquence d'apparition des valeurs annuelles minimales montre une prédominance durant les saisons automnale et hivernale, avec 100% des minimums observés entre le 7 juillet et le 3 février. En revanche, les valeurs maximales surviennent de la période hivernale jusqu'au début de l'été, sans aucun maximum enregistré en automne. La distribution qui représente le mieux les débits minimums est la GEV, elle permet d'estimer les temps de retour des faibles niveaux présentés au Tableau 14. A partir de 10 ans, ces estimations sont peu fiables en raison du nombre limité d'années de suivi qui ne permet pas un ajustement précis. Pour un temps de retour de 10 ans on obtient un niveau minimal de 710.001 msm.

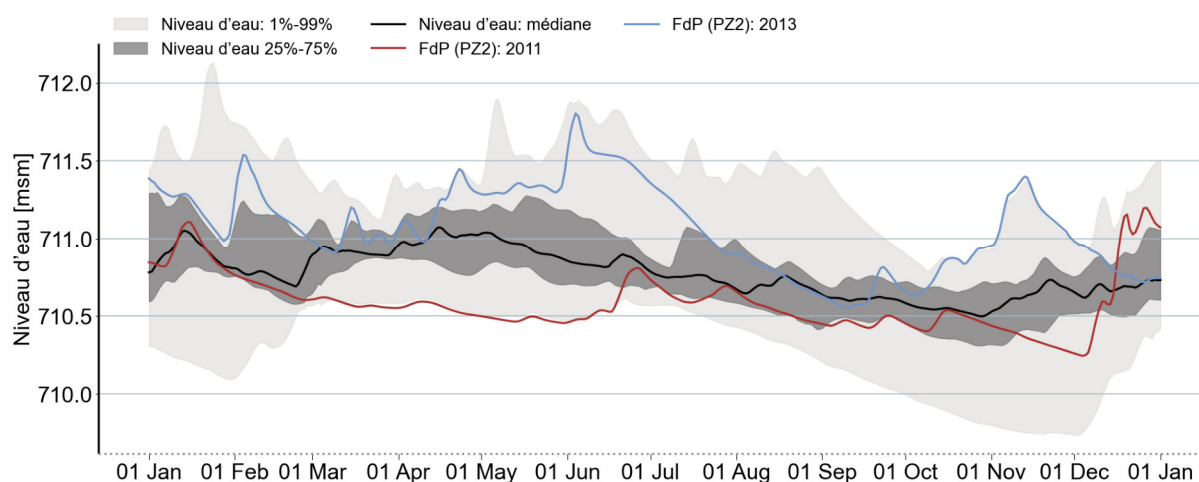


Figure 36 : Comparaison pluriannuelle de l'évolution du niveau du piézomètre PZ1 de la Fin de la Porta (moyenne mobile sur 5 jours).

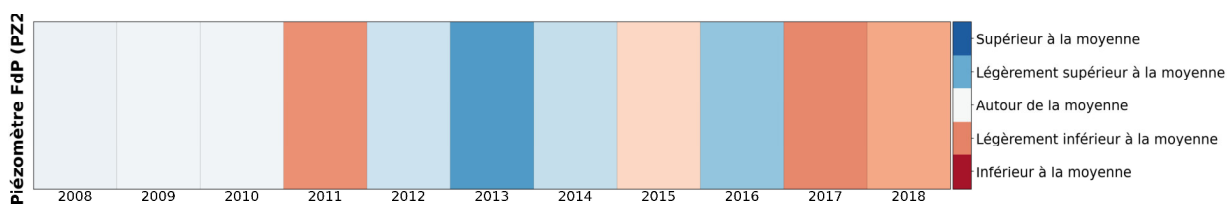


Figure 37 : Représentation en heatmap des variations du niveau moyen annuel normalisé (z-score). Notons que les valeurs des années 2008, 2017 sont légèrement biaisées, car ces années ne sont pas totalement complètes.

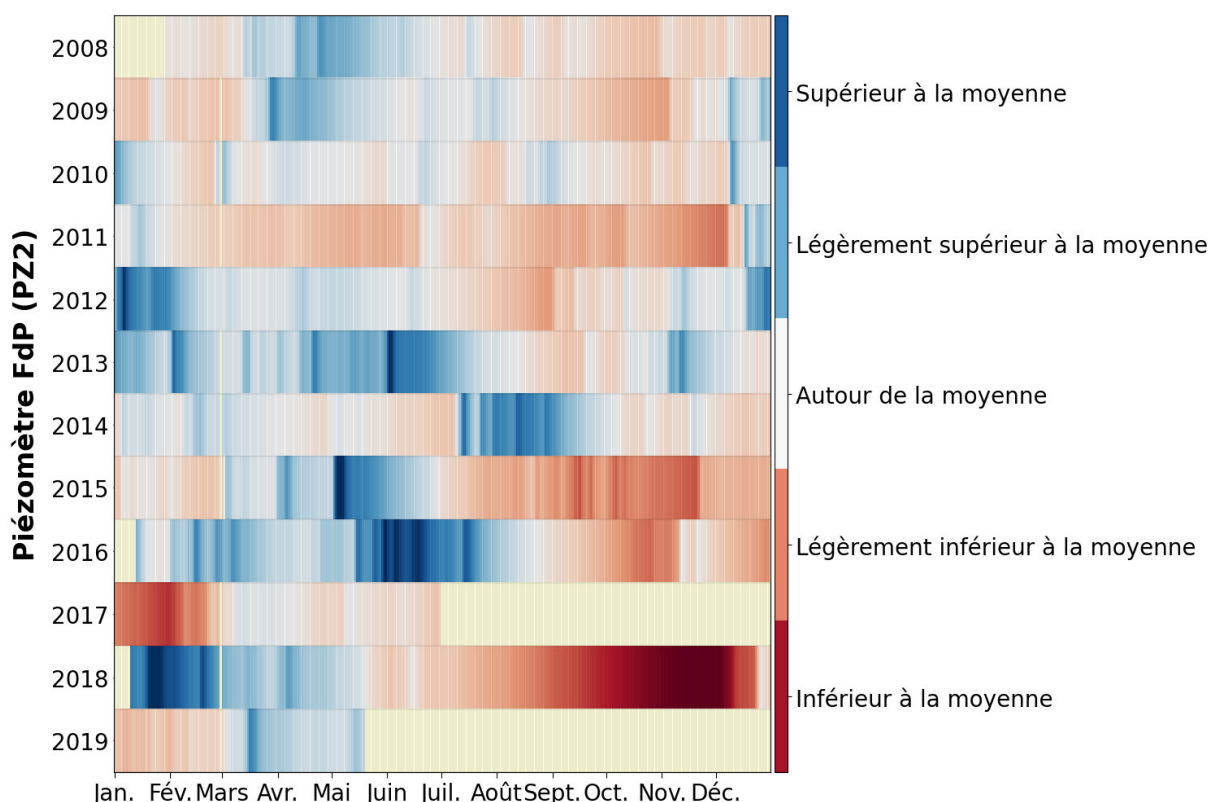


Figure 38 : Heatmap des variations journalières du niveau normalisé (z-score). Les zones en jaune indiquent des données manquantes.

Indicateur	Indicateur de récession	
	α [j^{-1}]	T1/2 [j]
Valeur	0.0091	76
Classe de résistance		Moyenne

Tableau 13 : Récapitulatif de la signature du piézomètre de Fin de la Porta PZ2

Temps de retour des minimaux (ans)	Niveaux d'eau (msm)
2	710.335
5	710.126
10	710.001
20	709.892 (à titre indicatif)

Tableau 14 : Temps de retour des minimums annuels issue de la loi de GEV

La période de suivi du niveau du piézomètre PZ2 de la Fin de la Porta est trop courte pour permettre le calcul de l'indicateur standardisé. L'indice de position est présenté ici afin de classer les mois d'observation en fonction de leur débit mensuel (Figure 39). L'indice de position met en évidence des mois particulièrement secs à la fin de l'été et en automne 2015, ainsi que durant la période automnale à hivernale 2018. Le mois de novembre 2018 étant le plus bas de toute la série. Le mois de juin 2016 a été le plus humide de toute la série.

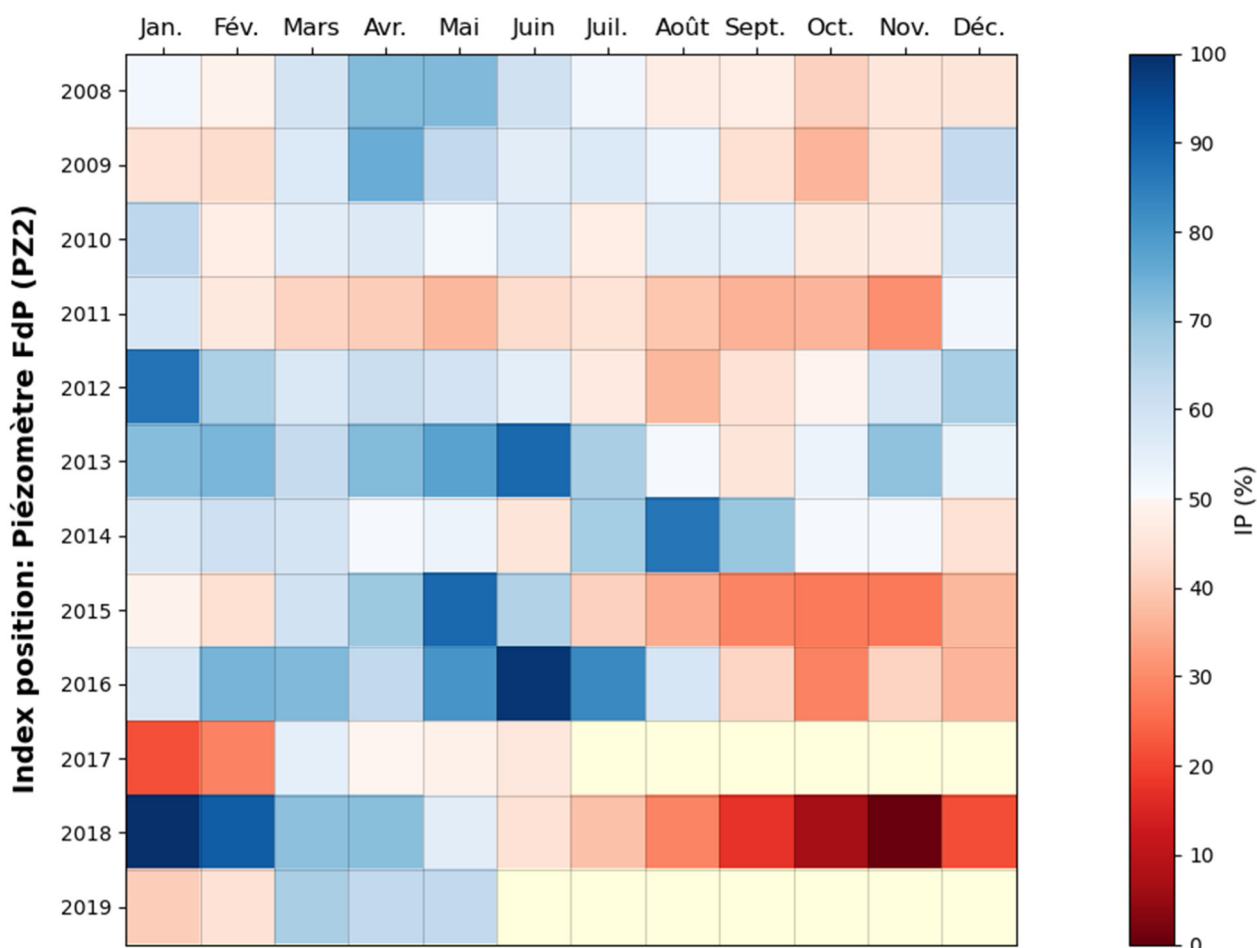


Figure 39 : Niveau mensuels de la source de Fin de la Porta (PZ2) exprimés sous forme d'indice de position. Chaque barre représente la position relative du débit moyen du mois dans la série observée. Les zones en jaune indiquent des données manquantes. Notons aussi que la valeur du mois de janvier 2008 repose sur très peu de valeurs, ce qui le rend peu représentatif.

4.3 Régime à forte composante anthropique : Source de Tuffière 5 - ouest

Le jeu de données de la source de Tuffière couvre la période du 2 janvier 2017 au 19 juin 2024, soit 7.5 années d'observations continues, avec quelques valeurs isolées ou manquantes au pas de temps journalier (Figure 40).

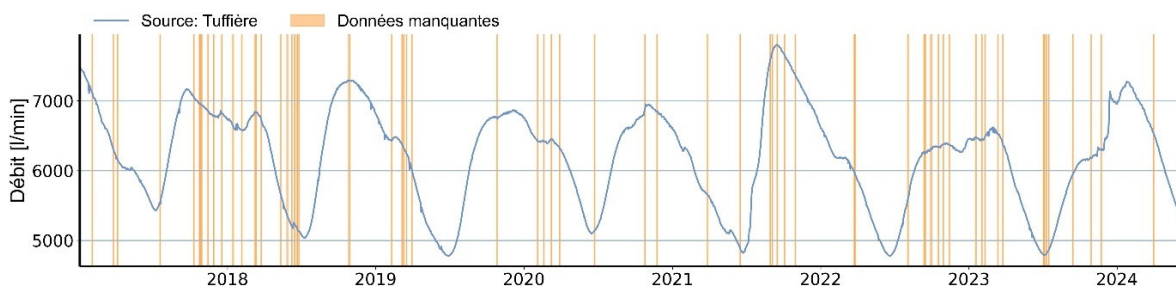


Figure 40 : Chronique journalière du débit [L/min] de la source de Tuffière avec indication des données manquantes (traits jaune)

L'analyse des débits annuels de la série de Tuffière indique que les mesures sont indépendantes et partiellement stationnaires (deux tests validés sur trois). Les débits annuels minimum, moyen et maximum montrent des tendances à la baisse (pentes négatives) mais ces tendances ne sont pas statistiquement significatives (Figure 41).

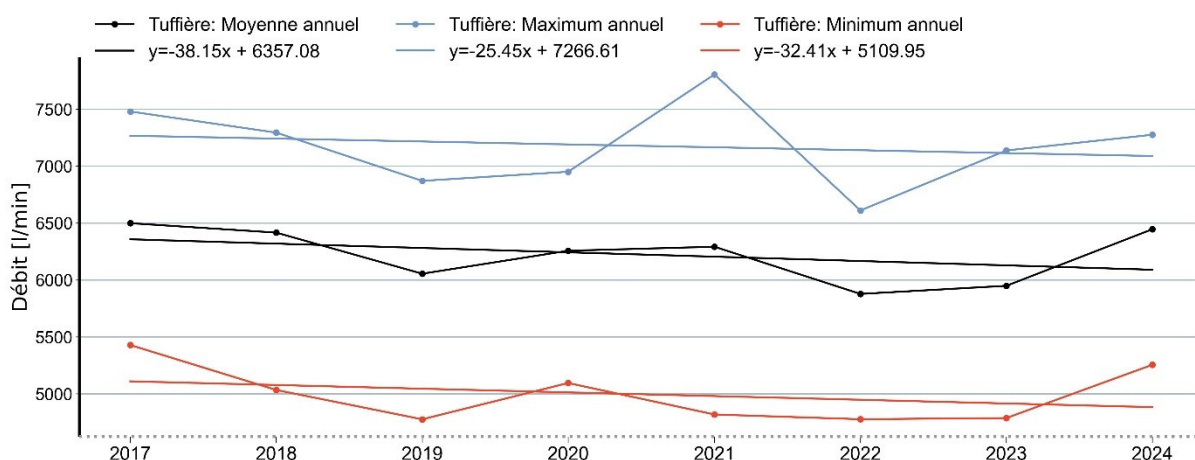


Figure 41 : Évolution annuelle des débits minimum, moyen et maximum à la station de Tuffière

L'analyse du régime hydrologique de la source Tuffière montre que le débit médian mensuel est plus élevé durant la période hivernale (6841 L/min en novembre contre 6474.3 L/min en février) et diminue progressivement au printemps pour atteindre un débit médian minimal en milieu d'été (débit minimal en juin : 5058.3 L/min). Cette dynamique n'est pas naturelle et ne correspond pas à un cible hydrologique défini. Ce cycle provient probablement des variations du niveau d'eau dans le barrage de Rossens (Thierrin, 1990) par transfert de pression. Pour confirmer cela et identifier si l'ensemble de la chronique est lié aux fluctuations du niveau d'eau dans le barrage, il serait nécessaire d'obtenir des informations et/ou données sur ces dernières. Le cycle d'origine anthropique semble dominer le jeu de données.

Les résultats des indicateurs sont seulement indicatifs, la série étant dominée par le cycle de charge et décharge du barrage, ce qui masque la signature naturelle de la source et rend les indicateurs incohérents entre eux.

Sur la période étudiée, l'année 2022 présente le débit moyen le plus faible (5878 L/min). L'année 2017 correspond à l'année avec le débit moyen le plus élevé (6498 L/min) (Figure 43 et Figure 42). L'analyse du débit normalisé de la source de Tuffière met en évidence un cycle saisonnier régulier, avec une phase de montée progressive du débit suivie d'une phase de vidange tout aussi progressive (Figure 44), probablement suivant les mises en charge et vidanges successives du barrage de Rossens par transfert de pression. Les années 2022 et 2023 apparaissent tout de même plus sèches que les autres années (Figure 43).

L'analyse de la fréquence des valeurs annuelles révèle que les minimums se produisent systématiquement entre juin et juillet avec 63% des occurrences en juin et 38% en juillet (8 mesures). Les maximums apparaissent quant à eux exclusivement en automne ou en hiver, répartis entre 63% des occurrences en hiver et 38% en automne. La distribution qui représente le mieux les débits minimums est la loi de GEV, elle permet d'estimer les temps de retour des faibles débit présentés au Tableau 16. Cependant, étant donné que ces mesures semblent fortement impactées par une composante anthropique non naturelle, ces temps de retour ne sont pas significatifs.

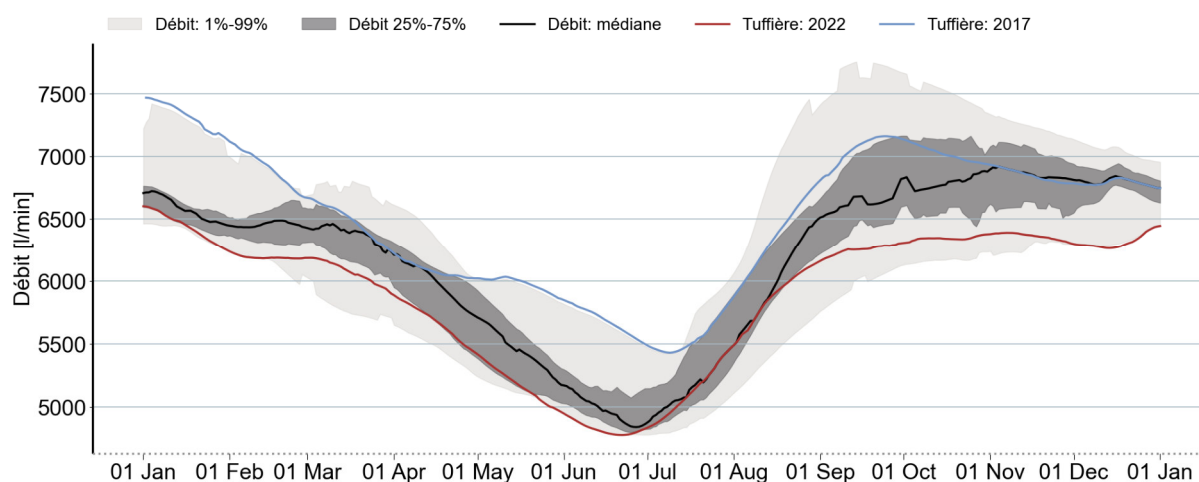


Figure 42 : Comparaison pluriannuelle de l'évolution du débit de la source de Tuffière (moyenne mobile sur 5 jours).

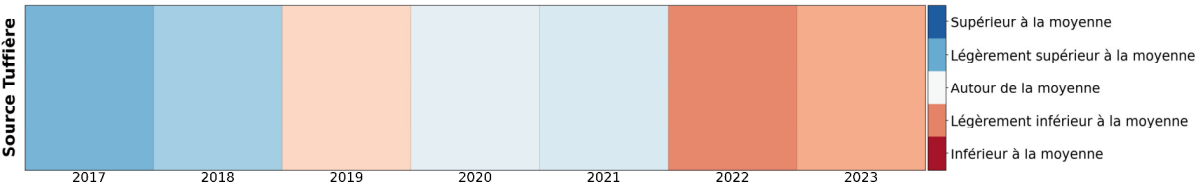


Figure 43 : Représentation en heatmap des variations du débit moyen annuel normalisé (z-score).

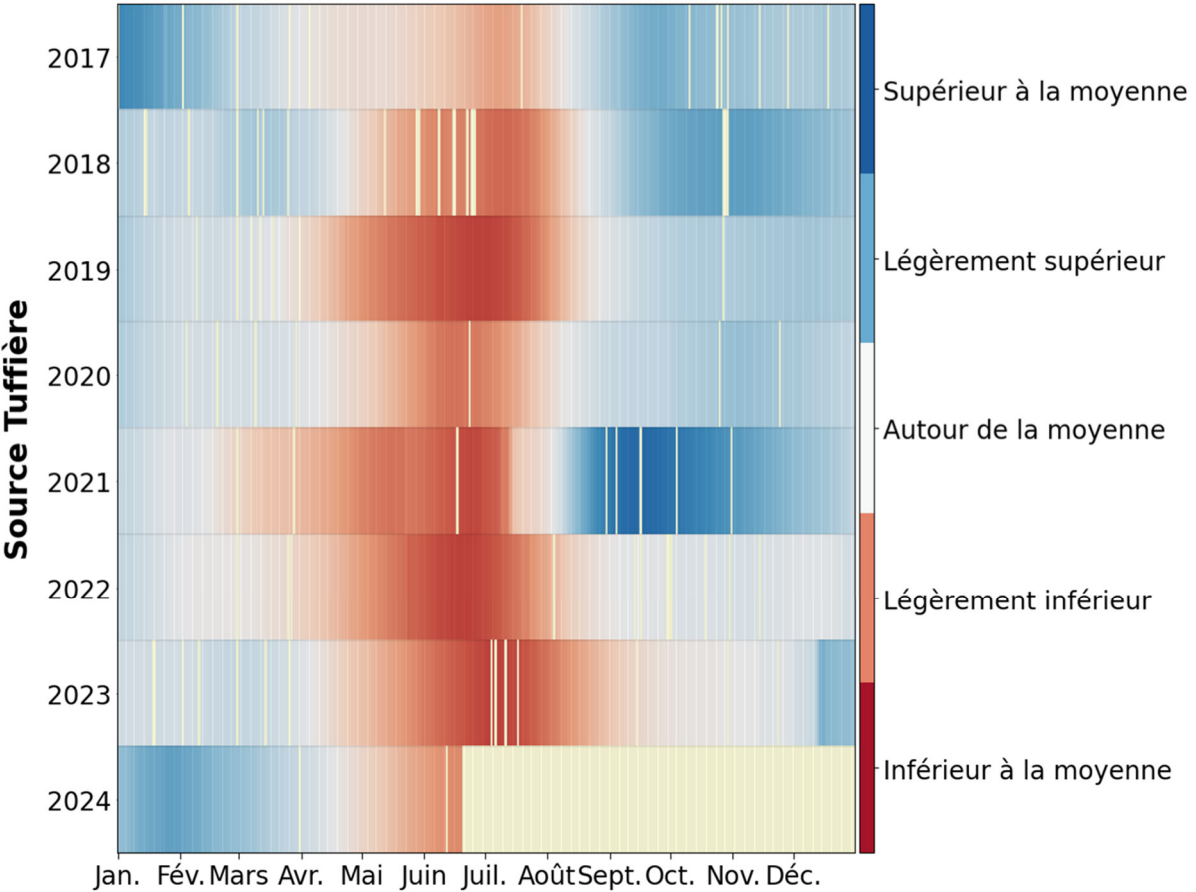


Figure 44 : Heatmap des variations journalières du débit normalisé (z-score). Les zones en jaune indiquent des données manquantes.

Indicateur	Indicateur physico-chimique	Indicateur valeur extrême		Indicateur de récession	
	VESPA	WFI	IRSAK	α [j ⁻¹]	T1/2 [j]
Valeur	0.248	0.839	0.918	0.0917	280
Classe de résistance	Moyenne		Très bonne	-	Très bonne

Tableau 15 : Récapitulatif des indicateurs obtenus pour la source de Tuffière 5 - ouest.

Temps de retour des minimaux (ans)	Débit (L/min)
2	4846
5	4765

Tableau 16 : Temps de retour des minimums annuels issus de la loi de GEV

La période de suivi de la source de Tuffière est trop courte pour permettre le calcul de l'indicateur standardisé. L'indice de position est présenté afin de classer les mois d'observation en fonction de leur débit mensuel (Figure 45). Le mois de septembre 2021 a été le plus humide de la série, tandis que le mois de juin 2022 a été le plus sec.

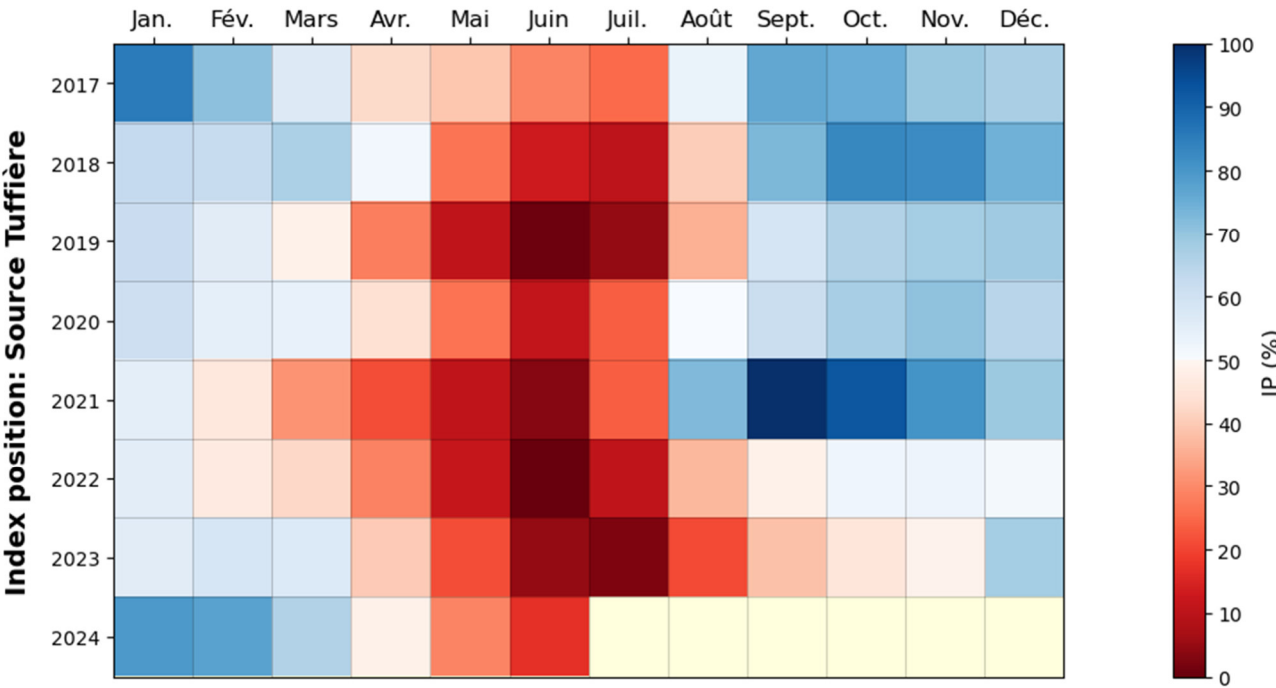


Figure 45 : Débits mensuels de la source de Tuffière exprimés sous forme d'indice de position. Chaque barre représente la position relative du débit moyen du mois dans la série observée. Plus l'indice de position est élevé, plus le mois est humide. Les zones en jaune indiquent des données manquantes.

4.4 Synthèse

Parmi les sources étudiées, la source de Tuffière montre un régime très probablement contrôlé par le barrage situé en amont, ce qui atténue l'effet des sécheresses avec un cycle décalé. La source de Hangbüel, de régime pluvial avec une forte variabilité autour du débit médian selon l'année, a été affectée par des périodes plus sèches en 2017, 2018, 2019 et 2022, l'année 2023 ayant été moins impactée. Le suivi sur le long terme de cette source permet de classer le mois d'août 2019 comme ayant un débit anormalement bas. En 2017, 2019 et 2022, le débit atteint des valeurs particulièrement basses. La source de Frassettes, de régime pluvial, a été affectée par des débits plus bas que la moyenne en 2017, 2022 et 2023 et des débits plus élevés en 2019, contrairement à la source de Hangbüel. Les débits minimaux observés restent cependant relativement proches au débit médian. Enfin, la source de Villard de Bonny, aussi de régime nivo-pluvial, semble montrer des débits plus bas en 2022, et 2023 dans une moindre mesure, malgré un jeu de données limité.

Parmi les piézomètres étudiés, le piézomètre d'observation du puits de Flamatt, Neuenegg, dans un contexte nivo-pluvial, indique un changement de comportement en 2007, probablement à la suite des crues de la Singine. L'effet de cet événement est visible dans le jeu de données jusqu'en 2014. Depuis 2014, des débits bas ont été mesurés en début d'hiver 2018, ainsi qu'au début du printemps et en hiver 2021. Quant au piézomètre de Grandvillard Fin de la Porta (PZ2), dans un contexte nivo-pluvial, il révèle que ce piézomètre a été affecté par les niveaux plus bas en 2011, 2017 et 2018 (les données ne vont que jusqu'au 2019). Enfin, bien que les données soient limitées, le site des Ouches (FD3), dans un contexte nivo-pluvial, semble également indiquer des niveaux bas en 2022. Cependant, la qualité du jeu de données ne permet pas de tirer de conclusions définitives.

La Figure 46 présente une synthèse et une classification des sites — sources et piézomètres — selon leur vulnérabilité face aux sécheresses. Ce résultat constitue une première évaluation comparative des systèmes étudiés, malgré les limitations liées à la durée et à la qualité des séries de suivi. Les piézomètres des Ouches (FD3), de Flamatt-(Neuenegg) et de Grandvillard/Fin de la Porta (PZ2) appartiennent tous à la classe de résistance moyenne aux sécheresses. Concernant les sources, la classification met en évidence les niveaux de résistance à la sécheresse suivants : Hangbüel (moyenne), Frassettes (bonne) et Tuffière (très bonne). Pour affiner cette analyse, il serait nécessaire de disposer de séries temporelles plus longues et de meilleure qualité, ainsi que de relier ces observations aux conditions météorologiques observées sur les bassins versants au cours des mêmes périodes.

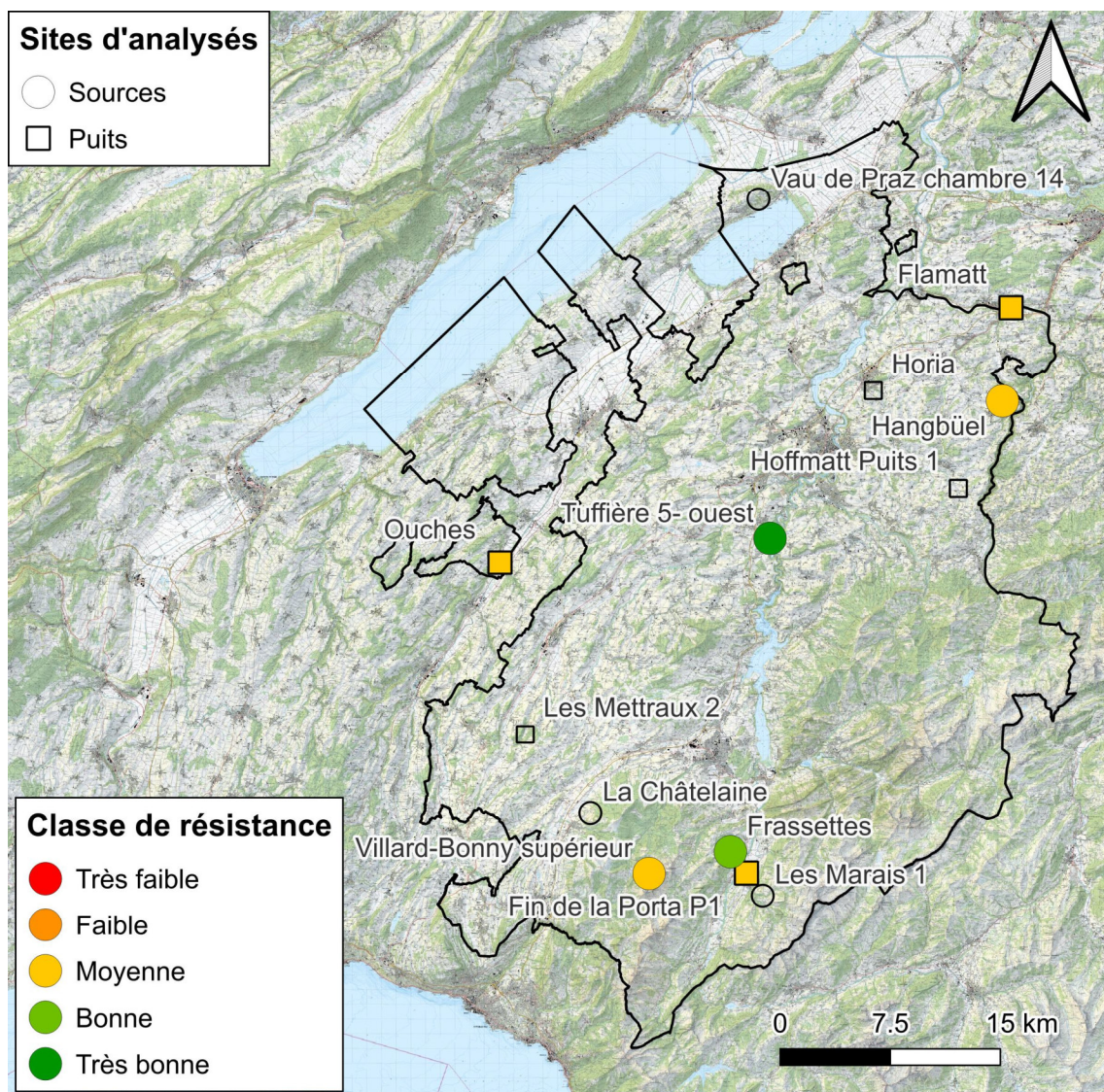


Figure 46. Carte représentant les classes de résistance aux sécheresses basées sur le temps de demi-décroissance, pour les puits et les sources analysés

5 Proposition concernant les sources/piézomètres à modéliser

Les débits des sources et niveaux d'eau des piézomètres pourraient être modélisés à l'aide d'un modèle hydrologique de type réservoir sur la base des données actuellement disponibles. Une fois calibrés, ces modèles pourraient être utilisés pour évaluer l'évolution future de ces ressources, en intégrant différents scénarios climatiques. Cette approche repose sur l'hypothèse que les caractéristiques hydrogéologiques des systèmes ne subiront pas de modification majeure à l'avenir, ce qui permet d'appliquer les paramètres calibrés aux conditions futures.

Parmi les sites analysés, les points suivants apparaissent comme potentiellement modélisables :

- Source de Hangbuel,
- Source des Frassettes,
- Source de Villard-Bony supérieur,
- Flamatt Neuenegg,
- Grandvillard – fin de la Porta (PZ2).

Cependant, certaines limites spécifiques doivent être prises en compte :

- Pour le piézomètre de Neuenegg, seule la période des dix dernières années semble utilisable pour la modélisation en raison d'un changement de comportement du système qui ne pourrait probablement pas être reproduit par un modèle de type réservoir, sauf si nous pouvons obtenir des informations complémentaires pour expliquer les raisons de ce changement.
- Le piézomètre PZ2 semble partiellement influencé par les pompages (niveau particulièrement bas en 2018 et tendance sur les minimaux). Des tests de modélisation seront nécessaires pour confirmer la faisabilité de sa représentation par ce type de modèle.

Concernant les deux autres sites :

- Le piézomètre des Ouches (FD3) ne dispose pas d'un historique suffisamment long pour permettre une calibration robuste.
- La source de la Tuffière, fortement contrôlée par le niveau du barrage, présente des influences anthropiques trop marquées pour être utilisée dans une modélisation destinée à identifier les effets du changement climatique.

6 Conclusion et recommandations

Le canton de Fribourg a adopté en juin 2021 un plan climat cantonal accompagné de mesures destinées à atténuer et permettre l'adaptation au changement climatique. Une des mesures est d'estimer les implications des scénarios d'évolution climatique pour les eaux souterraines du canton. Pour ce faire, le canton de Fribourg pilote des études hydrogéologiques qui portent sur le suivi et la gestion des eaux souterraines intégrant les effets du changement climatique. Le présent mandat est l'une d'entre elle. La partie du mandat présentée dans ce rapport (phase 2.3) avait pour objectifs de :

1. récolter les données existantes sur les sites d'intérêt ;
2. procéder à une première analyse de ces jeux de données ;
3. calculer les indicateurs de sensibilité des ressources en eaux quand les données le permettaient ;
4. formuler des recommandations sur la possibilité de modéliser l'impact du changement climatique.

La collecte des données et leur analyse a mis en lumière les éléments suivants :

- il a été observé une grande diversité dans les formats, la qualité, et la longueur de l'historique disponible. Cette situation est probablement liée au fait que les données acquises le sont pour des impératifs de gestion opérationnelle quotidienne ;
- le suivi de la ressource est parfois partiel, occultant par exemple l'observation de phénomènes ayant un impact significatif sur l'évolution de la ressource tel que les pompages, les variations de hauteur d'eau des rivières, ou des barrages ;
- pour les sources spécifiquement, il arrive qu'une partie des flux échappe à la mesure (trop plein ou surverse par exemple).

Nous formulons donc les recommandations suivantes :

- s'assurer que le pas de temps de mesure soit régulier, au minimum journalier et idéalement horaire ;
- s'assurer de l'enregistrement de l'ensemble des données, sans perte de l'historique ;
- disposer d'un système de télétransmission permettant un suivi en temps réel des données acquises, couplés à une procédure de détection des anomalies ;
- mettre en place un protocole de maintenance capable de palier rapidement à un problème au sein de la chaîne d'acquisition ;
- s'assurer que les paramètres mesurés correspondent à l'ensemble des contraintes qui s'exercent sur le système (piézométrie, débits, hauteur et débit des cours d'eau, hauteur d'eau dans le barrage) ;
- plus généralement, documenter l'ensemble des événements pouvant introduire une variation du signal mesuré (le débit ou la piézométrie) tels que les opérations de maintenance ou la modification de la topologie du réseau.

En ce qui concerne la sélection et le calcul d'indicateurs, 13 sites et 18 chroniques ont été considérés. Sept sites et 7 chroniques possédaient les caractéristiques adéquates pour poursuivre plus loin l'analyse. Neuf indicateurs ont été sélectionnés et mis en œuvre :

- des indicateurs liés aux valeurs extrêmes (Winter Flow Index, Indicateur de résistance à la sécheresse développé sur les aquifères karstiques (IRSAK), Q347 ou H347) ;
- des indicateurs de récession (coefficient de récession, temps de demi-décroissance) ;
- des indicateurs statistiques (temps de retour, z-score, indicateur de position, indicateur standardisé).

L'analyse des différents indicateurs a permis de dégager certaines tendances et de caractériser la réponse hydrogéologique propre à chaque source et piézomètre, notamment en période de sécheresse. Les

indicateurs temporels ont apporté des éléments intéressants sur l'évolution de la ressource au cours du temps. Toutefois, les résultats obtenus doivent être interprétés avec prudence : le nombre limité de points de mesure et la durée restreinte des séries de données ne permettent pas d'exploiter pleinement le potentiel de ces indicateurs. L'état actuel du réseau d'observation, combiné à la diversité des régimes hydrologiques, rend l'analyse plus complexe et essentiellement ponctuelle, ce qui limite les comparaisons entre différentes zones.

En ce qui concerne les possibilités de modélisation, à l'issue de l'analyse, la possibilité de modéliser les ressources à l'aide de modèles de type réservoir paraît bonne pour 5 sites (Source de Hangbuel, Source des Frassettes, Source de Villard-Bony supérieur, Flamatt Neueneegg, Grandvillard – fin de la Porta (PZ2)) pour lesquels les données disponibles et la qualité de ces données sont favorables. Pour deux sites (piézomètre Neueneegg, et PZ2), des réserves sont émises et un test de faisabilité permettrait de conclure de façon plus circonstanciée. Pour deux sites (piézomètre des Ouches (FD3) et source de la Tuffière), toute possibilité de modélisation est exclue pour le moment (historique trop court ou influence du barrage).

Ainsi, cette étude constitue une première étape dans l'analyse de la vulnérabilité des sites d'exploitation cantonaux. Elle souligne l'importance de mettre en place un réseau de suivi pérenne, homogène et de qualité, à une échelle territoriale plus large. Le suivi actuel, non centralisé, offre en effet une vision très limitée et ne permet pas d'avoir une perspective globale. Dans ce contexte, l'utilisation des indicateurs présentés ici prendrait tout son sens : ils offriraient une vision à la fois temporelle et spatiale de l'évolution de la ressource, facilitant l'identification des dynamiques régionales, des zones plus vulnérables à la sécheresse, ainsi que des tendances à long terme. À moyen et long terme, ces mêmes indicateurs pourraient devenir de véritables outils d'aide à la décision pour la gestion durable des eaux souterraines.

7 Annexes

Annexe 1 : Classification de l'indicateur VESPA selon les classes de résistance, utilisé pour les sources (Banzato et al., 2017)

Classe	Résistance	VESPA
1	Très faible	$VESPA \geq 10$
2	Faible	$1 \leq VESPA < 10$
3	Moyen	$0.1 \leq VESPA < 1$
4	Elevé	$0 \leq VESPA < 0.1$

Annexe 2 : Classification de l'indicateur IRSAK selon les classes de résistance, utilisé pour les sources (BRGM, 2015b)

Classe		Résistance	IRSAK
1		Très Elevée	> 0.85
2		Elevée	$0.70 - 0.85$
3		Moyen	$0.55 - 0.70$
4		Faible	$0.35 - 0.55$
5		Très faible	< 0.35

Annexe 3 : Classification de l'indicateur T1/2 pour les piézomètres (BRGM, 2020), également utilisé pour les sources, et classe résistance associée.

Classe : vitesse de décharge	T1/2 (jours)	Classe de résistance
Très rapide	< 15	Très faible
Rapide	$15 - 30$	Faible
Assez rapide	$30 - 90$	Moyenne
Assez lent	$90 - 180$	Bonne
Lente	$180 - 360$	Très bonne

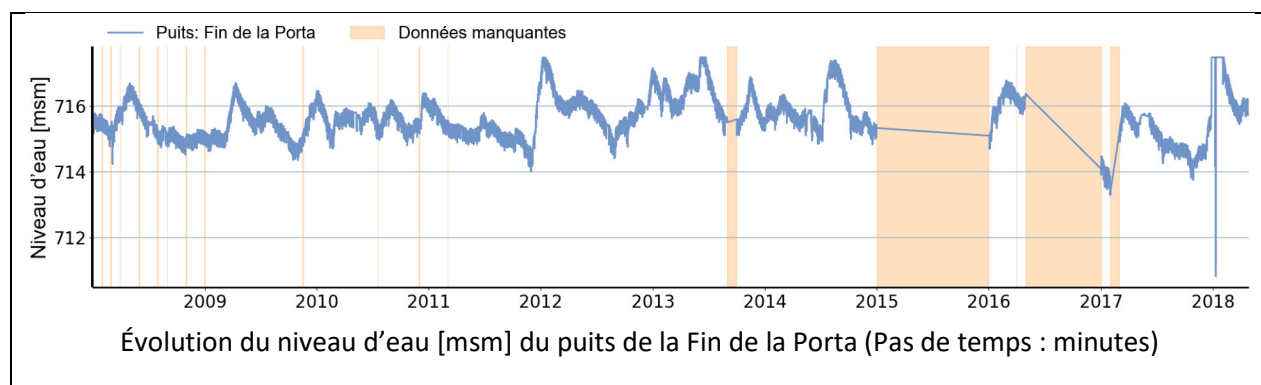
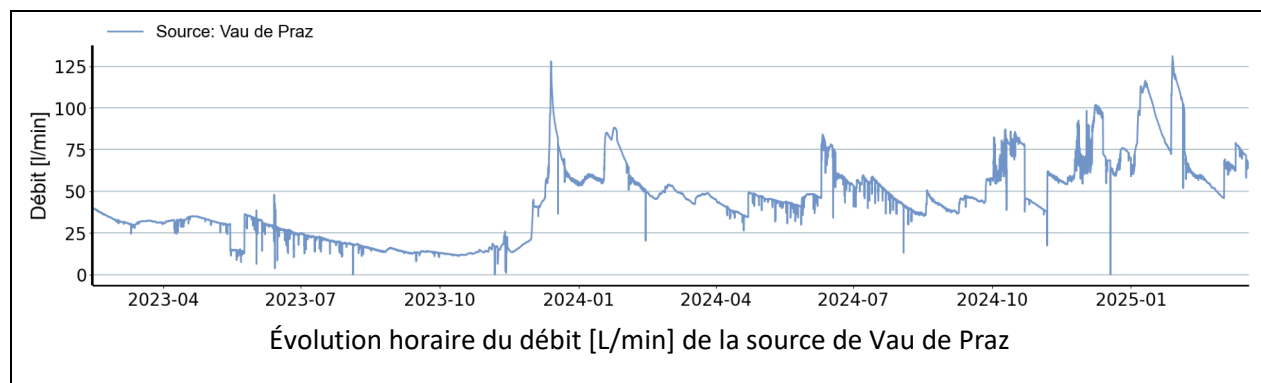
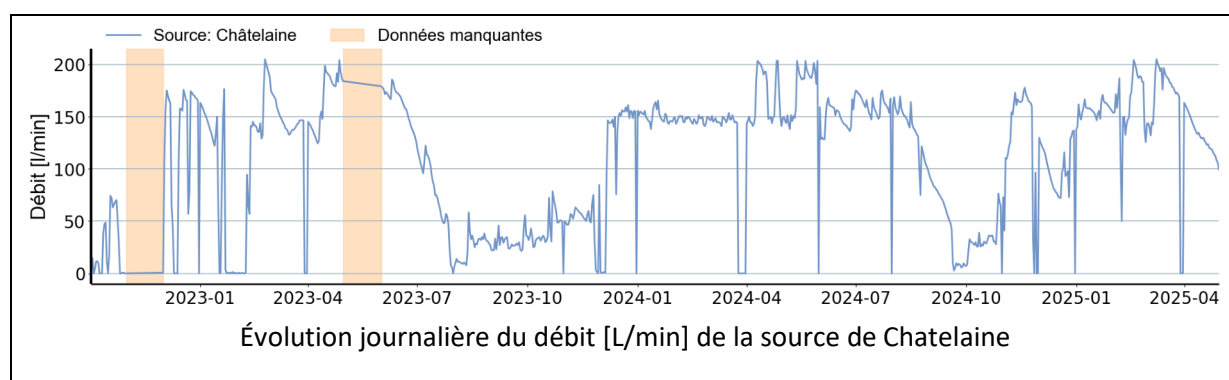
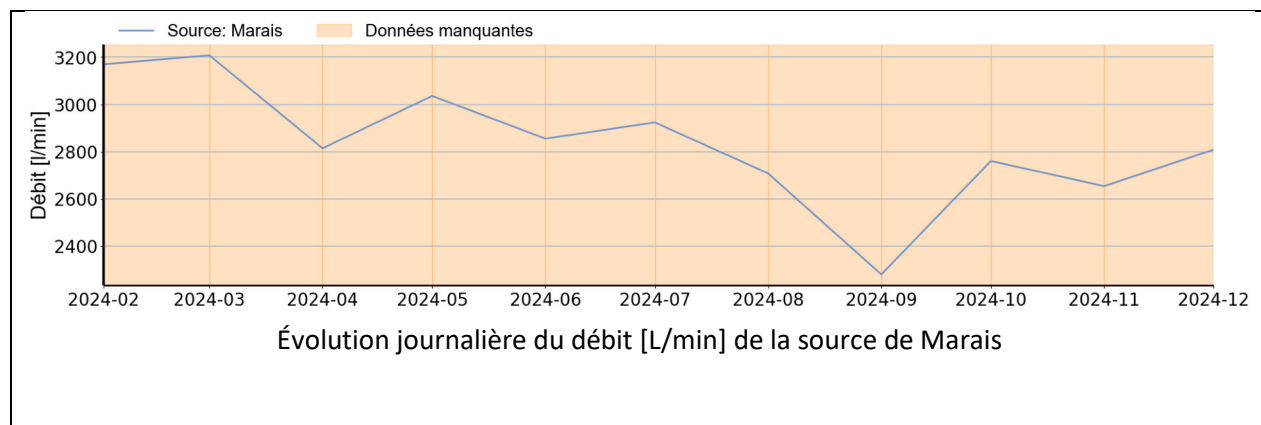
Annexe 4. Tableau récapitulatif des informations pour chaque source.

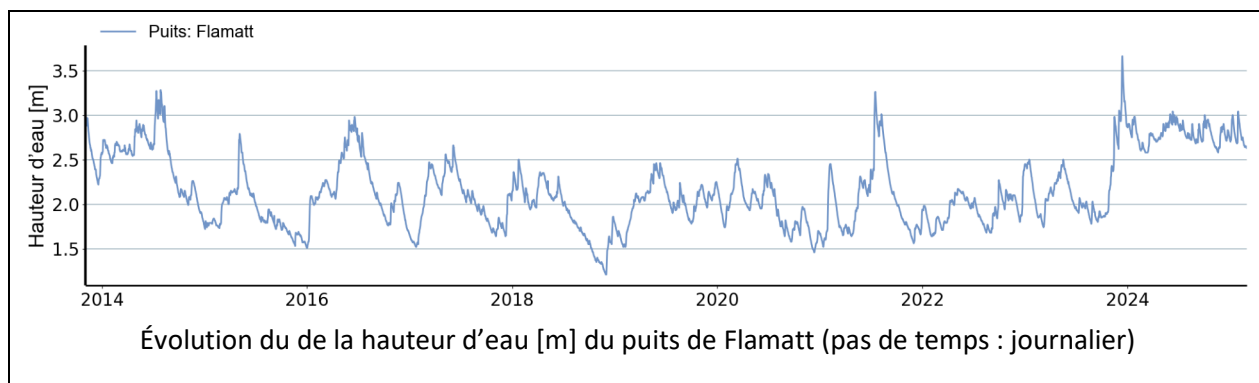
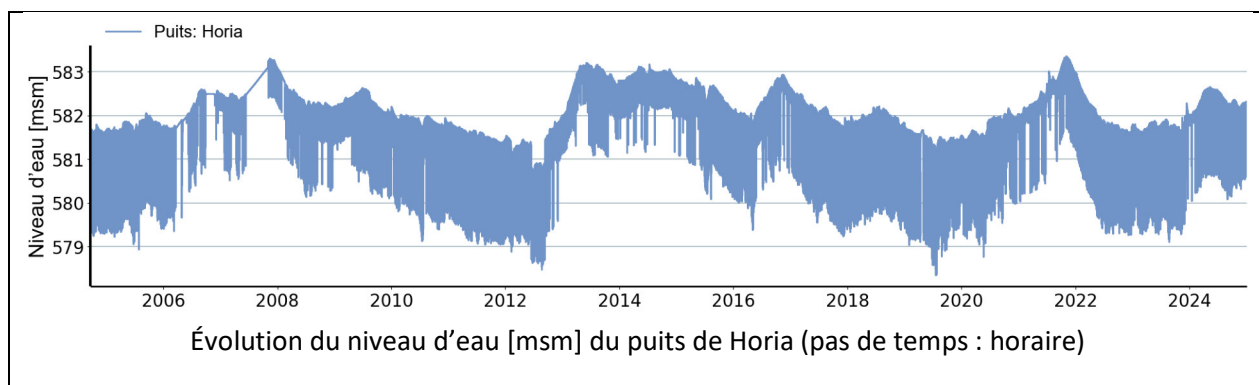
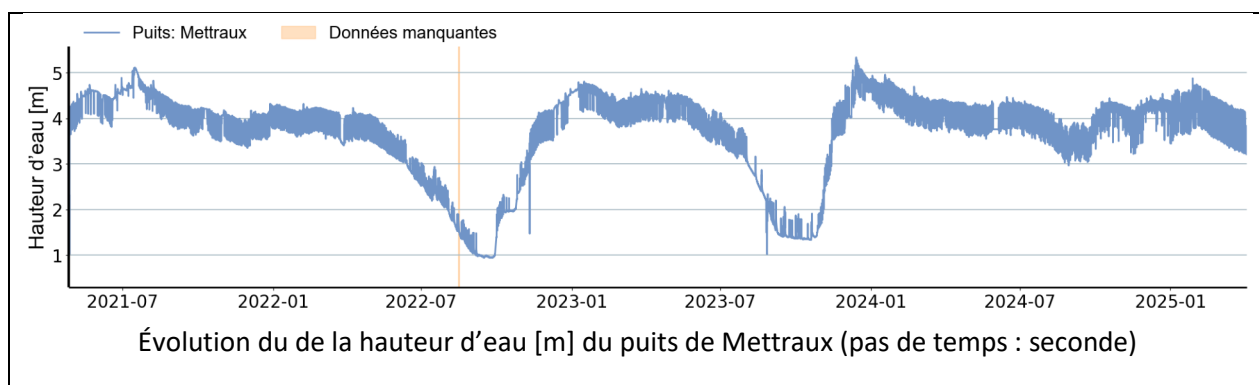
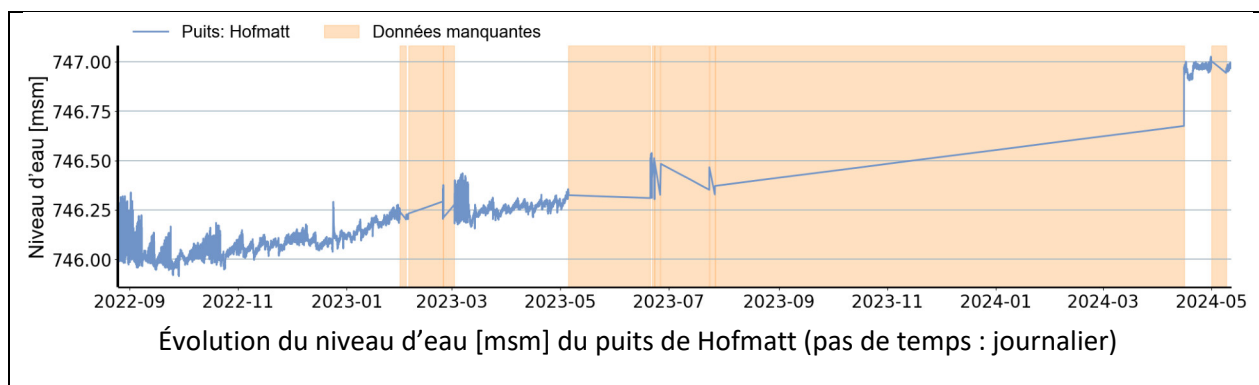
Sources	Région	Milieu	Type d'ouvrage	Influence supposée	Type de données	Pas de temps	Période de suivi	Période de suivi (ans)
Villard-Bony Supérieur VB05 et VB03	Préalpes karstiques	Poreux/fissuré	VB03: Drain superficiel VB05: Galerie	Aucune	Débit	Journalier	22 juin 2021 - 31 mars 2025	3.8
Frassettes	Préalpes karstiques	Fissuré, faiblement karstique	Réunion de sources	Aucun	Débit, conductivité électrique et température	Horaire	24 novembre 2016 - 24 octobre 2024	7.9
Tuffière 5	Plateau morainique	Alluvial (poreux)	Drains	Impact du lac de la Gruyère	Débit, conductivité électrique et température	Journalier	2 janvier 2017 - 19 juin 2024	7.5
Hangbüel	Plateau molassique	Fissurée	Galerie	Aucun	Débit, conductivité électrique, température et turbidité (Turbidité depuis le 2 juillet 2008)	Horaire	5 novembre 2003 - 1 ^{er} janvier 2025	21.2

Annexe 5. Tableau récapitulatif des informations pour chaque piézomètre.

Puits	Région	Milieu	Aquifère	Point d'observation	Influence externe	Type de données	Pas de temps	Période de suivi	Période de suivi (an)
Les Ouches	Plaine alluviale	Alluvial (poreux)	Libre	Piézomètre FD3	Proximité de la Broye	Niveau d'eau et température	Horaire	24 février 2021 - 14 novembre 2024	3.7
Grandvillard/Fin de la Porta	Préalpes karstiques	Alluvial (poreux)	Libre	Piézomètre Fin de la Porta PZ1/PZ2/PZ3	Proximité de la Sarine	Niveau d'eau	Horaire	29 janvier 2008 - 19 mai 2019	11.3
Flamatt	Plaine alluviale	Alluvial (poreux)	Libre	Piézomètre Neuenegg (BE)	Proximité de la Singine	Niveau d'eau Température depuis 2015	Journalier (niveau d'eau et de température au pas de temps de 10 min depuis 2015)	1 ^{er} janvier 1994 - 31 décembre 2023	30

Annexe 6 : Niveaux d'eau influencés par les pompages





Annexe 7 : Exigences pour l'analyse statistique

Afin d'assurer la fiabilité des calculs d'indicateurs, certaines conditions doivent être respectées.

- Analyses basées sur l'expertise de la série :

- **Qualité du dispositif** : Les valeurs retenues doivent refléter la réalité hydrologique annuelle et ne pas être faussées par des artefacts. Cette caractéristique est vérifiée en validant la qualité des données et en détectant les artefacts ou valeurs aberrantes, ce qui est réalisé lors du nettoyage des données. Par exemples, une panne de capteur, une interruption prolongée des mesures ou une erreur de lecture peuvent générer de faux minimums qui ne représentent pas l'état réel de la ressource en eau.
- **Durée d'observation suffisante** : La fiabilité des indicateurs statistiques dépend d'un nombre minimal d'années de suivi. Par exemple pour l'analyse des données d'extrêmes, une station présentant un cycle annuel ne fournit qu'un minimum par an. Ce minimum doit être comparé aux minimums des autres années afin de déterminer s'il est représentativement élevé ou faible. Une telle analyse nécessite donc un historique de mesures suffisamment long.

- Analyses basées sur des tests statistiques :

- **Stationnarité** : La série de données doit présenter une stabilité statistique, sans rupture dans les conditions de mesure ou le fonctionnement hydrologique. Par exemples, un changement dans le plan de captage des sources, la construction ou le réaménagement d'un cours d'eau, ou encore l'aménagement d'un barrage introduisent une rupture.
- **Indépendance** : Pour le calcul des temps de retours, les minimums et maximums annuels doivent constituer des observations indépendantes, non corrélées directement entre elles. Par exemple, si une source s'assèche et que le tarissement se prolonge sur deux années consécutives, les minimums de ces deux années sont corrélés et ne peuvent pas être considérés comme des observations indépendantes.

Annexe 8 : Durées d'observation idéalement requises pour le calcul de chaque indicateur

Période d'observation	Indicateur
≥ 1 ans	VESPA (Galleani et al., 2011)
≥ 5 ans	Statistiques descriptives (Dübendorfer et al., 2011), coefficient de récession (α) et temps de demi-décroissance (BRGM, 2010), WFI, IRSAC, Q347
≥ 8-10 ans	Indicateur index de Position (BRGM, 2016a), Temps de retour, Indicateur de normalisation, indicateur de tendance
≥ 15 ans	Indice hydrologique standardisé en conditions opérationnelles (BRGM, 2015c)
≥ 25-30 ans	Indice hydrologique standardisé en conditions standardisées (BRGM, 2015c)

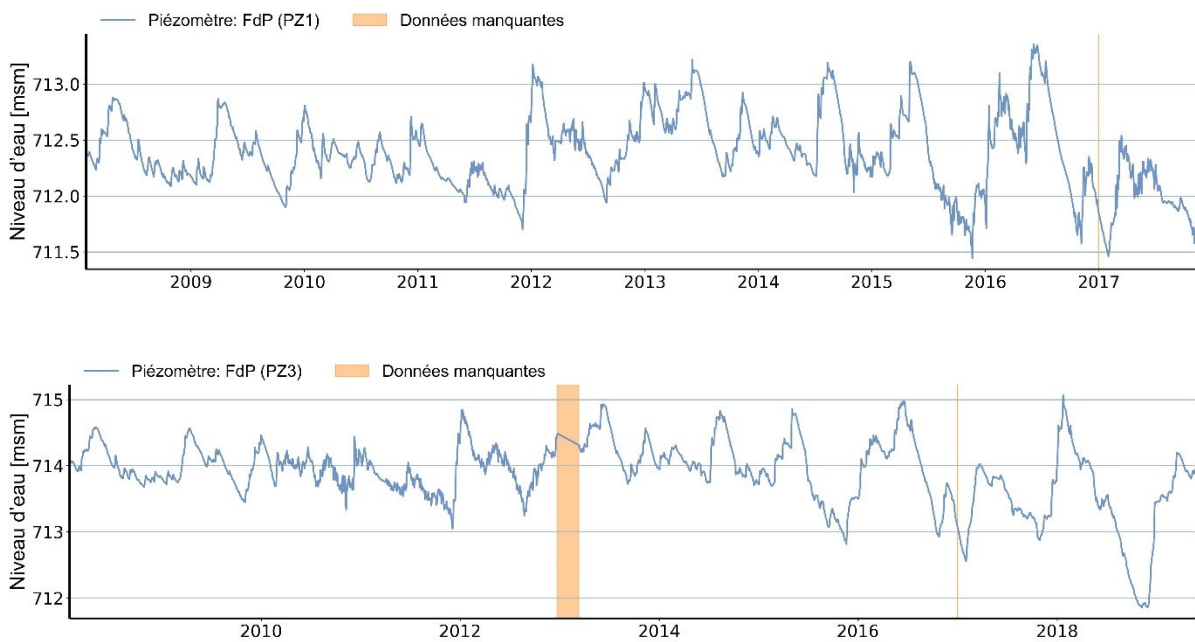
Annexe 9 : Statistiques synthétiques de l'ensemble des mesures de la source de Tuffière (2017-2024), Hangbüel (2003 –2025), Villard-Bony supérieur (2021-2025) et de Frassettes (2016 –2024).

Source	Débit moyen [L/min]	Débit minimal [L/min]	Débit 5% (Q ₃₄₇) [L/min]	Débit 25% (Q1) [L/min]	Débit médian (Q2) [L/min]	Débit 75% (Q3) [L/min]	Débit 95% [L/min]	Débit maximal [L/min]
Tuffière 5 - ouest	6208	4776	4943	5661	6317	6759	7257	7805
Hangbüel	2178	102	124	165	210	255	336	753
Villard-Bony supérieur	1012	331	497	769	1017	1263	1507	2074
Frassettes	1829	1157	1336	1579	1807	2018	2506	3259

Annexe 10 : Statistiques synthétiques de l'ensemble des mesures du piézomètre de de Neuenegg (1994-2024), Fin de la porta PZ2 (2008 –2019) et des des Ouches (df3) (2021 –2024))

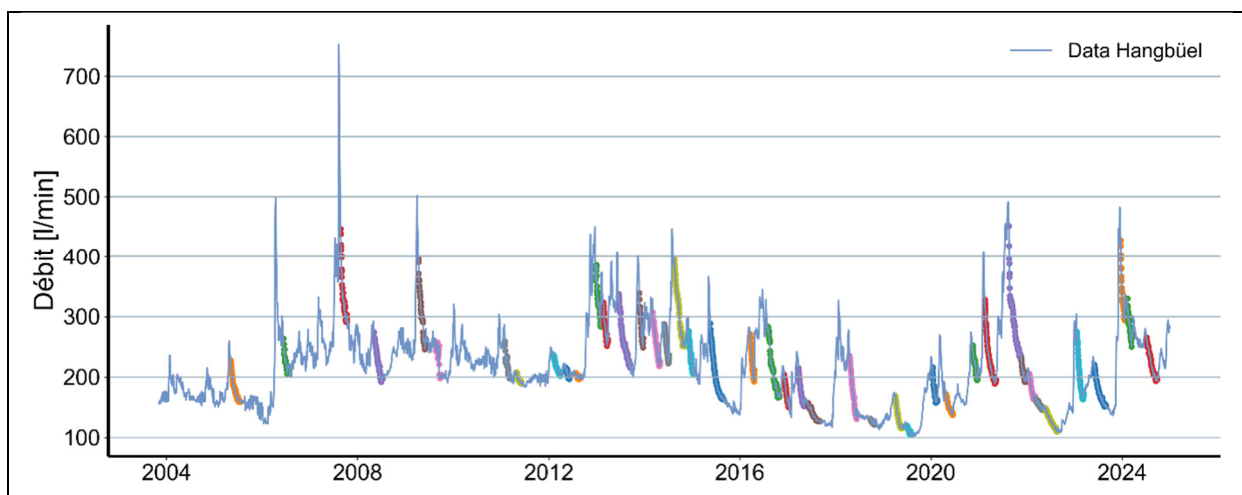
Piézomètre	Hauteur moyenne [msm]	Hauteur minimale [msm]	Hauteur 5% [msm]	Hauteur 25% (Q1) [msm]	Hauteur médiane (Q2) [msm]	Hauteur 75% (Q3) [msm]	Hauteur 95% [msm]	Hauteur maximal [msm]
Flamatt : Neuenegg (1994-2024)	539.60	538.40	538.76	539.04	539.318	540.26	540.95	542.58
Flamatt : Neuenegg (2014-2024)	539.43	538.67	538.88	539.08	539.27	539.57	540.61	542.58
Fin de la porta Grandvillard : PZ2	710.81	709.68	710.25	710.59	710.78	711.02	711.48	712.42
Les Ouches : DF3	476.85	476.23	476.30	476.69	476.87	477.06	477.33	477.76

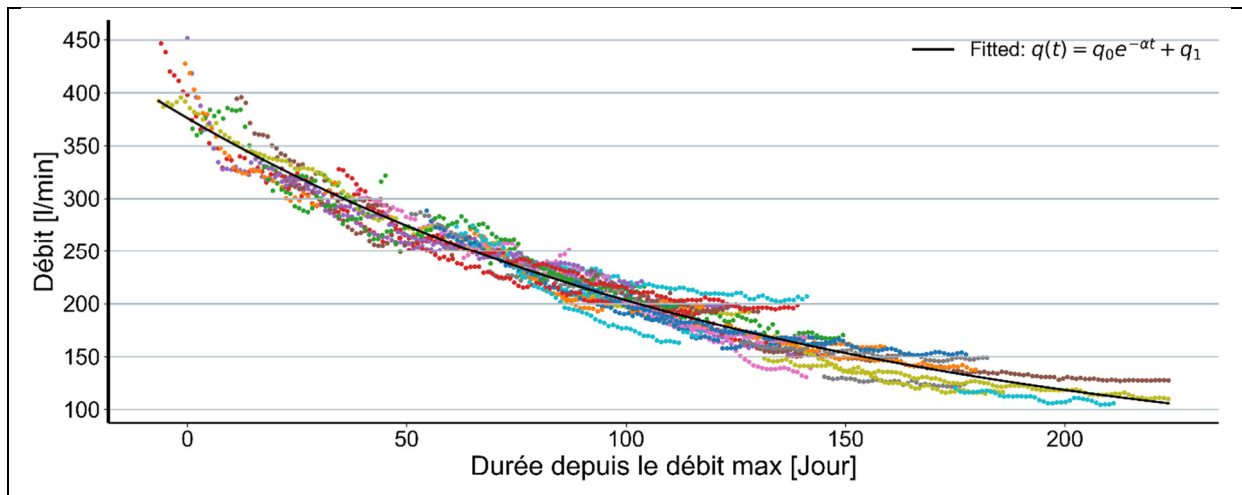
Annexe 11. Évolution du niveau de la nappe [msm] dans deux des trois piézomètres d'observation (PZ1 et PZ3) situés à proximité du puits d'exploitation de Grandvillard (Fin de la Porta) avec indication des données manquantes (trait jaune)



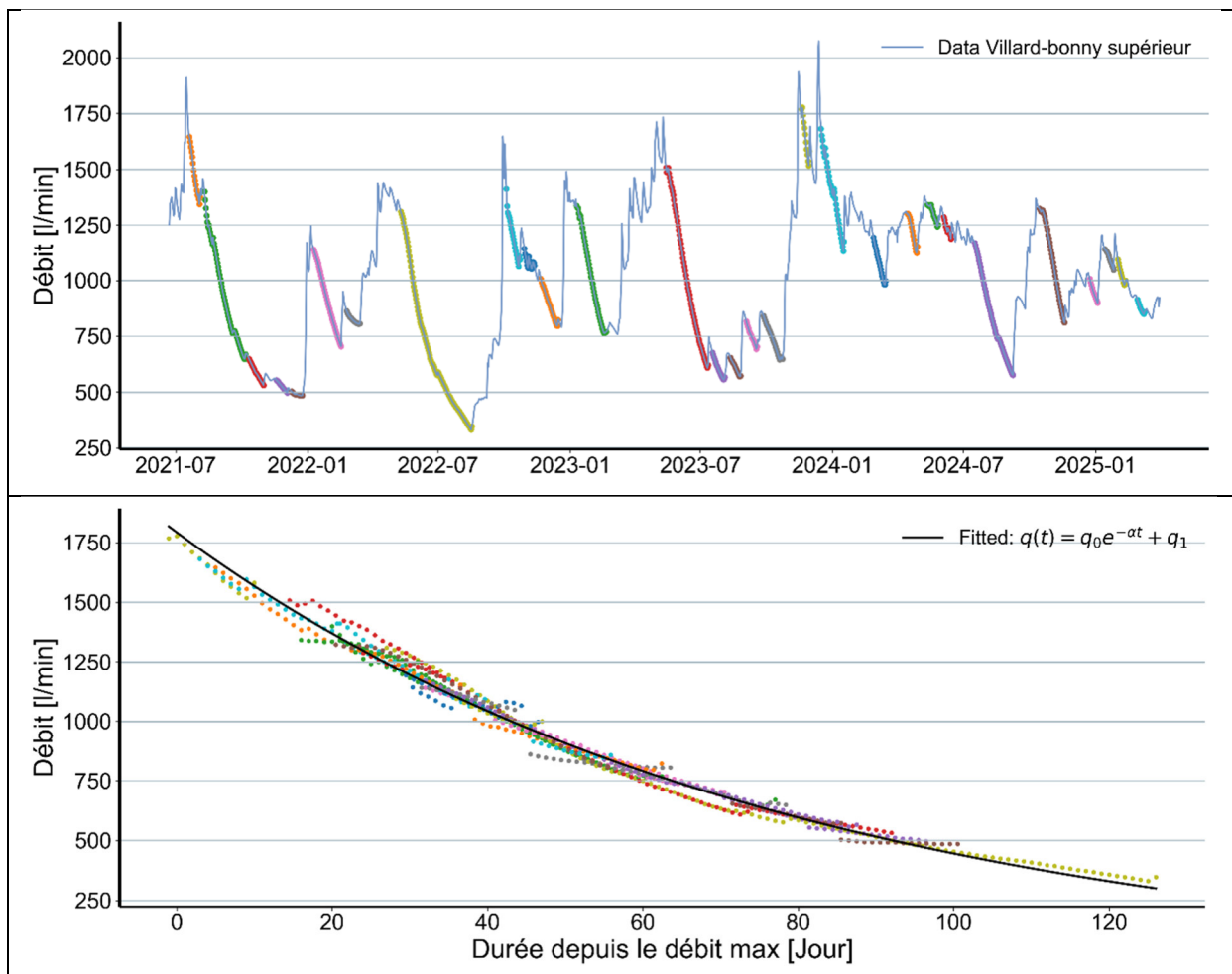
Annexe 12 : Périodes sélectionnées pour le calcul de la constante de récession

1. Source de Hängbuel

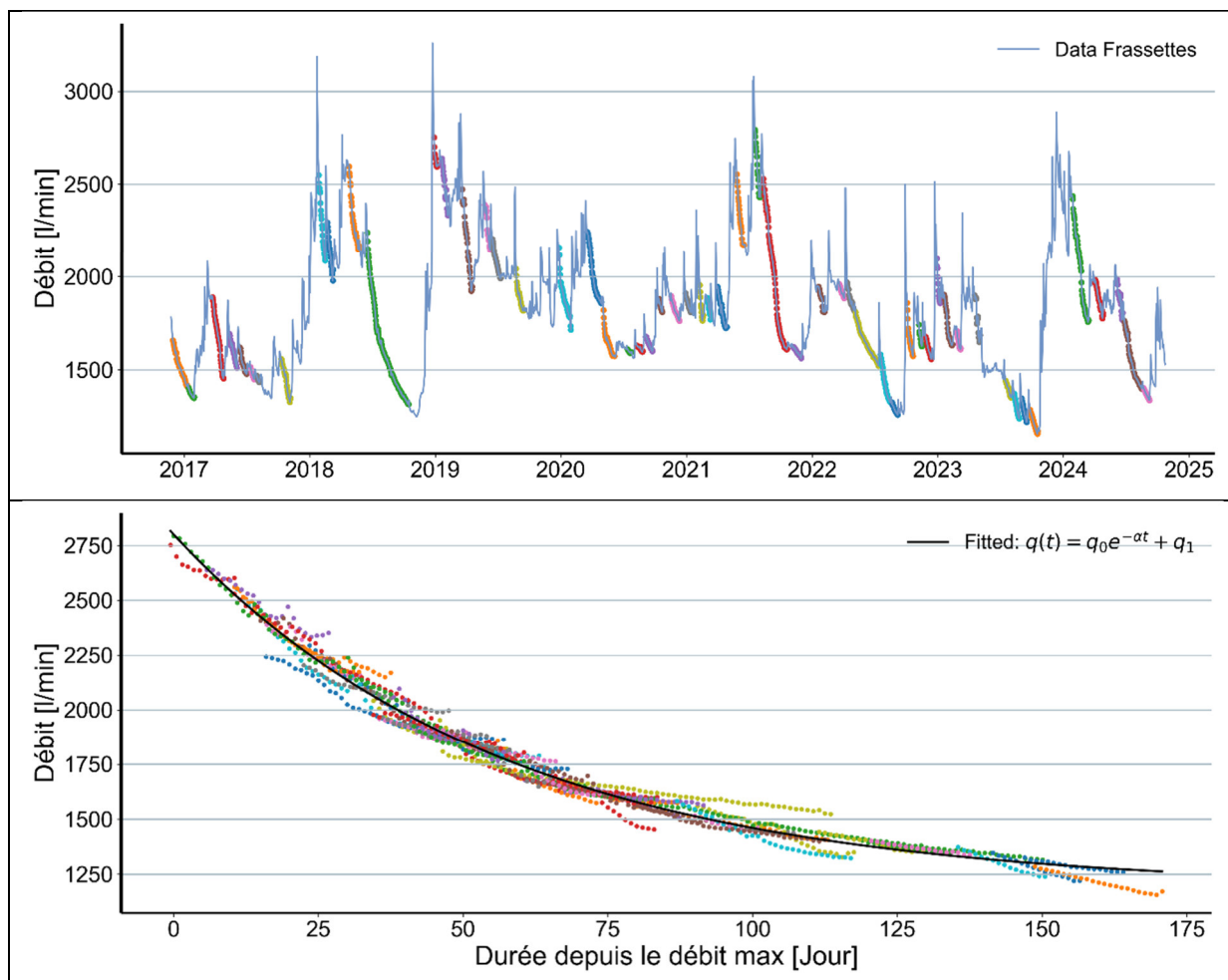




2. Source de Villard-Bony supérieur

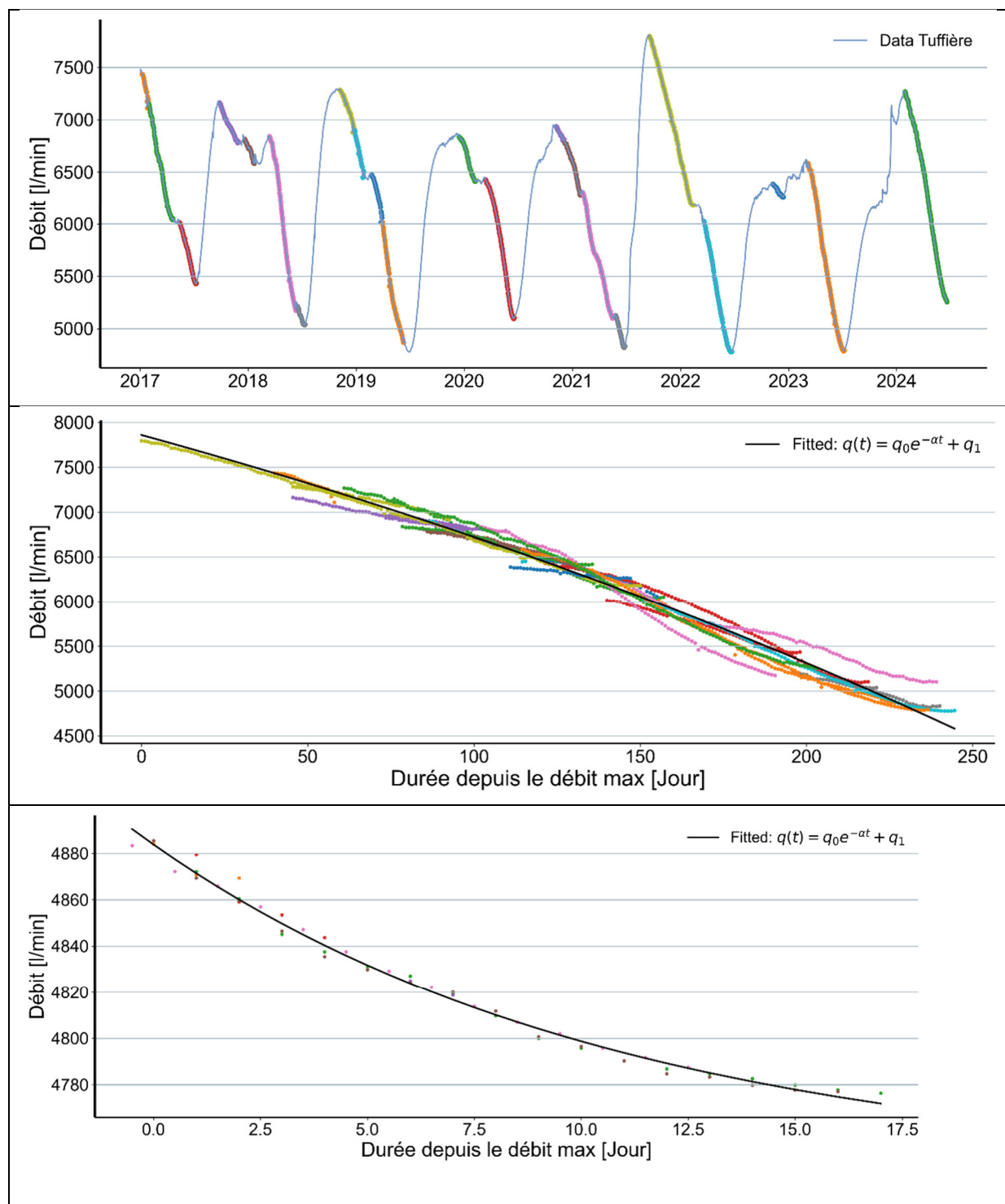


3. Source de Frassettes

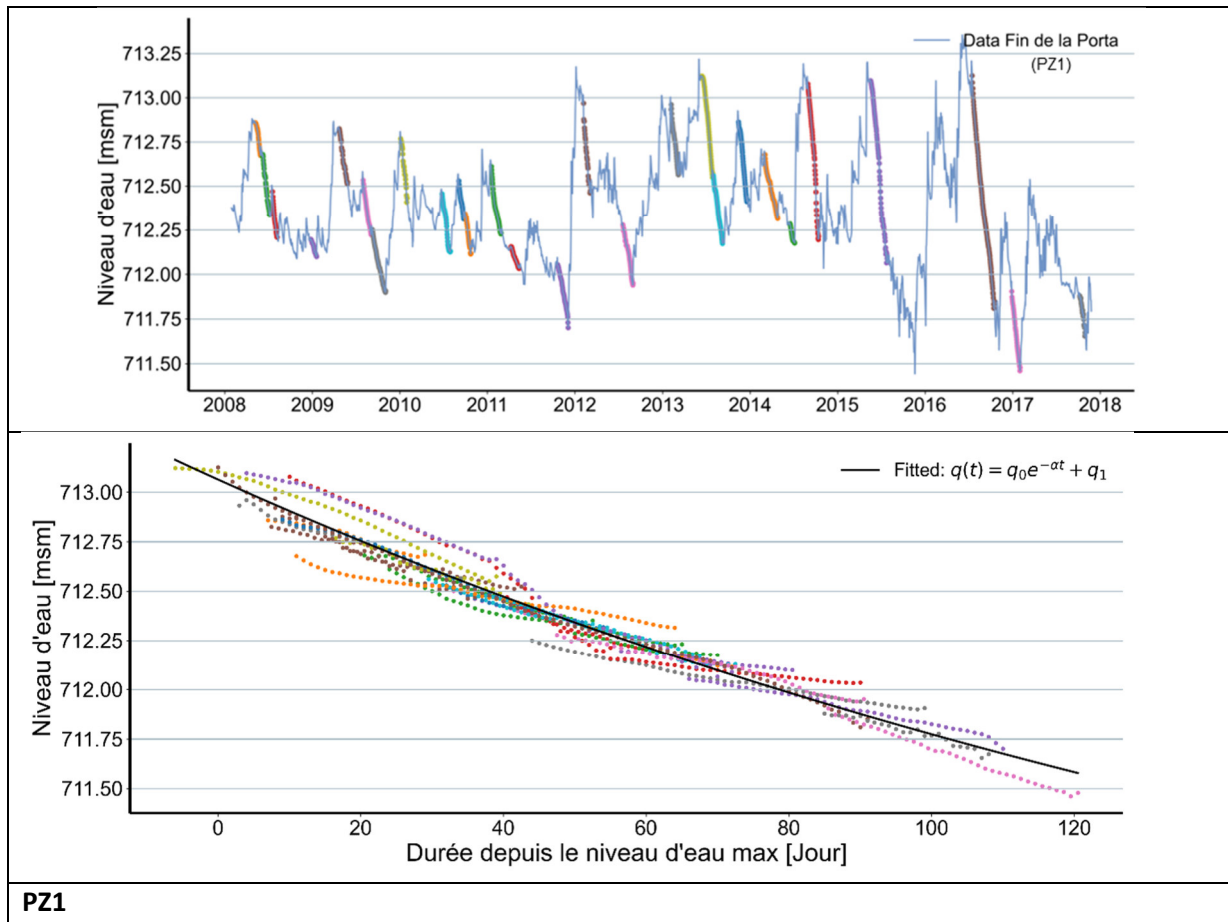


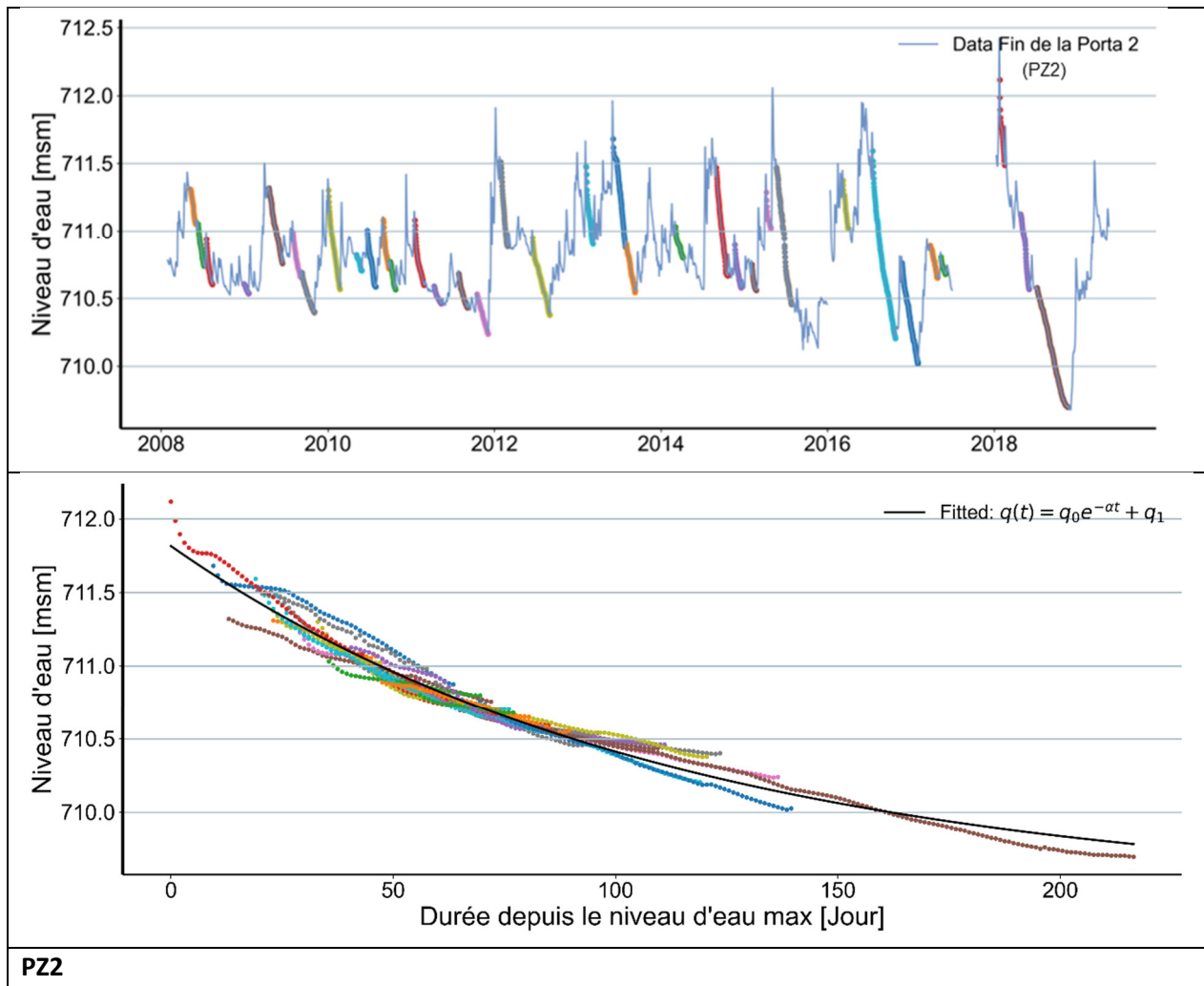
4. Source de la Tuffière

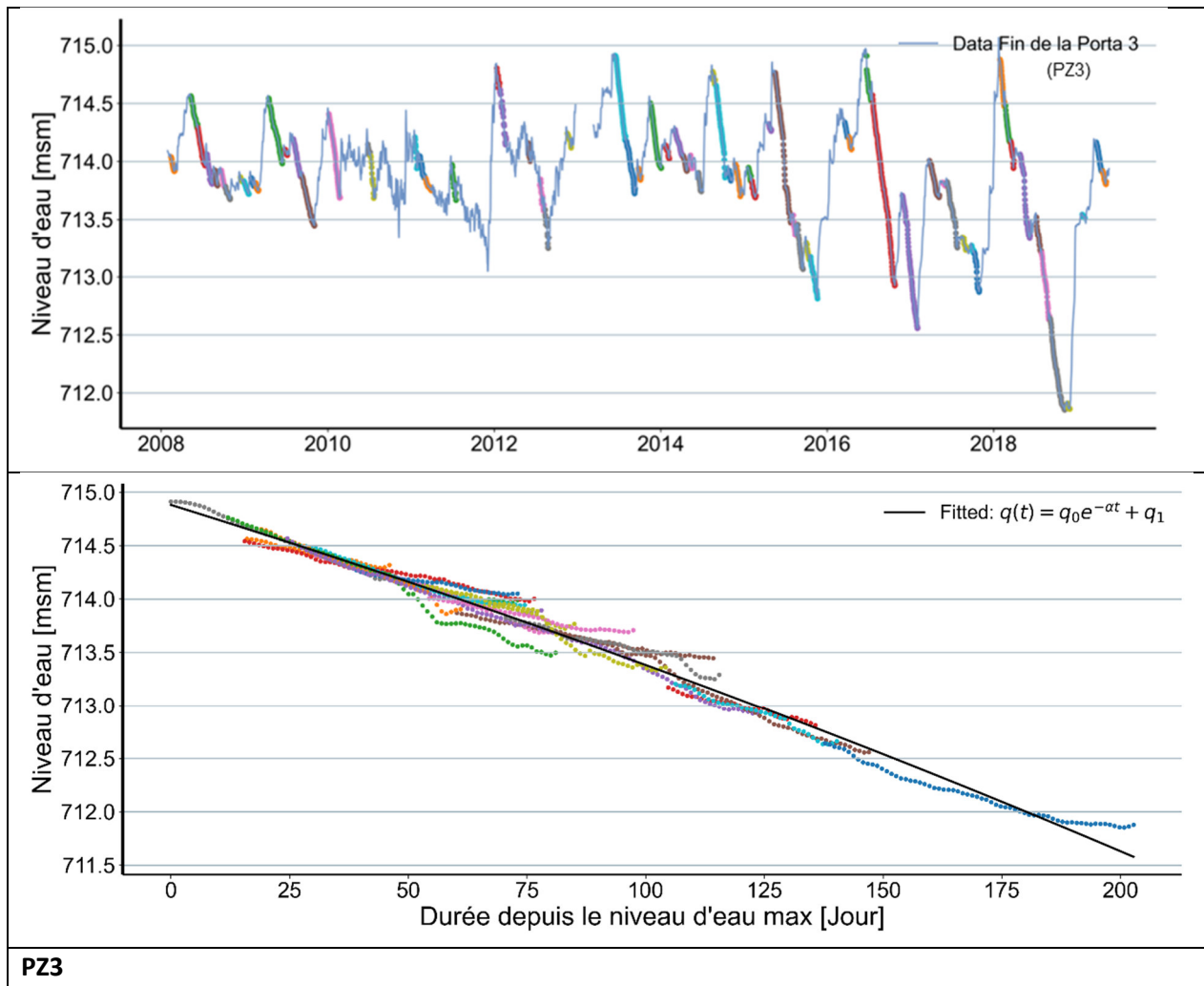
Pour la courbe de récession du haut, le modèle est ajusté sur toute la période, tandis que pour la courbe de récession du bas, le calcul est effectué uniquement sur la partie basse du segment, c'est ce dernier qui est utilisé dans le rapport.



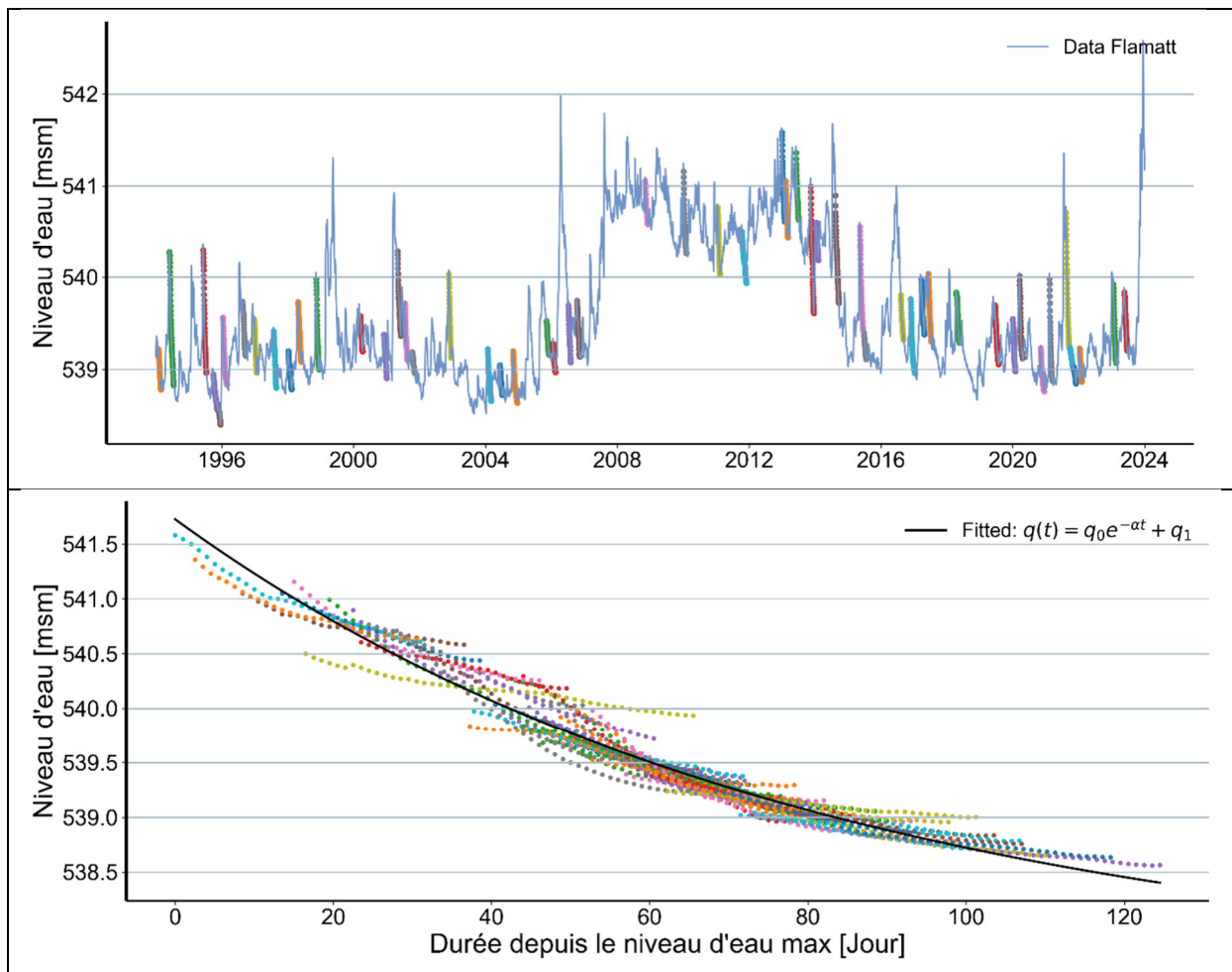
5. Fin de la Porta : piézomètres PZ1, PZ2 et PZ3



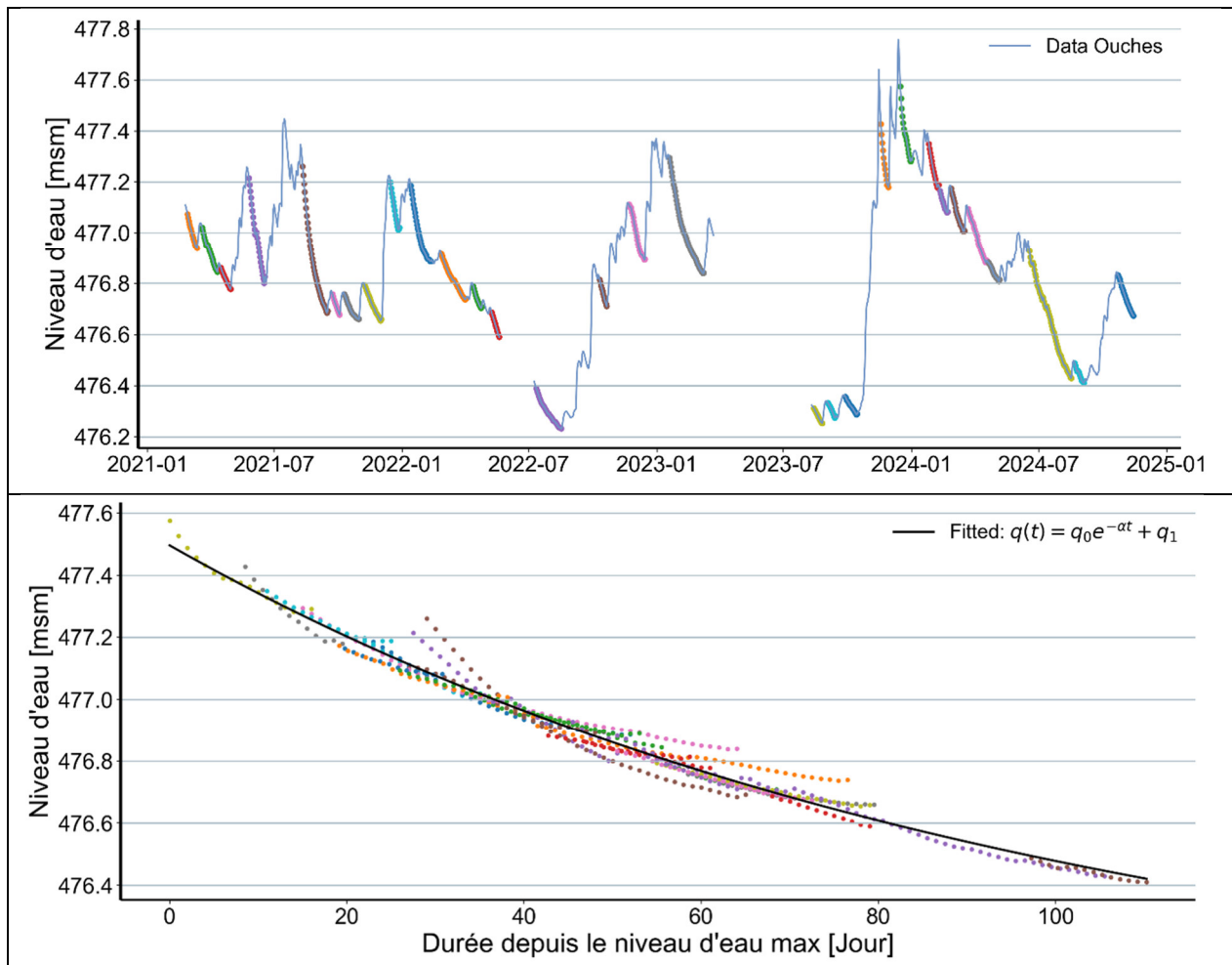




6. Flamatt : piézomètre de Neuenegg

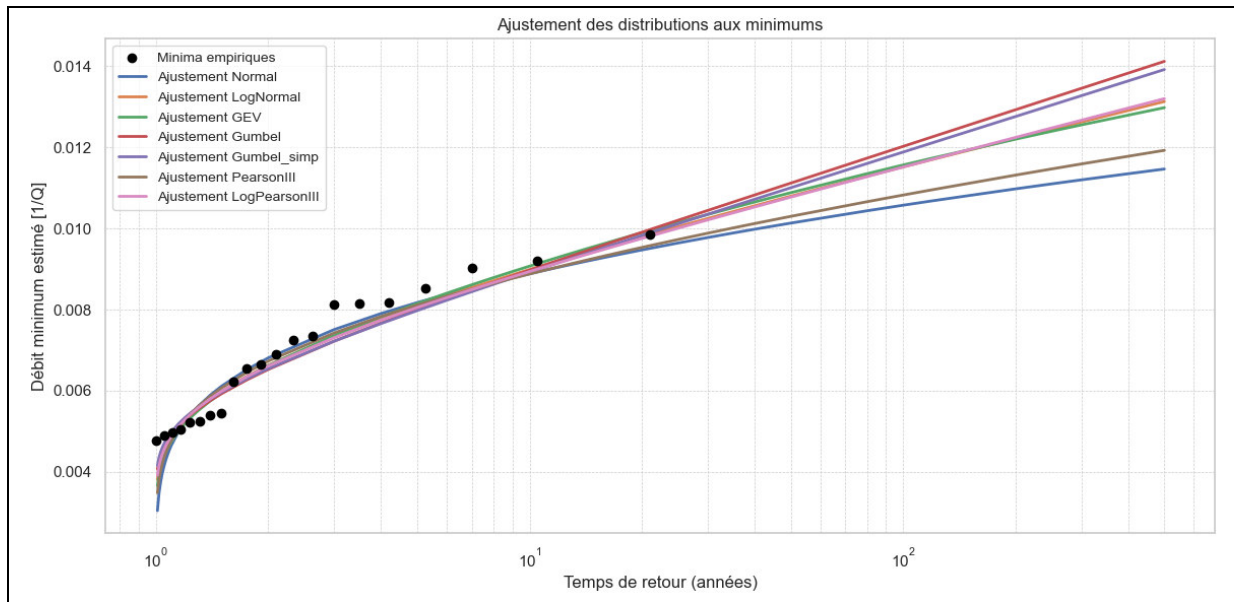


7. Ouches : piézomètre DF3

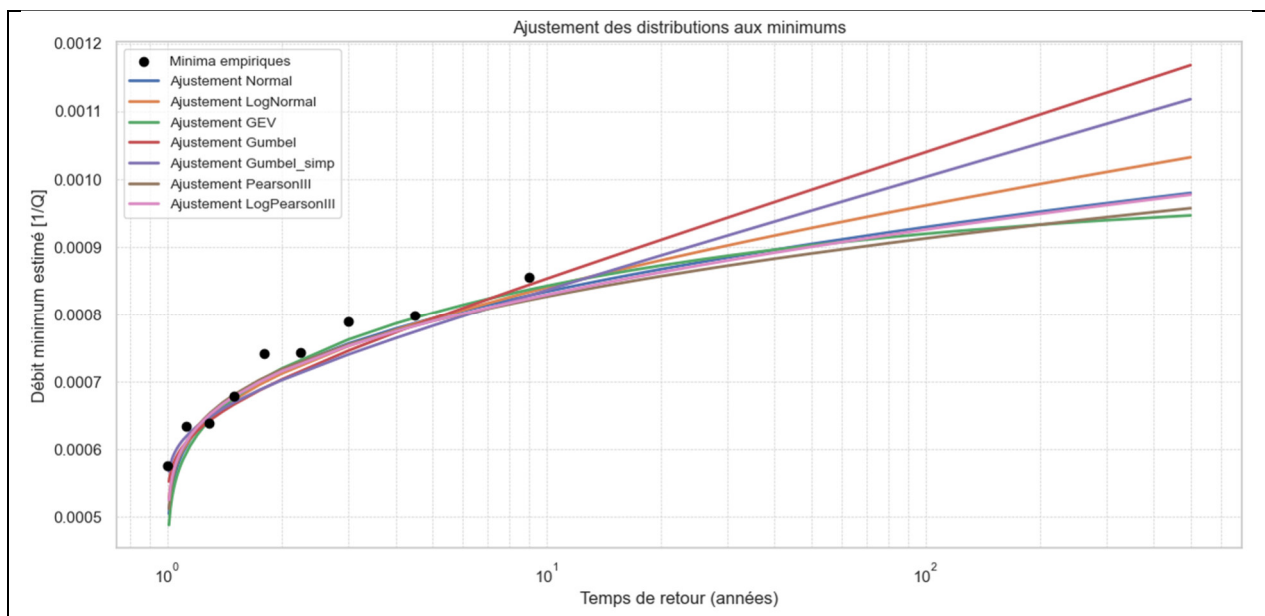


Annexe 13 : Ajustement loi de distribution statistique aux données

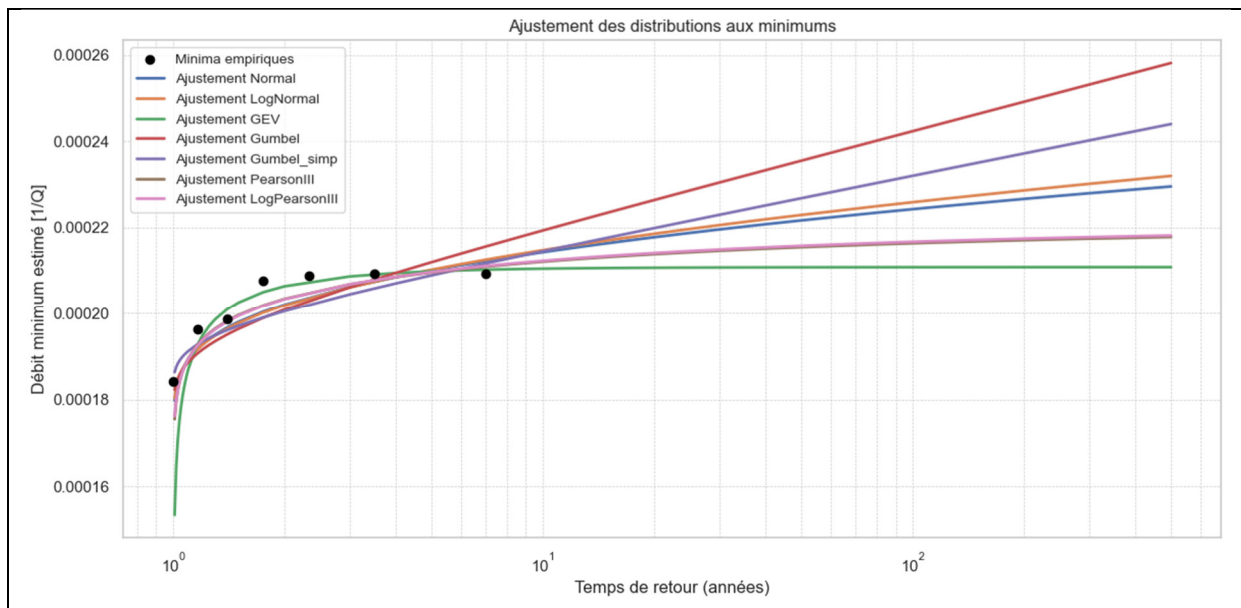
1. Source de Hangbüel



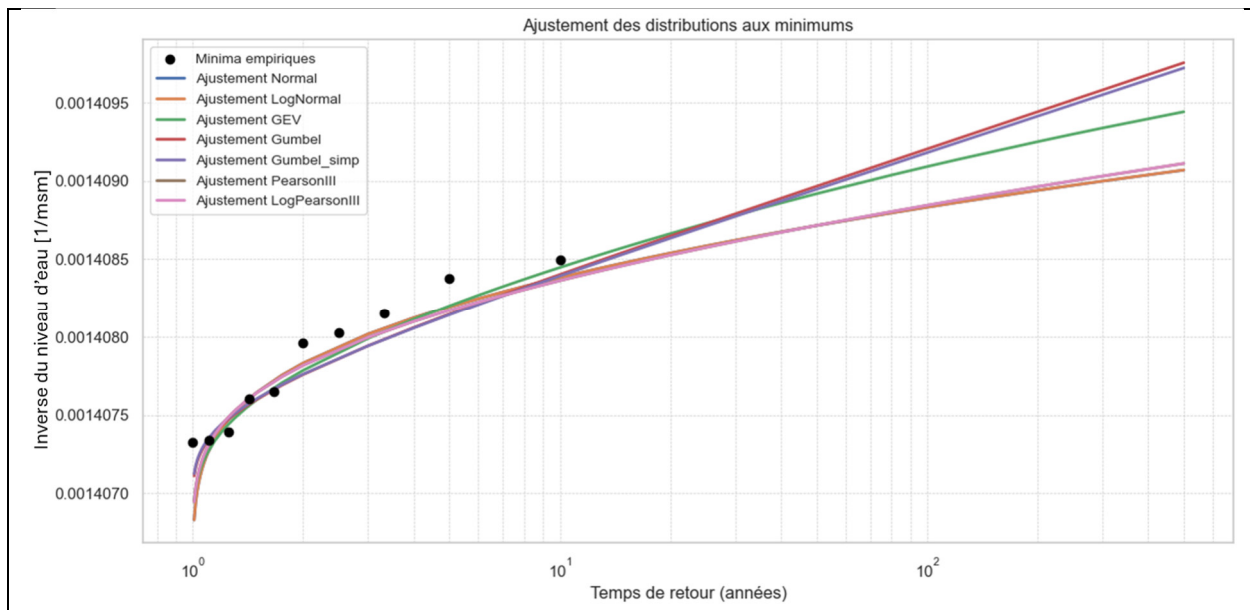
2. Source de Frassette



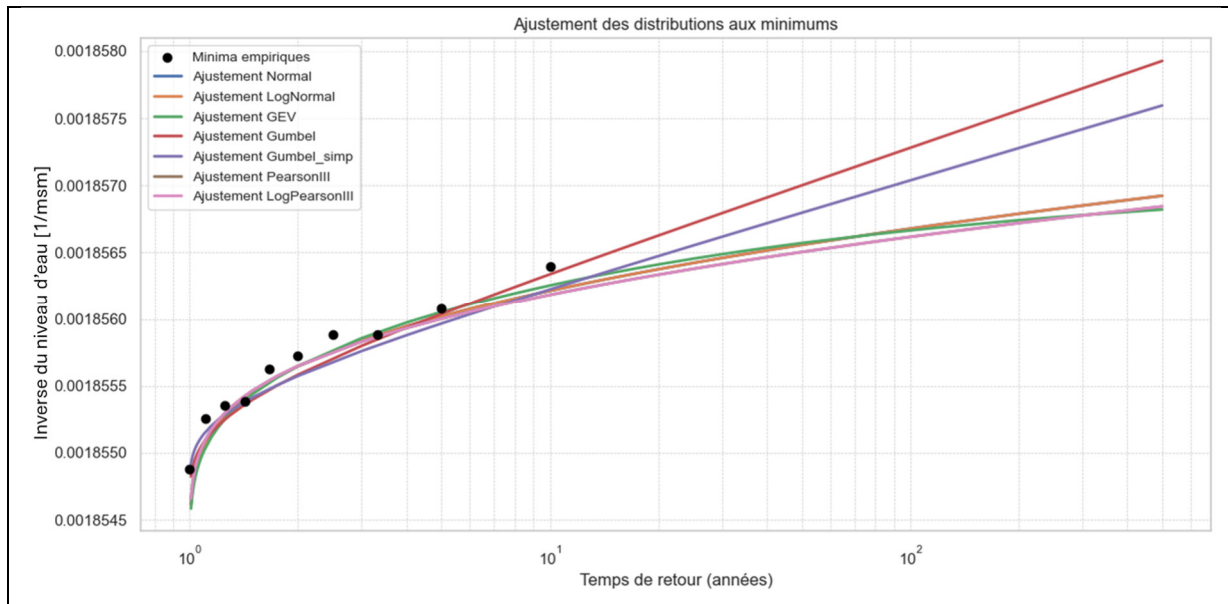
3. Source de Tuffière



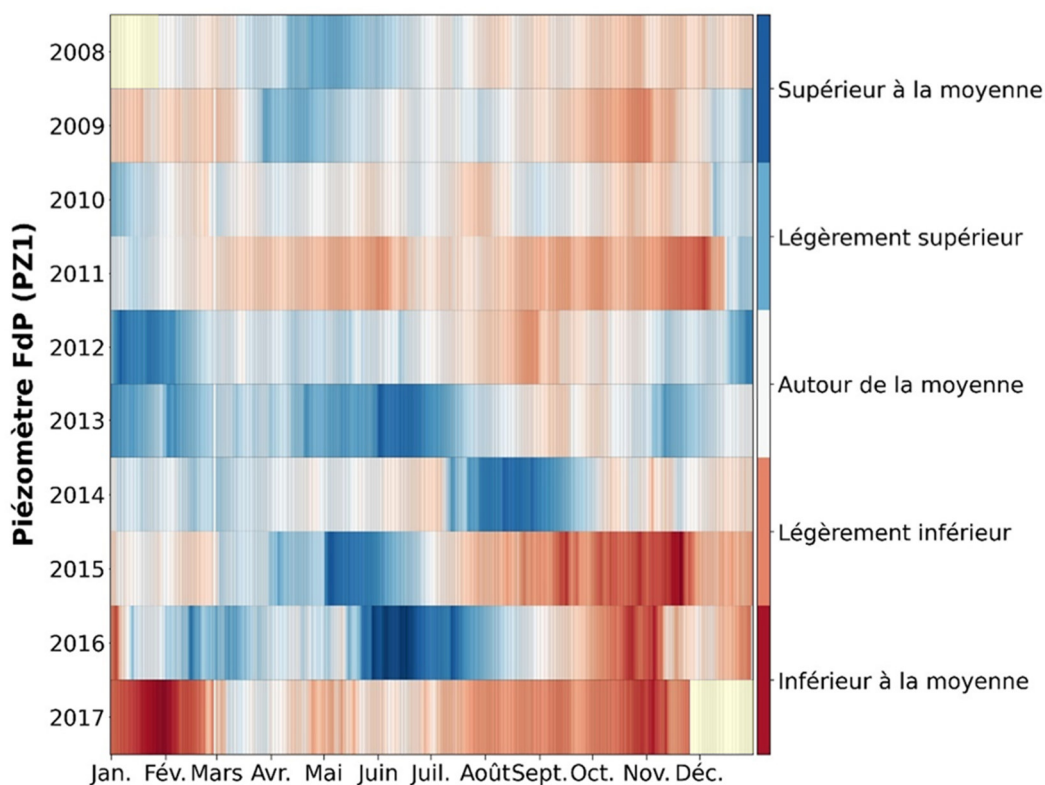
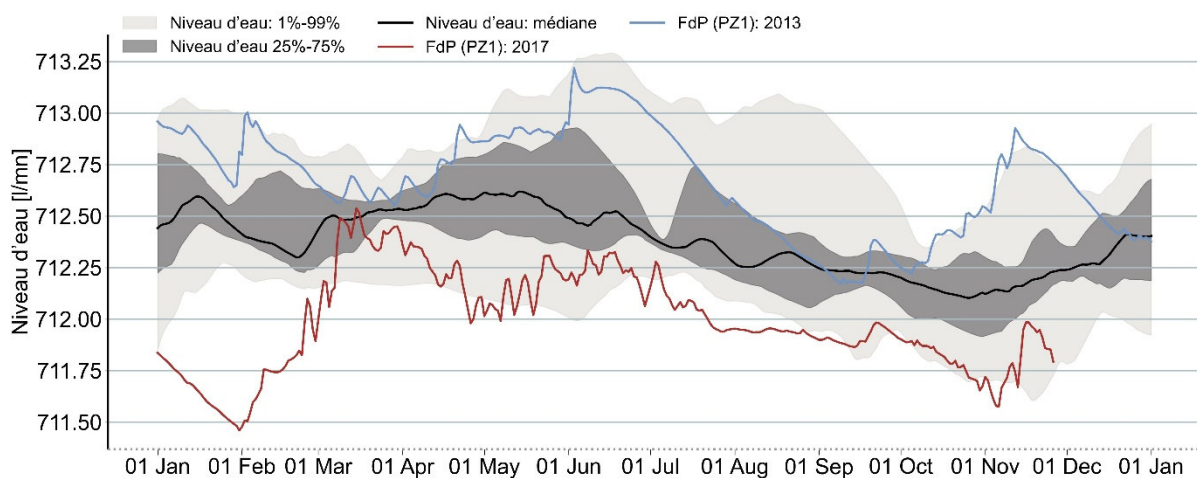
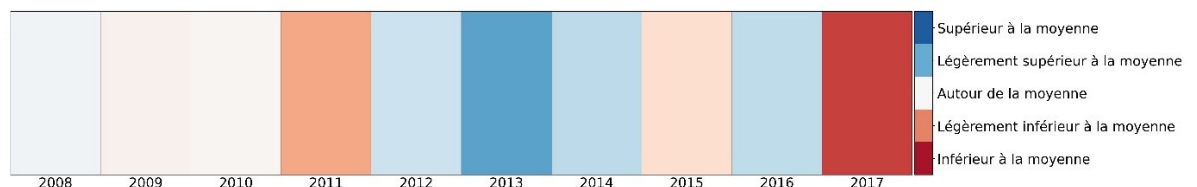
4. Grandvillard/ Fin de la Porta : Piézomètre PZ2

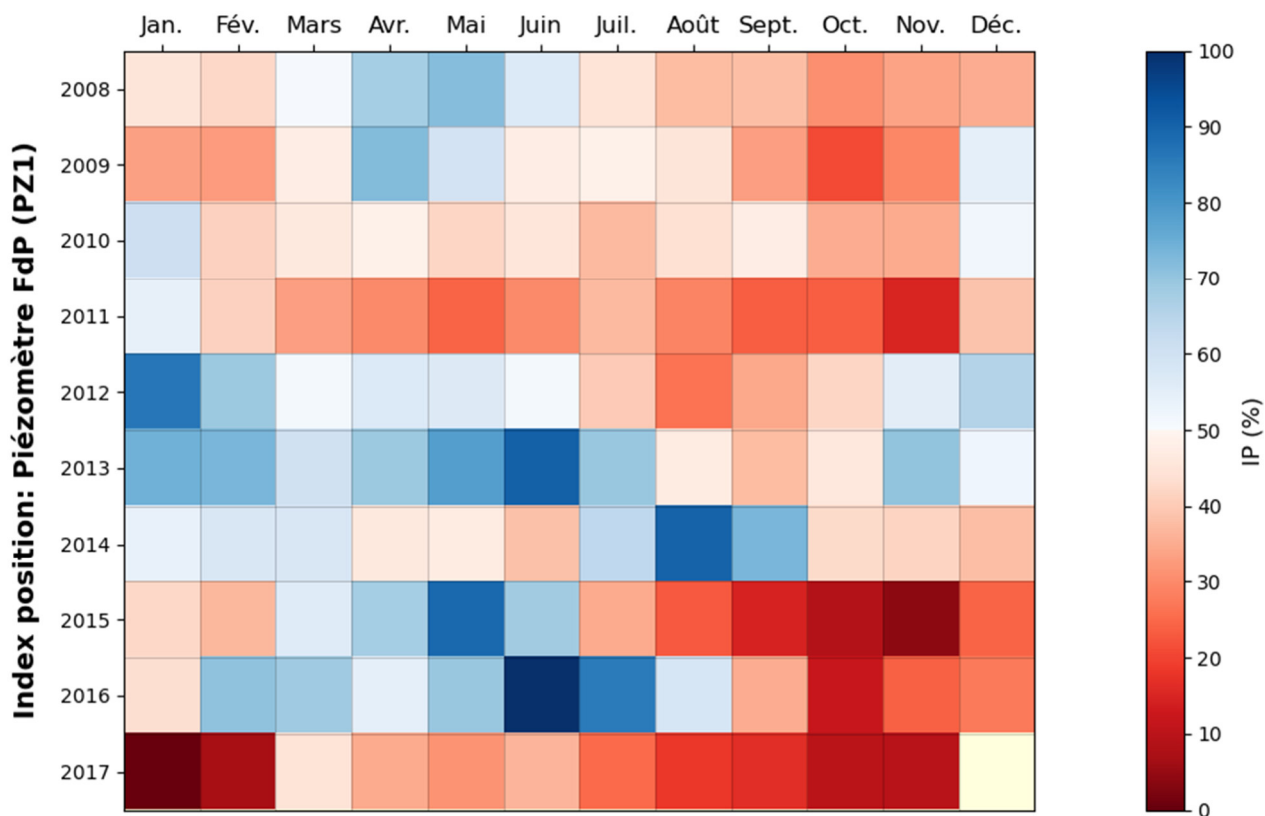


5. Flamatt : piézomètre Neueneegg (2014-2024)



Annexe 14 : Calculs pour le piézomètre PZ1 (Granvillard Fin de la Porta) : heatmap des variations du niveau moyen annuel normalisé (z-score), Comparaison pluriannuelle de l'évolution du niveau du piézomètre, heatmap des variations journalières du niveau normalisé (z-score) (Les zones en jaune indiquent des données manquantes) et niveaux mensuels exprimés sous forme d'indice de position (chaque barre représente la position relative du débit moyen du mois dans la série observée).





8 Bibliographie

- Aschwanden, H., & Weingartner, R. (1985). Die Abflussregimes der Schweiz GIOGRAPIUSCB.BS INSTITUT D'UNIVERSITÉ. *Gewässerkunde*, 65. Institut de géographie de l'Université de Berne.
- Banzato, C., Butera, I., Revelli, R., & Vigna, B. (2017). Reliability of the VESPA Index in Identifying Spring Vulnerability Level. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(6), 04017008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001498](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001498)
- BRGM. (2010). *Les outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure du fonctionnement des systèmes karstiques et l'évaluation de leur ressource*. (Guide méthodologique BRGM/RP-58237-FR).
- BRGM. (2015a). *Complément d'étude pour la caractérisation des pressions et impacts sur les eaux souterraines [Méthodes d'évaluation de la recharge des nappes]*.
- BRGM. (2015b). *Estimation des Ressources en Eaux souterraines renouvelables et évaluation de la Sensibilité à la Sécheresse des Aquifères en Région Midi-Pyrénées (ERESSAR)* (BRGM/RP-64075-FR).
- BRGM. (2015c). *Proposition d'un indicateur piézométrique standardisé pour le Bulletin de Situation hydrologique « Nappes »* (RP-64147-FR).
- BRGM. (2016a). *Bilans et comparaisons avec l'indicateurs BSH* (Index piézométrique standardisé (IPS) RP-67251-FR).
- BRGM. (2016b). *Note sur l'utilisation de l'IPS (indicateur piézométrique standardisé)* (Bulletin de situation hydrogéologique (BSH) RP-67249-FR; Note technique).
- BRGM. (2020). *Analyse de la sécheresse hydrogéologique de la région du Grand Est : Phase 2 amélioration des indicateurs de gestions* (BRGM R 37734-FR).
- Dübendorfer, C., Basler, E., & Schweizer, S. (2011). *Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau. Hydrologie – régime d'écoulement niveau R*.
- Galleani, L., Vigna, B., Banzato, C., & Russo, S. L. (2011). Validation of a Vulnerability Estimator for Spring Protection Areas: The VESPA index. *Journal of Hydrology*, 396(3-4), 233-245. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.11.012>
- OFEV. (2024). *STATISTIQUE DES ÉTIAGES RAPPORT DE STATION* [RAPPORT DE STATION]. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/eaux/evenements-extremes/etiages/statistiques-des-etiages.html>
- OMM. (2012). *Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé*. OMM-N° 1090, 25.
- Thierrin, J. (1990). *Contribution à l'étude des eaux souterraines de la région de Fribourg (Suisse occidentale)* [Université de Neuchâtel]. <https://doi.org/10.35662/unine-thesis-1101>
- WMO. (2007). *THE ROLE OF CLIMATOLOGICAL NORMALS IN A CHANGING CLIMATE* (WMO/TD No. 1377; p. 130). WMO.