

Projet LIFE ADSORB

LIFE17 ENV/FR/000398 LIFE ADSORB project is supported by the European Union LIFE program

Le projet LIFE17 ENV/FR/000398 LIFE ADSORB bénéficie du soutien financier du programme LIFE de l'Union européenne

LIFE ADSORB

LIFE17 ENV/FR/000398



Deliverable B.2.2 : Report on the hydraulic functioning of the structure and proposed management scenarios

Reporting date

V1	June 2025
----	-----------



Resumé

Dans le cadre du projet LIFE ADSORB, cofinancé par l'Union européenne, un prototype de traitement des eaux pluviales issues du boulevard périphérique parisien a été installé dans le Bois de Boulogne. Ce rapport (B2.2) analyse le fonctionnement hydraulique du système sur une période de deux ans et demi (mai 2021 – décembre 2023).

Le dispositif étudié comprend trois ouvrages : un déversoir d'orage (P115), une station de pompage et un filtre planté de roseaux divisé en deux compartiments. L'un contient un substrat classique (F1), l'autre un matériau adsorbant innovant (Rainclean®, F2). L'ensemble est alimenté en alternance pour permettre une période de repos hydraulique entre deux sollicitations.

Le système a été instrumenté afin d'assurer un suivi en continu : mesures de débits, hauteurs d'eau, pluviométrie, et données de qualité. Ces données ont été centralisées via la plateforme de supervision GAASPAR de la Ville de Paris.

L'analyse révèle un fonctionnement globalement conforme aux attentes, mais plusieurs ajustements ont été nécessaires en cours d'étude :

- Réglage des seuils de déclenchement des pompes selon les conditions météorologiques (temps sec ou de pluie).
- Réduction de la temporisation de vidange et augmentation des débits de pompage pour éviter les dysfonctionnements.
- Identification de transferts d'eau non souhaités entre les deux compartiments du filtre à cause de fuites dans le merlon central.

Les bilans de volumes montrent que le mode de fonctionnement "temps sec" est prédominant (62 % des volumes pompés) et que le compartiment F2 a été légèrement plus sollicité. Toutefois, des écarts importants entre les volumes mesurés à l'entrée, au pompage et en sortie du filtre ont été constatés, en partie dus aux incertitudes de mesure et aux fuites internes.

Enfin, le rapport souligne que les conditions climatiques (notamment une année 2022 peu pluvieuse) ont fortement influencé les résultats. L'analyse par saison indique une sollicitation plus forte du système en été, en lien avec une pluviométrie plus élevée durant cette période.

Abstract

As part of the LIFE ADSORB project, co-funded by the European Union, a prototype system for treating stormwater runoff from the Paris ring road was installed in the Bois de Boulogne. This report (B2.2) provides an analysis of the system's hydraulic performance over a period of two and a half years (May 2021 to December 2023).

The system is composed of three main components: a storm overflow structure (P115), a pumping station, and a reed bed filter divided into two compartments. One compartment (F1) contains a conventional sand substrate, while the other (F2) includes an innovative adsorbent material called **Rainclean®**. The compartments are fed alternately to allow each to rest between operational phases.

A comprehensive instrumentation system was implemented to continuously monitor flow rates, water levels, rainfall, and water quality. All data were collected and centralized using the GAASPAR monitoring platform of the City of Paris.

The analysis shows that the system generally operated as intended, although several adjustments had to be made during the study:

- Adjusting pump activation thresholds based on dry or wet weather conditions.
- Reducing the drainage delay time and increasing pumping rates to prevent malfunctions.
- Detecting water transfers between compartments due to leaks in the central berm.

Volume measurements revealed that the system was used more often in dry weather mode (62% of the pumped volumes), and that compartment F2 was slightly more frequently used. However, notable discrepancies were found between inflow, pumped, and outflow volumes—attributed to measurement uncertainty and internal leaks.

Lastly, the report highlights the impact of climatic variations—especially the dry year 2022—on system behavior. Seasonal analysis indicates greater hydraulic activity during the summer months, in line with higher recorded rainfall during that time.

Sommaire

1	Description et fonctionnement du systeme.....	9
1.1	Ouvrage P115.....	9
1.2	Station de pompage	10
1.3	Filtre plantée de roseaux	10
2	Instrumentation du système	13
2.1	Pluviométrie	13
2.2	P115.....	13
2.3	Station de pompage	13
2.4	Filtre planté de roseaux	16
3	Donnees disponibles.....	19
3.1	Pluviométrie	19
3.2	P115.....	20
3.3	Station de pompage	20
3.4	Filtre planté	20
4	Analyse du fonctionnement du système	21
4.1	P115.....	21
4.2	Fonctionnement de la station de pompage.....	24
4.2.1	Fonctionnement par temps sec.....	25
4.2.2	Fonctionnement par temps de pluie	30
4.2.3	Optimisations apportées en cours d'étude	37
4.3	Filtre planté	37
4.3.1	Fonctionnement par temps sec.....	37
4.3.2	Fonctionnement par temps de pluie	39
4.3.3	Modifications apportées en cours d'étude	42
5	Bilan du fonctionnement du systeme	44
5.1	Événements pluvieux.....	44
5.2	Bilan global pluriannuel	45
5.2.1	Bilan des volumes sur la période mai 2021 à décembre 2023.....	45
5.2.2	Bilan des volumes sur la période janvier 2022 à décembre 2023	46
5.2.3	Bilan des volumes en sortie du compartiment non prioritaire	47
5.2.4	Bilan des volumes par mode de fonctionnement	48
5.3	Bilan global par saison	51
5.4	Bilan par évènement	54

5.4.1	Evènements en mode temps sec	54
5.4.2	Evènements de temps de pluie	57
6	Conclusion	64
7	Annexes	66
7.1	Table des illustrations	66
7.1.1	Figures	66

- les dispositifs de prélèvements automatiques des eaux placés en différents points du système, asservis à la mesure hydraulique.

L'ensemble des données enregistrées est transmis et centralisé au système de supervision Gaaspar de la ville de Paris.

Cette instrumentation a fait l'objet d'un rapport¹ dédié.

L'objet du présent rapport est de rappeler la description, le fonctionnement et l'instrumentation du système, de présenter les données utilisées pour analyser le fonctionnement réel du système par rapport à son fonctionnement théorique et de présenter les résultats observés pendant les deux années et demi de suivi.

¹ Rapport « Life Adsorb - Instrumentation de l'ouvrage – Rapport d'action B1. Installation du site démonstrateur – Janvier 2024 »

1 DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DU SYSTEME

Le système étudié est décomposé en trois ouvrages :

- le regard d'accès de la partie amont du déversoir d'orage (DO) Bugeaud dit P115 (❶) ;
- la station de pompage (❷) ;
- le filtre planté (❸).

La Figure 2 précise la localisation de ces ouvrages.

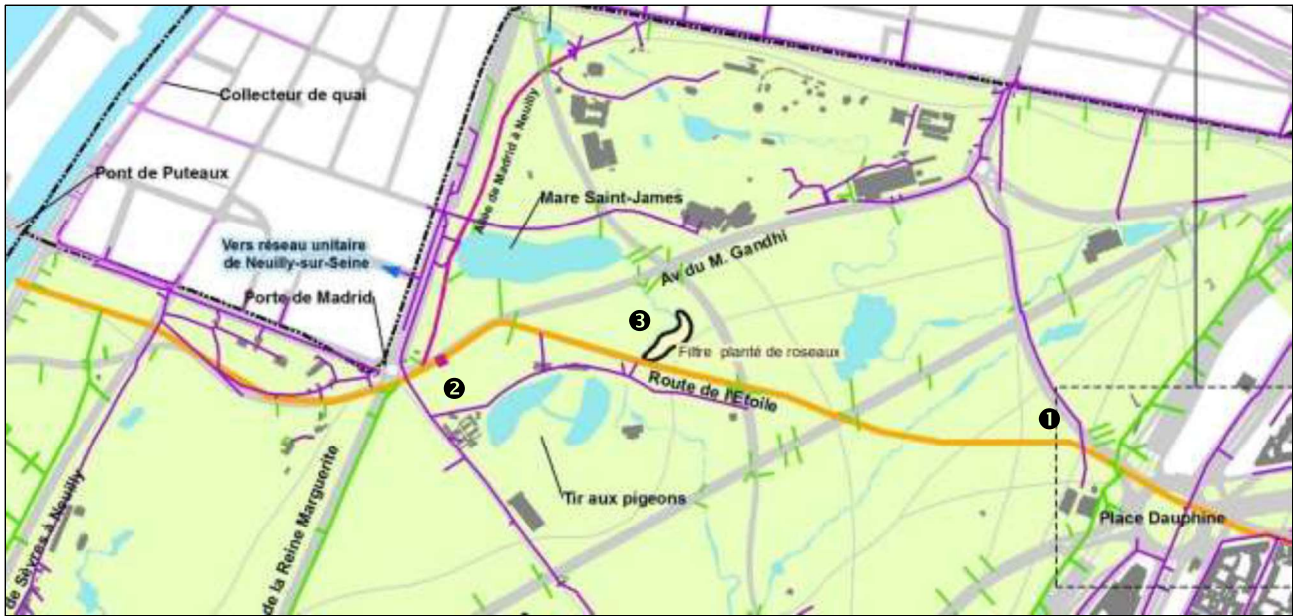


Figure 2 : localisation des trois ouvrages du système étudié.

1.1 Ouvrage P115

Le regard P115 permet d'accéder au réseau en amont de la station de pompage. Ce réseau constituant le déversoir d'orage Bugeaud a pour but de collecter les eaux de ruissellement et de relevage du boulevard périphérique et de reprendre les surverses de quatre égouts.

La Figure 3 décrit le réseau au niveau de l'ouvrage P115.

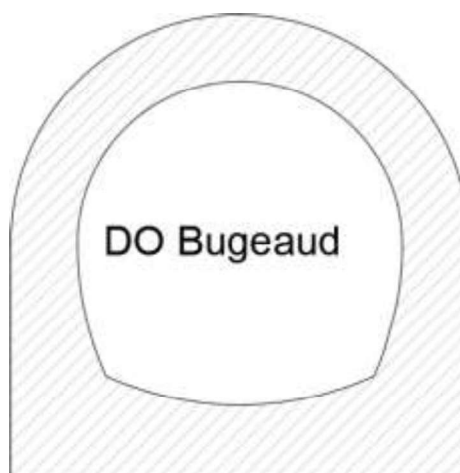


Figure 3 : coupe du déversoir d'orage au niveau de P115.

Le réseau a une longueur de 2 600 m entre la rue Spontini et la Seine et est constitué d'un collecteur de 2,20 m de diamètre. Le rechargement du radier pour créer une forme de cunette a réduit sa hauteur à 2,10 m.

1.2 Station de pompage

L'eau transitant par l'ouvrage P115 est stockée dans la station de pompage puis pompée vers le filtre. Cette eau peut avoir plusieurs origines :

- eaux claires parasites par temps sec ;
- eaux pluviales provenant du boulevard périphérique par temps de pluie ;
- mélange d'eaux pluviales et d'eaux usées provenant du déversoir d'orage pour des événements pluvieux exceptionnels.

La Figure 4 décrit la station de pompage.

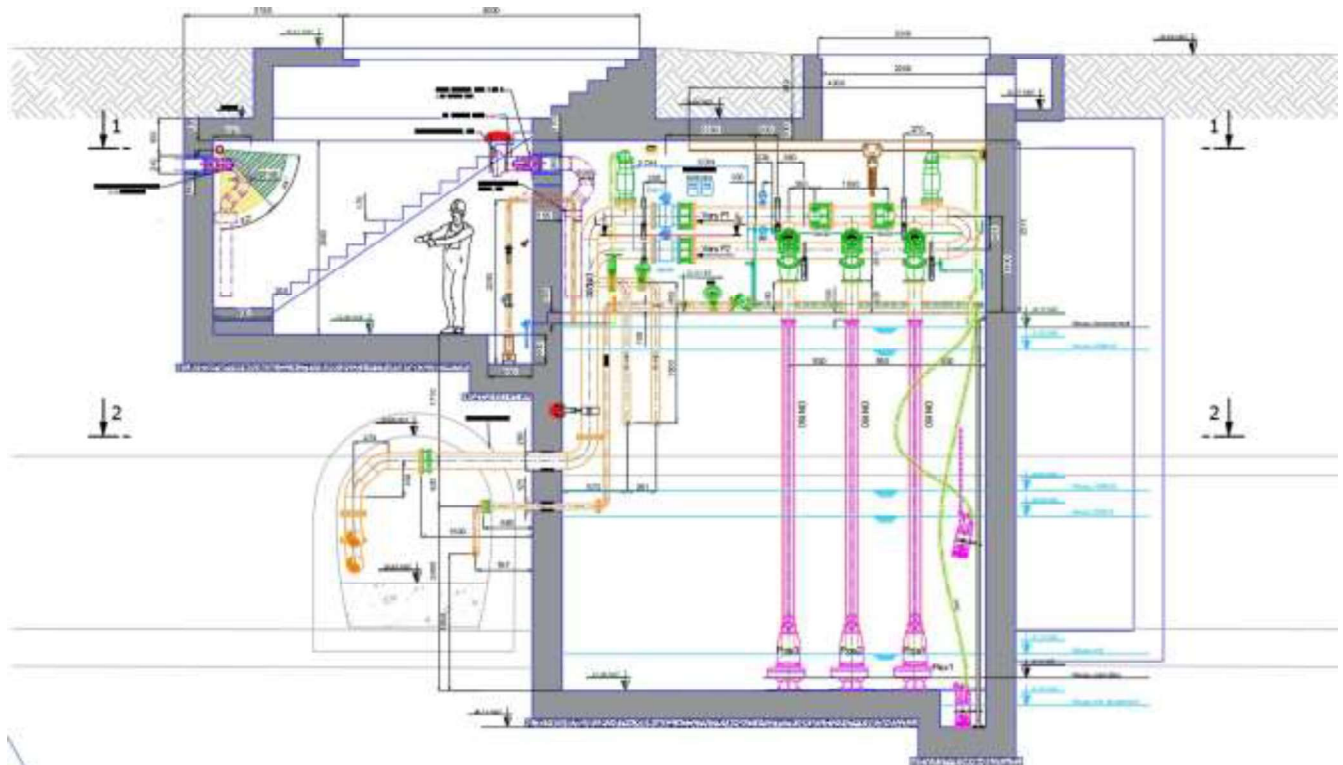


Figure 4 : schéma de la station de pompage.

La station est équipée de trois pompes :

- une pompe Ppe1 dédiée à la vidange de la bache vers le compartiment F1 ;
- une pompe Ppe2 dédiée à la vidange de la bache vers le compartiment F2 ;
- une pompe Ppe3 utilisée en complément des pompes Ppe1 ou Ppe2 afin de saturer respectivement les compartiments F1 et F2 ou en remplacement respectivement de Ppe1 ou Ppe2 en cas de panne.

1.3 Filtre plantée de roseaux

Le filtre planté de roseaux reçoit et traite l'eau de la station de pompage, puis la rejette à débit régulé dans la Seine via la mare Saint-James.

La Figure 5 décrit le filtre planté de roseaux.

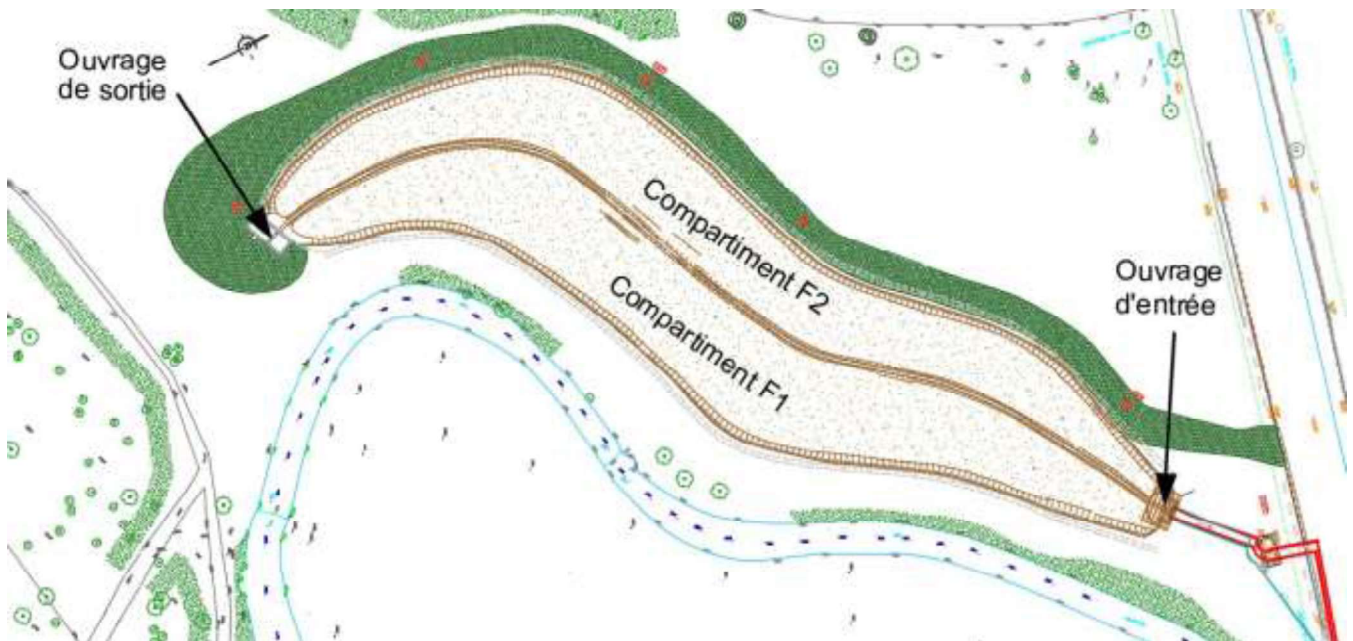


Figure 5 : schéma du filtre planté de roseaux.

Le filtre est constitué de deux compartiments :

- le compartiment F1 d'une surface d'environ 600 m² comportant une couche filtrante de 40 cm de sable fin ;
- le compartiment F2 d'une surface d'environ 600 m² comportant une couche filtrante composée de haut en bas de 10 cm de sable fin, de 20 cm de Rainclean² et de nouveau de 10 cm de sable fin.

Il est à noter que chaque compartiment doit respecter une période de repos. Ils sont donc alimentés de manière alternative pour une durée de 1 mois. Le compartiment alimenté est dit « prioritaire » pendant cette durée.

La Figure 6 présente le détail des couches pour chaque compartiment.

² Rainclean : matériau innovant permettant de traiter la pollution dissoute

Filtre planté de macrophytes détails couches de constitution

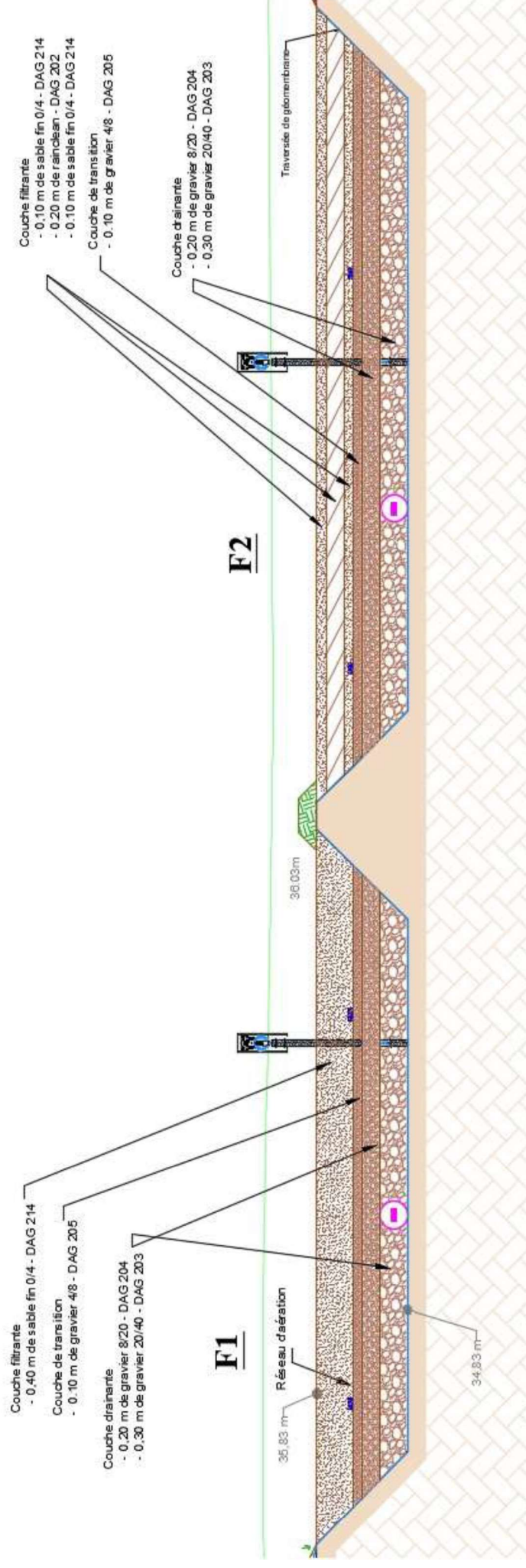


Figure 6 : coupe du filtre planté.

2 INSTRUMENTATION DU SYSTEME

Chaque ouvrage a fait l'objet d'une instrumentation permettant (i) le suivi quantitatif et/ou qualitatif en continu des eaux et (ii) le prélèvement automatique d'échantillons destinés aux analyses physico-chimiques. Le présent paragraphe rappelle uniquement l'instrumentation quantitative mise en place et/ou utilisée dans le cadre de l'analyse des données.

2.1 Pluviométrie

La ville de Paris dispose d'un réseau de pluviomètre sur son territoire. Ces données ont été utilisées dans le cadre du projet. Aucun pluviomètre n'a été installé spécifiquement.

La Figure 7 présente la localisation des pluviomètres du réseau.



Figure 7 : réseau de pluviomètre de la ville de Paris.

Les pluviomètres PL07, PL09 et PL01 sont situés à proximité du projet, leurs données sont utilisées pour l'analyse du fonctionnement.

2.2 P115

Dans ce secteur situé en amont de la station de pompage, un débitmètre de type hauteur / vitesse était déjà installé au début de l'étude. Les données utilisées dans le cadre de l'étude sont essentiellement :

- la hauteur d'eau dans le réseau ;
- la mesure du débit dans le réseau.

2.3 Station de pompage

Au niveau de la station de pompage, des piézomètres, des sondes radar et des débitmètres électromagnétiques ont été mis en place.

La Figure 8 précise la nature des capteurs mis en place et leur localisation dans l'ouvrage.

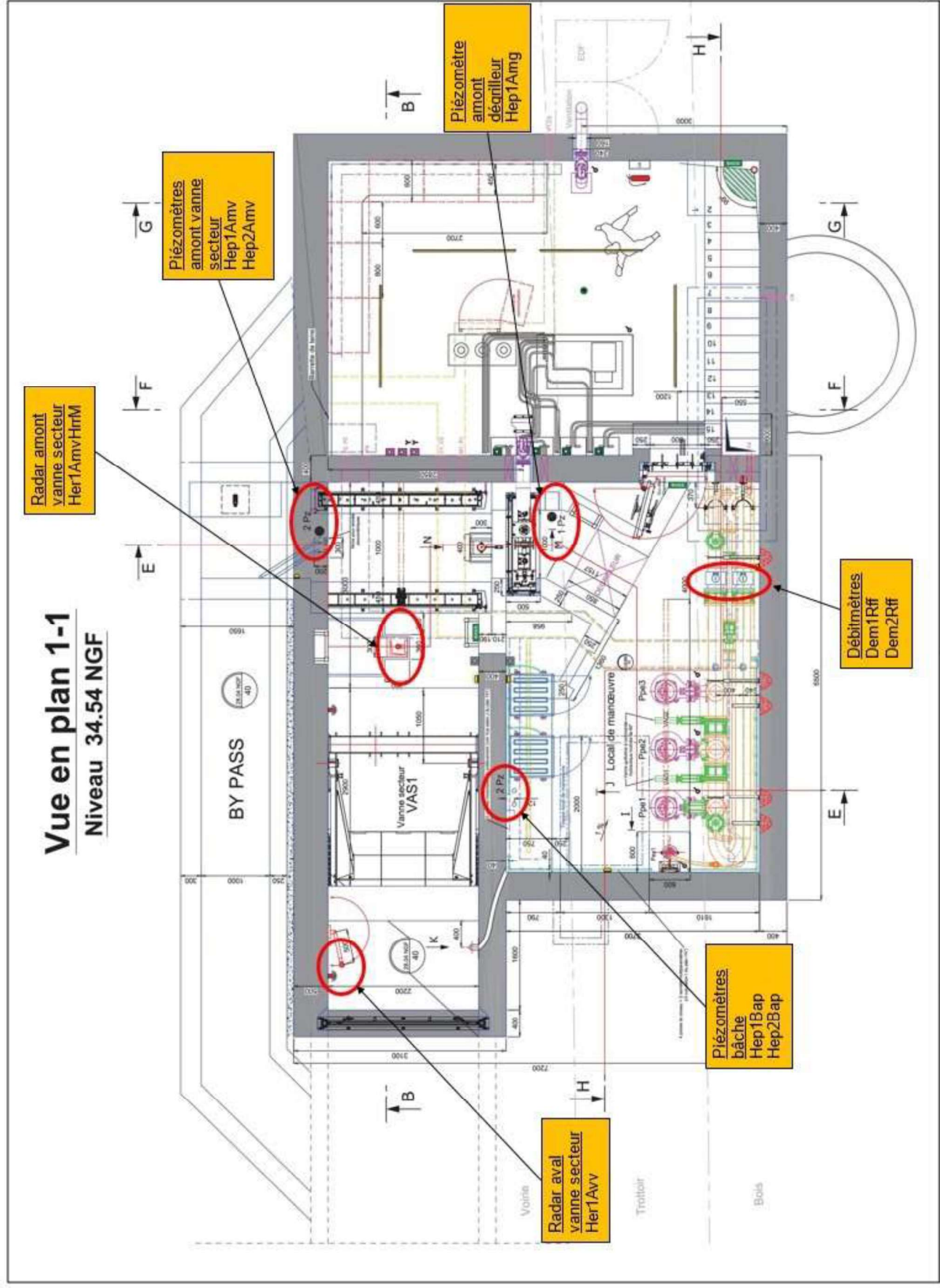


Figure 8 : localisation des capteurs de mesures hydrauliques de la station de pompage.

Les données utilisées sont essentiellement :

- la hauteur d'eau dans la bache de pompage (piézomètres bache) ;
- les débits pompées vers les compartiments F1 et F2 du filtre planté de roseaux (débitmètres Dem1Rff et Dem2Rff).

2.4 Filtre planté de roseaux

En entrée, en sortie et à l'intérieur de chaque compartiment du filtre planté de roseaux, des piézomètres et des sondes de teneurs en eau ont été mis en place.

La Figure 9 précise la nature des capteurs mis en place et leur localisation.

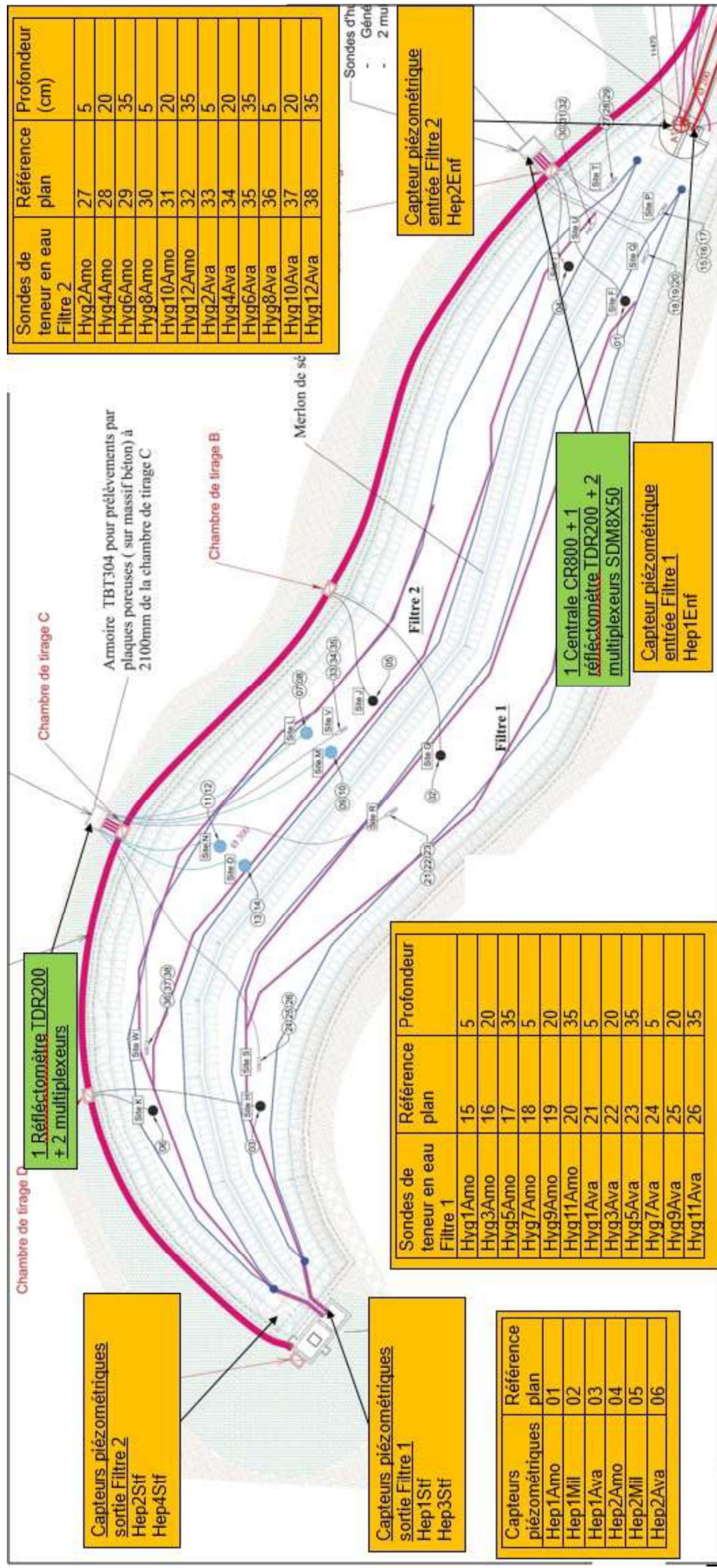


Figure 9 : localisation des capteurs de mesures hydrauliques du filtre planté de roseaux.

Les données utilisées dans ce rapport sont essentiellement celles des piézomètres situés en sortie d'ouvrage qui permettent d'estimer le débit de sortie de chaque compartiment via une loi d'orifice décrite dans le rapport d'instrumentation.

3 DONNEES DISPONIBLES

Dans ce paragraphe, les données disponibles utilisées sur la période du 01 mai 2021 au 31 décembre 2023 sont présentées. Certaines données peuvent être manquantes ou considérées comme non valides.

Les données non valides sont soit :

- des données qui sont hors de la plage de mesures possibles ;
- des données dont l'ordre de grandeur des valeurs paraît bon mais où les mesures sont considérées incorrectes.

3.1 Pluviométrie

Comme présenté dans le paragraphe 2.1, les pluviomètres PL01, PL07 et PL09 du réseau de pluviomètre de la ville de Paris ont été utilisés. Les données du pluviomètre PL01 sont les plus complètes sur la période d'étude. Ce sont celles qui ont été utilisées dans le présent document.

La Figure 10 montre que les cumuls journaliers des pluviomètres PL01, PL07 et PL09 sont proches. Et donc ponctuellement les données du pluviomètre PL01 peuvent être complétées par celles du PL07 et PL09. Les données du PL07 sont plus complètes que celles du PL09. Elles seront donc utilisées en priorité pour compléter les données du PL01. En l'absence de données du PL01 et du PL07 sur une même période, les données du PL09 seront utilisées.

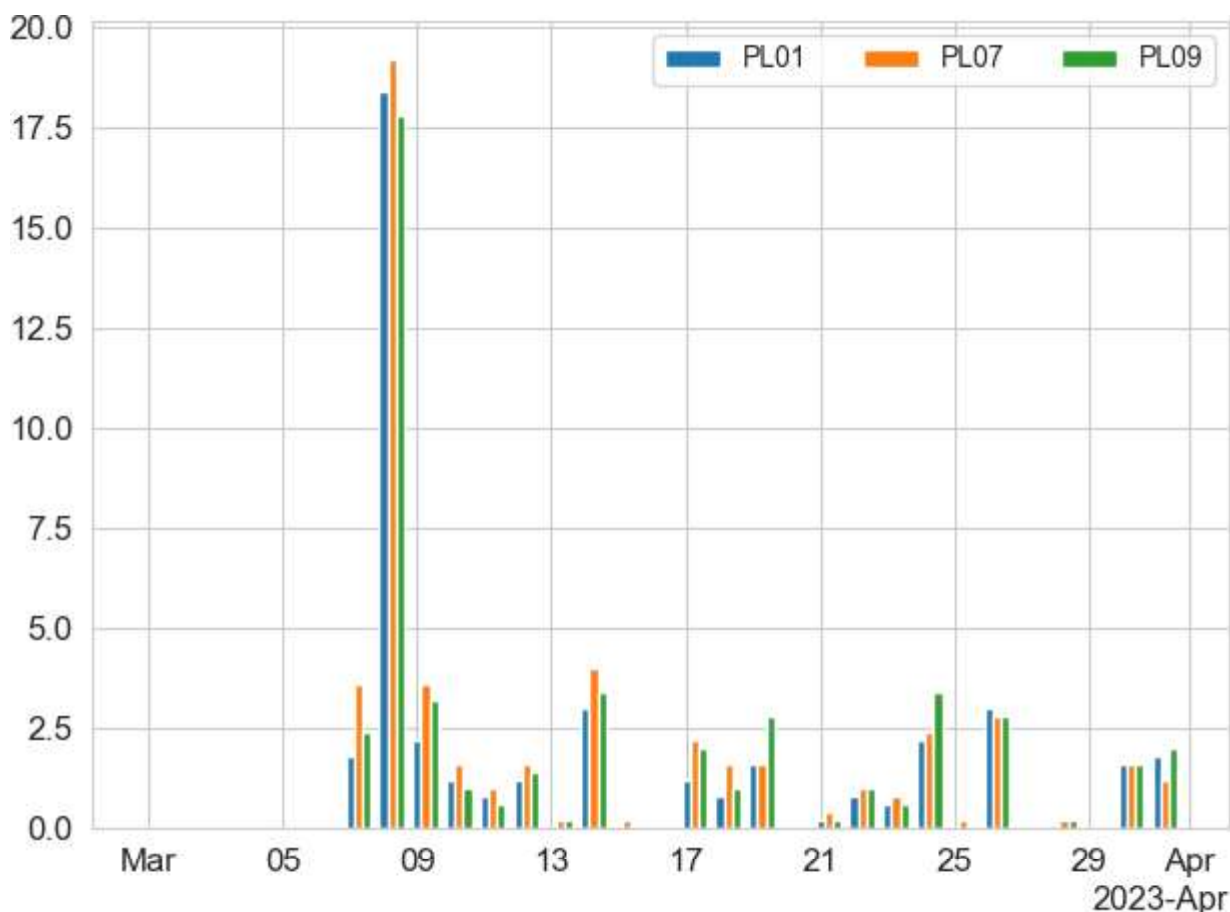


Figure 10 : cumuls journalier des pluviomètres PL01, PL07 et PL09 pour le mois d'avril 2023.

Les données des pluviomètres PL07 et PL09, utilisées en complément sur les quelques périodes où des manques ont été constatés dans les données du PL01, sont précisées ci-après :

- données du PL01 complétées par celles du PL07 entre le 05 juin 2021 et le 01 juillet 2021 ;
- données du PL01 complétées par celles du PL09 entre le 09 décembre 2021 et le 13 décembre 2021 ;
- données du PL01 complétées par celles du PL07 entre le 27 juin 2022 07h et le 27 juin 2022 09h.

3.2 P115

Les données utilisées du réseau au niveau du regard d'accès P115 sont essentiellement les données de débit. 3,5% des données sont manquantes/non valides³ et n'ont pas pu être remplacées.

3.3 Station de pompage

Au niveau de la station de pompage, les données de débit pompé vers chaque compartiment ont été utilisées.

Les données enregistrées sont quasi complètes sur la période d'étude (respectivement 0,13% et 0,19 % de données manquantes/non valides vers les compartiments F1 et F2). Il est à noter que les débitmètres électromagnétiques ont enregistré des données alors que les pompes n'étaient pas en fonctionnement. Afin de ne pas fausser le calcul du volume global enregistré, les débits inférieurs à 1 l/s ont été remplacés par 0 l/s.

Les données de hauteur dans la bêche ont également été utilisées pour identifier les bâchées de temps sec et de temps de pluie.

Les données de hauteur manquantes/non valides représentent 1,9% des données de la période d'étude.

3.4 Filtre planté

Au niveau du filtre planté de roseaux, les données de débit en sortie des compartiments F1 et F2 ont été utilisées.

Les données manquantes représentent respectivement 8,3 % et 2.1 % en sortie des compartiments F1 et F2 des données de la période d'étude.

³ Les données manquantes correspondent à l'absence de données remontées à la supervision GASPAAR. Les données non valides sont celles qui présentent des valeurs situées en dehors des plages des mesures physiques ou des données considérées comme non cohérentes.

4 ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DU SYSTEME

4.1 P115

Pour rappel, le fonctionnement du réseau P115 est le suivant :

- apport continu d'eaux claires parasites appelées « eaux de temps sec ». Le débit des « eaux de temps sec » peut fluctuer et induire des problèmes de fonctionnement.
- apport d'eaux de ruissellement lors des événements pluvieux appelés « eaux de temps de pluie ». En cas d'évènement important, un mélange d'eau usées et d'eaux de ruissellement provenant des quatre bouches d'égout peut se retrouver dans ces eaux de temps de pluie.

Les Figure 11 et Figure 12 illustrent les fluctuations que peut avoir le débit moyen selon la période.

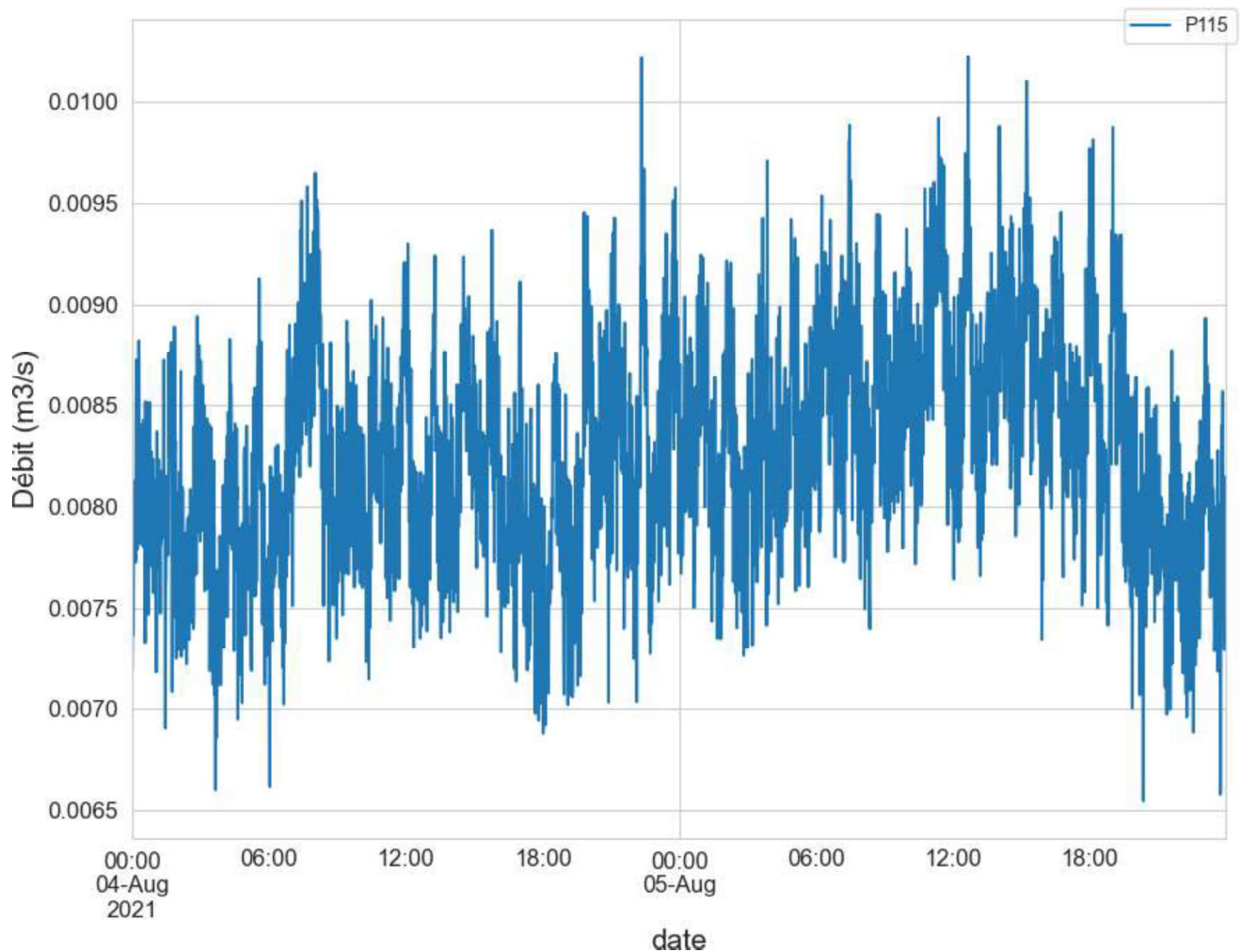


Figure 11 : Débit à P115 entre le 4 et 5 août 2021 – débit moyen entre 8 et 9 l/s.

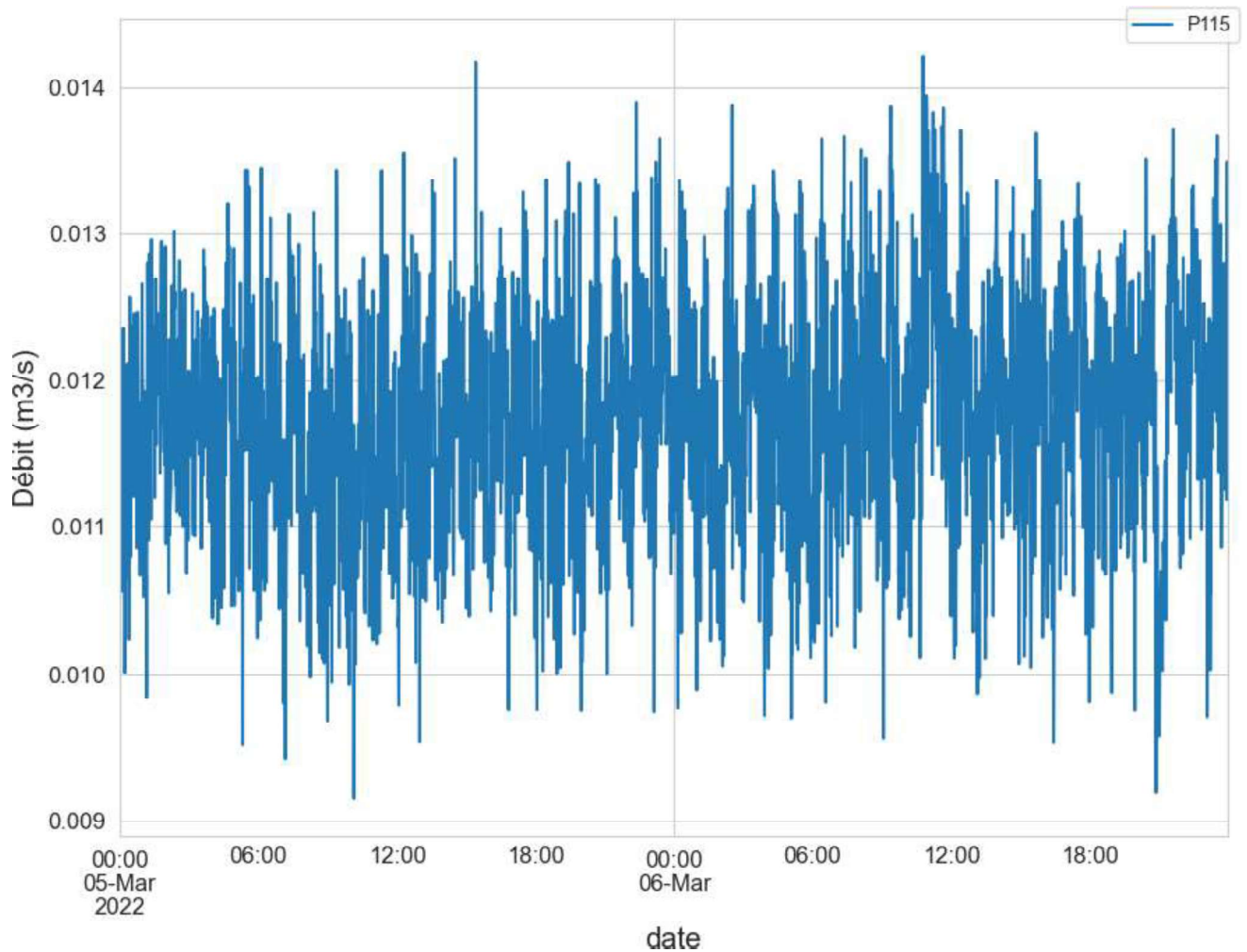


Figure 12 : Débit à P115 sur entre le 5 et 6 mars 2022 – débit moyen d'environ 12 l/s.

Par ailleurs, des apports journaliers ressemblant à des pompages, dont la fréquence journalière peut varier, sont régulièrement constatés comme le montre la Figure 13.

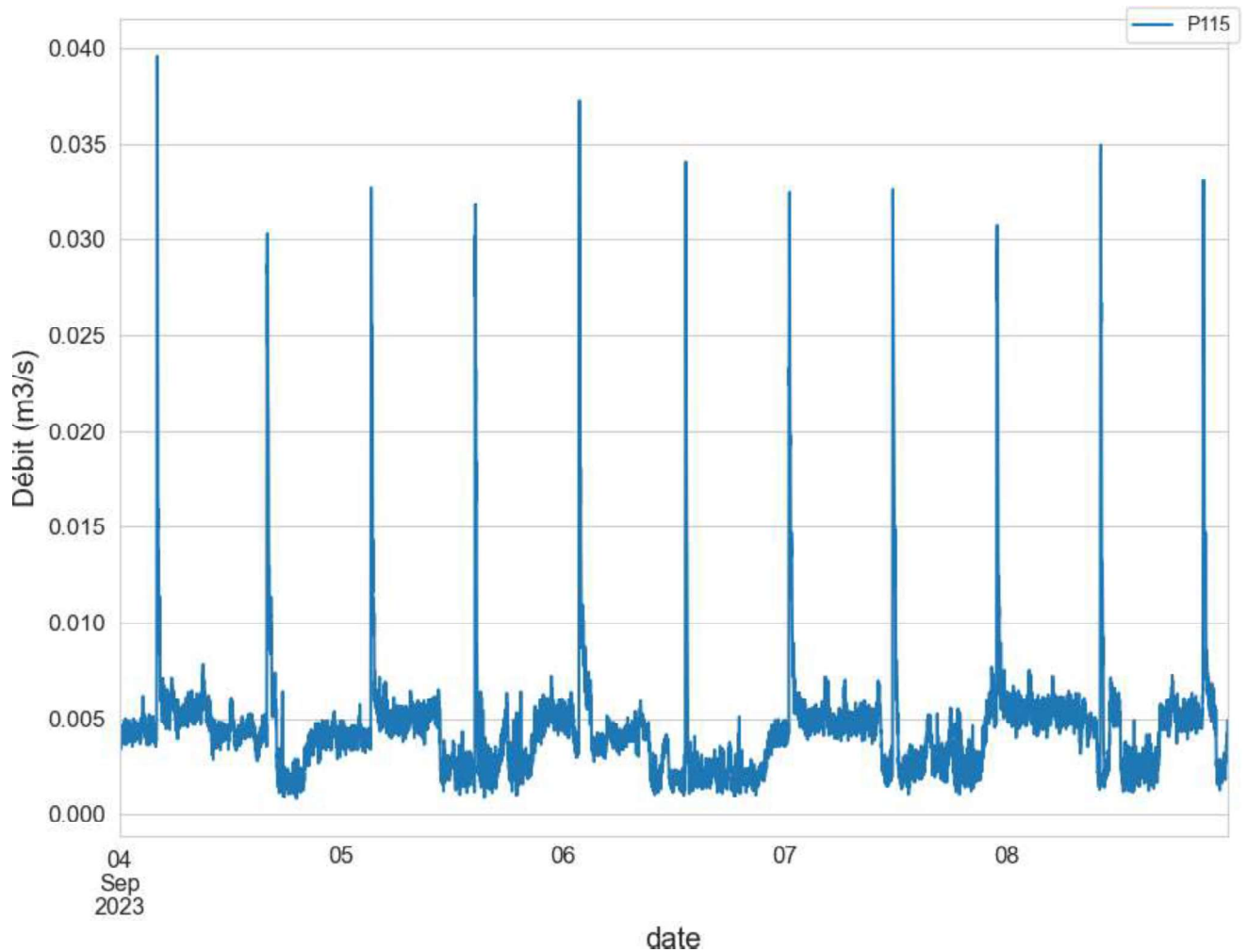


Figure 13 : exemple apport supplémentaire à P115.

Dans cet exemple, il est constaté 2 à 3 pics d'apports par jour.

La Figure 14 montre l'évolution du volume journalier sur la période d'étude.

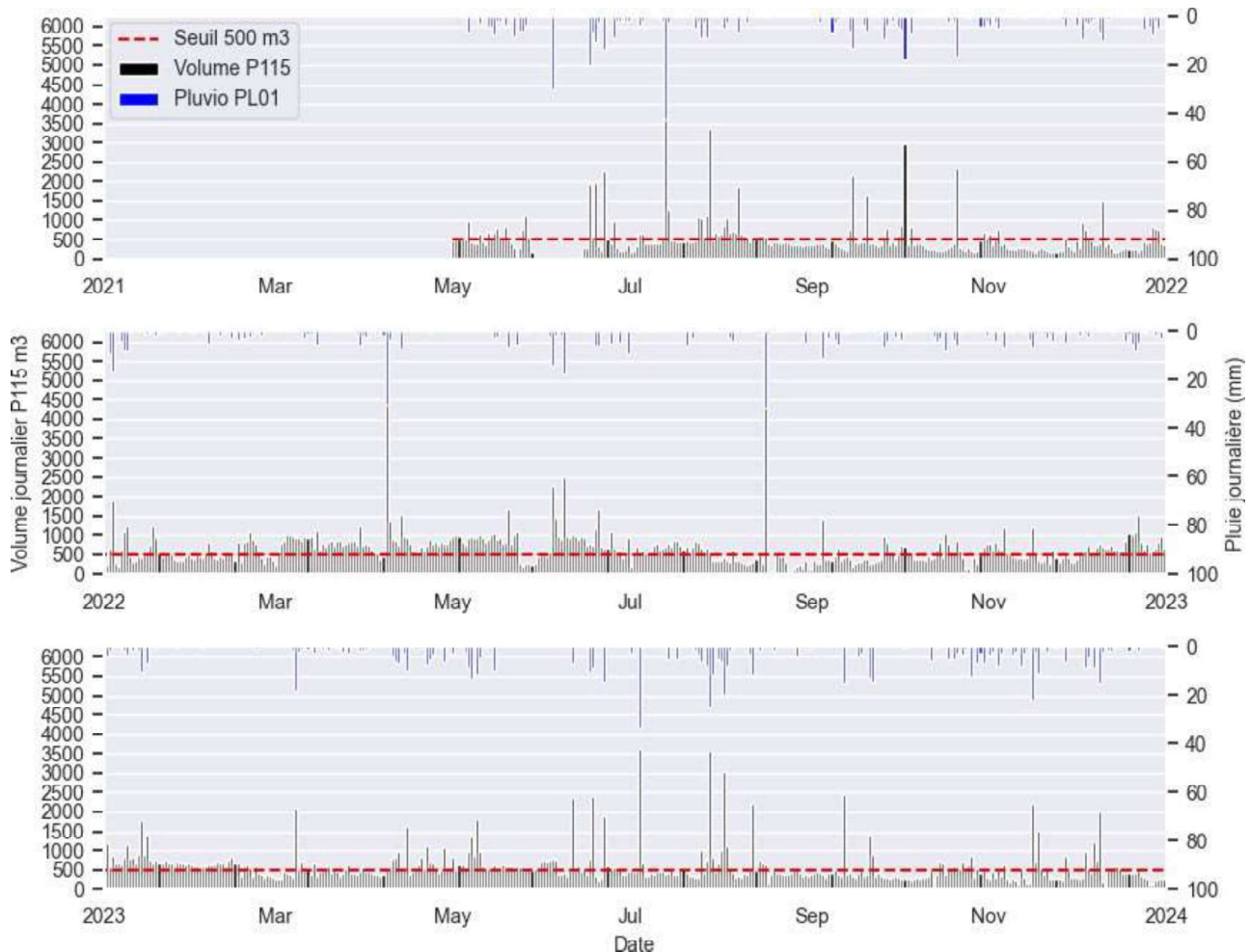


Figure 14 : volume journalier enregistré au regard P115.

Le volume journalier enregistré au regard P115 est théoriquement situé aux alentours de 500m³ par temps sec. Les augmentations de ce volume sont généralement bien corrélées avec l'occurrence des pluies. Cependant une augmentation du volume journalier « de temps sec » a été constatée sur les périodes de mars 2022 à août 2022 et de décembre 2022 à janvier 2023. Cette augmentation ne semble pas avoir une origine saisonnière.

4.2 Fonctionnement de la station de pompage

Pour rappel, les deux compartiments sont alimentés par alternance mensuelle, afin de respecter une période de repos. Le compartiment est alimenté est dit « prioritaire ».

La Figure 15 ci-dessous décrit le fonctionnement théorique de la station de pompage selon la hauteur d'eau dans la bache de pompage (extrait du rapport « Analyse fonctionnelle »⁴).

⁴ Rapport « Analyse fonctionnelle version I du 22/04/2021

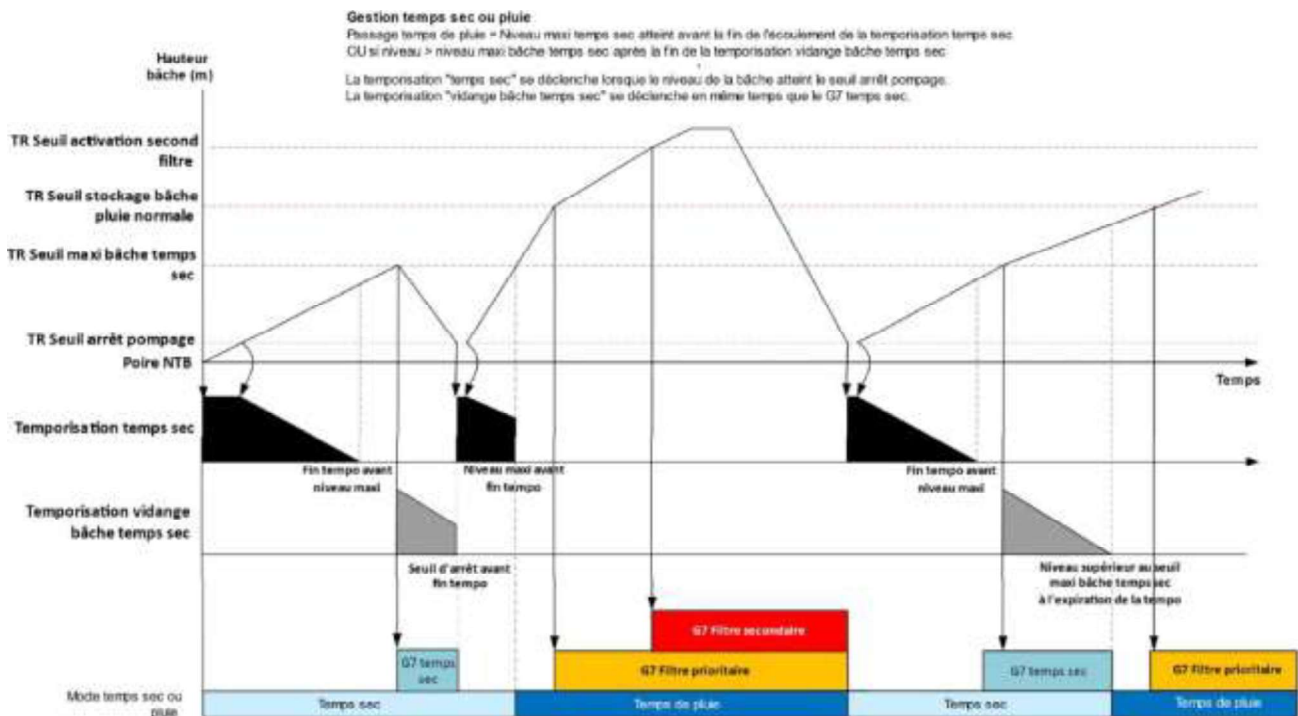


Figure 15 : fonctionnement théorique de la station de pompage.

Le fonctionnement de la station prévoit des modes différents de pompage pour gérer l'apport continu des eaux claires parasites par temps sec et l'apport supplémentaire d'eaux pluviales et ponctuellement d'eaux usées par temps de pluie.

Le déclenchement des différents modes de fonctionnement est basé sur différents seuils de hauteurs d'eau dans la bache et deux temporisations, l'une de remplissage et l'autre de vidange de la bache. Au total trois modes de fonctionnement ont été définis : le mode « temps sec », le mode « temps de pluie normale » et le mode « grande pluie » qui permet d'alimenter les deux compartiments du filtre en cas d'évènement pluvieux important.

4.2.1 Fonctionnement par temps sec

L'alimentation du compartiment prioritaire par temps sec se fait par bachee d'environ 50 m³, soit une dizaine de bachees par jour (500 m³).

Cela permet de ne pas solliciter l'ensemble du filtre et éviter un colmatage prématuré.

4.2.1.1 Fonctionnement théorique

Par temps sec, l'eau arrivant de manière continue dans le réseau P115 est stockée dans la bache jusqu'au seuil « **seuil maxi bache temps sec** » fixé à **28,60 mNGF**. Quand ce niveau est atteint, la pompe se déclenche et vidange la bache jusqu'au « **seuil arrêt de pompage** » situé à **27,95 mNGF**. Quand ce seuil est atteint, la pompe s'arrête et un nouveau cycle de remplissage / pompage est lancé. Il est à noter qu'au départ d'un nouveau cycle, une temporisation « **temporisation temps sec** » fixée à **150 min** est déclenchée. Tant que la durée de remplissage de la bache est supérieure à cette temporisation le mode temps sec reste activé. De la même manière, lorsque le seuil « **seuil maxi bache temps sec** » est atteint et déclenche la pompe, une seconde temporisation « **temporisation vidange bache temps sec** » fixée à **160 min** est déclenchée. Tant que la durée de vidange de la bache est inférieure à cette durée, le mode temps sec reste activé.

Lors de la phase de pompage, la pompe dédiée au compartiment prioritaire relève les eaux à 20 l/s (débit initialement programmé dans l'automatisme) vers celui-ci. Ce volume est ensuite vidangé en sortie de compartiment prioritaire à débit régulé (dépendant de la hauteur d'eau dans le filtre) vers la mare Saint-James. Il est à noter que la consigne de pompage a été modifiée en cours de d'étude et est

passée à 40 l/s pour pallier à un dysfonctionnement de passage inopiné en « mode temps de pluie » en l'absence de pluie.

4.2.1.2 Observations réelles

L'analyse des données des bâchées de temps sec dans les premiers mois de l'étude a montré que les variations du débit des eaux claires parasites, telles qu'observées au point P115 (cf. Figure 11, Figure 12 et Figure 14) se répercutent sur le fonctionnement de la station de pompage.

La temporisation « temporisation de temps sec » de 150 min est calé sur le débit théorique d'eaux claires à P115 (environ 5 l/s permettant de remplir la bâchée d'environ 50 m³ en 166 min). La temporisation « temporisation vidange bâche temps sec » fixée à 160 min, permet-elle, de vidanger environ 192 m³ maximum en 160 min sur la base d'un débit de pompage de 20 l/s.

Une augmentation du débit de temps sec trop importante entraine des passages inopinés en mode temps de pluie car la durée des temporisations « temporisation temps sec » et « temporisation vidange maxi temps sec » ne sont plus adaptés à ce nouveau débit. Au contraire, une diminution du débit de temps sec a un impact sur le fonctionnement en mode temps de pluie.

Les figures ci-après montrent des exemples de fonctionnement conformes au fonctionnement théorique et d'autres non conformes au fonctionnement théorique.

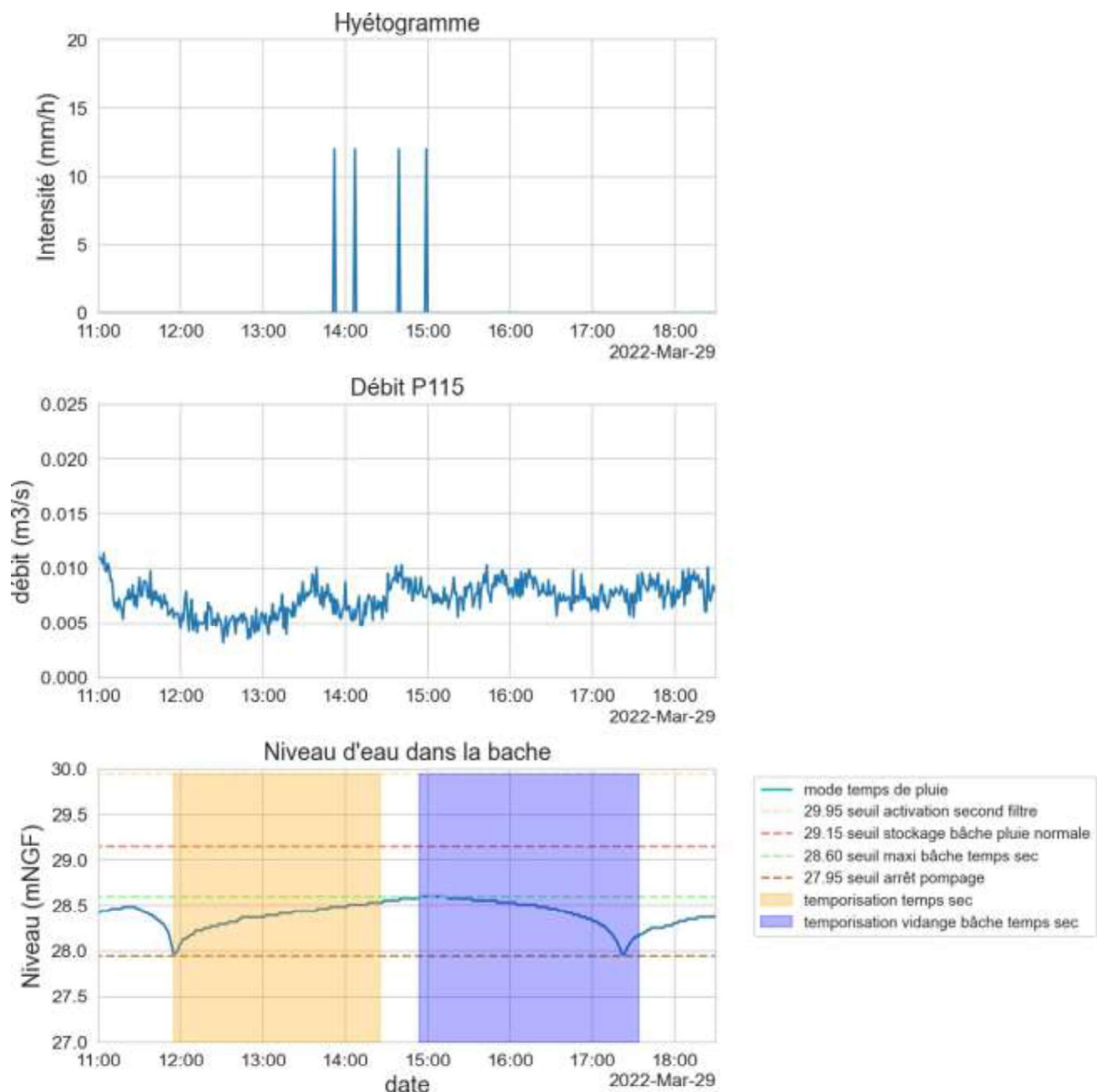


Figure 16 : exemple de fonctionnement conforme au fonctionnement théorique, avec des durées de temporisation adaptées au débit d'eaux claires à P115

Sur la Figure 16, les durées des temporisations « temporisation temps sec » et « temporisation vidange maxi temps sec » sont bien adaptées au débit de temps sec. En effet, ces durées sont proches des durées de remplissage et de vidange de la bache.

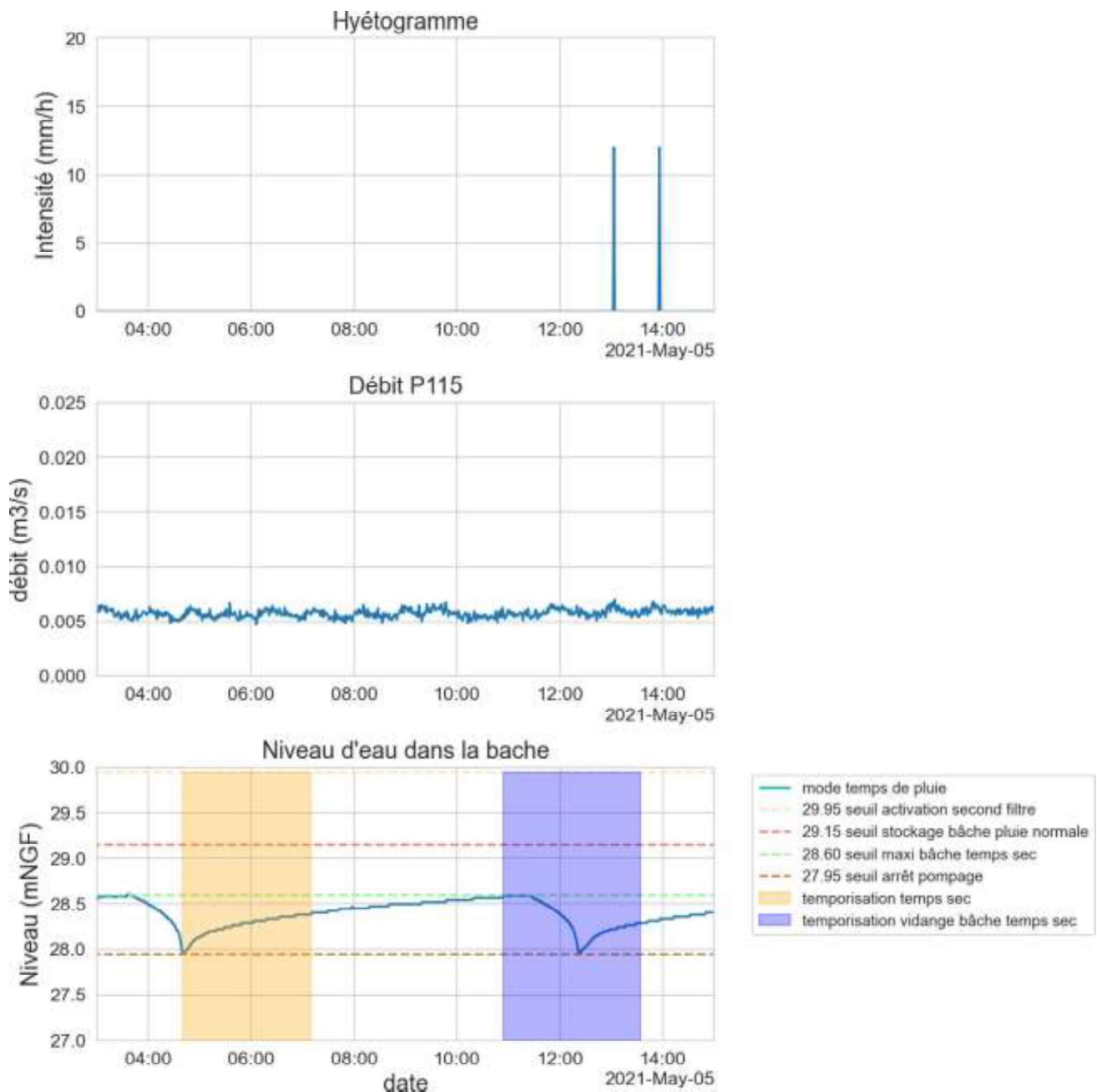


Figure 17 : exemple de fonctionnement conforme au fonctionnement théorique, avec des durées de temporisation non optimales.

Sur la Figure 17, la durée de la temporisation « temporisation temps sec » est très courte par rapport à la durée de remplissage d'une bache de temps sec et la temporisation « temporisation vidange maxi temps sec » est trop longue par rapport à la durée de vidange de la bache.

Cette situation est défavorable car susceptible de perturber le fonctionnement de la bache en temps de pluie comme détaillé au paragraphe 4.2.2.2.

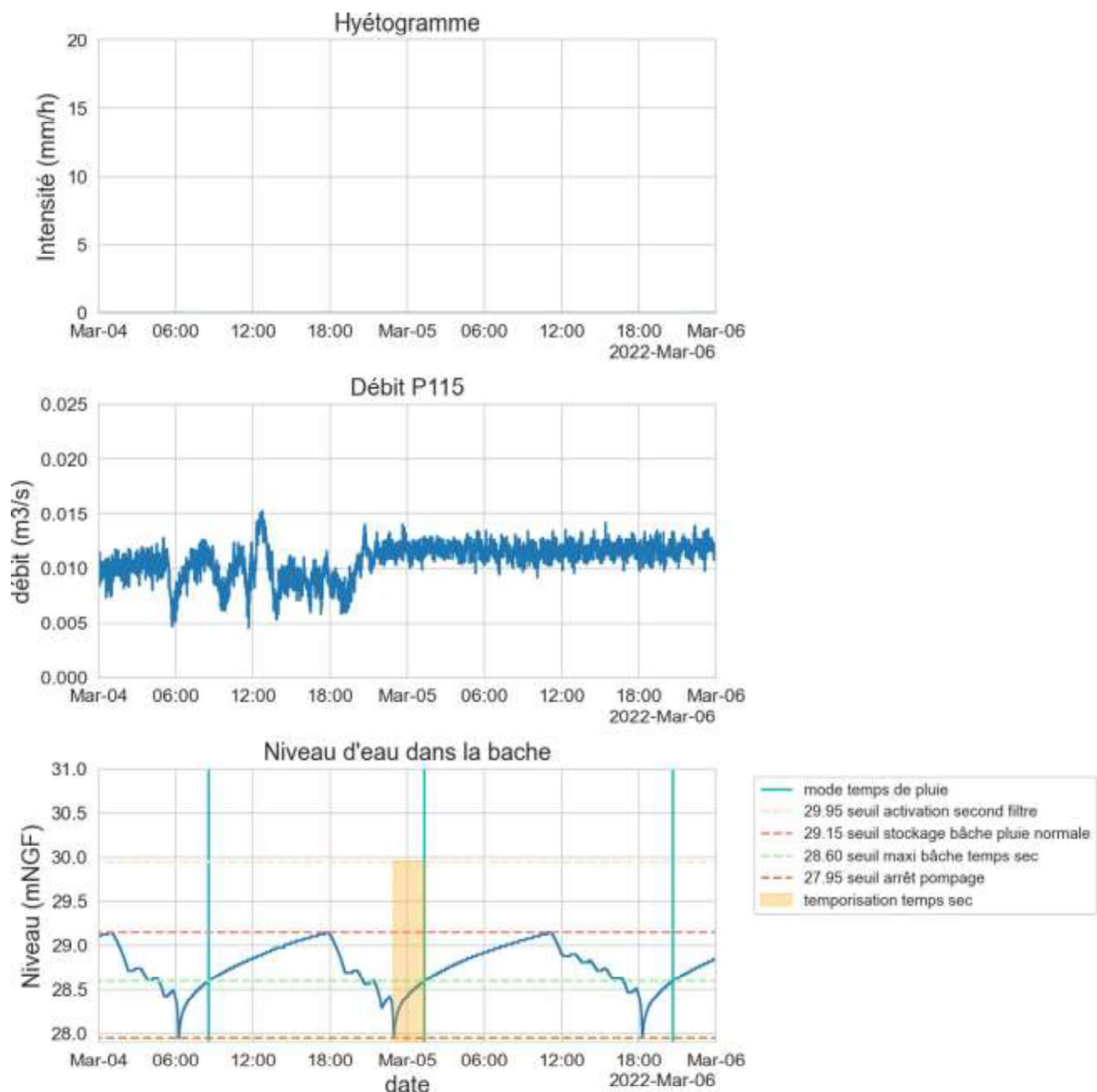


Figure 18 : exemple de dysfonctionnement lié à la temporisation "temporisation temps sec" trop longue.

La Figure 18 montre une série de bâchées qui fonctionnent en mode temps de pluie en l'absence de pluie et de pic de débit dans le réseau. Le mode temps de pluie a été activé car le seuil « seuil maxi bache temps sec » a été atteint avant la fin de la temporisation « temporisation temps sec ». Cela est dû à l'augmentation du débit dans le réseau qui a entraîné un remplissage plus rapide de la bache.

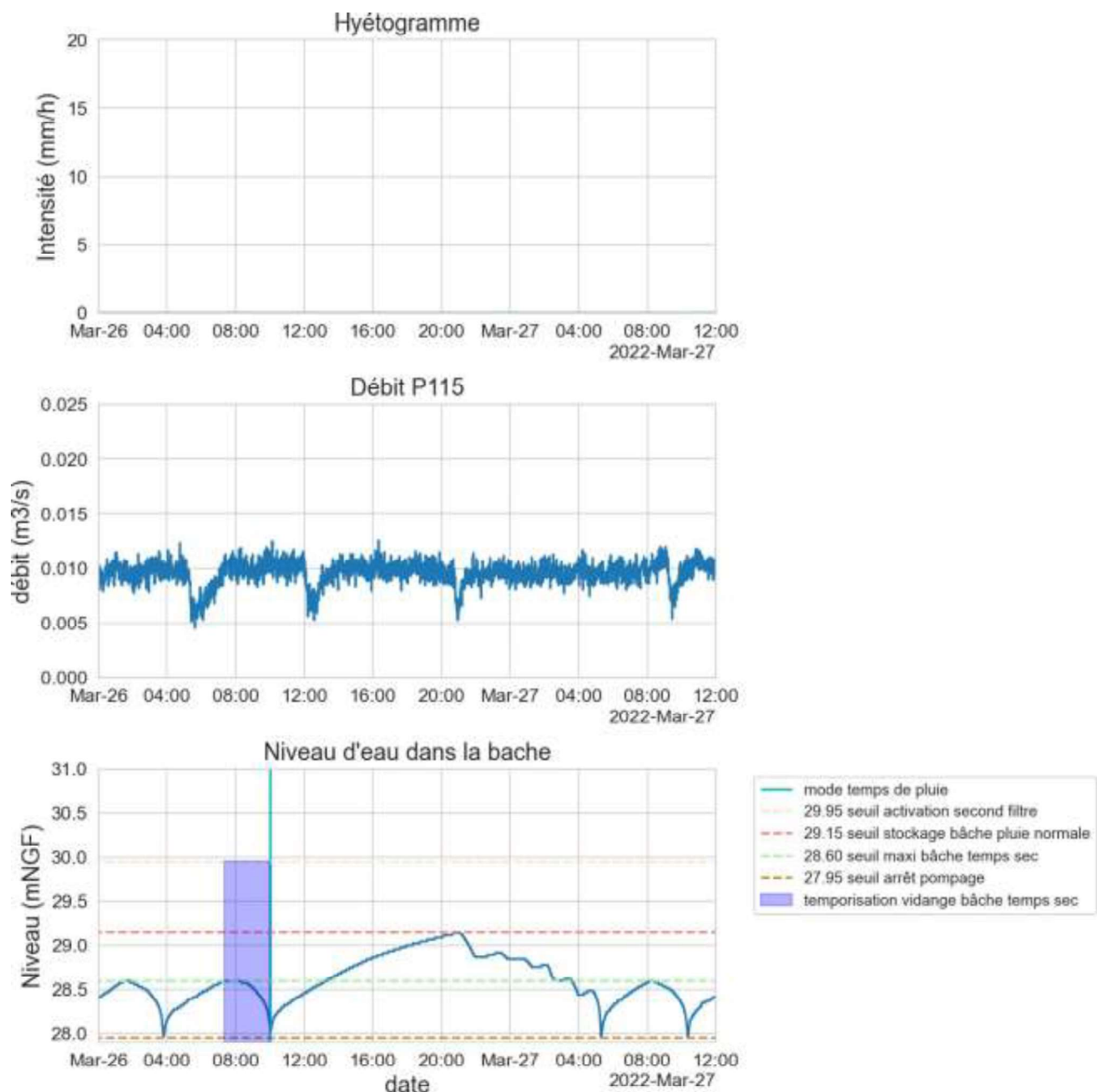


Figure 19 : exemple de dysfonctionnement lié à la temporisation "temporisation vidange bache temps sec" trop courte.

La Figure 19 montre un passage en mode temps de pluie suite à une vidange incomplète de la bache à l'issue de la temporisation « temporisation vidange bache temps sec ». Cela est dû également à l'augmentation du débit dans le réseau qui a entraîné une vidange plus lente de la bache.

Ces quatre exemples montrent que le passage du mode temps sec au mode temps de pluie est sensible aux variations de débit dans le réseau P115.

4.2.2 Fonctionnement par temps de pluie

L'alimentation du compartiment prioritaire par temps de pluie se déroule en deux phases :

- une phase de saturation du compartiment prioritaire du filtre ;
- une phase d'alimentation « de croisière » avec des cycles à 40l/s.

Dans cette première phase, la saturation se fait avec un débit théorique de 80 l/s jusqu'à obtention d'un flaquage de l'ordre de 5 cm en surface du compartiment autorisant une meilleure distribution de l'eau.

La durée de saturation du compartiment est estimée à moins de 50 min sur la base d'un débit de saturation de 80 l/s et d'un débit de fuite de 20 l/s.

Une fois le compartiment saturé, la seconde phase d'alimentation de croisière par temps de pluie se fait par alternances « 40 l/s, 0 l/s » entre les niveaux hauts et bas de flaquage. (variation de 5 cm correspondant à un volume de 30 m³) jusqu'à la vidange complète de la bache.

Afin de limiter les durées de saturation du compartiment prioritaire et sa charge hydraulique moyenne, quand le volume de stockage dans la station atteint 1000 m³, le second compartiment est alimenté. On notera qu'il est, de manière générale recommandé, pour un filtre planté, une hauteur annuelle maximum de sollicitation de 50-60 m. Pour le système étudié, du fait de l'apport continu des eaux claires parasites, il est attendu environ 145 m/an.

4.2.2.1 Fonctionnement théorique par temps de pluie

Lors d'un événement pluvieux, le débit dans le réseau P115 augmente. Le fonctionnement passe du mode temps sec au mode temps de pluie. Ce changement de mode intervient si l'une des trois conditions suivantes est rencontrée :

- le seuil « seuil maxi bache temps sec », 28,60 mNGF est atteint avant la fin de la temporisation « temporisation temps sec » ;
- la bache n'est pas vidangée à la fin de la temporisation « temporisation vidange bache temps sec » ;
- le seuil « seuil stockage bache pluie normale », 29,45 mNGF est atteint avant la fin de la temporisation « temporisation vidange bache temps sec ».

Lorsque le mode temps de pluie est activé :

- si la bache est en phase de remplissage, le pompage se déclenche uniquement lorsque le seuil « seuil stockage bache pluie normale » fixée initialement à 29,45 mNGF est atteint ;
- si la bache est en phase de vidange, la pompe s'arrête à la fin de la temporisation « temporisation vidange bache temps sec ». Le pompage reprend lorsque le seuil « seuil stockage bache pluie normale » est atteint ;
- si le seuil « seuil stockage bache pluie normale » est atteint avant la fin de la temporisation « temporisation vidange bache temps sec », le débit de pompage est augmenté par la mise en route d'une seconde pompe ;
- enfin si le seuil « seuil activation second filtre », 29,95 mNGF est atteint, le pompage vers le filtre non prioritaire est déclenché.

La Figure 20 décrit le fonctionnement de la vidange de la bache (phase de flaquage dans les compartiments) en fonction de la hauteur d'eau dans le compartiment prioritaire (extrait du rapport « Note de fonctionnement pompage »⁵).

⁵ Rapport « Note de fonctionnement pompage » version E du 04/07/2019

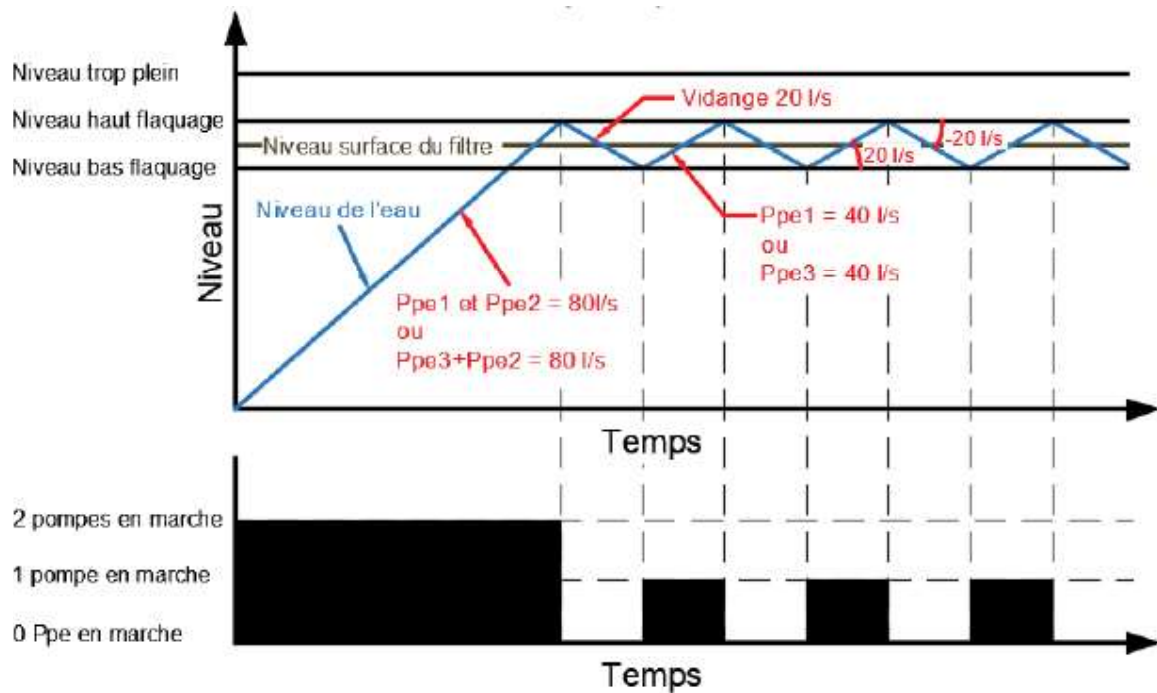


Figure 20 : schéma de principe du flaquage du compartiment prioritaire en temps de pluie normale.

Lorsque le seuil « **seuil stockage bache pluie normale** » est atteint, la pompe dédiée au compartiment prioritaire et la pompe commune aux deux compartiments se déclenchent et pompent à 80 l/s jusqu'au seuil « **niveau haut de flaquage** », les deux pompes s'arrêtent alors et le compartiment se vidange à un débit régulé autour de 20 l/s jusqu'au seuil « **niveau bas de flaquage** ». La pompe dédiée au compartiment prioritaire redémarre alors et pompe à 40 l/s jusqu'au seuil « **niveau haut de flaquage** ». Ce cycle de remplissage / vidange se répète jusqu'à la vidange complète de la bache.

Lorsque le seuil « **seuil arrêt de pompage** » est atteint, le mode temps de pluie est désactivé et le fonctionnement repasse en mode temps sec.

4.2.2.2 Observations réelles par temps de pluie

L'analyse des données des bachees de temps de pluie a permis de retrouver les trois types de déclenchement possibles (voir paragraphe 4.2.2.1) du mode temps de pluie :

- le type dit « **normal** » : déclenchement lorsque le seuil « **seuil maxi bache temps sec** » (28,60 mNGF) est atteint avant la fin de la temporisation « **temporisation temps sec** » ;
- le type dit « **dégradé tempo** » : déclenchement, à la fin de la temporisation « **temporisation vidange bache temps sec** », alors que le pompage en mode temps sec est actif mais est incapable de vidanger la bache avant la fin de cette temporisation ;
- le type dit « **dégradé seuil** » : déclenchement, lorsque le seuil « **seuil stockage bache pluie normale** » (29,45 mNGF) est atteint, alors que le pompage en mode temps sec est actif et que la fin de la temporisation « **temporisation vidange bache temps sec** » n'est pas atteint.

Le terme « **dégradé** » est utilisé car dans ces types de fonctionnement, le pompage en mode temps sec est lancé avec pour conséquence l'envoi d'un volume d'eau d'origine pluviale vers le filtre alors que le mode temps sec est toujours actif. De fait, ce volume d'eau pluviale ne sera pas pris en compte dans les analyses de qualité de l'eau car les prélèvements d'eau par temps de pluie ne se font que lorsque le mode temps de pluie est actif.

Dans le premier type de fonctionnement, la totalité du volume d'eau pluviale est concernée par les prélèvements d'eau par temps de pluie. Ce type de fonctionnement est qualifié de « **normal** ».

L'étude de ces trois types d'évènements a permis de montrer que les durées des temporisations « **temporisation temps sec** » et « **temporisation vidange bache temps sec** » ont une influence sur la

qualification du type d'évènement (« normal » ou « dégradé ») mais aussi sur le volume d'eau pluviale pompé en mode temps sec ».

Les figures suivantes montrent un exemple de chaque type de fonctionnement.

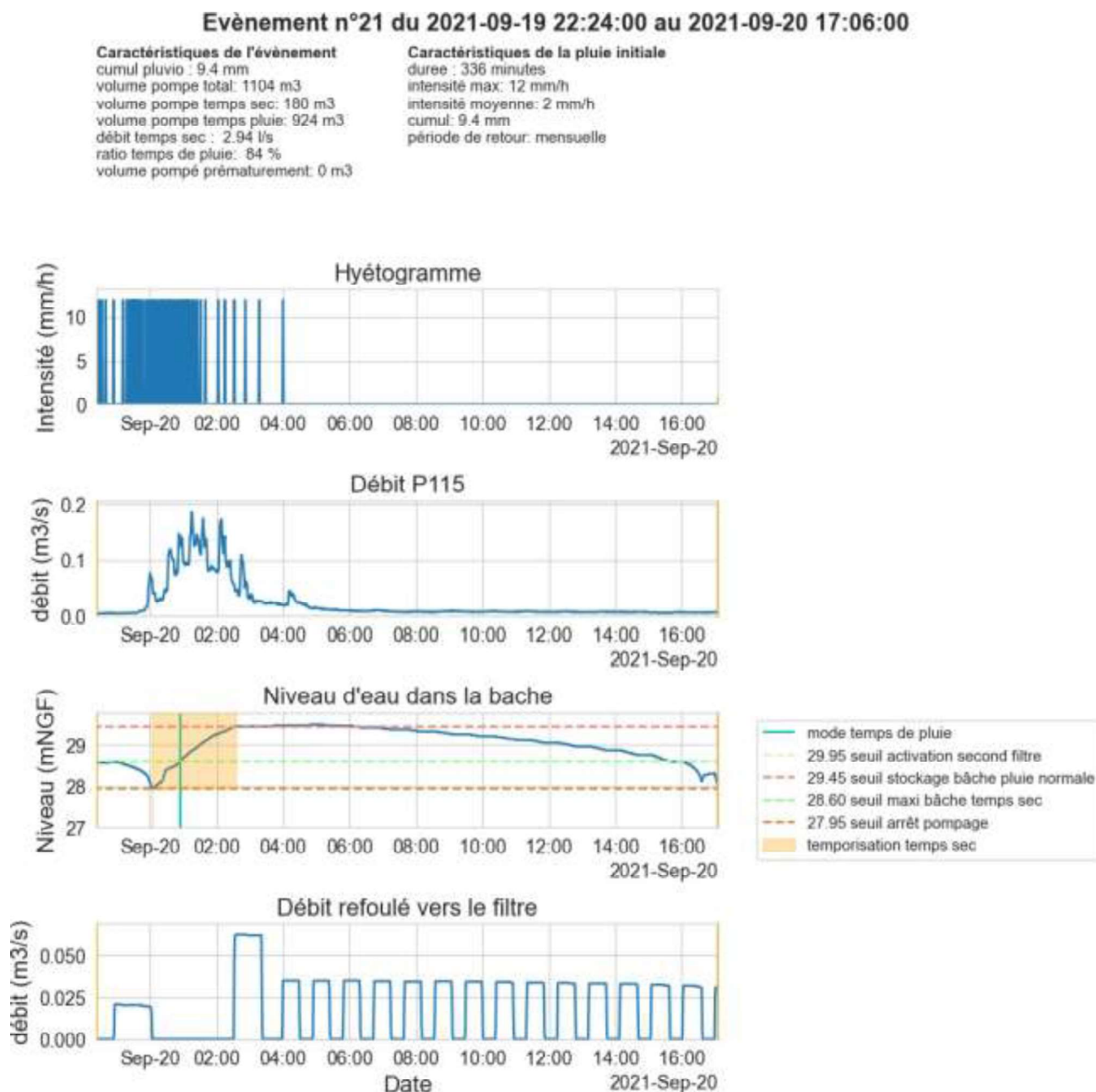


Figure 21 : exemple de fonctionnement de type "normal".

La Figure 3 montre le fonctionnement attendu du temps de pluie. Le débit de temps de pluie arrive lors d'un cycle de remplissage et le fonctionnement passe en mode temps de pluie quand le seuil « seuil stockage bache pluie normale » est atteint avant la fin de la temporisation « temporisation temps sec ». L'ensemble du volume de temps de pluie est stocké dans la bache et le pompage commence quand la hauteur atteint le seuil « seuil stockage bache pluie normale ».

Evènement n°1 du 2021-05-13 00:04:00 au 2021-05-15 09:31:00

Caractéristiques de l'évènement
 cumul pluvio : 9.0 mm
 volume pompe total: 957 m3
 volume pompe temps sec: 576 m3
 volume pompe temps pluie: 381 m3
 débit temps sec : 2.78 l/s
 ratio temps de pluie: 40 %
 volume pompé prématurément: 218 m3

Caractéristiques de la pluie initiale
 durée : 160 minutes
 intensité max: 12 mm/h
 intensité moyenne: 2 mm/h
 cumul: 4.2 mm
 période de retour: bi-mensuelle

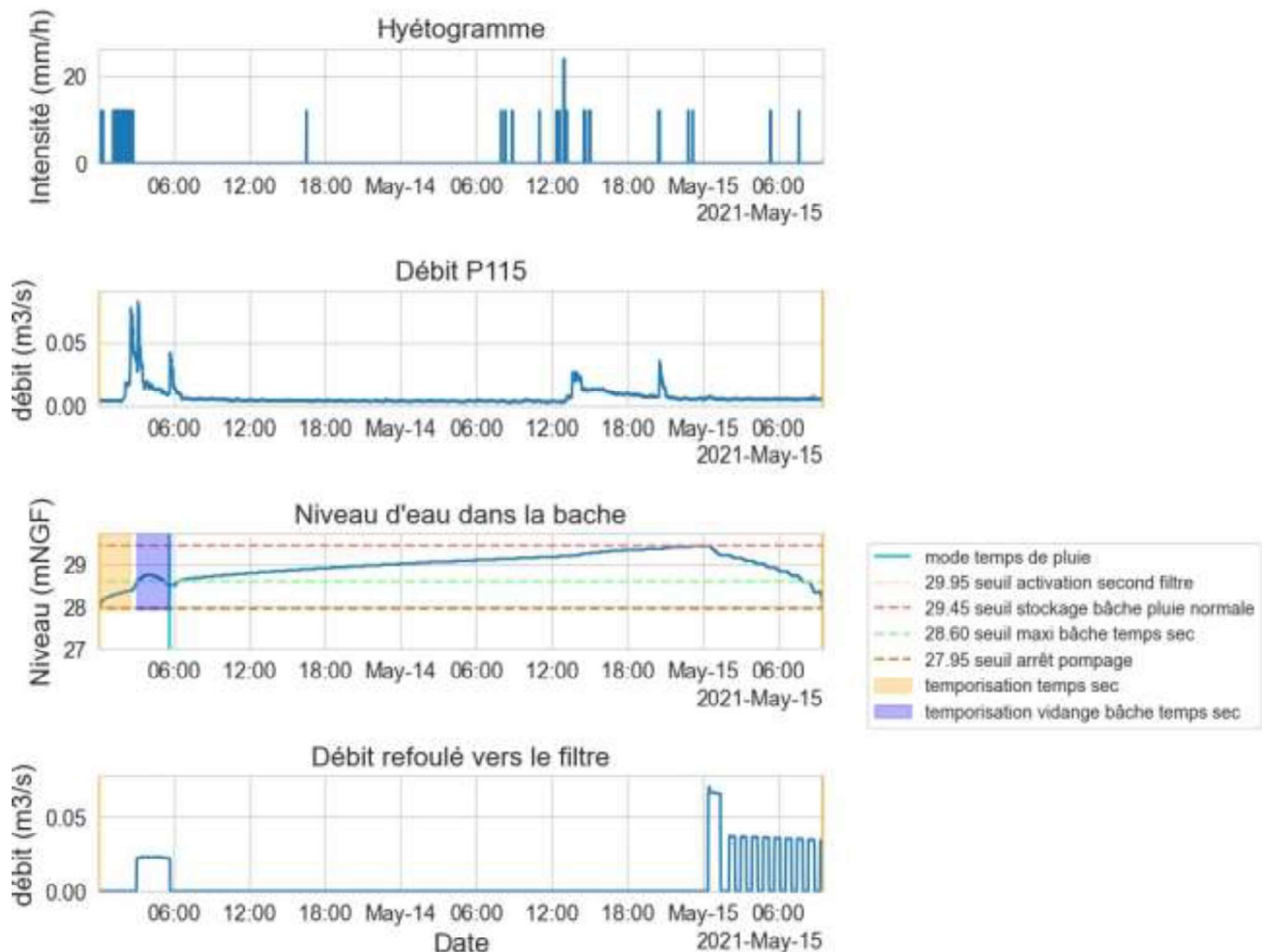


Figure 22 :exemple de fonctionnement de type "dégradé tempo".

Dans cet exemple, un événement pluvieux se produit alors que la bache a commencé à se remplir en mode temps sec. La vitesse de remplissage augmente bien sous l'effet de la pluie, cependant la temporisation « temporisation temps sec » est terminée, le « mode temps de pluie » ne se déclenche donc pas. La bache continue de se remplir jusqu'à atteindre le seuil « seuil maxi bache temps sec », alors la bache commence à se vider en mode temps sec. Cependant, l'eau envoyée vers le filtre est un mélange de temps sec et de temps de pluie. Comme la vidange ne peut se faire avant la fin de la temporisation (du fait de l'apport d'eau pluviale), le mode temps de pluie va se déclencher à la fin de la temporisation « temporisation vidange bache temps sec ». La vidange s'arrête alors et la bache recommence à se remplir jusqu'à atteindre le seuil « seuil stockage bache temps de pluie ». Cependant, comme une partie de l'eau de la pluie a été envoyée vers le filtre en mode temps sec, l'eau envoyée vers le filtre en mode temps de pluie contiendra une part plus importante de temps sec (l'évènement pluvieux s'étant arrêté avant le déclenchement du mode temps de pluie).

Dans ce mode de fonctionnement une partie de la pluie (volume pompé entre le moment où le niveau franchit le seuil « seuil maxi bâche temps sec » et le passage en mode de temps de pluie) est envoyée vers le filtre en mode temps sec avec trois impacts :

- le délai de remplissage de la bâche jusqu'au seuil « seuil stockage bâche pluie normale » est augmenté;
- une part plus importante d'eau de temps sec en mode temps de pluie sera envoyée vers le filtre ;
- le volume principalement de temps de pluie vidangé prématurément (en mode temps sec) ne sera pas pris en compte dans les prélèvements d'eaux à analyser.

Ce type de fonctionnement est dû à une durée de temporisation « temporisation temps sec » trop courte (150 min) par rapport à la durée de remplissage de la bâche. Plus cet écart est grand et plus la probabilité qu'un événement de temps de pluie apparaisse dans ce laps de temps est grande. Cet événement de temps de pluie ne sera pas pris en compte dès son apparition mais seulement à la fin de la temporisation « temporisation vidange bâche temps sec ».

Il est à noter que ce type d'évènement peut se produire également lors d'une phase de vidange.

Evènement n°36 du 2022-01-03 14:35:00 au 2022-01-04 20:23:00

Caractéristiques de l'évènement

cumul pluie : 26.2 mm
 volume pompe total: 2830 m3
 volume pompe temps sec: 323 m3
 volume pompe temps pluie: 2506 m3
 débit temps sec : 2.92 l/s
 ratio temps de pluie: 89 %
 volume pompé prématurément: 97 m3

Caractéristiques de la pluie initiale

durée : 232 minutes
 intensité max: 12 mm/h
 intensité moyenne: 2 mm/h
 cumul: 7.6 mm
 période de retour: mensuelle

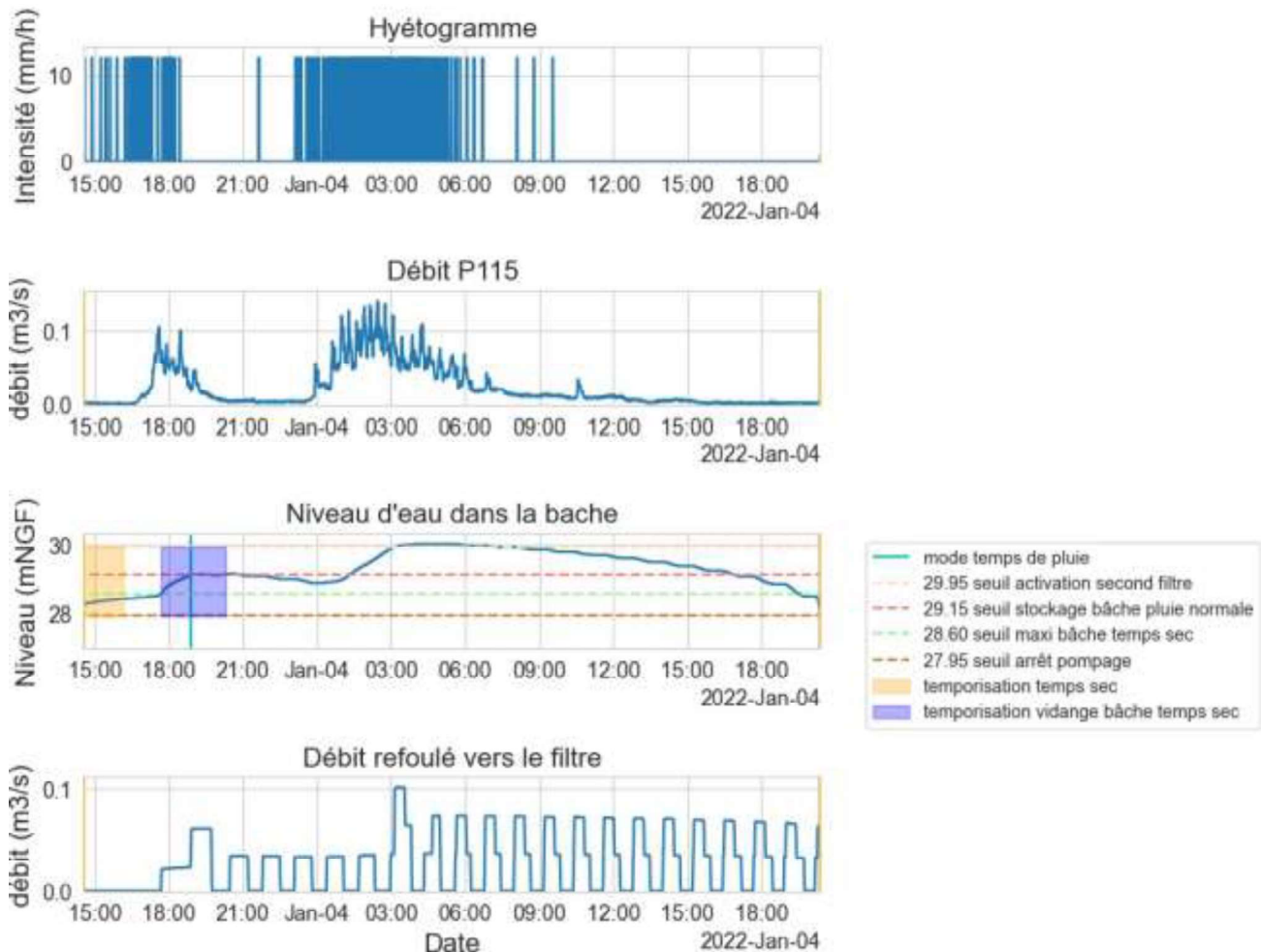


Figure 23 : exemple de fonctionnement de type "dégradé seuil".

Dans cet exemple, un évènement pluvieux apparaît alors que le seuil « seuil maxi bache temps sec » n'est pas encore atteint mais après la fin de la temporisation « temporisation temps sec ». Ainsi malgré l'augmentation du débit lié à la pluie, le filtre est alimenté en mode temps sec lorsque le niveau atteint le seuil « seuil maxi bache temps sec ». Cependant suite, à l'arrivée de la pluie, le débit de vidange n'est pas suffisant et le niveau continu à augmenter dans la bache jusqu'à atteindre le seuil « seuil stockage bache pluie normale » et déclencher le mode temps de pluie.

La seconde pompe se met alors en route au moment du passage en mode temps de pluie afin de saturer le filtre.

Dans ce mode de fonctionnement une partie de la pluie (volume pompé entre le moment où le niveau franchit le seuil « seuil maxi bache temps sec » et le passage en mode de temps de pluie) est vidangée prématurément en mode temps sec avec deux impacts :

- le délai de remplissage de la bache jusqu'au seuil « seuil stockage bache pluie normale » est augmenté;

- le volume principalement de temps de pluie vidangé prématurément ne sera pas pris en compte dans les prélèvements d'eaux à analyser.

Ce type de fonctionnement est, comme pour le type « dégradé tempo », dû à une durée de temporisation « temporisation temps sec » trop courte (150 min) par rapport à la durée de remplissage de la bache. Plus cet écart est grand et plus la probabilité qu'un événement de temps de pluie apparaisse dans ce laps de temps est grande. Cet événement de temps de pluie ne sera pas pris en compte dès son apparition mais quand le niveau dans la bache atteint le seuil « seuil stockage bache pluie normale ».

Il est à noter que ce type d'évènement peut se produire également lors d'une phase de vidange.

4.2.3 Optimisations apportées en cours d'étude

En cours d'étude, des réglages dans l'automatisme ont été nécessaires soit afin de pallier des dysfonctionnements constatés lors de l'analyse des données, soit afin d'optimiser le fonctionnement du système. Ainsi, les réglages suivants ont été apportés :

- réduction de la temporisation « temporisation vidange bache temps sec » de 150 min initialement à 130 min car des passages inopinés en mode temps de pluie ont été constatés par temps sec (absence de pluie et d'augmentation du débit dans le réseau) ;
- augmentation du débit de pompage en mode temps sec. De 20 l/s initialement à 40 l/s car la bache n'arrivait pas à se vidanger avant la fin de la temporisation « temporisation vidange bache temps sec » ce qui entraînait des passages en mode temps de pluie par temps sec ;
- modification du seuil « seuil stockage bache pluie normale », de 500 m³ initialement, à 300 m³ car le volume généré par les pluies courantes ne permettait pas d'atteindre ce volume de 500m³. La bache finissait de se remplir avec de l'eau claire parasite.

4.3 Filtre planté

4.3.1 Fonctionnement par temps sec

La Figure 24 montre le comportement des compartiments du filtre lors des périodes de pompage par temps sec.

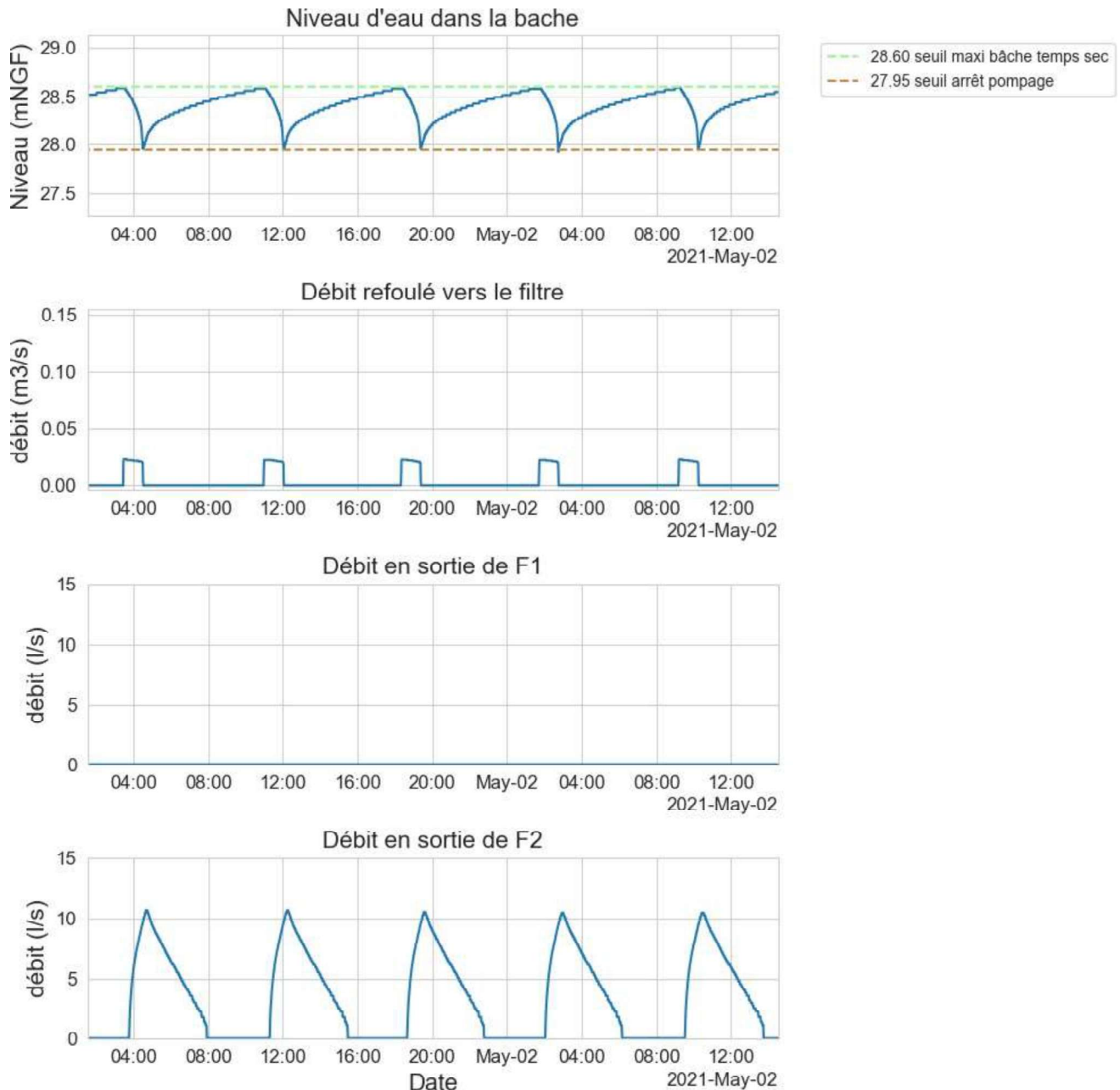


Figure 24 : exemple de fonctionnement du filtre pour des bâchées de temps sec.

Cet exemple montre un fonctionnement des compartiments conforme au fonctionnement attendu à savoir l'eau pompée vers le compartiment F2 prioritaire est totalement vidangée pour chaque bâchée de temps sec en sortie de ce compartiment.

La Figure 25 montre un exemple de dysfonctionnement.

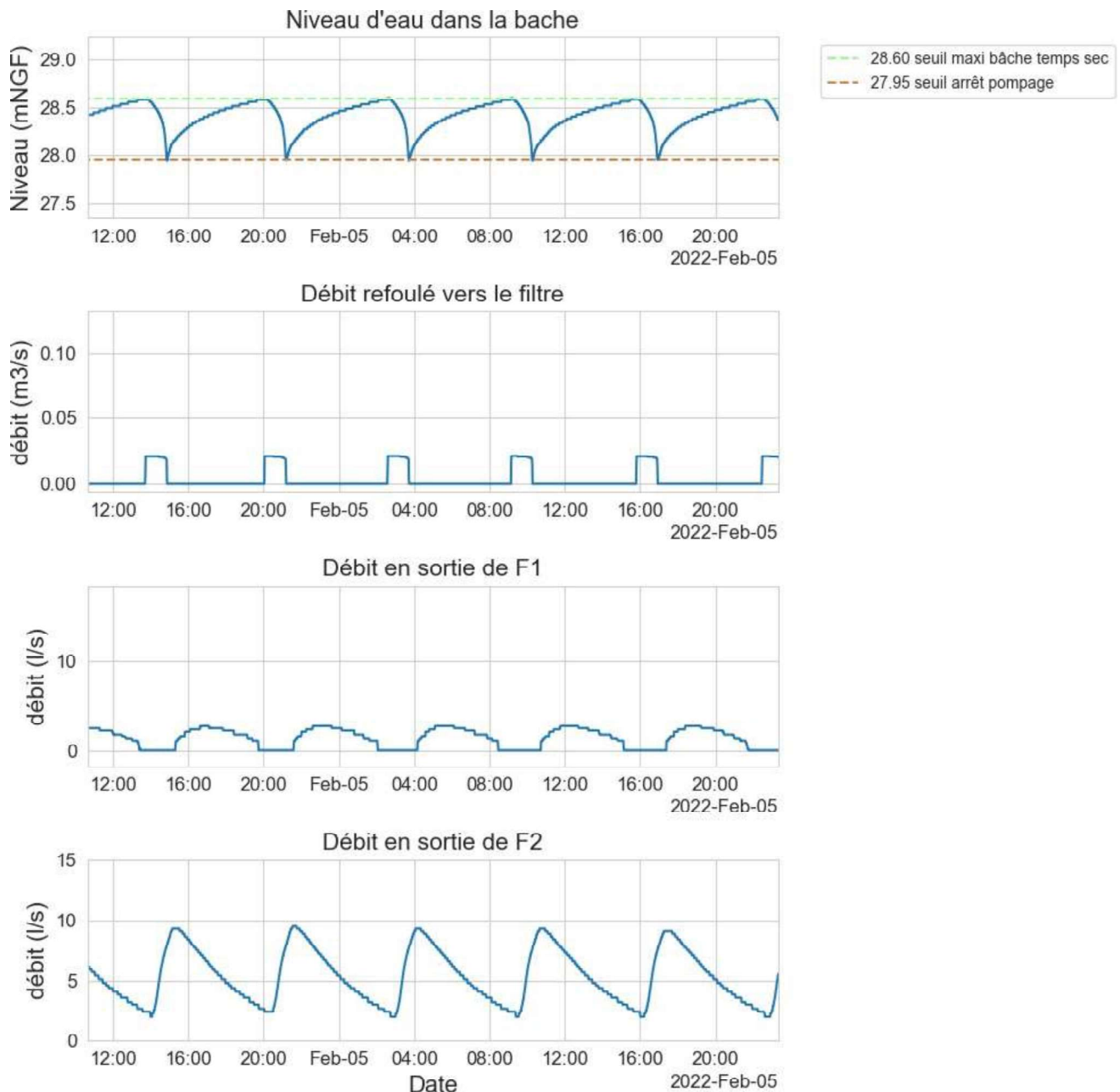


Figure 25 : exemple de dysfonctionnement du filtre pour des bâchées de temps sec.

En cours d'étude, des échanges d'eau ont été constatés entre les deux compartiments. Dans cet exemple, une partie de l'eau pompée vers le compartiment F2 prioritaire se retrouve en sortie du compartiment F1 pour chacune des bâchées de temps sec.

Il est constaté également qu'en sortie du compartiment prioritaire F2, de l'eau coule en permanence car la vidange n'a pas le temps de se faire entre deux bâchées.

4.3.2 Fonctionnement par temps de pluie

Les Figure 26 et Figure 27 montrent le fonctionnement du filtre par temps de pluie respectivement en mode pluie normale et en mode grande pluie conforme au fonctionnement attendu par temps de pluie.

Evènement n°85 du 2022-06-27 08:27:00 au 2022-06-28 05:29:00
Informations liées à l'évènement

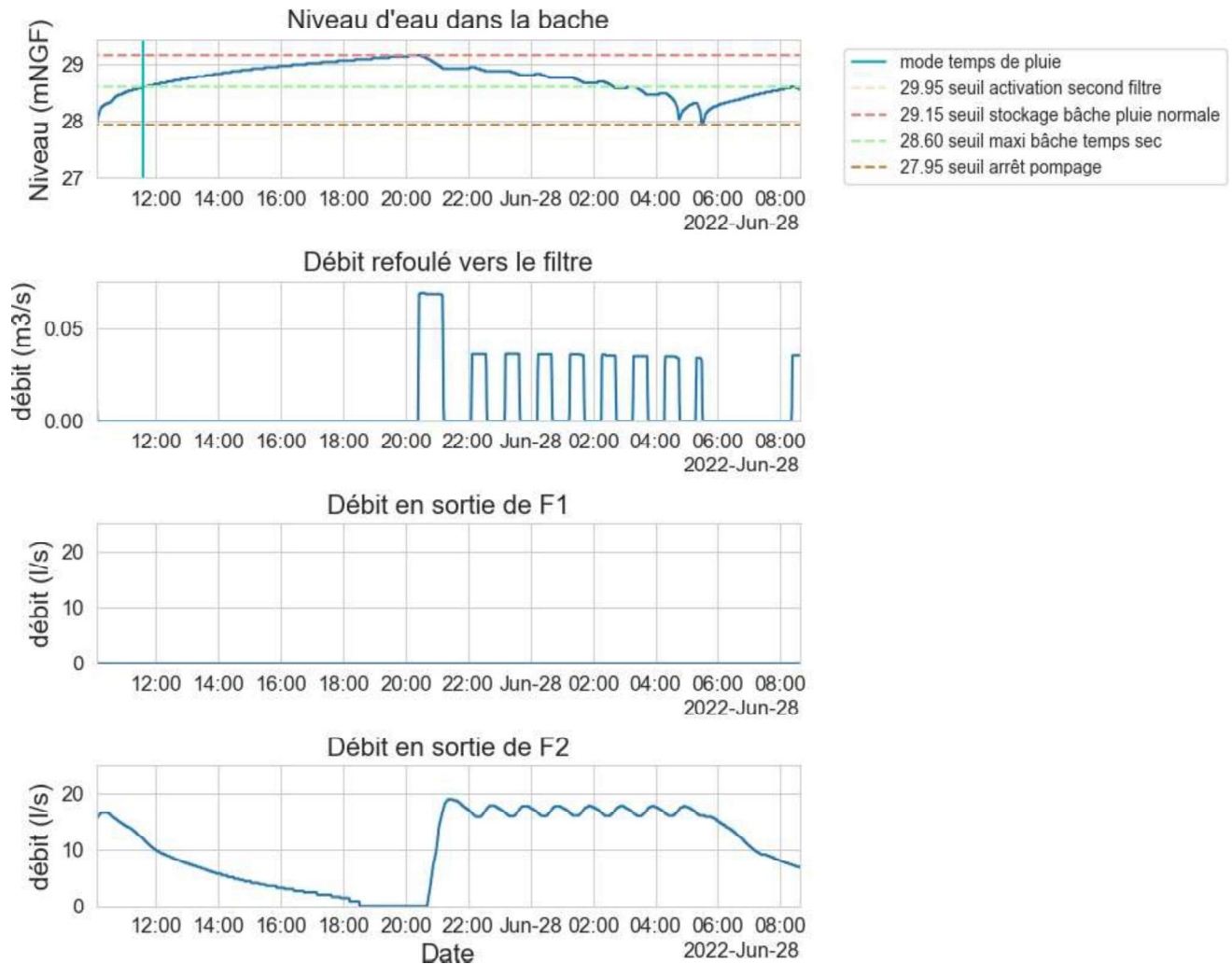
 filtre prioritaire: F2
 mode de pluie : normale
 volume pompe total: 629 m3
 volume sortie total: 654 m3


Figure 26 : exemple de fonctionnement du filtre en mode pluie normale.

Dans cet exemple, le volume stocké est pompé vers le compartiment F2 prioritaire. Le filtre se sature puis flaque jusqu'à la vidange complète de la bache de temps de pluie. L'intégralité de l'eau pompée se retrouve en sortie du compartiment F2.

Evènement n°89 du 2022-08-16 15:49:00 au 2022-08-17 11:47:00
Informations liées à l'évènement

filtre prioritaire: F1
 mode de pluie : grande pluie
 volume pompe total: 2575 m³
 volume sortie total: 2518 m³

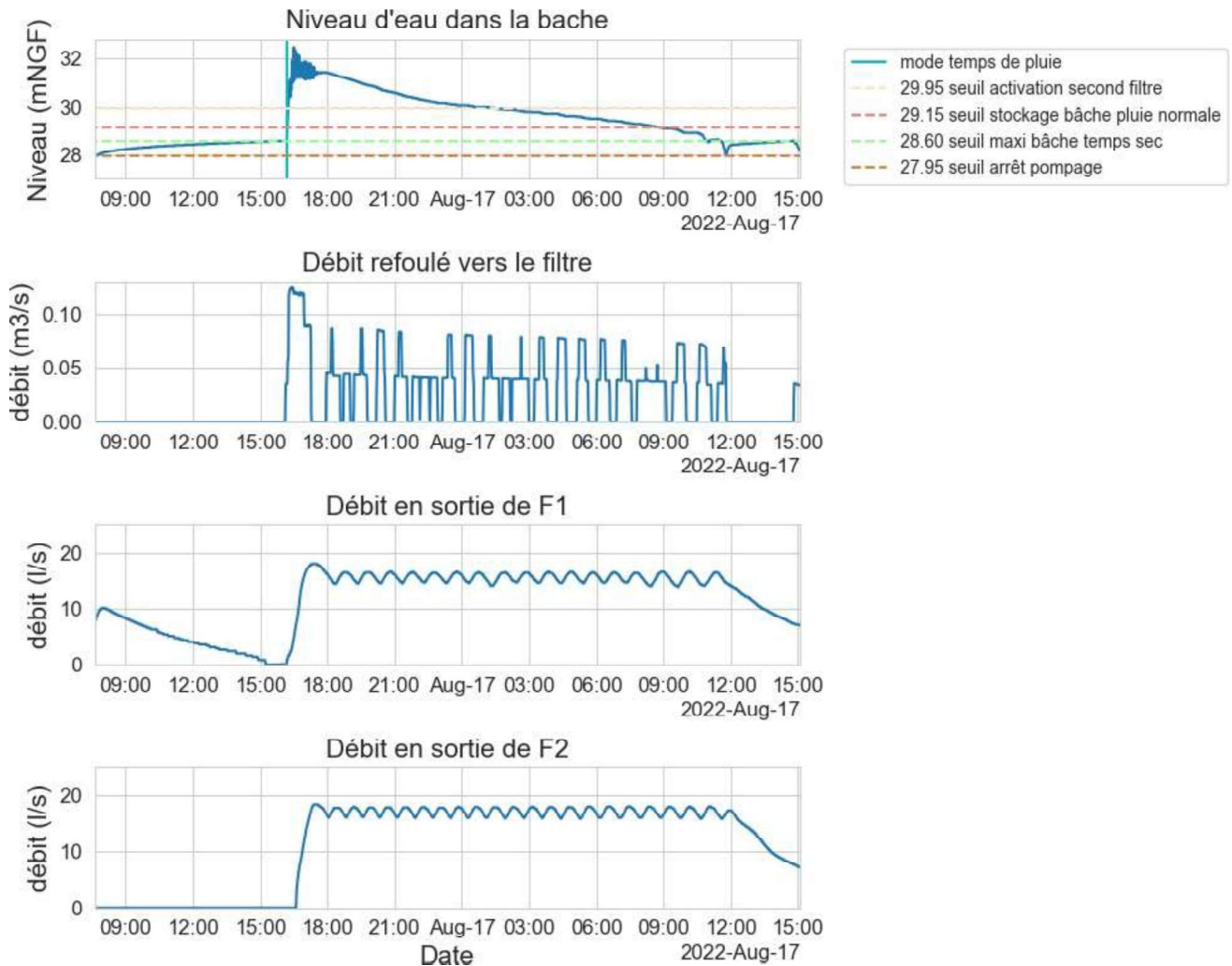


Figure 27 : exemple de fonctionnement du filtre en mode grande de pluie.

Dans cet exemple, les deux compartiments sont sollicités car le seuil « seuil activation du second filtre » a été atteint. Les deux compartiments seaturent puis flaquent jusqu'à la vidange complète de la bache de temps de pluie.

La Figure 28 présente un exemple de dysfonctionnement en mode de pluie normale.

Evènement n°37 du 2022-01-07 18:03:00 au 2022-01-10 13:13:00

Informations liées à l'évènement

filtre prioritaire: F1
 mode de pluie : normale
 volume pompe total: 2963 m³
 volume sortie total: 3211 m³

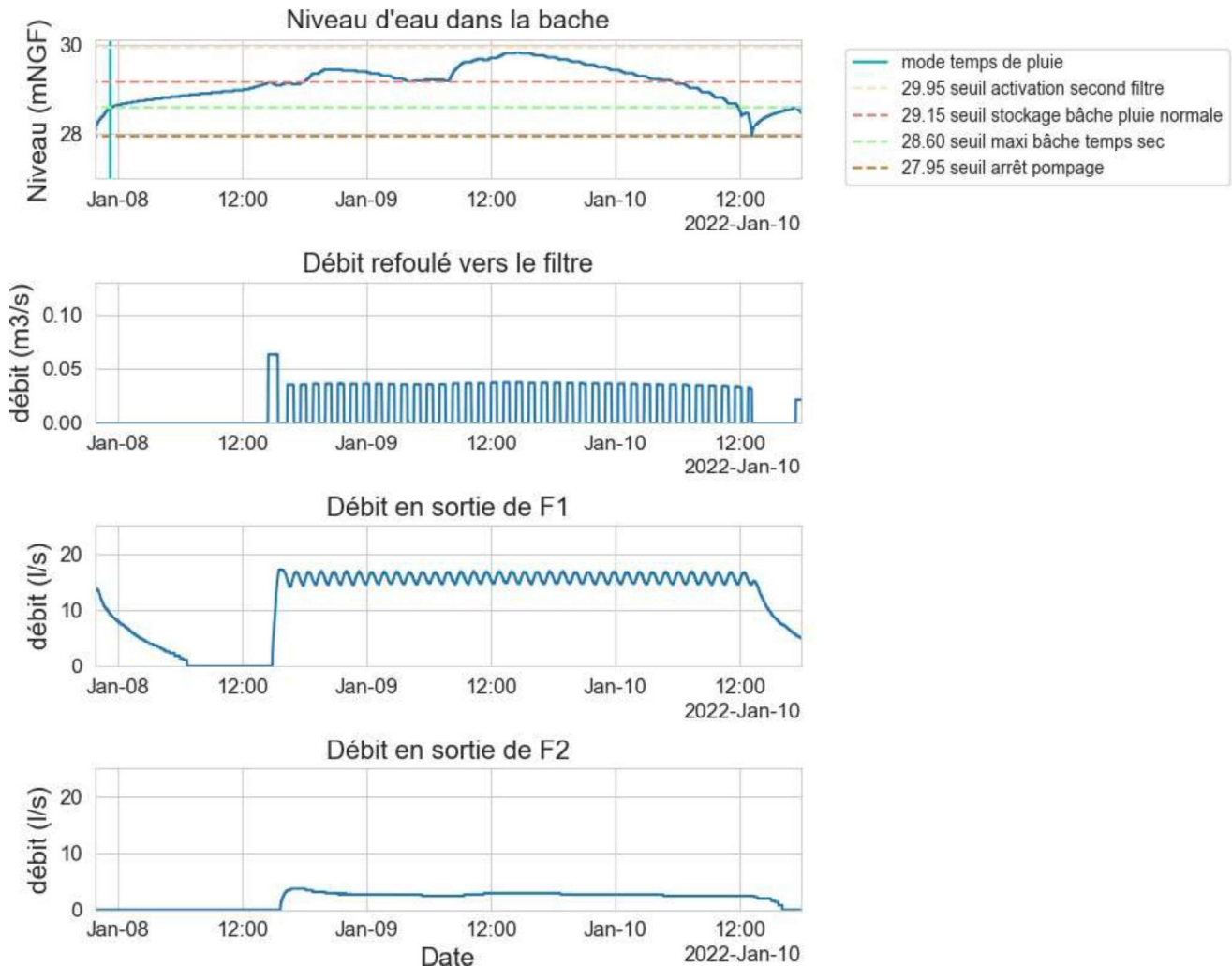


Figure 28 : exemple de dysfonctionnement du filtre en mode pluie normale.

Dans cet exemple, un débit est constaté en sortie du compartiment F2 pendant toute la durée du flaquage alors que le pompage est dirigé vers le compartiment F1. Un transfert partiel de l'eau du compartiment F1 se fait donc vers le compartiment F2.

4.3.3 Modifications apportées en cours d'étude

Les échanges d'eaux entre les deux compartiments constatés dans les exemples ci-avant sont la conséquence :

- de la présence d'une fissure dans le merlon central séparant les deux compartiments près des ouvrages d'entrée ;
- de la mise en charge dans la partie amont du filtre, en raison de la forte la densité des roseaux, qui entraine un débordement entre les deux ouvrages d'entrée.

Des réparations ont été apportées par la ville de Paris notamment le renforcement du merlon central par la mise en place de sacs de sable recouverts par de la terre végétale mais les désordres sont réapparus en cours d'étude et sont toujours présents.

Le faucardage des roseaux 1 à 2 fois par an permet de réduire temporairement la mise en charge amont du filtre.

5 BILAN DU FONCTIONNEMENT DU SYSTEME

5.1 Événements pluvieux

Le cumul de pluie enregistré par le pluviomètre entre le 01 mai 2021 et le 31 décembre 2023 a été de 1541,4 mm. La Figure 3 montre la répartition par année du cumul pluviométrique.

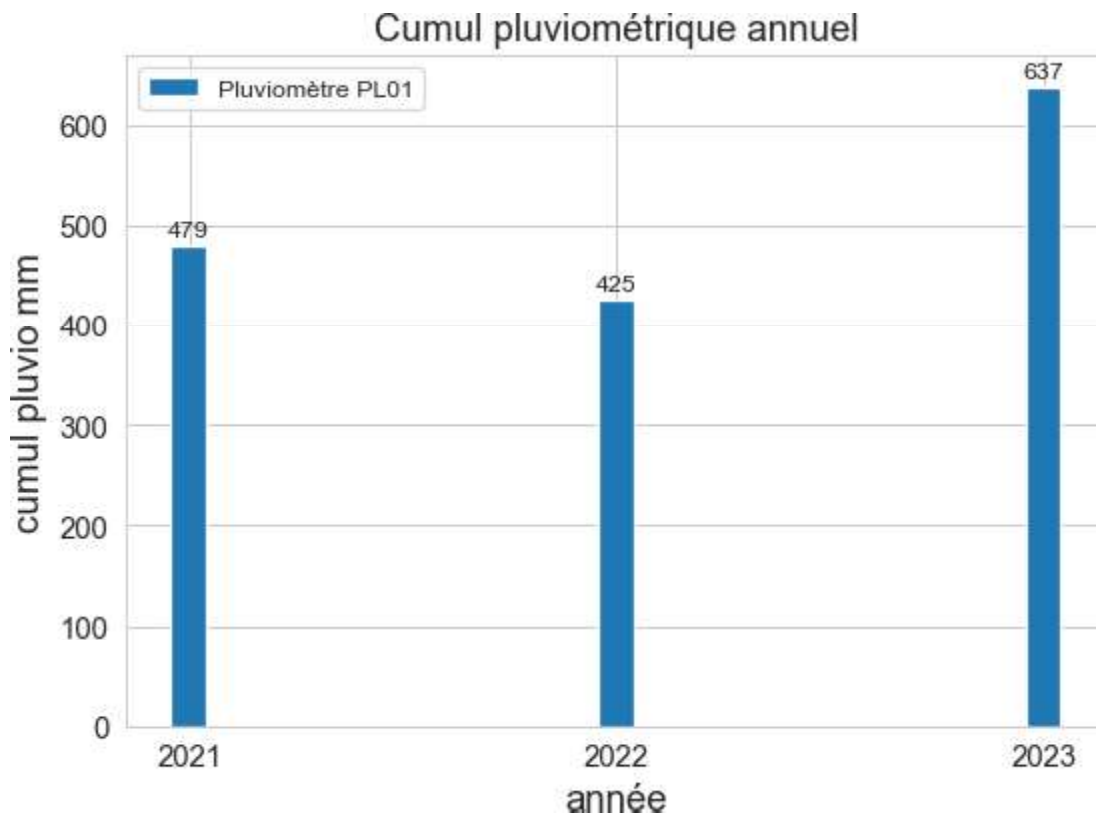


Figure 29 : cumul pluviométrique annuel.

L'année 2022 a été beaucoup moins pluvieuse que les deux autres années. Il est à noter que le cumul de l'année 2021 (479 mm) correspond au cumul des mois de mai à décembre.

À partir des données du pluviomètre PL01, les événements pluvieux ont été identifiés.

La méthodologie d'identification d'un événement pluvieux a été la suivante :

- une période de pluie commence dès que 0,2 mm de pluie sont enregistré (mesure par basculements d'auget) ;
- une période de pluie se termine lorsque que l'intensité est inférieure à 0,1 mm/h (aucun basculement de 0,2 mm n'est enregistré pendant 120 min). La fin de la pluie correspond alors au dernier basculement avant cette période de 120 min.

Cette durée de 120 min a été ajustée par itération afin d'être la plus cohérente possible avec les données de déclenchement du mode temps de pluie.

La Figure 30 montre un exemple d'identification d'un événement pluvieux de cumul supérieur à 1mm.

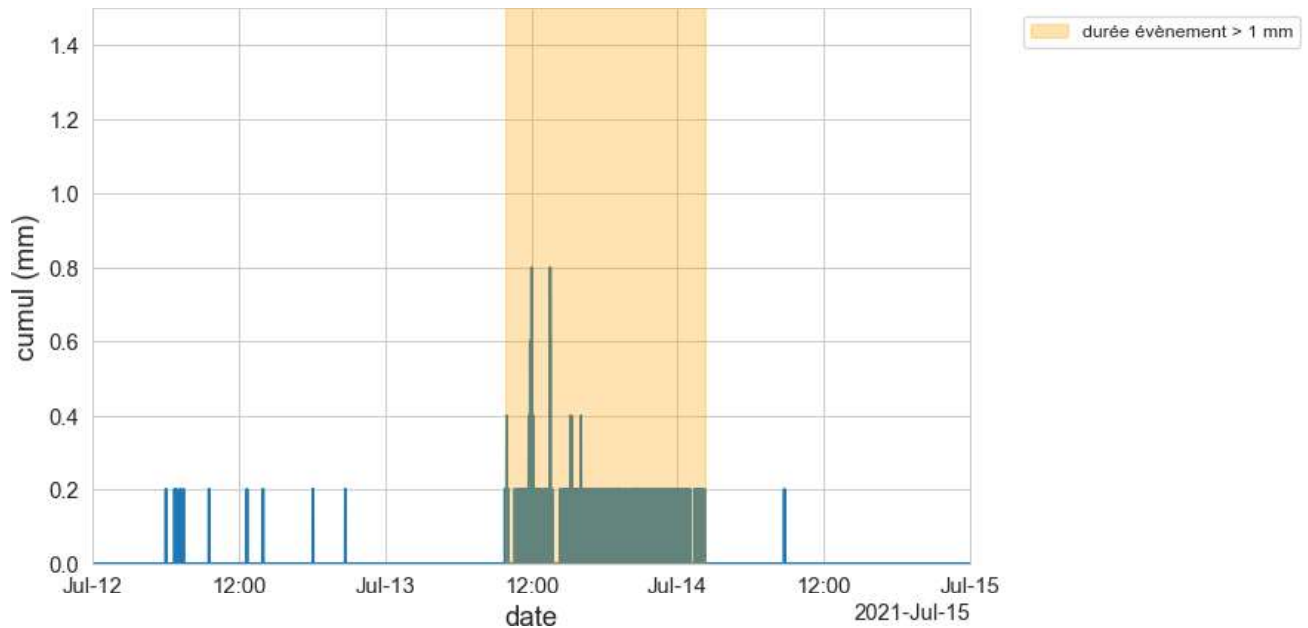


Figure 30 : identification des événements de pluie dont le cumul est supérieur à 1mm.

299 événements pluvieux de cumul supérieur à 1mm ont été identifiés sur la période étude. Les périodes de retour de ces événements (par comparaison avec les statistiques de Paris-Montsouris) sont présentées par la Figure 31.

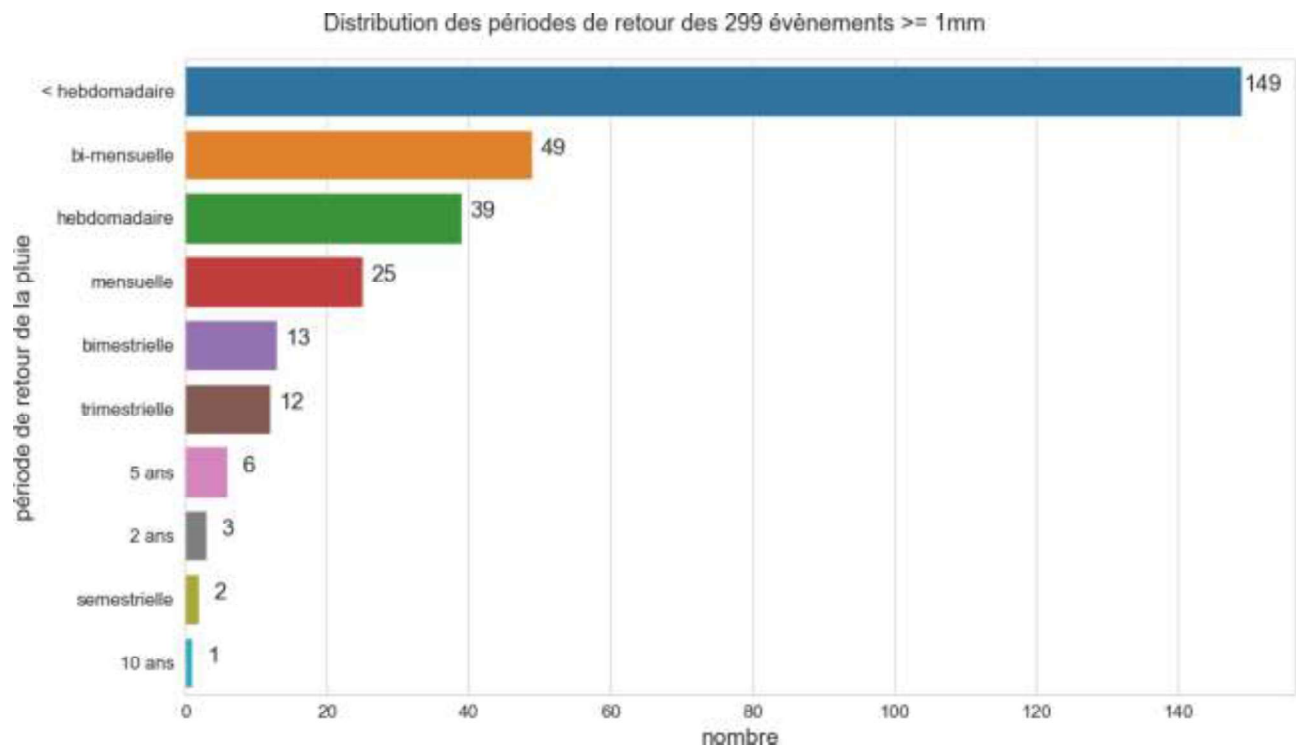


Figure 31 : distribution de la période de retour des événements.

5.2 Bilan global pluriannuel

5.2.1 Bilan des volumes sur la période mai 2021 à décembre 2023

Pour rappel, les volumes transités par le système, présentés dans la suite du document, ont été estimés à partir :

- des débits dans le réseau P115 mesurés par le capteur hauteur-vitesse ;
- des débits pompés vers les compartiments F1 et F2 mesurés par les débitmètres électromagnétiques ;
- des débits de sortie des compartiments F1 et F2 estimés à partir des hauteurs mesurés et d'une loi d'orifice ⁶.

La Figure 32 présente les volumes globaux mesurés à P115, dans la station de pompage et en sortie des compartiments F1 et F2 entre le 01 mai 2021 et le 31 décembre 2023.

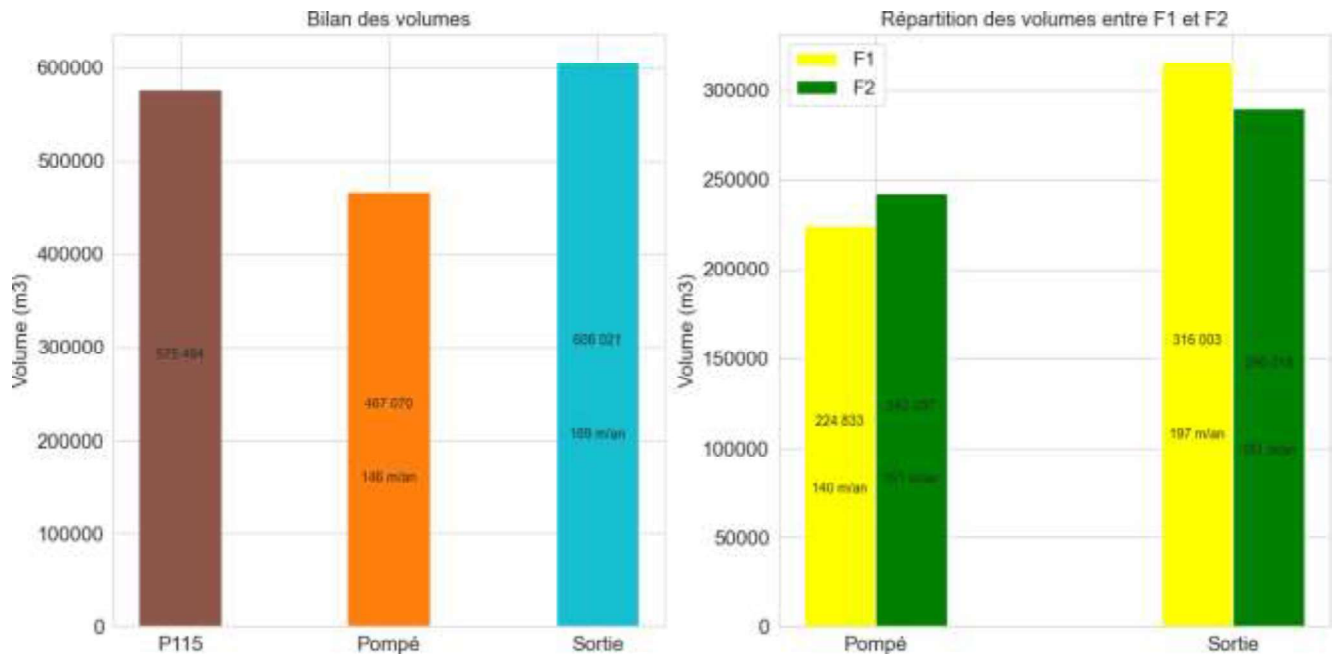


Figure 32 : bilan des volumes transités par le système sur la totalité de la période d'étude.

Ce bilan est approximatif car les données ne sont pas complètes pour les débits P115 (3,5% de données manquantes) et en sortie de filtre (environ 10% de données manquantes).

D'important écarts sont constatés entre les débits pompés vers le filtre par rapport au débit P115 (23% d'écart) et au débit en sortie de filtre (30% d'écart). Des écarts plus importants seraient probablement obtenus avec des données complètes.

Ces écarts peuvent être expliqués par :

- d'une part, la mauvaise qualité des données à P115 pour les petits débits. Cette limite avait déjà été identifiée lors de la pré-étude⁷ ;
- d'autre part, une incertitude dans l'estimation du débit en sortie d'ouvrage du fait d'une mesure approximative de la hauteur d'eau en amont de l'orifice et d'une absence de vérification de la loi d'orifice.

5.2.2 Bilan des volumes sur la période janvier 2022 à décembre 2023

Afin de mieux se rendre compte des écarts réels existants entre les mesures, l'analyse a également été faite sur une période de deux années quasi-complètes 2022 et 2023.

La Figure 33 présente les volumes globaux mesurés à P115, dans la station de pompage et en sortie des compartiments F1 et F2 sur ces deux années complètes.

⁶ Rapport « Life Adsorb - Instrumentation de l'ouvrage – Rapport d'action B1. Installation du site démonstrateur – Janvier 2024 »

⁷ Rapport « DO BUGAUD – Étude pour l'optimisation de la constitution du filtre et définition des moyens de suivi de son fonctionnement –Aout 2017 »

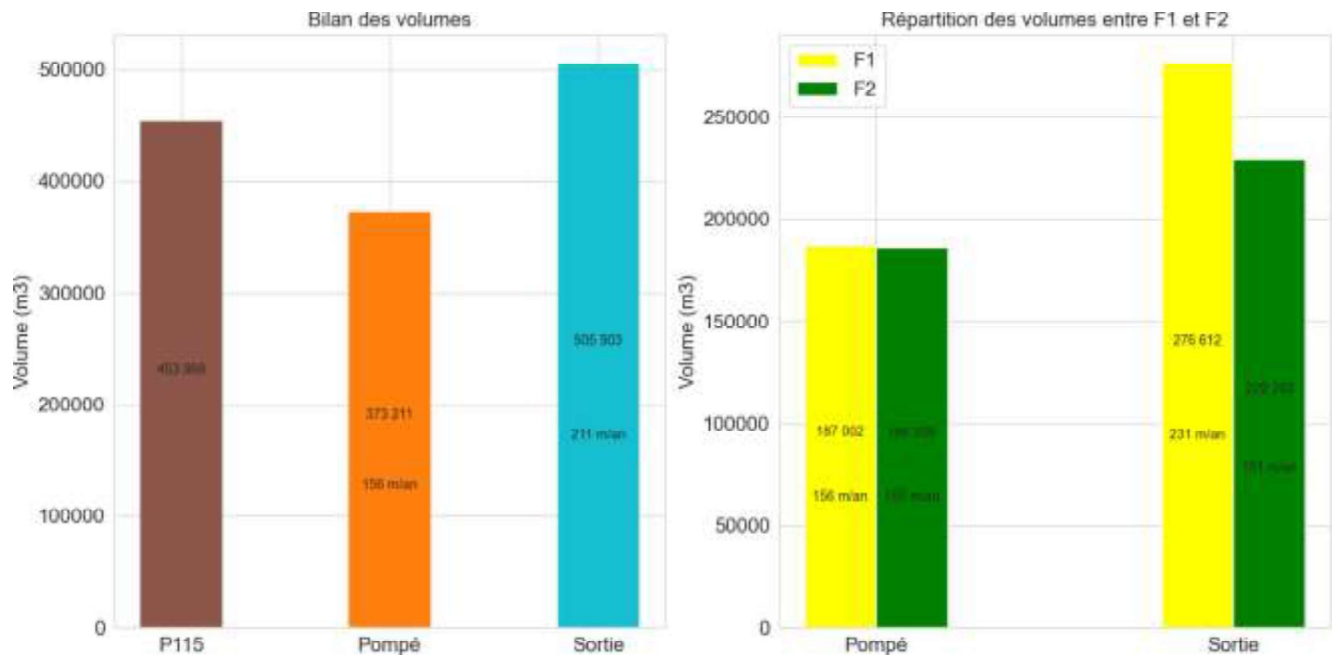


Figure 33 : bilan des volumes transités par le système sur la période 2022-2023.

Des écarts sont constatés entre les débits pompés vers le filtre par rapport au débit P115 (22% d'écart) et au débit en sortie de filtre (36% d'écart).

Sur les deux périodes étudiées, il est constaté un volume pompé équivalent, voire plus important vers le compartiment F2 alors que le volume mesuré en sortie de compartiment F1 est beaucoup plus important.

Les charges hydrauliques annuelles calculées sur la base des volumes pompés (146 m/an et 156 m/an) sont cohérentes avec celle attendue (environ 145 m/an). Ces charges hydrauliques sont sur cette base plus importantes pour le compartiment F2 pour les deux périodes.

Par contre en déterminant les charges hydrauliques à partir des volumes mesurés en sortie de filtre, celles-ci est plus importantes (189 m/an et 211 m/an) du fait des incertitudes de mesures citées ci-avant. Mais surtout, ces charges hydrauliques sont plus importantes pour le compartiment F1.

Une explication est que des échanges se font entre les deux compartiments à cause d'une faille dans le merlon séparant les deux compartiments. Des opérations de colmatage de la faille ont été menées mais les fuites persistent jusqu'à maintenant. Le filtre non prioritaire est également sollicité lors des fonctionnements en mode grande pluie ce qui peut également expliquer ces différences.

5.2.3 Bilan des volumes en sortie du compartiment non prioritaire

La Figure 34 montre le volume total mesuré en sortie de compartiment non prioritaire ainsi que la part mesuré lors des événements de grande pluie.

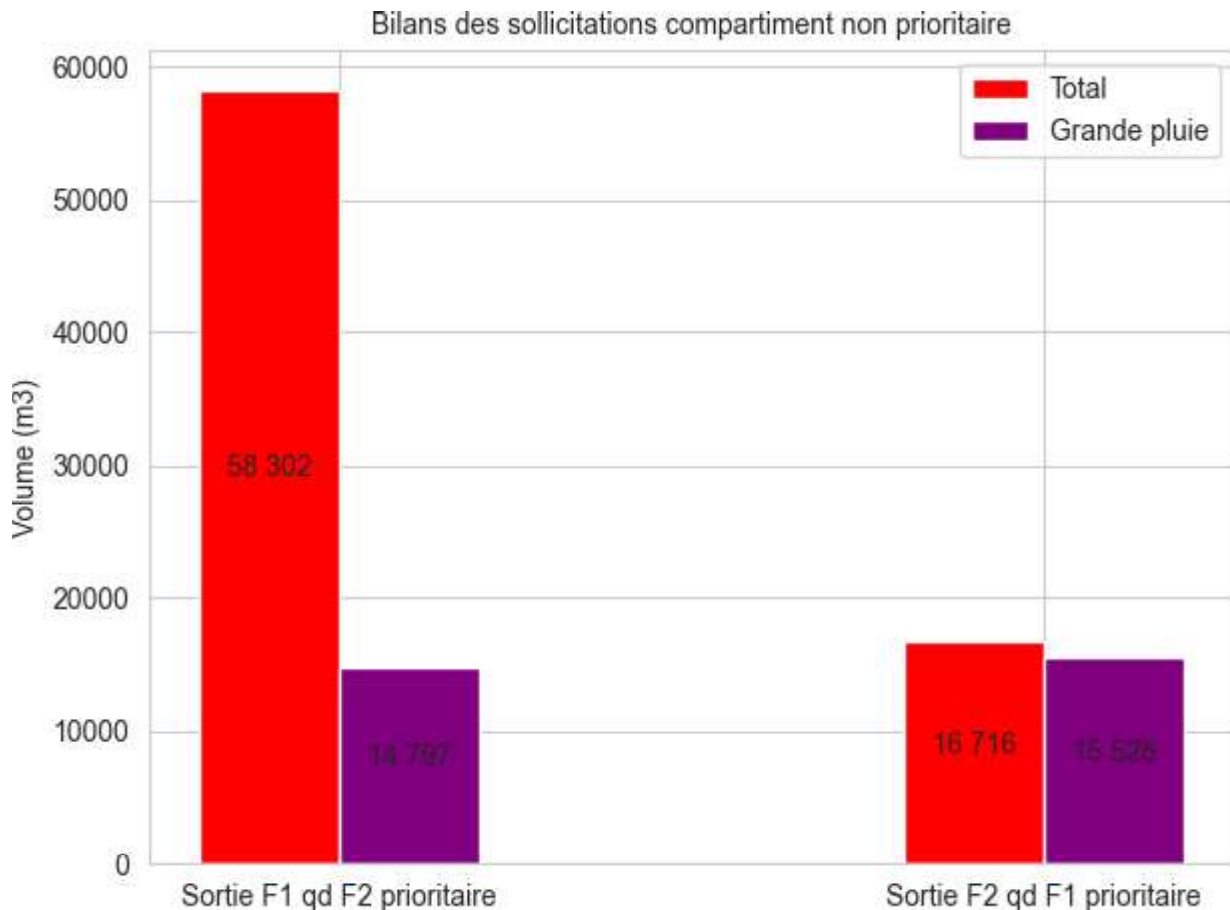


Figure 34 : bilan des volumes mesurés en sortie du compartiment non prioritaire.

Le graphe montre bien que les deux compartiments ont été sollicités de manière équivalente pour des événements de grande de pluie. Par contre, les échanges dues aux failles dans la digue se font de manière plus importante dans le sens F2 vers F1 ce qui explique que pour un même volume pompé par F1 et F2, le volume mesuré en sortie du compartiment F1 est plus important.

La part du volume de temps de pluie reçu par le compartiment F1 lorsque F2 est prioritaire est estimé à 18,4 %. Celui de F2 lorsque que F1 est prioritaire est estimé à 6.5 %.

5.2.4 Bilan des volumes par mode de fonctionnement

Pour chaque mode de fonctionnement (temps sec et temps de pluie), les bilans globaux ont été faits par compartiment :

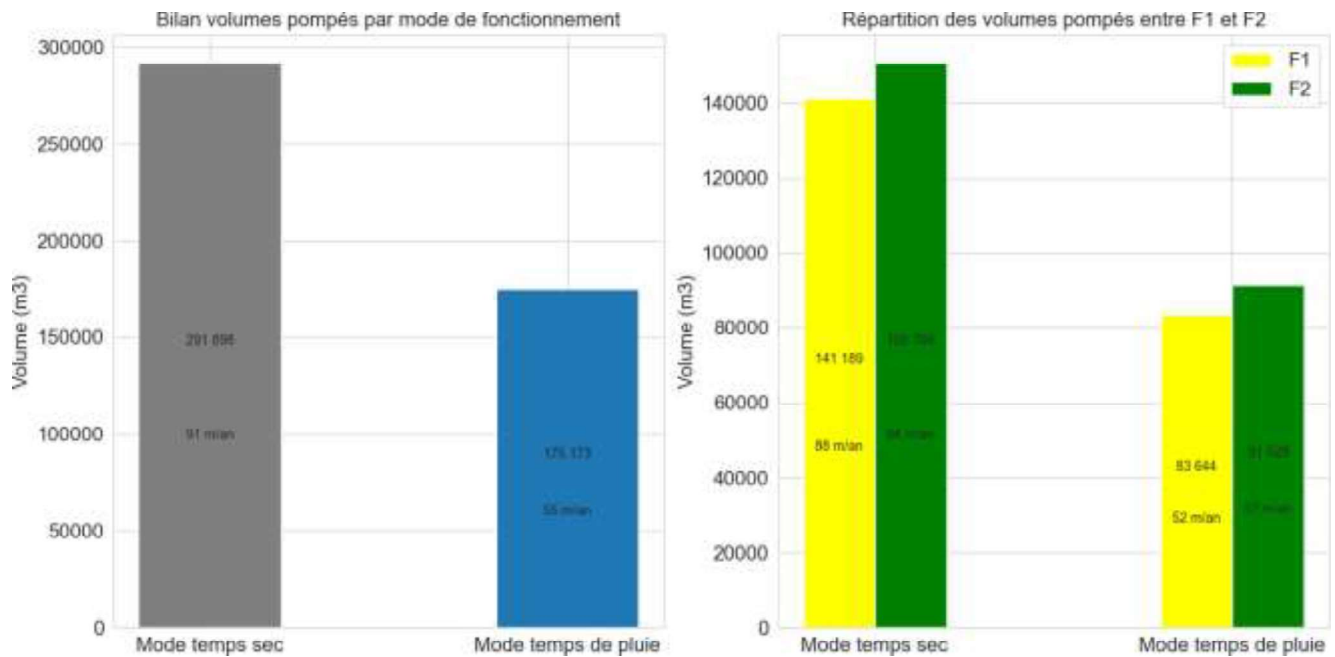


Figure 35 : bilan des volumes pompés par mode de fonctionnement et la répartition par compartiment.

La Figure 35 montre que le filtre est davantage sollicité en mode temps sec (62% des volumes reçus). Les résultats montrent également que le compartiment F2 est un peu plus sollicité que le F1 quel que soit le mode de fonctionnement (6,2 % de plus en temps sec et 8,6 % en temps de pluie).

La Figure 36 montre les durées cumulées en jours, selon le mode fonctionnement temps sec ou temps de pluie, des compartiments F1 et F2 quand ils sont prioritaires.

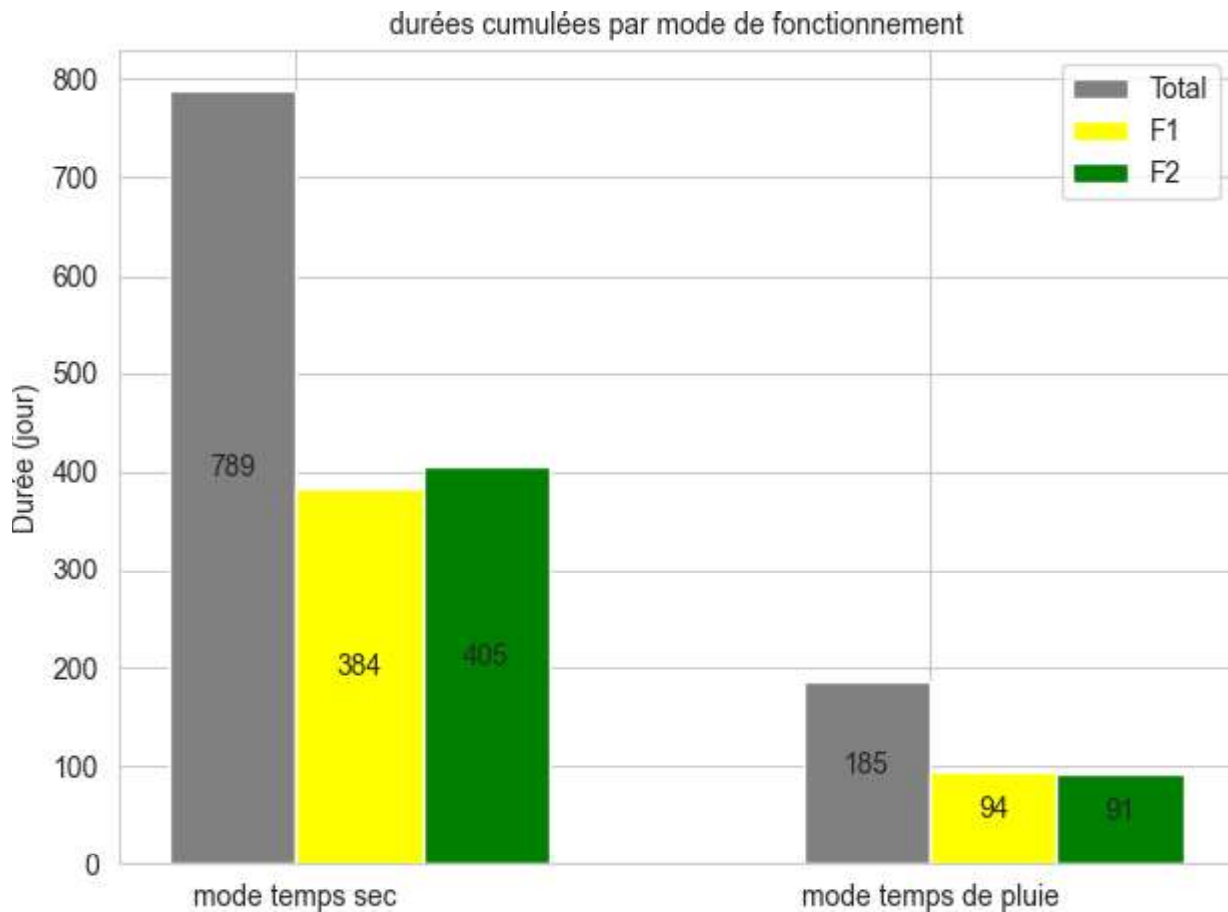


Figure 36 : durées cumulées en fonction du mode de fonctionnement.

Le graphique montre, de façon cohérente avec les résultats en volume, que le filtre fonctionne la majorité du temps en mode temps sec. La répartition entre les deux compartiments est bien équilibrée aussi bien par temps sec que par temps de pluie.

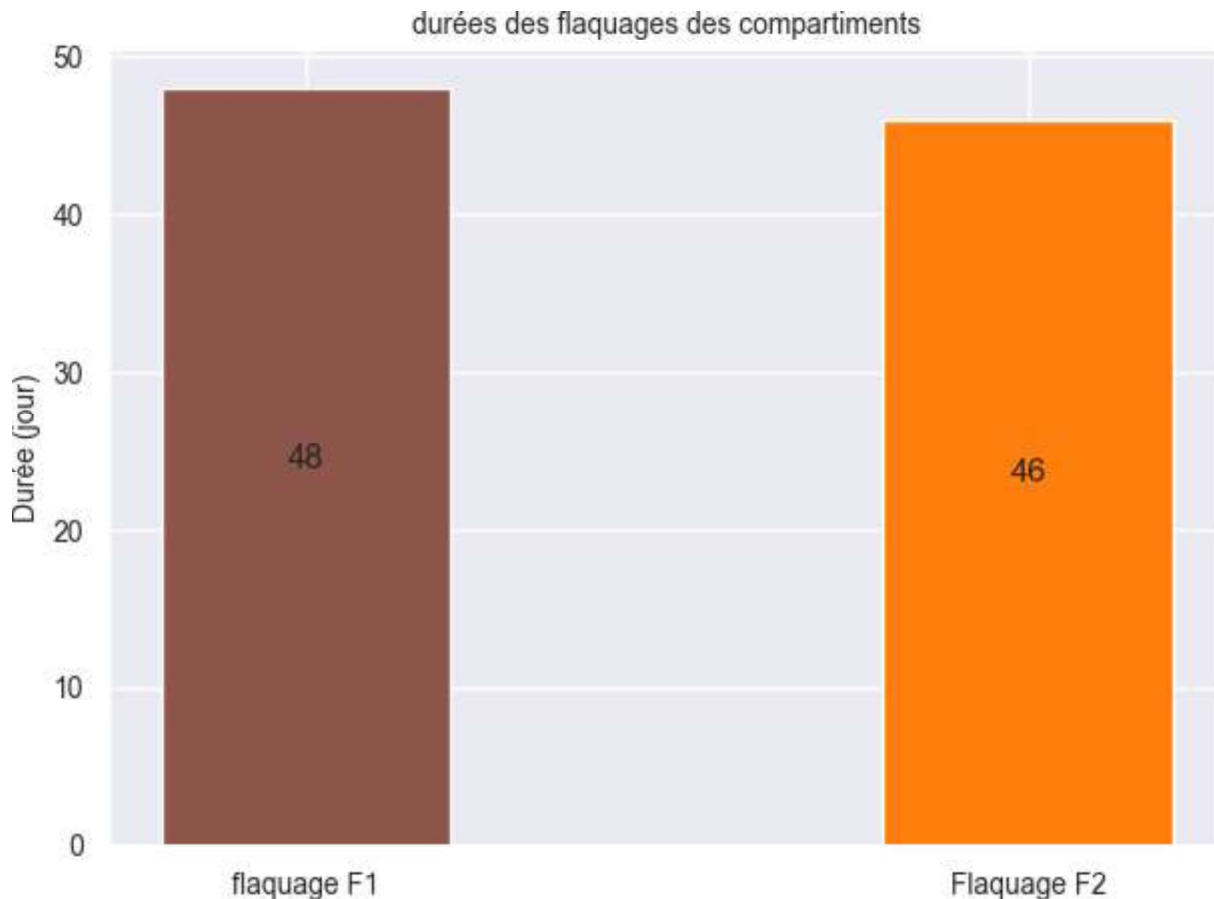


Figure 37 : durées de flaquaage par compartiment.

La Figure 37 montre que globalement, les deux compartiments ont été sollicités équitablement par temps de pluie.

A noter qu'en terme de durée flaquaage, le compartiment F1 est un peu plus sollicité que le F2 alors que les débits pompés sont supérieurs pour le F2. Une hypothèse est que l'échange d'eau constaté du compartiment F2 vers le compartiment F1 fait que la durée de flaquaage pour un évènement est moins importante qu'elle ne devrait l'être car un volume non négligeable d'eau est vidangé vers le compartiment F1.

5.3 Bilan global par saison

Afin de comparer les données saisonnières (été – hiver), l'analyse a été faite sur deux années civiles pleines (2022-2023). L'été correspondant à la période avril – septembre et l'hiver à celle d'octobre – mars.

La Figure 38 montre la répartition des volumes mesurés selon la période de l'année (hiver, été).

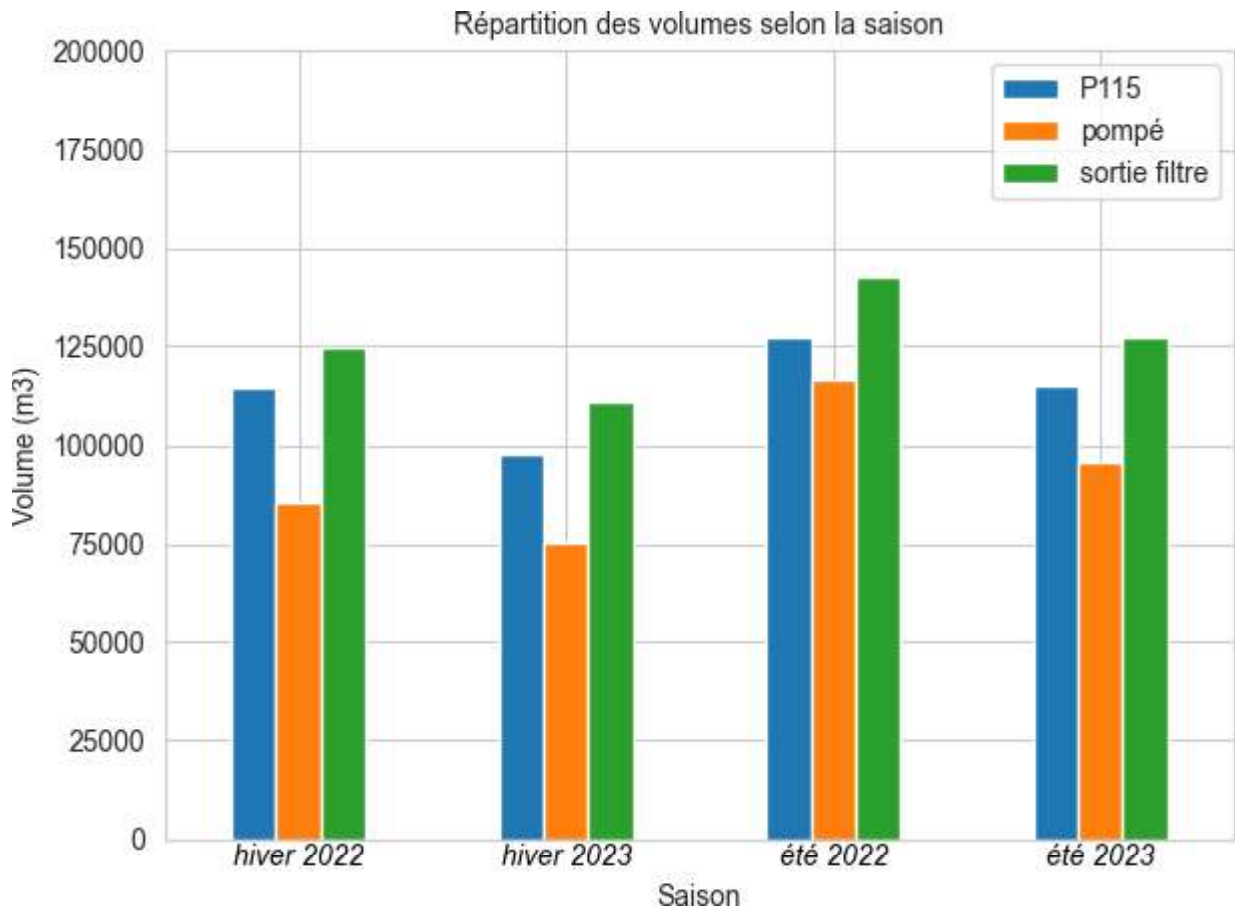


Figure 38 : bilan des volumes selon la saison.

Les résultats sur les années 2022-2023 montrent que le volume d'eau a été plus important en été qu'en hiver.

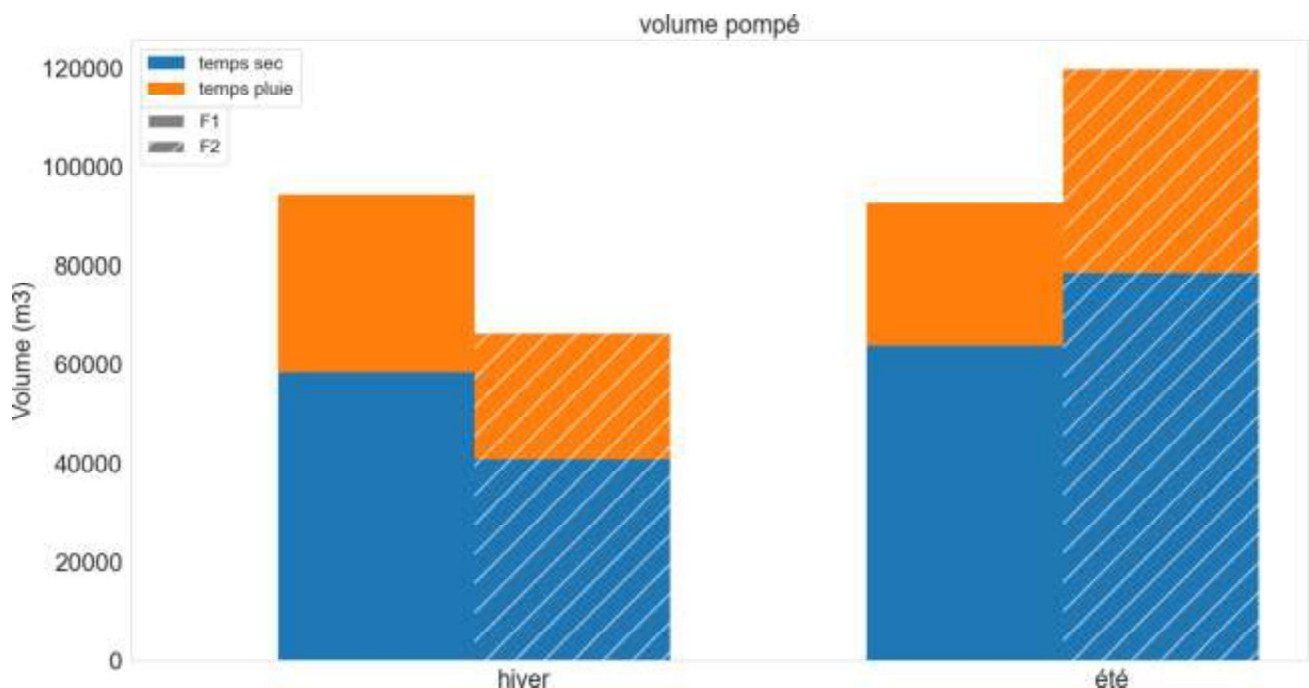


Figure 39 : volumes pompés par saison et selon le mode de fonctionnement pour chaque compartiment.

Les résultats montrent que le compartiment F1 a été sollicité dans les mêmes proportions en hiver et en été. Par contre le compartiment F2 a beaucoup plus été sollicité en été. Cela est peut-être dû à la priorisation d'alimentation des compartiments.

Le volume pompé en mode temps de pluie est un peu plus important en été qu'en hiver.

De même, le volume pompé par temps sec est également plus important en été qu'en hiver.

Afin de voir l'impact de la pluie sur les résultats précédents, la répartition de la pluie selon la saison a été tracée (Figure 40).

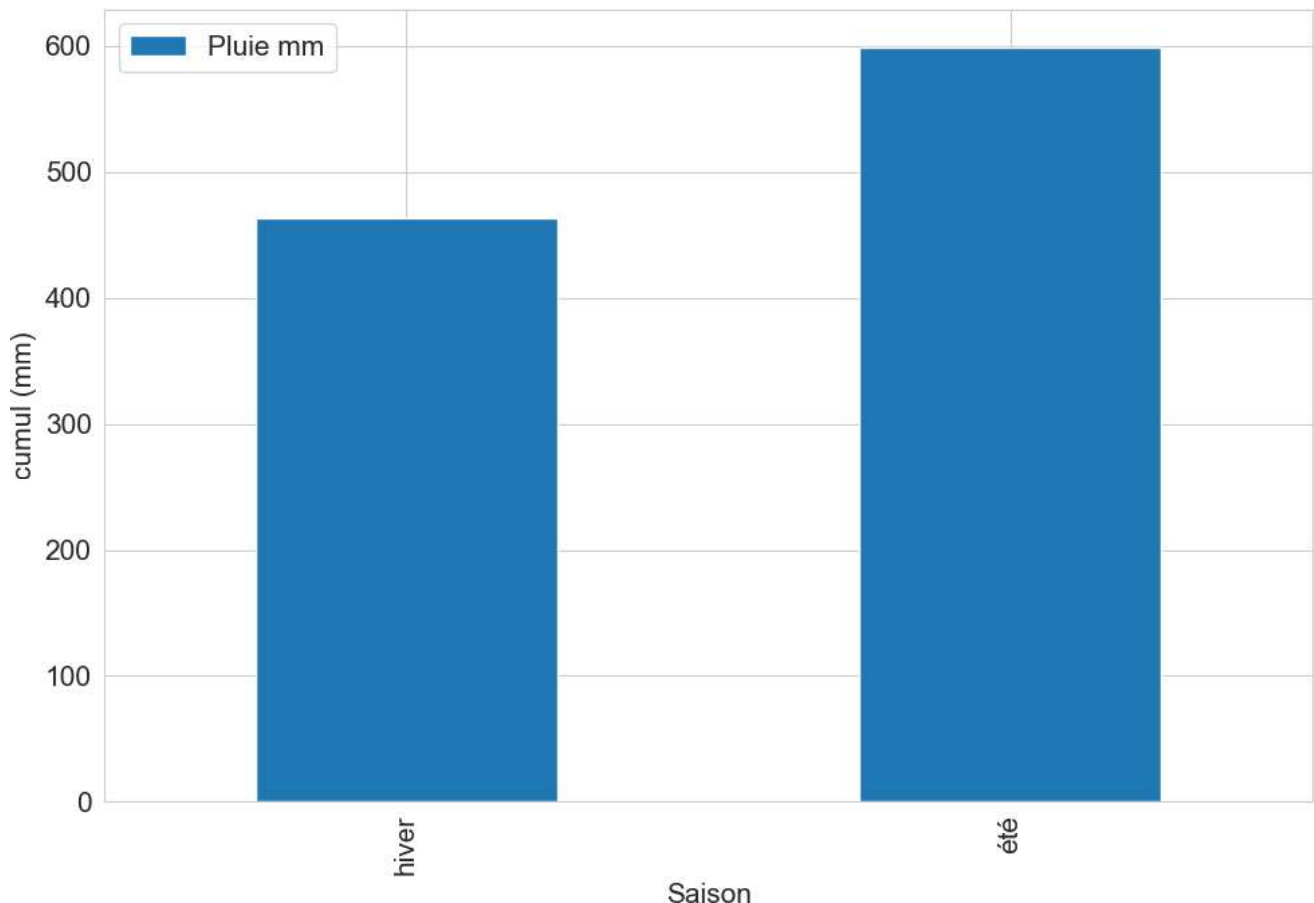


Figure 40 : répartition des cumuls de pluie par saison.

Les résultats montrent que la pluviométrie a été plus importante en été qu'en hiver ce qui justifie un volume d'eau pompé plus important en été qu'en hiver.

Concernant le temps sec, la part des événements pluvieux hors périodes de fonctionnements en mode de temps de pluie a également été analysée. En effet, l'intégralité des événements pluvieux ne se retrouve pas dans le fonctionnement en mode temps de pluie.

Sur les 1062 mm de pluie, 283,8 mm de pluie ne sont pas repris dans les fonctionnements en mode temps de pluie (soit environ 27%).

La répartition de ces 283,8 mm de pluie par saison est la suivante :

- 160,6 mm en hiver ;
- 123,2 mm en été.

Les événements pluvieux non inclus dans le fonctionnement en mode temps de pluie n'explique donc pas le volume de temps sec plus important en été qu'en hiver.

Comme présenté dans le paragraphe 3.2, une augmentation du débit inexpliqué dans le réseau P115 avec une part importante de ces périodes en été peuvent en partie expliquer ces résultats.

5.4 Bilan par évènement

5.4.1 Evènements en mode temps sec

Afin d'analyser le fonctionnement en mode temps sec, la première phase a été d'identifier les bâchées de temps sec à partir des données de niveau dans la bache.

Une bâchée est identifiée par la date de début de remplissage (qui correspond également dans la plupart des cas à une fin de vidange), la date de fin de remplissage lorsque le niveau atteint 28,60 mNGF (qui correspond également au début de la vidange) et la fin de la vidange lorsque le niveau atteint 27,95 mNGF.

3200 bâchées de temps sec ont pu être identifiées. Les statistiques ci-après ont été réalisées sur celles-ci. Il est à noter que ces 3200 bâchées ne représentent pas l'intégralité de la période de temps sec (périodes manquantes ne permettant pas de détecter les bâchées, bâchées ne respectant pas les critères de détection automatisée des seuils de remplissage).

En fonctionnement en mode temps sec, pour chaque bâchée, les caractéristiques suivantes ont pu être précisées :

- durée de remplissage calculée comme la différence entre l'horodatage du sommet de la bâchée et celui du niveau bas de la bâchée en début de remplissage ;
- durée de vidange calculée comme la différence entre l'horodatage du niveau bas de la bâchée de la fin de vidange et celui de début de vidange ;
- durée totale de la bâchée comme la différence entre l'horodatage de fin de vidange et celui de début de remplissage ;
- le volume pompé, calculé sur la base des mesures des débitmètres placés sur les conduites d'alimentation ;
- le débit moyen d'apport d'eau à la station calculé comme le rapport entre le volume pompé et la durée totale de la bâchée.

La Figure 41 représente l'analyse de ces caractéristiques :

- le trait à l'intérieur de la boîte représente la médiane ;
- la limite basse de la boîte, le premier quartile ;
- la limite haute de la boîte, le troisième quartile ;
- les losanges, les valeurs atypiques situées au-delà de 1,5 fois l'écart interquartile ;
- les moustaches, les plus petite et plus grande, valeurs qui ne sont pas des valeurs atypiques.

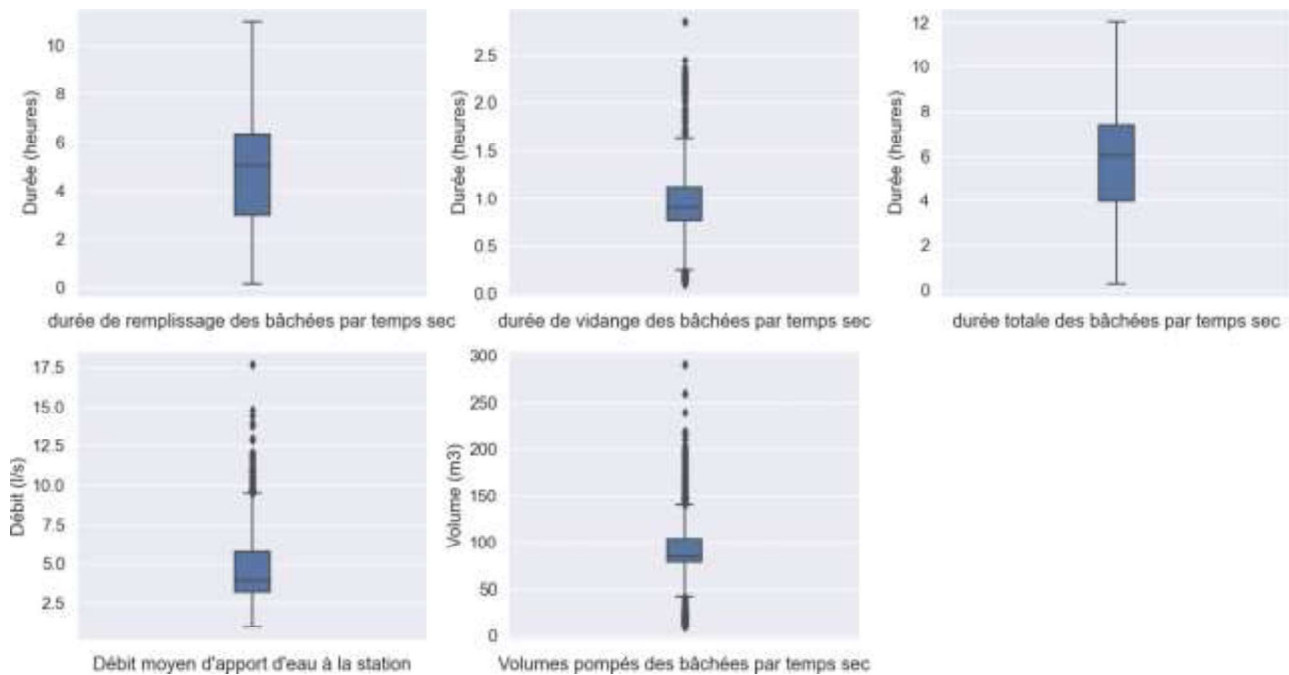


Figure 41 : caractéristiques des bâchées de temps sec.

La valeur médiane du temps de remplissage se situe à 5h03. 75 % des bâchées ont une durée de remplissage supérieure à 3h00. Cette durée est largement supérieure à la temporisation « temporisation temps sec » fixé à 130 min. Cette durée permet de s'affranchir des passages inopinés en mode « temps pluie » alors qu'il n'y a que du temps sec mais peut en contrepartie différer le passage en mode temps de pluie si une pluie intervient, après la fin de la temporisation « temporisation temps sec » et alors que le niveau d'eau dans la bache est loin du seuil « seuil maxi bache temps sec ». Cette situation est d'autant plus probable que les valeurs de débit à P115 et de durée de « temporisation temps sec » sont faibles.

Concernant la durée de vidange des bâchées de temps sec, la valeur de la durée médiane est de 54 min. 75 % des bâchées de temps sec ont une durée de vidange inférieure à 67 min. Cette durée est largement inférieure à la temporisation « temporisation vidange bache temps sec » fixé à 160 min.

Cette durée de temporisation doit être adaptée aux variations de débit à P115 afin d'éviter les déclenchements du mode temps de pluie si le débit P115 augmente et donc si la vidange est plus lente. Cependant cette durée ne doit pas être longue non plus afin que, si une pluie apparaît en fin de remplissage ou pendant la vidange, elle soit détectée assez rapidement pour limiter la vidange d'eau de pluie en mode temps sec.

La valeur médiane de la durée totale des bâchées de temps sec est de 6h03 soit environ 4 bâchées par jour ce qui est plus faible que l'hypothèse faite pour le fonctionnement de temps sec.

La valeur médiane du débit de temps sec est de 3,9 l/s. Ce débit est assez peu variable (écart interquartile de 2,5 l/s). Les valeurs atypiques correspondent à la période où le débit dans le réseau a augmenté en partie lors des premiers mois de l'année 2022.

De même les volumes pompés sont assez concentrés (écart interquartile de 25 m³). La valeur médiane se situe à 85 m³. Les valeurs atypiques de volumes élevées correspondent là aussi aux périodes où les débits dans le réseau ont augmenté. Les valeurs extrêmes basses correspondent à des périodes (notamment mars-avril 2023) où des bâchées de volumes peu important ont été vidangées suite à des interventions de la ville de Paris.

La Figure 42 présente la répartition du temps de réaction entre le début du pompage d'une bache et le début de vidange en sortie de filtre pour chaque compartiment.

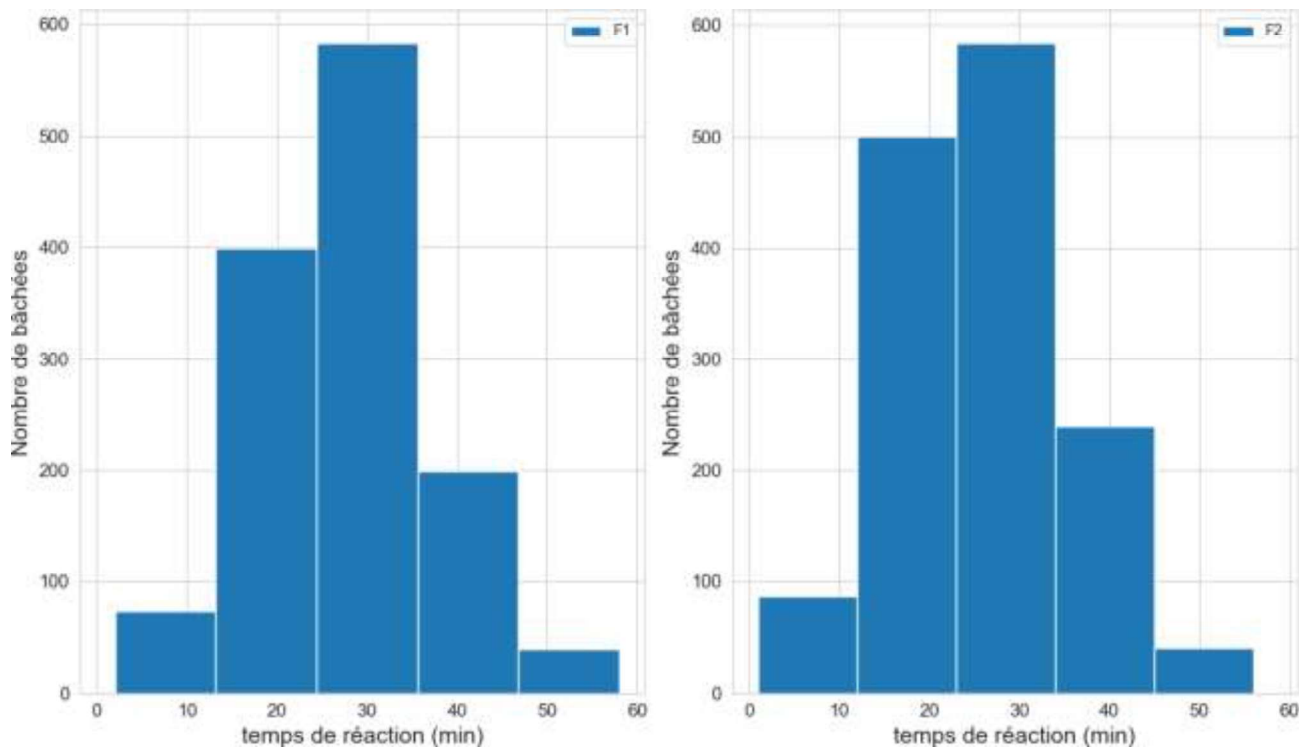


Figure 42 : temps de réaction des compartiments F1 et F2 à un pompage par temps sec.

Le temps de réaction de chaque compartiment (différence entre le début du pompage et le début de remplissage mesuré en sortie) est similaire (durée moyenne et médiane d'environ 27 min pour F1, 25 min pour F2).

La Figure 43 montre le temps de séjour d'une bâchée de temps sec entre le début du remplissage et la fin de vidange en sortie de filtre (débit nul ou fin de la diminution du débit).

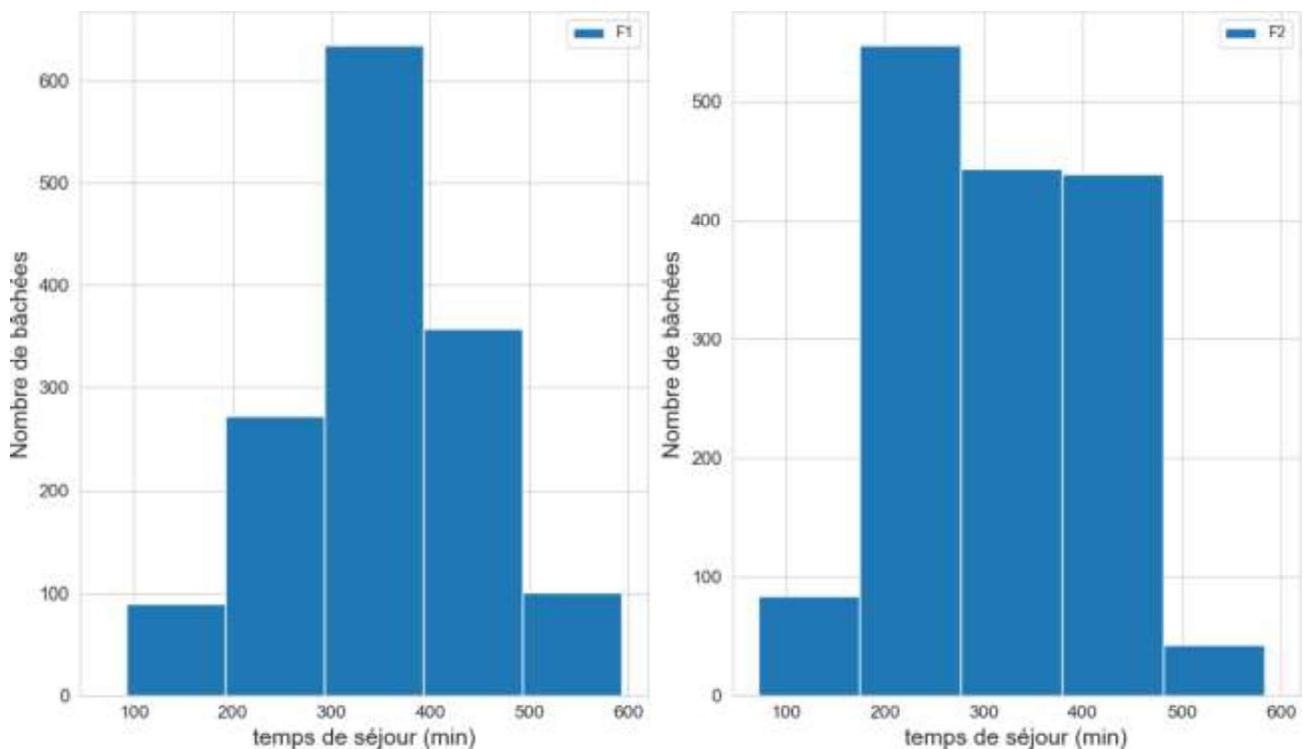


Figure 43 : temps de séjour d'une bâchée de temps sec pour chaque compartiment.

Le temps de séjour dans le compartiment F1 est environ une demie heure plus importante que celui du compartiment F2.

5.4.2 Evènements de temps de pluie

A partir des données de niveau dans la bêche, les bêchées de temps de pluie ont été identifiées.

Une bêchée est identifiée par la date de début de remplissage (qui correspond également dans la plupart des cas à une fin de vidange), la date de fin de remplissage lorsque le niveau atteint son maximum et la fin de la vidange lorsque le niveau atteint 27,95 mNGF.

157 bêchées de temps de pluie ont pu être identifiées. Ces bêchées ont été classées par la suite en 5 catégories :

- Normal (61)⁸,
- Dégradé tempo (34),
- Dégradé seuil (13),
- Incohérent (15) => incohérence avec données de pluie et/ou données de débit à P115
- Manuel (4) => déclenchement manuel par la supervision
- Dysfonctionnement (30) => déclenchement inopiné en l'absence de pluie.

Pour chaque bêchée de temps de pluie ont pu être déterminées :

- Les caractéristiques principales de pluie :
 - le cumul des pluies pendant la totalité de la bêchée (du début du remplissage à la fin de la vidange) ;
 - le cumul de la pluie initiale. La pluie initiale est l'événement de pluie identifié, qui entraîne le déclenchement du mode temps de pluie. Ensuite plusieurs événements de pluie, selon la définition que nous en avons fait peuvent se produire pendant la durée totale de la bêchée ;
 - la durée de la pluie initiale ;
 - l'intensité max sur 1 min de la pluie initiale ;
 - l'intensité moyenne de la pluie initiale ;
 - la période de retour (sur la base des statistiques de Paris-Montsouris) de la pluie initiale.
- Les caractéristiques liées au pompage vers le filtre :
 - le volume pompé total vers le filtre ;
 - le volume pompé de temps sec ;
 - le volume pompé de pluie ;
 - le ratio volume pompé de pluie/volume total ;
 - le débit moyen de temps sec préalable à la bêchée ;
 - le volume pompé avant le lancement du mode temps de pluie.

Ces éléments sont rappelés sur un graphe tracé entre le début de la pluie et la fin de la vidange de la bêchée. La Figure 44 présente un exemple de graphe sur lequel sont affichés :

- le hyétoگرامme ;
- le débit à P115 ;

⁸ Les types de déclenchement sont décrits dans le paragraphe 4.2.2.2

- le niveau d'eau dans la bache et les différents seuils de déclenchement du pompage en fonction du mode de fonctionnement;
- en marron, le seuil d'arrêt du pompage à la fin de la vidange ;
- en vert, le seuil de pompage en mode temps sec ;
- en rouge, le seuil de pompage en mode temps de pluie pour une pluie normale ;
- en rose, le seuil de pompage en mode temps de pluie pour une grande pluie ;
- le débit pompé vers le filtre.

Evènement n°117 du 2023-04-23 16:10:00 au 2023-04-24 21:21:00

Caractéristiques de l'évènement
 cumul pluvio : 5.6 mm
 volume pompe total: 446 m3
 volume pompe temps sec: 427 m3
 volume pompe temps pluie: 18 m3
 débit temps sec : 4.56 l/s
 ratio temps de pluie: 4 %
 volume pompé prématurément: 0 m3

Caractéristiques de la pluie initiale
 durée : 132 minutes
 intensité max: 24 mm/h
 intensité moyenne: 1 mm/h
 cumul: 2.6 mm
 période de retour: < hebdomadaire

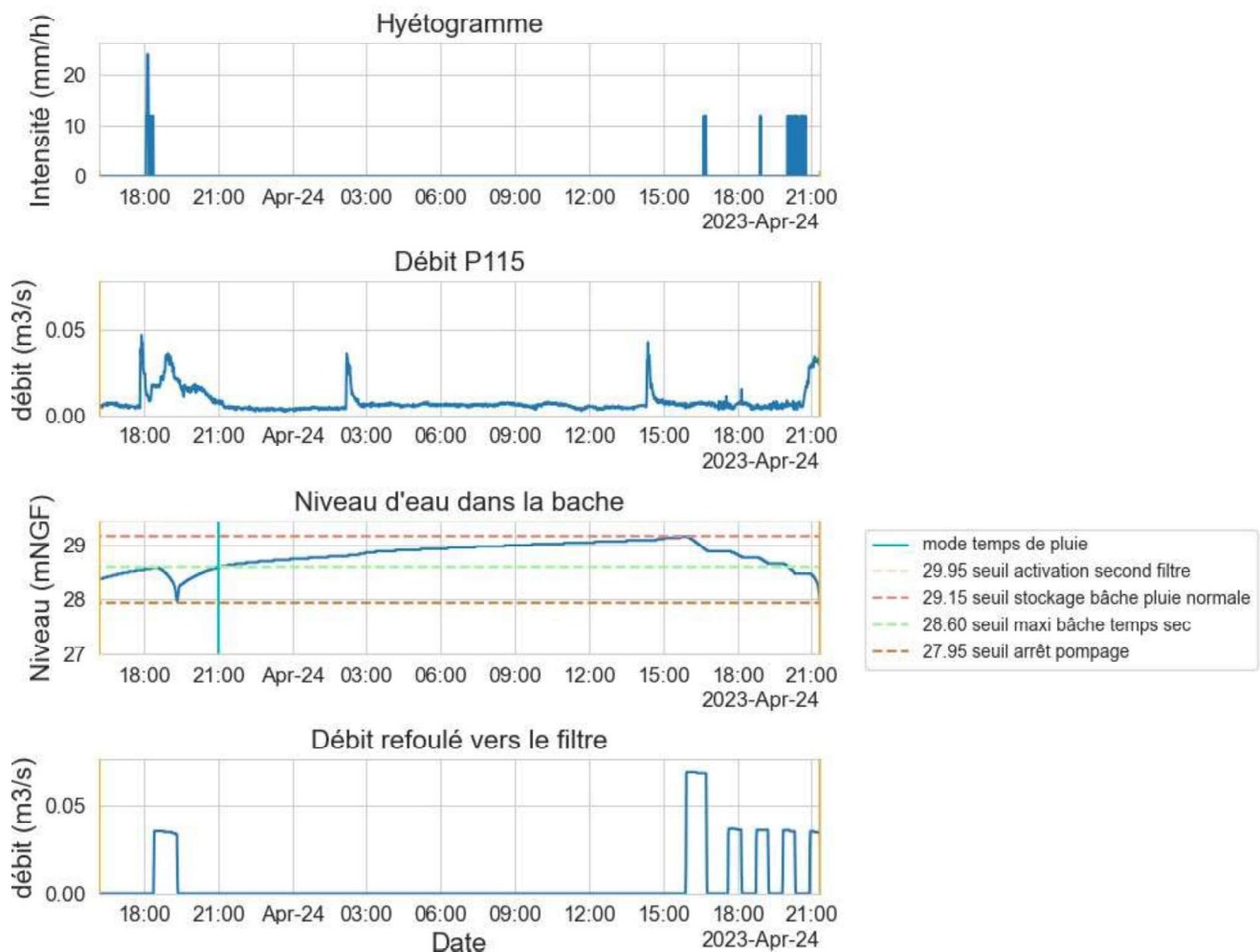


Figure 44 : exemple de graphe pour une bâchée de temps de pluie.

L'analyse fonctionnelle a montré trois types de fonctionnement distincts (voir § 4.2.2.2):

- le type « normal » ;
- le type « dégradé tempo » ;

- le type « dégradé seuil ».

Afin de mieux comprendre l'impact de ces trois modes sur le fonctionnement du filtre, une estimation du ratio volume de temps de pluie par rapport au volume total pompé vers le filtre pour chacun des évènements étudiés a été faite.

La méthodologie pour obtenir ces ratios a été la suivante :

- calcul du volume total pompé (calculé à partir des mesures des débitmètres) sur la durée de l'évènement (le volume considéré est uniquement celui de la bâchée de temps de pluie même si sur certain évènement, une bâchée de temps sec peut intervenir entre le début de la pluie et le moment où l'eau issue de cette pluie arrive à la station);
- estimation du volume de temps sec, sur la base du débit de temps sec minimum de remplissage des 4 dernières bâchées de temps sec;
- déduction du volume de temps de pluie déduit de la différence entre le volume total pompé et le volume temps sec;
- calcul du ratio temps de pluie correspondant au rapport volume de pluie / volume total.

La Figure 45 montre les résultats obtenus ainsi que les statistiques de durée de remplissage par type de fonctionnement.

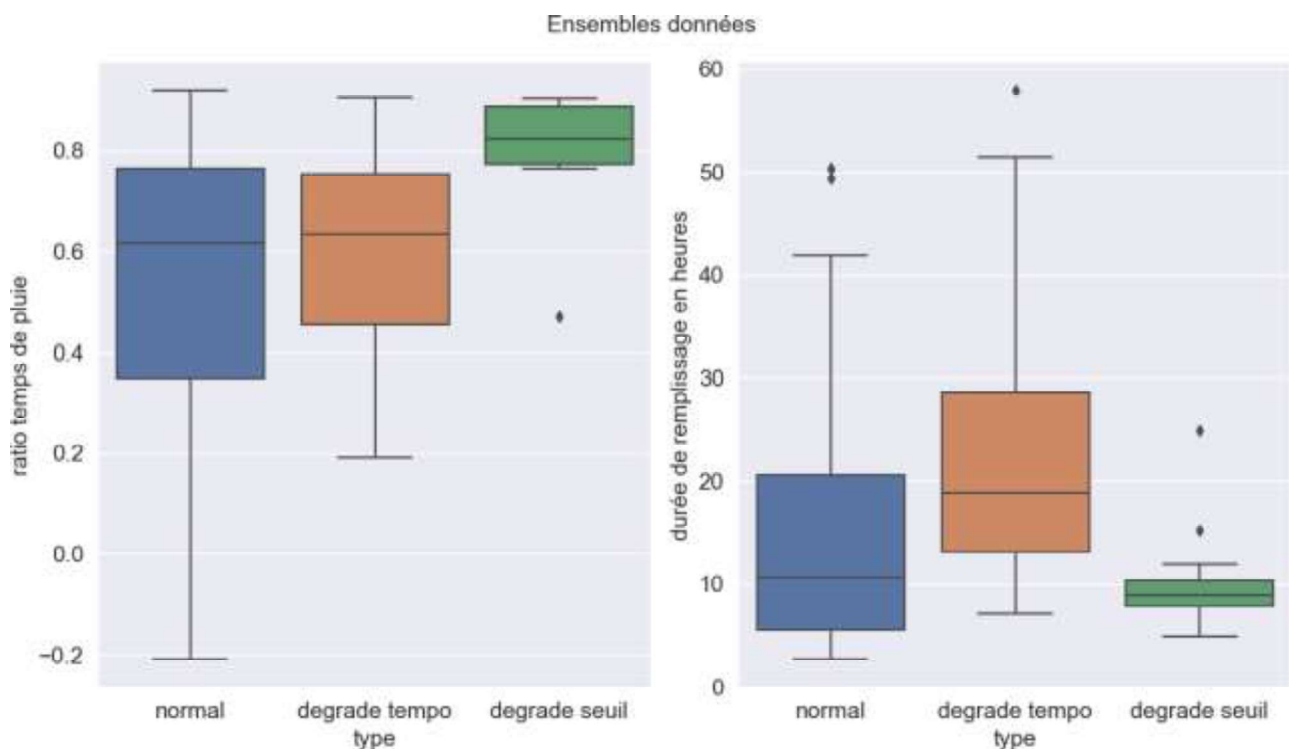


Figure 45 : ratio volume temps de pluie et durée de remplissage par type d'évènement.

Cette figure montre que les valeurs médianes des ratios de temps de pluie sont supérieures à 60 % voire 80 % pour le type « dégradé seuil ».

Il n'y a pas de différence marquée entre le type « normal » et le type « dégradé tempo » alors même qu'un volume de pluie est vidangé prématurément.

Le mode dégradé seuil affiche des ratios de pluie plus élevés car pour ce type de fonctionnement, le débit de remplissage de la bâche est largement supérieur au débit de pompage et correspond à un évènement pluvieux plus important.

L'analyse des durées de remplissage montre que la durée de remplissage de la bâche pour un fonctionnement de type dégradé tempo est plus importante que les autres modes.

Par ailleurs, l'analyse fonctionnelle a montré, pour les types de fonctionnement « dégradé tempo » et « dégradé seuil », qu'un volume d'eau (mélange entre temps sec et temps de pluie) est envoyé vers le filtre, en mode temps sec, préalablement au déclenchement du mode temps de pluie.

Pour rappel, ce volume vidangé prématurément correspond au volume pompé entre le moment où le niveau franchit 28,60 mNGF et le passage en mode de temps de pluie.

La Figure 46 montre ces volumes vidangés prématurément par type de fonctionnement.

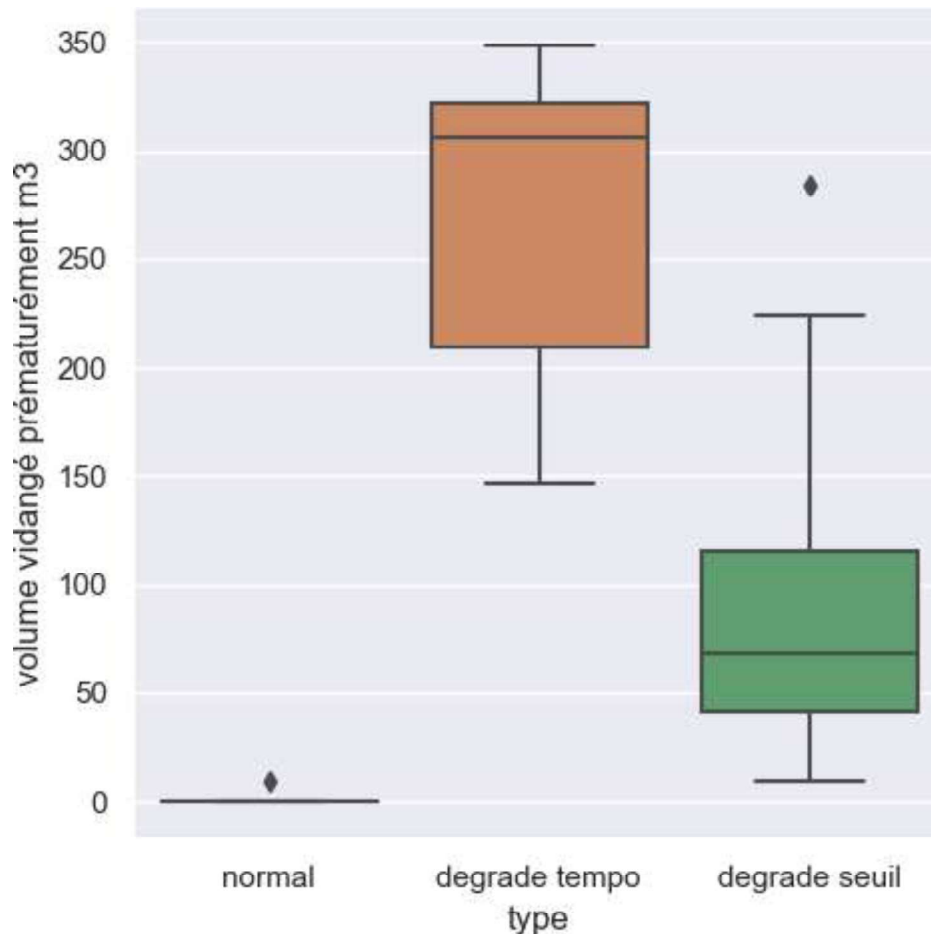


Figure 46 : volumes vidangés prématurément par type de fonctionnement.

Logiquement, les volumes vidangés en amont du passage en mode temps de pluie sont plus importants pour le type « dégradé tempo » car la vidange se fait sur toute la durée de la temporisation « temporisation vidange bêche temps sec ». La dispersion de volume observée est dû à la modification du débit de pompage (de 20 l/s à 40 l/s) en cours d'étude. Il y a eu une période où le volume pompé prématurément se situait autour de 250 m³. Suite à la modification, ce volume se situe autour de 310 m³. Concernant le type « dégradé seuil », ces volumes sont moins importants.

La Figure 47 présente le temps entre le début de pompage et le début de la vidange en sortie de filtre.

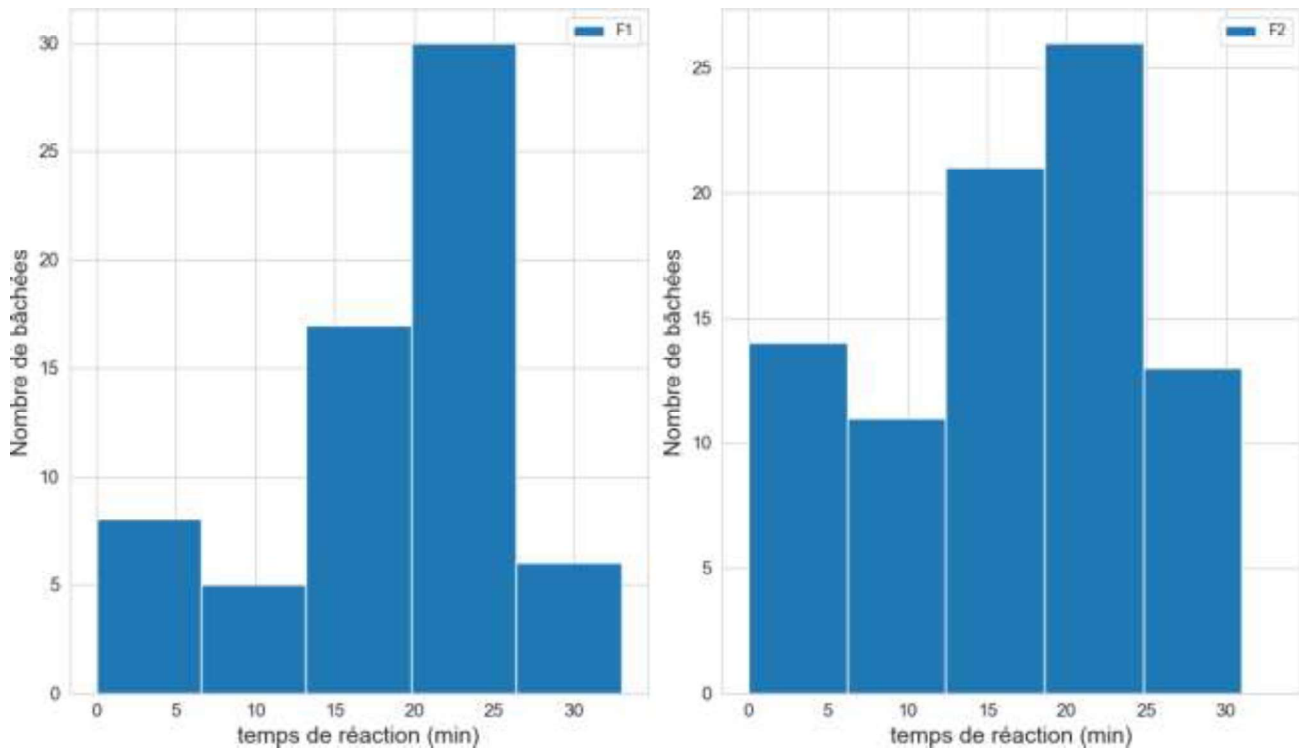


Figure 47 : temps de réaction des compartiments F1 et F2 à un pompage par temps de pluie.

Le temps de réaction de chaque compartiment est proche (durée moyenne et durée médiane respectivement de 18 min et 20 min pour F1, et 16 min et 18 min pour F2). Ces durées sont moins importantes que pour les bâchées de temps sec et peuvent s'expliquer par un pompage plus important en fonctionnement en mode temps de pluie (80 l/s au lieu de 40 l/s).

La Figure 48 présente le temps de séjour dans le filtre identifié comme le début du pompage d'une bâchée et la fin de vidange en sortie de filtre.

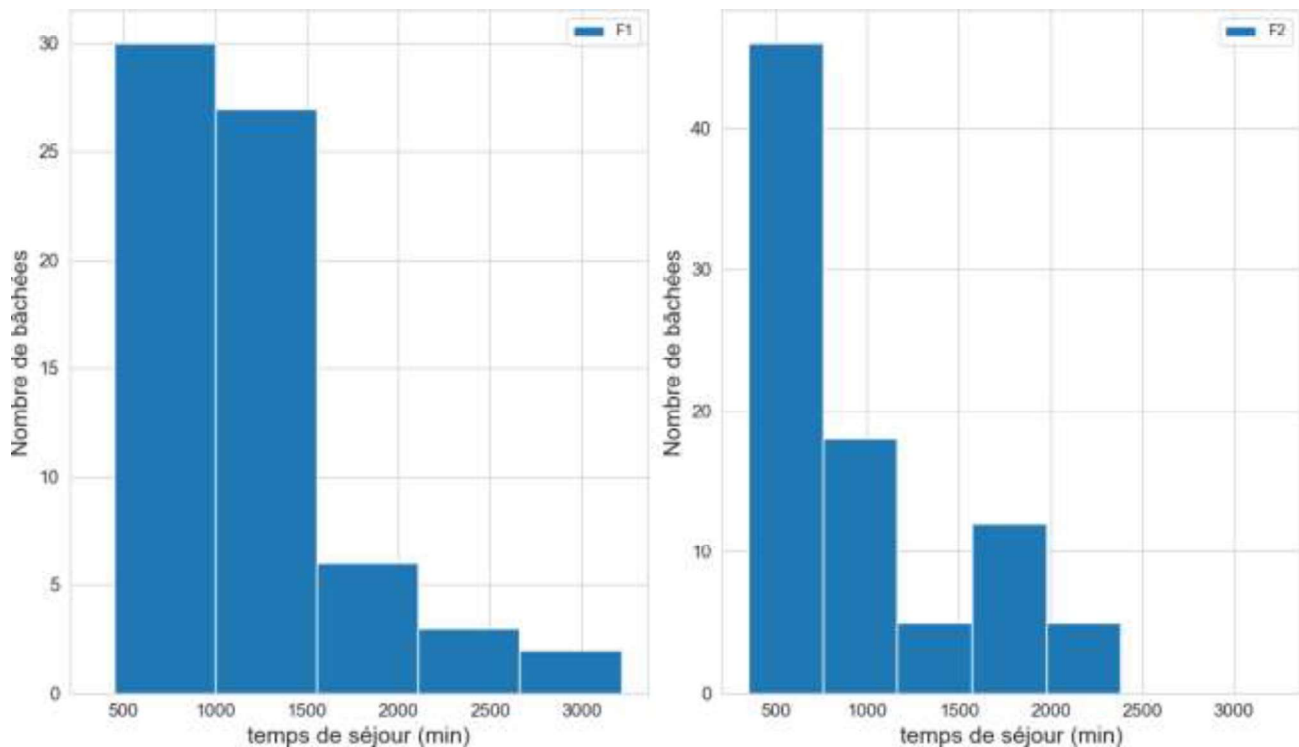


Figure 48 : temps de séjour d'une bâchée de temps de pluie pour chaque compartiment.

Comme attendu, les temps de séjours dans chaque compartiment sont variables car dépendant de la nature des événements pluvieux. Cette durée se situe entre 5h51 pour le compartiment F2 jusqu'à 2 jours et 5h36 pour le compartiment F1.

Comme évoqué dans le paragraphe 5.3, sur les 1062 mm de pluie, 283,8 mm de pluie ne sont pas repris dans les fonctionnements en mode temps de pluie (soit environ 27%).

La Figure 49 montre la répartition des événements pluvieux ayant entraînés le déclenchement d'un mode temps de pluie pour les modes « normal », « dégradé seuil » et « dégradé tempo ».

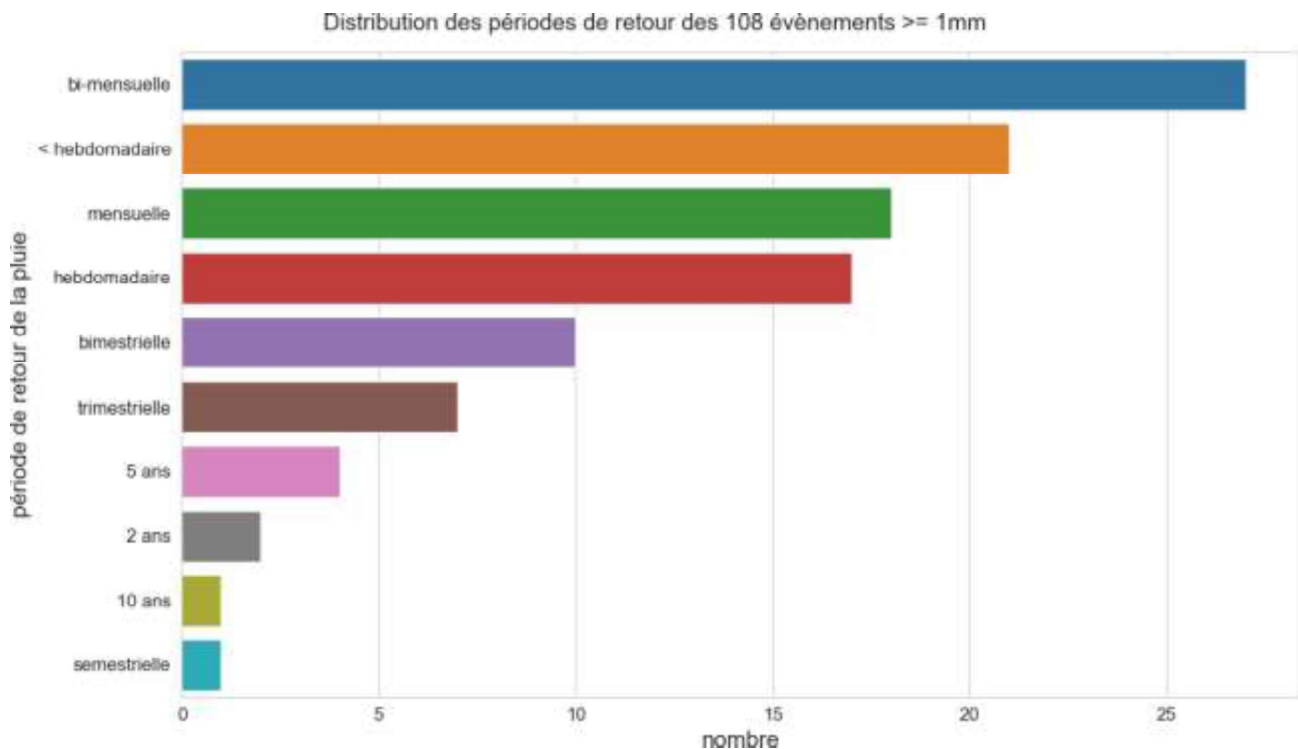


Figure 49 : distribution de la période de retour des événements ayant déclenchés le mode temps de pluie pour les types « normal », « dégradé tempo » et « dégradé seuil ».

Le fonctionnement en mode temps de pluie peut être déclenché avec des pluies dont la période de retour est inférieure à une fréquence hebdomadaire. Il est à noter, sur la période d'étude, plusieurs périodes de retour de fréquence supérieure à 2 ans.

La Figure 50 montre cette même distribution pour chacun des trois types de déclenchement.

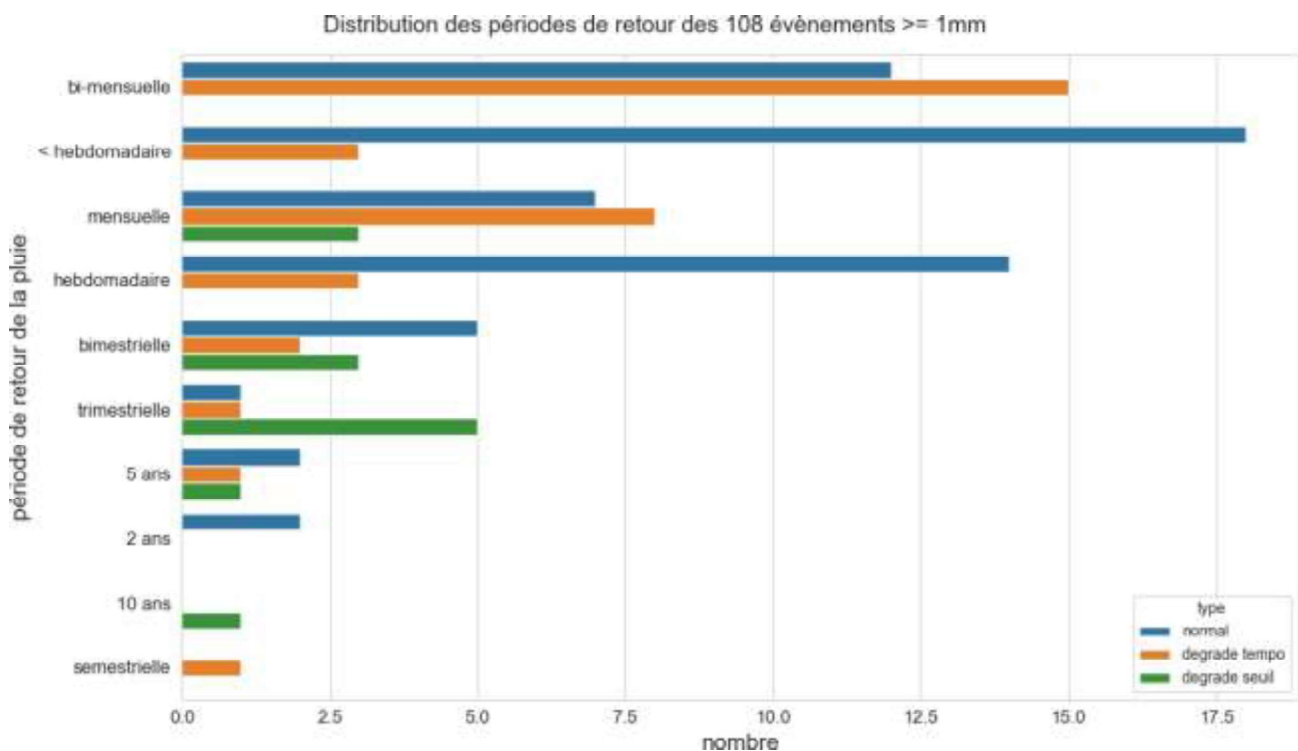


Figure 50 : distribution de la période de retour des événements ayant déclenchés le mode temps de pluie pour les types « normal », « dégradé tempo » et « dégradé seuil » pour chacun de ces trois types.

Cette figure montre que logiquement, le fonctionnement en mode « dégradé seuil » arrive pour des périodes de retour importantes (à partir de mensuelle).

6 CONCLUSION

Le présent rapport a permis de rappeler la description du système, de présenter son fonctionnement théorique et de préciser l'instrumentation mise en place pour son suivi hydrologique.

A partir des données enregistrées entre le 01/05/2021 et le 31/12/2023, une analyse du fonctionnement du système a été réalisée.

Les données enregistrées à P115 ont montré que le débit moyen des eaux claires parasites par temps sec dans le réseau P115 pouvaient augmenter de manière inexpliquée et avoir des impacts sur le fonctionnement de la station de pompage. La difficulté à mesurer les faibles débits, ne permet pas de boucler le bilan hydrique sur la totalité de la période d'étude (volume entrant estimé à partir de la mesure à P115 supérieur au volume envoyé vers le filtre depuis la station de pompage). Ces débits semblent surestimés.

Trois modes de fonctionnement « temps sec », « temps de pluie » et « grande pluie » ont été identifiés lors de la présentation du fonctionnement théorique de la station de pompage. Ces trois modes ont bien été observés dans les données et le passage d'un mode à un autre est satisfaisant. Des difficultés ont cependant été observées avec des passages inopinés de temps sec à temps de pluie en l'absence de pluie. En effet, la détection d'un événement de temps de pluie est basée sur des temporisations dépendantes du débit moyen des eaux claires parasites dans le réseau P115 par temps sec et celui-ci peut augmenter de manière imprévue comme expliqué précédemment.

Trois types de passage du mode temps sec au mode temps de pluie sont prévus dans l'automatisme de la station. Le mode « normal », le mode « dégradé tempo » et le mode « dégradé seuil ». Le déclenchement de ces trois types de passage est là aussi influencé par la temporisation « temporisation temps sec » lors de la phase de remplissage.

Dans les deux modes « dégradés », le déclenchement du mode temps de pluie, intervient alors que le pompage temps sec a commencé ce qui induit l'envoi d'un volume d'eau d'origine pluviale vers le filtre alors que le mode temps sec est toujours actif. La durée de la temporisation « temporisation vidange bache temps sec » va influencer la valeur de ce volume.

Les durées de ces deux temporisations impactent donc le fonctionnement de la station de pompage et sont difficiles à fixer. Elles doivent être adaptées au débit fluctuant dans le réseau P115. De même, elles doivent permettre d'éviter ou de réduire le pompage de volumes d'origine pluviale vers le filtre en mode temps sec.

Au niveau du filtre pompé, les cycles de saturation et de flaquage sont observés sur les données et sont conformes au fonctionnement théorique. Cependant des échanges d'eau entre les deux compartiments sont observés. Ces derniers sont dus à une faille dans le merlon central et à des débordements suite à la mise en charge à l'amont du filtre par la présence dense de roseaux.

Le calcul des débits en sortie des compartiments à partir des hauteurs mesurées via une loi d'orifice est imprécis et ne permet pas de boucler le bilan hydrologique au niveau du filtre. Ces débits semblent également surestimés.

Les résultats des bilans réalisés à l'échelle globale, saisonnière et événementielle montrent que les deux compartiments ont été sollicités de manière plutôt homogène. Cependant, l'analyse des échanges entre les deux compartiments montre que le compartiment F1 est davantage sollicité que le F2. Le mode temps sec représente une grande partie (près des 2/3) de la charge hydraulique annuelle. Le filtre est également davantage sollicité en été qu'en hiver à la fois par temps sec et par temps de pluie, avec un filtre F2 plus sollicité en été qu'en hiver.

L'analyse des bâchées de temps sec montre un débit de remplissage peu variable hors des périodes d'augmentation inexpliquée du débit dans le réseau P115.

L'analyse des ratios de pluie en fonction des trois types de fonctionnement montre que le mode « dégradé seuil » est celui qui présente les ratios les plus importants car seuls les événements pluvieux

importants peuvent le déclencher. Les deux autres types « normal » et « dégradé tempo » affichent des ratios de pluie de même ordre de grandeur avec cependant des durées de remplissage plus longues pour le mode « dégradé tempo ».

7 ANNEXES

7.1 Table des illustrations

7.1.1 Figures

Figure 1 : schéma de principe du système étudié.....	7
Figure 2 : localisation des trois ouvrages du système étudié.	9
Figure 3 : coupe du déversoir d'orage au niveau de P115.	9
Figure 4 : schéma de la station de pompage.....	10
Figure 5 : schéma du filtre planté de roseaux.....	11
Figure 6 : coupe du filtre planté.....	12
Figure 7 : réseau de pluviomètre de la ville de Paris.....	13
Figure 8 : localisation des capteurs de mesures hydrauliques de la station de pompage.....	15
Figure 9 : localisation des capteurs de mesures hydrauliques du filtre planté de roseaux.....	17
Figure 10 : cumuls journalier des pluviomètres PL01, PL07 et PL09 pour le mois d'avril 2023.....	19
Figure 11 : Débit à P115 entre le 4 et 5 août 2021 – débit moyen entre 8 et 9 l/s.	21
Figure 12 : Débit à P115 sur entre le 5 et 6 mars 2022 – débit moyen d'environ 12 l/s.....	22
Figure 13 : exemple apport supplémentaire à P115.	23
Figure 14 : volume journalier enregistré au regard P115.	24
Figure 15 : fonctionnement théorique de la station de pompage.....	25
Figure 16 : exemple de fonctionnement conforme au fonctionnement théorique, avec des durées de temporisation adaptées au débit d'eaux claires à P115.....	27
Figure 17 : exemple de fonctionnement conforme au fonctionnement théorique, avec des durées de temporisation non optimales.....	28
Figure 18 : exemple de dysfonctionnement lié à la temporisation "temporisation temps sec" trop longue.	29
Figure 19 : exemple de dysfonctionnement lié à la temporisation "temporisation vidange bache temps sec" trop courte.....	30
Figure 20 : schéma de principe du flaquage du compartiment prioritaire en temps de pluie normale ...	32
Figure 21 : exemple de fonctionnement de type "normal".....	33
Figure 22 : exemple de fonctionnement de type "dégradé tempo".....	34
Figure 23 : exemple de fonctionnement de type "dégradé seuil".....	36
Figure 24 : exemple de fonctionnement du filtre pour des bâchées de temps sec.....	38
Figure 25 : exemple de dysfonctionnement du filtre pour des bâchées de temps sec.	39
Figure 26 : exemple de fonctionnement du filtre en mode pluie normale.....	40
Figure 27 : exemple de fonctionnement du filtre en mode grande de pluie.	41
Figure 28 : exemple de dysfonctionnement du filtre en mode pluie normale.....	42
Figure 29 : cumul pluviométrique annuel.....	44
Figure 30 : identification des évènements de pluie dont le cumul est supérieur à 1mm.....	45

Figure 31 : distribution de la période de retour des évènements	45
Figure 32 : bilan des volumes transités par le système sur la totalité de la période d'étude.	46
Figure 33 : bilan des volumes transités par le système sur la période 2022-2023.	47
Figure 34 : bilan des volumes mesurés en sortie du compartiment non prioritaire.	48
Figure 35 : bilan des volumes pompés par mode de fonctionnement et la répartition par compartiment.	49
Figure 36 : durées cumulées en fonction du mode de fonctionnement.....	50
Figure 37 : durées de flaquage par compartiment.....	51
Figure 38 : bilan des volumes selon la saison	52
Figure 39 : volumes pompés par saison et selon le mode de fonctionnement pour chaque compartiment.	52
Figure 40 : répartition des cumuls de pluie par saison	53
Figure 41 : caractéristiques des bâchées de temps sec.....	55
Figure 42 : temps de réaction des compartiments F1 et F2 à un pompage par temps sec.....	56
Figure 43 : temps de séjour d'une bâchée de temps sec pour chaque compartiment.....	56
Figure 44 : exemple de graphe pour une bâchée de temps de pluie.....	58
Figure 45 : ratio volume temps de pluie et durée de remplissage par type d'évènement.....	59
Figure 46 : volumes vidangés prématurément par type de fonctionnement.....	60
Figure 47 : temps de réaction des compartiments F1 et F2 à un pompage par temps de pluie.	61
Figure 48 : temps de séjour d'une bâchée de temps de pluie pour chaque compartiment.....	62
Figure 49 : distribution de la période de retour des évènements ayant déclenchés le mode temps de pluie pour les types « normal », « dégradé tempo » et « dégradé seuil ».....	63
Figure 50 : distribution de la période de retour des évènements ayant déclenchés le mode temps de pluie pour les types « normal », « dégradé tempo » et « dégradé seuil » pour chacun de ces trois types.	63