

Mesures d'efficacité des zones de rejet végétalisées : méthodes et résultats

■ E. BLIN¹, J. SCHUEHMACHER¹, E. PAOLETTI¹, J. JORDI¹

Mots-clés : zone de rejet végétalisée, zone humide artificielle, méthodes, macropolluants, micropolluants, biodiversité, Zone Libellule

Keywords: constructed wetland at the outlet of WWTP, methods, macropollutants, micropollutants, biodiversity, Zone Libellule

Introduction

Caractériser l'efficacité du rôle épuratoire ou de l'évolution de la biodiversité d'un écosystème humide n'est pas chose aisée. Le nombre de paramètres à prendre en compte et le nombre de mesures à accumuler peuvent rapidement devenir problématiques, d'autant plus dans le cas où des variabilités temporelles et spatiales doivent être intégrées. Le juste coût des mesures, associé à la robustesse des méthodes utilisées, est également primordial à prendre en considération pour obtenir des résultats à la hauteur des efforts fournis.

Ces préoccupations ont été au cœur du suivi effectué sur une zone humide artificielle installée sur le rejet de la station d'épuration du Syndicat intercommunal à vocation multiple (Sivom) de la Palus regroupant les communes de Saint-Just et de Saint-Nazaire-de-Pézan (France, 34). Un suivi scientifique a été engagé dès sa mise en service, en 2009. Le présent article expose le contexte, le site et les objectifs de l'étude ainsi que les méthodes et les principaux résultats obtenus.

1. Contexte et organisation de l'étude

La recherche et la lutte contre la présence des substances émergentes (médicaments, solvants, résidus cosmétiques, pesticides...) et de leurs dérivés de dégradation dans l'eau représentent de véritables enjeux, comme en témoigne l'évolution réglementaire de ces dernières années – directive 2000/60/CE, circulaires relatives à l'action nationale de recherche

et de réduction des rejets de substances dangereuses dans les eaux (RSDE II 2009), circulaire sur les substances dangereuses dans les stations de traitement des eaux usées (STEU) 2010, 2^e plan national santé-environnement (PNSE2 2009-2013). Bien que ces molécules se retrouvent dans l'eau à de très faibles concentrations, souvent proches des limites de détection des appareils de mesure [FEITOSA-FELIZZOLA, 2009], elles peuvent perturber les éléments de la chaîne trophique par accumulation ou par synergie [CLEUVERS, 2004]. Depuis une vingtaine d'années, les scientifiques s'intéressent de près aux capacités de remédiation des milieux naturels (autoépuration) ainsi qu'aux phytotechnologies [ZHI et JI, 2012]. Grâce à leur diversité naturelle importante (biofilms, diatomées, planctons, microphytes, macrophytes, faune...), les zones humides apportent une complémentarité aux systèmes épuratoires classiques en matière de processus biologiques et biochimiques [KADLEC *et al.*, 2012].

Les atouts reconnus des zones humides naturelles ont fait naître depuis les années 2000 le concept de zone de rejet végétalisée (ZRV). Aménagées en aval des rejets de station d'épuration, les ZRV jouent le rôle d'espace de transition entre l'eau usée traitée et le point de rejet dans le milieu récepteur. Elles peuvent être une alternative à la canalisation de rejet direct. Ces installations sont créées artificiellement sur une surface variable de quelques centaines de mètres carrés à plusieurs hectares. Elles sont végétalisées avec des plantes de types hydrophyte et héliophyte. Plusieurs typologies de ZRV sont observées : prairie humide, bassin, lagune, taillis à courte rotation, fossé ou encore noue végétalisée. En 2010, près de trois

¹ Lyonnaise des Eaux – direction ingénierie environnementale – 12, route de Bessan – 34340 Marseillan.



Figure 1. Représentation schématique de la zone de rejet végétalisée « Zone Libellule »

cents zones de rejets végétalisées ont été recensées en France [BOUTIN *et al.*, 2010].

Sur la commune de Saint-Just, un pilote de zone humide artificielle nommée Zone Libellule (ZL)² a été mis en eau, sur 1,5 ha, avec pour objectif de compléter le traitement des eaux usées assuré par la station d'épuration d'une capacité nominale de 5 000 équivalent-habitant (EH). La particularité du concept réside surtout dans la fragmentation des écosystèmes en plusieurs systèmes complémentaires traversés par les eaux usées traitées (figure 1). Cette complexification induit en conséquence une multitude de facteurs à prendre en compte pour mesurer une efficacité sur la qualité de l'eau et sur la biodiversité. L'étude scientifique, cofinancée par l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse, le conseil général de l'Hérault et Lyonnaise des Eaux a été menée sur 3 ans. L'étude avait pour objectifs d'évaluer la capacité de traitement complémentaire, notamment en matière de réduction des micropolluants ainsi que d'apprécier l'intérêt environnemental sur le patrimoine naturel local. En plus des partenaires financiers précédemment cités, des partenaires scientifiques comme Biotope, HydroSciences de Montpellier (UMR CNRS 5569), le Cirsee de Suez Environnement et le Laboratoire de physico et toxico-chimie LPTC (UMR CNRS 5255) de l'université de Bordeaux 1 ont participé activement au suivi scientifique. Un comité de pilotage et un conseil scientifique ont accompagné l'étude sur toute sa durée, ce qui a permis de valider ou d'adapter les procédures à mettre en œuvre. Plus

² Pour Zone de « Liberté biologique et de lutte contre les polluants émergents ».

de 30 protocoles expérimentaux ont été spécialement développés ou adaptés pour le suivi de cette zone humide artificielle allant du suivi photographique à la détermination du temps de séjour hydraulique par traçage par terre rare, en passant par le suivi du développement de la végétation, la mesure des pertes de charges hydrauliques ou encore l'inventaire des orthoptères et des odonates.

2. Les mesures

L'étude a demandé l'installation d'appareils de mesures en continu sur le site, l'adaptation de préleveurs automatiques déjà présents en sortie de station d'épuration pour la réalisation des prélèvements de micropolluants et l'analyse de nombreux paramètres ou indicateurs comme décrits dans le *tableau I*.

Une des difficultés consiste pour chacun des paramètres à déterminer une fréquence de mesure adéquate pour obtenir une bonne représentativité du résultat. Pour cela, un compromis a dû être trouvé entre la faisabilité technique des mesures, les coûts et leur pertinence à répondre aux objectifs du suivi. Ainsi, la physico-chimie de l'eau, les paramètres météorologiques ainsi que les mesures de débits ont été mesurés en continu avec un pas de temps de 6 minutes. Les macropolluants et la bactériologie ont été acquis de manière ponctuelle et hebdomadaire. Le traçage hydraulique et le suivi des micropolluants ont été réalisés par des campagnes ponctuelles. Le suivi de la biodiversité a varié en fonction des saisons et de la période la plus propice au recensement des groupes ciblés. Le jeu de données final contient alors une multitude de données hétérogènes dont plusieurs variables quantitatives et qualitatives, fluctuant en fonction de paramètres connus ou inconnus.

L'acquisition à des pas de temps très différents des paramètres entraîne des difficultés dans le traitement des données. Pour une même date et pour une variable donnée, il peut correspondre des valeurs non connues pour un ou plusieurs paramètres. Une utilisation attentive des données et l'emploi de méthodes de projection de donnée sur une période élargie pour certains paramètres sont nécessaires. Par exemple, pour corréler la variation des espèces d'odonates et la qualité physico-chimique des eaux dans un compartiment, ou encore tenir compte des temps de séjour hydraulique et des évolutions végétales,

| Catégorie de suivi | Type de paramètres | Méthode | Nombre de paramètres | Nombre de points de mesure | Fréquence d'acquisition | Nombre de données acquises sur les 3 ans d'étude |
|--------------------|---|--|----------------------|----------------------------|-------------------------|--|
| Météorologie | Paramètres climatiques (température, anémométrie, rayonnement solaire...) | Station météo <i>in situ</i> | 9 | 1 | 6 minutes | 2 365 200 |
| Hydraulique | Débits (entrée, sortie, surverse, niveau nappe) | Débitmètres électromagnétiques, sonde piézométrique <i>in situ</i> | 4 | 1 | 6 minutes | 1 051 200 |
| | Traçage hydraulique (traceur artificiel) | Traçage gadolinium par analyse ICP-MS | 1 | 6 | 3 campagnes | 18 |
| | Niveau des bassins (hauteur d'eau) | Mesure par réglelet | 1 | 5 | Hebdomadaire | 560 |
| | Niveau sédiment | Carottage | 1 | 5 | 6 campagnes | 30 |
| | Pédologie (infiltration, texture du sol) | Test de perméabilité Porcher, analyse granulométrique | 2 | 5 | 1 campagne | 10 |
| Physico-chimie | Physico-chimie classique entrée-sortie (T°C, pH, redox, turbidité, conductivité, O ₂) | Mesure <i>in situ</i> | 6 | 2 | 6 minutes | 3 153 600 |
| | Physico-chimie bassins intermédiaires (T°C, pH, redox, turbidité, conductivité, O ₂) | Mesure <i>in situ</i> par sonde multiparamètre Hach Lange | 6 | 7 | Hebdomadaire | 2 352 |
| Polluants | Macropolluants (DCO, MES, NGL, P total...) | Analyse laboratoire par microméthodes Hach | 8 | 7 | Hebdomadaire | 4 368 |
| | Micropolluants eau (317 substances : pesticides, pharmaceutiques, HAP, PCB, COV, alkylphénols...) | Analyse laboratoire par méthode extraction SPE et analyse GC-MS/MS ou LC-MS/MS | 317 | 2 | 15 campagnes | 9 510 |
| | Micropolluants sédiments (247 substances : pesticides, HAP, PCB, COV, alkylphénols) | Analyse laboratoire par méthode extraction en phase solide (SPE) et analyse GC-MS/MS ou LC-MS/MS | 247 | 2 | 2 campagnes | 988 |
| | Micropolluants végétaux (4 substances : alkylphénols) | Analyse laboratoire par méthode extraction SPE et analyse GC-MS | 4 | 1 | 1 campagne | 4 |
| Sanitaire | Bactériologie (<i>Escherichia coli</i> , entérocoques, coliformes totaux) | Analyse laboratoire par méthode Idexx | 3 | 7 | Hebdomadaire | 1 638 |
| | Pathogènes (Légionelles, amibes, SbASR, phages ARNf...) | Analyse laboratoire dénombrement NPP et PCR | 5 | 3 | 11 campagnes | 165 |
| Biologie | Biodiversité (odonates, orthoptère, amphibien, oiseaux, flore) | Échantillonnage à vue selon transect | 5 | 1 | 3 campagnes | 15 |
| | Diatomées | Détermination microscopique | 1 | 5 | 4 campagnes | 20 |
| | Macro-invertébrés benthiques | Détermination laboratoire | 1 | 5 | 2 campagnes | 10 |

Suite du tableau page suivante ►

| Catégorie de suivi | Type de paramètres | Méthode | Nombre de paramètres | Nombre de points de mesure | Fréquence d'acquisition | Nombre de données acquises sur les 3 ans d'étude |
|----------------------------|---|--|----------------------|----------------------------|-------------------------|--|
| Biologie | Phytoplancton et zooplancton (microalgues, protozoaires, bactéries dispersées...) | Détermination microscopique | 175 | 5 | 10 campagnes | 8 750 |
| | Suivi photographique | Appareil photographique | 1 | 1 | 6 fois/jour | 8 760 |
| | Couverture végétale | Évolution du recouvrement relatif | 1 | 5 | Hebdomadaire | 840 |
| | Biomasse végétale (hydrophytes, héliophytes) | Échantillonnage par quadrats et pesées | 2 | 5 | 6 campagnes | 60 |
| | Pigments chlorophylliens (chlorophylles totales, phéopigments) | Analyses et dosages par laboratoire | 2 | 2 | 9 campagnes | 36 |
| Nombre total de paramètres | | | 802 | — | — | 6 608 134 |

COV : composés organiques volatils ; DCO : demande chimique en O₂ ; HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques ; MES : matières en suspension ; NGL : azote global ; NPP : nombre le plus probable ; PCB : polychlorobiphényle ; PCR : *polymerase chain reaction*.
Méthodes d'analyse : ICP-MS : spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif ; GC-MS/MS : chromatographie gazeuse avec spectrométrie de masse en tandem ; LC-MS/MS : chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem.

Tableau I. Liste et fréquences des paramètres suivis au cours de l'étude

certaines valeurs des paramètres ont été étendues à une période plus large que la seule date d'acquisition. Les mesures en continu constituent la plus importante masse de données. Des règles ont été établies lorsque des données sont absentes ou aberrantes, ce qui peut arriver lors de coupure de courant ou en cas d'erreur de transmission. Pour ce faire, si l'interruption représente une seule date d'acquisition, la donnée absente est remplacée par la moyenne des deux données encadrant la valeur manquante. Si l'interruption des données est supérieure ou égale à deux dates consécutives, alors les données absentes sont laissées vacantes.

Le suivi et l'interprétation des données ont également dû tenir compte du développement et de la vie du site (période de nidification des oiseaux d'eau, période de développement d'algues, d'envahisseurs végétal et animal, périodes de haute nappe...). Un cahier de bord a été mis en place recensant chaque événement naturel, opération d'exploitation ou encore chaque intervention métrologique sur les appareils en place.

3. Résultats

3.1. Qualité physico-chimique, macropolluants et bactériologie

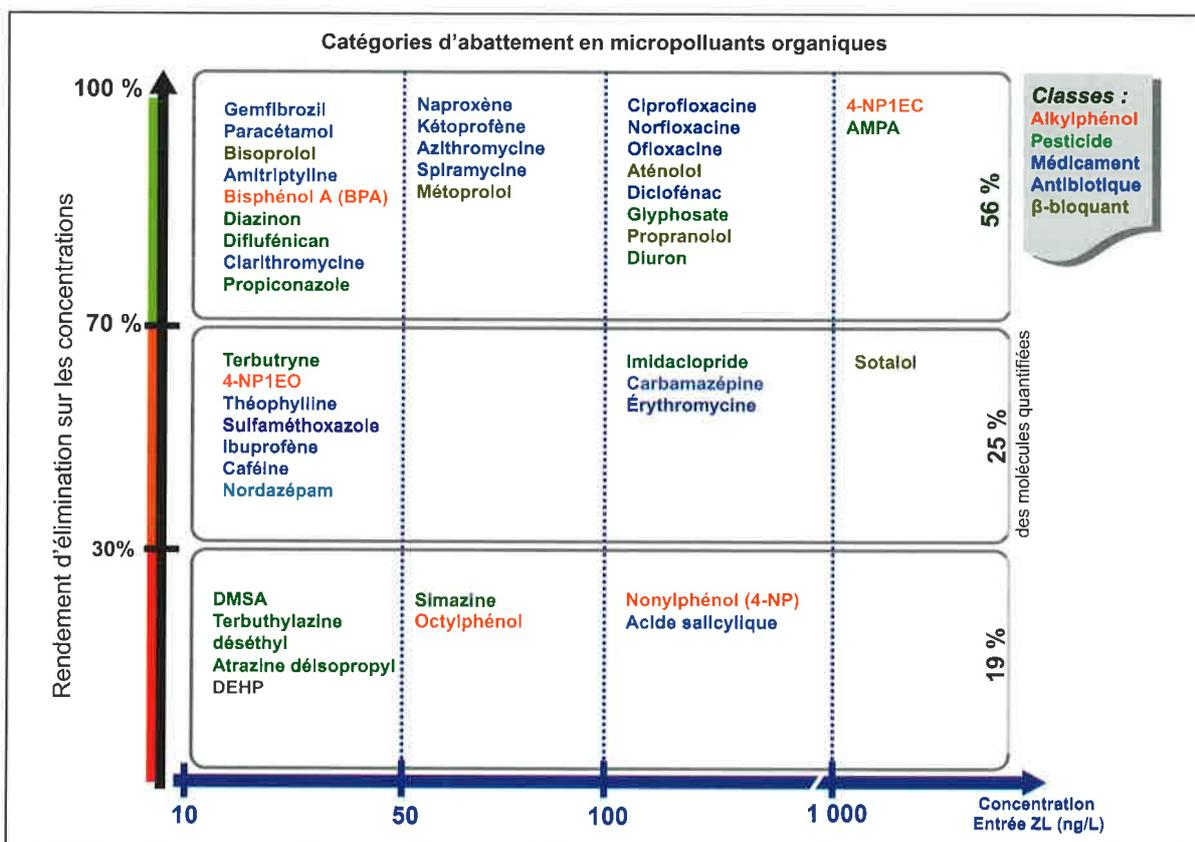
L'étude a montré que la zone humide artificielle installée en rejet des eaux traitées par la station d'épura-

tion du Sivom de la Palus permet entre autres de limiter l'impact thermique au niveau du rejet dans le milieu naturel, particulièrement en hiver, ou encore de réduire le volume d'eau rejeté au milieu superficiel de près de 60 % (tableau II). Bien que l'eau traitée par la station d'épuration soit déjà de très bon niveau, il est possible de mesurer une réduction supplémentaire de l'azote et du phosphore de l'ordre de 30 %. La réduction est négligeable sur les matières en suspension (MES) et la demande chimique en oxygène (DCO). Lors de perturbations ponctuelles du niveau de rejet de la station d'épuration (STEP), la ZRV amortit l'impact de pics de concentration en macropolluants et permet le maintien de la qualité finale de l'eau rejetée au milieu récepteur. En cas de dysfonctionnements très importants en amont, la résilience du système étudié s'observe en quelques semaines. L'abattement bactériologique moyen sur *Escherichia coli* est de 3,5 log et de 2,6 log sur les entérocoques. De plus, 83 % des échantillons d'eau présentent pour ces paramètres des concentrations inférieures aux seuils de qualité pour la baignade. Cependant, au cours de l'étude, il a été constaté que la couverture végétale des bassins, plus importante en été, limite la réduction des germes indicateurs de contamination fécale.

3.2. Suivi des micropolluants

Les campagnes de mesures montrent une variabilité importante des concentrations d'un jour à l'autre et au cours de l'année sur l'eau traitée par la station d'épuration. La variabilité interéchantillons peut être plus marquée que la variabilité entre l'entrée et la sortie. La variabilité est plus marquée sur les pesticides, dont la plupart ont pour origine une utilisation

domestique ponctuelle (herbicides, insecticides), mais également sur les produits pharmaceutiques qui suivent l'état de santé de la population. En moyenne, 195 molécules ont été décelées en entrée de la zone sur les 317 recherchées. Les rendements d'élimination sur les micropolluants en sortie Zone Libellule ont atteint 70 % sur 56 % des molécules quantifiées (43 molécules supérieures à 10 ng/L) (figure 2). Les



4-NP1EO : 4-nonylphénol monoéthoxylate ; DMSA : acide dimercatosuccinique ; DEHP : diéthylhexyle phtalate ; 4-NP1EC : acide 4-nonylphénoxyacétique ; AMPA : acide aminométhylphosphonique ; ZL : Zone Libellule.

Figure 2. Bilan de réduction des micropolluants calculé à partir des concentrations sur les substances quantifiées lors de la campagne de mesure de juillet 2011

| Paramètre | Unité | Concentration moyenne entrée ZL* | Concentration moyenne sortie ZL | Rendement moyen |
|-------------------------|----------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| Débit | m ³ /jour | 438 ± 9 | 143 ± 9 | 60 % |
| DCO | mgO ₂ /L | 23 ± 3 | 17 ± 1 | NS |
| MES | mg/L | 6,4 ± 1,7 | 3,0 ± 0,3 | NS |
| NGL | mgN/L | 4,4 ± 1,1 | 2,5 ± 0,7 | 30 % |
| P total | mgP/L | 0,71 ± 0,08 | 0,32 ± 0,04 | 30 % |
| <i>Escherichia coli</i> | log | 4,5 ± 0,1 | 1,0 ± 0,1 | 3,5 log |
| Entérocoques | log | 4,0 ± 0,1 | 1,6 ± 0,2 | 2,6 log |
| Total micropolluant** | µg/L | 18,8 ± 3,9 | 7,1 ± 2,8 | - |

*Sortie station d'épuration ; **somme des concentrations moyennes des 58 micropolluants quantifiées lors des 15 événements de prélèvements ; DCO : demande chimique en O₂ ; MES : matières en suspension ; NGL : azote global ; NS : différence entrée-sortie non significative.

Tableau II. Résumé des caractéristiques des effluents en entrée et en sortie de la Zone Libellule (ZL)

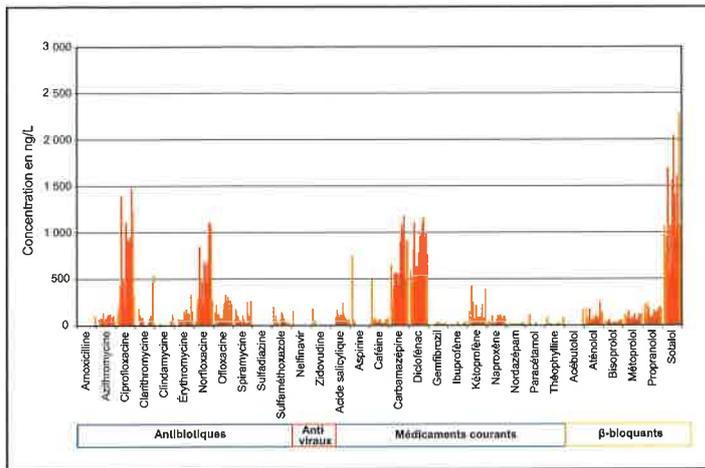


Figure 3. Concentrations en médicaments observées sur l'entrée de la zone de rejet végétalisée – 15 bilans (en clair : campagnes saisonnières, en foncé : campagnes de juillet 2011)

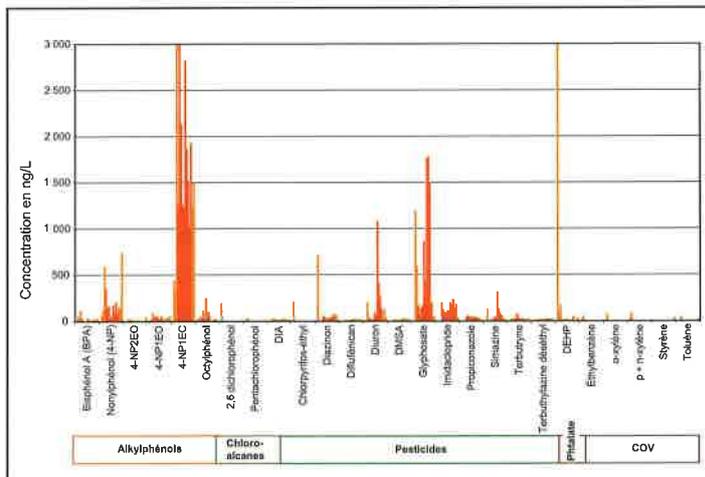


Figure 4. Concentrations en alkylphénols, chloroalcanes, pesticides, phtalates et composés organiques volatils (COV) observées sur l'entrée de la zone de rejet végétalisée – 15 bilans (en clair : campagnes saisonnières, en foncé : campagnes de juillet 2011)

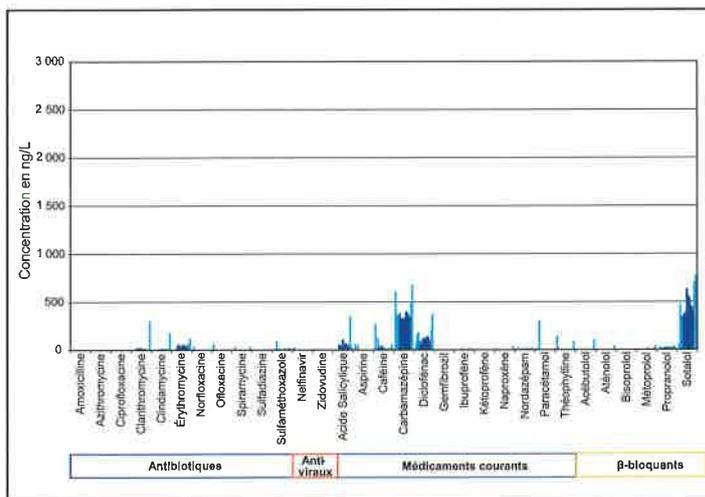


Figure 5. Concentrations en médicaments observées sur le rejet de la zone de rejet végétalisée – 15 bilans (en clair : campagnes saisonnières, en foncé : campagnes de juillet 2011)

alkylphénols, issus de résidus plastiques et de détergents, les médicaments comme les antibiotiques, le diclofénac, le naproxène, ou encore certains pesticides, ont des réductions de plus de 80 % en concentration dans l'eau. La campagne de mesures réalisée en juillet 2011 a montré que le flux de substances rejetées au milieu superficiel est réduit de plus de 80 % durant cette période.

3.3. Indicateurs biologiques et biodiversité

La détermination des espèces de diatomées, groupe utilisé en tant qu'indicateur biologique de la qualité de l'eau (IBD), montre une évolution du peuplement en relation avec l'amélioration de la qualité physico-chimique de l'eau en rejet dans la zone humide. Le suivi de la chaîne microtrophique (bactéries libres, protozoaires, plancton, etc.) montre des profils de peuplements différents selon les compartiments ainsi qu'une maturation progressive du système. La plus grande partie de la flore initiale aquatique et terrestre (35 espèces implantées à la construction) s'est maintenue pendant que la biodiversité floristique locale a pris place très rapidement, accompagnée du cortège emblématique de la faune des zones humides (batraciens, odonates, orthoptères, avifaunes). L'ensemble du terrain remanié a été recolonisé et le cortège floral comptait 143 espèces au bout de 3 ans. Deux espèces d'orthoptères menacées par la régression des milieux humides sont présentes sur la Zone Libellule. De plus, le site se montre également attractif pour les

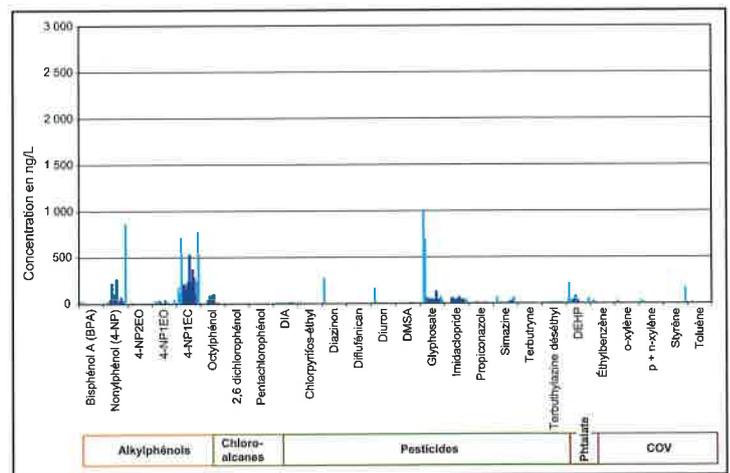


Figure 6. Concentrations en alkylphénols, chloroalcanes, pesticides, phtalates et composés organiques volatils (COV) observées sur le rejet de la zone de rejet végétalisée – 15 bilans (en clair : campagnes saisonnières, en foncé : campagnes de juillet 2011)

oiseaux en servant de sites de nourrissage. En 2010, 27 espèces ont été repérées sur le site avec la présence régulière d'aigrettes, de hérons et de poules d'eau (figure 7). Un site témoin proche, comparable au terrain initial (prairie sèche), a été suivi pour évaluer la biodiversité amorcée par la mise en place d'une Zone Libellule. Le suivi de la flore, terrestre et aquatique, et des insectes montre que, grâce à la mise en eau du terrain concerné, transformé en écosystème humide, la Zone Libellule abrite six fois plus d'espèces que le site témoin sur les taxons indicateurs (figure 7).

équipé de récipients en verre et de tuyaux d'aspersion en polytétrafluoroéthylène...). Le choix du laboratoire pour la réalisation de ces analyses est également important puisque les limites de détection et de quantification doivent être très faibles pour la majorité des composés recherchés (entre 1 et 10 ng/L). Ces cinq campagnes de mesures sont qualifiées de « saisonnières », car elles ont été effectuées à des périodes climatiques différentes. Les événements de prélèvements en entrée et en sortie ont été décalés du temps de séjour hydraulique théorique de l'eau dans la ZRV.

Une révision du protocole initial est intervenue à la suite des résultats des premières campagnes et de l'étude des temps de séjour hydraulique par traçage par terre rare. En effet, cette dernière a révélé que le système hydraulique ne fonctionnait pas en simple flux piston et que le temps de séjour hydraulique théorique était finalement éloigné du temps de séjour réel de l'eau dans les bassins. De plus, l'étude a permis de mettre en évidence que le temps de séjour réel variait entre 10 jours par temps de pluie à plus de 38 jours par temps sec. Il a donc été nécessaire de revoir le mode opératoire afin de réaliser une campagne de prélèvements supplémentaire permettant de couvrir toute la période de temps de séjour (10 prélèvements répartis sur 5 semaines en juillet 2011). Les prélèvements, effectués tous les 3 ou 4 jours, ont alors permis de raisonner sur des flux de polluants. Par ailleurs, les premières analyses ont permis de définir plusieurs groupes de substances comme « traceurs » dont la présence est significative dans l'effluent traité (groupe de substances dont la concentration de certains composés est supérieure à 100 ng/L). Pour limiter les coûts liés à l'analyse de l'ensemble des micropolluants, ce sont ces traceurs qui ont été recherchés durant la procédure révisée de prélèvement et d'analyse.

4.2. Révision du mode opératoire de l'inventaire des espèces végétales

Le suivi du développement de la biodiversité végétale a également dû être adapté à l'évolution du site. En effet, au départ après les plantations, il est relativement aisé de dénombrer le nombre de plans par espèces peuplant la surface et les rives des bassins de la zone humide artificielle. C'est pourquoi, la

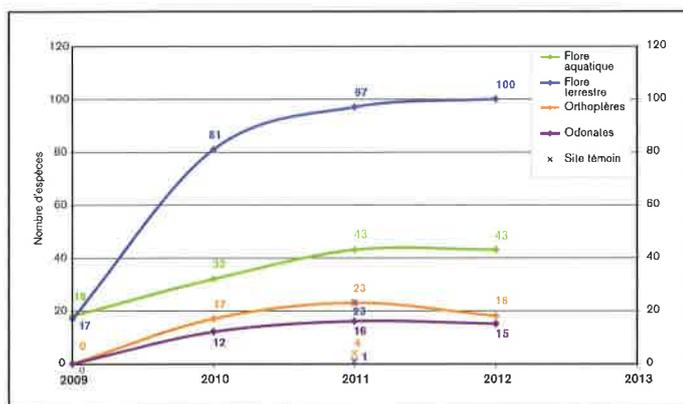


Figure 7. Évolution de la richesse spécifique par groupes inventoriés sur la Zone Libellule depuis 2009

4. Discussion

4.1. Révision du protocole de prélèvement pour l'analyse des micropolluants

La recherche et les dosages de micropolluants ont fait tout d'abord l'objet de cinq campagnes de prélèvements en entrée et en sortie. Les campagnes ont été réparties sur l'ensemble de la période de suivi de la ZRV (2009-2012). Les prélèvements d'eau ont été conduits suivant le protocole recommandé pour les analyses de micropolluants, comme décrit par CHOUVERT et coll. [2009], dans le cadre du programme Amperes³. Le matériel utilisé a été adapté pour la recherche de micropolluants organiques à l'état d'ultratraces, en prenant les précautions nécessaires pour limiter les risques de contaminations exogènes (verrerie décontaminée, préleveur automatique

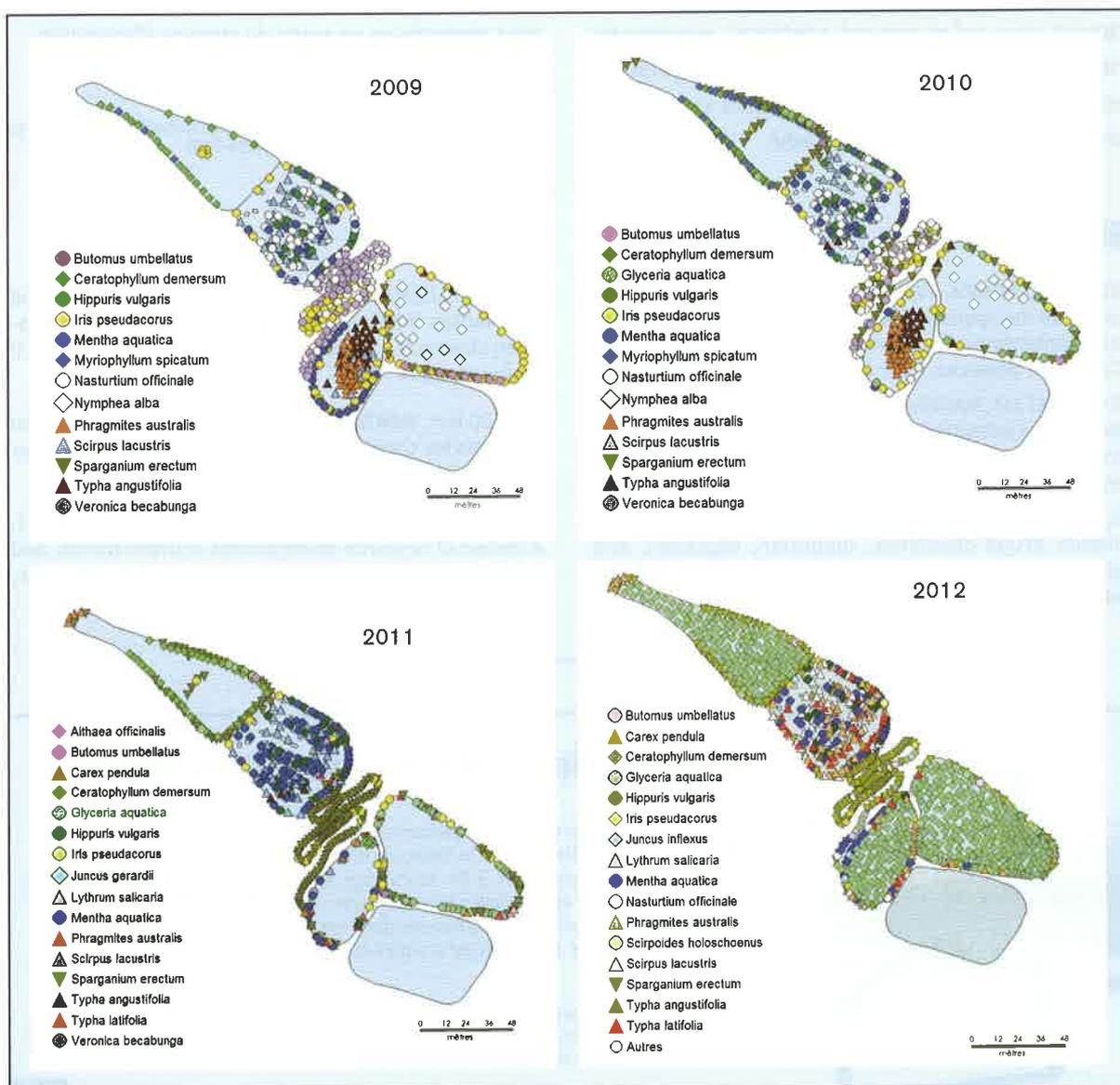
³ Amperes : analyse des micropolluants prioritaires et émergents dans les rejets et les eaux superficielles. Programme d'évaluation de l'efficacité d'élimination des substances prioritaires et émergentes par les stations d'épuration (2006-2009).

première année, un comptage par pied était possible. Étant donné le développement rapide de la plupart des macrophytes, le dénombrement des pieds a été remplacé la deuxième année par un comptage des bouquets. Sur l'ensemble de la zone, ce sont des transects échantillons qui ont été réalisés. À chaque relevé, une estimation du coefficient de dominance par espèce est donnée. Pour les macrophytes, une cartographie a été effectuée en fonction des zones échantillonnées (figure 8). Elle a permis de visualiser le recouvrement et la dynamique des espèces associées. Cependant, il est à noter que, chaque année, pour ne pas biaiser les

résultats, l'effort d'échantillonnage est resté similaire avec quatre passages étalés sur la même période : du mois de mai au mois de septembre.

Conclusion

L'expérience de cette étude conduit à insister sur plusieurs points méthodologiques pour la mesure d'efficacité d'une telle zone de rejet végétalisée. Il est utile de rappeler qu'il faut définir précisément des objectifs de mesures, savoir accorder des priorités dans les axes d'études, s'atteler à mettre en place des méthodes de base, tout en sachant faire évoluer les



Source : Biotope.

Figure 8. Cartographie de la végétation aquatique des compartiments de la Zone Libellule pendant les trois premières années de développement

protocoles pour répondre à l'évolution du terrain. Les limites des méthodes mathématiques doivent être bien cernées et les échelles de temps et les ordres de grandeur correctement respectés.

L'ensemble des méthodes et des mesures prises indépendamment pour cette étude a permis d'apporter des éléments importants pour conclure sur le fonctionnement et les performances en matière de traitement et d'accueil de la biodiversité générés par la zone de rejet végétalisée. En revanche, l'incorporation et le recouplement des différentes données *in situ* sont un challenge pour l'interprétation plus fine des résultats. Elle permettrait à terme de comprendre les phénomènes en cause. En effet, plusieurs compartiments (eau, sol et sous-sol, végétaux), aux caractéristiques propres, interviennent dans l'évolution des mécanismes physiques et biologiques régissant le fonctionnement du système étudié.

La surveillance de la qualité de l'eau en continu *via* des systèmes de télégestion a permis de réagir rapidement en cas de problème et de dysfonctionnement. Les diverses opérations de maintien des écoulements hydrauliques ou de la gestion maîtrisée de la végétation du site ont pu être intégrées dans la conduite de l'étude. La difficulté restante est de relier entre elles les données relatives aux variables et aux paramètres pouvant les influencer, d'autant plus que la variabilité spatio-temporelle est difficilement intégrable dans des outils d'analyses actuels.

L'étude des zones humides artificielles se poursuit avec le programme Zhart⁴. Il a pour but de développer et d'industrialiser l'aménagement de zones de rejet végétalisées en sortie de stations d'épuration.

⁴ Zhart : Zones Humides ARTificielles – Projet en consortium piloté par Suez Environnement avec le soutien du FUI 2013-2015.

Bibliographie

BOUTIN C., IWEMA A., LAGARRIGUE C. (2010) : « Point sur les zones de dissipation végétalisées : vers une protection supplémentaire du milieu récepteur de surface ? ». Cemagref, Sciences, eaux et territoires, juin 2010, 12 p.

CHOUBERT J.M., MARTIN-RUEL S., COQUERY M. (2009) : « Prélèvement et échantillonnage des substances prioritaires et émergentes dans les eaux usées. Les prescriptions techniques du projet de recherche Amperes ». TSM ; 4 : 88-101.

CLEUVERS M. (2004) : « Mixture toxicity of the anti-inflammatory drugs diclofenac, ibuprofen, naproxen, and acetylsalicylic acid ». *Ecotoxicology and Environmental Safety* ; 59 : 309-315.

FEITOSA-FELIZZOLA J., CHIRON S. (2009) : « Occurrence and distribution of selected antibiotics in a small Mediterranean stream (Arc River, Southern France) ». *Journal of Hydrology* ; 364 : 50-57.

KADLEC R.H., MARTIN D.C., TSAO D. (2012) : « Constructed marshes for control of chlorinated ethenes: An 11-year study ». *Ecological Engineering* ; 46 : 11-23.

ZHI W., JI G. (2012) : « Constructed wetlands, 1991-2011: A review of research development, current trends, and future directions ». *Science of the Total Environment* ; 441 : 19-27.



La collection est maintenant complète!

La nature et les causes des risques sanitaires liés à la consommation d'eau contaminée sont multiples et le rôle joué par le réseau de distribution est loin d'être négligeable. Retrouvez dans les tomes 2 et 3 de cet ouvrage, **le manuel du parfait opérateur** qui aborde l'exploitation et la maintenance du réseau et les aspects liés à la surveillance permanente de la qualité de l'eau mise en distribution. Ils complètent le tome 1 qui traite de la nature et des origines des problèmes de qualité.

Ces ouvrages s'adressent à l'ensemble des acteurs opérationnels : autorités organisatrices, opérateurs et gestionnaires des services d'eau, responsables institutionnels, maîtres d'œuvre, chercheurs, enseignants et étudiants.

Bon de commande sur le site www.aste.org



Résumé

E. BLIN, J. SCHUEHMACHER, E. PAOLETTI, J. JORDI

Mesures d'efficacité des zones de rejet végétalisées : méthodes et résultats

Dans le cadre de l'atteinte du bon état de nos masses d'eaux, encadré par la directive cadre sur l'eau, on a pu constater depuis plusieurs années l'installation croissante d'espaces tampons, de zones de diffusion, de zones de rejet végétalisées (ZRV), entre des rejets – le plus souvent d'eaux issues de traitement d'eaux usées – et les milieux aquatiques. Ces zones ont pour objectif, suivant le cas, de parfaire le niveau de qualité de l'eau avant rejet ou encore de lisser l'impact hydraulique. Plusieurs centaines de ZRV ont été recensées en France et l'on constate que l'utilisation de zones humides artificielles est également en fort déploiement dans de nombreux pays.

Il est vrai que ces dispositifs pouvant être installés sur des rejets aux qualités différentes et avec de multiples configurations, dans diverses régions, la mesure de leur efficacité se révèle délicate, notamment en fonction du type d'écoulement rencontré.

Ainsi, il a été décidé qu'à la suite de la mise en place de la zone humide artificielle en aval du rejet de la station d'épuration du Syndicat intercommunal à vocation multiple (Sivom) de la Palus à Saint-Just (34), les études visant à en déterminer l'efficacité seraient encadrées par des protocoles adaptés spécifiquement au fonctionnement typique de ces espaces humides. C'est en été 2009 que la zone humide artificielle de

Saint-Just, d'après un concept développé par Lyonnaise des Eaux et nommé Zone Libellule a été mise en eau. Pour mieux comprendre son fonctionnement, une étude scientifique a été menée avec pour objectif de mesurer l'efficacité tant sur la partie élimination des polluants, et en particulier des polluants émergents, que sur l'évolution de la biodiversité et de ses services rendus.

Pour remplir ces objectifs, une trentaine de protocoles expérimentaux ont été élaborés. Ils ont permis d'évaluer les capacités de traitement en incluant des mesures sur la météorologie, sur l'hydraulique, sur les concentrations en macropolluants et en micropolluants, sur la bactériologie et sur les caractéristiques physico-chimiques de l'eau. La partie biodiversité a également pu être évaluée en prenant en compte les inventaires des espèces végétales, de l'avifaune, des amphibiens, des odonates, des orthoptères, des macro-invertébrés benthiques, des diatomées et de certains micro-organismes.

Plus de 1 000 000 de données ont pu être ainsi prises en compte à l'aide de capteurs mesurant en continu, de campagnes d'analyses hebdomadaires, de mesures saisonnières ou annuelles pour la biodiversité, ou encore de 15 bilans spécifiques pour les micropolluants.

Abstract

E. BLIN, J. SCHUEHMACHER, E. PAOLETTI, J. JORDI

Measuring the effectiveness of constructed wetland at the outlet of WWTPs: methods and results

As part of the programme to improve the status of our bodies of water, as required by the Water Framework Directive, we have in recent years seen the growing use of buffer spaces, diffusion zones, constructed wetland at the outlet of WWTPs, situated between the discharge points, usually treated water from sewage plants, and the aquatic ecosystems. Depending on the individual case, the purpose of these zones is to further improve the quality of the water before discharge, or mitigate the hydraulic impact. Several hundred of constructed wetlands have been identified in France and it can be seen that there is also widespread deployment of constructed wetlands in many countries.

It is true that because these systems can be installed on discharges of different quality levels and with a multitude of configurations, in a variety of regions, it is far from easy to measure their effectiveness, especially for the different types of flows encountered.

The decision was therefore taken that following the creation of the constructed wetland downstream of the discharge from the Sivom (District Public Works Authority) de la Palus wastewater treatment plant in Saint-Just (Hérault administrative region, 34), studies to determine its effectiveness would be run in compli-

ance with protocols specifically adapted to the typical operation of these spaces.

It was in the summer of 2009 that water was released into the Saint-Just constructed wetland, based on a concept developed by Lyonnaise des Eaux and called Zone Libellule. To gain a clearer understanding of how it works, a scientific study was carried out with the aim of measuring the effectiveness, both with regard to the elimination of pollutants, in particular emerging pollutants, and to the changes in biodiversity and the provided services.

To meet these goals, about thirty experimental protocols were validated. They were used to evaluate treatment capacities, including measurements concerning meteorology, hydraulics, concentrations of macropollutants and micropollutants, bacteriology and the physical-chemical characteristics of the water. The biodiversity aspect was also evaluated by taking account of the inventories of plant species, birds, amphibians, odonata, orthoptera, benthic macro-invertebrates, diatoms and certain micro-organisms. More than 1,000,000 data were thus incorporated from continuous-measurement sensors, weekly analysis campaigns, seasonal or annual biodiversity measurements, as well as 15 specific analyses for micropollutants.