



OPUR : Observatoire d'hydrologie urbaine en Île de France
Thème de recherche R3 sur la gestion à la source des eaux pluviales

Action de recherche R3.5 : Analyse des dynamiques temporelles au niveau d'un ouvrage de biorétention

L'IMPACT DU VIEILLISSEMENT SUR LES PROPRIETES HYDROLOGIQUES D'UNE NOUE DE BIO-RETENTION

*Rapport final OPUR
Santiago Sandoval
Marie Christine Gromaire
Mai 2024*



Table des matières

Introduction.....	3
Description du site expérimental (reprise de la Thèse de Kanso, 2018).....	4
Noue Filtrante.....	5
Suivi de variables environnementales.....	7
Etat de lieux des données acquises en continu.....	8
Validation de données.....	9
Analyse préliminaire de données de teneur en eau et potentiel matriciel	10
Analyses de corrélation teneurs en eau	13
Courbes de rétention	14
Analyses approfondies de données de teneur en eau et potentiel matriciel.....	15
Analyse de ANOVA (two-ways repeated measurements).....	16
Courbe de rétention globale	17
Impact de l'évolution du substrat sur les variables hydrologiques du système	18
Essais de laboratoire sur le substrat.....	25
CONCLUSIONS	27
REFERENCES	28

Introduction

La gestion intégrée du cycle de l'eau est reconnue comme un aspect essentiel du développement de villes durables et résilientes. Dans ce contexte, une série de solutions techniques ont été développées pour gérer le ruissellement urbain à travers des systèmes décentralisés (c'est-à-dire reproduisant les conditions hydrologiques qui prévalaient avant le développement urbain). En particulier, les bassins de biorétenzione restent parmi les systèmes les plus étudiés et préconisés. D'après les expériences précédentes, les avantages hydrologiques des systèmes de biorétenzione restent largement étudiés (p.e., la réduction du ruissellement, l'évapotranspiration), en particulier au cours des premières années de fonctionnement des systèmes. Cependant, peu d'études se concentrent sur l'évaluation de l'évolution potentielle des bénéfices hydrologiques fournis par ces ouvrages à long terme (p.e. après plus de 5 ans de fonctionnement). En effet, les systèmes de biorétenzione peuvent être influencés dans la longue durée par les facteurs contrastés suivants : (i) le colmatage par la contribution des matières en suspension dans les eaux de ruissellement, (ii) le compactage du sol, (iii) la croissance de la végétation ou (iv) l'activité microbiologique (Wang et al., 2021).

Par conséquent, un aspect fondamental pour comprendre cette évolution reste la compréhension de l'évolution du milieu solide (substrat) dont le système est composé. A cette fin, une alternative prometteuse reste l'utilisation de la mesure en continu *in situ* des variables hydrologiques (p.e. le contenu volumétrique en eau -VWC-, le potentiel matriciel -MP-, les précipitations -R-) pendant des périodes prolongées, accompagnée de caractérisations supplémentaires *in situ* et en laboratoire de ces milieux solides. Par conséquent, les objectifs de cette étude sont les suivants (i) évaluer l'évolution des propriétés hydrodynamiques du milieu solide dans une baïssière de biorétenzione au moyen d'un suivi en ligne et de données *in situ*, et (ii) relier l'évolution de ces propriétés du milieu solide à des changements potentiels dans la performance hydrologique du système.

Une deuxième démarche en cours de développement dans le cadre de la valorisation de données OPUR est la production d'une note sur méthodes de validation de données qui pourraient être employée pour traiter les données brutes récupérées depuis les bases de données. Dans ce cadre-là, il est proposé l'incorporation de codes informatiques développés en langage Python sur la plateforme OPUR (ou les données se retrouvent actuellement). Enfin, cela pourrait permettre de constituer un module informatique fonctionnel de traitement de données, en proposant différents outils de traitement, ainsi que des données déjà traitées aux utilisateurs variés. Dans cette continuité, des méthodes mathématiques originales pour le traitement de données pourraient être développées sur Python (p.e. détection d'outliers, filtrage, imputation de valeurs manquantes, étalonnage de capteurs, attribution d'incertitudes).

En effet, les développements autour du traitement et validation de données viendront renforcer de questions scientifiques, ou la méthodologie se base sur l'exploitation et valorisation de ces données, tel que pour ce cas d'étude du vieillissement de la Noue de biorétenzione de Compans.

Dans un premier temps, des premières expériences de traitement de données ont permis d'aborder la question scientifique principale de ce rapport : *l'impact du vieillissement de la noue filtrante sur ses propriétés hydrologiques*.

Description du site expérimental (reprise de la Thèse de Kanso, 2018)

Le site expérimental est situé au nord du département de la Seine et Marne, sur le territoire de la commune de Compans, notamment dans la zone industrielle de Mitry-Compans (Figure 1). Cette activité industrielle constitue une source importante de pollution pour le site d'étude. Par ailleurs, situé à proximité de l'aéroport Charles de Gaulle, le site est soumis à la pollution du trafic aérien (Kanso, 2021).

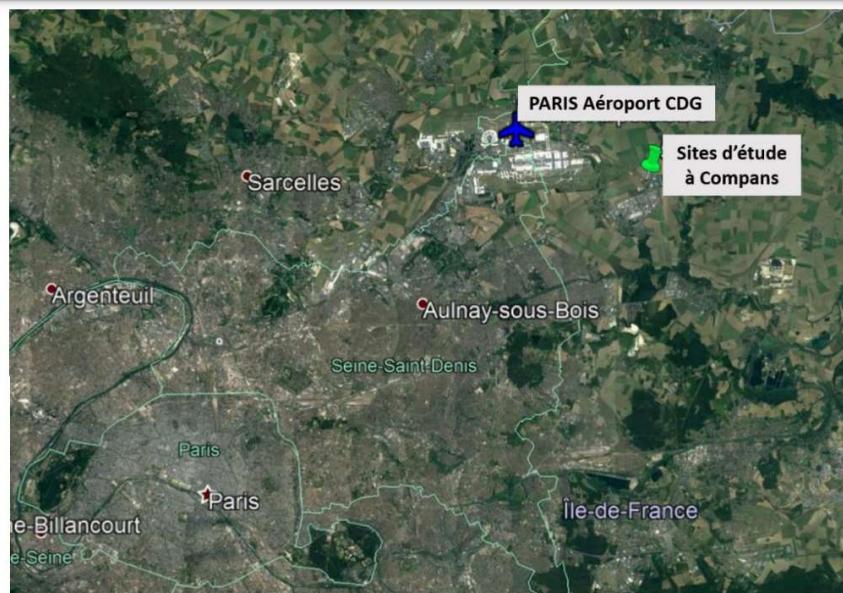


Figure 1. Vue aérienne site de Compans (source Kanso, 2021)

Les sites étudiés récupèrent les eaux de ruissellement d'une route départementale RD 212. Cette route est formée de 2x2 voies avec un trafic élevé d'environ 11 000 véhicules/jour par sens de circulation. Le bassin versant des ouvrages étudiés est constitué de deux voies sur quatre de cette chaussée, c'est-à-dire une seule direction de circulation. La largeur de ces deux voies est de 10,5 m.

La pente transversale de 2% de la route permet aux eaux de ruissellement de s'écouler vers les ouvrages linéaires de gestion des eaux pluviales longeant la route. L'eau n'est pas canalisée le long de la route mais ruisselle en lame mince vers les ouvrages étudiés de gestion des eaux pluviales à la source. Concrètement, trois ouvrages ont été étudié tout au long de démarches menées dans le cadre d'OPUR 5 (deux bandes enherbées et une noue filtrante). Les bassins versants alimentant chaque ouvrage ont été bien séparés à l'aide des petits redans en bétons.



Figure 2. Circulation routière à côté du site expérimental (source Kanso, 2021)

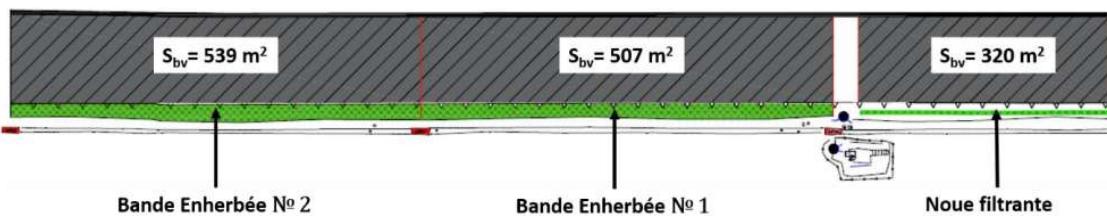


Figure 3. Schéma du site expérimental (source Kanso, 2021)

Les initiatives de recherche qui seront décrites dans ce rapport se focalisent sur l'ouvrage de la Noue Filtrante (Figure 3).

Noue Filtrante

Il s'agit d'une structure linéaire et végétalisée de traitement des eaux pluviales. Elle a été installée en mars 2016 le long d'une portion de la route. Ce système a été conçu pour récupérer et dépolluer les ruissellements associés aux précipitations courantes. Sa longueur est de 31 m et sa largeur de 0,7 m. Cette nouve filtrante est formée d'un massif filtrant composé d'un mélange sol-sable (60% de sable et 40% de terre) sur une épaisseur de 50 cm. Selon le système de classification de l'USDA, le massif filtrant est du type "Limon sableux", ayant la texture suivante : 72.1 % de sable, 18.2 % de limon et 9.7 % d'argile. Ce massif filtrant est drainé par un drain de 10 cm de diamètre. Une géomembrane entoure le massif filtrant et assure son étanchéité pour des besoins expérimentaux : la collecte des percolats pour les analyses chimiques et le calcul du bilan hydrique.

La route drainée vers cette nouve est longue de 31 m et large de 10,5 m. Cette nouve a une pente longitudinale qui varie entre 1,4 et 2 %, ce qui réduit la zone de stockage en surface. Afin d'agrandir ce dernier, des redans en béton ont été installés à 10, 20 et 30 m approximativement de l'extrémité amont

de la noue avec une hauteur de 20, 22 et 14 cm respectivement (Figure 2.11). Le 14 cm correspond au bas du V du déversoir triangulaire placé au milieu du redan en aval. Une coupe longitudinale de la noue montrant l'emplacement des redans et les dimensions de ceux-ci est présentée dans la Figure 5.

Le volume d'eau stockée dans la noue est calculé à partir de la mesure de la surface transversale (en surface) et de sa variation en fonction de la hauteur d'eau $S(h)$ ainsi que de la variation de la hauteur d'eau en fonction de la localisation dans la noue (x). En raison de la variation en section d'un endroit à un autre la noue est divisée en 3 parties et le volume de chaque partie était calculé séparément. Ces parties sont l'amont, le milieu et l'aval. Le volume de stockage est égal à l'intégrale de $S(h)* h(x)$ ayant comme bornes les abscisses x de chaque partie. Les résultats du calcul du volume de stockage en surface et des volumes de massif filtrant pour chaque partie de la noue sont donnés dans la Figure 4 ci-dessous. L'eau qui peut être stockée à la surface et le volume du sol sont respectivement d'environ 1 et 9,5 m³.

	Stockage en surface			
	$S(h)$ [cm ²] h en cm	$h(x$ en m) h en cm	Volume [m ³]	Volume du massif filtrant [m ³]
Amont	$1,12h^2 + 20,87h - 19,98$	$1,96x + 3$	0,39	2,86
Milieu	$0,99h^2 + 21,75h - 22,94$	$2,04x + 0,57$	0,40	3,13
Aval	$1,20h^2 + 24,02h - 23,83$	$1,31x$	0,24	3,52
		Total	1,03 m³	9,51 m³

Figure 4. Surface de stockage noue d'infiltration

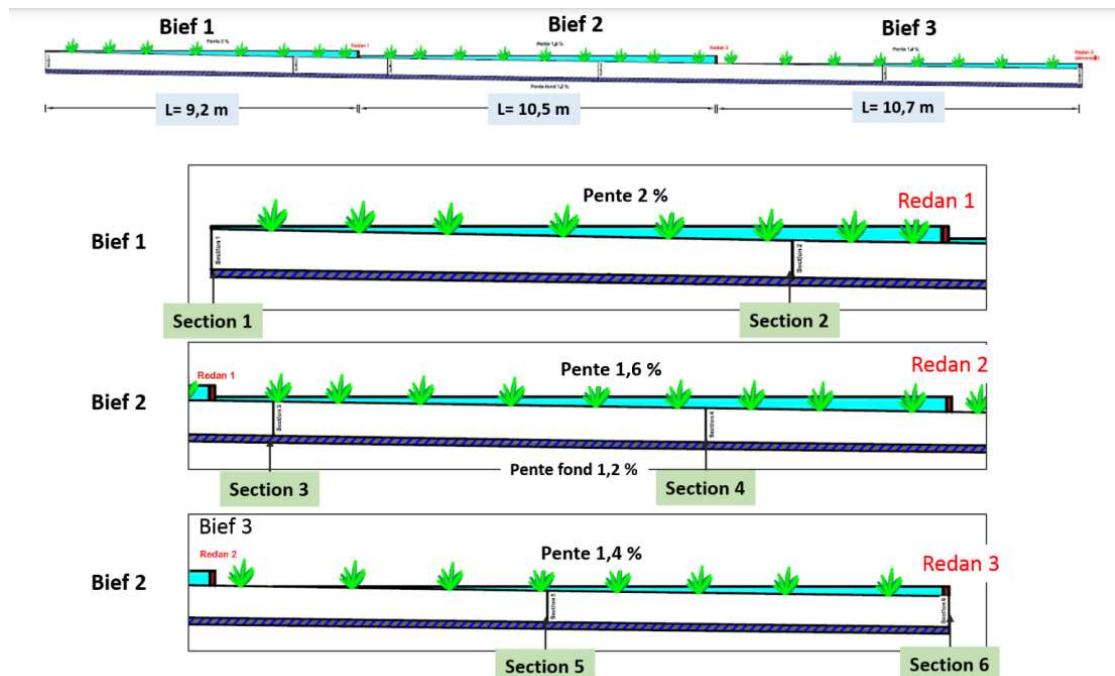


Figure 5. Schème longitudinal Noue d'Infiltration (source Kanso, 2021)

Suivi de variables environnementales

- Mesure de la pluie

Une station météorologique, mise en place par le CD 77 dans le cadre de son expérimentation à Compans, est située sur le terrain d'un centre sportif appartenant à l'Aéroport de Paris à environ 30 m au sud-ouest du site. Cette station est gérée par la société PulsoWeb responsable de l'acquisition et du transfert des données. Dans cette station la pluie est mesurée par un auget basculant de précision de 0,2 mm (Figure 2.16). L'heure de chaque basculement d'auget est enregistrée. On peut donc calculer les cumuls et les intensités de pluie au pas de temps désiré à partir de cette chronique. Les enregistrements du pluviomètre de l'aéroport de Paris - Roissy CDG (situé à moins de 10 km) sont utilisés en cas de panne du pluviomètre Compans ou de pertes des enregistrements.

- Mesure du débit

Dans le cas de la noue filtrante, complètement étanche, l'eau est toutefois recueillie directement par un drain placé longitudinalement au fond du massif filtrant sur une pente de 1,2 %. Ce tuyau se déverse dans une cuve placée en aval de la structure. Un auget basculant d'environ 1L (Figure Méthodes expérimentales 109 2.19) mesure les débits drainés. Les enregistrements des heures de basculement sont mémorisés dans un système d'acquisition de données. Le fonctionnement de la noue prévoit une surverse par-dessus les redans lorsque le volume de stockage de surface est plein, du bief 1 vers le bief 2 et du bief 2 vers le bief 3 (Figure 5). Au niveau des redans situés à l'aval du bief 3, l'eau surverse hors de la noue par un déversoir triangulaire muni d'une sonde de mesure de la hauteur d'eau. La sonde permet la mesure de la surverse en cas de dépassement de la capacité de stockage. Ce capteur mesure à pas de 30 minutes si le niveau d'eau mesuré est inférieur à 7 cm. Le pas de temps diminue à 1 min si la hauteur est supérieure ou égale à 7 cm. Le bas du déversoir triangulaire est atteint lorsque le niveau d'eau est de 14 cm. L'angle du déversoir est de 90°.

- Mesure de la teneur en eau et du potentiel matriciel

L'état hydrique dans les ouvrages est suivi en continu à l'aide des capteurs mesurant la teneur en eau et la succion (potentiel matriciel). Les capteurs de teneur en eau sont des EC5 et EC5TE (METER Group, Inc. USA). Ces capteurs mesurent la permittivité diélectrique du sol qui varie avec la variation de la teneur en eau. Les capteurs de tensions sont des tensiomètres T8 (UMS, Munich, Allemagne). Le capteur T8 fonctionne mieux en sol humide, avec une gamme de mesure entre -85 kPa et 100 kPa. Il peut donc indiquer une saturation du sol et même la présence d'une pression hydrostatique, sans toutefois fonctionner si le sol est très sec. Ces capteurs sont choisis pour leur petite taille qui convient à la profondeur limitée du sol, leur précision et leur coût bas. Les capteurs sont connectés à des systèmes d'acquisition de données, CR1000 et CR800 (Campbell Scientific, Logan, UT), à une tension d'alimentation de 3,3 V, pour une acquisition de données à un pas de temps de 30 minutes en continu. Le moyen de communication entre le capteur et la centrale pour les capteurs numériques 5TE T8 est SDI-12. Les capteurs EC5 sont analogiques.

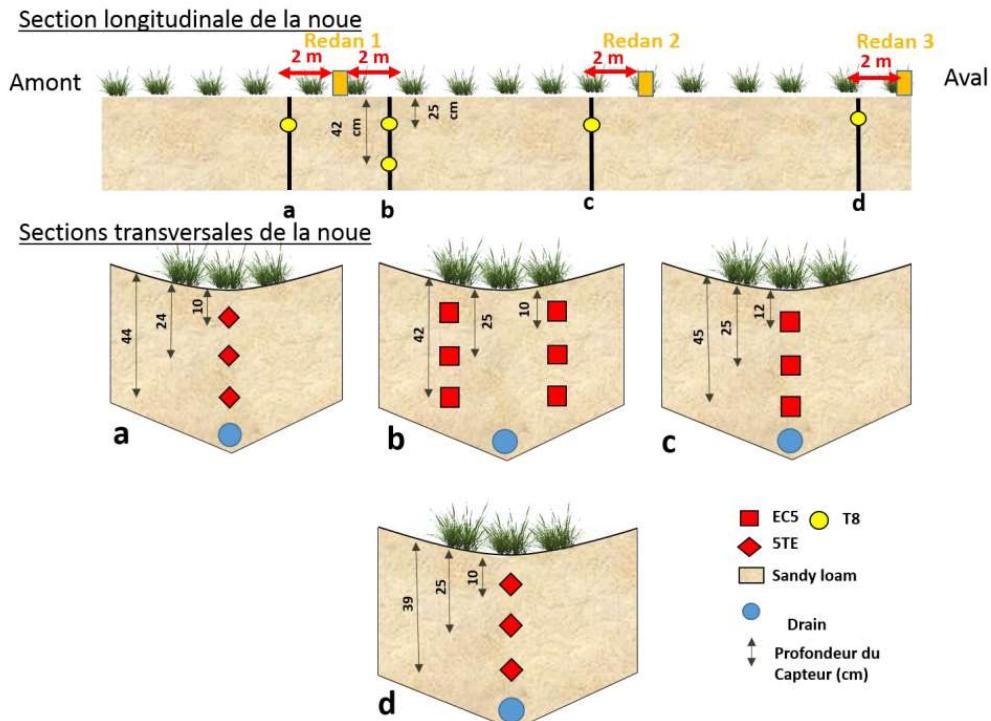


Figure 6 Localisation des capteurs de teneur en eau et tensiomètres (source : Kanso, 2021)

La Figure 6 illustre les emplacements des capteurs de teneur en eau et de tension dans la noue filtrante. Les capteurs de teneur en eau sont placés à différentes profondeurs : 10, 20 et 40 cm, dans 4 sections transversales : 1 dans le bief amont, 2 dans le bief du milieu, et 1 dans le bief aval. Ils permettent de suivre la variation de la teneur en eau du sol verticalement et longitudinalement après la séparation de la noue par des redans en béton. Dans le bief 2 deux sections de mesure sont mises en place afin de suivre la variabilité de l'état hydrique du sol dans un même bief. Pour mesurer la tension, des tensiomètres sont mises à 20 et 40 cm de profondeur dans la noue car en surface le tensiomètre ne mesure pas dans la gamme sèche.

Etat de lieux des données acquises en continu

Sur le site expérimental de la Noue Filtrante plusieurs capteurs ont été placés suite à sa construction en 2016, dans l'objectif de mesurer en continu différentes variables hydrologiques et de qualité d'eau. Une centrale d'acquisition est employée afin de récupérer les données depuis sa construction jusqu'à l'actualité (2023). Néanmoins, les mesures ont été interrompues en fin 2018 et ont été reprises en début 2022.

La liste suivante synthétise des informations complémentaires concernant les capteurs installés *in situ*, notamment les variables mesurées et la granularité des données acquises (Tableau 1).

Tableau 1. Description synthétique variables mesurées sur le site

Variable	Type de capteur	Nombre de capteurs installés dans la Noue	Granularité
Débit de sortie du drain	Auget	1	Variable
Hauteur de surverse	Sonde	1	30 min (temps sec) 1 min (événement de pluie)
Potentiel matriciel	Sonde	5	30 min
Teneur en eau sol	Sonde analogique	6	30 min
Teneur en eau sol	Sonde numérique	9	30 min

Validation de données

Pour la validation de données, un code sur Python est en cours de développement avec plusieurs modules aboutis à différents niveaux. Un premier module pour le traitement de dates (répétées ou déréglées) se trouve déjà à disposition. Un deuxième module déjà abouti permet l'agrégation temporel de données (passage entre granularités temporelles, selon le choix de l'utilisateur), ainsi que le massage de pas de temps variables au pas de temps fixe (notamment pour le cas d'augets). Le code contient un module d'identification d'outliers : différentes alternatives d'élimination ont été implémentées, notamment un module d'élimination visuel en interaction avec l'utilisateur.

- Premières expériences concernant le traitement des mesures de teneur en eau et tensiométrie :

L'approche retenue pour les premières analyses reste l'élimination visuelle de données (Figure 1) à l'aide du module *outliers*. Cela, étant donné que d'autres méthodes testées (fenêtrage de Hampel; Haidri et al., 2022) s'avèrent peu performants, vis-à-vis du fait que les chroniques restent suffisamment lisses. Voir l'exemple de la Figure 7, pour la chronique de teneur en eau EC5TE (en rouge les données sélectionnées manuellement à l'aide du code Python) :

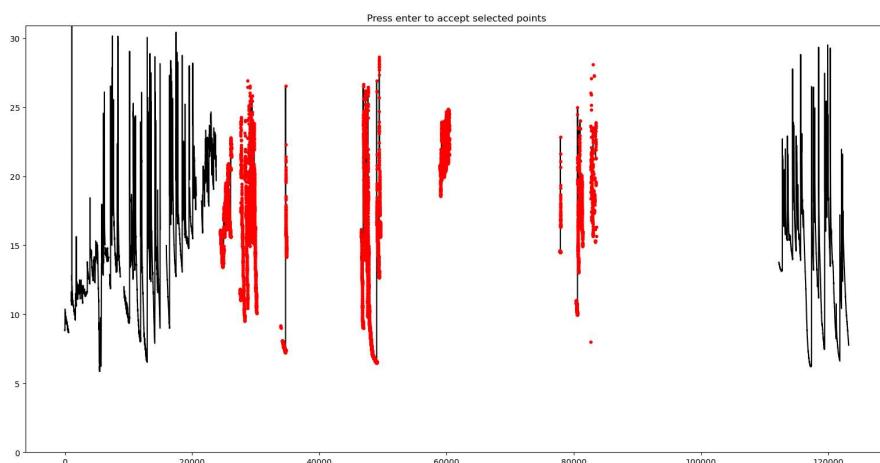


Figure 7. Fenêtre interactive développée sur Python afin d'éliminer les valeurs non-désirées manuellement

D'autres critères peuvent être testés dans ce module *outliers* (Métadier et Betrand-Krajewski, 2012). En effet, les données identifiées comme de mauvaise qualité ont comme généralité de faire partie de la période comprise entre mi 2018 et fin 2021. Cela s'explique à cause du manque de maintenance et des activités de récupération de données pendant cette période. Un filtrage avec différent type de filtrés sont possibles (médiane, moyenne, moyennes pondérées).

Concernant l'attribution des incertitudes écart-type aux signaux, deux sources peuvent être décrites, notamment la justesse et la répétabilité de chaque capteur de teneur en eau. L'expression suivante Eq 1 peut être employée dans cette objectif :

$$\mu(x)_{\text{totale}}^2 = \mu(x)_{\text{justesse}}^2 + \mu(x)_{\text{répétabilité}}^2 \quad \text{Eq 1}$$

Pour des développements postérieurs l'incertitude lié à l'étalonnage des capteurs est prévue d'être incorporée. De manière simplifiée, en considérant que les erreurs d'étalonnage suivent une loi normale, l'incertitude totale de mesure peut être estimée à l'aide de l'équation suivante Eq 2 :

$$\mu(x)_{\text{totale}}^2 = \mu(x)_{\text{justesse}}^2 + \mu(x)_{\text{répétabilité}}^2 + \mu(x)_{\text{étalonnage}}^2 \quad \text{Eq 2}$$

Où $\mu(x)_{\text{étalonnage}}$ fait référence à l'erreur d'étalonnage moyen.

Dans un cadre simplifié, on peut adopter $\mu(x)_{\text{étalonnage}} = RMSE_etal$.

Où $RMSE_etal$ reste le Root Mean Square Error d'étalonnage, calculé comme suit Eq 3:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_{\text{corrigé } i} - x_{\text{original } i})^2}{N}} \quad \text{Eq 3}$$

Avec un nombre de mesures N pour des valeurs x_{original} et $x_{\text{corrigé}}$ quelconques.

Le code Python du module *incertitudes* est actuellement développé jusqu'à l'implémentation de l'Eq 1.

Pour les mesures de teneur en eau et tensiométrie, les informations concernant les caractéristiques physiques des capteurs, les incertitudes de mesure et les lois d'étalonnage ont été reprises de l'article de Kango et al., 2020.

Analyse préliminaire de données de teneur en eau et potentiel matriciel

Les analyses préliminaires menées dans l'objectif d'explorer la question du vieillissement de l'ouvrage et l'impact sur les propriétés hydrologiques et du milieux solide qui le constitue. Pour ce faire, deux groupes de données seront comparées : période 1 (2017-2018) et période 2 (2022-2023).

Pour ce faire, les méthodes de traitement de données proposées dans la section précédente ont été appliquées pour les chroniques de teneur en eau et de potentiel matriciel.

Pour les mesures de potentiel matriciel, nous avons enlevés les valeurs ou la bouillie poreuse du tensiomètre était vide. Un léger filtre de médianes (fenêtrage mobile de 150 min, sur des données avec une granularité de 30 min) a été applique pour les mesures de tensiométrie. Pour l'attribution d'incertitudes de tensiomètres et de teneur en eau, les informations renseignées lors de la thèse de Kango (2021) ont été reprises. Il est à noter que les tensiomètres en section A et Bmed (nouveaux capteurs) ne

fonctionnent pas depuis leur installation en 2021. Également, le capteur EC5_8 (teneur en eau) n'était pas fonctionnelle pendant la période 2022-2023.

Dans cette continuité, une première analyse descriptive est proposée pour les deux périodes 1 et 2, afin de tirer des caractéristiques générales des données de teneur en eau. Des graphiques à violon sont donc proposés pour les mesures de teneur en eau en continu, en combinant les différentes sections et profondeurs dans lesquelles les capteurs ont été placées dans la Noue d'Infiltration (Figure 8 et Figure 9).

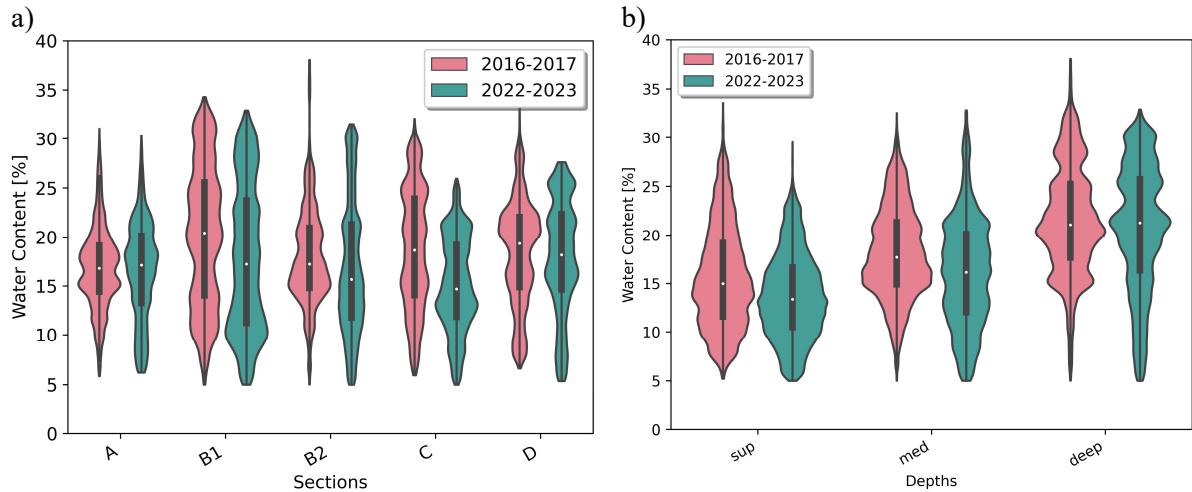


Figure 8. graph à violon pour les teneurs en eau groupées par a) section et b) profondeurs

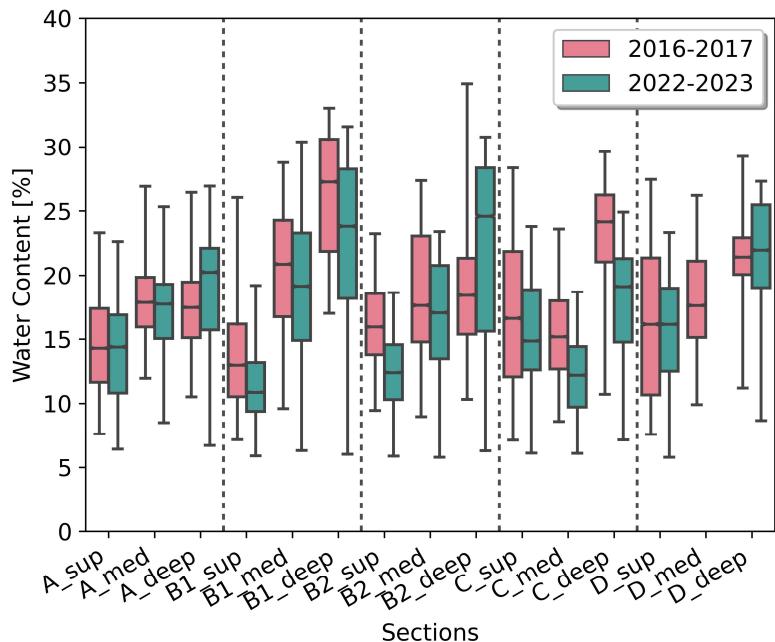


Figure 9. Graph à violon des teneurs en eau pour chaque section et profondeur

Les Figure 8 et Figure 9 permettent d'observer les généralités suivantes :

- Tendance à l'augmentation de la teneur en eau moyenne pour les emplacements plus profonds (de manière moins marquée pour la section B2 période 2016 et pour la section C période 2022) (Figure 8a).
- Une légère réduction de la teneur en eau moyenne est constatée pour les couches plus superficielles entre 2016 et 2023 (Figure 8b). Cette réduction pourrait s'expliquer par une augmentation de la macroporosité, favorisant le drainage rapide (développement racinaire vertical, précipitation CaO₃). Il reste également pertinent de comparer la pluviométrie entre les deux périodes. Pour ce faire, nous

proposons la Figure 10 qui représente le pourcentage de temps qu'une certaine précipitation journalière en mm a été dépassée, concernant les périodes 2016-2017 et 2022-2023.

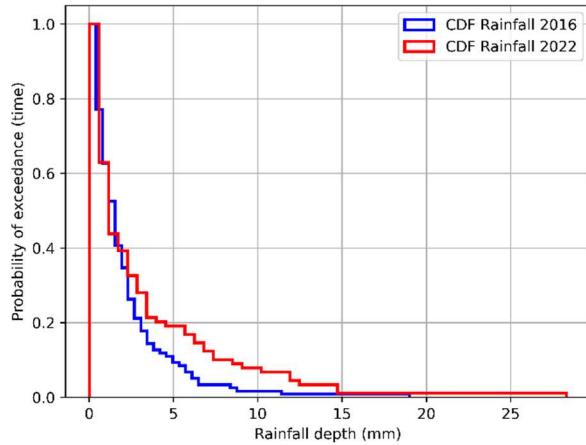


Figure 10. Courbe de probabilité de dépassement pour la précipitation journalière périodes 2016-2017 et 2022-2023

Les deux périodes possèdent une distribution de précipitations journalières similaires pour des pluies < 3 mm. Par contre, la période de 2022-2023 coïncide avec une période de sécheresse importante en France (Figure 11).

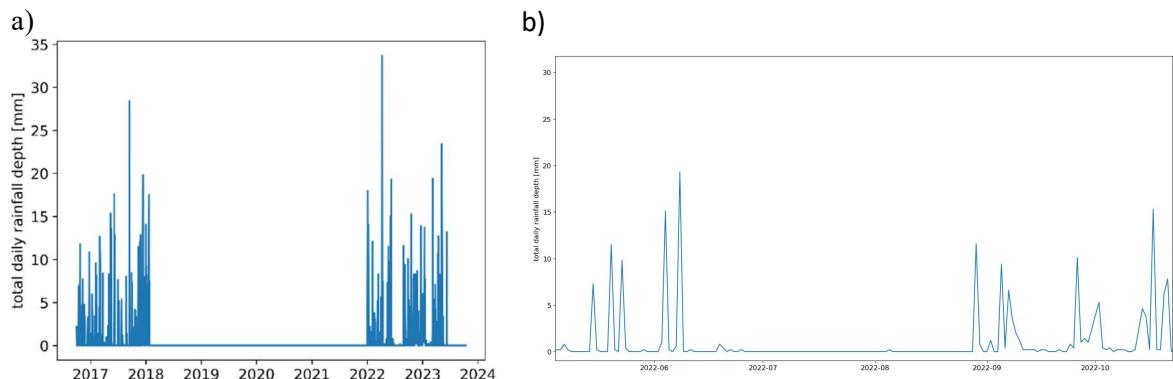


Figure 11 chronique de pluie journalière a) entière et b) zoomée sur la période de sécheresse 15/06/2022-20/08/2022

Cela expliquerait également en partie les teneurs en eau plus faibles en superficie en 2022-2023 par rapport à la période 2017-2018. En revanche, la non variation entre 2017 et 2023 des valeurs moyennes de teneur en eau autour de 22 % et les percentiles 75% autour de 30 % peut aussi s'expliquer à partir des conditions de bord constantes (c-à-d la capacité d'infiltration du tuyau perforé de drainage reste constante).

- Une réduction entre 2017 et 2023 de la teneur en eau moyenne est constaté pour les sections B et C, toute profondeur confondue (Figure 8a). La distribution de teneurs en eau paraît plus homogène pour la période 2016 par rapport à la période 2023. Cela pourrait s'expliquer à cause des différences sur la répartition d'eau dans chaque une des sections pendant l'opération de l'ouvrage.

Analyses de corrélation teneurs en eau

Une deuxième analyse de corrélation est proposée pour explorer les données de teneur en eau dans le but de vérifier la ressemblance entre les dynamiques de teneur en eau entre les différentes profondeurs et sections de la Noue Filtrante. Les résultats seront divisés pour la période 1 (2016-2017) et période 2 (2022-2023). Le Tableau 2 fourni les coefficients de corrélation entre les signaux de teneur en eau comparées par profondeur (p.e. superficie et moyenne), sur une section correspondante (Tableau 2).

Tableau 2. Corrélations entre les signaux de teneur en eau entre différentes profondeurs

a) 2016-2017

	Section A	Section B1	Section B2	Section C	Section D
sup-moy	0,93	0,73	0,84	0,88	0,86
moy- prof	0,95	0,83	0,81	0,77	0,47
sup-prof	0,88	0,80	0,77	0,78	0,55

b) 2022-2023

	Section A	Section B1	Section B2	Section C	Section D
sup-moy	0,97	0,92	0,87	0,91	NaN
moy- prof	0,96	0,81	0,92	0,85	NaN
sup-prof	0,93	0,78	0,75	0,80	0,77

Il est possible de constater dans le Tableau 2 des corrélations relativement importantes entre les dynamiques de teneur en eau liées aux couches plus superficielles de la Noue pour la période 2016-2017, qui en suite deviennent plus intenses pour la période 2022-2023. Cela peut s'expliquer par une augmentation de la vitesse de drainage dans les couches superficielles avec le vieillissement de l'ouvrage, ce qui est compatible avec les interprétations fournies pour les Figure 8 et Figure 9, concernant les réductions de teneur en eau moyenne dans les couches superficielles. Ce résultat semble en cohérence avec Kanso et al, 2018. Les corrélations en lien avec la profondeur moyenne dans la section D pour la période 2022-2023 n'ont pas pu être calculées, étant donné que le capteur correspondant n'était pas en fonctionnement pendant cette période.

Par la suite, les corrélations entre les dynamiques de teneur en eau ont été calculées entre les différentes sections de l'ouvrage par profondeur. Le Tableau 3 a et b montre les résultats synthétisés pour les sections les plus proches dans l'espace (p.e. A-B1), concernant les deux périodes 2016-2017 et 2022-2023.

Tableau 3. Corrélations entre les signaux de teneur en eau entre différentes sections

a) 2016-2017

	A-B1	A-B2	B1-B2	B1-C	B2-C	C-D
sup	0,86	0,82	0,83	0,79	0,87	0,90
moy	0,86	0,82	0,75	0,83	0,86	0,82
prof	0,81	0,77	0,79	0,81	0,71	0,78

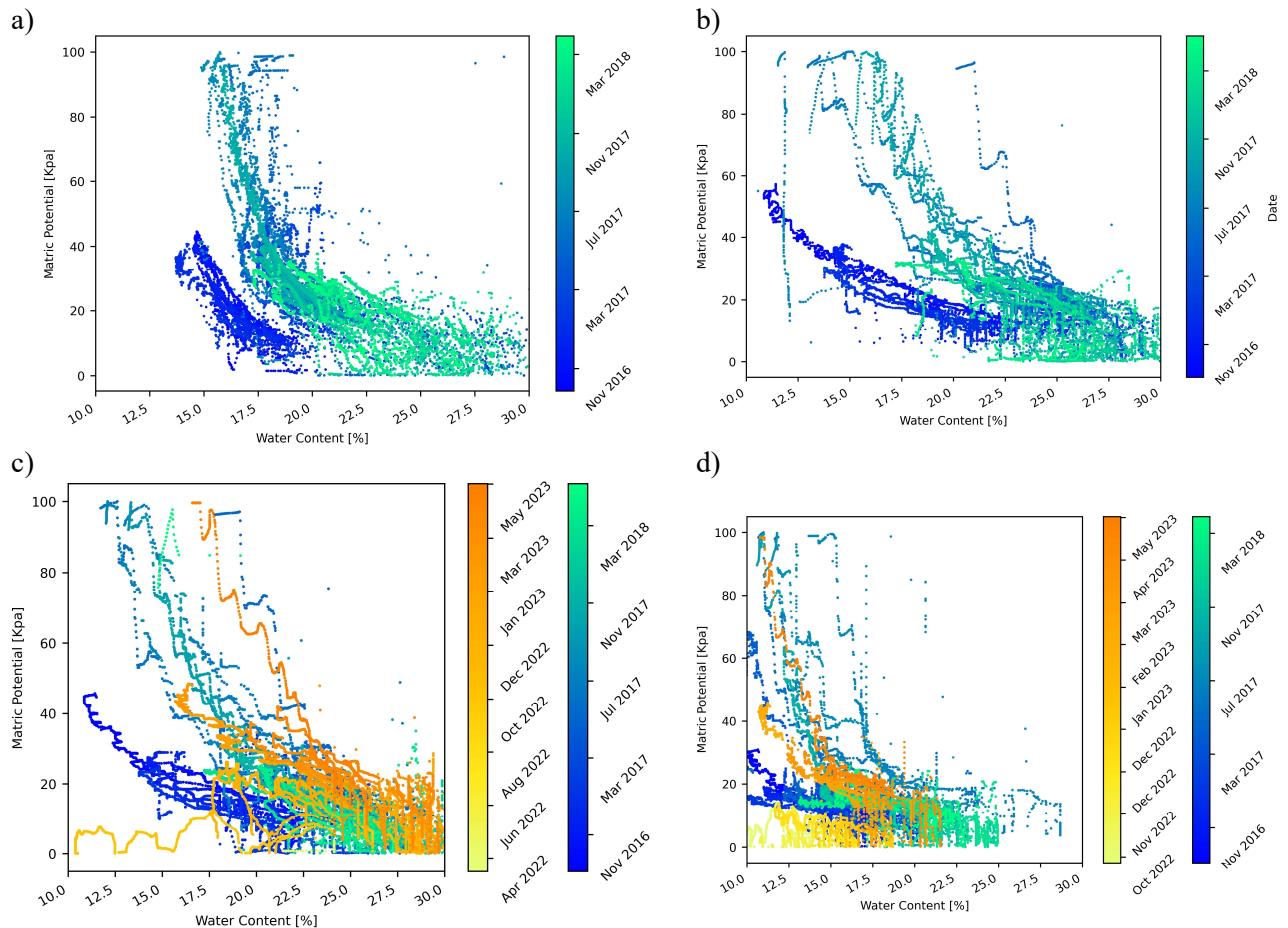
b) 2022-2023

	A-B1	A-B2	B1-B2	B1-C	B2-C	C-D
sup	0,84	0,82	0,83	0,92	0,85	0,91
moy	0,88	0,88	0,86	0,94	0,85	
prof	0,86	0,91	0,97	0,95	0,92	0,93

Une forte augmentation de la corrélation entre les signaux de teneur en eau enregistrés à chaque section dans la partie la plus profonde de l'ouvrage est constatée (Tableau 3). Cela pourrait suggérer une augmentation (de 2017 à 2023) de connectivité horizontale entre les différentes sections en profondeur. Un potentiel développement racinaire horizontal dans le fond de l'ouvrage pourrait expliquer ces observations. Cette homogénéisation des flux horizontaux pourrait également expliquer la légère augmentation de la variabilité des teneurs en eau en profondeur de 2016 à 2023 (Figure 8b).

Courbes de rétention

L'analyse suivante présente les courbes de rétention de la Noue d'Infiltration obtenues à l'aide des mesures en continu (Figure 12).



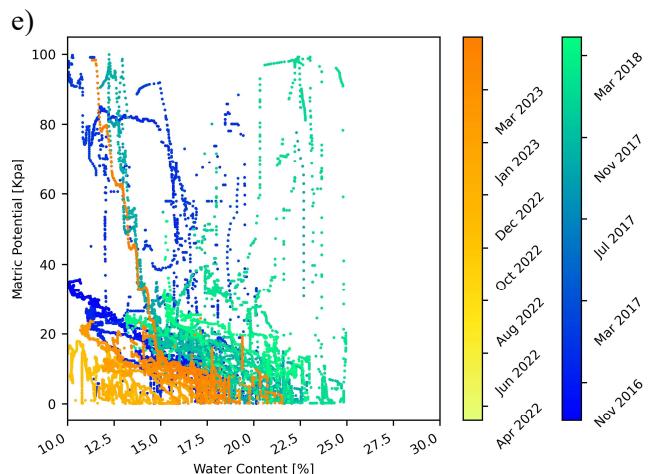


Figure 12. Courbes de rétention pour différentes sections obtenues à l'aide de la mesure en continu : a) section A à 10cm, b) section B à 10cm, b) section B à 40cm, b) section C à 10cm, b) section D à 10cm

Pour les sections A et B nous pouvons constater une augmentation de la capacité de rétention du milieu (shift de la courbe de rétention vers le haut et vers la droite) durant la période 2016-2017 (Figure 12).

Selon les hypothèses formulées à partir des résultats de boxplots (Figure 8 et Figure 9), les teneurs en eau moyennes de mesurées tout au long des couches superficielles de l'ouvrage se réduisent entre 2017 et 2022, possiblement à cause d'une potentielle augmentation du drainage rapide. D'autre part, nous constatons également une légère augmentation de la capacité de rétention en eau du sol dans l'ouvrage pour la section B en profondeur, concernant les périodes 2016 et 2023 (Figure 12c). Il semblerait que les données de Potentiel Matriciel enregistrées ne possèdent pas une bonne qualité afin de pouvoir fournir de conclusions robustes sauf pour la section B. Cela a été également constaté en vérifiant de manière visuelle les chroniques, dont des incohérences physiques ont été observées (p.e. potentielles matricielles plus élevées dans les sections avec de teneurs en eau plus élevées). Dans ce sens-là, les différences météorologiques (pluie, évapotranspiration) entre les deux périodes 2017-2023 paraissent une explication plus vraisemblable aux réductions des teneurs en eau moyennes entre ces deux périodes, par rapport à une augmentation exclusivement du drainage rapide des couches superficielles et/ou de la capacité de rétention des couches les plus profondes.

Analyses approfondies de données de teneur en eau et potentiel matriciel

Une difficulté pour pouvoir interpréter les résultats reste la quantité d'information fournie par les différents capteurs, ainsi que toutes les variétés de comparaisons qui peuvent être apportées. Dans le but de contourner cet obstacle, nous proposerons une analyse de groupement de données et ainsi fournir de conclusions plus globales pour la totalité de la Noue d'Infiltration. Des analyses complémentaires seront apportées à partir de ces analyses dans la suite du document.

Dans l'objectif de fournir plus d'interprétabilité aux données, cette section proposera une analyse de groupement sur la base d'une ANOVA (*Analysis of Variance*), en utilisant les chroniques de teneur en eau enregistrées par la totalité des capteurs.

Analyse de ANOVA (two-ways repeated measurements)

Cette analyse a pour objectif d'identifier quel facteur regroupe « mieux » les données, sur plusieurs possibilités catégoriques : la « section » (A, B1, B2, C, D), la « profondeur » (sup, med, prof), une interaction entre « section » et « profondeur » (voir Figure 6). L'analyse a été appliquée sur un principe de fenêtrage glissant, afin de constater la variabilité temporelle sur le facteur qui groupe mieux les données pour la période 2016-2017 et 2022-2023 (Figure 13).

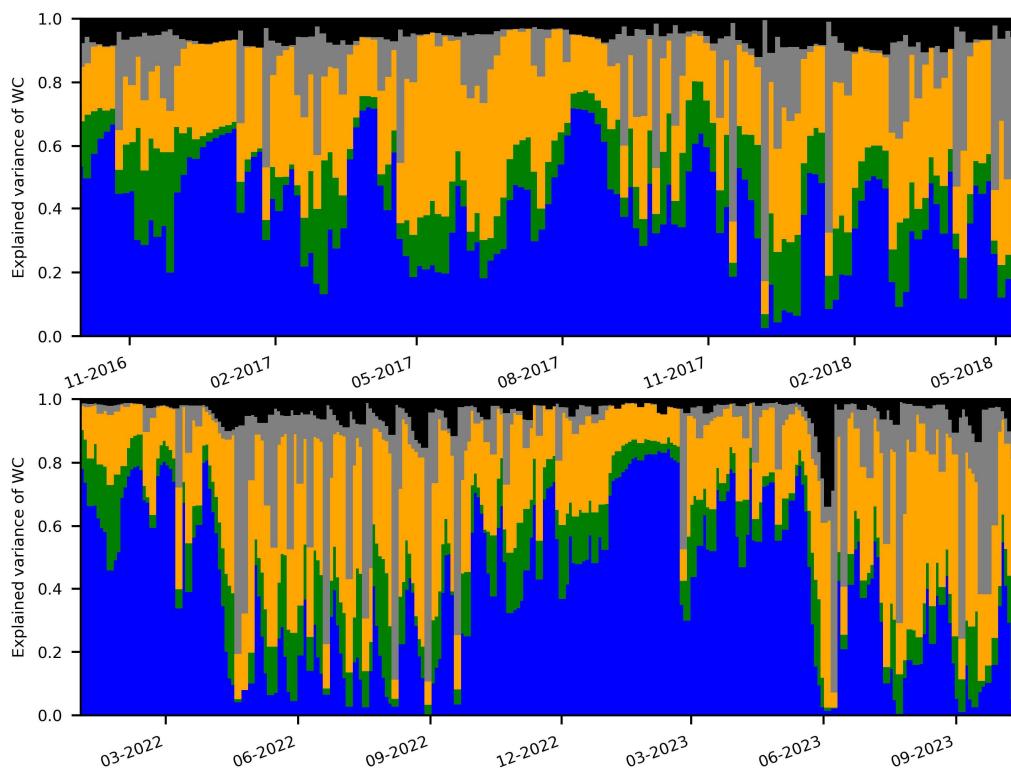


Figure 13. Two ways repeated measurements ANOVA au cours du temps pour les teneurs en eau.

Cette courbe (Figure 13) montre l'évolution temporelle de pourcentages de variance expliquée par le facteur section (vert), profondeur (bleu), par l'interaction des facteurs profondeur-section (jaune), non explicable par les facteurs considérés (gris) et la variance liée à l'incertitude de mesure (noir), concernant les périodes 2016-2017 et 2022-2023.

Ce résultat met en évidence que la profondeur reste le facteur explicatif dominant sur la variabilité des teneurs en eau. Cela implique que les valeurs moyennes (pas les dynamiques) de teneur en eau sont plus différentes entre chaque couche de sol, qu'entre les différentes sections (vert) et l'ensemble de couches et sections (jaune). Il est également possible de constater que la variance non explicable par les facteurs considérés (gris) et les incertitudes de mesures (noir) restent minoritaires dans la répartition de la variance, ce qui fournit de la robustesse aux conclusions tirées à partir de cette analyse.

Pour la période 2022-2023, nous constatons un effet saisonnier, où les dynamiques de teneur en eau sont moins discernables en fonction des couches et d'autres facteurs pour la période estivale (mai 2022-octobre 2022). Nous avons constaté que pendant cette période de sécheresse, les valeurs de teneur en eau étaient particulièrement faibles (< 15 %), avec des valeurs moyennes et des dynamiques très similaires entre tous les signaux, indépendamment de la profondeur ou et de la section. Cela explique la difficulté pendant cette période pour trouver un facteur de groupement satisfaisant. De manière générale, la saisonnalité de la Figure 13 permet de mettre en évidence qu'un effet de stratification du milieu solide,

en termes de rétention d'eau, qui est plus appréciable pendant les périodes d'humidité et donc de valeurs de teneur en eau élevées. Cela peut également suggérer que la teneur de saturation du sol est différente en fonction de la profondeur, ce qui expliquerait la stratification de teneurs en eau pendant les temps de pluie, lorsque le milieu solide se rapproche à la saturation.

Mis à part de ces périodes de sécheresse, une stratégie de groupement par profondeur paraît donc un choix raisonnable, vis-à-vis des résultats fournis par l'analyse ANOVA.

Dans une optique de modélisation, ces résultats suggèrent qu'une approche 1D avec deux ou trois couches différentes pourrait être plus adaptée, au lieu de considérer les différentes sections (A, B, C et D) de manière explicite dans la modélisation. En particulier, cette réflexion peut s'appliquer pour la production des courbes globales de rétention d'eau de l'ouvrage (une courbe par couche au lieu de le faire par section ou des analyses individuelles). Ceci permettrait enfin de gagner de l'interprétabilité sur les données.

Courbe de rétention globale

- Fusion de capteurs de teneur en eau :

Dans cette optique, nous adopterons par la suite des analyses une stratégie de fusion des capteurs de teneur en eau par couche (sup, med et prof). Plus précisément, la fusion se fait par pas de temps, en prenant la valeur médiane réelle (NaN exclus) de teneur en eau enregistrée entre tous les capteurs installés à la même profondeur. La teneur en eau fusionnée en profondeur (profondeur à 40 cm) est contrastée avec la mesure de tensiométrie en T3 (Figure 6) (capteurs avec les données de tensiométries de meilleure qualité et la nombre de capteurs insuffisant pour effectuer une fusion) (Figure 14).

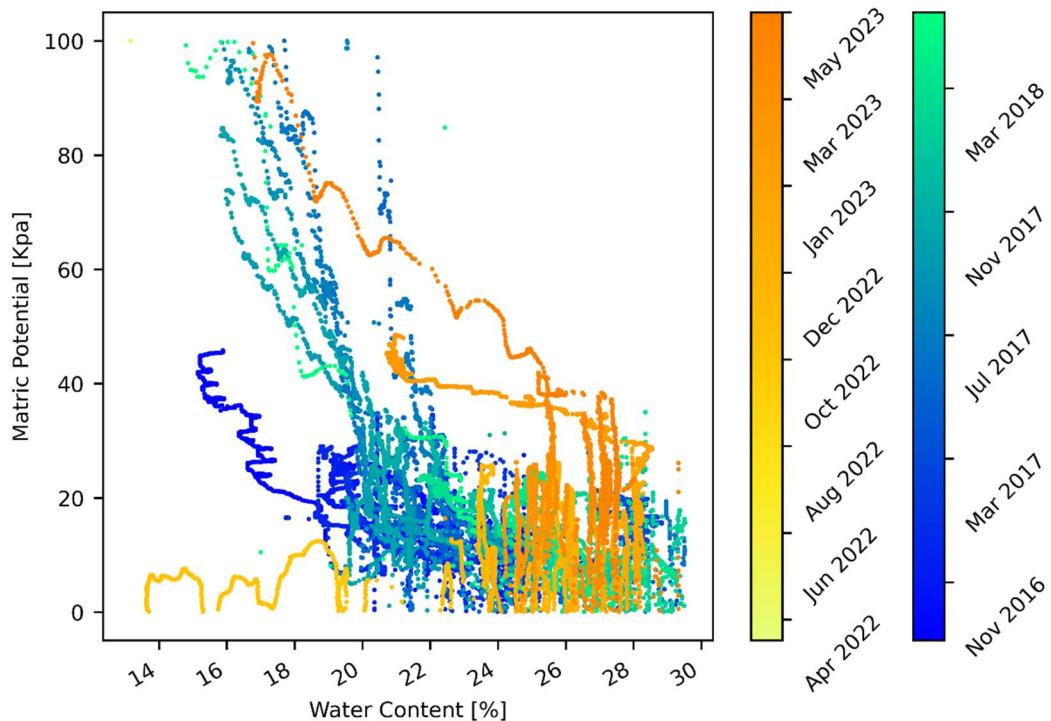


Figure 14. Courbe de rétention globale avec des teneurs en eau fusionnées pour la noue d'infiltration en profondeur (environ prof = 40 cm)

Cette courbe permet de visualiser une augmentation de la capacité de rétention du milieu solide entre la période 2016-2017, qui paraît encore augmenter pour la période 2022-2023 (*shift vers le haut*).

Un deuxième graphique est produit à l'aide des chroniques de teneur en eau fusionnées par profondeur (à 10cm et 40cm), avec la probabilité de dépassement périodes 2016-2017 et 2022-2023 (Figure 15).

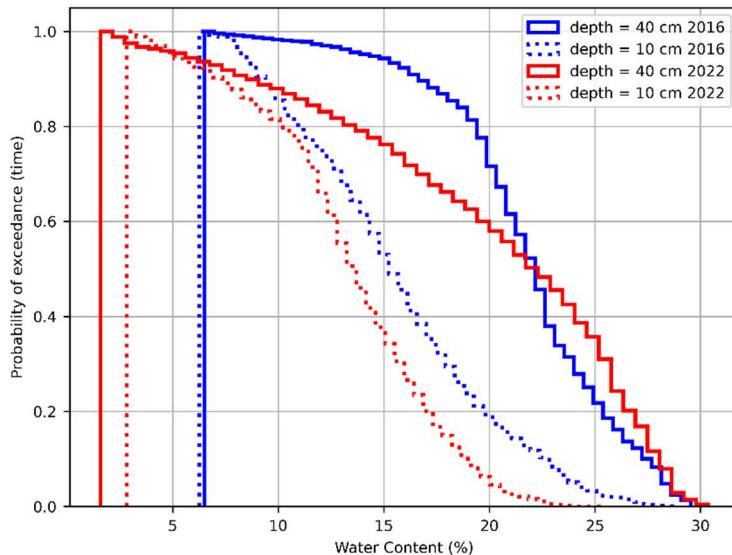


Figure 15 Courbe de probabilité de dépassement pour les teneurs en eau fusionnées périodes 2017-2018 et 2022-2023

Cette courbe de la Figure 15 permet de visualiser plusieurs éléments, notamment :

- l'augmentation de la fréquence de valeurs de teneur basses, durant la période 2022-2023, par rapport à la période 2017-2018, toute profondeur confondue.
- la capacité au champ moyenne de l'ouvrage pourrait être autours de 30 % pour les couches les plus profondes (40 cm). Elle semblerait ne pas avoir changé au cours du temps pour ces couches profondes. En revanche, pour les couches superficies (10 cm), une légère réduction de la valeur maximale de teneur en eau semble avoir eu lieu entre les périodes 2017-2018 et 2022-2023. Ce constat suggère que la valeur maximale de teneur en eau mesurée pendant 2022-2023 en superficie ne correspond pas à la capacité au champ, sur le principe des hypothèses formulées concernant l'augmentation du drainage rapide dans les couches superficielles à cause d'une augmentation de la macroporosité et/ou de sécheresses importantes pendant la période 2022-2023. Cette augmentation de la taille des macropores dans la surface peut être liée p.e. au développement des racines, favorisant un drainage plus rapide de la couche.
- Les différences entre les valeurs minimales de teneur en eau pour les périodes analysées 2017-2018 et 2022-2023 peuvent également s'expliquer par la sécheresse durant la période de 2022, ou des valeurs particulièrement basses de teneur en eau ont été atteintes. Un changement dans le point de flétrissement semble improbable.
- La réduction des teneurs en eau entre 2017-2018 et 2022-2023, qui prend une forme systématique dans les couches superficielles, peut s'expliquer par l'augmentation du drainage rapide. Pour les couches plus profondes, cette réduction des teneurs en eau reste partielle et peut donc s'expliquer par les valeurs d'évapotranspiration très élevées en 2022.

Impact de l'évolution du substrat sur les variables hydrologiques du système

Dans l'objectif d'évaluer des potentiels changement dans le comportement hydrologique du système entre les périodes 2017-2018 et 2022-2023, des différences analyses sur la base de bilans de masse ont été proposé pour les deux périodes. Pour ce faire, les chroniques suivantes ont été employées : débits

drainés à la sortie du système, débits de surverse et la pluie (mesuré sur Compans et sur la station de Roissy, Charles de Gaulle). Les chroniques ont été agrégées à un pas de temps journalier pour ces analyses. Par la suite, l'évapotranspiration réelle (ETR), a été calculée à l'aide de données journalières de volume de surverse ($vol_{surverse}$), de drainage ($vol_{drainage}$), de changement de stockage (dv/dt , en considérant le début et la fin des journées) et la pluie (vol_{pluie}). L'estimation a été notamment menée à l'aide de l'équation suivante Eq 4 :

$$ETR = \frac{dv}{dt} + vol_{pluie} - vol_{drainage} - vol_{surverse} \quad \text{Eq 4}$$

L'estimation de dv/dt a été effectuée capteur par capteur (voir Figure 6), puis la somme totale de tous les flux négatifs (sortants du système) associés à dv/dt ont été pondérés en fonction du volume d'influence de chaque capteur dans la Noue. Il est également important de souligner que, pour pouvoir calculer dv/dt à l'aide des capteurs à une échelle journalière, un lisage avec une fenêtre mobile a dû être appliquée sur tous les signaux de capteurs de teneur en eau.

Il faut également mettre en avant que cette méthode d'estimation pour l'ETR reste approximative, étant donné que les capteurs possèdent des incertitudes de mesure importantes liées p.e. à la loi d'étalonnage et son potentiel évolution au cours du temps du milieu solide qui les entourent. Afin de minimiser les incertitudes liées aux estimations de l'ETR à l'aide de capteurs, les valeurs de chroniques de ETR concernant les jours de temps de pluie (c-à-d journées avec de la pluie ou des débits drainés) n'ont pas été pris en compte, avec ETR=NaN.

A l'aide des chroniques journalières, un bilan de masse a été effectué sur de fenêtres de 10 jours (Figure 16). Dans cette analyse, le volume de ruissellement d'entrée retenu (fourni par les données de pluie de Compans où de Charles de Gaulle) est estimé en fonction sous la condition que les volumes journaliers sortant du drain soient inférieurs à l'un de ces deux volumes-là. Si cela reste le cas pour les deux stations météorologiques, la pluie de Compans est retenue par rapport à sa proximité avec le site. Si les volumes de sortie du drain restent supérieurs pour les deux cas, nous faisons l'hypothèse qu'il s'agit du manque de représentativité des mesures de pluie vis-à-vis du ruissellement entrant (en noir dans la Figure 16). Les pertes sont calculées comme la différence entre le volume total d'entrée (pluie) et le volume total de sortie (ETR, drain et surverse). Cette analyse de bilan de masse par fenêtres permet de voir l'évolution temporelle et des éventuels effets saisonniers de chaque composant du bilan (pluie, ETR, drain et surverse). L'analyse a également permis de vérifier la cohérence des données (p.e. bilans de masse inconsistants, pertes dans le système).

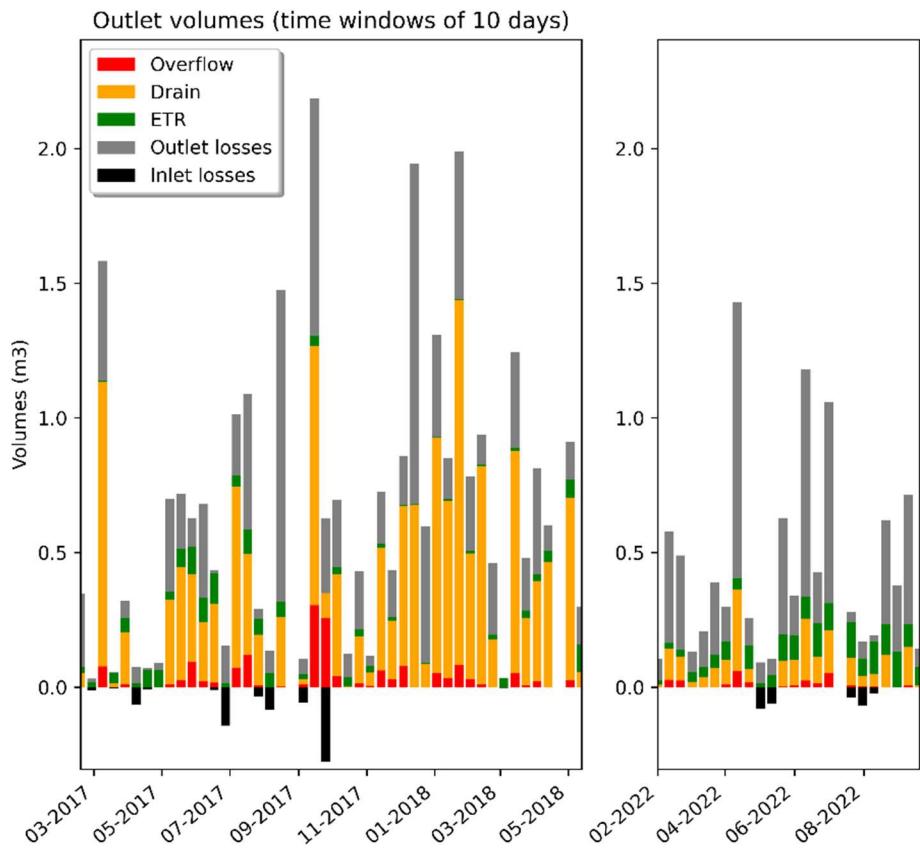


Figure 16 Bilan de masse mobile pour des fenêtres de 10 jours pour les périodes 2017-2018 et 2022-2023

A partir de la Figure 16, nous pouvons observer plusieurs éléments vis-à-vis de la distribution de l'eau sortant du système dans des fenêtres de 10 jours (chaque bar), contrastés entre les deux périodes (2017-2018 et 2022-2023). Notamment, dans la période d'été 2017-2018, certaines fenêtres présentent des bilans de masse avec des données manquantes ou avec des volumes d'entrée inférieurs par rapport aux volumes de sortie de la Noue (bars noires Figure 16). Dans la Figure 16, aucun effet saisonnier sur les bilans de masse n'a pu être constaté. Les volumes de sortie du drain restent visiblement plus importants dans les bilans de masse par rapport aux autres sorties (ETR, surverse), même si les pertes restent majoritaires. Deux constats supplémentaires peuvent être fournis : les pertes (Figure 17) et l'ETR paraissant augmenter de la période 2017-2018 à la période 2022-2023.



Figure 17 Photo de la noue filtrante montrant une possibilité de perte d'eau sur le talus (pris de Kanso, 2018)

En effet, nous pouvons également constater des pertes relatives (i.e. par rapport au volume d'entrée) importantes dans les deux périodes, mais largement supérieures dans la période 2022-2023 en comparaison avec 2017-2018.

Dans le but de constater cette hypothèse, la Figure 18 montre une comparaison entre les volumes de pluie pour chaque fenêtre de 10 jours versus les pertes.

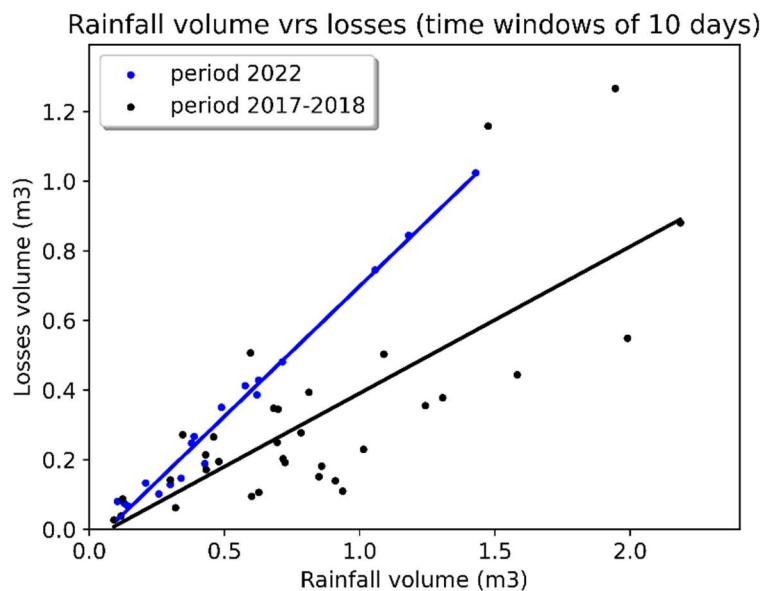


Figure 18 Relation entre les volume total de pluie d'entrée dans la Noue vrs le volume de pertes estimé à partir d'un bilan de masse, chaque point représente une fenêtre de 10 jours.

Ces résultats permettent de renforcer l'idée que ces pertes correspondent de manière majoritaire à des débordements latéraux du système (bonne relation linéaire), qui deviennent plus importantes pour un même volume d'entrée, concernant la période 2022-2023 par rapport à 2017-2018. Le développement de la végétation entre les deux périodes pourrait expliquer l'augmentation en pourcentage des pertes dans les bilans de masse. Ceci probablement dû à la perte de capacité de stockage superficiel de la Noue qui finalement incite les déversements latéraux, qui peuvent se produire davantage par rapport à la surverse du système en aval, étant donné que les volumes de surverses mesurés en aval ne semblent pas augmenter de manière significative en pourcentage entre les deux périodes.

Un bilan de masse global est fourni dans la Figure 19 (en retirant les valeurs non cohérentes, c-à-d les fenêtres avec des bars noir dans la Figure 16), où plusieurs des constants discutés précédemment peuvent être vérifiés. Nous pouvons également remarquer que le volume total de pluie concernant la période 2017-2018 reste environ 3 fois supérieur au volume enregistrée durant la période 2022-2023. En plus de la différence de longueur entre les deux périodes, des sécheresses trop importantes ont été observées pour l'été 2022 (<https://www.brgm.fr/fr/actualite/article/secheresse-sans-precedent-cet-ete-2022>).

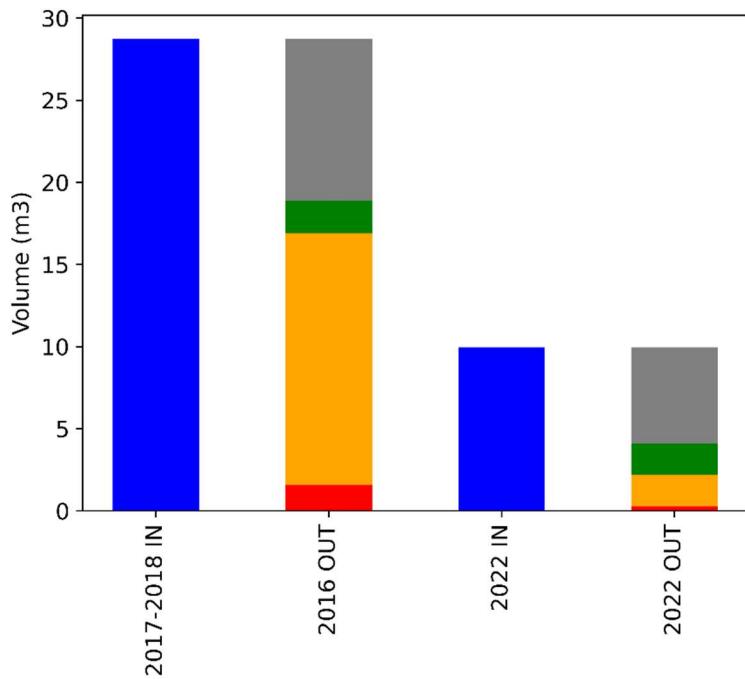


Figure 19 Bilan de masse global pour les périodes 2017-2018 et 2022-2023

Pour les données des volumes drainés et de surverse journalier, une courbe de dépassement a été élaborée pour chaque variable dans le but de mieux comprendre le système étudié (Figure 20).

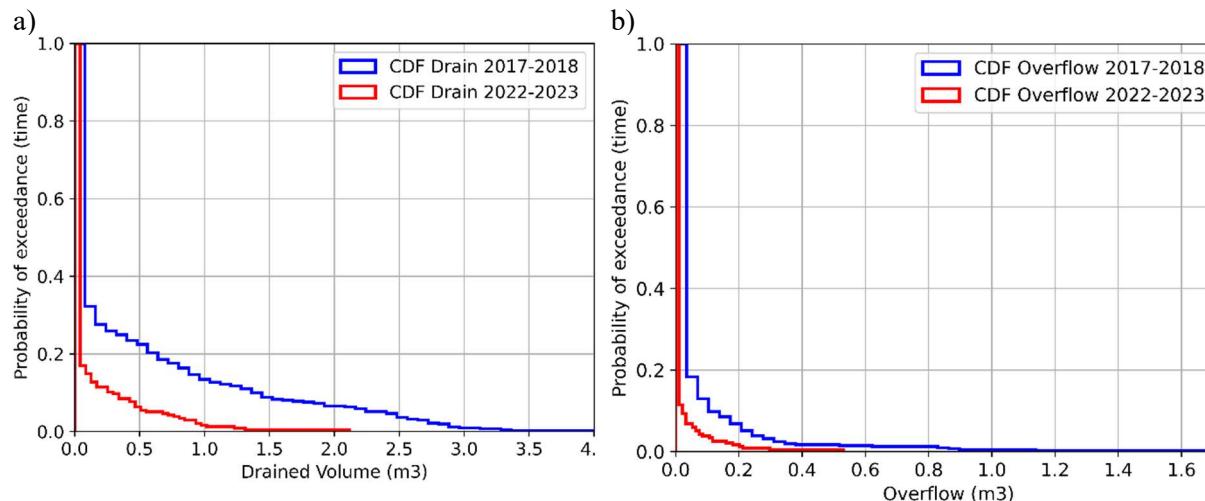


Figure 20 Courbe de probabilité de dépassement pour les volumes drainés et de surverse journaliers périodes 2017-2018 et 2022-2023

Ces résultats de la Figure 20 permettent de tirer les constats suivants :

- Les volumes de surverse restent supérieures pour la période 2017-2018 par rapport à la période 2022-2023.
- Les volumes drainés restent largement supérieurs pour la période 2017-2018 par rapport à la période 2022-2023.

La première explication de ces résultats vient certainement des différences de volumes d'entrée entre les deux périodes (Figure 19). Néanmoins, le bilan de masse dans la Figure 19 permet de constater qu'une augmentation relative des volumes de drain par rapport aux surverses a eu lieu. C-à-d, mise à part les pertes et le déversement latéraux non-recensés, la distribution d'eau en sortie des événements pluvieux paraît avoir une tendance à se produire plus par le drain que par la surverse en aval du système, au fur à et mesure que le système vieilli. Cela peut s'expliquer par la croissance et le développement de la végétation, qui en plus d'augmenter la capacité d'infiltration de l'ouvrage en superficie par l'augmentation de la macroporosité (donc de recharge des couches profondes et finalement de volumes drainés), peut ralentir le ruissellement dans la direction longitudinale de la noue vers la sortie en aval par surverse, en favorisant également cette infiltration en surface. Par la suite, les couches profondes, avec une capacité de rétention d'eau bonne et améliorée au cours des années selon la Figure 12 (possiblement par l'augmentation p.e. du contenu de Matière Organique MO), ont favorisé les flux d'évapotranspiration associées à la sécheresse de l'été 2022.

Dans le but d'explorer plus en détails ce dernier aspect, les chroniques d'évapotranspiration potentielle (ETP) journalières, enregistrées par météo France à la station de Roissy Charles de Gaulle (près de Compans), ont été récupérées gratuitement sur le site (<https://donneespubliques.meteofrance.fr/>) pour les comparer avec les chroniques d'ETR. Par la suite, ces chroniques journalières de ETP et ETR ont été exprimées en termes de courbes de dépassement pour les deux périodes 2017-2018 et 2022-2023 (Figure 21), dans le but de comparer les deux périodes et effectuer des analyses de bilans de masse (valeurs exprimées en mm/j).

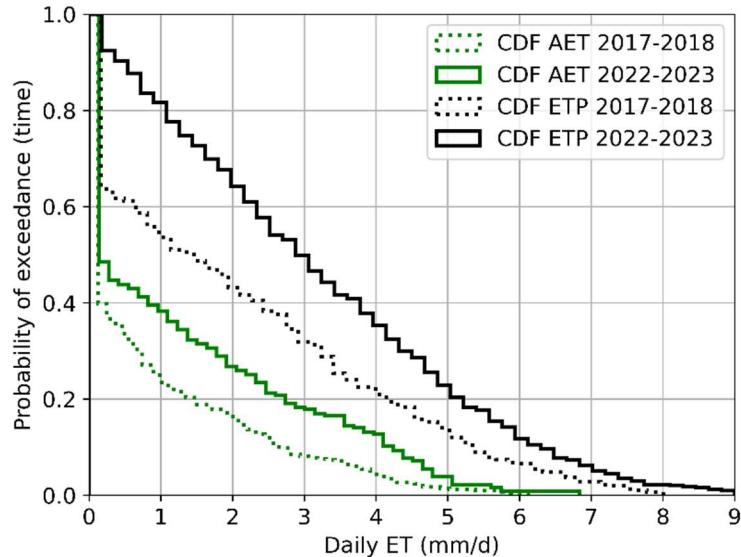


Figure 21 Courbes de probabilité de dépassement pour l'ETR et l'ETP journalière durant périodes 2017-2018 et 2022-2023

Nous pouvons constater plusieurs éléments à partir des résultats de la Figure 21. Les valeurs d'ETP restent systématiquement supérieures aux valeurs ETR, ce qui reste cohérent avec la littérature. Pour rappel, ETP est le flux d'évapotranspiration lié à des conditions de référence (c-à-d pour un gazon dégagé, avec des données de température, humidité relative, vitesse du vent et rayonnement solaire pris à 2m du sol, voir détails p.e. <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/310>) et souvent est compris comme la demande d'évapotranspiration pour un climat déterminé (voir e.g. Allen et al., 2005, parmi beaucoup d'autres). La valeur d'ETR dépend de l'ETP, ainsi que de l'eau disponible dans le substrat pour être évapotranspiré et d'autres facteurs (p.e. état et l'âge de la végétation).

D'autre part, les valeurs d'ETP et ETR restent plus élevées en 2022-2023 par rapport à 2017-2018, indiquant que les facteurs climatiques (c-à-d ETP) ont une influence dominant sur l'ETR par rapport à la disponibilité d'eau dans le substrat (teneur en eau), qui paraît être garanti par la rétention d'eau dans les couches plus profondes. Cela voudrait dire que l'ouvrage de bio rétention ne présente pas des périodes de stress hydriques importantes, malgré les conditions extrêmes de température et sécheresse observées en 2022-2023. Ce résultat reste également en cohérence avec les teneurs en eau profondes plutôt élevés en permanence (Figure 15), permettant l'alimentation de la végétation par les racines. La Figure 21 permet également d'apprécier une distance plus importante entre les valeurs d'ETP et ETR pour la période 2022-2023 par rapport à 2017-2018. Dans le but de quantifier la différence entre ETP et ETR à une échelle journalière, le coefficient de culture K_c peut être estimé à l'aide de Eq 5 :

$$K_c = \frac{ETR}{ETP} \quad \text{Eq 5}$$

Les résultats de K_c sont ensuite montrés dans la Figure 22 pour les périodes 2017-2018 et 2022-2023.

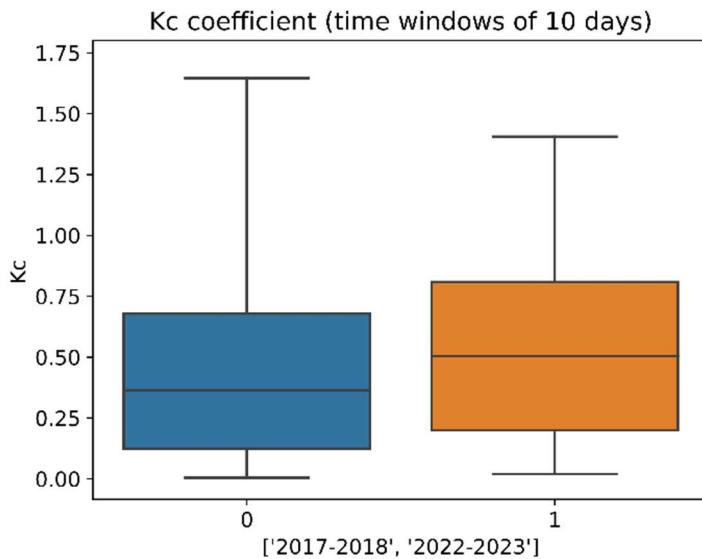


Figure 22. Boxplot coefficients K_c pour les périodes 2017-2018 et 2022-2023

Une légère augmentation de K_c est constatée entre les deux périodes, ce qui peut s'expliquer par la croissance et développement de la végétation dans la noue. Néanmoins, l'augmentation d'ETR pendant la période 2022-2023 paraît plus liée aux conditions climatiques, avec des valeurs d'ETP extrêmes, qu'à la croissance de la végétation et l'éventuelle augmentation de sa capacité evapotranspirative (estimée par le K_c). D'autre part, aucune corrélation a été constatée entre les ETR et les ETP à une échelle journalière, ce qui suggère qu'une éventuelle relation linéaire entre les deux grandeurs pourrait se retrouver plutôt à des échelles temporelles plus agrégées (p.e. K_c mensuel ou saisonnier). Cela, sous l'hypothèse que cette relation existe et si la précision des capteurs de teneur en eau employés permet de tracer l'ETR avec une fiabilité suffisante.

Essais de laboratoire sur le substrat

Différentes analyses de laboratoire ont été effectuées sur plusieurs échantillons de sol prélevés dans les deux périodes d'analyse 2017-2018 et 2022-2023, dans l'objectif de vérifier des propriétés du substrat, notamment la masse volumique (BD), la conductivité hydraulique à saturation (K_s) et la granulométrie, et ainsi chercher des changements importants dans ces propriétés entre les deux périodes 2017-2018 et 2022-2023, sans faire appel aux mesures en continu.

Une première analyse sur la masse volumique BD est présentée dans le Tableau 4.

Tableau 4 Résultats de masse volumique BD sur différents échantillons associés à la période 2017-2018 et 2022-2023

	2017-2018		2022-2023	
	Prof. < 20cm	Prof. > 20cm	Prof. < 20 cm	Prof. > 20 cm
BDmin [g/m ³]	1,37	1,74	0,90	1,21
BDmax [g/m ³]	1,83	2,10	1,82	2,11
BDmoyen [g/m ³]	1,70	1,94	1,42	1,72
	n=9	n=6	n=8	n=12

Dans le Tableau 4, il est possible de constater que la masse volumique BD augmente avec la profondeur du substrat, de manière indépendante de la période d'analyse 2017-2018 où 2022-2023 (de 1,7 g/cm³ à

1,94 g/cm³ et de 1,42 g/cm³ à 1,72 g/cm³, resp.). Cela suggère que les couches les plus profondes du système étaient plus compactées en début du fonctionnement et cette différence de BD par rapport à la profondeur reste présente tout au long de l'opération de l'ouvrage, en conservant la stratification du substrat. D'autre part, les résultats montrent une diminution moyenne de la BD entre les deux périodes 2017-2018 et 2022-2023 : de 1,7 g/cm³ (en 2017-2018) à 1,42 g/cm³ (en 2022-2023) en surface (prof < 20 cm), et moins prononcé de 1,94 g/cm³ (en 2017-2018) à 1,72 g/cm³ (en 2022-2023) en profondeur. Cela suggère également une augmentation généralisée de la macroporosité dans le temps surtout dans des profondeurs < 20 cm, probablement dû au développement biologique du milieu. Pour des profondeurs de > 35cm (près du fond de la noue), des analyses de BD n'ont été menés que pour la période 2022-2023, où les BD sont en moyen de 1,72 g/cm³, ce qui peut suggérer que les couches les plus profondes possèdent un comportement similaire en termes de rétention d'eau aux couches intermédiaires (c-à-d pour 25 cm < profs. < 35 cm).

La conductivité à saturation Ks a également été estimée à l'aide de la méthode *Beerkan estimation soil transfer* « BEST », où deux versions ont été retenues et moyennées pour les analyses : "BEST-intercept" et "BEST-steady" (voir Yilmaz et al., 2010 ; Bagarello et al., 2014) (Tableau 5).

Tableau 5 Résultats conductivité à saturation Ks tests BEST

	2017		2022
	Prof. < 20cm	Prof. > 20cm	Prof. < 20 cm
K _s _{min} [mm/h]	1,7	0,1	23,4
K _s _{max} [mm/h]	93,6	4,3	103,4
K _s _{moyen} [mm/h]	20,9	1,0	54
	n=9	n=6	n=6

Les résultats dans le Tableau 5 montrent des tendances cohérentes du Ks par rapport au Tableau 4 avec les BDs. Il est constaté une augmentation de Ks dans le temps entre les deux périodes 2017-2018 à 2022-2023, ce qui correspond à une potentielle augmentation de la macroporosité en superficie et donc de la masse volumique BD dans le substrat (Tableau 4). Les essais BEST n'ont été effectués que pour des profondeurs < 20 m dans les deux périodes, ce qui permet une comparaison directe.

Des tests granulométriques effectués sur les échantillons prélevés en 2016, 2017 et 2022 à différentes profondeurs (Tableau 6).

Tableau 6 Résultats granulométrie pour des échantillons à différentes périodes

D µm	Analyses INRA 2016			Analyses INRA 2017		Analyses INRAE 2022	
	10 cm	20 cm	30 cm	< 10 cm	> 20 cm		
Masse fraction g/kg							
< 2	97	112	105	101	134	101	
2 à 20	90	90	88	83	196	97	
20 à 50	92	116	111	113	154	113	
50 à 200	154	178	182	152	131	167	
200 à 2000	567	504	514	551	385	522	
> 2000	tamisé à 2mm				tamisé à 2 mm		

Pour des profondeurs < 20 cm du substrat, les résultats dans le Tableau 6 ont montré que les particules de diamètre de 200 μ m à 2000 μ m sont les plus fréquentes, couvrant environ 50 - 52% (entre 504 et 522 g/kg) du volume total du sol, pour les deux périodes d'analyse 2017-2023. Concernant les profondeurs > 10 cm, la proportion de particules fines (taille entre 2 μ m et 50 μ m) a augmenté de manière importante entre 2017 et 2022 (environ de 10% à 17%), ce qui a généré également une réduction de la proportion de particuliers plus grossières (200 μ m et 2000 μ m) de 50 % à 38 % pour chaque période. Ces changements granulométriques peuvent s'expliquer par la matière en suspension présente dans les eaux de ruissellement rentrant dans le système, qui pourrait agir de manière conjointe avec que l'augmentation de la macroporosité et donc d'espace disponible dans la surface du milieu filtrant. Cela reste en cohérence avec la réduction des masses volumiques mesurées en surface concernant 2017 et 2022 (Tableau 6).

Des essais de Carbone Total Organique (COT) ont montré une augmentation de 7 g/kg à 26 g/kg dans la surface de l'ouvrage (prof. < 10 cm) entre 2017 et 2022. Ces variations n'ont pas pu être constatées pour des profondeurs plus importantes, où la teneur de COT est restée constante (autour de 5 g/kg). Ce résultat suggère une augmentation importante de la matière organique en surface, ce qui reste également cohérente avec la réduction de la masse volumique observée et l'hypothèse d'une augmentation de l'activité biologique en surface.

CONCLUSIONS

L'évolution de ce milieu solide filtrant de la noue étudiée est certainement complexe et elle pourrait être attribuée à différents facteurs.

La couche superficielle a montré les changements les plus importants du substrat après 7 ans d'opération, en termes d'une réduction de la masse volumique, augmentation de la teneur en matière organique et une potentielle augmentation de la macroporosité dû à l'activité biologique dans le milieu filtrant. Ces changements peuvent finalement amener à favoriser un drainage rapide des couches superficielles.

En ce qui concerne les couches plus profondes du sol, les densités apparentes restent plutôt élevées et constantes, où les mesures en continu montrent également des valeurs élevées (>25 %) de teneur en eau la plupart du temps, et peu changeants entre les deux périodes d'analyse (2017-2018 et 2022-2023). Grâce à ces données de mesure en continu de teneurs en eau et du potentiel matriciel, un shift de la courbe de rétention globale du milieu vers le haut a été mise en évidence, ce qui implique une légère augmentation de la capacité de rétention d'eau du milieu filtrant dans les couches les plus profondes.

Les analyses de bilans de masse permettent de constater que les volumes de sortie du drain restent visiblement plus importants par rapport aux autres flux de sortie (ETR, surverses), même si les pertes restent majoritaires. La nature de ces pertes pourrait être attribuée à des débordements latéraux observés dans la noue lors de fortes pluies. Le développement de la végétation pourrait expliquer l'augmentation de ces pertes entre les deux périodes 2016-2018 et 2022-2023, ainsi qu'une augmentation relative des volumes sortants par le drain de la noue, par rapport aux surverses. La croissance et le développement de la végétation pourrait, lors d'événement particulièrement forts, réduire la capacité de rétention de la noue en superficie, ainsi que ralentir le ruissellement dans la direction longitudinale de la noue vers la sortie en aval par surverse. Par ailleurs, les couches profondes, avec une capacité de rétention d'eau assez performante peuvent favoriser l'alimentation en eau de la végétation et donc les flux d'évapotranspiration.

En synthèse, l'ouvrage se montre moins performant au cours des années dû à une augmentation de pertes d'eau, malgré le fait que le substrat paraît évoluer dans un sens favorable au fonctionnement

hydrologique attendu (e.g. augmentation de la capacité de rétention d'eau, évapotranspiration et ralentissement des pluies les plus fortes).

Il faut considérer lors des prochains développements avec les données sur le site étudiée que la calibration des capteurs de teneur en eau a été exclusivement fait pour la période 2016. Très probablement, l'évolution du milieu filtrant évoquée aura une influence sur la loi de calibration employée pour les capteurs de teneur en eau. Dans les prochaines démarches à développer, les capteurs seront recalibrés pour la période 2022-2023, dans le but de vérifier que les shifts dans les chroniques de teneur en eau et dans les courbes de rétention ne soient pas causé par des dérives de capteurs à cause de ces changements.

REFERENCES

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Smith, M., Raes, D., & Wright, J. L. (2005). FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131(1), 2-13.
- Bagarello, V., Di Prima, S., & Iovino, M. (2014). Comparing alternative algorithms to analyze the Beerkan infiltration experiment. *Soil Science Society of America Journal*, 78, 724–736.
- Haidri, S., Haranwala, Y. J., Bogorny, V., Renso, C., da Fonseca, V. P., & Soares, A. (2022). PTRAIL—A python package for parallel trajectory data preprocessing. *SoftwareX*, 19, 101176.
- Kanso, T. (2021). *Mesure et modélisation du bilan hydrologique de dispositifs rustiques de gestion à la source des eaux de ruissellement de chaussées* (Doctoral dissertation, Paris Est).
- Kanso, T., Gromaire, M. C., Ramier, D., Dubois, P., & Chebbo, G. (2020). An investigation of the accuracy of EC5 and 5TE capacitance sensors for soil moisture monitoring in urban soils-laboratory and field calibration. *Sensors*, 20(22), 6510.
- Kanso, T., Tedoldi, D., Gromaire, M. C., Ramier, D., Saad, M., & Chebbo, G. (2018). Horizontal and vertical variability of soil hydraulic properties in roadside sustainable drainage systems (SuDS)—Nature and Implications for Hydrological Performance Evaluation. *Water*, 10(8), 987.
- Métadier, M., & Bertrand-Krajewski, J. L. (2012). The use of long-term on-line turbidity measurements for the calculation of urban stormwater pollutant concentrations, loads, pollutographs and intra-event fluxes. *Water research*, 46(20), 6836-6856.
- Wang, M., Zhang, D., Wang, Z., Zhou, S., Tan, S.K., (2021). Long-term performance of bioretention systems in storm runoff management under climate change and life-cycle condition. *Sustain. Cities Soc.* 65, 102598.
- Yilmaz, D., Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Deneele, D., & Legret, M. (2010). Hydrodynamic characterization of basic oxygen furnace slag through an adapted BEST method. *Vadose Zone Journal*, 9, 107–116.