



HAL
open science

Éfficacité des marais artificiels pour le traitement des surverses de déversoir d'orage : Étude d'un site pilote

Thibaut Lefèvre

► **To cite this version:**

Thibaut Lefèvre. Éfficacité des marais artificiels pour le traitement des surverses de déversoir d'orage : Étude d'un site pilote . Sciences de l'ingénieur [physics]. 2016. dumas-01581008

HAL Id: dumas-01581008

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01581008v1>

Submitted on 5 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

EFFICACITÉ DES MARAIS ARTIFICIELS POUR LE TRAITEMENT DES SURVERSES DE DÉVERSOIR D'ORAGE

ÉTUDE D'UN SITE PILOTE



Mémoire de fin d'études présenté pour
l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES

Thibaut LEFEVRE

Promotion Stuttgart - 2013-2016
Formation d'Ingénieur Par Apprentissage

Octobre 2016

REMERCIEMENTS

Après trois années d'une aventure passionnante au sein du Syndicat des Eaux et de l'Assainissement Alsace-Moselle, ainsi vient le temps de la fin de ma formation en apprentissage. Je peux à présent exprimer toute ma gratitude envers les nombreuses personnes m'ayant accompagné tout au long de mon parcours. J'ai une pensée particulière pour chacune d'entre elles, mais je tiens à remercier plus particulièrement :

Joël HOCQUEL, mon maître d'apprentissage, pour avoir pris du temps pour m'inculquer des notions de la vie professionnelle, des connaissances diverses et variées en passant de l'exploitation des réseaux d'eaux à la connaissance des marchés public jusqu'à l'appréhension des instruments de mesures et leur paramétrage. Tu m'as aidé à développer mon expérience professionnelle et mon esprit critique tout au long de ces trois années, et je t'en suis énormément reconnaissant.

Marc THIERIOT, pour m'avoir laissé travailler en autonomie complète durant la réalisation de ce travail de fin d'étude tout en apportant un encadrement et un soutien moral lorsque cela était nécessaire. Merci pour votre encouragement à réaliser ce projet qui au premier abord ne m'enchantait guère et qui pourtant m'a permis de m'épanouir professionnellement pendant plus de 8 mois.

Béatrice MALARTRE, pour sa disponibilité et son aide sur le terrain comme au bureau. Tu as su me remettre en question sur divers points techniques comme la manière d'instrumenter, le choix des paramètres et bien d'autres choses. Merci de m'avoir consacré de ton temps pour l'ensemble de ce projet malgré un agenda très chargé.

Adrien WANKO, mon tuteur école pour ce travail de fin d'études, pour sa curiosité et son intérêt personnel et professionnel pour ce projet très particulier. Tu as su m'apporter l'aide nécessaire à l'établissement des vitesses de filtration.

Jacky BARDOL et toute l'équipe d'égoutiers de l'antenne de Roeschwoog, pour leur disponibilité tout au long de la campagne de mesures, sans quoi aucun déversement artificiel n'aurait pu être réalisé.

Les agents du laboratoire du Syndicat des Eaux et de l'Assainissement Alsace-Moselle, pour leur contribution à la réalisation des analyses d'eau malgré une surcharge de travail importante. J'ai une pensée toute particulière pour Frédéric TUTIN et Nathalie CAILLE.

L'ensemble de l'équipe du bureau d'études, pour la bonne humeur permanente au sein des locaux, les bons moments de convivialité passés autour d'un repas, ainsi que les avis et conseils techniques apportés, tout au long de mon apprentissage, pour la réalisation de mes différents projets.

RÉSUMÉ

Efficacité des marais artificiels pour le traitement des surverses de déversoir d'orage Étude d'un site pilote

Les filtres plantés de roseaux sont utilisés depuis plus de 20 ans dans le traitement des eaux usées et ont prouvé leur efficacité épuratoire. Depuis quelques années, ce procédé a été adapté pour le traitement des rejets urbains de temps de pluie. Le projet réalisé par le Syndicat des Eaux et de l'Assainissement Alsace-Moselle a pour objectifs de comprendre, optimiser et valider le filtre planté de macrophytes pour le traitement des surverses d'un déversoir d'orage d'un réseau unitaire. Le contexte très particulier du site d'étude a conduit à la création d'un ouvrage atypique qui fonctionne selon deux flux : horizontal et vertical.

La capacité de stockage en surface du filtre et la limitation du débit de sortie permettent un écrêtement des débits déversés afin de limiter les effets de chocs sur le milieu récepteur. Des rendements de 50-80 % sur les MES, 40-70 % sur la DCO et 30-80 % sur la DBO₅ peuvent être obtenus avec cette configuration. Néanmoins, les paramètres azotés et le phosphore restent plus difficiles à traiter en raison des vitesses de filtrations importantes. Les constatations visuelles et les analyses des données ont révélé des dysfonctionnements de l'ouvrage. Des solutions ont été proposées pour optimiser le fonctionnement hydraulique et épuratoire des futurs ouvrages en améliorant leur conception.

ABSTRACT

Efficiency of constructed wetlands for combined sewage overflow treatment Pilot site study

For more than 20 years, planted reed beds filters are used for wastewater treatment and have proved their effectiveness. Over the last few years, this technique was adapted for stormwater overflow. The project conducted in the Syndicat des Eaux et de l'Assainissement Alsace-Moselle consists to understand, optimize and validate this constructed wetland for combined sewage overflow treatment. The particular context of the study site led to the creation of an unusual constructed wetland, which works under two flow regimes: horizontal and vertical.

Retention capacity and limitation of output flow reduce the shock effects on the aquatic environment. Treatment efficiencies of 50-80 % for TSS, 40-70 % for COD and 30-80% for BOD are showed with this configuration but nitrogen parameters and phosphorus still have low performance efficiencies, such as planted reed beds filters for wastewater treatment, because of high filtering velocity. Visuals observations and data analyses have shown malfunctions of the pilot site. Solutions have been provided to optimize hydraulic and system efficiency of future constructions through improved design.

SOMMAIRE

SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	7
LISTE DES TABLEAUX	8
LISTE DES FIGURES.....	9
INTRODUCTION.....	10
1. REVUE DE LITTÉRATURE.....	11
1.1. Contexte réglementaire	11
1.1.1. Les textes européens	11
1.1.2. Les textes français	12
1.1.3. Textes relatifs aux rejets urbains de temps de pluie	12
1.2. Pollution des rejets urbains de temps de pluie	13
1.2.1. Principaux polluants et origine des rejets.....	13
1.2.2. Caractérisation des rejets	14
1.2.3. Impacts sur le milieu aquatique	15
1.3. Le traitement des rejets urbains de temps de pluie	17
1.3.1. Gestion intégrée des eaux pluviales	17
1.3.2. Traitement des eaux avant rejet	17
1.3.3. Traitement par filtre planté de roseaux	18
1.4. Conception et performances des filtres plantés	20
1.4.1. Préconisations de conception et de dimensionnement	20
1.4.2. Performances épuratoires observées	22
1.4.3. Filière de traitement adaptée aux surverses de déversoir d'orage	22
2. CONTEXTE, MATÉRIEL ET MÉTHODE	24
2.1. Contexte de l'étude	24
2.1.1. Présentation du SDEA.....	24
2.1.2. Origine du projet.....	25
2.1.3. Bassin versant, déversoir d'orage, milieu naturel.....	26
2.2. L'installation de traitement.....	28
2.2.1. Présentation globale.....	28
2.2.2. Conception et éléments de dimensionnement du système	30
2.2.3. Similitudes et différences de conception - dimensionnement.....	32
2.3. L'instrumentation.....	33
2.3.1. Suivi pluviométrique et hydraulique	33
2.3.2. Suivi des paramètres physico-chimiques.....	35
2.3.3. Asservissement et situations de prélèvements	37

2.4.	Méthodologie de résultats	39
2.4.1.	Augmentation de la fréquence de déversement du déversoir d'orage	39
2.4.2.	Déversement artificiel du déversoir d'orage	40
2.4.3.	Détermination des débits	40
2.4.4.	Bilan hydrique entrée - sortie	41
2.4.5.	Choix des paramètres physico-chimiques	42
3.	RÉSULTATS ET ANALYSES	45
3.1.	Fonctionnement hydrodynamique	45
3.1.1.	Évaluation des débits	45
3.1.2.	Détermination des vitesses de filtration	47
3.1.3.	Évaluation du fonctionnement hydraulique	48
3.2.	Fonctionnement épuratoire du filtre	50
3.2.1.	Concentrations en entrée et conditions hydrologiques	50
3.2.2.	Efficacité du système de traitement	52
3.3.	Analyses complémentaires	56
3.3.1.	Analyse d'impact par la méthode des classes de pluie	56
3.3.2.	Comparatif entre un ouvrage « béton » et « végétalisé »	57
3.4.	Incertitudes de mesure et limites de l'étude	58
3.4.1.	Incertitude sur les mesures pluviométriques, les débits, les volumes	58
3.4.2.	Incertitude sur la chaîne analytique	59
3.4.3.	Limites de l'étude	60
4.	PISTES D'AMÉLIORATION ET CONCEPTION D'UN OUVRAGE	62
4.1.	Recommandations techniques	62
4.1.1.	Observations du fonctionnement	62
4.1.2.	Esprit critique de la conception actuelle	63
4.1.3.	Proposition de points d'amélioration	65
4.2.	Règles de conception et de dimensionnement	66
4.2.1.	Conception	66
4.2.2.	Dimensionnement	67
4.2.3.	Perspectives de recherches complémentaires	69
4.3.	Conception d'un ouvrage végétalisé	69
4.3.1.	Contexte	69
4.3.2.	Proposition d'aménagements	71
4.3.3.	Conception et dimensionnement de l'ouvrage	72
	CONCLUSION	76
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	77
	ANNEXES	81

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AE : Agence de l'Eau
AERMC : Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse
Cu : Cuivre
Cd : Cadmium
CERTU : Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques
CUE : Conseil de l'Union Européenne
DBO₅ : Demande Biochimique en Oxygène à cinq jours, concentration exprimée en mg d'O₂/L
DCE : Directive Cadre sur l'Eau
DCO : Demande Chimique en Oxygène, concentration exprimée en mg d'O₂/L
DDAF : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt
DO : Déversoir d'Orage
FPRh : Filtre Planté de Roseaux à écoulement horizontal
FPRv : Filtre Planté de Roseaux à écoulement vertical
Hc : Hydrocarbure
Kns : Perméabilité insaturée, valeur exprimée en m/s
LEMA : Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques
MEDD : Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer
MES : Matières en Suspension, concentration exprimée en mg/L
MVS : Matières Volatiles Sèches
NaCl : Chlorure de sodium
N-NH₄ : Azote Ammoniacal, concentration exprimée en mg de N/L
N-NO₂ : Ions nitrites, concentration exprimée en mg de N/L
N-NO₃ : Ions nitrates, concentration exprimée en mg de N/L
NTK : Azote Kjeldahl, concentration exprimée en mg de N/L
Pb : Plomb
Pt : Phosphore Total, concentration exprimée en mg de P/L
PE : Polyéthylène
PR : Poste de refoulement
RF : République Française
RUTP : Rejets Urbains de Temps de Pluie
SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SDEA : Syndicat des Eaux et de l'Assainissement Alsace-Moselle
SIERM : Système d'Information sur l'Eau Rhin-Meuse
STEU : Station de Traitement des Eaux Usées
Zn : Zinc
ZDV : Zone de Dissipation Végétalisée
ZRV : Zone de Rejet Végétalisée

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Proportion de pollution liée aux particules	14
Tableau 1-2 : Domaine de variation des concentrations en polluants des différents types de rejets par temps sec et temps de pluie	15
Tableau 1-3 : Gammes des concentrations en polluants délimitant les classes de qualité des cours d'eau pour le SEQ-Eau	16
Tableau 1-4 : Préconisations pour le dimensionnement de filtres plantés de roseaux pour le traitement des eaux urbaines de temps de pluie.....	21
Tableau 1-5 : Efficacité épuratoire de marais artificiels pour le traitement des rejets des surverses de déversoir d'orage	22
Tableau 2-1 : Caractéristiques du bassin versant alimentant le déversoir d'orage 800127	
Tableau 2-2 : Valeurs de référence des coefficients d'imperméabilisation.....	27
Tableau 2-3 : Caractéristiques des matériaux de garnissage du filtre.....	31
Tableau 2-4 : Différences de conception et de dimensionnement entre la littérature et le système étudié	33
Tableau 2-5 : Paramétrage des deux préleveurs automatiques.....	37
Tableau 2-6 : Liste des paramètres physico-chimiques analysés	43
Tableau 3-1 : Type de fonctionnement du filtre pour les échantillons analysés	48
Tableau 3-2 : Caractéristiques des événements pluvieux échantillonnés	50
Tableau 3-3 : Comparaison de l'effluent d'entrée par rapport à la littérature.....	51
Tableau 3-4 : Efficacité épuratoire de l'ouvrage durant la campagne de prélèvements .	52
Tableau 3-5 : Performances minimales réglementaires, selon l'arrêté du 21 juillet 2015, pouvant être admises pour les rejets des eaux pluviales.....	55
Tableau 3-6 : Fréquence de déclassement du Stadenrhein sans l'ouvrage de traitement (gauche) et avec l'ouvrage de traitement (droite)	56
Tableau 3-7 : Comparatif des ouvrages limitant les impacts des déversements sur le milieu récepteur	57
Tableau 4-1 : Récapitulatif des éléments de conception à améliorer	64
Tableau 4-2 : Récapitulatif des propositions d'améliorations des éléments de conception	65
Tableau 4-3 : Récapitulatif des paramètres de conception-dimensionnement à adopter pour les futurs ouvrages.....	68

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Représentation schématique de l'impact des RUTP sur la qualité du milieu aquatique.....	15
Figure 1-2 : Système de classification des marais artificiels.....	18
Figure 1-3 : Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement vertical.....	19
Figure 1-4 : Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement horizontal.....	19
Figure 2-1 : Organisation géographique du SDEA.....	24
Figure 2-2 : Bassin versant et réseau associé.....	26
Figure 2-3 : Vues des conduites d'entrée $\varnothing 1000$ mm (gauche) et conservée $\varnothing 300$ mm (droite) du déversoir d'orage 8001 alimentant le filtre.....	27
Figure 2-4 : Le Stadenrhein.....	28
Figure 2-5 : Schémas de principe du système de traitement (vues de dessus et en coupe).....	29
Figure 2-6 : Pluviomètre à auget basculant installé sur site.....	34
Figure 2-7 : Enregistreur-transmetteur de données (gauche) et sonde à ultrason (droite) installés dans le déversoir d'orage 8001.....	34
Figure 2-8 : Dispositif de mesure dans le regard aval du filtre.....	35
Figure 2-9 : Dispositions des sondes de niveau dans le filtre.....	35
Figure 2-10 : Méthodologie de reconstitution de l'échantillon moyen en entrée de l'ouvrage.....	36
Figure 2-11 : Préleveur 24 flacons en entrée (gauche) et monoflacon en sortie (droite).....	37
Figure 2-12 : Cas de figure des différentes situations de prélèvement.....	38
Figure 2-13 : Vannage de la conduite conservée du déversoir d'orage 8001.....	39
Figure 2-14 : Hauteur d'eau mesurée par la sonde ultrason, à l'entrée du filtre, pour l'épisode pluvieux du 21 juillet 2016.....	42
Figure 2-15 : Méthode de détermination de l'hydrogramme du système.....	42
Figure 3-1 : Débits maximaux observés en entrée de l'ouvrage entre avril et septembre.....	45
Figure 3-2 : Débits maximaux observés en sortie de l'ouvrage entre avril et septembre.....	46
Figure 3-3 : Suivi hydrodynamique de la filière de traitement pour l'événement pluvieux du 26 juillet 2016.....	46
Figure 3-4 : Détermination de la vitesse de filtration à partir du flux hydraulique.....	47
Figure 3-5 : Zone de dissipation du flux hydraulique.....	49
Figure 3-6 : Zones de dépôts dans le regard de répartition (gauche) et en amont des gabions (droite).....	49
Figure 3-7 : Concentrations moyennes en entrée pour les différents déversements.....	51
Figure 3-8 : Efficacité épuratoire sur les MES en fonction de la concentration d'entrée.....	53
Figure 3-9 : Relation linéaire entre les concentrations d'entrée et de sortie pour la DCO et les MES.....	54
Figure 3-10 : Relation linéaire entre les concentrations d'entrée et de sortie pour le NTK, le N-NH ₄ et le Pt.....	54
Figure 3-11 : Lingettes retenues par le dégrilleur (gauche) et la grille anti-intrusion (droite) suite à de nombreux déversements.....	58
Figure 4-1 : Sollicitation de la géomembrane sur les parois latérales.....	62
Figure 4-2 : Charriage du matériau filtrant lors des alimentations verticales.....	63
Figure 4-3 : Proposition d'amélioration de la zone en aval des gabions.....	66
Figure 4-4 : Plan de situation des réseaux et des ouvrages existants.....	70
Figure 4-5 : Implantation et profil en long de la dernière ZDV.....	73

INTRODUCTION

En considérant les exigences de traitement des eaux de ruissellement urbain, les solutions traditionnelles de stockage sont capables de répondre aux critères actuels de qualité d'eau du milieu naturel. Les systèmes de traitement n'ont pas le seul rôle de rétention du premier flot de rinçage du réseau, qui peut contenir la majeure partie de la pollution, mais assure aussi un traitement des différents polluants entraînés par les eaux pluviales.

Parmi les techniques alternatives, les marais artificiels sont revendiqués non seulement pour leurs performances épuratoires mais également pour leur capacité de retranscription en fonction du contexte local. Par ailleurs, les nombreuses études réalisées sur différents types d'effluents et de boues soulignent l'adaptation de ce type d'ouvrage au traitement des surverses de déversoir d'orage.

Le projet présenté dans ce rapport intervient dans le cadre de la restauration du Stadenrhein, cours d'eau phréatique, pour lequel la commune de Beinheim a choisi de mettre en place des installations de traitement à l'exutoire de ses déversoirs d'orages afin de réduire l'impact des déversements sur le milieu naturel.

Un premier ouvrage, construit en décembre 2015, a été étudié pendant cinq mois afin de comprendre, optimiser et valider le fonctionnement hydraulique et épuratoire d'un filtre planté de macrophytes conçu pour le traitement des surverses de déversoir d'orage de cette commune.

Le contexte particulier du site d'étude, situé dans la plaine du Rhin, n'est pas favorable à la conception d'un marais artificiel à flux vertical qui, pourtant, est considéré comme la technique la plus adaptée au traitement des eaux de ruissellement. En effet, l'absence de dénivelé rend inappropriée la conception d'un ouvrage traditionnel. Des ajustements ont alors été entrepris lors de la conception de cet ouvrage unique en son genre.

L'étude réalisée au Syndicat des Eaux et de l'Assainissement Alsace-Moselle a consisté au suivi hydrodynamique et physico-chimique du système de traitement par :

- La mise en place d'une instrumentation spécifique ;
- L'identification des flux hydrauliques et du comportement de l'ouvrage ;
- L'identification, la caractérisation et la quantification des polluants.

L'intérêt de ce projet réside dans l'apport de solutions techniques en rapport à l'optimisation de la conception de l'ouvrage en vue de concevoir un dernier ouvrage sur la commune de Beinheim et de définir des règles communes pour la construction des futurs ouvrages sur le territoire local.

1. REVUE DE LITTÉRATURE

1.1. Contexte réglementaire

Depuis plusieurs années, la réglementation s'oriente de plus en plus vers le traitement des eaux de ruissellement urbain et sur les rejets des déversoirs d'orage. Source de pollution majeure des cours d'eau, les eaux déversées au milieu naturel ne reçoivent, la plupart du temps, aucun traitement. Fort de ce constat, les États membres de l'Union Européenne ont décidé de conduire une politique plus stricte envers la protection du milieu récepteur, notamment les eaux de surface et souterraines, en adoptant des textes de lois nationaux et européens.

1.1.1. Les textes européens

Le premier texte européen s'intéressant à la protection des milieux aquatiques est la Directive 76/464/CEE concernant la pollution causée par certaines substances dangereuses déversées au milieu naturel du 4 mai 1976.

Il s'agit du premier texte réglementaire fixant des limites pour les rejets de substances dangereuses au milieu aquatique. Ces substances, listées dans la Directive, sont répertoriées en deux groupes bien distincts : les substances dangereuses dont la pollution doit être éliminée, et les substances dont la pollution des eaux doit être réduite.

Elle prévoit également l'établissement d'un programme de réduction de la pollution, par les États membres, comprenant des objectifs de qualité des milieux et des normes d'émissions (CUE, 1976).

En 1991, l'Union Européenne a établi la Directive 91/271/CEE du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux urbaines résiduaires, visant à protéger la santé humaine et l'environnement. Cette Directive fixe un cadre réglementaire européen pour la collecte, le traitement et le rejet des eaux urbaines résiduaires, source de pollution du milieu aquatique. Elle définit, entre autre, des valeurs limites d'émission de polluants vers le milieu récepteur (CUE, 1991).

Enfin, la Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE du 23 octobre 2000 définit un cadre pour la gestion et la protection des milieux aquatiques au travers de grands bassins hydrographiques sur l'ensemble du territoire européen. Cette directive fixe des objectifs de qualité pour les masses d'eaux superficielles et souterraines, notamment en termes de préservation et de restauration des masses d'eaux.

L'objectif général est l'atteinte du bon état des différents milieux d'ici à 2015 sur tout le territoire européen. Étant donné que cet objectif n'a pas été atteint pour la plupart des masses d'eaux, il est possible de reporter cette échéance à deux reprises, soit en 2021, soit au plus tard en 2027.

La France a, quant à elle, décidé d'adopter la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) le 30 décembre 2006, dans le but d'atteindre les objectifs de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE).

Les grandes lignes de la DCE consiste à :

- Gérer et protéger les milieux aquatiques par bassin versant ;
- Fixer des objectifs de qualité par masse d'eau ;

- Planifier et programmer des échéances ;
- Analyser économiquement les modalités de tarification de l'eau et l'intégration des coûts environnementaux ;
- Renforcer la transparence de la politique de l'eau en informant le public.

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans le contexte de la DCE, étant donné que le cours d'eau du Stadenrhein contribue à la qualité de la masse d'eau de la Sauer 3. Selon les données de 2016 issues du Système d'Information sur l'Eau Rhin-Meuse (SIERM), le cours d'eau est pourvu d'un état écologique médiocre et d'un bon état chimique.

1.1.2. Les textes français

En France, la gestion de l'eau est réglementée par trois grandes lois, celle du 16 décembre 1964, la « Loi sur l'Eau » du 3 janvier 1992 et enfin la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques dite « LEMA » du 30 décembre 2006.

La première grande loi sur l'eau (Loi n° 64-1245) fait référence à la gestion de l'eau autour de six grands bassins hydrographiques français. Cette loi instaure la notion de gestion globale de l'eau à l'échelle du bassin, ainsi que le principe du « pollueur-payeur », visant à préserver la qualité de l'eau. C'est ainsi qu'ont été créées les Agences de l'Eau (RF, 1964).

La loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 dite « Loi sur l'eau » marque un tournant important puisque l'eau est reconnue comme « patrimoine commun de la nation ». Elle renforce la loi de 1964 en fixant des objectifs de qualité par cours d'eau. Elle rend obligatoire, d'ici 2005, la collecte et le traitement des eaux usées domestiques en transcrivant en droit français la directive européenne de mai 1991 sur les eaux urbaines résiduaires. Au sein de chaque bassin versant sont créés les SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) et les SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux), systèmes de planification globale de la ressource en eau au niveau local (RF, 1992)

Enfin, la LEMA, loi n° 2006-1772, transpose en droit français la Directive Cadre sur l'Eau de 2000. Elle rénove le cadre des lois sur l'eau de 1964 et de 1992 qui avaient posé les fondements de la politique française de l'eau. L'atteinte des objectifs fixés par la DCE est encouragée par l'utilisation des outils existants, permettant la poursuite d'une gestion équilibrée et durable de la ressource en eau. La LEMA reconnaît le droit à l'accès à l'eau pour tous, ainsi que l'importance du changement climatique dans la gestion des ressources en eau.

Avec cette loi, les collectivités territoriales peuvent désormais adapter les services publics d'assainissement pour répondre aux enjeux environnementaux (RF, 2006).

1.1.3. Textes relatifs aux rejets urbains de temps de pluie

La protection du milieu naturel est devenue, au fil des années, un enjeu essentiel, notamment dans le but de respecter les objectifs de qualité des masses d'eau fixés par la Directive Cadre sur l'Eau. Les nombreux textes de lois cités précédemment font tous références à la préservation des milieux aquatiques. Néanmoins aucun d'entre eux ne fixe de limites quantitatives et qualitatives des rejets urbains de temps de pluie.

En réponse à ces imprécisions administratives, les collectivités proposent des solutions d'aménagements permettant une meilleure gestion des eaux pluviales. Cette nouvelle

préoccupation les incite à réduire les flux déversés au milieu naturel, mais également à diminuer les concentrations des rejets urbains de temps de pluie.

Afin d'atteindre le bon état écologique des cours d'eau, les collectivités doivent s'attacher à réduire le plus en amont possible, les apports d'eau météorique dans les réseaux (déconnexion des toitures, infiltration à la parcelle, chaussée réservoir, les noues, les toitures terrasses, les tranchées drainantes, les puits d'infiltration.), ou réaliser des ouvrages de traitement des rejets de temps pluie afin de limiter les concentrations de polluants vers le milieu récepteur.

1.2. Pollution des rejets urbains de temps de pluie

Les Rejets Urbains de Temps de Pluie (RUTP) désignent l'ensemble des rejets du système d'assainissement d'une agglomération urbaine vers le milieu naturel, se produisant pendant un événement pluvieux et la période qui lui succède, jusqu'à ce que le réseau d'assainissement retrouve son fonctionnement de temps sec (Chocat *et al.*, 2007).

Selon Chocat *et al.* (2007), les RUTP regroupent :

- Les rejets des réseaux d'eau pluviale stricte (réseaux séparatifs) ;
- Les surverses de réseaux d'assainissement (déversoirs d'orage, trop-plein d'ouvrages de pompage, by-pass de station d'épuration) ;
- Les rejets à l'aval des stations d'épuration par temps de pluie.

Leur étude s'intéresse exclusivement aux rejets urbains de temps de pluie provenant de la surverse d'un déversoir d'orage (DO). Les autres composantes des RUTP ne seront donc pas développées.

1.2.1. Principaux polluants et origine des rejets

Les paramètres physico-chimiques représentatifs des polluants présents dans les eaux de ruissellement comprennent (Dechesne, 2002 et Chocat *et al.*, 1994) :

- **Des matières solides** : représentées par les MES et les MVS qui sont un indicateur significatif de la pollution organique.
- **Une pollution minérale** : la plupart des nutriments proviennent de la dégradation de la matière organique (ammonium N-NH₄) ou d'origines spécifiques (phosphates P-PO₄ provenant des lessives et les nitrates N-NO₃ des fertilisants). Les rejets urbains de temps de pluie contiennent également un large panel de métaux lourds (Cu, Cd, Pb et Zn).
- **Une pollution organique** : composée de molécules simples (carbone, hydrogène, oxygène et nitrogène), facilement biodégradable. Néanmoins, certaines molécules synthétiques comme les hydrocarbures ou les pesticides sont particulièrement toxiques. La matière organique est représentée par la DCO et la DBO₅ qui sont reliées par un ratio caractéristique de la biodégradabilité de l'effluent.

Les polluants des surverses de déversoir d'orage par temps de pluie proviennent de plusieurs origines :

- **La traversée de l'eau de pluie à travers l'atmosphère** : de nombreux polluants présents dans l'atmosphère sous forme de gaz ou de poussière seront remobilisés lors de chaque événement pluvieux.
- **Le ruissellement urbain** (érosion, lessivage des sols et des voiries) : selon Dechesne (2002) et Gromaire-Mertz (1998), la quantité de polluants est basée sur 3 mécanismes :
 - Dépôt : accumulation de polluants durant les périodes sèches rejetés par les déchets urbains domestiques, les déjections animales, les déchets végétaux, les rejets des moteurs à combustion (métaux lourds, hydrocarbures) et les éléments érodables des routes (goudron, ciment, peinture, agents de surface).
 - Érosion : remobilisation des polluants déposés au fil du temps par un événement pluvieux ou par une action humaine (nettoyage de la chaussée).
 - Ruissellement : les polluants sont amenés jusqu'aux avaloirs, rejoignant ainsi le réseau d'assainissement (unitaire ou séparatif).

Le ruissellement urbain comprend également le ruissellement des toitures des habitations. L'effluent contient peu de matières en suspension, mais il est plutôt chargé en cuivre ou en zinc, fonction du type de matériaux utilisés pour les gouttières de toiture.

- **L'écoulement en réseau d'assainissement unitaire** : une partie de la pollution des rejets de temps de pluie provient des eaux usées elles-mêmes, par mélange avec les eaux pluviales. Néanmoins, la plus grande source de pollution provient de la remise en suspension des dépôts ayant décanté préalablement par temps sec.

1.2.2. Caractérisation des rejets

Les rejets urbains de temps de pluie caractérisés par leur discontinuité temporelle révèlent une composition des effluents extrêmement variable.

En effet, il est possible d'observer une grande variabilité des concentrations, que ce soit pour un même site, à différents intervalles de temps d'un même événement pluvieux ou entre différents événements pluvieux.

Ainsi, il est difficile de prédire la qualité d'un effluent pour un événement pluvieux spécifique à un endroit donné.

Lors des RUTP, les concentrations des effluents de temps de pluie est plus importante que pour les eaux usées domestiques, notamment sur les matières en suspension.

De plus, les MES ont été reconnues comme étant le principal vecteur de transport des polluants présents dans les eaux de ruissellement. En effet, plus de 80 % de la pollution totale de ces eaux de ruissellement est liée aux matières en suspension (Chebbo, 1992).

La répartition de la pollution des eaux pluviales unitaires entre phases dissoute et particulaire (Tableau 1-1) a été quantifiée par Chebbo (1992).

DCO	DBO ₅	Pb	Hc
83 – 92 %	83 – 91 %	82 – 99 %	99 – 100 %

Tableau 1-1 : Proportion de pollution liée aux particules [Chebbo, 1992]

Les travaux de Ellis (1991), Philippe et Ranchet (1987) et Degrémont (1989), repris par Bertrand-Krajewski (2006) montrent que les concentrations en polluants dans les RUTP présentent des ordres de grandeurs comparables à ceux des eaux résiduaires urbaines (Tableau 1-2). Cependant, les concentrations des RUTP sont très variables, contrairement aux eaux usées de temps sec. Les variations observées sur un même

bassin versant peuvent atteindre un rapport de 1 à 10, contre 1 à 4 pour les eaux résiduaires.

Paramètres (mg/L)	Eau résiduaire urbaine	Rejets pluviaux séparatifs	Rejets pluviaux unitaires
MES	150-500	21-2600	176-2500
DCO	300-1000	20-500	42-900
DBO ₅	100-400	3-184	15-301
NTK	30-100	4-20	21-28,5
N-NH ₄	20-80	0,2-4,6	3,1-8
Pt	10-25	0,02-4,3	6,5-14

Tableau 1-2 : Domaine de variation des concentrations en polluants des différents types de rejets par temps sec et temps de pluie [Ellis, 1991 ; Philippe et Ranchet, 1987 ; Degrémont, 1989]

De nos jours, les rejets par temps de pluie vers le milieu naturel ne sont pas traités, entraînant des risques pour la qualité des cours d'eau. Au vue des concentrations des RUTP et des volumes importants rejetés directement dans l'environnement, il devient indispensable d'apporter un traitement à ces effluents contribuant à la pollution des masses d'eau.

1.2.3. Impacts sur le milieu aquatique

Le caractère événementiel et parfois très violent des rejets urbains de temps pluie peut provoquer des effets de choc sur le milieu naturel et être également à l'origine d'effets chroniques et cumulatifs (Chocat *et al.*, 1994).

Wolff (1991) présente les deux types d'effets susceptibles d'être observés suite à des déversements vers le milieu naturel (Figure 1-1).

Les effets immédiats ou effets de choc sont caractérisés par une pollution non rémanente dans le temps. En d'autres termes, les effets de la pollution cessent relativement vite lorsqu'il n'y a plus d'apports en polluants : le milieu naturel retrouve donc son état d'origine avant le prochain rejet. Les impacts liés à ce type de déversement ont des conséquences désastreuses pour l'écosystème aquatique, pouvant entraîner une mortalité piscicole importante.

Les effets cumulatifs font référence à une pollution rejetée sur une grande échelle de temps (la saison, l'année). Selon les auteurs, les masses polluantes annuelles rejetées par temps de pluie tendent à se rapprocher des masses annuelles rejetées par temps sec (Chocat *et al.*, 1994).

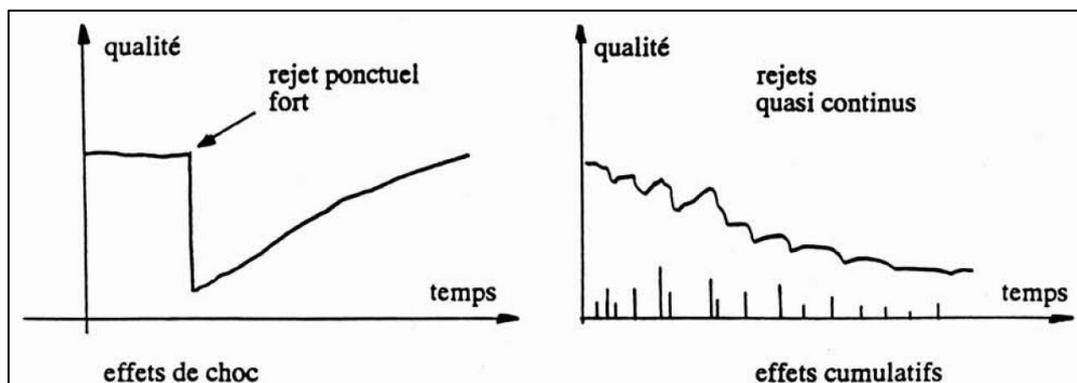


Figure 1-1 : Représentation schématique de l'impact des RUTP sur la qualité du milieu aquatique [Wolff, 1991]

Les impacts des déversements de temps de pluie sur un milieu aquatique dépendent tout autant de la quantité et de la nature des rejets que du type et de l'état du milieu récepteur. Les effets négatifs de ces rejets ont été constatés (Chocat *et al.*, 1994) :

- **Impact physique** : les caractéristiques hydro-morphologiques du cours d'eau récepteur peuvent être modifiées par les rejets de temps de pluie. En effet, les débits rejetés, parfois très importants, peuvent augmenter considérablement le débit global du cours d'eau favorisant les phénomènes d'érosion du lit et des berges. Par ailleurs, les quantités importantes de MES présentes dans ces rejets sont à l'origine d'un envasement de certaines parties du cours d'eau à plus ou moins long terme.
- **Choc anoxique** : La désoxygénation se caractérise par une diminution soudaine et rapide du taux d'oxygène dissous contenu dans le milieu récepteur pouvant entraîner, dans le pire des cas, une forte mortalité piscicole.
Les rejets urbains de temps pluie apportent de fortes quantités de matières organiques rapidement biodégradables par les bactéries naturellement présentes. La dégradation de ces matières organiques est réalisée par les bactéries qui consomment alors l'oxygène présent dans le milieu récepteur. Ce risque de choc anoxique est d'autant plus élevé lorsque le milieu aquatique présente un faible débit, une eau stagnante, de fortes profondeurs ou de faibles teneurs en oxygène. De plus, l'augmentation de la température amplifiera ce phénomène.
- **Impact des micropolluants** : les concentrations en micropolluants, de l'ordre du nanogramme ou du microgramme par litre, n'ont pas forcément d'impact direct sur le milieu récepteur. Néanmoins, l'action répétée des rejets urbains par temps de pluie peut cependant être néfaste à l'écosystème. En effet, l'absorption de certains micropolluants par quelques organismes aquatiques crée des effets d'accumulation le long de la chaîne alimentaire.
- **Hyper-eutrophisation des milieux aquatiques** : un apport excessif en nutriments dans le milieu naturel entraîne une hyper-eutrophisation. Elle ne concerne pas seulement les lacs, mais également les rivières dont l'eau se renouvelle lentement. Ce phénomène se caractérise par un développement rapide d'algues vertes entraînant des désordres sur l'écosystème aquatique (baisse du taux d'oxygène dissous).

Les rejets des surverses de déversoirs d'orage qui atteignent le milieu naturel sans aucun traitement peuvent entraîner un impact négatif sur la faune et la flore locales, compte tenu de la capacité de dilution du milieu récepteur. Le Tableau 1-3 indique les valeurs limites en concentration qui permettent de définir la classe de qualité d'un cours d'eau.

Classe de qualité	MES (mg/L)	DCO (mg/L)	DBO ₅ (mg O ₂ /L)	N-NH ₄ (mg/L)	N total (mg/L)	P total (mg/L)
Bleu Très bonne	< 25	< 20	< 3	< 0,1	< 1	< 0,05
Vert Bonne	25 ≤ x < 50	20 ≤ x < 30	3 ≤ x < 6	0,1 ≤ x < 0,5	1 ≤ x < 2	0,05 ≤ x < 0,2
Jaune Passable	50 ≤ x < 100	30 ≤ x < 40	6 ≤ x < 10	0,5 ≤ x < 2	2 ≤ x < 4	0,2 ≤ x < 0,5
Orange Mauvaise	100 ≤ x < 150	40 ≤ x < 80	10 ≤ x < 25	2 ≤ x < 5	4 ≤ x < 10	0,5 ≤ x < 1
Rouge Très mauvaise	≥ 150	≥ 80	≥ 25	≥ 5	≥ 10	≥ 1

Tableau 1-3 : Gammes des concentrations en polluants délimitant les classes de qualité des cours d'eau pour le SEQ-Eau [MEDD et AE, 2003]

En comparant le Tableau 1-2 et le Tableau 1-3, on constate que les rejets des surverses de déversoirs d'orage peuvent provoquer une dégradation du milieu aquatique vers des classes de qualité inférieure. C'est pourquoi il est nécessaire de limiter l'apport en polluants, résultant d'une gestion globale des rejets urbains de temps de pluie.

1.3. Le traitement des rejets urbains de temps de pluie

Par temps de pluie, la station de traitement des eaux usées (STEU) ne peut pas accepter toutes les eaux de ruissellement en provenance du réseau. Ce dernier doit délester une partie du flux hydraulique vers le milieu naturel par le biais des déversoirs d'orage (CERTU, 2003). Les rejets vers le cours d'eau ne sont alors pas traités, entraînant des enjeux majeurs quant à l'acceptabilité de la faune et de la flore aquatiques.

Les déversoirs d'orage sont des points de contrôle essentiels pour réguler les débits vers la STEU et diminuer les risques de mise en charge du réseau d'assainissement pouvant provoquer des inondations sur la chaussée. En France, les déversements s'effectuent soit vers des ouvrages de stockage (bassin d'orage ou de dépollution), soit directement vers le milieu naturel, ce qui est le cas le plus fréquent.

La meilleure connaissance des enjeux liés au RUTP a permis de sensibiliser les collectivités de l'importance de la mise en place d'ouvrages de traitement des rejets de temps de pluie afin de rejeter des eaux moins chargées en polluants.

1.3.1. Gestion intégrée des eaux pluviales

Les eaux pluviales, et les rejets qui leurs sont associés, sont responsables d'une partie de la dégradation des eaux superficielles. Une gestion intégrée de ces eaux permet entre autres de réduire les impacts sur le milieu naturel. D'ailleurs, ce mode de gestion s'attache à limiter les risques d'inondations, en délestant les réseaux unitaires ainsi que les cours d'eau, tout en intégrant la gestion des eaux pluviales dans le paysage urbain (Lami *et al.*, 2006).

Différentes solutions techniques dites « alternatives » sont disponibles pour maîtriser le ruissellement pluvial sur la zone aménagée et à son aval. En fonction des situations locales, on adaptera la solution à mettre en œuvre : noues, fossés, tranchées, chaussées à structures réservoirs, espaces inondables, toitures stockantes, bassins, puits d'infiltration, déconnexion des eaux de toitures, ...

Le stockage temporaire des eaux pluviales permet de lisser les débits arrivant au réseau d'assainissement, limitant ainsi le risque de débordement et les rejets directs par temps de pluie. De plus, certaines de ces techniques permettent de réaliser un traitement sommaire des eaux retenues.

1.3.2. Traitement des eaux avant rejet

Seul ou en complément de la gestion intégrée, le traitement des eaux avant rejet permet une autre approche de la gestion des eaux pluviales.

La difficulté de cette gestion réside dans le caractère épisodique des eaux pluviales. En effet, les installations de traitement doivent être dimensionnées en fonction des volumes

à traiter, souvent très importants en un court instant, et avoir la possibilité de ne pas fonctionner pendant de nombreux jours lors des périodes de temps sec. C'est pourquoi un certain type de système peut être utilisé comme le système compact de type décanteur lamellaire ou le système extensif de type marais artificiel.

Vymazal (2007) propose un système de classification des marais artificiels pour le traitement des eaux usées pouvant être adapté aux RUTP (Figure 1-2) :

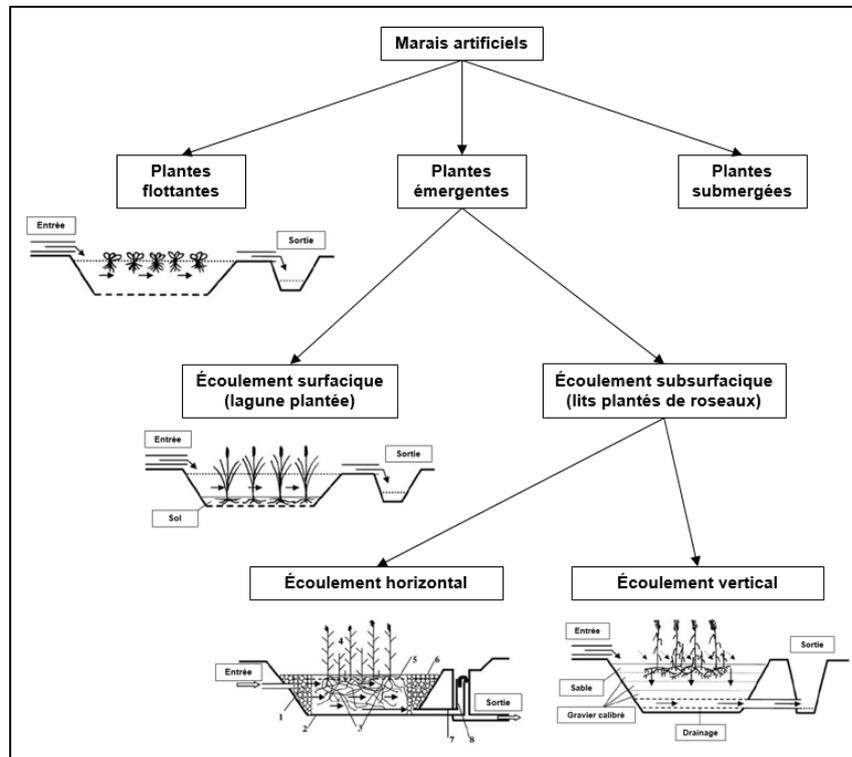


Figure 1-2 : Système de classification des marais artificiels [Vymazal, 2007]

L'étude réalisée par Vymazal (2007) s'articule autour des marais artificiels et notamment la filière de type filtre planté de roseaux qui a été étudiée par de nombreux auteurs (Fournel, 2012 ; Molle *et al.*, 2013 ; Schmitt, 2014 ; ...) pour le traitement des eaux pluviales.

1.3.3. Traitement par filtre planté de roseaux

L'utilisation des filtres plantés de macrophytes pour le traitement des eaux usées des collectivités est une technique au développement récent. Apparue en France dans les années 80, ce type de traitement a vu son développement s'accroître depuis 1997 (Iwema *et al.*, 2005).

L'utilisation de ces filtres est connue depuis de nombreuses années pour le traitement des eaux usées domestiques. Néanmoins, cette technique s'est vue adaptée pour le traitement des rejets urbains de temps de pluie donnant lieu à de plus en plus de sujets de recherche scientifique.

Les filtres plantés de roseaux à écoulement vertical (Figure 1-3) sont des ouvrages d'épuration des eaux, constitués de gravier ou de sable de différentes granulométries dans lesquels sont plantés des macrophytes.

Le traitement repose sur une filtration mécanique des particules en suspension présentes dans l'eau et une dégradation biologique de la phase dissoute par les bactéries fixées sur le matériau filtrant (Paulus, 2010). Le filtre est rempli de différents matériaux de granulométries croissantes jusqu'au fond du massif. L'effluent est réparti en surface du filtre de façon homogène, grâce à un système de bâchées, et s'écoule verticalement dans un milieu non saturé. Des drains, situés au fond de l'ouvrage, permettent de récupérer l'effluent traité et de l'évacuer au milieu naturel (Iwema *et al*, 2005).

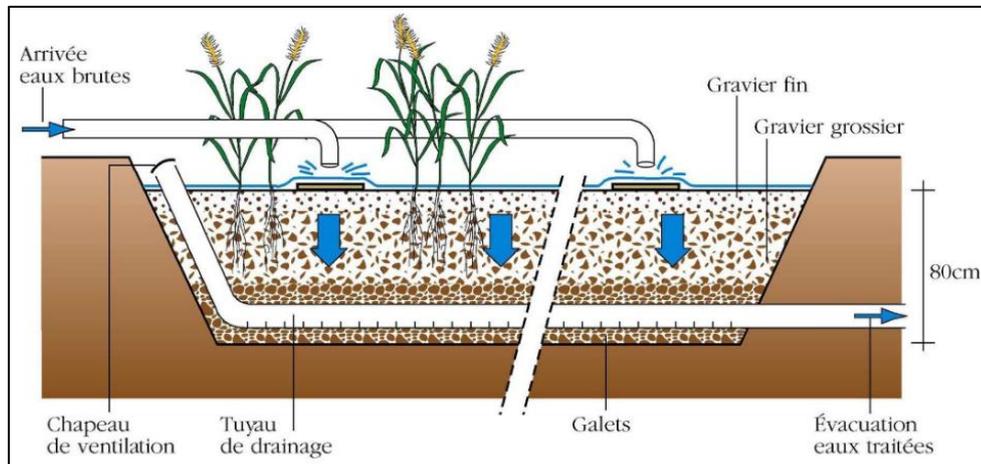


Figure 1-3 : Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement vertical [AERMC, 1999]

Les filtres plantés à écoulement horizontal (Figure 1-4) sont, quant à eux, saturés en eau grâce à un système de siphon en sortie permettant de régler la hauteur d'eau dans le massif. L'écoulement, horizontal, se fait à travers un filtre à gravier (Iwema *et al*, 2005). Les composés organiques sont aussi bien dégradés en aérobie qu'en anaérobie grâce aux bactéries situées dans la rhizosphère et le média filtrant. Néanmoins, le transport d'oxygène jusqu'aux racines est insuffisant pour avoir une bonne décomposition aérobie contrairement aux décompositions anoxique et anaérobie qui elles jouent un rôle important dans ce type de fonctionnement.

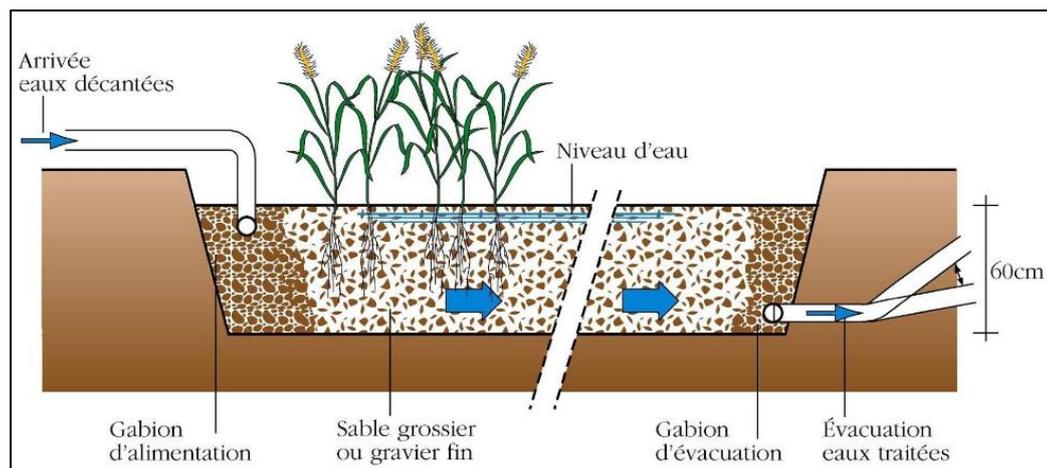


Figure 1-4 : Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement horizontal [AERMC, 1999]

Les roseaux, de l'espèce *Phragmites australis*, remplissent plusieurs fonctions essentielles au bon fonctionnement du filtre (Paulus, 2011) :

- Leurs racines sécrètent des acides organiques, dégagent de l'oxygène (en quantités limitées) favorisant ainsi le développement des bactéries dans leur entourage. On parle alors de « l'effet rhizosphère » ;
- Leurs tiges, sous l'action du vent, ouvrent des cheminements à l'eau à travers la couche de boue présente en surface et le massif filtrant en profondeur. Elles diminuent ainsi les risques de colmatage ;
- Ils protègent le filtre du soleil et de l'assèchement du filtre, tout en favorisant la minéralisation des boues ;
- Ils améliorent l'esthétique des filtres et facilitent leur entretien (plus de désherbages une fois la roselière bien établie) ;
- Ils confinent les odeurs éventuelles (sauf en hiver, entre le faucardage d'automne et la repousse de printemps) et limitent leur diffusion dans le voisinage.

1.4. Conception et performances des filtres plantés

1.4.1. Préconisations de conception et de dimensionnement

Les incertitudes liées au caractère épisodique des événements pluvieux sur les débits, les volumes et les concentrations rendent la conception des ouvrages extensifs de traitement des rejets de temps de pluie délicate. C'est pourquoi certains auteurs (Shutes *et al.*, 1999 et Meyer *et al.*, 2013) ont étudié ces systèmes afin d'établir une liste de recommandations pour leur dimensionnement.

Les filtres à écoulement subsurface, aussi bien horizontaux que verticaux, ont une conception et un dimensionnement similaires. Néanmoins, des différences remarquables entre ces deux systèmes jouent un rôle plus ou moins important sur l'efficacité du traitement.

Shutes *et al.* (1999) se sont intéressés au traitement des eaux de ruissellement des autoroutes par des filtres plantés de roseaux à écoulement horizontal (FPRh). Les éléments de dimensionnement à retenir sont les suivants :

- Une zone de sédimentation est indispensable pour prévenir le colmatage du filtre ;
- Le volume moyen d'un événement pluvieux doit être retenu dans le filtre pendant plusieurs heures (3 à 5 heures) afin d'assurer un bon traitement de l'effluent ;
- Une réserve hydrique au fond du massif doit être assurée pendant les périodes de temps sec.

Enfin, pour les systèmes verticaux, Meyer *et al.* (2013) se sont attachés au traitement des effluents issus des surverses de déversoir d'orage. Ils en retirent certains éléments importants :

- Plusieurs filtres en parallèle doivent être créés en cas d'eaux très chargées en particules ou de déversement fréquent (alternance de l'alimentation des lits) ;
- La granulométrie de la couche filtrante doit être adaptée en fonction de la charge polluante à traiter ;
- Une réserve hydrique au fond du massif doit être assurée pendant les périodes de temps sec.

Le choix de l'une ou de l'autre unité de traitement est nécessairement lié aux enjeux locaux et aux disponibilités foncières. En effet, les filtres plantés sont des systèmes extensifs, qui exercent une pression foncière importante à prendre en compte dans le choix de la filière de traitement.

Par ailleurs, le dimensionnement de ce type d'ouvrage pour le traitement des rejets urbains de temps de pluie pourra s'appuyer sur différentes approches (Ellis, 1999) :

- Hydrologique : la surface de l'ouvrage est fonction de la surface active du bassin versant, affectée d'un coefficient (1 à 5 % en règle générale) ;
- Hydraulique : la quantité d'eau à stocker au sein de l'ouvrage est fonction des différents apports (précipitations, déversements) ;
- Cinétique : le temps de séjour minimal dans l'ouvrage permet d'assurer une dégradation suffisante des polluants.

Chacune de ces approches peut être utilisée séparément ou, un couplage entre l'approche hydraulique et cinétique peut éventuellement être envisagé afin d'affiner le dimensionnement du système de traitement.

Le Tableau 1-4, ci-dessous, présente les critères de dimensionnement essentiels des filtres plantés de roseaux à écoulement vertical et horizontal pour le traitement des RUTP :

	Paramètres de dimensionnement
Filtre planté de roseaux horizontal	<ul style="list-style-type: none"> • Ratio largeur/longueur = 1 : 1 à 1 : 2 • Pente de fond de filtre = 1% maximum • Épaisseur minimale du substrat = 0,6 m • Conductivité hydraulique = 10^{-3} à 10^{-2} m/s • Charge hydraulique optimale = inférieure à $1 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{jour}$ • Vitesse d'amenée de l'eau = inférieure à 0,3 à 0,5 m/s (risque d'endommagement des macrophytes au-delà de 0,7 m/s) • Alimentation de toute la largeur du filtre • Maintien d'une épaisseur du substrat en submersion permanente en réglant le tuyau de sortie = minimum 300 mm sous la surface du filtre • Installation de gabions en sortie pour favoriser le drainage • Dispositif de contrôle du niveau d'eau dans le filtre en sortie de l'ouvrage
Filtre planté de roseaux vertical	<ul style="list-style-type: none"> • Adapter la granulométrie en fonction de la qualité de l'effluent pour prévenir tout colmatage du filtre • Utiliser plusieurs filtres en parallèle et alterner leur alimentation pour permettre la minéralisation des boues en surface du filtre • Charges hydrauliques annuelles de 40 à 80 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{an}$ • Zone saturée en fond de filtre pour éviter le stress hydrique des macrophytes • Couche de filtration minimale = 0,5 m • Débit de fuite de l'ouvrage = 0,02 L/m²/s • Mise en place de tuyaux pour aider à l'aération du massif filtrant • Un clapet anti-retour doit être installé lorsqu'il y a des remontées d'eau trop fréquentes
Commun aux filtres plantés	<ul style="list-style-type: none"> • Création d'une zone de rétention d'eau en surface du filtre, variable en fonction des fils d'eau entrée/sortie disponibles • L'ouvrage de surverse est apparenté à un déversoir situé en amont de l'ouvrage • Étanchéité de l'ouvrage par une géomembrane PE de 2 mm ou une couche d'argile de 40 cm

Tableau 1-4 : Préconisations pour le dimensionnement de filtres plantés de roseaux pour le traitement des eaux urbaines de temps de pluie [Shutes et al., 1999 ; Uhl et Dittmer, 2004 ; Meyer et al., 2013]

1.4.2. Performances épuratoires observées

De nombreux auteurs ont établi les performances épuratoires de marais artificiels pour le traitement des surverses de déversoir d'orage. La conception et le dimensionnement sont différents entre chacune de ces études. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1-5 :

		Filtre planté de roseaux vertical (Uhl et Dittmer, 2004)	Filtre planté de roseaux (Van de Moortel <i>et al.</i> , 2009)	Marais filtrant (Van de Moortel <i>et al.</i> , 2009)	Filtre planté de roseaux vertical (Fournel, 2012)	Filtre planté de roseaux vertical (Arias Lopez, 2013)
MES	Influent (mg/L)	99				
	Effluent (mg/L)	< 10				
	Rendement (%)	-			78	91
DCO	Influent (mg/L)	75				
	Effluent (mg/L)	12				
	Rendement (%)	84	84,6 - 91,6	53,7 - 67,9	60	86
DBO ₅	Influent (mg/L)	8,9				
	Effluent (mg/L)	< 3				
	Rendement (%)	-				88
N total	Influent (mg/L)		10,8 - 53			
	Effluent (mg/L)					
	Rendement (%)		94,8 - 98,6	33,3 - 39,9		
NTK	Influent (mg/L)					
	Effluent (mg/L)					
	Rendement (%)				50 - 80	70
N-NH ₄	Influent (mg/L)	0,74				
	Effluent (mg/L)	0,03				
	Rendement (%)	96			33 - 99	
N-NO ₃	Influent (mg/L)	0,76	4,3 - 16,1			
	Effluent (mg/L)	2,36				
	Rendement (%)	-	98,6 - 99,6	99,6 - 99,8		
Pt	Influent (mg/L)		2,1 - 5,9			
	Effluent (mg/L)					
	Rendement (%)		63,4 - 78,8	31 - 41		

Tableau 1-5 : Efficacité épuratoire de marais artificiels pour le traitement des rejets des surverses de déversoir d'orage

Les rendements épuratoires élevés des marais artificiels pour le traitement des rejets des surverses de déversoir d'orage ont été prouvés, néanmoins les performances de ce type d'ouvrage sont influencés par de nombreux paramètres comme la température, le taux de charge, la concentration de l'influent, la période de temps sec précédant l'événement pluvieux et les débits d'alimentation (Dittmer *et al.*, 2005).

1.4.3. Filière de traitement adaptée aux surverses de déversoir d'orage

La majorité des marais artificiels étudiés, dans les différentes ressources bibliographiques recensées dans ce rapport, se concentre sur les filtres plantés de roseaux à écoulement vertical (FPRv).

Les études menées sur cette filière montrent de hautes performances épuratoires concernant la matière organique et les composés azotés et phosphorés.

Il est vrai que cette technologie est plus coûteuse qu'un simple marais d'infiltration, de ce fait l'utilisation d'une filière à filtre planté de roseaux à écoulement vertical est seulement recommandé pour le traitement des surverses de déversoir d'orage ou quand le contexte local ne permet pas l'implantation d'un système d'infiltration.

En effet, les FPRv sont capables de traiter de fortes charges polluantes sans avoir de risque de colmatage. Leur utilisation est alors justifiée dans les cas suivants (Fournel, 2012) :

- Surverses de déversoir d'orage fréquentes et/ou très chargées ;
- Zones urbaines avec une forte densité de population ;
- Cas spécifiques :
 - Zones industrielles, avec la nécessité de traiter des polluants spécifiques ;
 - Eaux de ruissellement de voiries à fort trafic, avec de grandes charges en métaux et polluants organique.

SYNTHÈSE - REVUE DE LITTÉRATURE

L'étude bibliographique a permis de mettre en évidence la pollution engendrée par les eaux de ruissellement urbain comprenant un certain nombre de polluants, tels que les matières en suspension, la matière organique et les nutriments. Les concentrations des effluents de ruissellement urbain sont soumises à de fortes variabilités intra-événementielles liées, entre autres, à la durée de temps sec entre deux événements pluvieux. De plus, différentes études montrent que la majeure partie de la pollution présente dans les eaux de ruissellement urbain est sous phase particulière.

Le traitement des rejets urbains de temps de pluie avant le rejet au milieu naturel devient alors essentiel afin de limiter les impacts nocifs sur les cours d'eau. En effet, les surverses de déversoir d'orage ne sont que très rarement équipées de système de traitement, or lorsque le milieu naturel ne permet pas une dilution des rejets urbains de temps de pluie, les conséquences peuvent être désastreuses pour la faune et la flore locales.

Un moyen de traiter ces effluents, est la mise en place de filtres plantés de roseaux, qui sont efficaces pour traiter une diversité d'effluents, dont les effluents urbains, qu'il s'agisse des eaux usées domestiques ou des eaux de ruissellement urbain. Ces systèmes rustiques réalisent une épuration très intéressante au regard des rendements affichés par certaines études.

Au vu des nombreuses études portant sur le traitement des surverses de déversoir d'orage, rares sont celles qui s'intéressent aux filtres plantés de roseaux à écoulement horizontal. Le fait est que la filière verticale est de loin la plus adéquate pour traiter les effluents issus des déversoirs d'orage.

Le filtre étudié au sein du Syndicat des Eaux et de l'Assainissement Alsace-Moselle n'est absolument pas conventionnel dans sa conception et dans son fonctionnement en comparaison avec la littérature. En effet, les conditions altimétriques et foncières ne permettent pas d'envisager un filtre vertical ou horizontal. C'est pourquoi l'étude de son comportement hydraulique et épuratoire permettra de cibler des points d'amélioration dans l'optique de promouvoir cette filière pour des contextes locaux similaires.

2. CONTEXTE, MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1. Contexte de l'étude

2.1.1. Présentation du SDEA

Le Syndicat des Eaux et de l'Assainissement Alsace-Moselle (SDEA) est un syndicat mixte dont le fonctionnement est régi par le Code Général des Collectivités Territoriales. Il fédère des communes ou groupements de communes (syndicats, communautés de communes), l'Eurométropole de Strasbourg et le Département du Bas-Rhin. Créé en 1939 sous le nom de Service des Eaux de Strasbourg-Campagne et regroupant alors 55 communes, il deviendra en 1998 le Syndicat des Eaux et de l'Assainissement du Bas-Rhin. Au service de plus de 810 000 habitants dans près de 500 communes, le SDEA compte aujourd'hui 566 agents pour un budget annuel d'environ 200 millions d'euros (SDEA, 2015). L'adhésion de collectivités du Haut-Rhin, en 2013, et de Moselle, en 2015, ont conduit le SDEA à adopter la dénomination « SDEA Alsace-Moselle ».

Le SDEA a engagé depuis le début des années 2000 une démarche pluriannuelle de territorialisation dont l'objectif est d'assurer une proximité et une réactivité renforcées aux collectivités membres. Le SDEA s'organise autour (Figure 2-1) :

- D'un siège situé à Schiltigheim regroupant les fonctions supports (ressources humaines, affaires juridiques - achats, finances - gestion des abonnés, contrôle interne et de gestion, management de la performance, communication) et les fonctions d'expertise technique (métiers et expertise technique, maintenance et travaux, ressources et méthodes) ;
- De quatre centres, un par territoire, assurant l'exploitation des réseaux et des ouvrages, les études et le suivi des travaux, la gestion administrative et financière, la gestion des abonnés ainsi que les missions technico-administratives ;
- D'antennes chargées, à une échelle locale, d'assurer les interventions techniques les plus courantes et d'apporter des réponses administratives rapides.

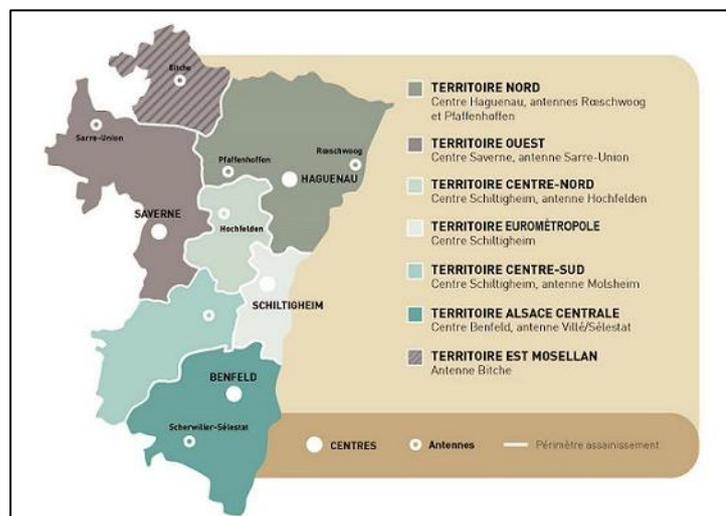


Figure 2-1 : Organisation géographique du SDEA [SDEA, 2015]

Depuis septembre 2015, le SDEA a élargi ses compétences en proposant aux communes de son territoire un service qui englobe à la fois les usages domestiques de l'eau et l'aménagement et la gestion des bassins versants et des cours d'eau, la protection-réaménagement des zones humides et la prévention des inondations. Une évolution naturelle puisque le SDEA s'y implique progressivement depuis une quinzaine d'années. Il devient ainsi acteur du Grand cycle de l'Eau.

En tant que groupement de collectivités, le SDEA est administré par les élus des collectivités membres. Chaque délégué est appelé à s'impliquer au niveau local, au niveau territorial et au niveau global au sein des commissions locales, des assemblées territoriales et des assemblées générales.

Le SDEA peut exercer les compétences suivantes en matière d'eau et d'assainissement :

- L'étude, la réalisation, l'extension, l'amélioration, la rénovation, le contrôle, l'entretien, l'exploitation et la maîtrise d'ouvrage des équipements publics de production, de transport et de distribution d'eau potable ;
- L'étude, la réalisation, l'extension, l'amélioration, la rénovation, le contrôle, l'entretien, l'exploitation et la maîtrise d'ouvrage des équipements publics de collecte, de transport et de traitement des eaux usées et pluviales ;
- Le contrôle et l'entretien des systèmes d'assainissement non collectifs ;
- La gestion des abonnés et l'assistance administrative.

Ses membres lui transfèrent tout ou partie de leurs compétences. Dans le cas d'un transfert total, le SDEA devient Maître d'Ouvrage des installations de la collectivité. Depuis janvier 2008, les nouvelles collectivités membres doivent transférer l'ensemble des compétences en eau et/ou assainissement au SDEA. Les collectivités déjà partiellement intégrées avant cette date conservent l'organisation mise en place mais peuvent effectuer des transferts complémentaires jusqu'à un transfert total, on parle alors de périmètre intégré.

2.1.2. Origine du projet

Dans le cadre de la réduction des rejets par temps de pluie du réseau d'assainissement vers le milieu récepteur, la commune de Beinheim a missionné le SDEA pour apporter un diagnostic du réseau d'assainissement communal. La commune de Beinheim est située dans la plaine du Rhin à environ 50 km au nord de Strasbourg.

L'étude d'impact par temps de pluie a mis en évidence une non-conformité du réseau dans son fonctionnement actuel. En effet, les résultats soulignent un impact fort et instantané des déversements sur le cours d'eau, le Stadenrhein, au regard de son débit.

Afin de répondre aux exigences réglementaires, une première solution d'aménagement, de création de trois bassins de pollution, a été proposée mais non retenue au vu de la complexité technique et du coût élevé des travaux.

Une réflexion s'est alors portée sur le prétraitement des eaux déversées au milieu naturel au droit des déversoirs d'orage et du trop-plein d'un bassin d'orage de manière à trouver un compromis entre exigences réglementaires et considérations techniques et financières.

Un bureau d'études a été mandaté dans le but de proposer des aménagements sur le Stadenrhein permettant la réduction de l'impact des déversements et l'amélioration, de manière globale, de sa qualité sur l'ensemble de son linéaire.

Trois mesures d'aménagements ont été mises en avant par ce prestataire :

- La restauration de la végétation rivulaire composée d'essences adaptées en bordure du cours d'eau ;
- La diversification des habitats du Stadenrhein tout en améliorant ses capacités autoépuratoires en aménageant des banquettes végétalisées d'hélophytes au sein du lit mineur ;
- La réduction des impacts des déversements en créant quatre Zones de Dissipation Végétalisées (ZDV). Les ZDV collecteront les eaux des déversoirs d'orage et trop-plein avant le rejet au milieu naturel.

Après un premier dimensionnement sommaire des ZDV, le SDEA a été chargé de réaliser la maîtrise d'œuvre de ces ouvrages, de leur conception jusqu'à leur réalisation. Une première ZDV a été réalisée en 2015 et sert d'ouvrage pilote pour cette étude.

2.1.3. Bassin versant, déversoir d'orage, milieu naturel

L'ouvrage pilote se situe à l'aval d'un bassin versant drainé par un réseau d'assainissement unitaire récoltant les eaux usées domestiques des habitations ainsi que les eaux pluviales. L'exutoire de ce bassin versant est un déversoir d'orage, qui déverse, par temps de pluie, vers l'ouvrage de traitement.

La délimitation du bassin versant et le réseau d'assainissement unitaire associé sont représentés à la Figure 2-2.

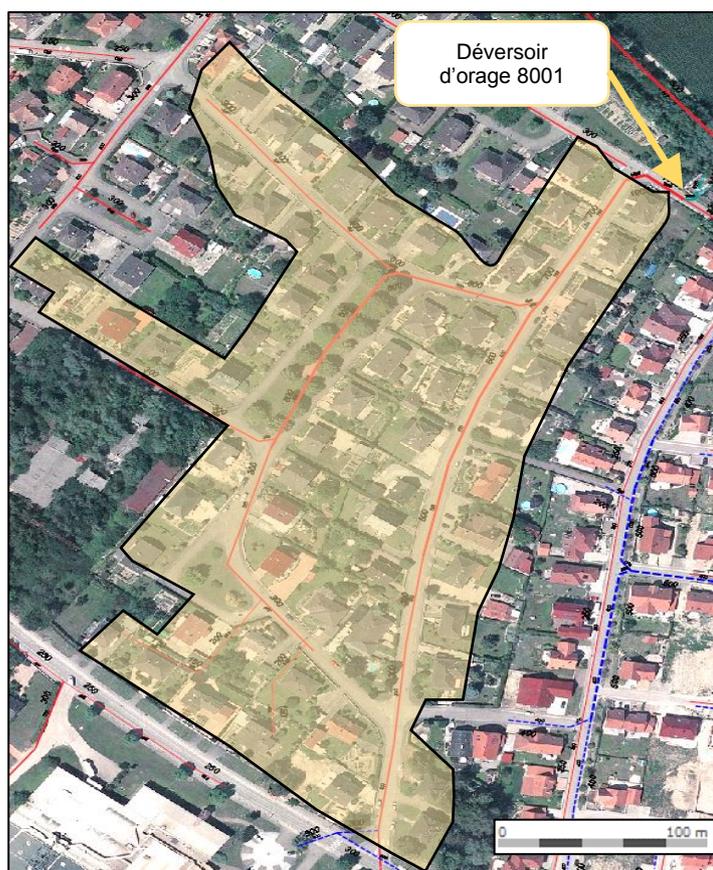


Figure 2-2 : Bassin versant et réseau associé

Les caractéristiques du bassin versant sont détaillées dans le Tableau 2-1 ci-après.

Bassin versant - DO 8001	
Type	Résidentiel - Individuel
Surface totale (ha)	6,5
Surface active (ha)	2,6
Coefficient d'imperméabilisation	0,4

Tableau 2-1 : Caractéristiques du bassin versant alimentant le déversoir d'orage 8001

Le coefficient d'imperméabilisation calculé pour le bassin versant est à la limite des valeurs usuelles entre un habitat individuel et un habitat collectif pour des quartiers résidentiels, selon le guide de référence du CERTU (2003), exposées dans le Tableau 2-2.

Type d'habitat	Coefficient d'imperméabilisation
Habitations très denses, centres-villes, parkings	0,8 à 1
Habitations denses, zones industrielles et commerciales	0,6 à 0,8
Quartiers résidentiels (habitat collectif)	0,4 à 0,6
Quartiers résidentiels (habitat individuel)	0,2 à 0,4

Tableau 2-2 : Valeurs de référence des coefficients d'imperméabilisation [CERTU, 2003]

On observe bien sur la Figure 2-2, la nature résidentielle du bassin versant étudié : des habitations de type pavillonnaire comprenant une maison, une cour pavée et un jardin. La valeur calculée du coefficient d'imperméabilisation correspond bien à la situation réelle.

L'exutoire de ce bassin versant est un déversoir d'orage dont le flux de temps sec continue jusqu'à la station d'épuration, tandis que par temps de pluie, une partie de l'effluent est évacuée vers l'ouvrage de traitement.

Le déversoir d'orage 8001, présenté à la Figure 2-3, est un déversoir latéral à crête haute qui présente une longueur de crête courte et une conduite aval étranglée. Ce type de déversoir permet d'avoir une bonne régulation du débit conservé même en cas de fortes pluies et la présence d'un seuil élevé empêche l'entrée des eaux de l'émissaire dans le réseau (ENGEES-Anjou Recherche, 2006).



Figure 2-3 : Vues des conduites d'entrée $\varnothing 1000$ mm (gauche) et conservée $\varnothing 300$ mm (droite) du déversoir d'orage 8001 alimentant le filtre (15/02/2016)

Les eaux surversées par le déversoir d'orage sont amenées jusqu'à l'ouvrage de traitement par un siphon (Annexe 1) pour franchir le cours d'eau du Stadenrhein. Une fois l'effluent traité, il rejoint le Stadenrhein (Figure 2-4), petit cours d'eau phréatique alimenté en grande partie par le Rhin.

Ce type de cours d'eau caractéristique est alimenté en partie par l'eau peu oxygénée de la nappe, rejoignant ensuite le réseau hydrographique ou s'infiltrant à nouveau dans la nappe.

Les débits restent souvent peu élevés avec des capacités de dilution très limitées ce qui fait que la qualité de l'eau est directement liée à la qualité de l'eau de la nappe phréatique et des rejets effectués dans le cours d'eau (Goetghebeur, 2009).



Figure 2-4 : Le Stadenrhein (03/06/2016)

La fragilité de ces cours d'eau phréatique soulève un point important : il faut supprimer les rejets en redirigeant les exutoires vers les cours d'eau pouvant les absorber (Goetghebeur, 2009). Néanmoins, cette solution n'est absolument pas viable techniquement pour le Stadenrhein. C'est pourquoi des compromis ont été réalisés pour restaurer le Stadenrhein et créer des ZDV limitant l'impact des rejets urbains par temps de pluie.

2.2. L'installation de traitement

2.2.1. Présentation globale

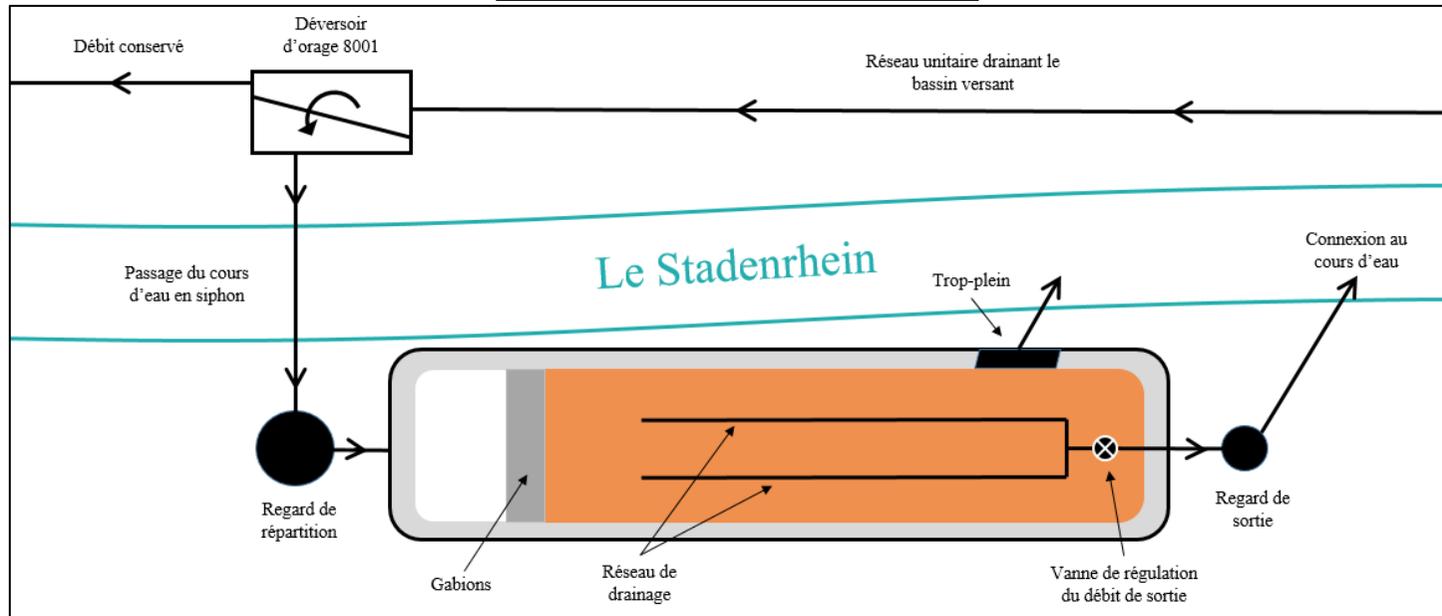
Construit en décembre 2015, l'ouvrage de traitement, d'une superficie de 130 m², est à la fois un filtre planté de roseaux de type horizontal et vertical. Le choix de ce fonctionnement hybride est notamment lié au contexte local, la plaine du Rhin, qui ne permet pas d'obtenir un fonctionnement traditionnel sans avoir recours à du pompage.

En effet, la filière verticale, qui est recommandée pour le traitement des surverses de déversoir d'orage, nécessite un minimum de 1 mètre de dénivelé entre l'arrivée de l'eau en surface du filtre et le fil d'eau de sortie auquel se rajoute la hauteur de stockage maximale souhaitée, soit un dénivelé de 2 mètres à 2.5 mètres (Molle *et al.*, 2013). Cependant, le site étudié dispose seulement d'un dénivelé de 0,2 mètre entre les fils d'eau d'entrée et de sortie du système de traitement. Ces conditions si particulières imposent par conséquent des contraintes de conception et de dimensionnement très particulières.

Dans son ensemble, le système est composé d'un déversoir d'orage, d'une conduite de décharge amenant l'eau au droit du cours d'eau, sous lequel passe un siphon, avant d'arriver à un regard de répartition permettant de rediriger le flux hydraulique dans l'axe du filtre. L'eau transite ensuite par le filtre, composé de différents granulats et planté de roseaux, puis, rejoint un regard de drainage avant de gagner le milieu naturel.

Les schémas de principe (vue de dessus et vue en coupe) de la filière de traitement sont présentés à la Figure 2-5. De plus, pour avoir une meilleure représentation de l'installation de traitement, des photographies des différents éléments du système de traitement sont visualisables en Annexe 2.

Vue de dessus



Vue en coupe

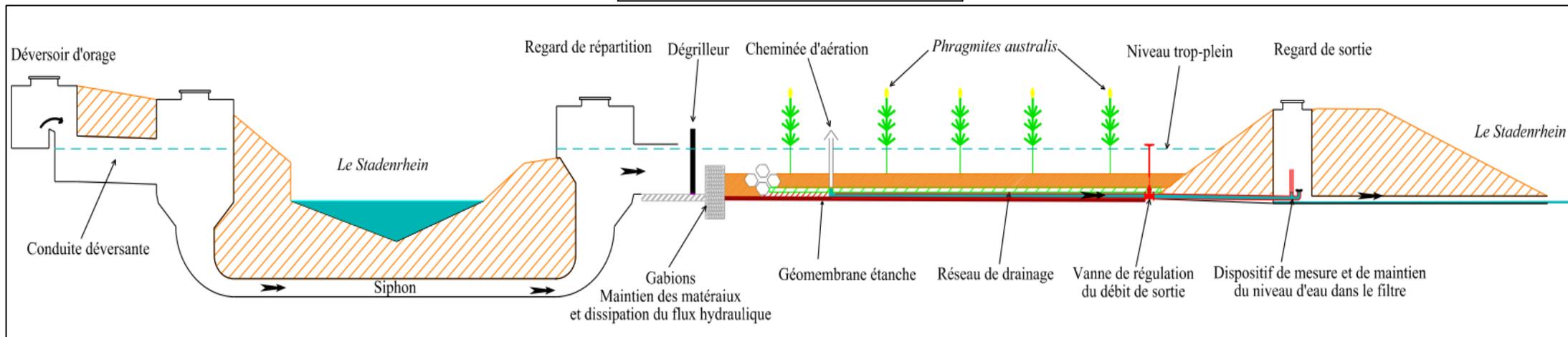


Figure 2-5 : Schémas de principe du système de traitement (vues de dessus et en coupe) [Inspiré de Schmitt, 2014]

L'emplacement spécifique du filtre en rive droite du Stadenrhein, soit sur la rive opposée du déversoir d'orage, est justifiée par des raisons foncières. D'une part, les surfaces disponibles du côté du déversoir d'orage n'étaient pas suffisantes pour réaliser l'ouvrage, et d'autre part la commune était propriétaire des terrains en rive droite.

Enfin, avant d'entrer dans le détail de la conception et du dimensionnement de l'ouvrage, il est important de souligner que la présente étude a été réalisée postérieurement à la réalisation de ce filtre planté et des choix techniques qui lui sont associés. Cette étude a pour objectif d'étudier le fonctionnement de l'ouvrage ainsi réalisé et le cas échéant de faire des propositions d'amélioration.

2.2.2. Conception et éléments de dimensionnement du système

Par rapport aux systèmes de traitement des eaux urbaines de temps de pluie, des modifications importantes ont dû être apportées à l'ouvrage pour essayer de compenser, tout du moins en partie, le faible dénivelé entre les fils d'eau d'entrée et de sortie. Pour ce faire, la conception du filtre a été réalisée selon un fonctionnement hybride : horizontal et vertical.

La conception du lit filtrant s'est donc inspirée de la littérature en conciliant, à la fois, une approche horizontale sur la première partie du filtre et verticale sur le reste. L'Annexe 3 montre de manière claire les différentes zones de fonctionnement, ainsi que la disposition des couches de matériaux : succession de couches verticales pour le fonctionnement horizontal et succession de couches horizontales pour le fonctionnement vertical.

L'origine de cette conception hybride a été proposée pour répondre à deux types de fonctionnement supposés en phase d'étude :

- Lors de faible déversement, le niveau d'eau au sein du massif ne dépassera pas la génératrice supérieure du matériau filtrant. Le fonctionnement prédominant sera alors horizontal avec une phase de vidange verticale ;
- Lors de fort déversement, le niveau d'eau passera alors rapidement au-dessus des gabions et se répartira sur toute la surface du massif. Le fonctionnement prédominant deviendra alors vertical.

De plus, on peut remarquer sur la Figure 2-5 que le fil d'eau de la conduite d'amenée est situé à la base du massif filtrant. L'alimentation en surface du filtre n'est tout simplement pas viable d'un point de vue technico-économique. En effet, dans ce cas, un terrassement dans la nappe phréatique, d'une surprofondeur de 0,5 mètre, ainsi qu'un lestage et la création d'un poste de relevage en sortie de l'ouvrage auraient été nécessaires pour obtenir un fonctionnement classique.

Il faut rappeler que ces filières de traitement des eaux pluviales sont des ouvrages rustiques, il n'est donc pas envisageable de construire des ouvrages trop coûteux pour la collectivité.

D'un point de vue général, l'ouvrage a été dimensionné suivant son volume de stockage en surface du filtre pour contenir un volume déversé correspondant à des pluies d'occurrence trimestrielle. Pour mémoire, le choix de ce volume de stockage résulte d'un compromis entre exigences réglementaires et considérations techniques et financières entre tous les acteurs du projet.

D'autre part, la mise en place de ce type d'ouvrage nécessite une disponibilité d'emprise foncière importante et doit pouvoir correspondre au volume de stockage désiré.

La parcelle considérée pour construire l'ouvrage disposait d'une surface largement supérieure à celle calculée lors du dimensionnement initial, ce qui a permis de réévaluer sa superficie pour augmenter considérablement son volume de stockage de 20 à 65 m³.

Ce système rustique, basé sur la filière d'épuration des eaux domestiques par lits plantés, a subi plusieurs aménagements spécifiques :

Étanchéité

Le filtre est isolé de la nappe phréatique par la mise en place d'une géomembrane imperméable. De façon à préserver son étanchéité, deux géotextiles anti-poinçonnement ont été disposés de part et d'autre de cette dernière, tel que montré en Annexe 4.

Regard de répartition et conduite d'aménagé

Un regard de répartition et une conduite ont été aménagés entre l'arrivée du siphon et l'entrée de l'ouvrage de traitement. Ce dispositif permet de rediriger le flux hydraulique dans le sens du filtre car l'arrivée du siphon se fait perpendiculairement au filtre. Le flux est tout d'abord dissipé en partie dans le regard puis orienté par une conduite de diamètre 1000 mm sur longueur de 2 mètres jusqu'au filtre (Annexe 4).

Dégrilleur

Un dégrilleur vertical manuel d'entrefer 20 mm a été installé à l'entrée immédiate du massif filtrant pour retenir un maximum de déchets flottants amenés par le réseau et le lessivage des sols.

Gabions

Des gabions sont disposés derrière le dégrilleur et jouent plusieurs rôles. Ils permettent, en premier lieu, de maintenir les matériaux du filtre (rôle de contrefort) mais également de casser le flux hydraulique qui arrive à l'entrée de l'ouvrage. Enfin, il permet aussi de retenir les quelques déchets flottants passés au travers du dégrilleur.

Les différentes couches

Les filtres plantés de roseaux sont par nature composés de différentes couches de matériaux de plusieurs granulométries. Les matériaux sont disposés en succession de couches de différentes épaisseurs et de granulométrie décroissante dans le sens de l'écoulement. Ces couches de matériaux sont représentées schématiquement à l'Annexe

3 et leurs caractéristiques sont détaillées dans le Tableau 2-3.

	Couche de filtration	Couche de transition	Couche de drainage
Type de matériau	Sable grossier	Gravier fin	Gravier grossier
Granulométrie (mm)	2/5	8/16	16/32
Épaisseur (m)	0,3	0,1	0,2 à 0,4

Tableau 2-3 : Caractéristiques des matériaux de garnissage du filtre

Enrochement

Des blocs sont disposés dans le filtre pour « délimiter » le fonctionnement horizontal du fonctionnement vertical. Ils limitent les phénomènes d'érosion superficielle sur la deuxième partie du filtre.

Drain de collecte et aération passive

Deux drains de collecte de 150 mm de diamètre sont disposés en fond de filtre et espacés de 1,5 mètre. Ils se rejoignent en un seul juste en amont du regard de sortie. Chaque drain est composé d'une cheminée à son extrémité, permettant une aération passive du fond du filtre (Annexe 4).

Végétaux

Le filtre est planté de macrophytes (*Phragmites australis*) à raison de 4 plants/m². Les jeunes pieds doivent, après plantation, disposer d'une réserve d'eau conséquente pour permettre leur croissance et leur prise au sein du massif granulaire. En règle générale un niveau d'eau constant doit être maintenu 5 à 10 cm en-dessous de la surface du lit.

Cette opération n'a pu être réalisée dans la mesure où la plantation a été effectuée au début de l'étude, cependant l'apport en eau météorique et des déversements ont conduit à une pousse rapide des plants comme montré à l'Annexe 4, même si les rhizomes ne sont pas encore trop développés en profondeur.

Trop-plein

Un trop-plein a été créé à la sortie du filtre pour éviter une mise en charge du réseau d'assainissement au niveau du déversoir d'orage (Annexe 4). La cote du trop-plein est calée en-dessous de celle de la crête du déversoir, ainsi la différence de hauteur entre le trop-plein et la surface du filtre permet d'obtenir un volume de rétention.

Vanne de régulation du débit

Une vanne de régulation a été installée sur la conduite de drainage du massif filtrant pour réguler le débit de sortie de l'ouvrage, ce qui permet également d'augmenter le temps de rétention synonyme d'une meilleure épuration de l'effluent.

Coude de maintien du niveau d'eau

Tout comme les FPRh, un coude en sortie de l'ouvrage permet de maintenir un niveau d'eau constant sous la surface du filtre. Néanmoins, le faible dénivelé du filtre étudié ne permet pas de se retrouver dans cette même situation. Le coude permet seulement d'obtenir une réserve hydrique de 0 à 20 cm en fonction de la pente du fond de filtre, pour pallier aux longues périodes de temps sec pouvant être néfastes à la survie des roseaux. Cette réserve hydrique est complétée par une surprofondeur de 20 cm réalisée lors du terrassement de l'ouvrage, augmentant ainsi la réserve d'eau au sein du massif.

2.2.3. Similitudes et différences de conception - dimensionnement

En comparaison avec la littérature, le filtre étudié comporte des points communs et divergents au niveau de la conception et du dimensionnement. Néanmoins, il est délicat de comparer l'ouvrage étudié avec les éléments de la bibliographie puisqu'aucun ouvrage n'a un fonctionnement à la fois horizontal et vertical.

Ainsi, les éléments comparatifs présentés dans le Tableau 2-4 font références à la fois aux filtres plantés horizontaux et verticaux : il s'agit d'une sorte de comparaison mixte.

Dans l'ensemble, le filtre est assez cohérent avec la littérature même si certains points sont assez éloignés des recommandations de dimensionnement ou de conception.

Paramètre de conception et de dimensionnement	Littérature	Filtre étudié
Ratio largeur/longueur	1 : 1 à 1 : 2	1 : 5
Pente de fond de filtre	1 % maximum	1 %
Charge hydraulique optimale	Inférieure à 1 m ³ /m ² /jour	0,05 à 2,5 m ³ /m ² /jour
Vitesse d'amenée de l'eau	Inférieure à 0,3 à 0,5 m/s	Inconnue (Vitesse variable en fonction de l'intensité du déversement)
Maintien d'une hauteur d'eau dans le filtre	minimum 300 mm sous la surface du filtre	Impossible par manque de dénivelé
Couche de filtration minimale	0,5 m	0,3 m
Débit de fuite de l'ouvrage	0,02 L/m ² /s	0,2 L/m ² /s (10 fois plus)
Temps de rétention de l'effluent optimal	3 à 5 heures	30 min à 3 heures
Volume de stockage en surface du filtre	Oui	Oui
Zone de sédimentation	Conseillée pour prétraiter	Oui et Non (avant les gabions)
Utilisation de filtres en parallèle	Conseillé pour la minéralisation des boues	Impossible d'un point de vue technique (Parcelle pas assez large)
Dispositif de contrôle du niveau d'eau en sortie	Oui pour de l'horizontal	Oui
Zone saturée en fond de filtre pour éviter le stress hydrique	Oui	Oui
Étanchéité de l'ouvrage	Oui	Oui
Ouvrage de surverse	Conseillé en amont du filtre	Oui mais à l'aval du filtre

Tableau 2-4 : Différences de conception et de dimensionnement entre la littérature et le système étudié [Shutes et al., 1999 ; Uhl et Dittmer, 2004 ; Meyer et al., 2013]

2.3. L'instrumentation

L'instrumentation mise en place a pour but de comprendre le fonctionnement hydraulique et de suivre la qualité de l'effluent en entrée et en sortie du massif filtrant, grâce à différents instruments de mesures répertoriés à l'Annexe 5.

Une campagne de mesures et de prélèvements doit répondre à des objectifs précis, en fonction des moyens disponibles, pour répondre aux besoins de l'utilisateur final des résultats.

Le filtre planté de roseaux, construit en décembre 2015, a fait l'objet d'une instrumentation sur une période de six mois, entre le mois d'avril et septembre 2016.

2.3.1. Suivi pluviométrique et hydraulique

Durant la campagne de mesures et de prélèvements, il est nécessaire d'avoir une idée précise de la pluviométrie pour caractériser les événements pluvieux. Cette précision doit permettre de connaître, sur des intervalles de temps relativement courts (classiquement 5 minutes), la hauteur d'eau précipitée, c'est-à-dire l'intensité moyenne sur chaque pas de temps. C'est la relative rapidité du cycle "pluie - ruissellement sur le sol - écoulement en réseau" qui nous oblige à considérer la discrétisation de la pluie sur des pas de temps courts (Vazquez et Zug, 2010). C'est pourquoi l'installation d'un pluviomètre à auget basculant (Hydreka, 2016) a été effectuée sur le site expérimental, visualisable à la Figure 2-6.



Figure 2-6 : Pluviomètre à auget basculant installé sur site (03/06/2016)

La mesure du débit est, quant à elle, essentielle puisque les flux hydrauliques mis en jeu représentent les principales variables du système de traitement.

L'entrée du système est caractérisée par le déversoir d'orage 8001, qui est un déversoir latéral à crête haute. D'une manière générale, ce type d'ouvrage est qualifié de simple, de par sa géométrie, permettant de calculer les débits déversés à partir d'une mesure de hauteur d'eau dans l'ouvrage, qui est réalisée par une sonde ultrason (Sofrel, 2013).

La sonde ultrason est raccordée à un enregistreur-transmetteur de données autonome (Figure 2-7) de la même marque que la sonde, Sofrel. Il a pour but d'enregistrer les données de hauteur d'eau et de les transférer au système de télégestion du SDEA, quotidiennement par le réseau GSM, afin de pouvoir exploiter les données sans avoir à se déplacer sur site. De plus, l'enregistreur est programmé pour envoyer une alerte sms à l'opérateur à chaque fois que la détection de surverse est activée dans le déversoir d'orage.

La proximité, du site d'étude, avec l'Allemagne crée des interférences au niveau du réseau GPRS ce qui a restreint le retour quotidien de données et l'émission d'alerte de déversement. Cette gêne est survenue deux mois après le début de la campagne de mesures et n'a pratiquement jamais cessé jusqu'à la fin de l'étude.

La sonde ultrason dispose d'un système de renvoi d'angle (Figure 2-7), qui permet de s'affranchir de la bande morte, distance de 20 cm à partir de l'extrémité de la sonde où aucune mesure n'est possible. De plus, le capteur est couplé à un détecteur de surverse placé sur la crête du déversoir, côté intérieur, ce qui permet d'affiner le pas de temps de mesure en fonction du niveau d'eau dans le DO. En temps normal, une mesure est effectuée toutes les heures afin de limiter la consommation de la batterie interne de l'enregistreur et dès lors que le détecteur de surverse est activé, synonyme de déversement imminent, la mesure s'effectue toutes les minutes jusqu'à ce que le niveau d'eau revienne à la normale.



Figure 2-7 : Enregistreur-transmetteur de données (gauche) et sonde à ultrason (droite) installés dans le déversoir d'orage 8001 (22/02/16)

Les données de sortie du système sont les eaux surversées par le trop-plein de l'ouvrage et le débit de sortie du filtre mesuré par une sonde piézométrique PDCR 1830 (Hydreka, 2016) installé dans un dispositif de mesure comme représenté à la Figure 2-8.

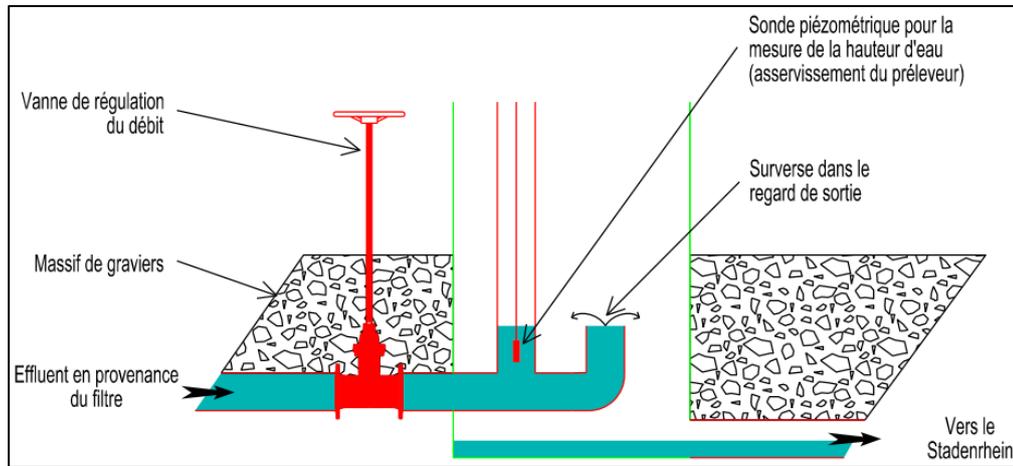


Figure 2-8 : Dispositif de mesure dans le regard aval du filtre

Enfin, le filtre planté est équipé de trois sondes piézométriques PDCR 1830 et d'une sonde ultrason SonicSens (Hydreka, 2016) qui permettent de suivre l'évolution de la ligne d'eau au sein du massif. Les sondes sont disposées à chaque endroit du filtre où il y a un changement de matériau filtrant. La Figure 2-9 montre l'emplacement de ces quatre sondes par rapport aux différents matériaux.

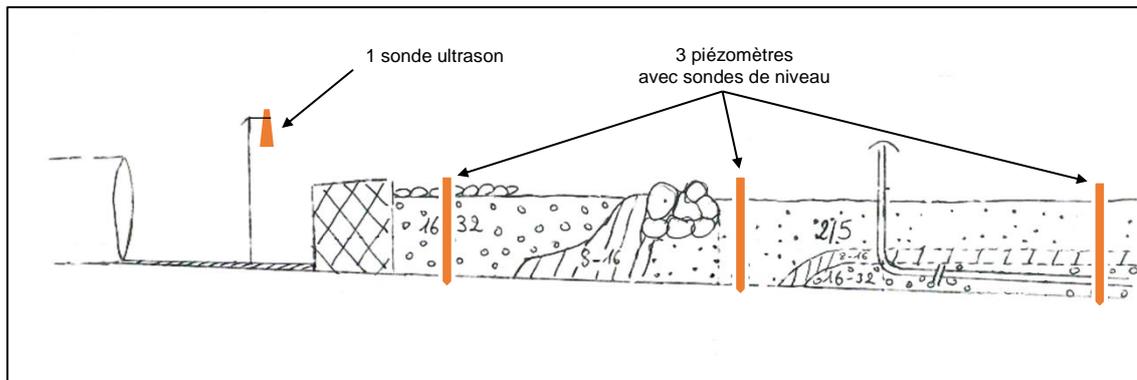


Figure 2-9 : Dispositions des sondes de niveau dans le filtre

Tous les instruments de mesures installés sur le site sont paramétrés avec le même pas de temps de la minute, pour être assez précis lors des phénomènes de remplissage et de vidange de l'ouvrage sans pour autant trop impacter la durée des batteries internes de chaque enregistreur auxquels ils sont raccordés.

2.3.2. Suivi des paramètres physico-chimiques

Si les mesures de la pluviométrie, des débits en entrée et en sortie de l'ouvrage et de l'évolution de la ligne d'eau se font en continu, sur toute la durée de la campagne, la mesure des matières polluantes s'effectue ponctuellement (manuellement ou automatiquement) lors d'un déversement par temps de pluie.

Le suivi des paramètres physico-chimiques consiste à déterminer la qualité des effluents à l'entrée et à la sortie de l'ouvrage de traitement (filtre planté uniquement) afin de

déterminer sa capacité épuratoire. Pour ce faire, deux points de prélèvements ont été mis en place : le premier situé dans le regard de répartition en amont du filtre et le second placé au niveau du regard de sortie. Les préleveurs choisis sont automatiques, isothermes et autonomes sur batterie (Hydreka, 2016) puisqu'il n'y a pas d'électricité sur le site.

La stratégie de prélèvement adoptée vise à réaliser un échantillon moyen en fonction du débit, aussi bien en entrée qu'en sortie du filtre. Pour cela, chaque préleveur doit être programmé par rapport au débit, selon les recommandations d'échantillonnages des eaux résiduaires urbaines (Pouzol, 2010).

L'échantillonnage sur le débit est souvent réalisé directement par le préleveur automatique via un asservissement sur le débit. Cependant, l'emplacement du préleveur d'entrée du filtre ne permet pas de réaliser cet asservissement. La stratégie d'échantillonnage a donc été revue pour le premier préleveur en adoptant une méthodologie de reconstruction de l'échantillon moyen, telle qu'illustrée à la Figure 2-10.

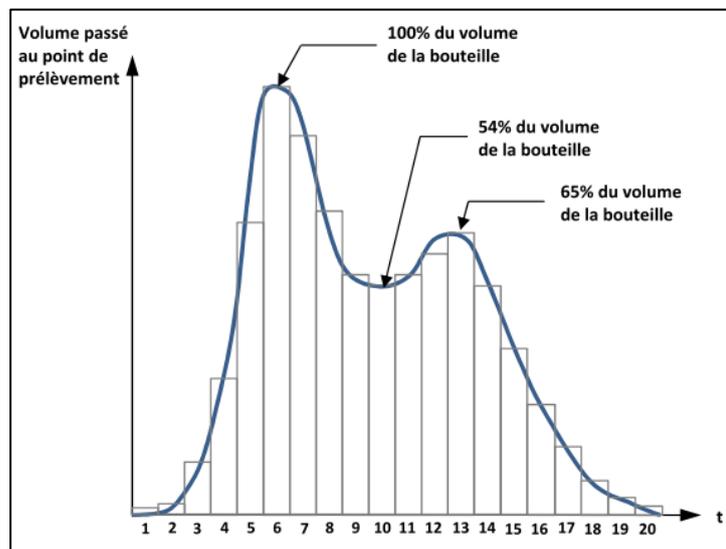


Figure 2-10 : Méthodologie de reconstitution de l'échantillon moyen en entrée de l'ouvrage [Schmitt, 2014]

Lors de la reconstruction de la chronique de débit au niveau du point de prélèvement, on s'attache à déterminer le volume écoulé pour un pas de temps donné. Ainsi, le volume prélevé manuellement dans chaque bouteille du préleveur est proportionnel au volume écoulé au point de prélèvement : l'échantillon moyen est alors reconstitué.

Ainsi, le choix du préleveur d'entrée s'est naturellement orienté vers un préleveur composé de 24 flacons polyéthylène (PE) de 1 litre, permettant de reconstituer l'échantillon moyen après chaque déversement. De son côté, le préleveur de sortie est directement asservi sur le débit, ce qui explique le choix d'un préleveur monoflacon en PE de 11 litres. Les deux préleveurs sont illustrés à la Figure 2-11 ci-dessous.

De plus, le choix du matériau PE pour la composition des bidons est en adéquation avec les paramètres physico-chimiques choisis, qui ne sont pas influencés par le temps de contact avec le support comme cela pourrait être le cas avec les micropolluants.



Figure 2-11 : Préleveur 24 flacons en entrée (gauche) et monoflacon en sortie (droite)
(29/04/2016)

Le paramétrage des préleveurs est délicat dès lors qu'on ne maîtrise pas les volumes transitant à chaque point de prélèvement. Par ailleurs, ces réglages ont été affinés au cours de l'étude et sont présentés dans le Tableau 2-5 :

	Préleveur Entrée	Préleveur Sortie
Flaconnage	24 flacons de 1 L	1 flacon de 11 L
Asservissement	Temps	Débit
Durée totale de prélèvement	48 minutes	-
Fréquence de prélèvement	1 par minute	1 tous les 1,5 m ³
Volume prélevé pour chaque prélèvement	500 mL	200 mL
Nombre de prélèvement total	48	55

Tableau 2-5 : Paramétrage des deux préleveurs automatiques

Ces deux réglages des préleveurs considèrent les contraintes liées à chacun d'eux et s'approchent au plus près des conditions réelles du fonctionnement du filtre, à savoir :

- Une alimentation du filtre brève et intense, de l'ordre de 15 à 30 minutes de déversement ;
- Un volume sortant non connu et très variable, mais la plupart du temps inférieur à 82,5 m³ qui correspond au volume total échantillonné par le préleveur.

Bien évidemment, pour que chaque prélèvement soit significatif, il faut que :

- La durée du déversement vers le filtre soit inférieure ou égale au paramétrage du préleveur d'entrée ;
- La durée de vidange du filtre soit inférieure ou égale au paramétrage du préleveur de sortie ;
- Le volume de l'échantillon moyen soit au moins égal à 3 litres pour permettre de réaliser les analyses par le laboratoire du SDEA.

Si la durée de déversement ou de vidange est supérieure à celle des préleveurs, on définit alors un ratio entre le volume total transité au point de prélèvement durant l'échantillonnage et le volume total déversé. Pour que l'événement échantillonné soit gardé, il faut obtenir un ratio de 80 % (valeur arbitraire), sinon il ne sera pas pris en compte.

2.3.3. Asservissement et situations de prélèvements

Les mesures de débit et de pollution sont les deux plus importantes variables du système de traitement en entrée comme en sortie de l'ouvrage. Néanmoins, la mesure de la pollution ne peut se faire indépendamment de celle du débit : les deux doivent se faire de manière simultanée.

Lors d'un déversement, chaque préleveur doit effectuer des prélèvements ponctuels selon la méthodologie décrite précédemment. Pour avoir lieu, ces préleveurs sont asservis à des organes de mesures :

- Le préleveur amont est couplé à un détecteur de surverse ;
- Le préleveur aval est couplé à la sonde de pression situé dans le dispositif de mesure situé dans le regard de sortie.

Par conséquent, le préleveur d'entrée se déclenche lorsqu'il détecte un niveau d'eau dans le regard de répartition en amont du filtre et s'arrête lorsque le filtre a fini de se vidanger (en raison du faible dénivelé). Le préleveur de sortie s'enclenche lorsque la sonde piézométrique, située dans le dispositif de mesure dans le regard aval, détecte une montée d'eau. Alors le prélèvement commence et se termine lorsque le niveau d'eau dans le dispositif revient à l'état initial.

Bien entendu, si les préleveurs atteignent leur capacité limite de prélèvement, soit 48 prélèvements pour l'entrée ou 55 pour la sortie, alors ils s'arrêtent d'eux-mêmes.

Pour une meilleure compréhension du fonctionnement ou non des préleveurs, la Figure 2-12 ci-après décrit les principales situations rencontrées durant la campagne de mesures.

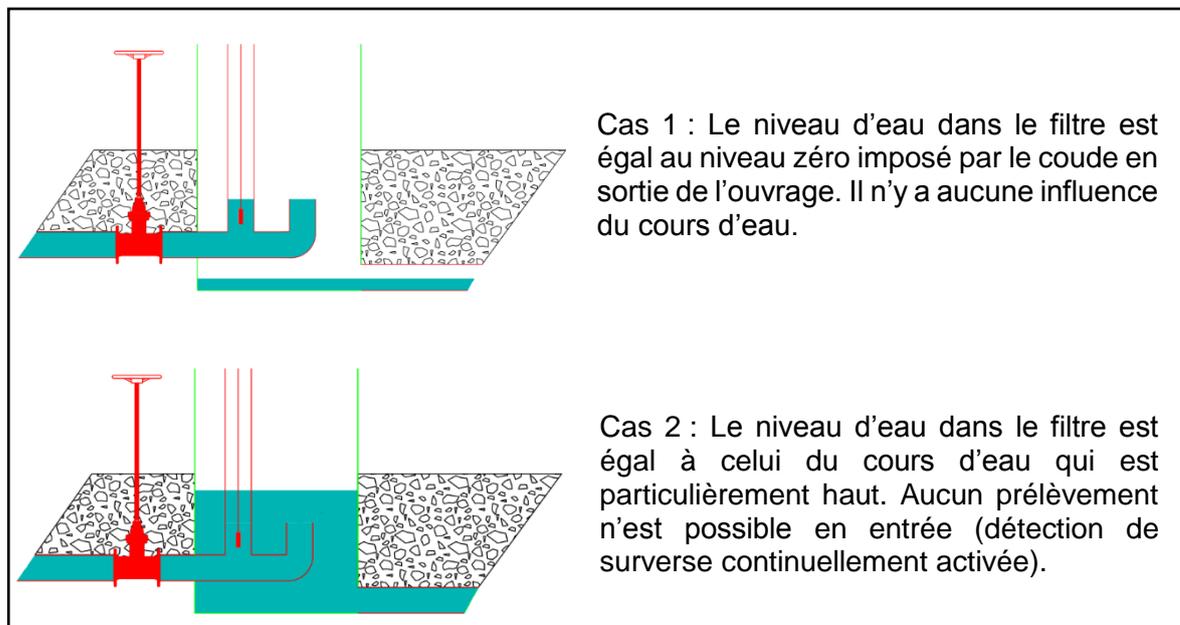


Figure 2-12 : Cas de figure des différentes situations de prélèvement [Inspiré de Schmitt, 2014]

Le cas 1 correspond à la situation normale de fonctionnement du filtre. Cette situation résulte d'une alimentation en eau du filtre, puis de sa vidange complète pour atteindre le niveau d'eau défini par la côte du tuyau de régulation dans le regard de sortie. Le filtre est en attente d'un autre déversement.

Le cas 2 correspond à une situation que l'on pourrait qualifier de fonctionnement dégradé de la filière. En effet, le niveau d'eau dans le filtre est régi par la hauteur d'eau du milieu naturel. Dans ce cas, il est impossible de déclencher le préleveur d'entrée de manière automatique puisque son asservissement est lié à une détection de surverse qui est activée par le niveau d'eau du cours d'eau (vases communicants). Les photographies dispensées en Annexe 6 montrent la communication de l'eau entre le cours d'eau et l'ouvrage. Cette situation particulière est souvent liée à une hausse rapide du niveau de la nappe suite à de fortes précipitations rendant impossible tout prélèvement d'effluent.

Enfin, sans trop aller dans le détail, on pourrait ajouter deux cas supplémentaires correspondant à :

- Une période de temps sec prolongée qui ferait descendre le niveau d'eau sous le « zéro » imposé par le coude en sortie. Dans cette situation il n'y aurait aucun dysfonctionnement sur l'enclenchement des préleveurs. Cependant il y aurait une sous-estimation du volume sortant qu'il faudrait essayer de quantifier ;
- Deux déversements successifs très proches avec vidange incomplète du filtre suite au premier événement. Dans cette situation, il est envisageable d'isoler les deux événements en entrée et en sortie si les deux volumes déversés ont pu être échantillonnés. Dans le cas contraire, on ne pourra rien en retirer.

2.4. Méthodologie de résultats

2.4.1. Augmentation de la fréquence de déversement du déversoir d'orage

Face aux retours de la collectivité, il a clairement été mis en évidence que le déversoir 8001 qui alimente l'ouvrage de traitement est très peu sollicité par temps de pluie ce qui réduit de manière conséquente le nombre de déversements observés sur une année.

Pour atténuer cette contrainte durant la campagne, il a été convenu de mettre en place une plaque en aluminium, au niveau de la conduite étranglée (diamètre 300 mm), à une hauteur de 10 cm par rapport au fil d'eau (Figure 2-13). La diminution de la section de passage engendrée par cette « vanne » permet ainsi d'augmenter la fréquence de déversement du déversoir d'orage.



Figure 2-13 : Vannage de la conduite conservée du déversoir d'orage 8001 (31/03/2016)

Malgré cette réduction de la section de passage du débit conservé il s'est avéré, lors de l'étude, que la superficie du bassin versant raccordée à l'ouvrage n'est pas assez conséquente pour générer des déversements pour des pluies d'intensité moyenne ; comparé aux autres déversoirs de la commune.

Après concertation avec l'exploitant du secteur (SDEA), cette plaque faisant office de vanne sera laissée en place après l'étude du système de traitement pour maintenir une alimentation plus régulière de l'ouvrage par rapport à la situation d'origine.

2.4.2. Déversement artificiel du déversoir d'orage

Outre l'augmentation de la fréquence de déversement du déversoir d'orage, il a été décidé de réaliser des déversements artificiels dans le but d'observer un fonctionnement forcé du filtre planté au niveau hydraulique et épuratoire.

Un mode opératoire a donc été mis en place pour solliciter l'ouvrage de traitement même si aucun déversement « naturel » n'a lieu.

L'opération consiste à obturer la conduite amont au déversoir d'orage par temps sec pendant 2 à 3 jours afin de disposer d'un volume d'effluent conséquent pour réaliser un lâché d'eau. Afin d'obtenir un effluent proche de celui réellement observé par temps de pluie, l'obturation du réseau est réalisée, si possible, lors d'un événement pluvieux de faible intensité pour ne pas risquer de mettre en charge le réseau.

Si l'apport d'eau météorique n'est pas possible, une dilution de l'effluent sera réalisée, par l'apport d'eau potable provenant d'un poteau incendie.

Lorsque le volume d'effluent semble assez conséquent, on procède à l'obturation de la conduite étranglée du déversoir d'orage afin que la totalité de l'eau stockée soit déversée vers le système de traitement. L'obturateur situé en amont est alors retiré pour laisser place à un phénomène de chasse d'eau dans le réseau permettant d'alimenter le filtre en eau.

Pour avoir une meilleure idée de la méthodologie adoptée, diverses photographies et explications complémentaires sont fournies en Annexe 7.

Lors des déversements artificiels, toute l'eau arrivant dans le déversoir d'orage est forcément déversée puisque la conduite conservée, en diamètre 300 mm, est elle aussi obturée. Ainsi, l'ouvrage de décharge est alors considéré comme un déversoir frontal à seuil oblique, et une relation entre hauteur et débit peut être établie selon une formule littéraire jointe en Annexe 8.

2.4.3. Détermination des débits

Les données brutes obtenues par les différents instruments de mesures dans le déversoir d'orage et dans le regard de sortie du filtre permettent de calculer les débits du système.

La mesure de hauteur d'eau située dans le DO 8001 permet, à l'aide d'une modélisation 1D, d'établir une relation entre la hauteur d'eau et le débit déversé. Pour rappel, le déversoir est de type latéral à crête haute ce qui permet de modéliser son fonctionnement hydraulique à partir du logiciel CalDO (ENGEES-Anjou Recherche, 2005).

La nouvelle configuration obtenue avec la mise en place de la vanne a été modélisée pour obtenir la loi de déversement.

De plus, une modélisation 0D a été réalisée pour calculer les débits lors des déversements artificiels. En effet, l'obturation de la conduite conservée amène un fonctionnement semblable à un déversoir frontal à seuil oblique. Les détails des formules littéraires utilisées sont disponibles en Annexe 8.

La sonde piézométrique et le dispositif de mesure associé, situés dans le regard de sortie, permettent de calculer le débit de sortie de l'ouvrage sur la base d'une loi d'orifice. Le fonctionnement normal de ce dispositif est associé à un régime dénoyé, qui permet d'assurer un référentiel stable (la cote du niveau d'eau imposée par le coude de sortie) et par ce fait la validité de la mesure.

Le détail de la formule de calcul et du fonctionnement de la mesure sont développés en Annexe 9.

Si l'orifice est noyé, lorsque la hauteur d'eau en aval est supérieure à l'orifice, la formule est toujours valable, il faut alors considérer la charge comme la différence de hauteur d'eau entre le niveau d'eau dans le dispositif de mesure et la hauteur du milieu naturel (DDAF, 2008).

Il s'est avéré, lors de l'analyse des débits entrée/sortie, que le bilan de masse des débits n'est pas respecté. Des différences de l'ordre de 100 % ont été calculées avec une surestimation conséquente des débits d'entrée, qui peut être expliquée par des erreurs de convergences importantes (50 à 300 %) lors du calcul sous CalDO.

Pour pallier ces erreurs sur les débits d'entrée, une nouvelle méthodologie de calcul des débits a été adoptée. Basée sur une « modélisation » 3D du filtre, elle permet d'obtenir la variation de volume d'eau au sein du filtre en fonction des différentes mesures de hauteurs d'eau déjà présentes.

2.4.4. Bilan hydrique entrée - sortie

Une méthodologie a été développée pour établir les flux entrant et sortant du système de traitement. Une reconstruction 3D du volume du système permet de visualiser la dynamique de stockage de l'ouvrage en fonction des mesures de hauteurs d'eau dans le filtre.

Étant donné que le calcul du débit déversé, par une mesure de hauteur d'eau au niveau du déversoir d'orage, est très approximatif, il est nécessaire d'adopter un nouveau protocole pour évaluer le débit entrant. Les variations de hauteurs d'eau au sein de l'ouvrage ont été utilisées pour déterminer les variations de volumes (Équation 1).

$$\Delta V = (Q_{\text{déversé}} + Q_{\text{précipitations}} \pm Q_{\text{infiltration}} - Q_{\text{sortie}} - Q_{\text{évapotranspiration}} - Q_{\text{trop plein}}) \Delta t$$

Équation 1 : Détermination de la variation de volume dans l'ouvrage

Le terme d'infiltration peut être positif ou négatif. En effet, la présence de la nappe phréatique peut apporter un excédent d'eau non négligeable et en période de basses eaux, le système peut s'avérer fuyard. Néanmoins, ce terme peut être négligé pour plusieurs raisons :

- Le filtre possède une géomembrane imperméable ;
- Le siphon alimentant le filtre est étanche ;
- On considère la conduite située entre le déversoir d'orage et le siphon hermétique à toute intrusion ou exfiltration d'eau.

Les flux liés aux précipitations et à l'évapotranspiration peuvent être négligés à l'échelle de l'événement pluvieux. En effet, Schmitt (2014) établit des flux hydrauliques dus aux précipitations sur l'un de ses trois filtres plantés étudié. Situé en Alsace, le filtre étudié par Schmitt présente une superficie équivalente à celui étudié à Beinheim. Les valeurs qu'elle obtient sont comprises entre un 0,10 et 1,27 m³/h pour 10 événements pluvieux, valeurs pouvant être admises dans cette étude. De plus, elle reporte des données moyennes en Alsace quant à l'évapotranspiration allant de 4 à 6 L/m²/j, soit 0,022 à 0,033 m³/h pour le site étudié.

Ainsi, les flux dus aux précipitations, à l'évaporation et l'infiltration peuvent être négligés à l'échelle de l'ouvrage et de l'événement pluvieux.

Le constat réalisé précédemment permet de simplifier les flux mis en jeu et la variation de volume dans le temps est maintenant associée au débit déversé, au débit de sortie et au débit du trop-plein. Suite à de nombreux déversements, il a été constaté que le trop-plein de l'ouvrage n'a jamais été sollicité même pour un événement très intense (Figure 2-14).

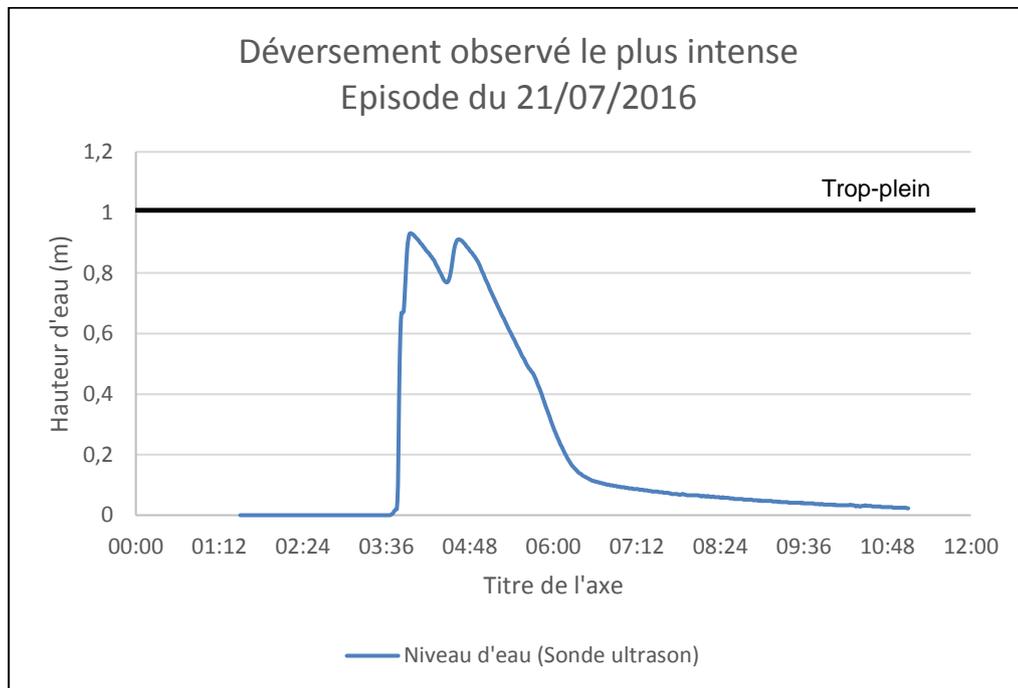


Figure 2-14 : Hauteur d'eau mesurée par la sonde ultrason, à l'entrée du filtre, pour l'épisode pluvieux du 21 juillet 2016

La variable du débit de sortie est donc nulle, ce qui permet de déterminer les débits associés au système, selon une méthode présentée à la Figure 2-15.

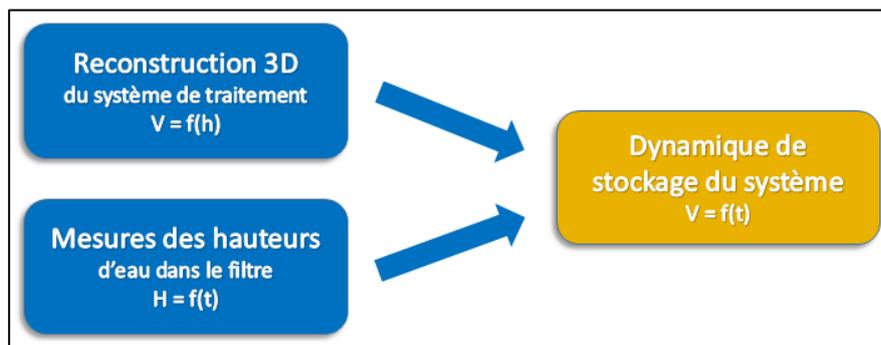


Figure 2-15 : Méthode de détermination de l'hydrogramme du système

La reconstruction 3D du système est basée sur plusieurs points de mesures de l'ouvrage de traitement et des éléments qui le composent. Les détails de l'outil de calcul ainsi que des éléments de compréhension de la dynamique de stockage sont consultables en Annexe 9.

2.4.5. Choix des paramètres physico-chimiques

Les préleveurs installés sur le site permettent d'établir un suivi de l'évolution de la qualité de l'effluent avant et après l'ouvrage afin d'évaluer sa capacité de traitement.

Les échantillons d'eau réalisés sur le site d'étude sont analysés par le laboratoire interne du SDEA, selon les normes en vigueur. Le Tableau 2-6, ci-dessous, référence les analyses physico-chimiques effectuées durant la campagne de mesures ainsi que les méthodes d'analyses utilisées en laboratoire.

Paramètres analytiques	Entrée	Sortie	Méthodes	Références
Matières en Suspension Totales (MEST)	✗	✗	Gravimétrie-Filtration sur filtre AP40 Millipore	NF EN 872
Demande Chimique en Oxygène (ST-DCO)	✗	✗	Minéralisation-Spectrométrie visible	ISO 15705
Demande Biochimique en Oxygène (DBO ₅)	✗	✗	Électrochimie avec suppression de la nitrification	NF EN 1899-1
Azote Kjeldahl (NTK)	✗	✗	Minéralisation-Distillation-Volumétrie	Méthode interne adaptée selon la NF EN 25663
Azote ammoniacal (N-NH ₄)	✗	✗	Distillation et Volumétrie	Méthode interne adaptée selon la NF T 90-015-1
Azote nitreux (N-NO ₂)		✗	Spectrophotométrie	NF EN 26777
Azote nitrique (N-NO ₃)		✗	Spectrophotométrie	ISO 7890-3
Phosphore total (PT)	✗	✗	Minéralisation-Spectrométrie visible	NF EN 6878

Tableau 2-6 : Liste des paramètres physico-chimiques analysés

Le filtre étudié peut être assimilé à une station de traitement des eaux usées recevant une charge brute organique supérieure à 1,2 kg/j de DBO₅ selon l'arrêté du 21 juillet 2015 qui définit les trois principaux paramètres à suivre : la DBO₅, la DCO et les MES. L'azote et le phosphore s'y ajoutent parfois selon la sensibilité à l'eutrophisation du milieu récepteur, ce qui est le cas pour le Stadenrhein.

Le traitement de l'azote dans le cadre de l'épuration des eaux usées met en jeu deux phénomènes de dégradation : la nitrification et la dénitrification. C'est pourquoi le suivi des nitrates et des nitrites a été réalisé seulement en sortie de l'ouvrage pour évaluer et quantifier ces phénomènes, sachant que la part en entrée de ces paramètres est quasiment nulle. Cette hypothèse a bien entendu été vérifiée à l'aide de mesures réalisées sur quelques échantillons en entrée d'ouvrage, de manière ponctuelle.

De plus, le phosphore a, quant à lui, été suivi en entrée comme en sortie de l'ouvrage pour observer sa dégradation. Ce paramètre étant fortement impliqué dans le développement algal du milieu récepteur et ce, de manière durable.

Enfin, il n'a pas été choisi de suivre l'évolution des micropolluants qui ne reflète pas l'intérêt initial de l'étude, à savoir la compréhension générale de la filière sans trop aller dans le détail des analyses physico-chimiques. De plus, le laboratoire interne du SDEA ne réalise pas d'analyses sur ces paramètres, qui impliqueraient des contraintes supplémentaires en termes de logistique, ces micropolluants devant être analysés par un laboratoire externe.

SYNTHÈSE - CONTEXTE, MATÉRIEL ET MÉTHODE

Le système de traitement mis en place à Beinheim est de loin un ouvrage atypique par sa conception, son dimensionnement mais aussi par son fonctionnement à la fois horizontal et vertical. Cet ouvrage est alimenté directement par les surverses du déversoir d'orage 8001, qui est l'exutoire du bassin versant qu'il draine.

En s'intéressant plus en détail au contexte local, on remarque trois points essentiels à la compréhension des choix réalisés pour sa conception :

- La nappe phréatique est affleurante au fond de l'ouvrage. Le cours d'eau récepteur est alimenté par cette nappe ;
- Le site n'est pas alimenté en électricité, le pompage est donc exclu au regard du surcoût qu'il engendrerait ;
- Le faible dénivelé entre le déversoir d'orage et le fil d'eau de sortie du filtre ne permet pas d'avoir un filtre traditionnel.

Tous ces points réunis rendent la conception de l'ouvrage spécifique mais sans pour autant être éloignée des recommandations de la littérature. C'est dans ce contexte qu'une instrumentation complète du filtre a été réalisée pour évaluer de manière précise le fonctionnement de l'ouvrage d'un point de vue hydraulique et épuratoire.

La faible sollicitation du déversoir d'orage par temps de pluie a conduit à adopter une méthodologie de déversement artificiel et d'augmentation de la fréquence de déversement de l'ouvrage.

Enfin, l'appréciation des débits initialement prévue à l'aide d'une loi de déversement hauteur-débit a montré de fortes incertitudes entre l'entrée et la sortie de l'ouvrage. C'est pourquoi une nouvelle méthodologie de détermination de l'hydrogramme du filtre a été adoptée sur la base de l'évolution du volume d'eau en fonction du temps.

3. RÉSULTATS ET ANALYSES

3.1. Fonctionnement hydrodynamique

Les instruments permettant la mesure des hauteurs d'eau dans le filtre donnent des indications sur le comportement hydrodynamique de l'ouvrage dans sa globalité. On peut alors s'intéresser à :

- Quantifier les débits d'alimentation et de vidange de l'ouvrage en fonction des épisodes pluvieux ;
- Déterminer les vitesses de filtration de l'effluent ;
- Établir le régime d'alimentation du filtre en suivant l'évolution de la ligne d'eau ;
- Évaluer le comportement hydraulique général de l'ouvrage au regard des constatations visuelles et des données de hauteur d'eau.

3.1.1. Évaluation des débits

Sur l'ensemble de la campagne de mesures, 15 déversements dits « naturels » ont été observés suite à des précipitations. La majorité de ces déversements ont eu lieu sur la période du mois de juin, qui a été un mois particulièrement pluvieux au niveau local et national. L'Annexe 10 répertorie la totalité des événements pluvieux durant la campagne de mesures et précise ceux qui ont entraîné un déversement vers l'ouvrage de traitement.

Les réponses hydrauliques de ces précipitations se traduisent par un déversement du déversoir d'orage 8001 vers l'ouvrage de traitement. Les débits maximaux caractéristiques de l'alimentation du filtre sont représentés à la Figure 3-1. On remarque une corrélation logique entre l'intensité ou la période de retour des événements pluvieux et les débits d'entrée (voir corrélation entre la Figure 3-1 et l'Annexe 10)

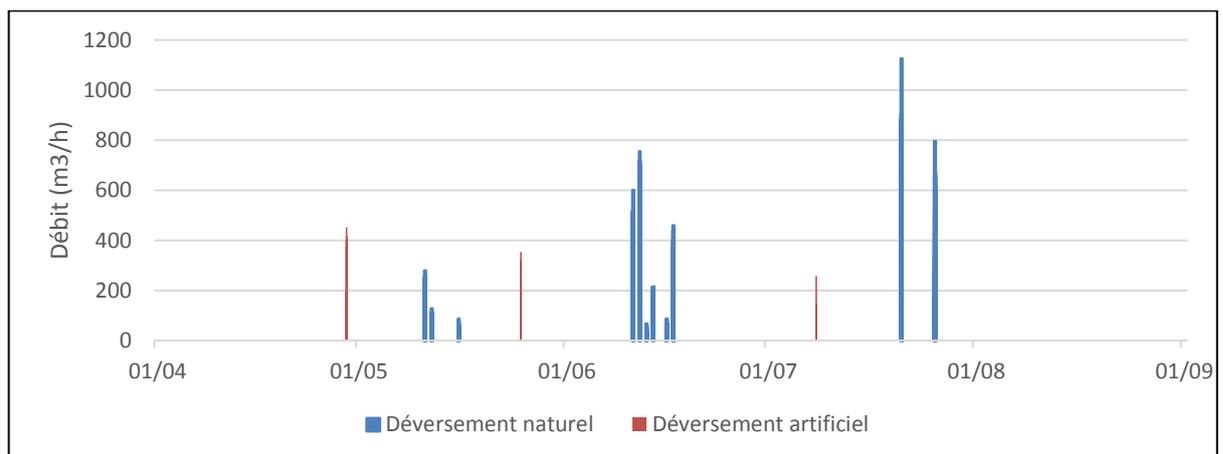


Figure 3-1 : Débits maximaux observés en entrée de l'ouvrage entre avril et septembre

Les déversements survenus le même jour, à savoir ceux du 13 et 17 juin, sont tellement proches dans le temps qu'ils sont confondus entre eux. Le débit maximal observé de chaque journée est alors représenté par une seule valeur. C'est pourquoi seuls 11 déversements naturels sont représentés et non 15.

Les débits maximaux mesurés en entrée de l'ouvrage montrent bien qu'il n'y a aucune limitation du débit ce qui implique des surcharges hydrauliques conséquentes pour le filtre planté. Ces variations de débits comprises entre 100 et 1100 m³/h, soit un facteur 11, conduisent le filtre à fonctionner selon deux comportements hydrauliques bien différents qui seront détaillés dans la partie 3.1.3.

Concernant les débits sortants, ces derniers sont eux aussi variables mais avec un facteur moitié moins important que pour celui d'entrée avec des débits oscillants entre 20 et 110 m³/h (Figure 3-2). La régulation du débit par une simple canalisation permet donc d'obtenir un débit réduit et ce de manière conséquente puisque le débit de sortie est 2 à 10 fois moins important que le débit d'entrée. De manière générale, plus le débit d'entrée est élevé, plus le laminage du débit de sortie est important ce qui peut s'expliquer par la capacité de rétention de l'ouvrage.

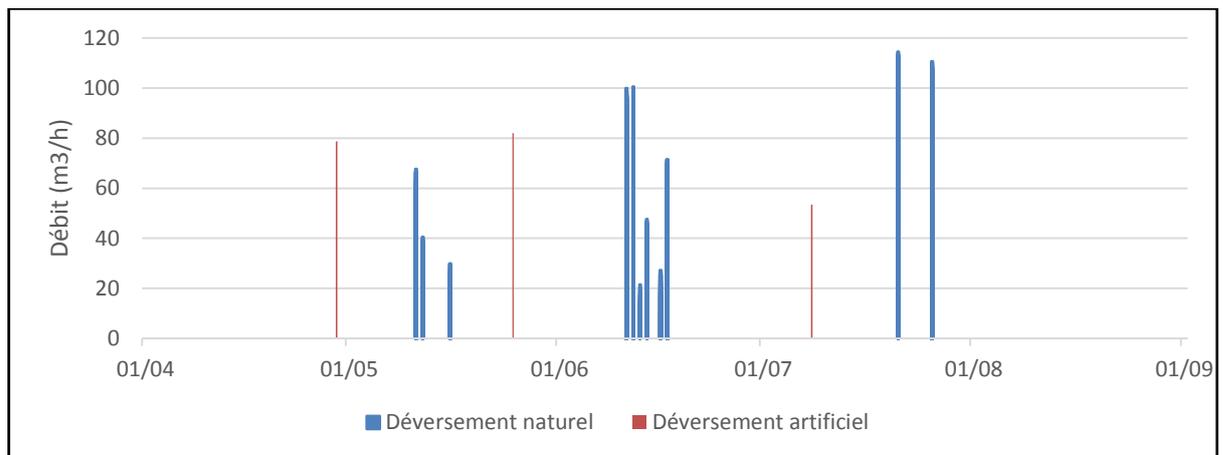


Figure 3-2 : Débits maximaux observés en sortie de l'ouvrage entre avril et septembre

La méthodologie de détermination de la dynamique de stockage, présentée à la partie précédente, permet d'évaluer l'hydrodynamique du filtre (Figure 3-3). L'épisode du 26 juillet 2016 représenté sur cette figure, illustre de manière très claire le phénomène de laminage du débit de sortie, limitant de cette manière les effets de chocs sur le milieu naturel. Pour cet exemple, le débit maximal de sortie est 7 fois moins important que celui d'entrée et le temps de vidange du système est de l'ordre de 2 heures contrairement à la durée d'alimentation d'une trentaine de minutes.

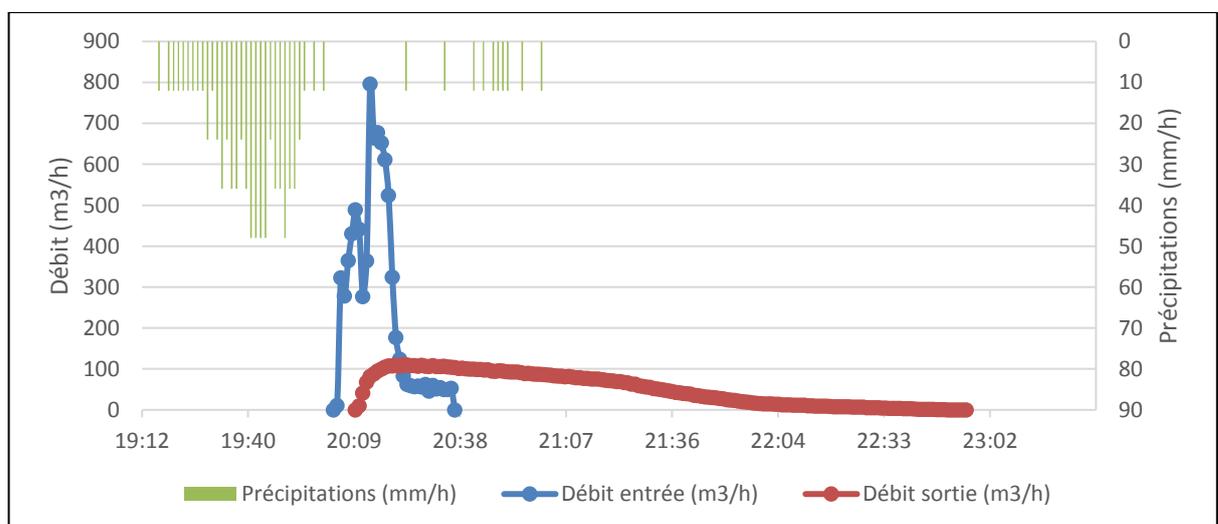


Figure 3-3 : Suivi hydrodynamique de la filière de traitement pour l'événement pluvieux du 26 juillet 2016

3.1.2. Détermination des vitesses de filtration

En plus du traitement, l'ouvrage a pour but de limiter les débits vers le milieu naturel par le biais d'une régulation du débit en sortie du filtre. Le fonctionnement de l'ouvrage résulte d'un compromis entre le temps de séjour de l'effluent et le volume d'eau pouvant être traité par l'ouvrage.

Une limitation importante du débit de sortie augmentera le temps de séjour de l'effluent, synonyme d'une meilleure dégradation de la pollution, mais le volume d'eau traitée sera plus faible et le trop-plein de l'ouvrage risque d'être plus souvent sollicité. Dans le cas contraire les performances épuratoires diminueront mais un plus grand volume sera traité.

Bien évidemment la conception et le dimensionnement de l'ouvrage, notamment en ce qui concerne les matériaux du filtre jouent un rôle essentiel dans le temps de séjour de l'effluent. En effet, plus la perméabilité du matériau est faible et plus la vitesse de filtration le sera également, augmentant alors le temps de séjour de l'effluent au sein du filtre.

Le temps de séjour hydraulique est difficilement quantifiable en fonction des deux régimes d'alimentation hydraulique au sein de l'ouvrage. Sa détermination par des méthodes de traçage avec, par exemple, la fluorescéine ou par un traceur chimique tel que le NaCl n'est pas envisageable pour cet ouvrage à taille réelle qui est alimenté par des débits d'alimentation très variables et très intenses difficilement reproductibles.

Outre ce constat, il est quand même envisageable de calculer les différentes vitesses de filtrations selon la perméabilité insaturée K_{ns} (Équation 2) qui est établie à partir de la dynamique du flux hydraulique entre l'entrée et sa réponse en sortie (Figure 3-4). Les sondes de mesures des hauteurs d'eau disposées dans le filtre et la longueur du filtre permettent de calculer ces valeurs de vitesse.

$$K_{ns} = \left| L \times \frac{\ln(\Delta H)}{\Delta t} \right|$$

Où :

L , la longueur entre les deux points de mesures de hauteur d'eau équivalent à la longueur du filtre (25 m) ;

ΔH , la différence de hauteur d'eau entre les deux courbes.

Équation 2 : Perméabilité insaturée KNS (utilisant la dynamique du flux hydraulique)

La figure ci-dessous caractérise le flux hydraulique traversant le filtre de l'entrée jusqu'à la sortie de l'ouvrage. On peut alors déterminer la vitesse de filtration de l'effluent.

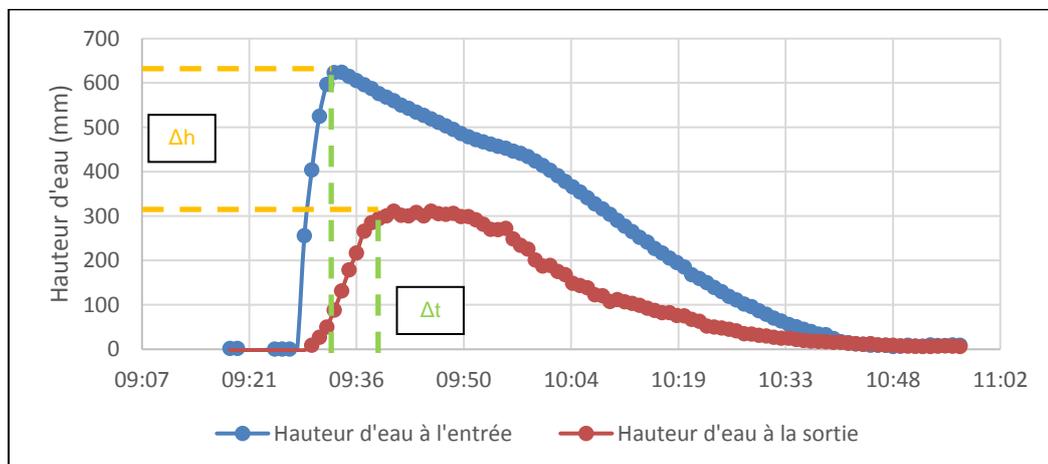


Figure 3-4 : Détermination de la vitesse de filtration à partir du flux hydraulique

La vitesse de filtration calculée pour le déversement artificiel du 29 avril 2016 est de $6,7 \cdot 10^{-2}$ m/s. Pour l'ensemble des déversements dont le filtre n'était pas saturé en eau, les valeurs de vitesse s'échelonnent de $4,5 \cdot 10^{-2}$ à $9,6 \cdot 10^{-2}$ m/s, soit plus du double. D'une façon générale, les débits d'entrée intenses se distinguent par une vitesse de filtration plus importante qui s'explique par une augmentation de la charge en amont des gabions.

Selon Uhl et Dittmer (2004) des vitesses de filtration comprises entre $1 \cdot 10^{-5}$ et $3 \cdot 10^{-5}$ m/s permettent d'assurer un bon traitement épuratoire de la DCO, de la DBO5, des nutriments, des métaux et des pathogènes. Ici, les vitesses de filtration sont largement supérieures à celles recommandées. Ceci étant lié, en grande partie, à la granulométrie des matériaux utilisés qui est assez grossière. Ce dernier point permettra sans aucun doute de limiter le colmatage du massif filtrant au fil du temps.

3.1.3. Évaluation du fonctionnement hydraulique

Une première analyse du comportement hydraulique du filtre peut être établie sur la base des mesures de débits et de l'évolution des hauteurs d'eau dans le filtre, mais également à partir des constatations visuelles relevées lors des déversements artificiels.

En effet, il s'avère que deux fonctionnements hydrauliques existent au sein du massif filtrant en fonction des régimes d'alimentation. Un complément visuel ainsi qu'une explication complémentaire de ces deux fonctionnements sont joints en Annexe 11 :

- Le premier fonctionnement est considéré comme mixte : un mélange entre un fonctionnement horizontal et un vertical. Effectivement, pour certains déversements de moyenne à faible intensité, l'eau reste en-dessous du niveau des gabions et traverse horizontalement le massif jusqu'à ce que la ligne d'eau dans le filtre soit à l'équilibre. Une fois ce niveau atteint, le niveau d'eau décroît, avec la vidange de l'ouvrage, laissant apparaître un fonctionnement assimilable à du vertical ;
- Le deuxième fonctionnement est majoritairement vertical : il intervient lors de gros déversements. Le niveau d'eau monte rapidement au-dessus des gabions et la surface du filtre est rapidement alimentée en eau. Le volume de stockage en surface du filtre est alors pleinement utilisé. Le filtre se vidange ensuite de la même manière que le cas précédent avec une réelle filtration verticale car toute l'épaisseur des matériaux est traversée par l'effluent.

La limite entre ces deux fonctionnements est dictée par la variable du débit maximal d'entrée qui, à partir d'une certaine valeur, fait passer le filtre du fonctionnement mixte au vertical. Le débit limite entre ces deux régimes d'alimentation a été établi aux alentours de 600 à 700 m³/h. Phénomène qui a été observé seulement 4 fois sur la campagne de mesures. Cette valeur assez élevée peut être compréhensible puisqu'il faut un déversement puissant pour mettre en charge la zone en amont des gabions sur une hauteur de 80 cm.

Parmi ces 4 déversements, un seul a pu être échantillonné ce qui crée de fortes incertitudes quant à l'interprétation des résultats par rapport à ceux obtenus avec un fonctionnement mixte. Le Tableau 3-1, ci-dessous, fait référence au type de fonctionnement de l'ouvrage pour les échantillons analysés durant la campagne.

	29/04/2016 Artificiel	12/05/2016 Naturel	25/05/2016 Artificiel	08/07/2016 Artificiel	21/07/2016 Naturel
Type de fonctionnement	Mixte	Mixte	Mixte	Mixte	Vertical
Débit maximal d'entrée (m ³ /h)	450	280	350	250	1100

Tableau 3-1 : Type de fonctionnement du filtre pour les échantillons analysés

Par ailleurs, les observations visuelles du fonctionnement du filtre ont confirmé le rôle des gabions qui consiste à dissiper l'énergie du flux hydraulique et à créer une zone de décantation. La Figure 3-5 montre très bien l'objectif premier de dissipation du flux hydraulique avec la création de deux boucles de recirculation de part et d'autre de l'entrée de l'effluent lorsque ce dernier arrive perpendiculairement aux gabions.



Figure 3-5 : Zone de dissipation du flux hydraulique (29/04/2016)

Le rôle de décantation du système de traitement est à la fois observé sur la zone d'alimentation du filtre mais également sur toute la partie amont comprenant la conduite déversante, le siphon et le regard de répartition. En effet, l'absence de dénivelé entre le fil d'eau de la conduite déversante du déversoir d'orage et le niveau du cours d'eau crée une mise en charge de toute cette zone jusqu'à la crête du déversoir d'orage.

Cette zone représente seulement 10 % du volume total du système mais elle permet, lorsque l'ouvrage se vidange à débit limité, une décantation des matières en suspension et particulièrement aux abords des gabions (Figure 3-6).



Figure 3-6 : Zones de dépôts dans le regard de répartition (gauche) et en amont des gabions (droite) (29/04/2016)

En première conclusion, on peut affirmer que l'ouvrage de traitement a un fonctionnement hydraulique à dominance mixte entre un régime d'alimentation horizontal et vertical et que les gabions permettent de bien casser le flux hydraulique tout en créant une zone de décantation des matières en suspension.

Dans l'ensemble, les résultats de l'hydrodynamique soulignent la difficulté du dimensionnement de l'ouvrage. En effet, le caractère instable des précipitations ne permet pas de gérer toutes les pluies. Un choix doit être établi entre un ouvrage correctement dimensionné pour les faibles déversements avec une sollicitation plus fréquente du trop-plein et un filtre surdimensionné qui limitera de manière plus conséquente les impacts sur le milieu naturel. Le système étudié dans ce rapport est naturellement porté sur le second choix dans le but de réduire au maximum les rejets vers le Stadenrhein.

3.2. Fonctionnement épuratoire du filtre

Un suivi de la qualité des effluents a été effectué entre le 1^{er} avril et le 1^{er} septembre 2016. Cinq campagnes de prélèvement ont été effectuées durant cette période et ont permis de collecter des échantillons d'eau représentatifs de l'effluent d'entrée et de sortie du système de traitement.

La faible quantité de prélèvement réalisée par rapport au nombre de déversements s'explique par la longue période de crue du mois de juin qui a suspendu la campagne d'échantillonnage. Ainsi près d'un mois et demi, sur une période de cinq mois, n'ont pas pu être suivis qualitativement.

3.2.1. Concentrations en entrée et conditions hydrologiques

Sur les cinq campagnes de prélèvements, seuls deux sont liées à des déversements naturels, les autres étant artificiels. Le nombre limité d'échantillons réels analysés ne permet pas de tirer de conclusions précises, cependant une tendance peut être établie.

Les différents déversements analysés montrent une assez grande variabilité de la concentration des différents polluants en entrée du filtre. Pour les deux déversements naturels on constate que la pollution est liée à l'intensité de l'événement pluvieux. La durée de la période de temps sec précédent le déversement joue également un rôle dans la concentration en matières en suspension de l'effluent. Durant la période de temps sec, le réseau unitaire accumule des sédiments qui seront remobilisés lors de la prochaine pluie. Les caractéristiques hydrologiques des deux déversements de temps de pluie échantillonnés sont résumées dans le Tableau 3-2.

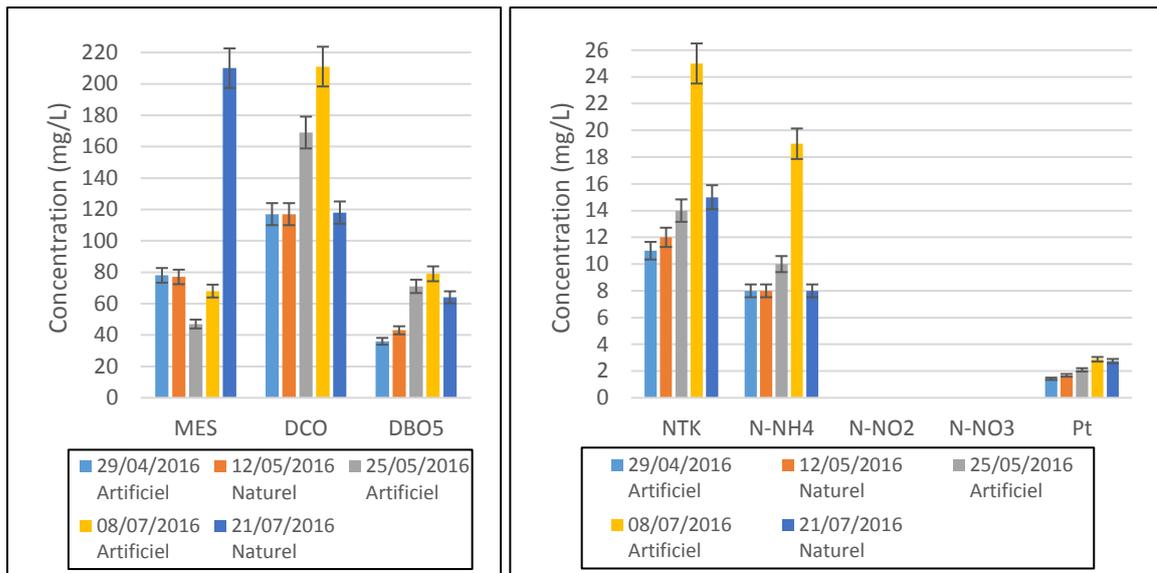
	Durée (min)	Cumul (mm)	Durée temps sec (jour)	Intensité moyenne (mm/h)	Période de retour
12 mai	36	5,2	0,3	8,7	1 à 2 mois
21 juillet	119	22,2	6,4	11,2	1 à 2 ans

Tableau 3-2 : Caractéristiques des événements pluvieux échantillonnés

Les résultats d'analyses de ces deux épisodes montrent l'influence de l'intensité pluvieuse sur la concentration en matières en suspension. En effet, la pluie du 21 juillet 2016 a généré une concentration en MES presque 3 fois plus importante que pour l'événement du 12 mai. La cause de cette augmentation est facilement explicable par l'intensité exceptionnelle de la pluie qui a entraîné un rinçage important des sédiments du réseau sans pour autant impacter significativement les autres paramètres physico-chimiques (Figure 3-7).

En s'intéressant aux masses de polluants entrant sur le filtre on distingue clairement l'épisode pluvieux du 21 juillet qui a apporté environ 40 kg de matières en suspension soit presque 10 fois plus de MES que chacun des autres déversements.

La Figure 3-7, recense les résultats d'analyses des concentrations moyennes pour les 5 campagnes d'échantillonnage réalisées. Ces données sont également comparées avec les valeurs de la littérature dans le Tableau 3-3. (Les valeurs comparatives sont celles du Tableau 1-2 dans la partie « Revue de littérature »)



Remarque : Les barres d'erreurs se réfèrent aux incertitudes de mesures en laboratoire estimées à $\pm 6\%$ selon Grommaire-Mertz (1998)

Figure 3-7 : Concentrations moyennes en entrée pour les différents déversements

On remarque que les déversements artificiels ont sensiblement les mêmes caractéristiques physico-chimiques que les déversements naturels excepté pour l'épisode du 8 juillet qui présente des valeurs de DCO, NTK et N-NH₄ assez élevées (+ 65 à 90 % selon les paramètres). Cette hausse est révélatrice des déversements artificiels qui sont composés d'un mélange d'eau de pluie ou du réseau d'eau potable et d'eaux usées. Il s'avère que pour ce déversement, l'effluent déversé était assez concentré en eaux usées ce qui peut expliquer ces valeurs.

	29/04/2016 Artificiel	12/05/2016 Naturel	25/05/2016 Artificiel	08/07/2016 Artificiel	21/07/2016 Naturel	Valeurs de la littérature
MES	78	77	47	68	210	176-2500
DCO	117	117	169	211	118	42-900
DBO ₅	36	43	71	79	64	15-301
NTK	11	12	14	25	15	21-28,5
N-NH ₄	8	8	10	19	8	3,1-8
N-NO ₂	-	-	-	-	-	-
N-NO ₃	-	-	-	-	-	-
Pt	1,42	1,68	2,09	2,88	2,74	6,5-14

Tableau 3-3 : Comparaison de l'effluent d'entrée par rapport à la littérature

Les résultats présentés à la figure précédente montrent des concentrations assez faibles en MES (concentrations inférieures à 150 mg/L) sauf pour l'événement intense du 21 juillet. Il existe plusieurs éléments de réponse à cette faible quantité de matières en suspension qui sont la petite superficie du bassin versant et l'emplacement du réseau unitaire en tête par rapport au reste du réseau de la commune.

A contrario, les valeurs de DCO et de DBO₅ sont en adéquation avec les valeurs relevées dans la littérature (respectivement 42-900 et 15-301 mg/L).

Pour les paramètres azotés, les valeurs de NTK sont un peu faibles (21-28,5 mg/L dans la bibliographie) contrairement à celles de l'azote ammoniacal qui sont 2 à 3 fois plus élevées. Le rapport entre ces deux paramètres indique qu'il y a très peu d'azote organique dans l'effluent ce qui ne correspond pas aux valeurs de temps de pluie.

En effet, la proportion d'azote ammoniacal par rapport à l'azote organique est de l'ordre de 65 à 75 % pour les 4 premiers déversements contre 20 % environ pour un effluent unitaire de temps de pluie (Schmitt, 2014). Ce rapport élevé est compréhensible pour les déversements artificiels qui sont composés d'eaux usées domestiques et, par le temps de rétention dans la conduite qui favorise l'ammonification de la matière organique azotée. Le déversement naturel du 21 juillet présente, quant à lui, une proportion plus faible de 50 % qui reste cependant élevée pour un effluent unitaire de temps de pluie.

De plus, les valeurs d'azote en nitrite et nitrate ont été considérées comme nulles au regard de quelques échantillons analysés qui révèlent des concentrations inférieures à la limite de quantification.

Pour le phosphore total, les concentrations sont environ 3 fois inférieures à celles de la littérature qui s'expliquent encore par la taille du bassin versant drainé et le faible nombre d'habitants raccordé au réseau.

3.2.2. Efficacité du système de traitement

L'efficacité épuratoire du système de traitement est présentée sous différentes formes qui permettent la compréhension des phénomènes de dégradation propre au filtre étudié. Une première comparaison des paramètres entre l'entrée et la sortie du filtre et des rendements montre une diminution globale de tous les paramètres (Tableau 3-4)

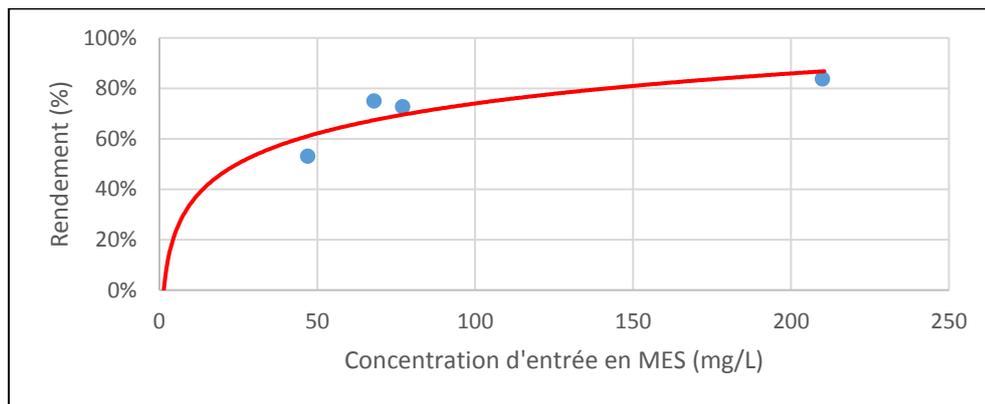
		29/04/2016 Artificiel	12/05/2016 Naturel	25/05/2016 Artificiel	08/07/2016 Artificiel	21/07/2016 Naturel
MES	Influent (mg/L)	78	77	47	68	210
	Effluent (mg/L)	94	21	22	17	34
	Rendement (%)	-21	73	53	75	84
DCO	Influent (mg/L)	117	117	169	211	118
	Effluent (mg/L)	45,7	40	62,6	131	46,8
	Rendement (%)	61	66	63	38	60
DBO ₅	Influent (mg/L)	36	43	71	79	64
	Effluent (mg/L)	21	17	32	57	12
	Rendement (%)	42	60	55	28	81
NTK	Influent (mg/L)	11	12	14	25	15
	Effluent (mg/L)	9	6	10	21	7
	Rendement (%)	18	50	29	16	53
N-NH ₄	Influent (mg/L)	8	8	10	19	8
	Effluent (mg/L)	6	5	7	17	5
	Rendement (%)	25	38	30	11	38
N-NO ₂	Influent (mg/L)	-	-	-	-	-
	Effluent (mg/L)	0,17	0,25	0,09	0,06	0,01
	Rendement (%)	-	-	-	-	-
N-NO ₃	Influent (mg/L)	-	-	-	-	-
	Effluent (mg/L)	2,09	0,85	0,59	0,51	0,15
	Rendement (%)	-	-	-	-	-
Pt	Influent (mg/L)	1,42	1,68	2,09	2,88	2,74
	Effluent (mg/L)	0,93	0,86	1,1	1,96	0,82
	Rendement (%)	35	49	47	32	70

Remarque : Le déversement du 21/07/2016, qui correspond à l'événement pluvial le plus intense de la campagne, n'a pas été totalement échantillonné en sortie de l'ouvrage. Cependant, le premier flot correspondant au pic de pollution a bien été prélevé. Les concentrations mesurées pour cet événement sont surement plus élevées que les valeurs réelles. On considérera ces valeurs comme justes.

Tableau 3-4 : Efficacité épuratoire de l'ouvrage durant la campagne de prélèvements

Les plus forts rendements sont observés sur les matières en suspension à l'exception du premier déversement du 29/04/2016 qui correspond à la première alimentation en eau du filtre. Lors de ce déversement artificiel, le premier flux hydraulique a lessivé les fines présentes dans les matériaux filtrants augmentant alors la concentration en MES en sortie par rapport à l'entrée. Les fines emportées par l'eau n'étaient pas chargées en polluant puisque les autres paramètres, comme la DCO et la DBO5, ont subi un abattement par rapport à l'entrée du système.

Par ailleurs, les variations importantes de concentrations en entrée du système de traitement sont liées au caractère spécifique des eaux pluviales et plus particulièrement des effluents unitaires par temps de pluie. La Figure 3-8 montre une disparité des concentrations en matières en suspension dans l'effluent d'entrée où les plus fortes concentrations sont de manière générale mieux traitées que les plus faibles.



Remarque : le 1er déversement n'a pas été pris en compte puisque la concentration de sortie était supérieure à celle d'entrée à cause du lessivage des fines des matériaux filtrants

Figure 3-8 : Efficacité épuratoire sur les MES en fonction de la concentration d'entrée

Les quatre analyses exploitables sur les matières en suspension donnent un premier aperçu de la relation entre la concentration d'entrée en MES et son rendement associé. Cette relation est également observée par Fournel (2012) qui remarque une grande disparité pour les plus faibles concentrations, aussi bien sur les MES que sur la DCO, et soulève la question de l'efficacité de filtration du massif granulaire. Son étude met en avant l'amélioration rapide des performances de filtration des filtres plantés durant les 4 premières années pour ensuite se stabiliser à un stade dit de « maturation ».

Le nombre restreint de prélèvements réalisés sur la durée de la campagne ne permet pas de confirmer ces conclusions.

De plus, la dynamique de la nitrification est très peu observée sur l'ensemble des résultats d'analyse, principalement causé par un temps de séjour trop court dans l'ouvrage où les phénomènes d'aérobies n'ont pas le temps de prendre place, ce qui se traduit par une très faible transformation de l'azote ammoniacal en nitrites et nitrates.

Une étude plus fine sur le suivi des paramètres azotés aurait pu mettre en évidence des phénomènes de relargage de nitrates, sous forme d'un pic de concentration, suite à une alimentation en eau du filtre après une longue période de temps sec. (Uhl et Dittmer, 2004). Néanmoins, ce phénomène n'est pas observé car il n'y a pas de suivi fin, dans le temps, des paramètres azotés en sortie. Ainsi ce pic n'est pas représenté dans l'échantillon moyen réalisé par le préleveur automatique, ce qui peut expliquer cette faible concentration en nitrates malgré des périodes de temps sec prolongées au sein du filtre.

Les composés azotés et le phosphore restent globalement les paramètres les plus difficiles à traiter, comme sur les filières à lits plantés de roseaux à écoulement vertical pour l'assainissement collectif en sortie du premier étage de traitement.

La représentation graphique des rendements permet d'établir des lois de prédictions simple et fiable pour des faibles concentrations. Lorsque l'effluent d'entrée possède de fortes concentrations en MES ou encore en DCO, ces lois simples ne sont plus applicables à cause de nombreux paramètres impactant potentiellement la concentration de l'effluent de sortie (régime d'alimentation, paramètres physico-chimique de l'effluent d'entrée, formation de dépôts, etc.) (Fournel, 2012). L'étude réalisée ne cherche pas à modéliser le comportement épuratoire avec des modèles dynamiques comme HYDRUS mais simplement à établir des relations linéaires simples entre la concentration d'entrée et la concentration de sortie de l'ouvrage (Figure 3-9 et Figure 3-10) pour avoir un aperçu des performances de cette filière de traitement qui, pour rappel, n'est pas traditionnelle.

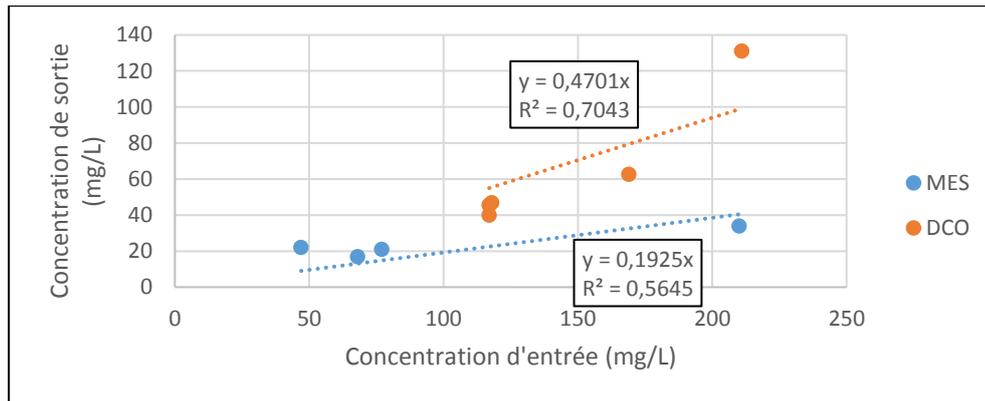


Figure 3-9 : Relation linéaire entre les concentrations d'entrée et de sortie pour la DCO et les MES

Des corrélations linéaires permettent de définir un comportement qualitatif des effluents traités par rapport à ceux d'entrée. Le comportement épuratoire de l'ouvrage suit une loi linéaire malgré deux comportements hydrauliques bien distincts.

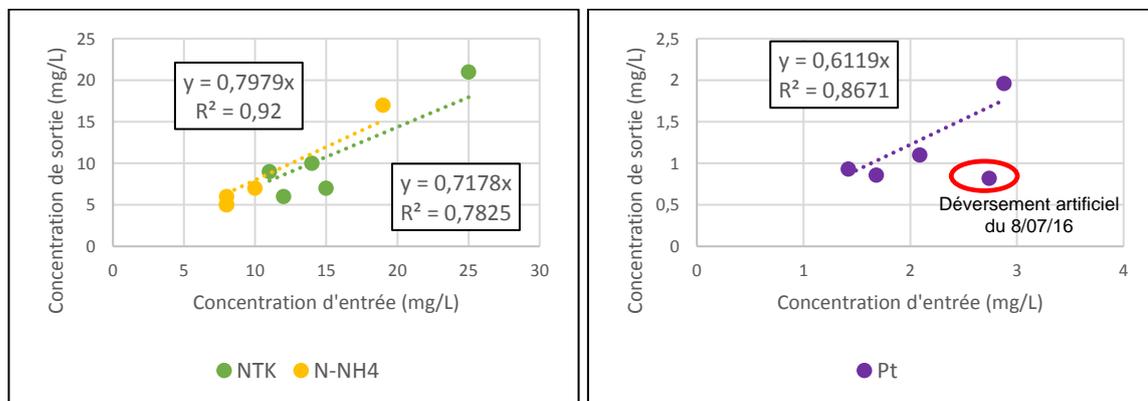


Figure 3-10 : Relation linéaire entre les concentrations d'entrée et de sortie pour le NTK, le N-NH4 et le Pt

Sur cette dernière figure, il est possible de constater les mêmes relations linéaires d'abattement que précédemment. L'azote Kjeldhal, l'azote ammoniacal et le phosphore suivent eux aussi des relations simples. À l'exception du déversement artificiel du 8 juillet, pour le phosphore, la relation entre la concentration d'entrée et celle de sortie semble assez précise.

Ces graphiques permettent d'établir des lois linéaires simples de prédiction :

- **MES** :
 $47 < [\text{MES}] < 210 \text{ mg/L} : [\text{MES}]_{\text{sortie}} = 0,1925 \times [\text{MES}]_{\text{entrée}}, R^2 = 0,5645$

- DCO :
117 < [DCO] < 211 mg/L : $[DCO]_{\text{sortie}} = 0,4701 \times [DCO]_{\text{entrée}}$, $R^2 = 0,7043$
- NTK :
11 < [NTK] < 25 mg/L : $[NTK]_{\text{sortie}} = 0,7178 \times [NTK]_{\text{entrée}}$, $R^2 = 0,7825$
- N-NH4 :
8 < [N-NH4] < 19 mg/L : $[N-NH4]_{\text{sortie}} = 0,7979 \times [N-NH4]_{\text{entrée}}$, $R^2 = 0,92$
- Pt :
1,42 < [Pt] < 2,88 mg/L : $[Pt]_{\text{sortie}} = 0,6119 \times [Pt]_{\text{entrée}}$, $R^2 = 0,8671$

Les différents paramètres physico-chimiques adoptent des comportements similaires en suivant leur propre loi linéaire de dégradation. Ainsi, ces lois caractérisent le comportement du filtre malgré des régimes d'alimentation différents et des volumes plus ou moins conséquents.

D'autre part, en l'absence de valeurs réglementaires pour les rejets par temps de pluie, la qualité des rejets de l'ouvrage peut être comparée à celle demandée réglementairement pour les stations d'épuration recevant une charge brute inférieure ou égale à 120 kg/jour de DBO5, selon l'arrêté du 21 juillet 2015 (Tableau 3-5).

Sur les cinq campagnes de prélèvements, seul le déversement artificiel du 8 juillet a été supérieur aux valeurs réglementaires pour l'assainissement collectif, pour le paramètre de la DBO₅ uniquement, à la fois en terme de concentration et de rendement.

Pour les autres paramètres de cet échantillon et pour les quatre autres déversements échantillonnés, les valeurs de concentrations ou de rendement sont respectées (à l'exception du premier déversement qui a engendré un lessivage des fines présentes dans le matériau filtrant suite à sa mise en place augmentant alors la concentration en MES en sortie de l'ouvrage par rapport à l'entrée).

Paramètres	OU	
	Concentration à ne pas dépasser	Rendement minimum à atteindre
DBO ₅	35 mg/L	60 %
DCO	200 mg/L	60 %
MES	-	50 %

Tableau 3-5 : Performances minimales réglementaires, selon l'arrêté du 21 juillet 2015, pouvant être admises pour les rejets des eaux pluviales [RF, 2015]

Une dernière analyse peut être apportée sur la corrélation entre le fonctionnement hydraulique et les rendements épuratoires obtenus. Le filtre semble fonctionner de manière optimale lorsqu'un déversement important a lieu, synonyme d'un fonctionnement majoritairement vertical. Cette hypothèse est vérifiée sur l'événement du 21 juillet 2016, avec des rendements supérieurs ou égaux aux autres déversements analysés sauf pour la DCO (60 % contre 68 % pour le meilleur rendement).

Il est évident que le nombre limité de campagnes de mesures ne permet pas de confirmer avec exactitude ce lien entre le fonctionnement vertical du filtre et le rendement. Cependant, cette première analyse semble fort probable au vu des données de rendements épuratoires recensées dans la littérature pour des filtres plantés verticaux.

D'une manière plus générale, les résultats des 5 déversements montrent des rendements très intéressants pour les différents polluants et permettent d'appréhender le fonctionnement épuratoire de l'ouvrage.

Les différents rendements établis sont équivalents à ceux d'un marais filtrant surfacique (cf. Tableau 1-5). Ils sont bien inférieurs aux rendements obtenus pour des filtres plantés à fonctionnement vertical, notamment pour les paramètres suivants : DCO, DBO₅, Pt.

Même si les rendements obtenus ne sont pas optimaux en référence à la littérature, il convient de rappeler que l'ouvrage étudié n'est pas assimilable à un filtre planté de roseaux classique de par sa conception et son dimensionnement.

L'ouvrage est également en service depuis peu de temps et son fonctionnement va évoluer au fil du temps, tel que l'a mentionné Fournel (2012) par rapport au stade de « maturation » du filtre. Le système racinaire, peu développé pour le moment, va s'étendre de plus en plus dans le massif pour laisser place à l'effet rhizosphère. Le voile de boues en surface et en amont des gabions est également en cours de formation ce qui peut modifier le fonctionnement futur de l'ouvrage aussi bien du point de vue hydraulique qu'épuratoire.

Enfin, les cinq campagnes de prélèvement menées sur l'ouvrage, pour déterminer l'efficacité du filtre, ont montré l'intérêt de rétention des matières en suspension et de dégradation d'une partie de la matière dissoute. Outre ce traitement, l'ouvrage permet également de retenir les déchets anthropiques, tels que les lingettes et plastiques qui ont un impact direct sur le milieu naturel tant au niveau visuel qu'environnemental.

3.3. Analyses complémentaires

3.3.1. Analyse d'impact par la méthode des classes de pluie

L'étude diagnostique du réseau d'assainissement réalisée par le SDEA avait mis en avant des déversements violents avec des impacts forts et instantanés sur le cours d'eau, suite à l'analyse d'impact sur le Stadenrhein par la méthode des classes de pluie.

Cette méthode qui avait été utilisée sur l'ensemble des ouvrages déversants dans le cours d'eau du Stadenrhein, a été réutilisée pour se focaliser sur l'impact des déversements par le déversoir d'orage 8001. Une simulation de la situation sans ouvrage de traitement et une autre avec l'ouvrage de traitement en place ont été réalisées et les résultats des fréquences de déclassement du cours d'eau sont représentés dans le Tableau 3-6.

Les détails de cette méthode ainsi que les données utilisées pour le calcul des fréquences de déclassement sont présentés en Annexe 12.

	VERTE	JAUNE	ORANGE	ROUGE		VERTE	JAUNE	ORANGE	ROUGE
DCO	97,5%	0,0%	2,4%	0,1%	DCO	98,3%	1,7%	0,0%	0,1%
DBO ₅	97,5%	0,0%	2,4%	0,1%	DBO ₅	97,5%	0,7%	1,7%	0,1%
NH ₄	97,5%	0,0%	2,4%	0,1%	NH ₄	97,5%	0,7%	1,7%	0,1%
Objectifs	> 90%	< 10%			Objectifs	> 90%	< 10%		
	> 95%	< 5%				> 95%	< 5%		
	100%		0%			100%		0%	

Tableau 3-6 : Fréquence de déclassement du Stadenrhein sans l'ouvrage de traitement (gauche) et avec l'ouvrage de traitement (droite)

Ces résultats confirment la sensibilité du milieu récepteur qui possède un débit très faible ne permettant pas une dilution des effluents déversés directement dans le Stadenrhein. On voit bien que même en présence de l'ouvrage de traitement, il est impossible de ne pas déclasser de plus de 2 classes. Lors de l'étude de conception des ZDV, les acteurs du projet étaient informés de l'état du cours d'eau et de l'impossibilité à respecter les préconisations de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse en matière de déclassement.

Enfin, il est essentiel de prendre du recul sur ces résultats puisque :

- Le débit du cours d'eau est celui à l'exutoire du Stadenrhein et non au niveau du déversoir d'orage 8001 qui est le DO le plus en amont du cours d'eau. Le débit entrant dans la dilution de l'effluent déversé est donc surestimé ;
- Les pluies utilisées sont établies selon un classement statistique sur la station météorologique de Stattmatten située à 10 km du site d'étude. Ces pluies ne reflètent pas forcément les pluies réellement observées durant la campagne de mesures et par conséquent les débits déversés ;
- Les volumes déversés pour le DO 8001 sont calculés par le modèle hydraulique créé pour l'étude globale du réseau communal. Ce dernier n'a pas été ajusté avec les données récoltées durant la campagne de mesures par faute de temps. Ainsi, ces volumes sont peut-être surestimés ou sous-estimés en fonction de la pluie simulée.

3.3.2. Comparatif entre un ouvrage « béton » et « végétalisé »

Suite au calcul de la fréquence de déclassement de la situation passée et avec l'ouvrage de traitement, il s'avère que ce dernier ne permet pas de respecter les préconisations de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse.

Une étude comparative entre un projet béton de type bassin d'orage et une zone de dissipation végétalisée peut être réalisée pour comprendre l'intérêt de ce dernier type d'ouvrage pour limiter la pollution des cours d'eau par temps de pluie.

Afin de raisonner sur les mêmes bases, un volume équivalent a été calculé pour chacun des deux types d'ouvrages pour obtenir le même résultat souhaité, à savoir un non déclassement de plus de deux classes. Ainsi, pour le déversoir d'orage 8001, un volume de 400 m³ doit être pris en compte pour le bassin d'orage en béton contre 600 m³ pour l'ouvrage végétalisé. Une description des avantages et des inconvénients de ces deux ouvrages est proposée dans le Tableau 3-7.

	Ouvrage « béton »	Zone de Dissipation Végétalisée
Volume	400 m ³	600 m ³
Emprise foncière	100 m ²	300 m ²
Coût investissement	600 000 € H.T	100 000 € H.T
Coût fonctionnement	2 fois plus élevé qu'un filtre planté (Camilleri, 2016)	-
Entretien	Difficulté pour l'entretien et risques pour les agents (H ₂ S)	Entretien facilité mais grosses opérations à prévoir tous les 10 à 15 ans
Gestion des pluies successives	Temps de vidange recommandé vers la STEU < 24h	Volume restitué au milieu naturel tout au long du déversement < 15 h (Shutes <i>et al</i> , 1999)
Nuisances	Olfactives si présence d'ouvertures	Olfactives et visuelles (déchets anthropiques et boues)

Tableau 3-7 : Comparatif des ouvrages limitant les impacts des déversements sur le milieu récepteur

Outre ces différences entre un projet exclusivement béton, type bassin d'orage et une zone de dissipation végétalisée, il est évident que le coût d'un ouvrage « béton » est un point clairement limitant pour les collectivités qui n'ont pas forcément les moyens pour réduire les impacts des rejets sur le milieu naturel.

De surcroît, les Agences de l'Eau tendent de plus en plus vers la construction d'ouvrages « verts », s'inscrivant ainsi dans une démarche de gestion durable des eaux pluviales.

Par conséquent, les intérêts de la construction d'une zone de dissipation végétalisée par rapport à un ouvrage béton de type bassin d'orage sont nombreux :

- Coûts de construction et de fonctionnement plus faibles ;
- Facilité et rapidité de mise en œuvre ;
- Aspect écologique et durable, ouvrage « vert » ;
- Mise en valeur de l'aménagement urbain ;
- Ouvrage éducatif, notamment pour les déchets anthropiques comme les lingettes (Figure 3-11).



Figure 3-11 : Lingettes retenues par le dégrilleur (gauche) et la grille anti-intrusion (droite) suite à de nombreux déversements (24/06/2016)

3.4. Incertitudes de mesure et limites de l'étude

De nombreuses incertitudes sont attachées à la campagne de mesures et de prélèvements et sont, pour certaines, difficilement quantifiables. Ainsi les incertitudes globales sur les débits et les concentrations en polluant ne seront pas calculées.

3.4.1. Incertitude sur les mesures pluviométriques, les débits, les volumes

Incertitude pluviométrique

À la différence d'une modélisation hydraulique, les incertitudes de mesure de la pluviométrie n'ont pas d'influence notable dans le contexte de l'étude puisqu'il s'agit simplement de corrélérer un événement pluvieux à un déversement. Il est cependant intéressant de se pencher sur l'estimation relative de l'erreur de mesure de la pluviométrie.

Le type de pluviographe utilisé pour l'étude est celui le plus couramment utilisé, c'est à dire celui à augets basculants. En respectant les règles d'installations, on peut estimer sa précision à environ 10% pour des pluies courantes, mais pouvant être largement supérieures dans le cas de fortes intensités (Vazquez et Zug, 2010).

Incertitude bilan hydrique

La fiabilité de la mesure de débit est primordiale car l'hydraulique sert de base à la compréhension du système car elle est le vecteur des matières polluantes.

La reconstruction de l'hydrogramme, à partir des mesures dimensionnelles du filtre et des mesures de hauteur d'eau au cours du temps, est entachée d'erreurs indéniables. En effet, l'erreur sur les mesures des dimensions de l'ouvrage et les incertitudes des appareils de mesures augmente les imprécisions sur l'établissement du volume d'eau dans l'ouvrage.

De plus, les hypothèses choisies pour l'évapotranspiration, les précipitations et l'infiltration au niveau du filtre, considérées comme nulles, sont d'autres approximations sur les flux réellement mis en jeu. Ces derniers paramètres, essentiellement liés aux conditions météorologiques, sont très variables et il n'est pas envisageable de les estimer pour chaque campagne de prélèvement.

3.4.2. Incertitude sur la chaîne analytique

Les principales incertitudes liées au prélèvement d'un échantillon jusqu'à son analyse sont présentées ci-après.

Représentativité de l'échantillon

Selon diverses études, répertoriées dans la thèse réalisée par Grommaire-Mertz (1998), le positionnement de la crépine d'aspiration du préleveur, dans une conduite, a une influence certaine sur la concentration de l'échantillon. En effet, il a été montré que la concentration de l'effluent est plus chargée au fond de la conduite qu'en surface. La différence de concentration par temps de pluie montre des écarts de l'ordre de 50 % sur la teneur en MES. Ainsi, il est recommandé de placer la prise d'eau à une hauteur de 40 à 60 % de la colonne d'eau.

Ces conclusions permettent d'affirmer que les concentrations mesurées tout au long de la campagne de prélèvement sont surestimées en entrée, puisque la crépine d'aspiration du préleveur d'entrée est fixée dans la partie basse de la conduite du siphon.

Le point de prise d'eau en sortie est quant à lui plutôt bien situé dans la conduite de drainage : la crépine, d'une longueur de 15 cm, est orientée à 45 degré par rapport au fond de la conduite de diamètre 300 mm.

Conditionnement de l'échantillon

Il est recommandé de réaliser les analyses des effluents sous 24 h pour les MES et sous 48 h pour la DCO et la DBO₅ pour une température de stockage de 4°C (Grommaire-Mertz, 1998), néanmoins les préleveurs mis en place sont isothermes donc l'échantillon prélevé reste à température ambiante jusqu'à l'intervention de l'opérateur. La durée de conditionnement de l'échantillon peut durer entre 2 et 8 h, selon le moment du déversement (la journée ou la nuit). La qualité des paramètres physico-chimiques est donc susceptible de changer entre le moment de la prise d'échantillon et celui où les analyses sont réalisées.

Procédure échantillonnage

Les préleveurs automatiques ont une imprécision lors de la prise des volumes, estimés à hauteur de $\pm 5\%$ d'un volume d'échantillon de 200 mL (Hydreka, 2016). Cette imprécision est d'autant plus significative pour l'entrée de l'ouvrage car la reconstitution de l'échantillon moyen à partir de 24 bidons de 1 litre, à l'aide d'une éprouvette graduée de 500 mL, entraîne des incertitudes supplémentaires.

Incertitudes d'analyse

L'incertitude d'analyse en laboratoire sur les paramètres globaux (MES, DCO, DBO₅) suivant un intervalle de confiance de 95 % est estimée inférieure ou égale à $\pm 6\%$ (Grommaire-Mertz, 1998). L'incertitude relative aux analyses des autres paramètres n'est pas connue mais peut être assimilée à celle des paramètres globaux selon un test de répétabilité.

3.4.3. Limites de l'étude

Tout au long de la campagne de mesures et de prélèvement, il s'est avéré que plusieurs éléments ont perturbé le fonctionnement optimal du filtre. Situations pouvant être considérées comme les limites de l'étude du système de traitement.

Le premier point marquant est le nombre restreint d'échantillons analysés. Ce qui ne permet pas d'être représentatif du fonctionnement épuratoire de l'ouvrage de traitement. Plusieurs explications sont à l'origine de ce problème :

- Malgré la mise en place de la plaque sur la conduite conservée du déversoir d'orage pour augmenter sa fréquence de fonctionnement, très peu de déversements ont eu lieu sur la période étudiée en comparaison avec d'autres déversoirs présents sur la commune ;
- Le mois de juin 2016 a été exceptionnellement pluvieux au niveau local et national et a engendré une période de crue longue et intense. Le niveau d'eau du Stadenrhein, a été particulièrement haut pendant plus d'un mois et demi ce qui a suspendu la campagne de prélèvement. Pour mémoire, en période de hautes eaux, le niveau d'eau du milieu naturel communique avec l'ouvrage de traitement par un effet de vases communicants rendant le prélèvement automatique impossible en entrée.

Le deuxième point important sur les limites de l'étude est l'association entre le temps et les moyens disponibles. Une démarche complète a été réalisée en allant du choix du matériel jusqu'à l'analyse des résultats et nécessite une charge de travail conséquente. Des alternatives ont alors été déployées pour mener à bien l'étude comme la création de déversements artificiels. Les résultats obtenus permettent d'établir le fonctionnement global de l'ouvrage qui devra être validé dans le temps par des études complémentaires sur le même principe de fonctionnement hydraulique à la fois horizontal et vertical.

SYNTHÈSE - RÉSULTATS ET ANALYSES

L'analyse des mesures de hauteur d'eau et des échantillons d'eau résulte de données restreintes qui limitent la compréhension du comportement hydraulique et épuratoire du système de traitement. C'est pourquoi il est assez difficile de valider avec certitude les conclusions établies. Les déversements artificiels ont apporté des données complémentaires et essentielles à la compréhension épuratoire de l'ouvrage, en se rapprochant d'un effluent unitaire par temps de pluie. Les analyses réalisées sur l'ensemble des échantillons et sur les mesures de hauteur d'eau ont permis d'établir une première approche du fonctionnement de l'ouvrage.

D'un point de vue hydraulique, l'ouvrage est régi par deux fonctionnements bien distincts selon les débits maximaux d'alimentation. Le premier est caractérisé par un régime d'alimentation mixte entre fonctionnement horizontal et vertical. Le second est majoritairement vertical. Il apparaît lors d'événements pluvieux intenses entraînant une réponse hydraulique supérieure à 600 m³/h. L'étude montre clairement que le premier type de fonctionnement est le plus récurrent.

Au niveau épuratoire, il semblerait que plus l'effluent est concentré, meilleur est le rendement obtenu. Ce constat a pu être établi sur les MES mais non sur les autres paramètres de par le nombre limité de campagnes de prélèvements analysés. De plus, le fonctionnement en vertical du filtre, pour des débits importants, montre les meilleures performances épuratoires de la campagne. L'hypothèse d'un meilleur traitement en fonctionnement vertical que mixte est tout à fait plausible selon les résultats de la littérature observés pour des filtres plantés verticaux.

De manière générale, les abattements et les concentrations en sortie de l'ouvrage sont conformes, sauf pour un paramètre d'un déversement, à l'arrêté du 21 juillet 2015, concernant la réglementation des rejets pour les petites installations de traitement des eaux usées. Ce qui traduit l'utilité et les performances de cet ouvrage.

Enfin, ces différentes constatations permettront de se focaliser sur l'amélioration des critères de conception et de dimensionnement afin d'optimiser le traitement des effluents.

4. PISTES D'AMÉLIORATION ET CONCEPTION D'UN OUVRAGE

4.1. Recommandations techniques

Les observations réalisées tout au long de l'étude, qu'elles soient le fruit d'une analyse des données ou simplement visuelles, permettent de définir des points d'ajustement dans le but d'améliorer le fonctionnement de ce type d'ouvrage qui pourra être déployé par d'autres collectivités.

4.1.1. Observations du fonctionnement

La campagne de mesures et de prélèvements a révélé un fonctionnement spécifique de l'ouvrage particulièrement en présence de la nappe phréatique affleurante.

Effectivement, en période de hautes eaux, le cours d'eau communique avec l'ouvrage par la conduite de sortie et réduit le volume de stockage. Les données récoltées durant la campagne de mesures indiquent une perte de la capacité de stockage pouvant aller jusqu'à 75 % de celle-ci. Cette situation, considérée comme peu récurrente dans l'année, implique un fonctionnement dégradé du système de traitement qui doit être pris en compte au stade de la conception.

Néanmoins, ce fonctionnement dégradé peut être minimisé par l'effet de dilution qui se produit lorsqu'il y a un déversement, puisque cette situation intervient en nappe haute, là où le débit et le volume du cours d'eau sont assez conséquents pour diluer l'effluent déversé en comparaison à la période d'étiage. De plus, la présence d'un niveau d'eau « propre » dans l'ouvrage favorise directement le mélange des eaux déversées sans pour autant que le trop-plein soit sollicité.

Une autre observation a mis en évidence l'impact de la remontée de la nappe sur les parois étanches du filtre créant des zones de pression sur la géomembrane. La sollicitation est d'autant plus importante en entrée où aucun matériau ne fait contrepoids (Figure 4-1). Il conviendra de s'assurer, dans des futures études, du bon choix de la géomembrane en fonction de ses caractéristiques par rapport au risque de déchirement de cette dernière.



Figure 4-1 : Sollicitation de la géomembrane sur les parois latérales (24/06/2016)

À titre d'information, le niveau du cours d'eau phréatique peut s'élever de 60 cm en moins de 24h suite à de fortes pluies sur le bassin versant du Rhin courant libre qui s'étend jusqu'en Suisse. Le niveau de la nappe subit ensuite une décrue longue pouvant durer plus d'un mois, notamment si les précipitations subsistent. C'est ce qui est arrivé au mois de juin 2016 lors de la campagne.

De plus, la présence d'un niveau d'eau dans le filtre planté ne permet pas une oxygénation du milieu poreux entraînant un développement d'algues et d'odeur. Cette situation est problématique pour les riverains qui subissent ces nuisances odorantes désagréables mais qui s'estompent rapidement lorsque l'état initial est retrouvé.

Par ailleurs, l'alimentation verticale du filtre crée des désordres sur le matériau filtrant où des zones de charriage sont observées (Figure 4-2). Les blocs en pierre marquant la délimitation entre la première partie du massif et la seconde sont à l'origine de ce transport de matériaux en sus de la vitesse de l'écoulement de l'eau en surface.



Figure 4-2 : Charriage du matériau filtrant lors des alimentations verticales (24/06/2016)

Enfin, l'effluent en provenance d'un réseau unitaire amène des déchets anthropiques comme des lingettes ou des plastiques de toutes sortes qui ne sont pas assimilables par le filtre planté de roseaux. Ces déchets sont le plus souvent retenus par le dégrilleur situé en tête. Malheureusement, certains d'entre eux se retrouvent sur les matériaux ou accrochés aux tiges des roseaux. Le nettoyage du dégrilleur est un point essentiel pour valoriser l'image de ce type d'ouvrage végétalisé et de l'insertion dans le paysage urbain.

4.1.2. Esprit critique de la conception actuelle

Cette partie consiste à décrire les points d'intérêts de la conception de l'ouvrage et de les critiquer aussi bien de manière positive que négative afin d'optimiser les futures constructions. Tous les éléments présentés ci-après dans le Tableau 4-1 mettent en évidence, et de manière synthétique, les éléments de conception nécessitant des rectifications.

	Points critiques
Nappe affleurante	La stabilité de l'ouvrage n'a pas été prise en compte face à la remontée de nappe lors de la construction. Le calcul de stabilité montre un état limite lorsque le niveau de la nappe est proche du trop-plein avec un risque de soulèvement du filtre. Par ailleurs, l'eau du milieu naturel entre dans l'ouvrage par la conduite de sortie, ce qui réduit le volume de stockage de l'ouvrage. Cette situation peut être minorée par l'effet de dilution durant la période des hautes eaux.
Dégrilleur	Le prétraitement du filtre est constitué d'un simple dégrilleur qui retient une grande partie des flottants. Ce rôle est également joué par les gabions qui retiennent une partie de ces déchets. Certains d'entre eux arrivent parfois à passer au travers et se retrouvent en surface du filtre planté ou accrochés aux tiges des roseaux. Une sollicitation du trop-plein, lors de déversement important, peut entraîner une partie de ces déchets anthropiques vers le milieu naturel.
Zone de décantation	Il n'existe pas de zone de décantation à proprement parler. Néanmoins, la zone située en amont des gabions participe à la sédimentation des matières polluantes, notamment lorsque le filtre est en phase de vidange.
Gabions	Les gabions jouent leur rôle de dissipation du flux hydraulique cependant, ils ne permettent pas une mise en charge rapide pour les « faibles » débits (<600 m ³ /h environ dans la configuration actuelle). De plus, la hauteur des gabions par rapport à celle du lit de matériaux est trop importante pour faciliter ce fonctionnement (respectivement 80 cm contre 50 cm). La perte de charge imposée par les gabions n'est donc pas assez importante.
Enrochements	Les enrochements créent une zone de charriage à leur aval. Ils favorisent l'accélération de l'eau au lieu de mieux la répartir sur la surface du filtre. Il y a un risque de détérioration des premiers plants de roseaux et d'aggravation au fil des alimentations.
Granulométrie	La granulométrie du matériau de filtration est de taille grossière en comparaison à un FPRv pour l'assainissement. Les vitesses de filtration sont donc plus élevées diminuant ainsi les performances épuratoires. Le risque de colmatage est quant à lui limité ce qui est point important pour ce filtre qui possède deux régimes d'alimentation différents.
Dispositif de maintien du niveau d'eau	Le dispositif actuel permet d'obtenir une réserve hydrique supplémentaire. Le coude situé dans le regard de sortie est bien calibré pour ne pas avoir d'eau stagnante en amont des gabions.
Drains	Les drains permettent un drainage de l'effluent traité jusqu'à la sortie de l'ouvrage. Ils sont cependant trop proches de l'entrée du filtre, ce qui peut entraîner un court-circuit hydraulique et par conséquent une diminution des performances épuratoires. Cette hypothèse n'a pas pu être vérifiée expérimentalement.
Aération du massif	En temps normal, le réseau de drainage permet à la fois d'évacuer les eaux traitées et également de participer à l'aération du massif. Cette tâche n'est pas réalisée dans l'ouvrage étudié puisque les deux cheminées d'aération sont reliées aux drains qui sont complètement noyés (à cause du coude en sortie).
Roseaux	La pousse des roseaux s'est bien réalisée tout au long de la campagne. Malgré cela, les macrophytes doivent faire l'objet d'une attention particulière durant leur première année dans le filtre (niveau d'eau constant sous la surface et désherbage). Le risque est lié aux alimentations verticales qui engendrent des vitesses d'écoulement élevées en surface pouvant détruire les jeunes plants. Cette situation a été observée sur certains plants qui ont été couchés par des matières fécales et des déchets flottants se fixant à la base des pieds.

Tableau 4-1 : Récapitulatif des éléments de conception à améliorer

4.1.3. Proposition de points d'amélioration

Les différentes critiques relevées à la partie précédente permettent de proposer un ajustement des paramètres de conception afin d'optimiser le système de traitement dans les conditions actuelles (faible dénivelé, nappe phréatique affleurante, conception en fonction du foncier). Les points d'améliorations proposés sont consignés dans le Tableau 4-2, ci-après.

	Points d'amélioration
Nappe affleurante	Afin de préserver l'ouvrage, un dispositif de sécurité permettra de laisser entrer l'eau du Stadenrhein lorsque le niveau de la nappe sera trop important (dispositif calibré à 20 cm sous le niveau du trop-plein) ; l'augmentation de l'épaisseur du matériau n'est pas un choix audacieux puisque cela rend plus difficile l'alimentation verticale et augmente le coût de construction d'autant plus que la surface est importante. La mise en place d'un clapet anti-retour de type assainissement sur la conduite de sortie permet de s'affranchir des remontées d'eau dans l'ouvrage. Néanmoins, s'il y a une alimentation en eau de l'ouvrage, ce dernier ne pourra pas se vidanger si la nappe est haute (effet de vases communicants).
Dégrilleur	Une réduction de la taille de l'entrefer, dans une certaine mesure, pour obtenir une meilleure rétention. La mise en place d'une paroi siphonide dans le déversoir d'orage permettra de limiter l'apport de ces déchets tout en réduisant l'entretien du dégrilleur.
Zone de décantation	L'expérience des Bodenfilter en Allemagne montre que « le traitement des eaux sans stockage ou décantation préalables est déconseillé en raison des risques du colmatage des filtres » (Boutin et al., 2000). Cependant, la construction d'un bassin de décantation n'est pas envisageable selon la configuration de l'ouvrage étudié, l'emplacement des sites à proximité de chemins piétonniers ainsi que la nature des effluents. La zone située en aval des gabions permet une pré-décantation de l'effluent réduisant les risques de colmatage.
Gabions	Réduction de la hauteur des gabions par rapport à la surface du filtre en passant de 30 cm à 5 cm. L'alimentation verticale sera favorisée. De plus, une plaque sera placée à l'arrière des gabions sur la partie haute pour créer une perte de charge plus importante tout en permettant une vidange de la zone amont (cf Figure 4-3).
Enrochements	La suppression de ces blocs d'enrochements permettra de supprimer le charriage des matériaux filtrants. On gardera la couche de galets anti-affouillement sur 5 à 10 mètres après les gabions pour protéger la surface du lit.
Granulométrie	Une diminution de la taille du granulat filtrant n'est pas envisageable pour le moment en raison du risque de colmatage sur la partie horizontale du filtre. On gardera donc cette granulométrie qui est vérifiée par la relation de Terzaghi.
Dispositif de maintien du niveau d'eau	Adapter le même procédé en veillant bien à la côte du coude.
Drains	Disposer les drains en fond du filtre sur la moitié de sa longueur seulement afin de limiter les courts-circuits hydrauliques lors des alimentations horizontales.
Aération du massif	Créer un réseau de drains supplémentaire pour l'aération du massif. Il sera placé au-dessus du niveau d'eau imposé par le coude de sortie soit au-dessus de la couche de drainage.
Roseaux	Laisser les roseaux prendre pendant 1 an afin qu'ils soient assez résistants face aux alimentations verticales. Un niveau d'eau constant sous la surface du lit devra être maintenu pour la pousse des roseaux.

Tableau 4-2 : Récapitulatif des propositions d'améliorations des éléments de conception

4.2. Règles de conception et de dimensionnement

4.2.1. Conception

L'ensemble des propositions d'améliorations énumérées peut être complété par des dispositions particulières ayant pour objectifs de mieux appréhender les nouvelles dispositions constructives et d'optimiser le fonctionnement.

Les zones de dissipations végétalisées pour le traitement des surverses de déversoir d'orage devront intégrer une alimentation à récurrence verticale dans le but d'améliorer les performances épuratoires.

On attachera de l'importance à garder la même structure globale du lit planté, à savoir une première partie conçue comme un filtre horizontal et la seconde comme un vertical. De plus, la granulométrie sera identique afin de ne pas modifier la connaissance des vitesses de filtration. Cela permettra également de limiter les risques de colmatage.

Une adaptation de la zone en aval des gabions, sur la base de la Figure 4-3, permettra de créer une perte de charge plus importante en entrée grâce à une plaque en acier disposée sur toute la longueur des gabions afin de forcer l'alimentation verticale. Cette plaque laissera un espace vide à la base des gabions, sur une hauteur de 10 cm, pour permettre une vidange complète de la zone amont. La disposition des matériaux est réaménagée pour limiter le colmatage à la base du massif et permettre une filtration verticale de l'effluent dès le début du massif.

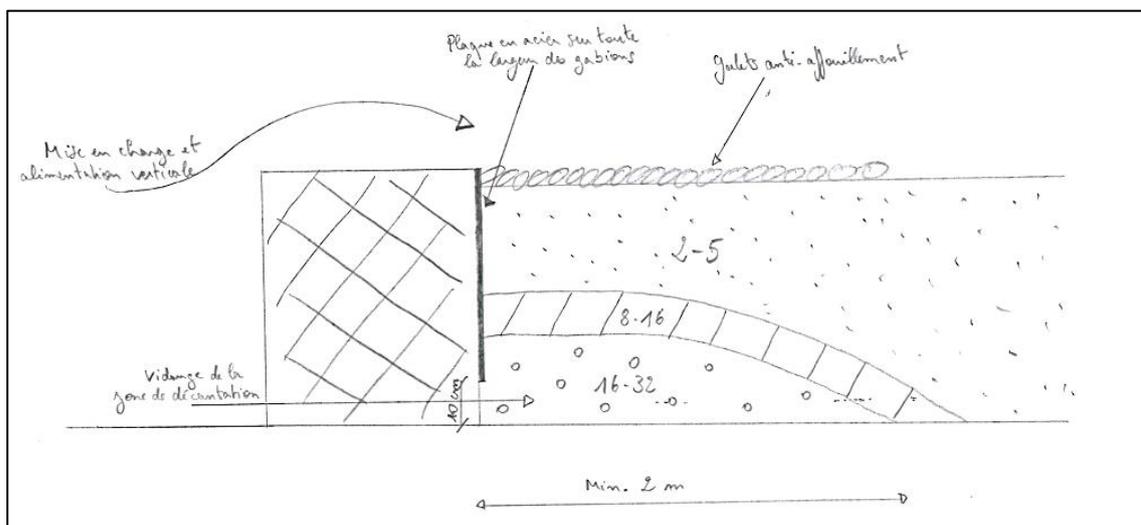


Figure 4-3 : Proposition d'amélioration de la zone en aval des gabions

L'étude a montré la difficulté à dimensionner ce genre d'ouvrage pour la gestion de toutes les pluies sans avoir de régulation du débit. Le contexte de l'étude implique d'autant plus une gestion des grands volumes pour limiter l'impact des rejets sur le Stadenrhein.

De plus, le caractère intrinsèque des effluents unitaires de temps de pluie demande une bonne conception de l'ouvrage pour restreindre les nuisances visuelles et olfactives.

Une alimentation de plusieurs filtres en parallèle, selon le principe du filtre de Marçy-l'Etoile, peut être envisagée lorsque la surface dédiée au traitement est importante. Les plus faibles débits alimenteront le premier filtre tandis que les plus importants seront déversés vers le deuxième. Une distribution alternée des lits doit être réalisée par le biais d'une vanne en amont du système afin de permettre une minéralisation des boues supplémentaire à la durée de temps sec.

En 2013, Toussaint et Vareilles se sont intéressés à comprendre les processus d'urbanisation à travers l'observation des activités sociales sur le site de Marçay-l'Étoile. Ils ont mis en évidence les difficultés d'acceptabilité des riverains face à des projets urbains, en l'occurrence la création et le suivi d'un filtre planté pour le traitement des surverses d'un déversoir d'orage en proximité d'un quartier résidentiel.

Les réactions de rejets de la part des riverains sont des éléments essentiels à prendre en compte avant la construction d'un tel ouvrage. Des dispositions doivent être prises en amont du projet pour en informer le public afin de les rassurer sur les éventuelles nuisances provoquées par l'ouvrage.

Par conséquent, il faut s'attacher lors de l'élaboration d'un filtre planté de roseaux pour le traitement des surverses de déversoir d'orage à :

- Réduire les zones d'eau stagnante pour éviter la prolifération des nuisibles tels que les moustiques ;
- Entretenir régulièrement le dégrilleur pour réduire les odeurs et l'aspect visuel négatif ;
- Insérer au maximum l'ouvrage dans le paysage urbain ;
- Informer et sensibiliser le public par la mise en place de panneaux d'informations.

4.2.2. Dimensionnement

Le dimensionnement d'un filtre planté de roseaux pour le traitement des surverses de déversoir d'orage est très empirique d'autant plus que le type de système de traitement étudié vise à être déployé sur des zones présentant un faible dénivelé et/ou une nappe phréatique affleurante. Pour le moment, le manque de retour d'expérience par rapport à ce premier ouvrage de traitement réduit l'établissement de critères de dimensionnement spécifiques et adaptés. On se basera en grande partie sur le dimensionnement des filtres plantés classiques ajusté au traitement des rejets urbains de temps de pluie.

Dans un premier temps, le dimensionnement d'un tel filtre planté de roseaux est dicté par la définition du volume de rétention souhaité pour réduire l'impact des déversements sur le milieu naturel. Ce volume peut être déterminé en fonction d'une étude d'impact sur un cours d'eau et pourra être ajusté en fonction des rendements observés sur ce type d'ouvrage de traitement.

Dans un second temps, il faut s'attacher à l'implantation du projet et à la surface disponible. Les filières extensives sont souvent dénigrées pour leurs contraintes foncières notamment dans des secteurs urbanisés. Des ajustements du volume de stockage et de la forme du filtre seront nécessaires, la plupart du temps, en fonction de la surface parcellaire.

Différentes formes peuvent être adoptées : rectangulaire, polygonale voire triangulaire. Les ratios entre la longueur et la largeur de l'ouvrage sont eux aussi très variables mais il faut essayer au maximum d'avoir un ouvrage plus long que large notamment lorsque l'alimentation est horizontale pour que l'effluent transite plus longtemps dans le massif. Il ne faut pas non plus qu'il soit trop long afin d'avoir une bonne répartition en surface quand il est alimenté verticalement. On pourra retenir un ratio de 3 à 5 de longueur pour 1 de largeur.

Le stockage de l'eau en surface du filtre devra se faire sur une hauteur de 0,5 à 1 mètre en fonction de la topographie et surtout des fils d'eau d'entrée et du niveau de la crête du déversoir d'orage alimentant l'ouvrage.

La zone élargie située en amont des gabions est nécessaire à la dissipation du flux hydraulique et doit permettre à la fois une pré-décantation. Elle assure également une

mise en charge pour obtenir une alimentation verticale du lit filtrant. Cette zone doit rester à l'identique mais peut être allongée ou raccourcie en fonction des débits maximaux obtenus par la modélisation hydraulique. Une largeur de 3 mètres sera considérée comme valeur guide en entrée d'un ouvrage.

La vitesse d'écoulement en surface du lit planté doit être raisonnable pour ne pas endommager les roseaux (< 0,7 m/s selon Meyer et al, 2013). Par ailleurs, une couche de boues va se former au fil du temps et des déversements. Il est donc impératif d'avoir une vitesse de l'eau réduite. Pour ce faire, un élargissement du filtre en aval des gabions permettra de réduire la vitesse de l'eau avec une distribution de l'effluent en surface.

La charge hydraulique annuelle est un des points difficilement quantifiables puisque la fréquence de déversement ainsi que les volumes déversés sont différents d'une année à l'autre. Ce point-ci ne sera pas évalué.

Le dernier point concerne le débit de fuite qui est fortement lié à la conductivité hydraulique donnée par la taille des granulats utilisés. L'étude a montré qu'avec un niveau d'eau de près de 1 mètre dans le filtre ainsi qu'une conduite de 150 mm, on arrive à limiter le débit en sortie aux alentours de 110 m³/h, soit 0,2 L/s/m². Ce débit, considéré comme 10 fois supérieur à la littérature, doit être réduit. L'installation d'un vannage ainsi qu'un choix plus adapté du diamètre de la conduite selon la surface du filtre permettront d'ajuster le débit de fuite des futurs filtres.

Enfin, pour les autres points de dimensionnement plus conventionnels, on gardera les mêmes principes que pour les filtres plantés. Tous les éléments propres à la construction d'un tel ouvrage de traitement sont recensés dans le Tableau 4-3 suivant :

	Paramètre de conception et de dimensionnement
Dimensionnement général	En fonction du volume de rétention souhaité et de la surface disponible
Forme de l'ouvrage	A adapter selon le contexte (rectangulaire, polygonale ou triangulaire)
Ratio largeur/longueur	1 : 3 à 1 : 5
Pente de fond de filtre	1 % maximum
Charge hydraulique	Variable en fonction des déversements
Largeur gabions	Plus ou moins 3 mètres. Variable selon le débit maximum
Vitesse d'amenée de l'eau	Conseillée inférieure à 0,7 m/s. Difficilement évaluable car très variable en fonction de l'intensité du déversement
Maintien d'une hauteur d'eau en fond de filtre	Hauteur du coude en sortie au niveau de l'entrée des gabions pour ne pas avoir d'eau stagnante à l'air libre
Couche de filtration minimale	0,5 m en vertical - 5 mètres en horizontal
Débit de fuite de l'ouvrage	Régulé par le diamètre de sortie : Ø150 mm pour un volume de stockage de 200 m ³ – Ø200 mm pour 1000 m ³ Régulation supplémentaire par vannage sur la conduite drainante
Temps de rétention de l'effluent optimal	3 à 5 heures. À adapter avec le vannage
Volume de stockage en surface du filtre	La cote du trop-plein donne la hauteur de stockage disponible. Hauteur comprise entre 0,5 à 1 mètre en surface du filtre. Attention à bien caler cette cote pour ne pas influencer le réseau d'assainissement au niveau du déversoir d'orage
Zone de sédimentation	Zone en amont des gabions
Utilisation de filtres en parallèle	Conseillé pour la minéralisation des boues et pour des grandes surfaces lorsque la largeur est suffisante
Dispositif de contrôle du niveau d'eau en sortie	Possible grâce au coude de sortie
Étanchéité de l'ouvrage	Possible par géomembrane étanche ou couche d'argile sur 30 à 40 cm
Ouvrage de surverse	En aval du filtre pour avoir une pré-décantation de l'effluent avant rejet direct au milieu naturel (cela réduit le court-circuit hydraulique)

Tableau 4-3 : Récapitulatif des paramètres de conception-dimensionnement à adopter pour les futurs ouvrages

4.2.3. Perspectives de recherches complémentaires

Le type d'ouvrage proposé pour la commune de Beinheim est particulier dans sa conception et son dimensionnement d'où la nécessité de réaliser des investigations complémentaires pour confirmer les phénomènes hydrauliques et épuratoires établis au sein du filtre.

Des études supplémentaires conciliant à la fois cette configuration et ce contexte permettraient de confirmer ou d'infirmer les résultats obtenus dans cette étude. Ces études pourraient prendre en compte la conception-dimensionnement de l'ouvrage et son instrumentation. La campagne de mesures et de prélèvements pourra s'étendre sur une plus longue période dans le but d'apprécier les phénomènes de dégradation biologique dans leur ensemble tout en intégrant les micropolluants. Une nouvelle approche critique de la construction mettra en valeur les nouveaux défauts observés.

Bien entendu, différents points peuvent être développés et intégrés dans un nouvel ouvrage pour tenter d'optimiser le système de traitement. Plusieurs études ont déjà porté sur l'amélioration des ouvrages « classiques » et pourraient être reconduites sur ce type d'ouvrage. Les points pouvant être abordés sont les suivants (Schmitt, 2014) :

- Les différentes granulométries intervenant dans la dégradation des polluants et dans la vitesse de filtration de l'effluent ;
- L'épaisseur des différentes couches de matériaux ;
- L'impact de la provenance du granulat filtrant ;
- Le rôle des plantes dans la dégradation des polluants et dans l'assimilation des métaux ;
- L'impact du temps de rétention hydraulique, en lien avec la granulométrie et la charge hydraulique.

Désormais les sujets de recherche vont de plus en plus loin en s'intéressant à l'optimisation des matériaux pour cibler certains paramètres physico-chimiques, au fonctionnement sur le long terme notamment en matière de colmatage et d'exploitation de l'ouvrage et sur les modèles prédictifs de qualité d'eau (Uhl et Dittmer, 2004).

4.3. Conception d'un ouvrage végétalisé

Pour mémoire, l'étude réalisée par le bureau d'études extérieur avait conclu en la création de quatre Zones de Dissipation Végétalisées le long du Stadenrhein. L'ouvrage étudié tout au long de ce mémoire a été le premier réalisé, puis deux autres ont vu le jour au cours de l'année 2016. Un des objectifs de ce travail est de réaliser une pré-conception et un pré-dimensionnement de ce dernier ouvrage qui sera le plus grand filtre planté de la commune.

4.3.1. Contexte

Pour ce dernier ouvrage, les études menées par le bureau d'études extérieur ainsi que par le SDEA via la modélisation du réseau d'assainissement communal ont mis en exergue la nécessité de :

- créer un bassin de pollution supplémentaire de 300 m³ complémentaire à celui de 400 m³ déjà existant pour garantir le maintien d'une qualité satisfaisante du cours d'eau ;

- Déplacer la surverse du DO 2001 en rive droite du Stadenrhein comme pour les 3 autres ZDV déjà réalisées ;
- Créer une ZDV comprenant un volume de stockage de 3300 m³, à adapter au contexte local du site et à la surface.

Le réseau d'assainissement communal comprend actuellement un bassin d'orage de 400 m³ dont l'alimentation se fait par pompage car l'ouvrage est hors sol. Dans la mesure du possible, l'objectif est donc de construire un ouvrage complémentaire de 300m³ dont le fonctionnement sera lié à l'ouvrage existant.

Actuellement, les effluents unitaires de Beinheim sont acheminés vers le poste de refoulement aval par deux collecteurs Ø 400 et 600 mm. Seuls les effluents conservés au droit du DO 2001 (rue des Cigognes) sont dirigés vers ce même poste par un autre collecteur de Ø 250 mm (Figure 4-4).

Ce poste de refoulement est composé de 4 pompes : 2 permettant d'évacuer les effluents vers la station d'épuration de Seltz et 2 assurant l'alimentation du bassin existant.

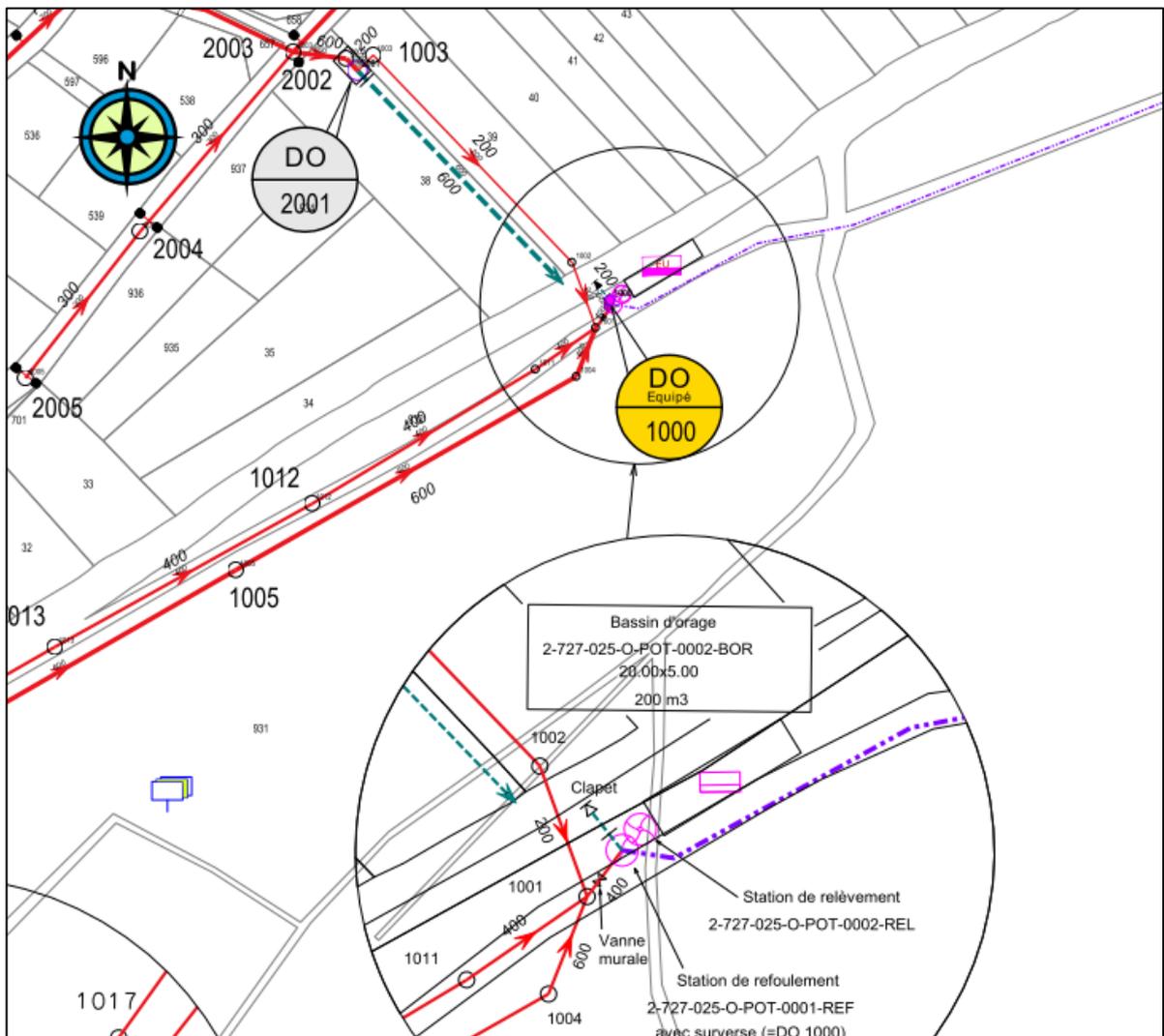


Figure 4-4 : Plan de situation des réseaux et des ouvrages existants

Le système futur fonctionnera comme suit :

- Par temps sec : aucun rejet au milieu. Les bassins de pollution restent vides, l'ensemble des eaux usées est conservé afin d'être amené à la station d'épuration ;

- Lors d'un événement pluvial de faible intensité : aucun rejet au milieu naturel. La station d'épuration n'étant pas en mesure de traiter l'ensemble de l'effluent, le premier flot d'eaux usées, dont la charge polluante est très élevée, sera pompé vers le bassin de pollution ;
- Lors d'un événement pluvial prolongé : aucun rejet de surface vers le milieu naturel. En effet, l'ensemble des effluents est pompé vers les bassins. Une fois ceux-ci pleins, les effluents sont renvoyés par le trop-plein du poste vers la zone de dissipation végétalisée attenante. Les volumes déversés dans la ZDV sont alors traités avant rejet dans le Stadenrhein ;
- Lors d'un événement pluvial prolongé important ou intense : aucun rejet direct vers le milieu naturel. En effet, l'ensemble des effluents est pompé vers les bassins. Une fois ceux-ci pleins, les effluents sont renvoyés par le trop-plein du poste vers la zone de dissipation végétalisée attenante. Les volumes déversés dans la ZDV sont alors traités avant rejet dans le Stadenrhein. L'autre partie est rejetée au milieu naturel par le trop-plein de la ZDV après avoir transité par le poste de refoulement puis la ZDV, subissant un processus de décantation ;
- Après l'événement pluvial, les eaux stockées dans le bassin de pollution seront restituées, peu à peu au réseau intercommunal, sans rejet au milieu naturel.

4.3.2. Proposition d'aménagements

Comme évoqué précédemment, les effluents rejetés par le trop-plein du poste de refoulement transiteront par la ZDV avant le rejet au milieu naturel.

Néanmoins, il est clair que le volume de stockage de la ZDV est très important et nécessite une surface disponible presque 2 fois supérieure au volume requis. Pour rappel, le volume de stockage est établi à 3300 m³.

Dans ces conditions, il est envisagé de ne créer qu'une partie filtre planté sur 800 m² et le reste de la surface disponible en zone de rejet végétalisée (ZRV) similaire à une zone humide.

La création du deuxième bassin d'orage de 300 m³ ainsi que des ZDV et ZRV nécessite des aménagements du réseau actuel :

- Le raccordement de la conduite déversante du DO 2001 au regard amont du poste de refoulement existant avec passage en siphon du cours d'eau ;
- La reprise du regard amont du poste de refoulement (PR) avec augmentation du diamètre d'entrée du PR ;
- La reprise du trop-plein du poste en diamètre supérieur et aménagement jusqu'à la ZDV ;
- La mise en place d'une plaque étanche au niveau du trop-plein pour éviter un retour d'eau du milieu naturel par la ZDV ;
- La rehausse du poste de refoulement pour permettre la surverse de l'eau par-dessus la plaque jusqu'à la ZDV ;
- L'ajout d'une plate-forme en inox et grille caillebotis dans le poste de refoulement pour y installer les deux futures pompes d'exhaure du bassin d'orage de 300 m³ ;
- L'adjonction d'un déflecteur devant les nouvelles pompes ;
- L'aménagement de la conduite de pompage et de vidange du nouveau bassin avec passage sous la route attenante ;
- Le déplacement des appareils de mesures du PR ;
- La modification de l'automatisme de la station de pompage.

Bien entendu, les opérations complémentaires à la réalisation du projet nécessiteront la remise en état du poste de refoulement existant durant la phase de travaux.

4.3.3. Conception et dimensionnement de l'ouvrage

La conception et le dimensionnement de la ZDV reprennent les éléments déjà détaillés dans les parties précédentes. L'ouvrage est présenté sur les Figure 4-5 suivantes dans sa globalité et dans les détails grâce au profil en long du système global.

La surface disponible ainsi que les fils d'eau indiquent un volume de stockage du filtre de 470 m³. La zone de rejet végétalisée suivant l'ouvrage permettra de disposer d'un volume complémentaire de 2080 m³. Les contraintes spatiales, techniques et les réseaux des concessionnaires situés à proximité limitent l'emprise de l'ouvrage et par conséquent le volume de stockage qui est déficitaire de 750 m³ par rapport au volume souhaité.

La dernière partie concernant l'aménagement de la ZRV en zone de prairie humide ne sera pas abordée dans le détail. Cependant, il est intéressant de donner quelques éléments sur l'intérêt de cette zone :

- Épure les eaux par les plantes, notamment sur les MES, les nitrates et le phosphore ;
- Permet de retrouver un aspect naturel ;
- Restructure les corridors écologiques ;
- Assure une recolonisation rapide du milieu par des espèces animales et végétales (il faudra un suivi pour ne pas avoir d'espèces invasives).

Dans le but de n'avoir aucun contact direct entre l'effluent rejeté et la nappe phréatique, la mise en place d'une couche imperméable d'argile de 30 à 40 cm sera disposée sur l'ensemble du marais pour optimiser le traitement jusqu'au rejet dans le Stadenrhein.

Enfin, du point de vue de l'entretien des futurs aménagements, le fonctionnement simplifié du pompage additionnel associé au nouvel ouvrage de stockage permet de minimiser les alarmes de télégestion et de simplifier les éventuelles interventions sur le site en cas de défaut. D'ailleurs, le bassin d'orage sera géré de manière autonome sans nécessiter d'entretien régulier de l'ouvrage puisque le principe de vidange sera identique à celui déjà en place qui est efficace selon l'exploitant.

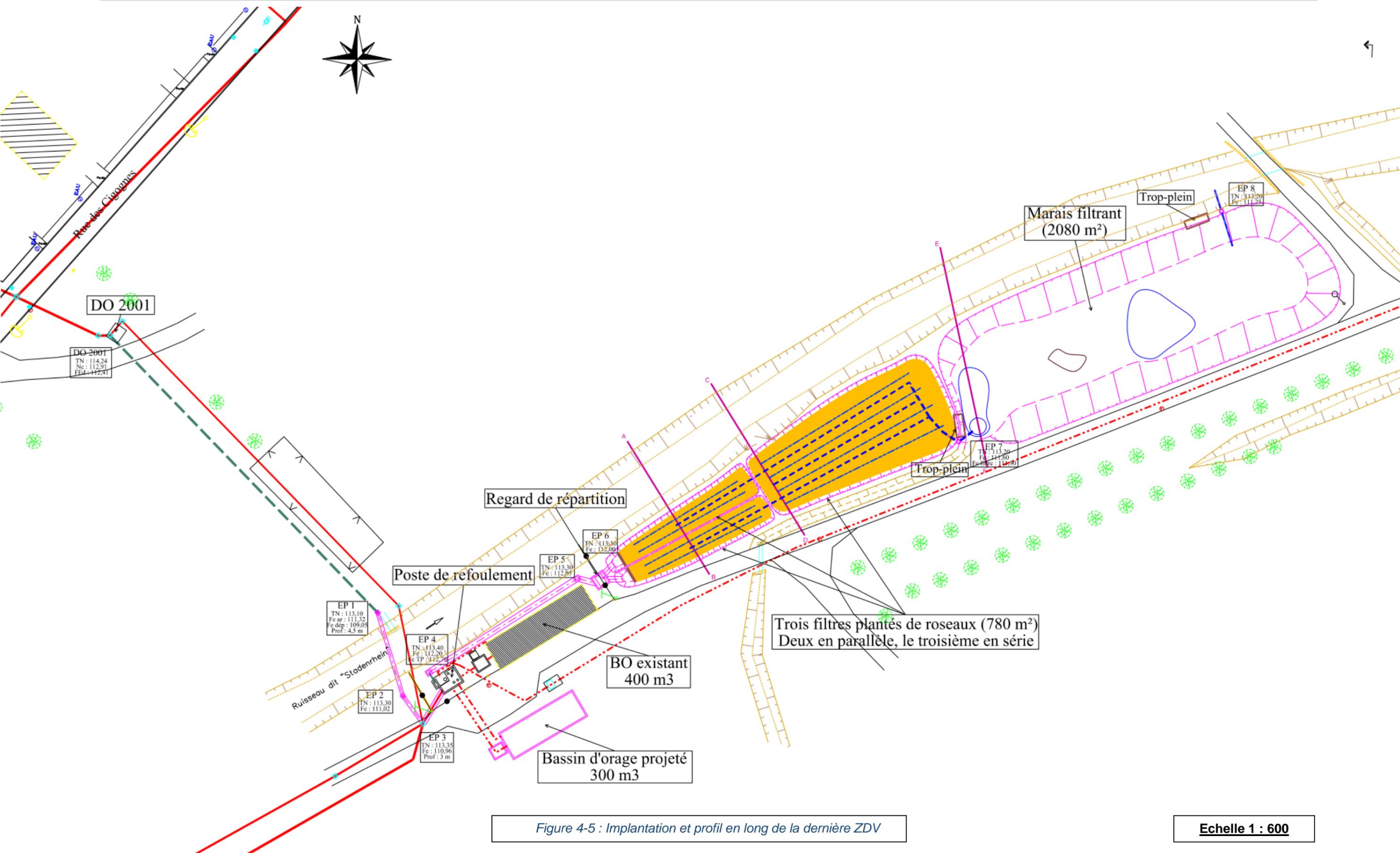
La zone de dissipation végétalisée et la zone humide associée ne nécessiteront pas d'entretien particulier. Un nettoyage régulier du dégrilleur ainsi qu'une tonte et taille annuelles des espèces indésirables devront être réalisés.

SYNTHÈSE – PISTES D'AMÉLIORATION ET CONCEPTION D'UN OUVRAGE

Les différentes observations et les réflexions menées sur le fonctionnement de l'ouvrage de traitement ont permis de définir des points d'amélioration concernant la conception générale en préconisant également une méthode et des critères de dimensionnement.

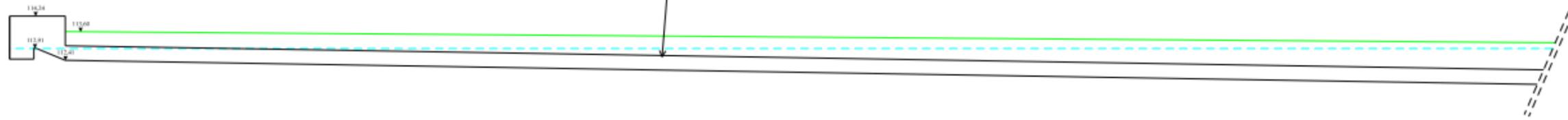
Des analyses complémentaires devront être réalisées pour uniformiser les éléments dimensionnels en adoptant une approche empirique par rapport aux quatre ouvrages construits sur la commune de Beinheim. Les quatre zones de dissipation végétalisées feront l'objet d'un retour d'expérience dans les années à venir et d'une vitrine des techniques alternatives pour le traitement des surverses de déversoir d'orage.

L'étude consistait à intégrer les recommandations techniques établies pour la réalisation du dernier ouvrage qui prend place dans un projet complexe. La première ébauche a été intégrée à cette étude afin de visualiser la finalité des travaux sur la commune pour réduire l'impact des rejets sur le Stadenrhein. Des suivis par campagne de mesures et de prélèvements permettront de confirmer l'efficacité épuratoire de ces ouvrages atypiques.



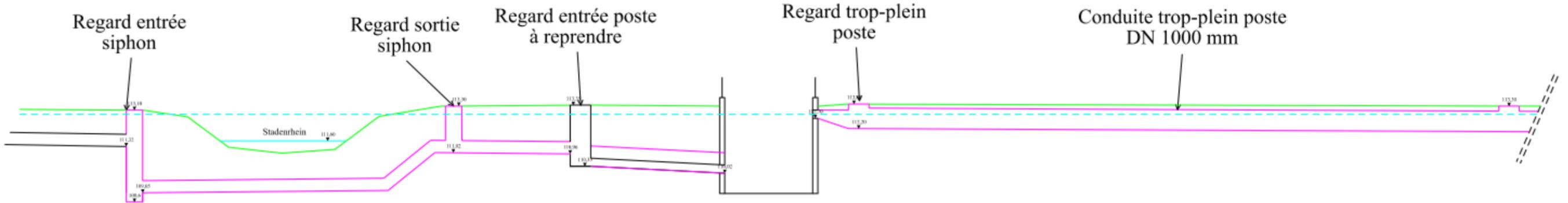
DO 2001

Conduite déversante
DN 600 mm



Siphon

Poste de refoulement

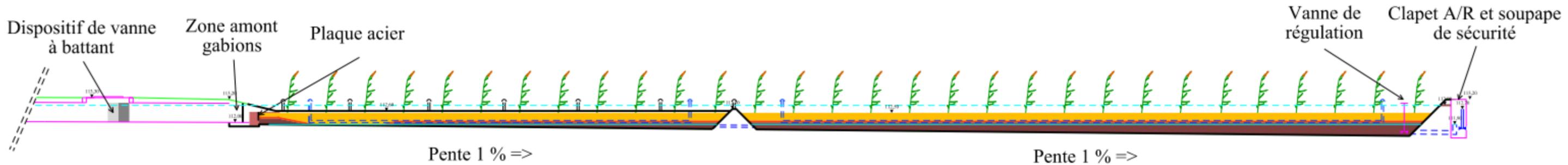


Deux filtres plantés de roseaux
en parallèle

Troisième filtre planté de roseaux
en série

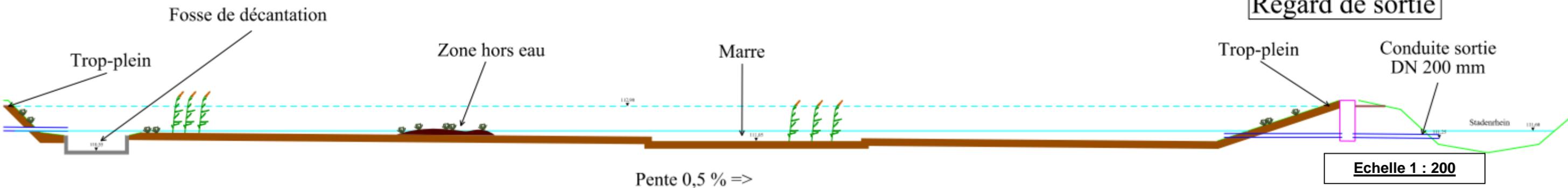
Regard de sortie

Regard de répartition

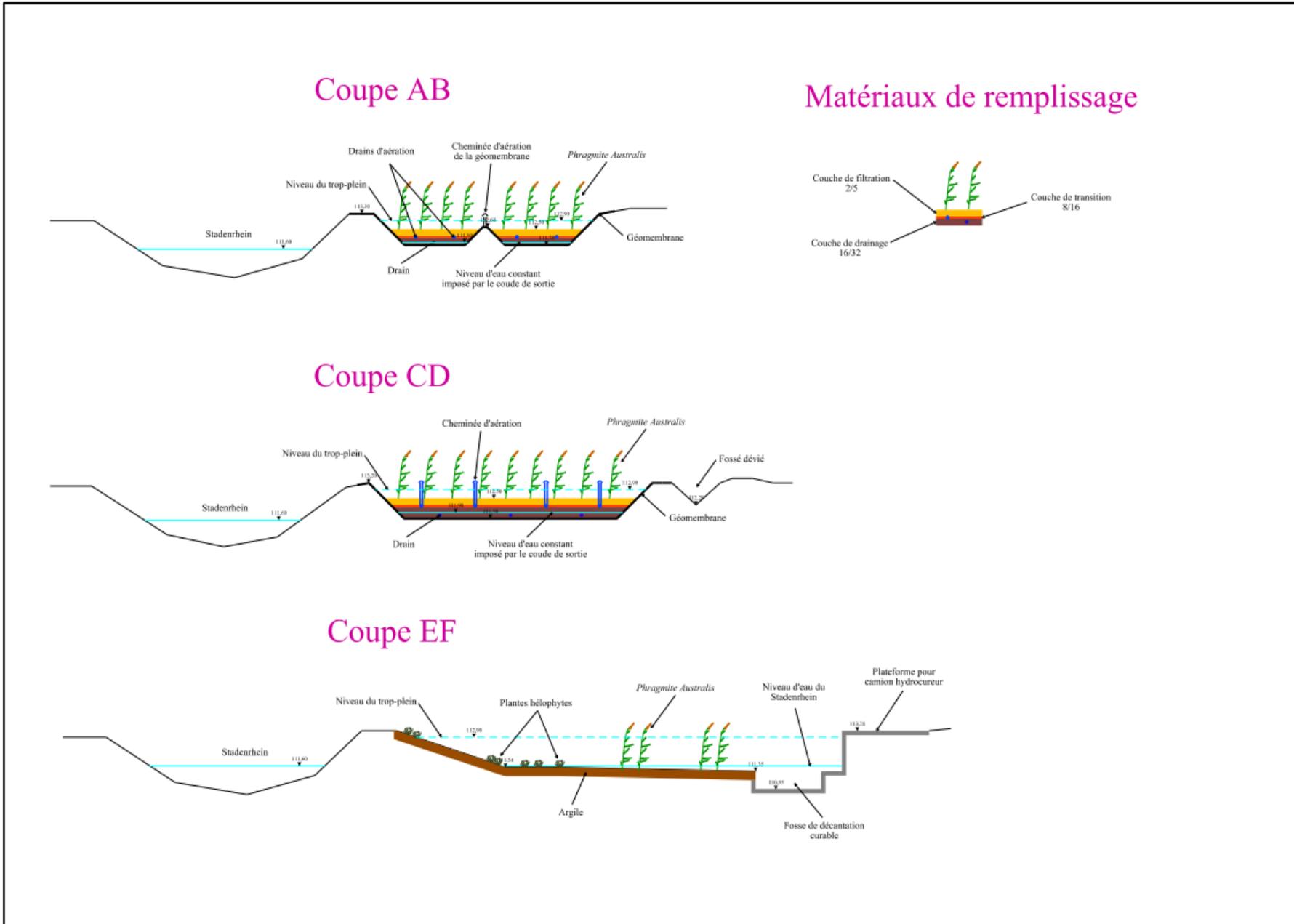


Marais filtrant

Regard de sortie



Echelle 1 : 200



CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de comprendre le fonctionnement hydraulique et épuratoire d'un ouvrage planté de roseaux mis en place pour le traitement des surverses de déversoir d'orage.

Une instrumentation spécifique a été réalisée pour permettre une compréhension fine des flux hydrauliques et de la qualité des différents paramètres physico-chimiques entre l'entrée et la sortie de l'ouvrage étudié. La méthodologie développée a permis l'établissement des flux entrants et sortants ainsi que l'obtention de prélèvements d'eau complémentaires indispensables à la compréhension des phénomènes épuratoires.

L'ouvrage est caractérisé par deux fonctionnements hydrauliques bien distincts en fonction du débit maximal d'alimentation. Pour des débits supérieurs à 600 m³/h, l'alimentation du filtre est à prédominance verticale. Dans le cas contraire, il est alimenté de manière horizontale et suit un régime de dégradation mixte entre horizontal et vertical. Ce dernier type de fonctionnement est le plus récurrent pour le système de traitement étudié.

D'un point de vue hydrodynamique, l'ouvrage réalise un lissage des débits entre l'exutoire du déversoir d'orage et celui de la filière de traitement. En effet, une limitation du débit de sortie est observée avec des valeurs toujours inférieures à 110 m³/h, alors que les débits déversés varient fortement entre 100 et 1100 m³/h.

Les performances épuratoires du filtre planté sont très intéressantes puisqu'elles respectent les valeurs réglementaires de l'arrêté du 21 juillet 2015 concernant les rejets des petites installations de traitement des eaux usées. Cette comparaison permet d'affirmer le rôle épuratoire de cet ouvrage de traitement et d'assurer une qualité de rejet.

Enfin, les observations visuelles et l'analyse des données ont permis de définir des points d'amélioration quant à la conception et au dimensionnement des futurs ouvrages de traitement. Les différentes améliorations préconisées ont été intégrées au projet de construction du dernier ouvrage végétalisé de la commune de Beinheim qui sera réalisé au cours de l'année 2017.

Dorénavant, les sujets de recherches sur les filtres plantés de roseaux pour le traitement des eaux de ruissellement urbain sont focalisés sur l'optimisation des matériaux de garnissage du filtre, le fonctionnement à long terme comme le colmatage et les modèles de simulation prédictifs.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AGENCE DE L'EAU RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE. (1999). **Épuration des eaux usées par des filtres plantés de macrophytes - Une étude bibliographique.** 78 p.

ARIAS LOPEZ J.L. (2013). **Vertical-flow constructed wetlands for the treatment of wastewater and stormwater from combined sewer systems.** Institut National des Sciences Appliquées de Lyon - Thèse de doctorat. 234 p.

BERTRAND-KRAJEWSKI J.L. (2006). **Les polluants des rejets urbains de temps de pluie : natures, concentrations physico-chimiques, solides en suspension, et répartition temporelle durant les événements pluvieux.** Unité de Recherche en Génie Civil - Hydrologie Urbaine, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Cours d'hydrologie Urbaine, Partie 7. 54 p.

BOUTIN C., ESSER D., MOLLE P., LIENARD A. (2000). **Les filtres et lits plantés de roseaux en traitement d'eaux usées domestiques. Perspectives pour le traitement d'eaux pluviales.** Les rendez-vous du GRAIE. Le traitement des eaux par macrophytes. Perspectives pour les eaux pluviales. p. 1-19.

CAMILLERI S. (2016). **Une solution verte pour traiter les rejets urbains par temps de pluie.** HYDROPLUS 232 - Janvier-Février 2016. p. 48-49.

CENTRE D'ÉTUDES SUR LES RÉSEAUX, LES TRANSPORTS, L'URBANISME ET LES CONSTRUCTIONS PUBLIQUES. (2003). **La ville et son assainissement : Principes, méthodes et outils pour une meilleure intégration dans le cycle de l'eau.** 514 p. ISBN 2-11-094083-2.

CHEBBO G. (1992). **Solides des rejets urbains de temps de pluie : caractérisation et traitabilité.** École Nationale des Ponts et Chaussées de Paris - Thèse de doctorat. 488 p.

CHOCAT B., CATHELAIN M., MARES A., MOUCHEL J.M. (1994). **La pollution due aux rejets urbains de temps de pluie : impacts sur les milieux récepteurs.** La Houille Blanche, N°1/2. p. 97-105.

CHOCAT B., BERTRAND-KRAJEWSKI J. L., BARRAUD S. (2007). **Eaux pluviales urbaines et rejets urbains par temps de pluie.** Techniques de l'ingénieur. Technologies de l'eau, 2 (W6800). 17 p.

CONSEIL DE L'UNION EUROPÉENNE. (1976). **Directive 76/464/CEE du Conseil, du 4 mai 1976, concernant la pollution causée par certaines substances dangereuses déversées dans le milieu aquatique de la Communauté.** Journal officiel n° L 129. p. 23 -29.

CONSEIL DE L'UNION EUROPÉENNE. (1991). **Directive 91/271/CEE du Conseil, du 21 mai 1991, relative au traitement des eaux urbaines résiduaires.** Journal officiel n° L 135. p. 40 -52.

DECHESNE M. (2002). **Connaissance et modélisation du fonctionnement des bassins d'infiltration d'eaux de ruissellement urbain pour l'évaluation des performances techniques et environnementales sur le long terme**. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon - Thèse de doctorat. 275 p.

DEGRÉMONT. (1989). **Mémento technique de l'eau**. Degrémont, Éditions Lavoisier. 1459 p. ISBN : 2-9503984-0-5.

DIRECTION DÉPARTEMENTALE DE L'AGRICULTURE ET DE LA FORÊT. (2008). **Gestion des eaux pluviales dans les projets d'aménagement - Conception des projets et constitution des dossiers d'autorisation et de déclaration au titre de la police de l'eau**. Guide technique - Volume 2. p. 55-113.

DITTMER U., MEYER D., LANGERGRABER G. (2005). **Simulation of a subsurface vertical flow constructed wetland for CSO treatment**. Water Science and Technology - Vol 51 N°9. p. 225-232.

ELLIS J.B. (1991). **Measures for the control and treatment of urban runoff quality**. Report n° DT/PL/FV/JB, commissioned by Agence de l'Eau Seine-Normandie. 132 p.

ELLIS J.B. (1999). **Design considerations for the use of vegetative controls for the treatment of highway discharges**. IAHS Publication n°259. p. 357-363.

ENGEES-ANJOU RECHERCHE. (2005). **Logiciel de calcul des déversoirs d'orage CalDO - Version 3.0 08/2005 - Notice d'utilisation**. 52 p.

ENGEES-ANJOU RECHERCHE. (2006). **Fiches techniques du guide technique sur le fonctionnement des déversoirs d'orage**. ENGEES-Anjou Recherche. 94 p.

FOURNEL J. (2012). **Systèmes extensifs de gestion et de traitement des eaux urbaines de temps de pluie**. Université de Montpellier 2 - Thèse de doctorat. 218 p.

GOETGHEBEUR P. (2009). **Fiche référence du SAGE ill-nappe-rhin - Préserver les cours d'eau phréatiques**. Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux ill-nappe-rhin. 2 p.

GROMAIRE-MERTZ M.C. (1998). **La pollution des eaux pluviales urbaines en réseau d'assainissement unitaire - Caractéristiques et origines**. École Nationale des Ponts et Chaussées de Paris - Thèse de doctorat. 506 p.

HYDREKA. (2016). **Capteur à ultrasons autonome SonicSens - Documentation**. 2 p.

HYDREKA. (2016). **Capteur de pression PDCR 1830 - Documentation**. 2 p.

HYDREKA. (2016). **Échantillonneur portable Isotherme AS950 - Documentation**. 3 p.

HYDREKA. (2016). **Pluviomètre - Documentation**. 2 p.

IWEMA A., RABY D., LESAVRE J., BOUTIN C., DODANE P.H., LIÉNARD A., MOLLE P., BECK C., SADOWSKI G.A., MERLIN G., DAP S., OHRESSER C., POULET J.B., REEB G., WERCKMANN M., ESSER D. (2005). **Épuration des eaux usées domestiques par filtres plantés de macrophytes - Recommandations techniques pour la conception et la réalisation**. Groupe Macrophytes et Traitement des Eaux. 44 p.

LAMI M., VIGNERON S., BRELOT E., BACOT L., CHAPGIER J., SIBEUD E., BARRAUD S., PIONCHON P., CLABAUT A., CAMBON A., RICARD B. (2006). **Pour la gestion des eaux pluviales - Stratégie et solutions techniques**. Conseil régional Rhône-Alpes. 32 p.

MEYER D., MOLLE P., ESSER D., TROESCH S., MASI F., DITTMER U. (2013). **Constructed wetlands for combined sewer overflow treatment - Comparison of German, French and Italian approaches**. Water, 5. p. 1-12.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER., AGENCES DE L'EAU. (2003). **Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau (SEQ-Eau)**. Version 2. 40 p.

MOLLE P., FOURNEL J., MEYER D., TROESCH S., CLEMENT F., BRELOT E., BACOT L., GUILLERMARD S., DE BRITO C., TOUSSAINT J.Y., VAREILLES S., AH LEUNG S., LIPEME KOUYI G., BICHET Q., CHOCAT B., ESSER D. (2013). **Guide technique - Systèmes extensifs pour la gestion et le traitement des eaux urbaines de temps de pluie**. Groupe de travail SEGTEUP. 43 p.

PARLEMENT EUROPÉEN, CONSEIL DE L'UNION EUROPÉENNE. (2000). **Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau**. Journal officiel n° L 327. p. 1 -73.

PAULUS A. (2011). **Le filtre planté de roseaux - Le versant vert de l'épuration des eaux usées**. Éditions du Rouergue. 235 p. ISBN 978-2-8126-0219-1.

PHILIPPE J.P., RANCHET J. (1987). **Pollution des eaux de ruissellement pluvial en zone urbaine. Synthèse des mesures sur dix bassins versants en région parisienne**. Rapport de recherche du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées n° 142. 76 p.

POUZOL T. (2010). **Stratégies d'échantillonnage - Optimisation des stratégies d'échantillonnage des eaux résiduaires industrielles et urbaines**. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse/Institut National des Sciences Appliquées de Lyon - Rapport de stage. p. 6-16.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE. (1964). **Loi n° 64-1245 du 16 décembre 1964 relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution**. Journal Officiel de la République Française du 18 décembre 1964. p. 11258-11265.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE. (1992). **Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau**. Journal Officiel de la République Française n°3 du 4 janvier 1992. p. 187-195.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE. (2006). **Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques**. Journal Officiel de la République Française n°0303 du 31 décembre 2006 - Texte n°3. p. 1-53.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE. (2015). **Arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif, à l'exception des installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5**. Journal Officiel de la République Française n°0190 du 19 août 2015 - Texte n°2. p. 14457.

SCHMITT N. (2014). **Caractérisation des systèmes hybrides pour le traitement des eaux pluviales - Mitigation des substances prioritaires et émergentes**. Université de Strasbourg - Thèse de doctorat. 367p.

SHUTES R.B.E., REVITT D.M., LAGERBERG I.M., BARRAUD V.C.E. (1999). **The design of vegetative constructed wetlands for the treatment of highway runoff**. Science of the Total Environment - Volume 235, n°1. p. 189-197.

SOFREL. (2013). **Sofrel LT-US - Mesure de débits pour réseaux d'eaux usées**. 2 p.

SYNDICAT DES EAUX ET DE L'ASSAINISSEMENT ALSACE-MOSELLE. (2015). **SDEA - Accueil SDEA** [en ligne]. SDEA, [consulté le 01/03/2016] <<http://www.sdea.fr/index.php/fr/>>.

SYSTÈME D'INFORMATION SUR L'EAU RHIN-MEUSE. (2016). **SIERM - Le portail des données sur l'eau du bassin Rhin-Meuse : Fiche de synthèse, masse d'eau** [en ligne]. Agence de l'Eau Rhin-Meuse, [consulté le 18/03/2016] <<http://rhin-meuse.eaufrance.fr/masseeau?lang=fr>>.

TOUSSAINT J.Y., VAREILLES S. (2013). **Les conditions de réception des systèmes extensifs de gestion des eaux urbaines : L'exemple des pilotes de Craponne et du prototype de Marçay-l'Etoile**. Grand Lyon. Cadre d'analyse et premières enquêtes (2009-2011). 38 p.

UHL M., DITTMER U. (2004). **Marais artificiels pour le traitement des surverses de déversoir d'orage - Point sur la pratique et la recherche en Allemagne**. Ingénieries-EAT, n° spécial. p. 41-48.

VAN DE MOORTELE A.M.K., ROUSSEAU D.P.L., TACK F.M.G., DE PAUW N. (2009). **A comparative study of surface and subsurface flow constructed wetlands for treatment of combined sewer overflows: A greenhouse experiment**. Ecological Engineering 35. p. 175-183.

VAZQUEZ J., ZUG M. (2010). **Modélisation des réseaux d'assainissement : Concept-Approches et Étapes : Cours 3^{ème} année de l'ENGEES**. ENGEES-Anjou Recherche. 75 p.

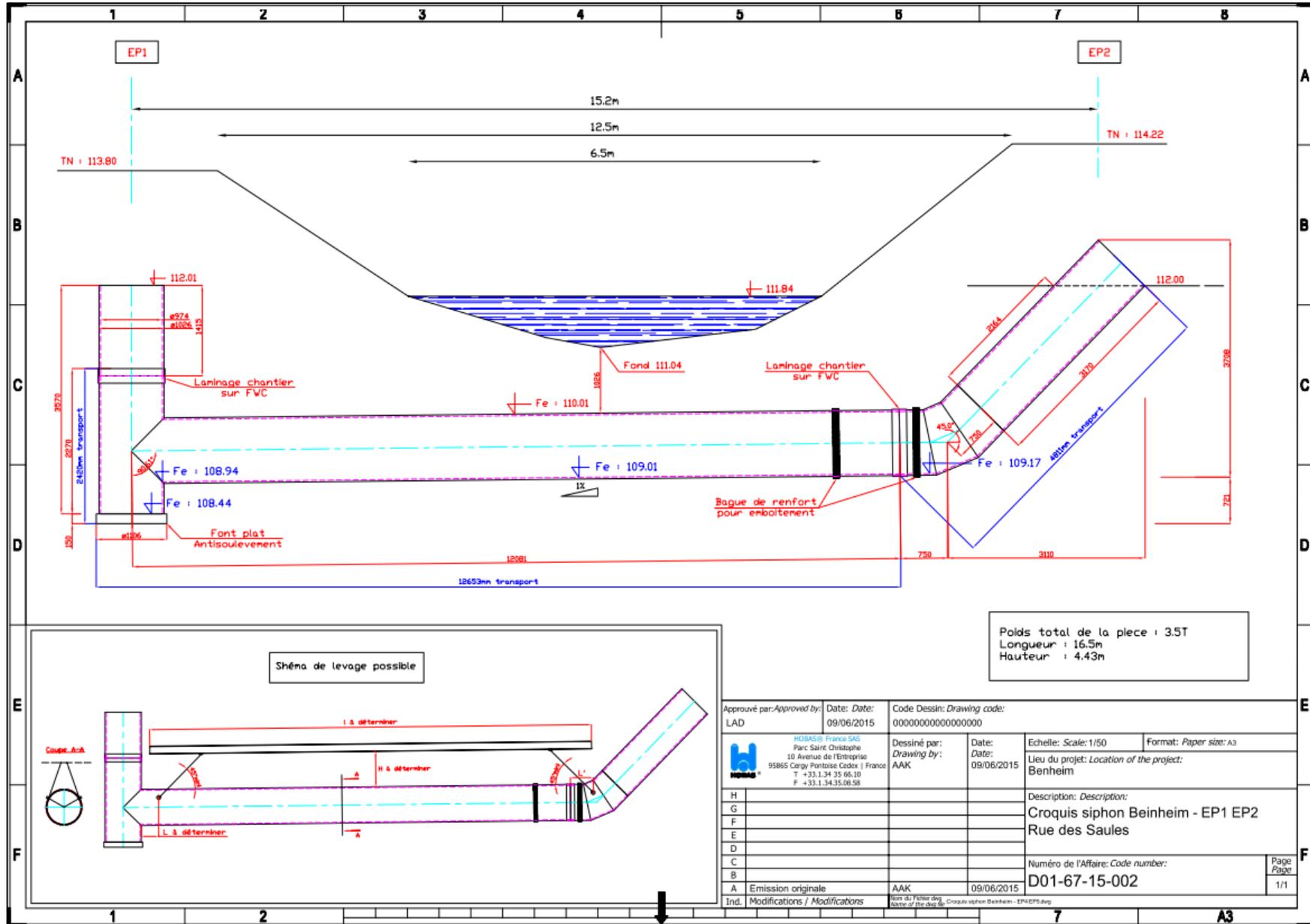
VYMAZAL J. (2007). **Removal of nutrients in various types of constructed wetlands**. Science of The Total Environment - Volume 380, Issues 1-3. p. 48-65.

WOLFF E. (1991). **Étude de l'impact des déversements d'eaux usées et d'eaux pluviales sur le milieu récepteur : analyse du phénomène et modélisation**. Laboratoire Méthodes - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 47 p.

ANNEXES

Annexe 1 : Plan du siphon reliant la conduite déversante du DO à l'ouvrage de traitement	82
Annexe 2 : Photographies des éléments de l'installation de traitement	83
Annexe 3 : Schéma de principe de la conception du lit (vue en coupe)	84
Annexe 4 : Différentes photographies des éléments de conception du système	85
Annexe 5 : Vue d'ensemble de l'instrumentation du site expérimental	86
Annexe 6 : Influence de la nappe phréatique sur la campagne de prélèvement	87
Annexe 7 : Méthodologie de déversement artificiel	88
Annexe 8 : Évaluation du fonctionnement du déversoir 8001 par calcul, lors des déversements artificiels	90
Annexe 9 : Calcul du débit à l'exutoire et reconstruction 3D	92
Annexe 10 : Ensemble des précipitations observées pendant la campagne	94
Annexe 11 : Illustrations des deux types de fonctionnement hydraulique	95
Annexe 12 : Impact des déversements sur le Stadenrhein : méthode déclassement Agence de l'Eau avec les classes de pluie	97

Annexe 1 : Plan du siphon reliant la conduite déversante du DO à l'ouvrage de traitement



Annexe 2 : Photographies des éléments de l'installation de traitement



Vue de l'emplacement du déversoir d'orage 8001, de la conduite déversante jusqu'à l'entrée du siphon (29/10/2015)

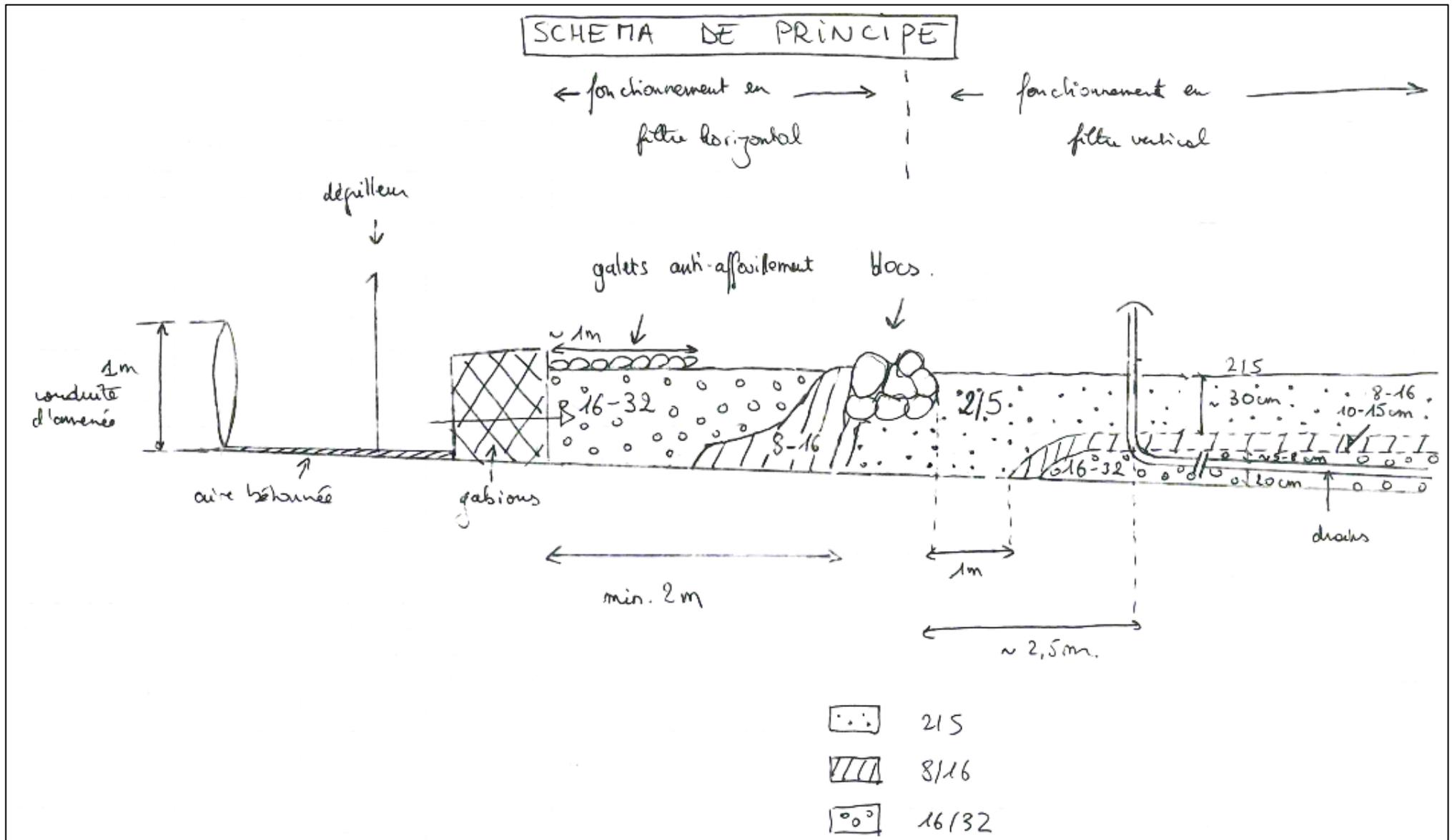


Vue de la conduite d'arrivée du siphon dans le regard de répartition, le départ vers le filtre est situé à droite ; système de maintien du niveau d'eau dans le filtre et tube permettant une mesure de niveau, situé dans le regard de sortie (29/10/2015)



Vue du filtre planté de roseaux dans son ensemble. On distingue le regard de répartition, le dégrilleur, le massif, le trop-plein et le regard de sortie (la vanne de régulation du débit de sortie a été installée a posteriori) (29/10/2015)

Annexe 3 : Schéma de principe de la conception du lit (vue en coupe)



Annexe 4 : Différentes photographies des éléments de conception du système



Géotextile anti-poinçonnement (en blanc) et géomembrane d'étanchéité (en noir)
(02/11/2015)



Évolution de la pousse des roseaux deux mois après leur plantation (10 mai au 20 juillet 2016)

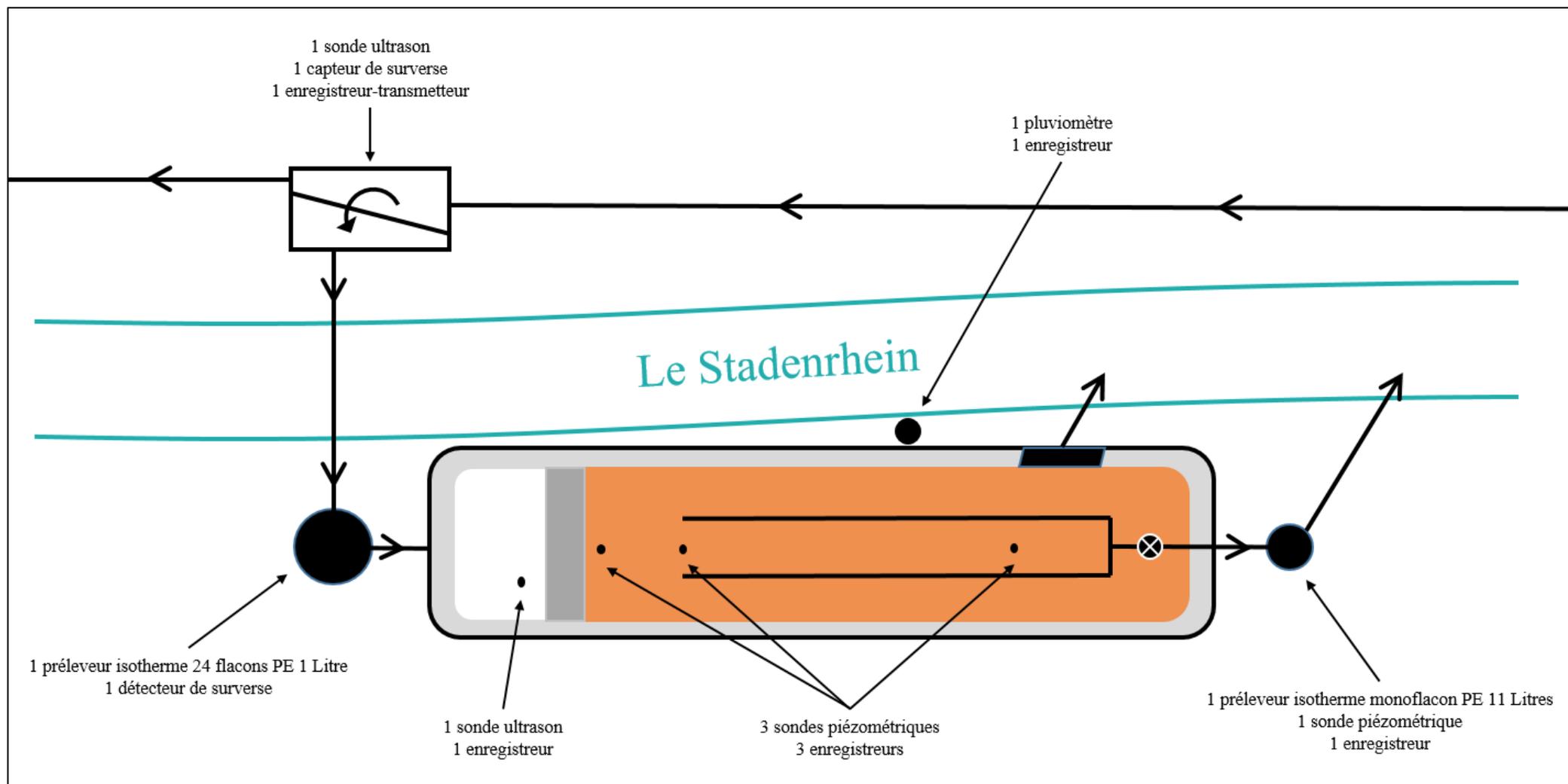


Photographie du trop-plein situé à l'extrémité de l'ouvrage (12/02/2016)



Photographies du drain et des cheminées d'aération en diamètre 150 mm (12/11/2015)

Annexe 5 : Vue d'ensemble de l'instrumentation du site expérimental [Inspiré de Schmitt, 2014]



Annexe 6 : Influence de la nappe phréatique sur la campagne de prélèvement



Niveau d'eau de la nappe au droit du détecteur de surverse d'entrée (03/06/2016)

Le capteur de surverse qui déclenche le préleveur d'entrée est activé par le niveau d'eau du milieu naturel qui remonte par la conduite de sortie du filtre.

Pour mémoire, le cours d'eau est de type phréatique, donc le niveau de la nappe correspond bien à celui du Stadenrhein.



Effet de vases communicants entre l'ouvrage et le milieu naturel (24/06/2016)

Sur cette deuxième photographie on aperçoit de l'eau, sur une hauteur de 20 cm environ, en amont des gabions, ce qui correspond au niveau du cours d'eau. La couleur trouble correspond au mélange entre l'eau déjà présente dans le filtre et un déversement naturel ayant eu lieu quelques jours plus tôt.

Dans cette situation, le filtre ne peut se vidanger tant que le niveau de la nappe phréatique n'est pas redescendu. De plus, aucun prélèvement d'eau n'est possible comme présenté à la figure précédente.

Annexe 7 : Méthodologie de déversement artificiel

Les déversements artificiels sont réalisés par la mise en place d'un obturateur dans la conduite de \varnothing 700 mm, située 2 regards en amont du déversoir d'orage 8001, afin de disposer d'un volume suffisant dans le réseau pour réaliser une chasse d'effluent permettant l'alimentation en eau de la ZDV.

Une discrétisation du réseau amont à l'obturateur permet de connaître approximativement le volume d'eau retenu dans le réseau en fonction d'une mesure de hauteur d'eau dans le regard en amont de celui où a été placé l'obturateur.



Par exemple, une mesure hauteur d'eau de 0,3 m indique un volume disponible d'environ 30 m³ et une hauteur de 0,4 m correspond à un volume de 60 m³.

L'estimation de ce volume permet de connaître approximativement le taux de remplissage du filtre. De plus, il est comparé au volume calculé par la reconstruction 3D afin de confirmer les résultats donnés par l'outil de calcul.

L'obturation du réseau unitaire est réalisée pendant 1 à 2 jours en fonction du volume de chasse souhaité. On s'efforcera de ne pas dépasser 0,5 m d'effluent au niveau du point de mesure au risque de mettre en charge une partie du réseau situé plus en amont.

Photographie : Suivi du volume d'eau retenu dans le réseau (04/08/2016)



Avant chaque déversement artificiel, un second obturateur est placé à l'aval de la conduite étranglée du déversoir d'orage. L'objectif de cet obturateur est d'optimiser le déversement vers l'ouvrage de traitement.

En effet, dans cette configuration, la majorité de l'eau stockée dans la conduite est déversée. Une partie de cette eau ne peut pas être évacuée puisqu'il faut une certaine hauteur d'eau dans le déversoir d'orage pour obtenir un déversement. Le volume nécessaire est estimé à 8 m³.

De plus, une loi de déversement, tirée de la littérature, permet d'estimer le débit déversé en fonction d'une mesure de hauteur d'eau déjà présente à l'intérieur du déversoir d'orage.

Photographie : Mise en place du second obturateur sur la conduite conservée du déversoir d'orage (04/08/2016)



L'obturateur principal est ensuite retiré pour réaliser un effet de chasse similaire à la réaction du réseau face à un événement pluvieux.

Afin d'obtenir un effluent proche de celui par temps de pluie, il est nécessaire de diluer l'effluent avec de l'eau claire.

L'eau claire pourra provenir :

- d'un poteau incendie, pour diluer les eaux usées ;
- d'eau météorique, en prenant soin de suivre scrupuleusement l'évolution des précipitations durant la phase de remplissage du réseau.

Photographie : Retrait de l'obturateur principal pour réaliser un effet de chasse d'eau avec l'effluent stocké (04/08/2016)



On remarque également une chute d'environ 50 cm dans le regard où se trouvait l'obturateur principal. Elle permet de passer d'une conduite 700 à 1000 mm. Le niveau d'eau est pratiquement au niveau du haut de la chute qui est imposé par la hauteur de crête du déversoir d'orage (46 cm).

Photographie : Apport d'eau claire en provenance d'un poteau incendie (04/08/2016)



Cette méthodologie de déversement artificiel permet entre autres d'observer le comportement du déversoir d'orage et d'appréhender le système dans sa globalité.

En effet, suite à ces déversements on remarque nettement le manque de dénivelé et la relation qui existe entre le niveau d'eau présent dans l'ouvrage et l'eau qui communique jusqu'au déversoir.

Photographie : Déversement artificiel du déversoir d'orage 8001 (04/08/2016)

Annexe 8 : Évaluation du fonctionnement du déversoir 8001 par calcul, lors des déversements artificiels

Lors des déversements artificiels, le déversoir d'orage a été considéré comme un déversoir frontal à seuil oblique.

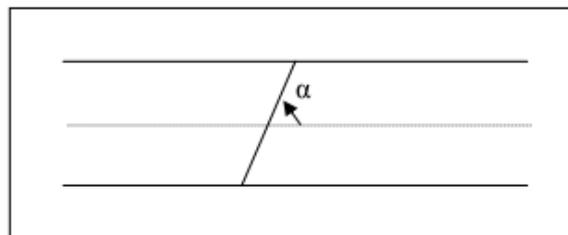
Le débit déversé est alors calculé à partir de la formule d'Aichel, correspondant au débit déversé pour un DO de mêmes caractéristiques mais frontal, affecté d'un coefficient de pondération.

La formule de Poleni, suivant le coefficient pondérateur m de Bazin, a été utilisée pour calculer le débit déversé pour un déversoir frontal de mêmes caractéristiques que le DO 8001.

Référence : ENGEES et Anjou Recherche, 2006

Déversoirs frontaux à seuil oblique, nappe libre

C'est un déversoir vertical dont la crête est disposée obliquement par rapport à l'axe longitudinal du canal dans lequel il est placé.



Vue en plan d'un déversoir oblique.

Abréviations :

h_0 : hauteur de la ligne d'eau en amont par rapport au seuil (m)	y : coefficient adimensionnel
h_s : hauteur du seuil par rapport au fond (m)	α : angle aigu de la crête du déversoir avec l'axe longitudinal du canal
Q : débit déversé d'un DO de mêmes caractéristiques mais disposé perpendiculairement à l'axe	

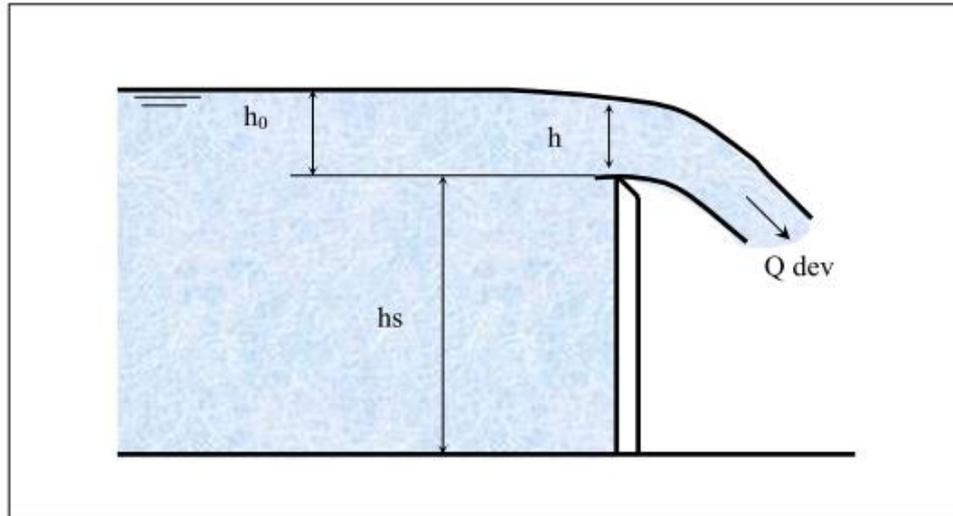
Aichel :

$$Q_{dev} = \left(1 - 250 \frac{h_0}{h_s} \frac{1}{y} \right) Q$$

y est donné par la formule : $y = 182,57 e^{0,044\alpha}$

L'angle α du déversoir 8001 est égal à 15° .

Déversoir frontal à seuil bas, seuil mince rectangulaire sans contraction latérale nappe libre



Vue en coupe du déversoir rectangulaire à seuil mince.

Abréviations :

g : accélération de la pesanteur (généralement, 9,81 m/s ²)	m : coefficient pondérateur du débit (m ³ /s)
Q _{dev} : débit déversé	V ₀ : vitesse à l'amont (m/s)
h ₀ : hauteur de la ligne d'eau en amont par rapport au seuil (m)	L : largeur du seuil (m)
	h : hauteur de la ligne d'eau par rapport au seuil (m)
	h _s : hauteur du seuil par rapport au fond (m)

Poleni :

$$Q_{dev} = mLh_0\sqrt{2gh_0}$$

Avec $V_0^2 \ll h$ (vitesse d'écoulement faible).

La vitesse d'écoulement est très faible aux abords de la crête déversante, dispensée par un régime fluvial en amont du DO.

Et m variant suivant différentes hypothèses :

- d'après BAZIN dans le cas d'un canal amont rectiligne de grande longueur, avec les limites suivantes :

$0,008\text{m} < h_0 < 0,70\text{m}$; $L > 4h_0$ et $0,2\text{m} < h_s < 2\text{m}$:

$$m = \left(0,405 + \frac{0,003}{h_0} \right) \left(1 + 0,55 \left(\frac{h_0}{h_0 + h_s} \right)^2 \right)$$

Les hypothèses de Bazin sont respectées sauf pour des hauteurs d'eau très faibles (<0,008 m).

Annexe 9 : Calcul du débit à l'exutoire et reconstruction 3D

Le débit de sortie est calculable par la mesure de hauteur d'eau en sortie de l'ouvrage de traitement grâce à la formule de Torricelli. Cette formule comporte un coefficient d'ajustement k qui a été établi par rapport à la variation de volume selon plusieurs résultats réels permettant d'ajuster le débit de sortie. La formule utilisée est la suivante :

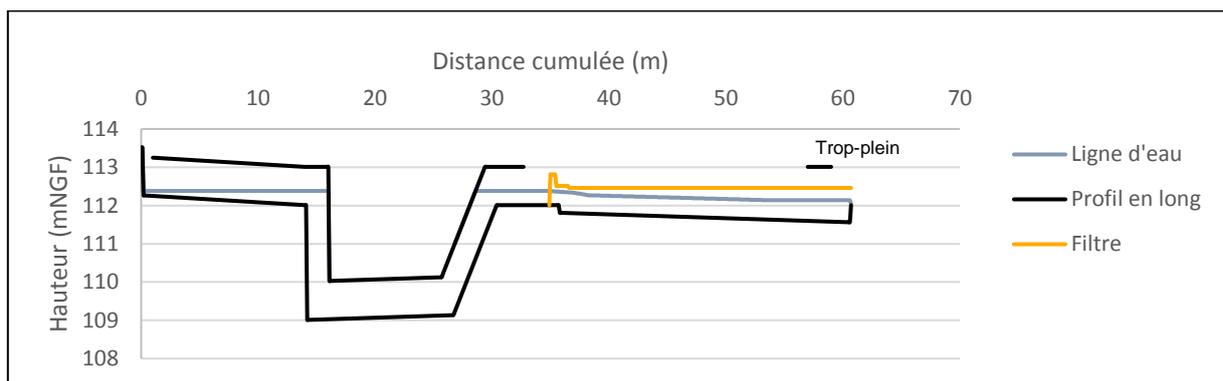
$$Q = S \times K \sqrt{2gh}$$

Avec S , la surface de l'orifice de sortie (en diamètre 150 mm) ;
 K , le coefficient d'ajustement de la vitesse d'écoulement (égal à 0,5) ;
 g , la constante gravitationnelle ;
 h , la hauteur d'eau mesurée dans le dispositif de sortie.

L'établissement des débits est lié à la reconstruction 3D du système de traitement sous Excel. Une macro permet de calculer le volume d'eau à l'intérieur de l'ouvrage en fonction du temps et de la surface.

Le volume de l'ouvrage a été discrétisé par tronçon de 10 cm et le calcul de la variation du volume est établi chaque minute en fonction des quatre mesures de hauteur d'eau (1 ultrason et 3 piézomètres).

Les Figures suivantes illustrent cette reconstruction 3D selon un profil en long du système et de la ligne d'eau ainsi que la fiche de calcul initial.

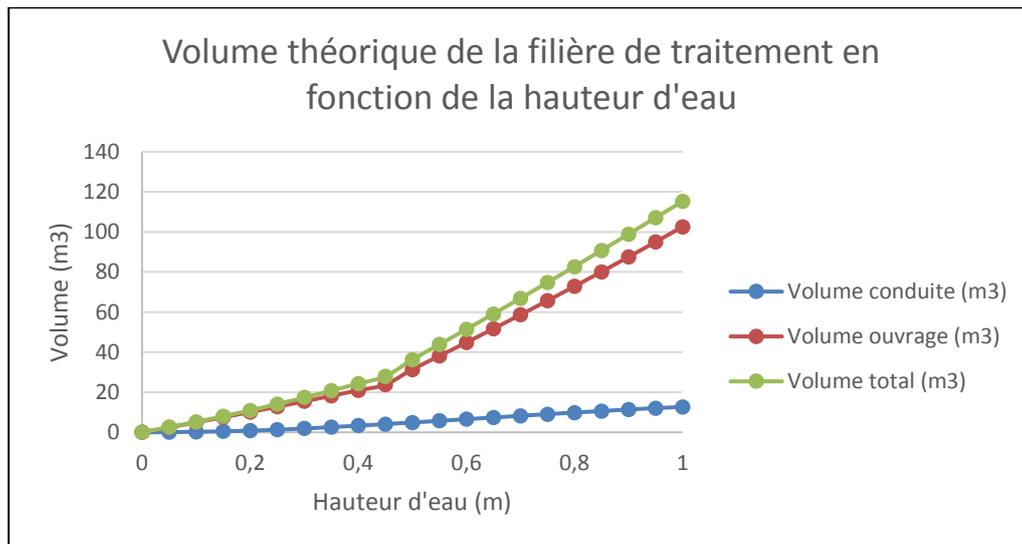


Évolution de la ligne d'eau au cours du déversement selon le profil en long

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Pour rappel		Début évènement (min)	8	Ne pas modifier				
2	x minutes avant déversement	10	Durée animation (min)	120	Ultrason	Entrée	Milieu	Sortie	Préleveur sortie
3					917	912,79	961,16	913,91	623,13
4									
5			Ne pas modifier			Ne pas modifier		Ne pas modifier	
6	Hauteur de la crête (mNGF)	Hauteur de crête (m)	Longueur conduite déversée (m)	Pente conduite déversée (%)	Profondeur siphon (m)	Longueur siphon (m)	Remonté siphon (m)		
7	113,515	1,25	14	1%	3	12,6	3		
8	Pente siphon (%)	H entre béton et fond filtre (m)	Pente fond filtre (%)	Diamètre conduite (m)	Porosité				
9	1%	0,2	1%	1	0,4				
10									
11					Volume conduite (m ³)	Volume ouvrage (m ³)	Volume total (m ³)		
12					11,6	91,5	103,1		
13									
14	x (m)	Profil en long	Filtre	Haut conduite	Ligne d'eau	H conduite (m)	Alpha	Surface (m ²)	Volume (m ³)
15	0	113,515			113,515	0	0	0	0
16	0,1	113,515			113,515	0	0	0	0
17	0,2	112,265			112,927	0,662		1,305	0,86391
18	0,3	112,2631522			112,927	0,663847826	1,904659844	0,553565309	0,055356531
19	0,4	112,2613043			112,927	0,665695652	1,908574151	0,555309915	0,055530992
20	0,5	112,2594565			112,927	0,667543478	1,912493848	0,557052123	0,055705212
21	0,6	112,2576087			112,927	0,669391304	1,916419015	0,558791901	0,055879191
22	0,7	112,2557609			112,927	0,67123913	1,920349739	0,560529221	0,056052922
23	0,8	112,253913			112,927	0,673086957	1,924286103	0,562264052	0,056226405
24	0,9	112,2520652			112,927	0,674934783	1,928228192	0,563996362	0,056399636
25	1	112,2502174		113,2502174	112,927	0,676782609	1,932176094	0,565726123	0,056572612
26	1,1	112,2483696		113,2483696	112,927	0,678630435	1,936129896	0,567453302	0,056745330
27	1,2	112,2465217		113,2465217	112,927	0,680478261	1,940089687	0,569177869	0,056917787

Illustration de la feuille de calcul de la reconstruction 3D de l'ouvrage de traitement

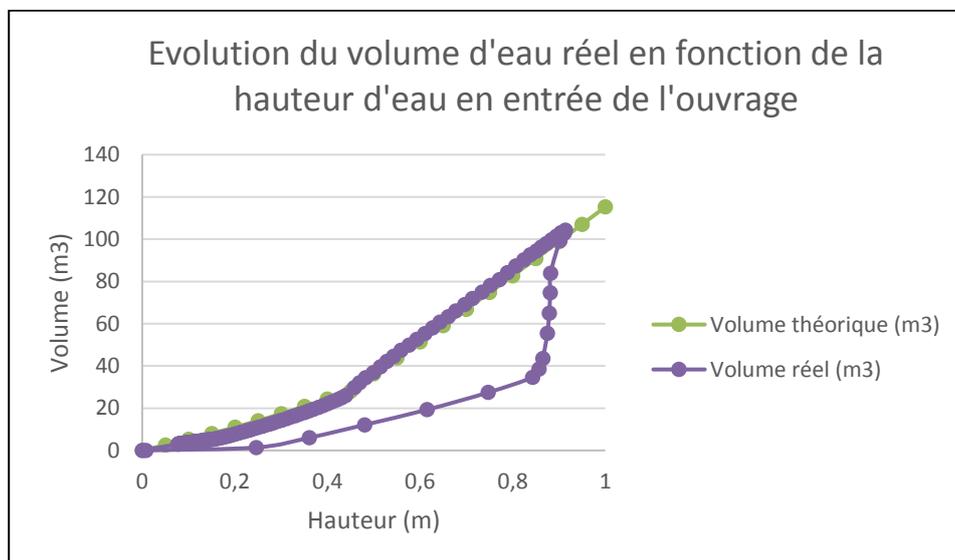
Ce fichier permet entre autres de déterminer les différents volumes du système en fonction de la hauteur d'eau :



Détermination de l'équation $V_{théorique} = f(h)$ pour la filière de traitement

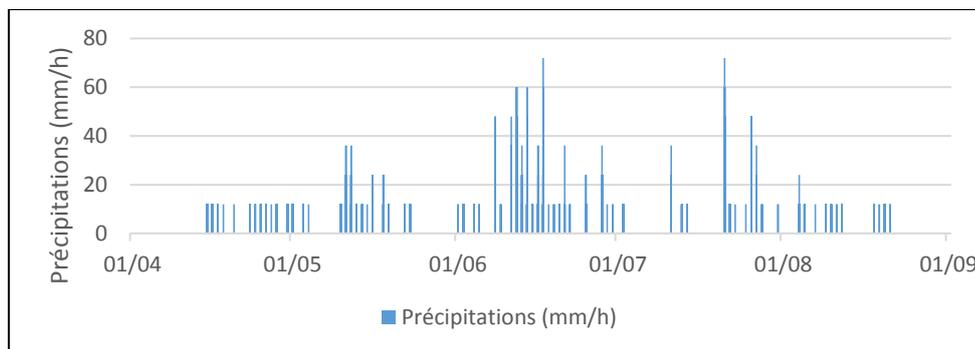
Sur cette Figure, la rupture de pente correspond au passage du matériau filtrant à l'air. Le filtre possède une porosité de 0,4, ce qui réduit le volume d'eau stockée. Lorsque l'eau passe au-dessus du massif, le volume croît alors de manière plus rapide.

Cette représentation est théorique puisqu'on considère un niveau d'eau constant tout au long du déversement. Or la ligne d'eau est très variable en début d'alimentation pour ensuite atteindre un niveau d'équilibre. La phase de vidange peut alors commencer. Dans ce cas on retrouve la courbe théorique établie précédemment (Figure suivante).



Comparaison entre l'évolution du volume d'eau réel et théorique en fonction de la hauteur d'eau en entrée de l'ouvrage

Annexe 10 : Ensemble des précipitations observées pendant la campagne



Intensités maximales des événements pluvieux mesurés

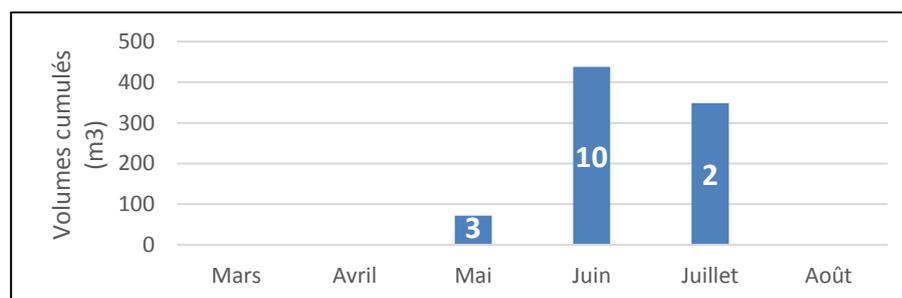
L'insuffisance de données sur les coefficients de Montana de la station météorologique de Stattmatten, située à 10 km du site d'étude, n'a pas permis d'établir les périodes de retour qui sont inférieures à 5 ans.

Pour avoir plus de détails quant à la classification des pluies, les coefficients de la station d'Entzheim ont été utilisés, même si ces données sont issues d'un site 6 fois plus éloigné (Tableau suivant).

	Durée (min)	Cumul (mm)	Période de retour
11 mai	54	5,8	1 à 2 mois
12 mai	36	5,2	1 à 2 mois
16 mai	39	4,2	0,5 à 1 mois
11 juin	31	10,4	0,5 à 1 an
12 juin	101	10,4	2 à 3 mois
13 juin	48	3,8	0,5 à 1 mois
13 juin	25	3,2	0,5 à 1 mois
14 juin	159	7,8	1 à 2 mois
16 juin	96	5	0,5 à 1 mois
17 juin	87	5,2	0,5 à 1 mois
17 juin	35	8	3 à 6 mois
17 juin	35	6	1 à 2 mois
17 juin	13	1,8	1 à 2 semaines
21 juillet	119	22,2	1 à 2 ans
26 juillet	79	15,8	0,5 à 1 an

Détails des événements pluvieux ayant entraîné un déversement

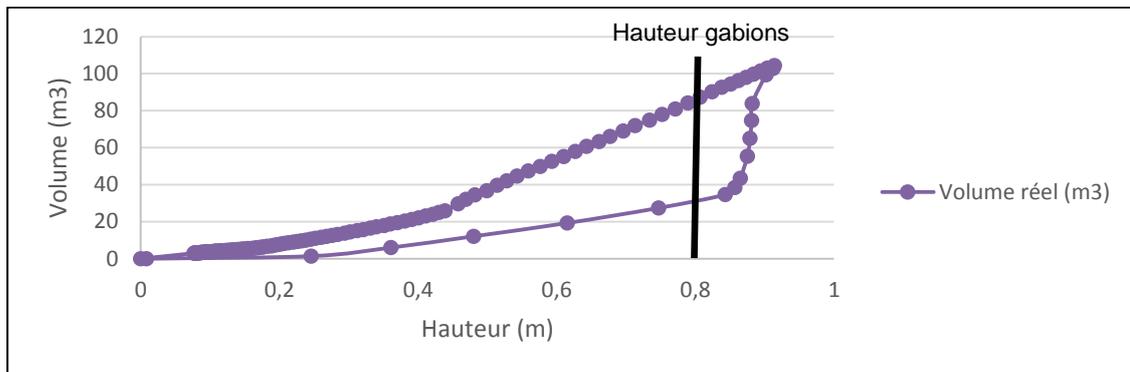
Les volumes cumulés déversés par le déversoir d'orage en période pluvieuse sont représentés à la Figure suivante. Les résultats confirment l'intensité pluvieuse du mois de juin où les volumes sont les plus conséquents.



Volumes cumulés mensuels déversés

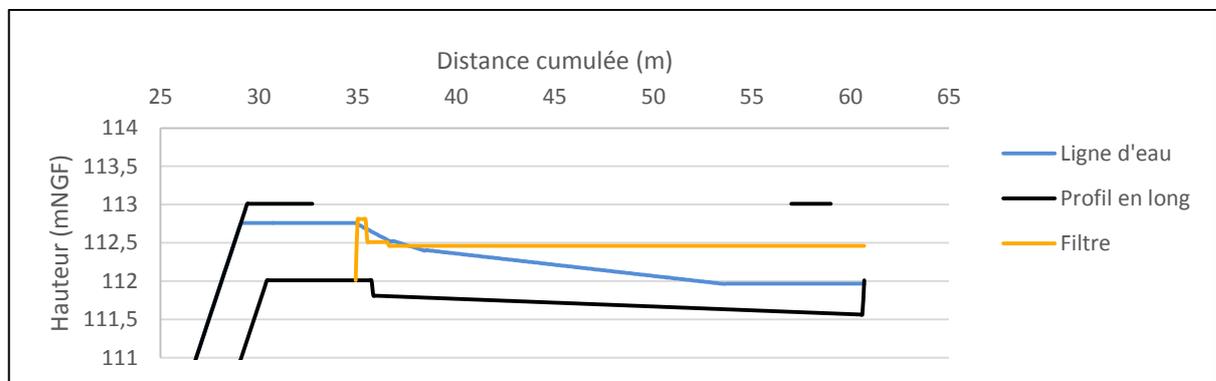
Annexe 11 : Illustrations des deux types de fonctionnement hydraulique

La Figure suivante montre l'évolution de la ligne d'eau en amont du filtre (mesure réalisée par la sonde ultrason). On observe une rapide montée de l'eau jusqu'à un niveau qui se stabilise autour de 0,9 mètre. L'alimentation est verticale avec un passage de l'eau par-dessus les gabions. La vidange du filtre est quant à elle beaucoup plus longue.

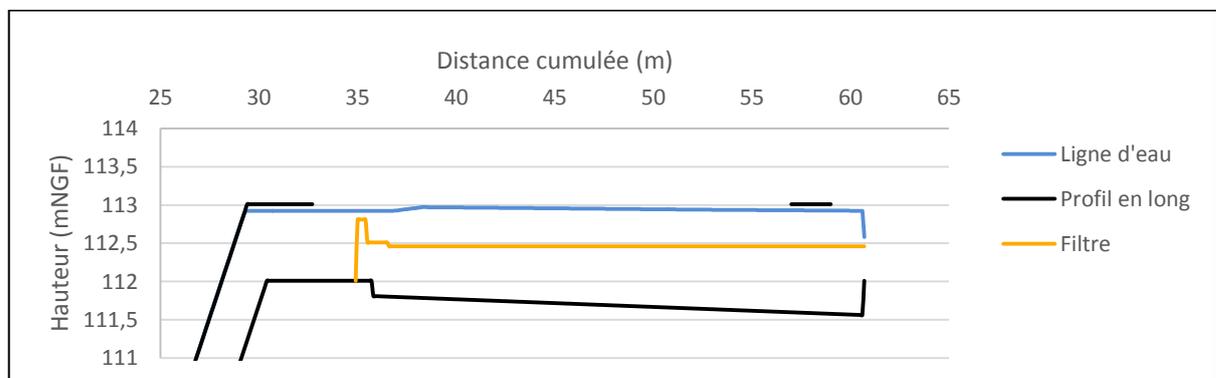


Évolution du volume d'eau réel en fonction de la hauteur d'eau en entrée de l'ouvrage
Déversement naturel du 26/07/2016

Le résultat de cette première courbe se traduit par une réponse hydraulique qui est illustrée par les deux Figures suivantes. La perte de charge et le débit important font rapidement monter le niveau d'eau dans la zone amont des gabions. S'en suit une alimentation de toute la surface du filtre.



Ligne d'eau au début du déversement naturel du 26/07/2016



Ligne d'eau au cours du déversement naturel du 26/07/2016

La répartition du flux en surface du filtre est seulement possible lorsque le volume déversé devient assez conséquent pour avoir un niveau d'eau en amont des gabions au moins supérieur à 50 cm, qui correspond à la hauteur du matériau filtrant, comme le montrent les figures suivantes. Néanmoins, ce fonctionnement n'est pas caractéristique d'une alimentation verticale prépondérante. La filtration est essentiellement horizontale.

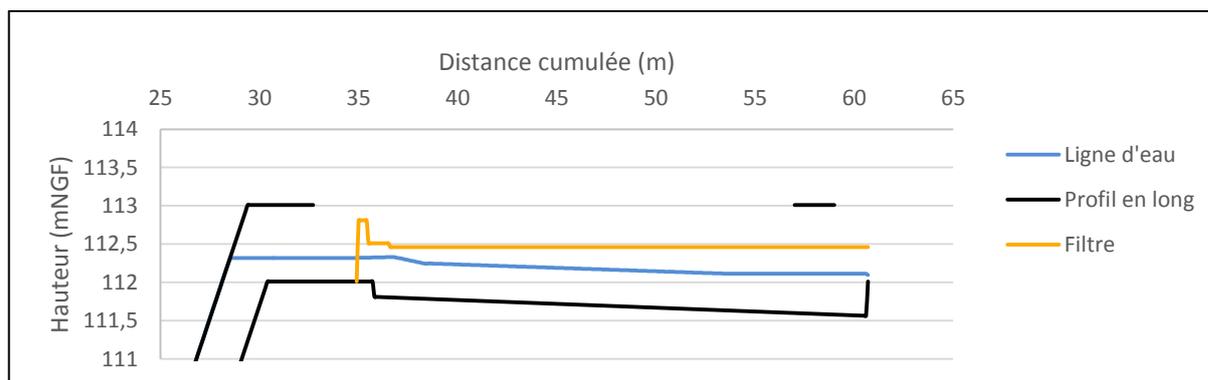


Alimentation horizontale avec présence d'un ruissellement surfacique (29/04/2016)



Inégale répartition en surface pour des alimentations horizontales avec présence de l'effluent 5 cm sous la surface du filtre (02/09/2016)

Sur cette dernière Figure, on distingue un niveau d'eau sous la surface du filtre. Une légère mise en charge en tête du filtre peut être observée visuellement.



Évolution de la ligne d'eau au cours du déversement selon le profil en long : déversement naturel du 12/05/2016

Annexe 12 : Impact des déversements sur le Stadenrhein : méthode déclassement Agence de l'Eau avec les classes de pluie

La méthode des classes de pluie s'appuie sur des pluies réelles enregistrées, regroupées en un nombre restreint de classes de pluie.

Lors des simulations, chaque classe est représentée par une pluie réelle, représentative de la classe, à laquelle est affectée une fréquence d'apparition d'après les relevés pluviométriques.

Ces pluies permettent d'estimer l'impact moyen annuel sur le milieu naturel.

Dans le cadre de la présente étude, il est pris comme base le calcul de classes de pluie effectué à la station Météo France de Stattmatten. Il est pris en compte l'analyse faite sur la période critique, à savoir de mai à octobre.

CLASSEMENT STATISTIQUE DES PLUIES											
Poste pluviographique	Période	Classe	Durée précipitations	Hauteur d'eau cumulée	Temps sec au sens large	Saut intensité maximale	Position du pic imax	Nombre d'évntmts	Nombre d'années	Fréquence	Période de retour
		unité	min	mm	mn	mm/h	de 0 à 1	unité	unité	nb/an	
STATTMATTEN	CRITIQUE	1	630	7,6	15708	0,3	0,7	59	9	6,6	2 mois
		2	378	26,2	1266	15,8	0,2	27	9	3,0	4 mois
		3	1440	1,0	456	0,0	0,5	9	9	1,0	1 an
		4	72	41,4	954	75,5	0,3	3	9	0,3	3 ans
		5	204	18,4	4476	22,6	0,1	63	9	7,0	2 mois
		6	78	3,8	558	0,0	0,5	660	9	73,3	1 sem

Représentation des classes de pluies

Classe de qualité	DCO (mg/L)	DBO ₅ (mg O ₂ /L)	N-NH ₄ (mg/L)
VERTE : Bonne	< 30	< 6	< 0,5
JAUNE : Passable	30 ≤ x < 40	6 ≤ x < 10	0,5 ≤ x < 2
ORANGE : Mauvaise	40 ≤ x < 80	10 ≤ x < 25	2 ≤ x < 5
ROUGE : Très mauvaise	≥ 80	≥ 25	≥ 5

Limites des états du milieu naturel

Identification du point	Surface du BV en km ²	Données 2000 Agence de l'Eau Rhin Meuse					
		Débits mensuels d'étiage (m ³ /s)			Rapport débit/surface		
		F1/2	F1/5	F1/10	F1/2	F1/5	F1/10
Le Stadenrhein au confluent avec la Sauer	6,7	0,091	0,067	0,057	0,0136	0,0100	0,0085

Estimations des débits mensuels d'étiage du Stadenrhein

Les valeurs prises en compte pour la présente étude sont :

- $Q_{MNA1/2} = 0,091 \text{ m}^3/\text{s}$;
- $Q_{MNA1/5} = 0,067 \text{ m}^3/\text{s}$.

Concernant la qualité du cours d'eau, pour l'ensemble du périmètre étudié, les paramètres pris en compte sont la DCO, la DBO et le NH₄ avec les valeurs ci-dessous : (données AERM) :

DCO (mg/l)	DBO (mg/l)	NH ₄ (mg/l)
17	3	0,33

Concentration des paramètres dans milieu naturel

Les impacts sur le milieu sont estimés sur la base d'une dilution des effluents déversés dans le cours d'eau et sur la base d'une durée d'effet correspondant au temps de déversement auquel est ajoutée une durée d'effet. En l'absence de données de vitesse sur le cours d'eau, il est pris comme hypothèse une durée d'effet de 10h.

L'effluent considéré comme déversé est la moyenne des concentrations observées durant la campagne de prélèvement. Les rendements moyens sont affectés aux paramètres d'entrée pour calculer la concentration de l'effluent après traitement.

Les conditions à respecter sont les suivantes, en conformité avec les préconisations AERM/DREAL :

- respecter la qualité d'objectif pendant au moins 90% de la durée de la période considérée (déclassement inférieur à 10% du temps),
- déclassement de plus d'un rang de qualité ne doit pas se produire pendant plus de 5% du temps au cours de la période considérée,
- le déclassement en classe « rouge » ne doit pas être observé.

	VERTE	JAUNE	ORANGE	ROUGE
Objectifs	> 90%	< 10%		
	> 95%		< 5%	
	100%			0%

Objectifs et fréquences de déclassement

Les résultats des calculs pour la situation sans l'ouvrage de traitement sont détaillés dans les deux Tableaux suivants :

Classe de pluie		1			2			3		
Volume déversé	m3	0			50			0		
Pollution rejetée		DCO	DBO ₅	NH ₄	DCO	DBO ₅	NH ₄	DCO	DBO ₅	NH ₄
	kg	0	0,0	0,0	7	2,9	0,5	0	0,0	0,0
Concentration aval	mg/l	0	0,0	0,0	48	16,3	2,7	0	0,0	0,0
Part du temps d'impact sur le temps de période critique	%	0,0%			0,7%			0,0%		
Classe de qualité du cours d'eau aval		VERTE	VERTE	VERTE	ORANGE	ORANGE	ORANGE	VERTE	VERTE	VERTE

Classe de pluie		4			5			6		
Volume déversé	m3	567			73			0		
Pollution rejetée		DCO	DBO ₅	NH ₄	DCO	DBO ₅	NH ₄	DCO	DBO ₅	NH ₄
	kg	82	32,9	5,7	11	4,2	0,7	0	0,0	0,0
Concentration aval	mg/l	106	41,2	7,1	57	20,0	3,3	0	0,0	0,0
Part du temps d'impact sur le temps de période critique	%	0,1%			1,7%			0,0%		
Classe de qualité du cours d'eau aval		ROUGE	ROUGE	ROUGE	ORANGE	ORANGE	ORANGE	VERTE	VERTE	VERTE

Les résultats des calculs pour la situation sans l'ouvrage de traitement sont détaillés dans les deux Tableaux suivants :

Classe de pluie		1			2			3		
Volume déversé	m3	0			50			0		
Pollution rejetée		DCO	DBO ₅	NH ₄	DCO	DBO ₅	NH ₄	DCO	DBO ₅	NH ₄
	kg	0	0,0	0,0	3	1,4	0,4	0	0,0	0,0
Concentration aval	mg/l	0	0,0	0,0	28	8,8	2,0	0	0,0	0,0
Part du temps d'impact sur le temps de période critique	%	0,0%			0,7%			0,0%		
Classe de qualité du cours d'eau aval		VERTE	VERTE	VERTE	VERTE	JAUNE	JAUNE	VERTE	VERTE	VERTE

Classe de pluie		4			5			6		
Volume déversé	m3	567			73			0		
Pollution rejetée		DCO	DBO ₅	NH ₄	DCO	DBO ₅	NH ₄	DCO	DBO ₅	NH ₄
	kg	61	25,2	5,0	4	2,0	0,5	0	0,0	0,0
Concentration aval	mg/l	80	31,8	6,2	31	10,5	2,5	0	0,0	0,0
Part du temps d'impact sur le temps de période critique	%	0,1%			1,7%			0,0%		
Classe de qualité du cours d'eau aval		ROUGE	ROUGE	ROUGE	JAUNE	ORANGE	ORANGE	VERTE	VERTE	VERTE

Les résultats de l'analyse d'impact présentent un déclassement de 3 classes (passage de la classe verte à rouge) pendant 0,1 % du temps pour la classe de pluie n°4, ce qui est supérieur au 0 % toléré.

Cette situation n'est pas améliorée avec l'ouvrage de traitement mais ce résultat a été pris en compte par l'Agence de l'Eau et les autres partenaires lors de l'étude de création des ZDV.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Diplôme : Diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES

Spécialité : Exploitation et travaux

Auteur : Thibaut LEFEVRE

Année : 2016

Titre :

Efficacité des marais artificiels pour le traitement des surverses de déversoir d'orage
Étude d'un site pilote

Nombre de pages Texte : 81 pages Annexes : 18 pages

Nombre de références bibliographiques : 49

Structure d'accueil : Syndicat des Eaux et de l'Assainissement Alsace-Moselle, Schiltigheim, Bas-Rhin

Maître de stage : Monsieur Marc THIERIOT, Directeur des Études

Résumé :

Les filtres plantés de roseaux sont de plus en plus utilisés dans le traitement des eaux de ruissellement urbain. L'étude réalisée met en avant le traitement des surverses d'un déversoir d'orage par un filtre planté de macrophytes dans des conditions topographiques désavantageuses. L'absence de dénivelé concilié à une nappe phréatique affleurante a conduit à la création d'un ouvrage atypique qui fonctionne selon deux flux : horizontal et vertical. Les analyses réalisées sur ce site pilote mettent en avant la capacité épuratoire de la filière. Des points d'amélioration ont été définis afin de créer un dernier ouvrage similaire sur la commune.

Mots-clés : Eaux pluviales, rejets urbains de temps de pluie, filtre planté de roseaux, marais artificiel, déversoir d'orage, instrumentation, performances épuratoires, impact milieu.