

L'ingénierie écologique appliquée aux zones de rejet végétalisées : élimination de micropolluants, biodiversité et intégration socio-territoriale

■ Y. PENRU¹, T. POLARD², M. AMALRIC³, C. CIRELLI⁴, M. BACCHI⁵, M. LAFFORGUE⁶, J. SCHUEHMACHER², M. CHAMBOLLE², M.-A. LEBAS⁴, P. PROHIN⁵, L. MEHDI⁴, F. DI PIETRO⁴, C. LARRUE⁴, A. SELLIER⁷, A. CADIÈRE⁷, M.-P. SOM⁸, N. TAPIE⁹, H. BUDZINSKI⁹, S. MARTIN¹, L. PERRIDY²

Mots-clés : génie écologique, génie hydraulique, traitement tertiaire, espace tampon, maintien de la biodiversité, insertion socio-territoriale, eau, assainissement

Keywords: ecological engineering, hydraulic engineering, tertiary treatment, buffer area zone, biodiversity development, socio-territorial integration, water, sanitation

Introduction

La directive cadre européenne sur l'eau (DCE) vise la reconquête de la qualité des milieux aquatiques et impose que de nouveaux polluants, même à faible concentration, disparaissent de nos eaux dans les années à venir. À l'échelle d'un bassin versant, ces polluants sont issus de diverses sources (rejets domestiques, industriels, eaux pluviales, etc.), mais convergent généralement vers les milieux aquatiques. Même si une partie de ce flux de polluants est éliminée par les stations de traitement des eaux usées, celles-ci ne sont pas conçues pour les traiter et une part significative de ces flux se retrouve dans les milieux naturels.

Face à ce défi, les traitements qui s'appuient sur les mécanismes naturels qui contribuent à éliminer certains de ces polluants de la phase eau (biodégradation, photolyse, volatilisation, adsorption puis décantation, fixation par les plantes) apparaissent comme une alternative aux traitements plus intensifs parfois implantés à l'aval de la filière de traitement des stations d'épuration (ozonation ou adsorption sur charbon actif). Depuis une dizaine d'années, des zones de rejet végétalisées (ZRV) sont fréquemment proposées, comme un espace aménagé entre la station d'épuration et le milieu récepteur, même si elles ne sont pas considérées aujourd'hui comme faisant partie du dispositif de traitement. Actuellement, les ZRV existantes sont très hétérogènes et il n'existe pas de règles de conception ni de dimensionnement permettant de garantir des fonctionnalités épuratoires et le développement d'une biodiversité.

La réalisation des ZRV a pour objectif principal de répondre aux attentes et aux besoins du maître d'ouvrage face aux contraintes le plus souvent réglementaires (gestion de l'eau). Toutefois, d'autres bénéfices que l'aspect épuratoire peuvent être visés. En effet, la conception des ZRV permettrait aussi de favoriser le développement de la biodiversité, elle

¹ Suez Groupe (Cirsee) – 38, rue du Président-Wilson – 78230 Le Pecq. Courriel : ywann.penru@suez.com

² Suez Eau France – LyRe et direction de l'ingénierie environnementale – Domaine du Haut-Carré, Bâtiment C4 – 33400 Talence.

³ UMR 7324 Citeres – Université Tours – 33, allée Ferdinand-de-Lesseps – 37204 Tours.

⁴ Nymphéa – Route du Pont-des-Tourradons – 30740 Le Cailar.

⁵ SARL Rive – Bonivet Pontille – 37500 Chinon.

⁶ Suez Consulting – Le Bruyère 2000 – Bâtiment 1 – Zone du Millénaire 650 – Rue Henri-Becquerel – CS79542 – 34961 Montpellier cedex 2.

⁷ LERES – École des hautes études en santé publique – Place Gabriel-Péri, 30000 Nîmes.

⁸ Eurofins – IPL – Rue Lucien-Cuenot – ZI Saint-Jacques II – 54320 Maxeville.

⁹ Université Bordeaux 1 – CNRS – EPOC/LPTC UMR5805 – 351, cours de la Libération – 33405 Talence.

pourrait également participer à des actions d'initiation à l'environnement, voire participer au développement local, élargissant ainsi les bénéfices au-delà d'une stricte réponse à la réglementation. Les usagers effectifs et potentiels des ZRV pourraient à ce titre être qualifiés de bénéficiaires de « services écosystémiques » (par exemple, les associations naturalistes locales, les classes des écoles, mais aussi les riverains pour qui les ZRV pourraient constituer des zones récréatives...).

C'est dans ce contexte que le projet Zone Humide ARTificielle (ZHART) a été conduit entre 2013 et 2016. Les objectifs étaient multiples : il s'agissait en effet de progresser suffisamment dans la connaissance des mécanismes physiques, chimiques et biologiques existant au sein des ZRV et de permettre l'abatement de polluants de la phase eau pour enfin proposer présenter des garanties épuratoires de polluants, mais également de répondre aux spécificités écologiques des zones humides et de s'interroger sur les fonctions sociétales et paysagères de telles zones.

1. Définition des garanties d'élimination des micropolluants

En 2009, la construction de la Zone Libellule à Saint-Just (Sivom de la Palus – département 34) traduisait la prise en compte d'un besoin de conception spécifique des ZRV pour que celles-ci soient adaptées aux services annoncés tels que l'élimination des polluants ou l'accueil de la biodiversité. Le principe de conception reposait sur le passage de l'effluent secondaire (eaux usées traitées par boues activées) au travers d'une succession de compartiments. Un suivi de 3 ans a mis en évidence des résultats prometteurs en matière de performances épuratoires, en particulier pour les micropolluants. Cependant, de nombreuses inconnues subsistaient et ne permettaient pas de répondre aux demandes de garanties épuratoires des maîtres d'ouvrage. Les questions posées étaient entre autres les suivantes :

- En quoi la conception et le dimensionnement d'une ZRV peuvent-ils avoir des incidences sur le traitement des polluants ?

- Quels sont les mécanismes, existants naturellement dans les zones humides, qui permettent d'éliminer de la phase eau certains polluants ?

- Comment garantir une efficacité épuratoire dans le temps ?

Afin de franchir un palier, et d'être en capacité de proposer de tels dispositifs en tant que solution innovante pour le traitement tertiaire des micropolluants, il restait nécessaire de caractériser et de comprendre les performances des ZRV vis-à-vis du devenir de chacun des micropolluants. Pour cela, le devenir de 33 micropolluants, organiques et inorganiques, a été étudié au travers d'audits réalisés sur cinq sites représentant différentes typologies de ZRV existantes, de tests en microcosmes menés sous serre expérimentale et d'une consolidation des interprétations par un état de l'art de la littérature scientifique (*figure 1*). Les résultats obtenus pour chacune des molécules suivies (analyses chimiques dans l'eau, les sédiments et le végétal) ont mis en évidence les processus d'élimination impliqués, leur importance et les conditions limites. Ainsi, l'association des garanties d'épuration à des propositions de dimensionnement et de conception en génie écologique a été rendue possible.

1.1. Les substances suivies

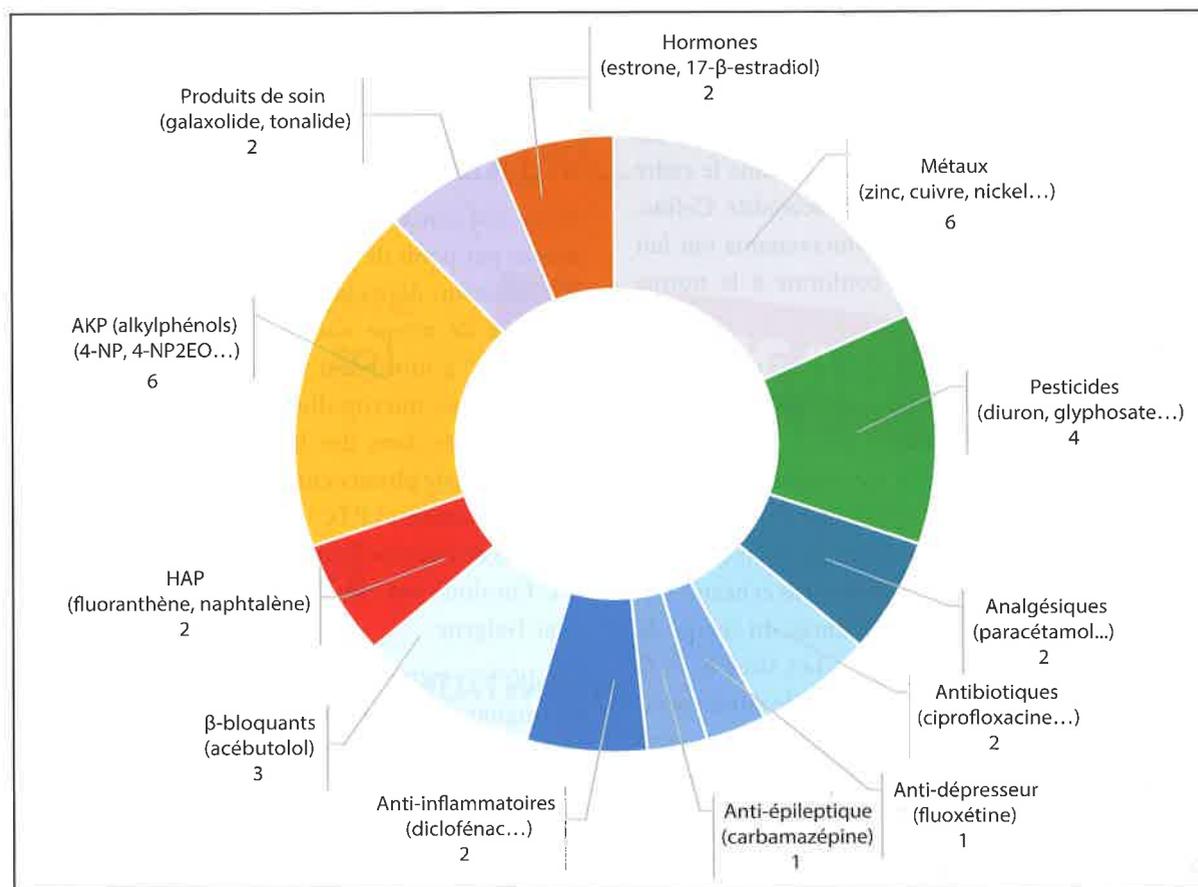
La sélection de ces micropolluants s'est faite sur plusieurs critères.

La fréquence de quantification en sortie de station d'épuration. Ce critère a été construit d'après les premiers résultats de l'action RSDE¹⁰, du projet Amperes, des données provenant de l'étude réalisée en 2010-2012 sur le site atelier Zone Libellule de Saint-Just et de la littérature scientifique.

La disponibilité des méthodes d'analyse fiables avec des limites de quantification (LQ) basses.

Leur représentativité vis-à-vis de différentes classes de composés dont l'élimination peut être demandée en sortie de station de traitement des eaux usées (STEU) du fait de leur impact potentiel sur le milieu.

¹⁰ Recherche et réduction des rejets de substances dangereuses dans les eaux.



HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Figure 1. Répartition par familles des 33 molécules analysées dans le projet ZHART

1.2. Les sites audités

Des audits ont été effectués sur cinq sites français. Ils ont été sélectionnés pour représenter une diversité de critères techniques et contextuels (figure 2 et tableau I). Néanmoins, afin de n'auditer que des sites pertinents dans un objectif d'élimination de micropolluants, tous présentaient un temps de séjour théorique d'un jour minimum.

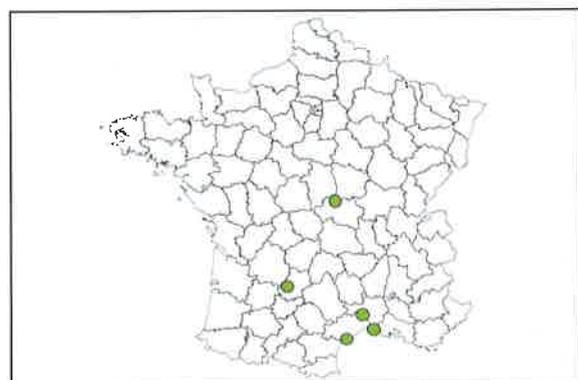


Figure 2. Localisation des sites audités

Caractéristiques	Gamme
Taille de STEU	De 600 à 30 000 EH
Surface de la ZRV	0,3 à 22 ha
Typologie de ZRV	Bassins, fossés, avec et sans végétaux De 1 à 5 compartiments Différentes vitesses d'écoulement
Temps de séjours	De 1 à > 50 jours
Climat	Méditerranéen, océanique, continental
Contexte	Rural/périurbain, station balnéaire, agriculture, résidentiel

STEU : station de traitement des eaux usées ; ZRV : zone de rejet végétalisée ; EH : équivalent-habitant.

Tableau I. Diversité des sites audités

1.3. Le protocole d'échantillonnage et d'analyse

Les cinq sites audités ont fait l'objet d'analyses chimiques visant à détecter et à quantifier les 33 molécules dans les compartiments suivants : eau, sédiments et plantes. Toutes les analyses ont été

réalisées conformément aux normes en vigueur (lorsqu'elles existent), ainsi qu'aux prescriptions techniques du cahier des charges, sous agrément du ministère en charge de l'Environnement, pour les paramètres où cet agrément existe, et dans le cadre d'un système d'assurance qualité accrédité Cofrac. Les méthodes des laboratoires intervenants ont fait l'objet d'une caractérisation conforme à la norme NF T90-210.

Les échantillons d'eau ont été prélevés au moyen d'un préleveur automatique réfrigéré SD900 (Hach Lange, Berlin, Allemagne). À chaque point d'analyse, un échantillon moyen 24 h a été constitué à partir d'échantillons de 10 mL prélevés toutes les 10 minutes. Les temps de prélèvements en entrée et en sortie de zone (et aux points intermédiaires le cas échéant) ont été décalés dans le temps de la durée du temps de séjour théorique dans ces zones. Les sites A, B, C et D ont fait l'objet d'une campagne de suivi spécifique. Le site E a, quant à lui, fait l'objet de quatre campagnes réparties sur 2 ans, visant à appréhender les variabilités temporelles des performances. Pour chacun des sites et chacune des campagnes, les conditions opérationnelles (débit hydraulique, temps de séjours, vitesse d'écoulement), physico-chimiques (pH, potentiel Redox...) et environnementales (température, intensité lumineuse, couvert végétal...) ont été suivies sur la durée des prélèvements.

L'ensemble des résultats obtenus a été analysé au regard de l'ensemble de ces paramètres ainsi que de la configuration des sites (nombre et ordre des compartiments).

L'évaluation des performances d'élimination des micropolluants par les procédés de traitement nécessite le calcul des rendements d'élimination de la phase eau, notés R_w . Les R_w sont calculés sur la base des rapports de concentrations mesurées en phase dissoute en entrée et en sortie de la ZRV. Ils sont déterminés substance par substance. Afin de prendre en compte les incertitudes associées à l'analyse et au prélèvement, la méthodologie qui a été appliquée est celle développée dans le cadre de projet Armistiq¹¹, adaptation aux procédés de traitement tertiaire de la méthode du projet Amperes. Du fait de la forte incertitude sur la mesure lorsque le résultat est proche de

la LQ (de 50 à 100 %), un seuil en dessous duquel il faut prendre plus de précautions dans le calcul du rendement d'élimination et dans son interprétation a été établi. Ce seuil a été défini comme égal à cinq fois la LQ du micropolluant cible.

En ce qui concerne les sédiments, un échantillon moyen par point de prélèvement a été constitué par la réalisation de trois sous-échantillons de même poids et de même volume. L'échantillon moyen est de 100 g minimum. Les échantillons pour les analyses des micropolluants organiques ont été conditionnés dans des barquettes en aluminium (laboratoire de physicochimie et de toxico-chimie de l'environnement, LPTC). Les échantillons pour les analyses de micropolluants inorganiques (laboratoire IPL-Eurofins) ont été conditionnés dans du flaconnage Nalgene.

Les prélèvements de végétaux ont été réalisés en distinguant, lorsque le volume le permettait, les tissus racinaires et les tissus aériens. Les espèces les plus représentées ont été récoltées en plusieurs sous-échantillons. La méthodologie d'échantillonnage était la suivante : trois sous-échantillons ont été effectués pour reconstituer un prélèvement moyen pour une même espèce et pour un type de tissus et un point de prélèvement. Le conditionnement était identique à celui des échantillons de sédiments. L'échantillon moyen était de 100 g minimum (poids frais).

Les échantillons ont été expédiés vers les laboratoires par transport rapide dans des glacières réfrigérées le jour même, avec livraison sous 24 h maximum. Les échantillons ont été maintenus à une température de 4 °C pendant la durée du transport.

1.4. Élimination de la phase eau

1.4.1. Approche globale

Considérées globalement, les analyses chimiques effectuées en entrée et en sortie de ZRV révèlent des performances d'élimination des micropolluants prometteuses, mais également très hétérogènes (tableau II). En effet, d'une part, des $R_w > 90\%$ ont pu être calculés dans toutes les familles de micropolluants à l'exception des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (70 % maximum), mais, d'autre part, des rendements nuls ont également été observés dans chacune d'entre elles. ►

¹¹ <http://armistiq.irstea.fr>

Famille de micropolluants	Gamme de Rw calculés
Métaux	0 à > 90 %
Pharmaceutiques	0 à > 90 %
Hormones	0 à > 90 %
Muscs	15 à > 90 %
Pesticides	0 à 90 %
Hydrocarbures aromatiques polycycliques	15 à 70 %
Alkylphénols et dérivés	0 à > 90 %

Tableau II. Gamme de rendements d'élimination Rw calculés pour chaque famille de micropolluant

► La diversité des résultats implique d'utiliser une description de résultats plus fine pour être en mesure d'évaluer les performances des ZRV vis-à-vis de l'épuration des micropolluants.

De nombreuses études sur l'évaluation des performances d'élimination de micropolluants par les ZRV ont été menées en France [SCHUEHMACHER *et al.*, 2013], en Europe [MATAMOROS et SALVADÓ, 2012; DORDIO et CARVALHO, 2013; VERLICCHI et ZAMBELLO, 2014] ainsi qu'en Asie [ZHANG *et al.*, 2012]. La revue bibliographique réalisée par VERLICCHI et ZAMBELLO [2014] confirme la grande variabilité des rendements d'élimination reportés pour une famille de micropolluants, voire

pour une même substance cible (par exemple de 0 à 100 % pour le kétoprofène).

MATAMOROS et SALVADÓ [2012] ont évalué l'efficacité d'un système pleine échelle composé de plusieurs étapes de traitement. Ils ont ainsi observé une variabilité de performance d'élimination suivant les composés étudiés (de 27 à 93 %), mais aussi suivant la saison pour certains des micropolluants étudiés. Les auteurs expliquent cette variabilité par l'existence de différentes voies d'élimination des micropolluants dont l'efficacité peut être affectée par les variations des conditions opératoires et environnementales.

Afin de mieux comprendre et d'identifier les voies d'élimination des différents composés, les performances des ZRV étudiées ont été évaluées site par site (§ 1.4.2) mais aussi compartiment par compartiment (§ 1.4.3) ainsi que différentes conditions opératoires et environnementales pour le site E, et cela pour chacun des micropolluants suivis dans ce projet.

1.4.2. Approche par site

Les taux d'abattement dans la phase eau ont été analysés site par site. Au sein de chaque site, les Rw des molécules d'une même famille de composés sont très hétérogènes. La figure 3 illustre les rendements calculés sur chaque site pour les médicaments et les produits de soins personnels.

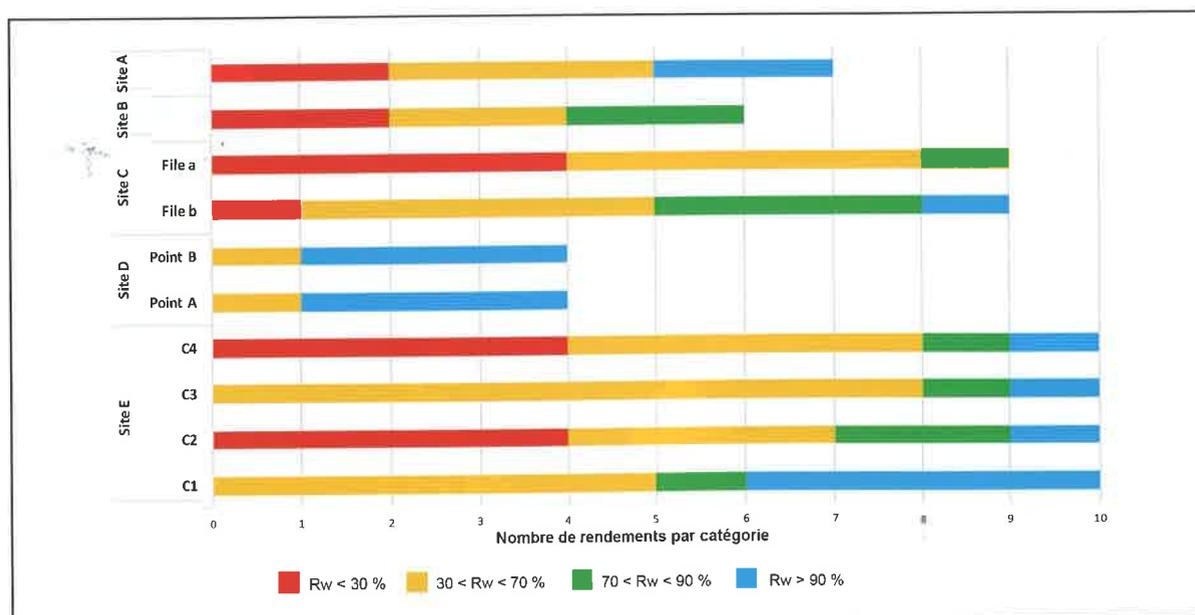


Figure 3. Nombre de médicaments et produits de soin personnel par classe de rendement R_w d'élimination de la phase eau

Le potentiel d'épuration des micropolluants par les ZRV est confirmé. En effet, il apparaît que chaque site présente des performances « bonnes » ($Rw > 70\%$) ou « très bonnes » ($> 90\%$) pour certains des composés. Toutefois, chacun d'entre eux est également le siège de performances « mauvaises » ($< 30\%$) ou « moyennes » ($< 70\%$) pour d'autres molécules. Plus spécifiquement, pour une même molécule, la gamme d'abattements peut varier nettement d'un site d'étude à l'autre. Par exemple, l'acébutolol est très bien éliminé sur le site D, bien éliminé sur le site B et moyennement éliminé sur les sites A et C.

Ces résultats mettent également en lumière la variabilité dans le temps des performances d'élimination (comme observé par MATAMOROS et SALVADÓ [2012]). En effet, toujours pour l'acébutolol, les résultats sont « moyens » pour deux des quatre campagnes, et « mauvais » pour les deux autres campagnes menées sur le site E. Cette différence peut être mise en relation directe avec une variation des conditions opérationnelles (débit hydraulique), environnementales (température, intensité lumineuse), mais également avec les modifications de la zone qui en résultent (variation du couvert végétal et de l'action des plantes, modification potentielle des communautés bactériennes et de leur activité, par exemple).

Enfin, les performances peuvent également être différentes entre deux files similaires d'un même site.

C'est le cas du site C qui présente des rendements d'élimination de la phase eau globalement plus faibles sur la « file a » que sur la « file b ». Les deux files étant de conception identique, la différence de performance épuratoire peut s'expliquer par des temps de séjour et des charges hydrauliques et organiques différentes entre ces deux files.

Les mêmes observations ont été faites pour les performances d'élimination d'autres micropolluants organiques suivis dans le cadre du projet et ainsi que pour des métaux (figure 4).

Parmi les six métaux présents dans la liste des substances recherchées, certains ont été peu retrouvés en entrée de ZRV. Ainsi, il n'a jamais été possible de calculer le rendement pour le cadmium, et un seul rendement a pu être calculé pour le plomb. À l'image des résultats obtenus pour les molécules organiques, les rendements qui ont pu être calculés sont largement variables d'un composé à l'autre et d'un site à l'autre.

Les performances d'élimination ne sont donc pas dépendantes uniquement des caractéristiques intrinsèques des molécules ou de celles de la zone, mais plutôt de leurs interactions, en plus des interactions directes et indirectes avec les facteurs environnementaux. Il ne semble donc pas envisageable de proposer une évaluation générale des performances des ZRV pour traiter les micropolluants. En revanche, la ►

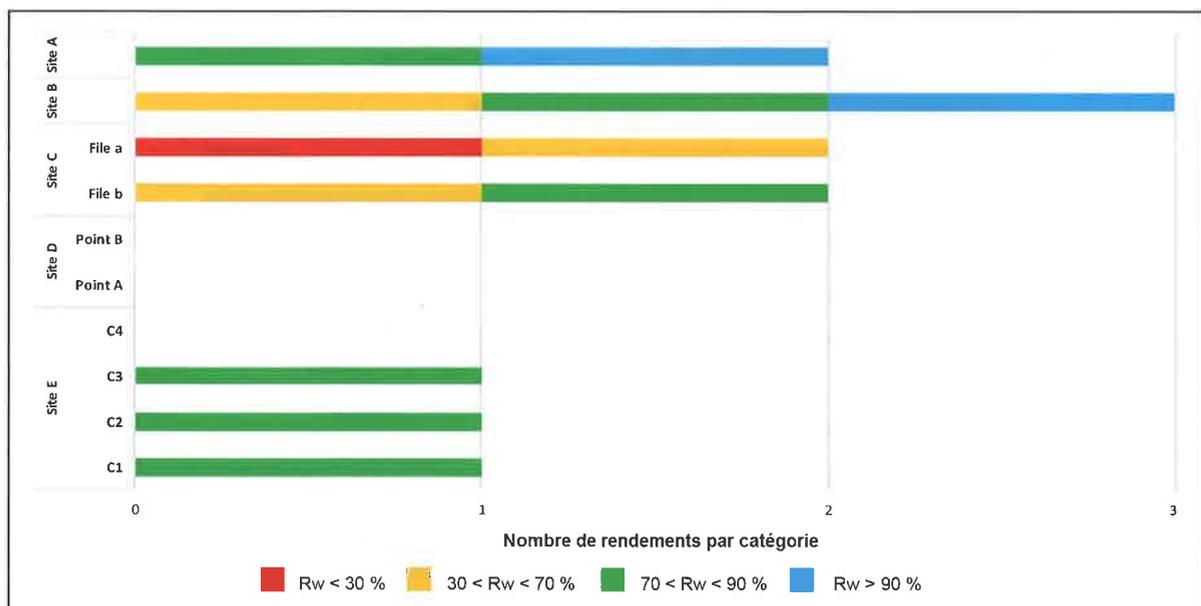


Figure 4. Nombre de métaux par classe de rendement Rw d'élimination de la phase eau

► caractérisation des paramètres chimiques, physiques et écologiques qui régissent ces performances d'épuration semble indispensable pour être en mesure de mobiliser le potentiel de ces zones pour éliminer les micropolluants de la phase eau. Pour cela, une approche à l'échelle des compartiments a été déployée pour décomposer la contribution de chacun d'entre eux aux performances globales d'épuration des ZRV.

1.4.3. Approche par compartiment

Dans le cadre du projet ZHART, tous les sites étudiés comportaient plusieurs compartiments. Le plus complexe d'entre eux, le site E, est ainsi composé de cinq compartiments. La conception de chacun d'entre eux vise à mobiliser les différents processus qui participent à l'épuration. Par exemple, une roselière tend à ralentir les écoulements et à mettre l'effluent en contact avec le chevelu racinaire ; un delta favorise la photolyse en facilitant l'exposition aux rayons UV ; et un bassin plus profond permet de favoriser la décantation, la biodégradation par les biomasses en suspension ainsi que la photolyse (suivant le degré de pénétration de la lumière).

Afin d'investiguer la contribution de chacun de ces bassins aux performances d'épuration, ce site a fait l'objet d'un audit approfondi. Au cours de quatre campagnes, les R_w de chacun des composés ont été calculés au niveau de six points de mesures inter-

médiaires correspondant à la sortie de chacun des compartiments. Les résultats sont présentés pour deux molécules lors des campagnes sur la figure 5.

Deux modèles de contribution des compartiments sont révélés par les deux exemples présentés. Dans le cas du galaxolide, un composé que l'on retrouve dans les produits cosmétiques, l'abattement est « faible » ou « moyen » dans les premiers compartiments. Il est complété par les compartiments suivants qui favorisent l'adsorption et la décantation jusqu'à atteindre des performances « très bonnes » ($R_w > 90\%$) pour la zone lors de la première campagne, et « bonnes » ($R_w > 70\%$) pour la deuxième. L'impact des variations des conditions opérationnelles d'une saison à l'autre est également notable à cette échelle d'analyse. En effet, le rendement d'élimination du premier compartiment varie entre 56 % lors de la campagne C1 à 17 % lors de la campagne C3. Cette variation peut être mise en relation avec une variation des facteurs saisonniers, et en particulier une augmentation du débit. Dans le cas de la ciprofloxacine, un antibiotique, de bonnes performances d'élimination sont atteintes dès le premier compartiment qui favorise la photolyse. À la sortie de ce compartiment, le taux d'élimination de la phase eau est déjà supérieur à 70 % pour toutes les campagnes. Chacun des compartiments suivants contribue toutefois à compléter le traitement jusqu'à atteindre les R_w maximaux calculables.

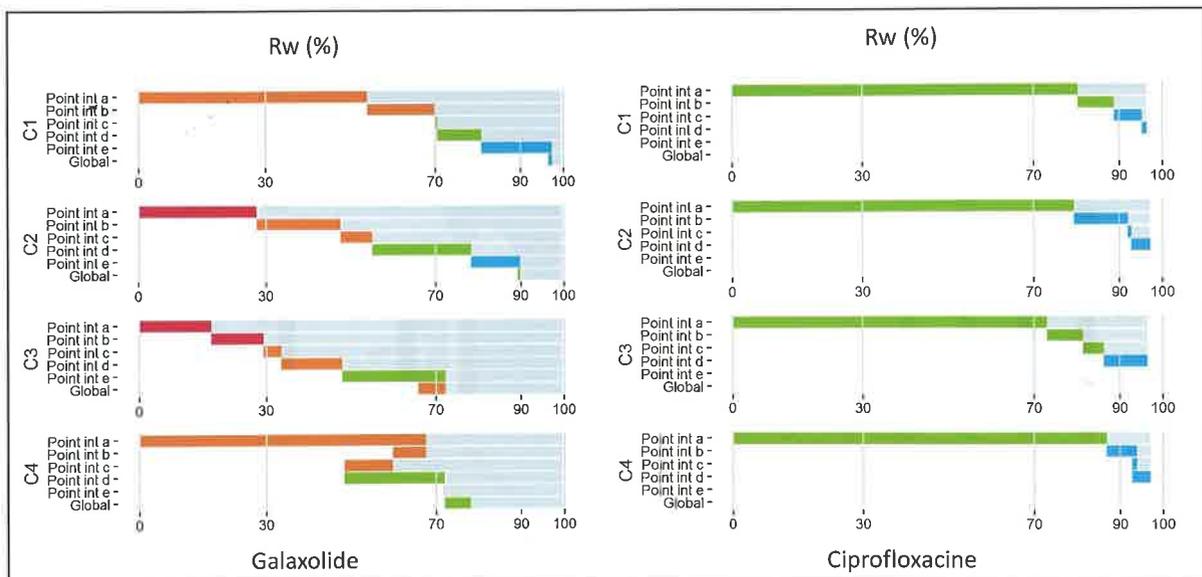


Figure 5. Rendement d'élimination R_w au sein de la phase eau tout au long du traitement pour deux composés lors de quatre campagnes sur le site E

Une approche investiguant le devenir des molécules à une échelle spatiale inférieure à celle de la ZRV permet d'appréhender les principales voies d'élimination qui participent aux performances globales. L'analyse des échantillons de sédiments et de végétaux a permis de compléter la démarche.

1.5. Occurrence dans les sédiments et les végétaux

Les analyses chimiques réalisées dans l'eau ont mis en évidence une grande diversité de comportements des molécules lors de leur transit dans les ZRV ainsi qu'une contribution aux performances d'élimination différentes de chaque compartiment pour les différentes molécules. Ces comportements traduisent le devenir des composés suivis : dégradation, prélèvements par les plantes et/ou stockage dans les sédiments. Afin d'investiguer la contribution de ces voies d'élimination, la présence des différentes molécules a été recherchée dans des échantillons de sédiments et de végétaux. Ce type de mesures traduit des résultats intégrés dans le temps. En effet, tandis que la présence dans l'eau peut être directement associée à une entrée de la molécule dans la zone pendant la durée de la campagne, les résultats obtenus dans les échantillons solides sont influencés par les apports passés, liés au stockage des contaminants dans les sédiments et tissus végétaux.

La figure 6 illustre l'occurrence de détection de deux molécules médicamenteuses recherchées dans les échantillons de sédiments et de plantes. Chaque

point représente une analyse effectuée dans la matrice indiquée. Un point coloré indique que la substance a été quantifiée, un cercle vide indique que la molécule n'a pas été détectée.

Il apparaît que la carbamazépine, un antiépileptique, est détectée dans quasiment tous les échantillons testés (figure 6a). L'accumulation dans les sédiments, mais également le prélèvement par les plantes contribuent donc à l'élimination de cette molécule de l'eau. Le rôle des plantes est par ailleurs confirmé par la détection de la molécule dans les parties aériennes (tiges et feuilles) des héliophytes. À l'inverse, le sotalol (figure 6b) un β -bloquant, n'est pas détecté dans tous les prélèvements de sédiments ou végétaux. Il est particulièrement peu détecté dans les parties aériennes de la plante (quatre détections pour 20 échantillons testés), indiquant un faible transfert ou une forte métabolisation au sein de la plante.

Différents comportements ont également été observés pour les métaux (figure 7). Ainsi, du zinc est détecté dans tous les échantillons, tandis que, si le cuivre est détecté dans tous les échantillons de sédiments, il l'est dans moins de la moitié des échantillons de tissu végétal. Dans ce cas, la métabolisation ne constitue pas une hypothèse valable, et il est donc possible de conclure que le prélèvement par les plantes n'est pas un mécanisme majeur régissant le devenir du cuivre dans les ZRV. Par ailleurs, les concentrations de polluants dans les sédiments ont été mesurées. Celles-ci sont inférieures aux concentrations mesurées dans les boues de STEU. ►

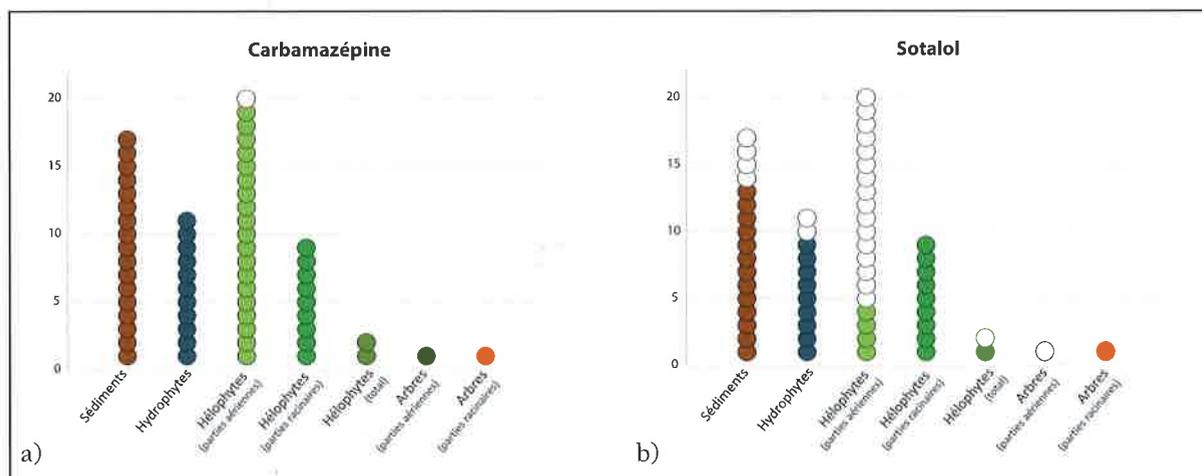


Figure 6. Exemple d'occurrence de deux médicaments dans les échantillons environnementaux de sédiments et de tissus végétaux réalisés lors des audits

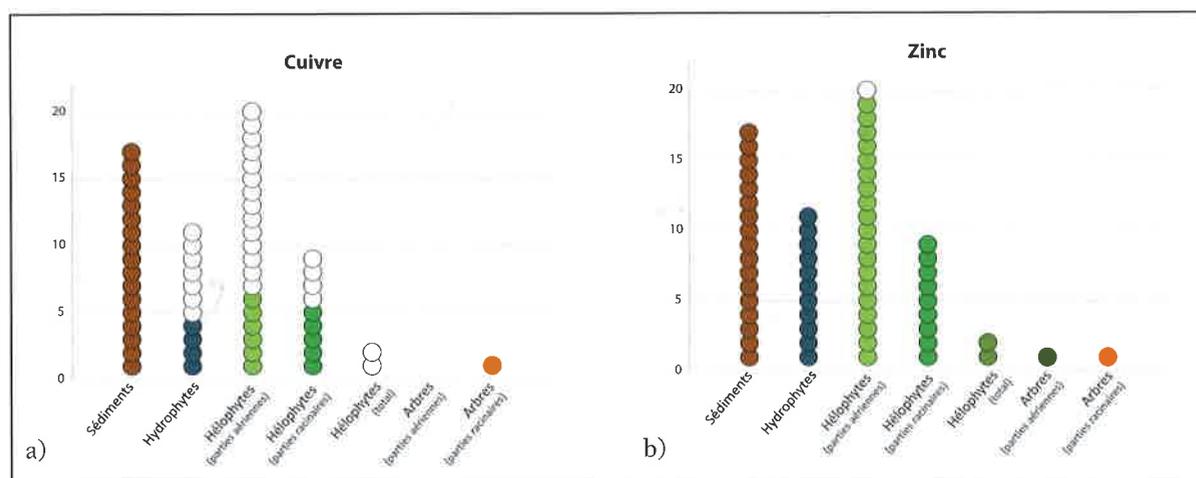


Figure 7. Exemple d'occurrence de deux métaux dans les échantillons environnementaux de sédiments et de tissus végétaux réalisés lors des audits

- En complément de l'examen de la contribution de chaque compartiment du site E, la recherche des 33 molécules de la liste dans les prélèvements de sédiments et de plantes a permis de progresser dans la compréhension des voies d'élimination impliquées dans les performances des ZRV.

1.6. Interprétation

Le rôle épurateur des ZRV, basé sur les capacités d'autoépuration des écosystèmes aquatiques naturels, est parfois remis en question. Les résultats observés sur les cinq sites audités ont permis de confirmer le potentiel épuratoire des ZRV dont le temps de séjour est supérieur ou égal à un jour vis-à-vis de certains micropolluants. En effet, pour certaines molécules suivies, les abattements dans l'eau sont supérieurs à 90%.

Toutefois, ces résultats mettent également en évidence une grande hétérogénéité de résultats. Des différences sont notables entre sites, entre substances, ainsi que pour une même substance sur différentes zones, ou sur une même zone à différentes saisons. Dans ce contexte, plutôt que de chercher à décrire les performances d'élimination, il est apparu intéressant d'explorer les paramètres qui induisent une telle variabilité. Pour cela, le suivi d'un site sur plusieurs campagnes, en distinguant chacun des compartiments qui favorise les différents processus d'autoépuration, a permis de mettre en lumière des modèles d'élimination différents pour des composés variés au sein d'une même ZRV. De plus, en recherchant les

composés dans différentes matrices (sédiments, partie aérienne ou racinaire des différents types de plantes), il a été possible d'appréhender la contribution relative de ces composantes dans le devenir des molécules.

Néanmoins, compte tenu de la complexité inhérente aux sites audités (interaction des processus, historique de contamination, nature et variabilité du mélange de contaminants auquel les zones sont exposées, etc.), ces résultats ne permettent pas une compréhension complète des voies d'élimination impliquées.

Pour y remédier, le projet ZHART a intégré, en plus des audits de sites, des séries d'expérimentations en conditions contrôlées (microcosmes). Le recours à ces conditions simplifiées d'exposition, impliquant notamment des témoins « eau », des témoins « substrat », différentes conditions de végétalisation et un historique connu de contamination a permis de compléter la caractérisation des voies d'élimination.

Plus qu'une hypothèse globale d'élimination de certains micropolluants présents dans l'eau, cette vision permettant de faire le lien entre les molécules à traiter, les voies d'élimination à mobiliser (photodégradation, adsorption, prélèvement par les plantes et biodégradation) et le design des dispositifs permet désormais de proposer des zones avec des garanties de performances d'élimination propres aux micropolluants ciblés. La conception et le dimensionnement des nouvelles ZRV, sont également définis pour tendre vers un temps de séjour hydraulique (TSH)

réel le plus proche du TSH théorique (éviter les courts-circuits). Dans le *tableau III*, quelques exemples de garanties (six sur 19 possibles en l'état actuel) pouvant être proposées dans le cadre de projet de ZRV sont présentés.

Le maintien dans le temps de ces différentes voies d'élimination demande toutefois un suivi avec des outils et des indicateurs adaptés à actualiser en fonction de l'évolution du site. En effet, les ZRV sont des écosystèmes soumis à des évolutions naturelles, mais aussi à la forte pression qu'exerce sur elle l'alimentation par un rejet de station d'épuration. Ainsi, il convient de mettre en œuvre un plan de suivi et de gestion afin de maintenir opérationnels les services produits.

Cette gestion s'appuie sur des actions de suivi et d'entretien qui visent à vérifier l'atteinte de ses objectifs et leur maintien par la prévention de possibles dérives. Le projet ZHART, via son consortium de partenaires, a permis de développer des solutions innovantes de surveillance et de gestion permettant de garantir l'atteinte et le maintien des services qu'ils soient hydrauliques, épuratoires, écologiques ou sociaux.

Famille	Substances	Rendement visé
Métaux	Zinc	> 50 %
Pharmaceutiques :		
– Antibiotiques	Ciprofloxacine	> 70 %
– Anti-inflammatoire	Ibuprofène	> 50 %
– β -bloquants	Propranolol	> 50%
Produits cosmétiques	Galaxolide	> 70 %
	Tonalide	> 70 %

Tableau III. Exemple de garanties d'élimination par les zones de rejet végétalisées

2. Fonctionnalité écologique et biodiversité

2.1. De la conception à l'exploitation à long terme

Dès leur conception, les ZRV mobilisent conjointement le génie écologique et le génie végétal. En effet, les investigations réalisées lors du projet ZHART ont confirmé la plus-value d'un concept de ZRV composée d'habitats typiques des milieux humides. Cette spécificité permet de favoriser les voies d'élimination ciblées préalablement et la colonisation d'espèces faunistiques/floristiques inféodées à ces espaces. La

diversité des habitats (communautés amphibiens, végétation aquatique, magnocariçaie, roselière...) permet d'accroître la richesse spécifique de la ZRV par l'accueil d'espèces qui y trouveront des conditions favorables à leur développement et à leur maintien. Avant la réalisation d'un projet, un inventaire faune/flore est réalisé afin d'évaluer l'intérêt environnemental du site ciblé. Le gain écologique lié à la réalisation de la ZRV doit être systématique vis-à-vis de son état initial. Dans ce cadre, des processus de surveillance et de contrôle particulièrement adaptés à ces écosystèmes ont été développés.

Le cortège floristique est choisi en fonction des capacités épuratoires des plantes, mais leur caractéristique autoécologique est prioritaire dans l'arbre de décision. Ainsi, au sein même de la zone, les associations végétales permettent le maintien d'espèces caractéristiques des zones humides de la faune des milieux humides. Si le mode de gestion est adapté à la ZRV, les fonctionnalités écologiques et la biodiversité au sein de l'aménagement pourront être en fonction des caractéristiques de chaque ZRV et se rapprocher des zones humides naturelles. Cependant, il ne faut pas oublier que ces ZRV sont soumises à une forte pression anthropique (débit, apports de nutriments...). Pour atteindre cet objectif, l'application de la norme Afnor du génie écologique (NFX 10-900) est indispensable lors des phases de conception et de réalisation de la future ZRV. En effet, le génie écologique est souvent négligé lors de ces étapes, intervenant à l'aval du génie civil alors qu'il devrait en conditionner la réflexion et le fonctionnement. La prise en compte du génie végétal est également importante. Il se traduit dans la conception et la réalisation de ce type de zone.

À terme, la sélection du cortège floristique d'une ZRV sera conditionnée par plusieurs informations. Les exigences du client (par exemple, l'aspect épuratoire primant sur l'aspect paysager ou pédagogique) sont à prendre en compte. Sur ce point, le projet R&D a permis de développer l'expertise sur des sélections de substrats/plantes endémiques à fonctionnalité épuratoire. Ces nouvelles connaissances vont permettre de déterminer la faisabilité de certaines plantations (choix des bons cortèges floristiques) suivant le type de sol de la nouvelle ZRV. Les caractéristiques de

l'effluent de la STEU considérée (diversité et concentration en micropolluants) et les conditions pédo-climatiques sont également des données importantes à intégrer.

De plus, dans le cadre du projet ZHART, un modèle biologique a été développé. Celui-ci vise à fournir une information prédictive de la qualité des peuplements macrobenthiques potentiellement présents dans une ZRV. Il ne peut en aucun cas prédire la présence ou l'absence réelle de taxons, mais plutôt la présence ou l'absence de groupements ainsi qu'une estimation de la variété taxonomique potentielle et de l'abondance globale qui pourra y être observée (caractère semi-quantitatif du modèle).

Le cœur du modèle est sa base de données, recueillant les informations sur les peuplements macrobenthiques et leurs habitats associés issus de zones humides naturelles et/ou aménagées. Cette base de données sera enrichie au cours du développement du modèle par l'acquisition de nouvelles données. Elle permet de réaliser des « prédictions » sur les peuplements qui pourront être potentiellement présents dans la zone selon les habitats qu'on y implante.

D'autres facteurs sont bien évidemment pris en compte comme la conception du site (dimensionnement et objectifs visés), la qualité des rejets qui y seront déversés ainsi que la présence de connexions entre la zone et les milieux environnants (Trame verte et bleue).

Le modèle biologique conceptuel se découpe en sept modules :

- le module « Variables de contrôle » regroupe les variables environnementales et anthropiques. Elles ont un rôle de pondération vis-à-vis de l'évolution temporelle de la valeur biologique d'un site ;
- le module « Caractérisation des milieux » constitue l'élément essentiel de ce modèle. En effet, grâce à l'acquisition de données sur les peuplements macrobenthiques en zone naturelle et artificielle, les différentes valeurs d'habitats nécessaires aux calculs des valeurs biologiques d'un site pourront être déterminées ;
- le module « Base de données » sert d'intermédiaire de stockage des données acquises ;
- le module « Caractérisation des objectifs » permet la définition des buts à atteindre avant la construc-

tion du site et influe directement sur le module « Conception des scénarios de milieux » ;

– le module « Modélisation des scénarios » est l'étape clé où les différents scénarios vont être testés et leur potentiel biologique évalué. L'audit en fin de procédure (à partir d'un protocole spécifique) définira si le scénario retenu remplit les objectifs définis.

Une fois le site construit, le dernier module est celui du « Suivi », réalisé avec une procédure de suivi inédite, créée spécialement pour ce type de site.

Ce modèle se veut être une aide à la conception des nouvelles ZRV, car il permet de tester différentes hypothèses lors de la conception d'une zone pour choisir le scénario qui présenterait le potentiel de biodiversité le plus intéressant, en fonction de la qualité physico-chimique probable des rejets.

Lors de cette phase, le modèle biologique peut être appliqué aux scénarios retenus par le maître d'ouvrage. Des variantes seront proposées pour optimiser les scénarios qui présenteraient les plus fortes potentialités. Les principales étapes sont les suivantes :

- analyse de l'évolution interannuelle du potentiel biologique ;
- comparaison des scénarios proposés (figure 8) ;
- présentation au maître d'ouvrage et choix du modèle retenu.

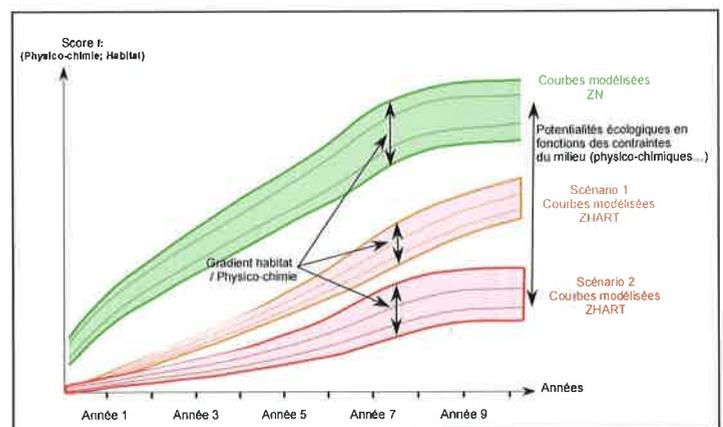


Figure 8. Comparaison de scores de différents scénarios et de leur évolution dans le temps

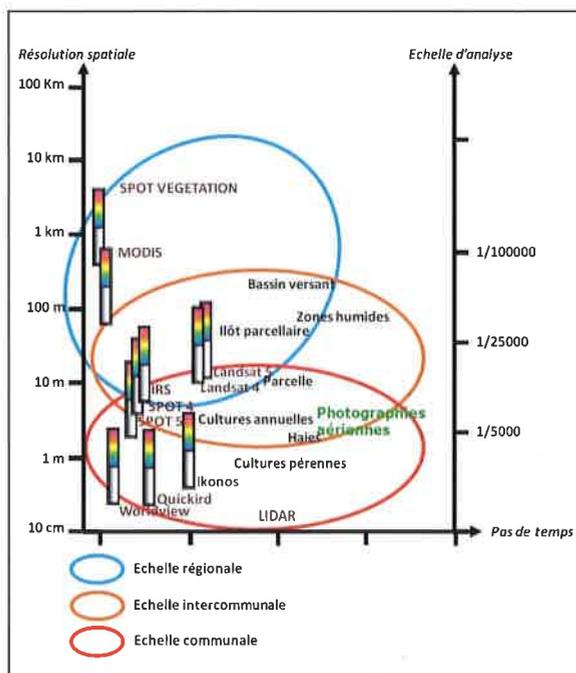
De plus, il permet, grâce à une estimation de l'évolution temporelle du site, de préciser comment ce dernier évoluera au fil du temps et ainsi de préciser les périodes où un entretien sera nécessaire. Il permettra également de définir si les objectifs initiaux du site en termes biologiques sont atteints grâce au

suivi qui devra être réalisé sur le site et à la comparaison des données du suivi au potentiel biologique théorique calculé par le modèle.

2.2. Intégration dans les corridors écologiques

Les ZRV sont généralement des sites de taille « moyenne », qui varient de quelques centaines de mètres carrés à quelques hectares. Les bénéfices de tels dispositifs pour la faune doivent être appréhendés au sein de la zone elle-même, mais également au travers de son influence au-delà de son périmètre. Les éléments à prendre en considération dans la mise en connectivité des zones dépendent donc des conditions de leur environnement et des échelles. Certes, l'effet d'une ZRV sur le potentiel de connectivité diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de sa localisation, mais son apparition risque de modifier la dynamique d'un certain nombre d'espèces, en particulier celles tributaires des zones humides et/ou à faible capacité de déplacement.

En fonction des objectifs (vision écocentrique vs anthropocentrique) de l'intégration des zones à la Trame verte et bleue (TVB) et de la qualité des données disponibles (souvent multisources), trois échelles au moins peuvent être identifiées (figure 9).



Source : HUBERT-MOY et coll. [2012].

Figure 9. Résolutions spatiales et échelles d'exploitation des données de télédétection

2.2.1. Échelle intracommunale, voire échelle du site

Les plans locaux d'urbanisme (PLU) et les cartes communales étant plus précis, ce sont les outils les plus adaptés pour l'examen de la place des projets de ZRV à l'échelle intracommunale. Ainsi, les tracés des corridors écologiques potentiels peuvent être identifiés avec une plus grande finesse. En plus des bases de données de l'Institut national de l'information géographique et forestière, d'autres données peuvent être employées pour l'évaluation fonctionnelle des zones humides à l'échelle locale, en combinant, par exemple, des informations issues de l'imagerie multispectrale et des données Lidar (*light detection and ranging*, détection et télémétrie par ondes lumineuses).

2.2.2. Échelle intercommunale à communale

Le schéma de cohérence territoriale (SCOT) est le document de référence à l'échelle intercommunale, il permet de penser l'insertion des ZRV au projet de territoire considéré, notamment dans le volet consacré à l'environnement et au paysage. La loi d'engagement national pour l'environnement (nommé aussi Grenelle II) du 12 juillet 2010, a introduit, entre autres, la prise en compte de la TVB dans les documents d'urbanisme (SCOT, PLU...). Par ailleurs, et selon le cas considéré, il semble que l'observation de l'effet du bassin versant est généralement plus pertinente à cette échelle.

2.2.3. Échelle régionale

À cette échelle, l'intérêt de la zone peut être appréhendé au moyen du schéma régional de cohérence écologique (SRCE) et du schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE). Il dépend essentiellement de sa superficie, de sa localisation, des espèces qui sont susceptibles d'y trouver refuge et de la valeur écologique et patrimoniale des habitats situés aux alentours.

L'effet de la zone sur le potentiel de connectivité est également influencé par la nature du relief, un aspect important qui permet d'appréhender le fonctionnement du réseau hydrographique, notamment à l'échelle du bassin versant. Cela dit, l'étendue du bassin versant peut couvrir des zones très variables, allant d'une dimension limitée à une échelle locale jusqu'à une échelle régionale. Enfin, pour chacune ►

- des échelles proposées, les zones à forte valeur écologique et patrimoniale, qui sont censées être déjà intégrées dans le SRCE, peuvent être identifiées.

3. Prise en compte des enjeux socio-territoriaux

Dans la partie socio-territoriale de la recherche ZHART, la ZRV est considérée comme un dispositif socio-technique (par opposition à technique), cela signifie que le dispositif doit trouver sa place dans un territoire donné, lui-même constitué de divers acteurs et d'interrelations entre eux, d'usages variés engageant différents individus, le tout à plusieurs niveaux territoriaux et, enfin, de multiples conditions « naturelles » (biogéographiques, topographiques et hydrologiques...). Les habitants, les usagers, les gestionnaires et les élus ont, en outre, des représentations différentes de l'objet sociotechnique et du territoire concerné, qui pèsent sur la conception, d'une part, et sur la réception de la ZRV, d'autre part. Enfin, ce territoire n'est pas un espace neutre et possède des caractéristiques foncières, politiques, économiques, sociales, paysagères et écologiques. Il importe donc de décrypter ces éléments en vue de qualifier le degré d'insertion potentiel et réel d'une ZRV.

3.1. Méthodologie de la caractérisation de l'insertion sociale et territoriale

Deux étapes méthodologiques se sont déroulées entre 2013 et 2015 sur huit sites, dont les cinq précédemment présentés (dans l'Hérault, les Bouches-du-Rhône, le Gard, l'Allier, la Charente-Maritime, le Lot et le Nord).

3.1.1. Analyse synoptique d'une insertion multidimensionnelle

Le projet ZHART a permis de développer une méthodologie de l'étude de l'insertion sociale et territoriale d'une ZRV en deux étapes. La méthode a tout d'abord consisté à évaluer 15 critères, relevant de cinq dimensions fondamentales (technique, spatiale, sociale, environnementale, institutionnelle), permettant ainsi de qualifier l'insertion territoriale en matière de « robustesse ». À la suite de la récolte de données indirectes sur les communes et intercommunalités concernées, une campagne d'enquêtes de terrain a été menée auprès des exploitants des installations, des

élus et des personnels administratifs et techniques et enfin des représentants des usagers des abords des ZRV (associations). À l'issue de cette phase d'enquête, un tableau synoptique des dimensions décisives pour qualifier l'insertion d'une ZRV est mis en œuvre et complété (tableau IV).

Associée à chaque critère, une hypothèse est énoncée et mise à l'épreuve au regard des sites étudiés ; à chaque hypothèse, une échelle de valeur est déterminée afin d'attribuer une note (gradation de 1 à 3) aux huit terrains pour l'ensemble des critères. Chaque site est représenté par un graphe radar qui présente les scores relatifs des 15 dimensions (figure 10).

3.1.2. Les focus groups comme outil de mise en valeur des controverses

Dans un second temps de la méthodologie, une étude fine des représentations sociales d'un panel d'individus résidants dans les communes de deux des ZRV a été menée sous forme d'entretiens collectifs (aussi appelés *focus groups*, soit : groupes de discussion), regroupant au total une trentaine de personnes (voir

Dimensions prises en compte	Critères d'évaluation
Dimensions techniques	Procédé de traitement
	Type de ZRV
Dimensions spatiales	Covisibilité de la ZRV
	Ancienne emprise de la ZRV
	Accessibilité du site
Dimensions sociales	Nombre et diversité des usages de la ZRV
	Investissement symbolique de la ZRV
	Compatibilité des usages environnants
	Acceptation locale
Dimensions environnementales	Objectifs écologiques
	Compatibilité avec les milieux environnants
	Connexion biogéographique et paysagère
Dimensions institutionnelles	Ancrage de la gestion de la ZRV
	Multiplicité des niveaux de portage
	Mobilisation environnementale des acteurs

ZRV : zone de rejet végétalisée.

Tableau IV. Dimensions et critères pris en compte dans l'analyse de l'insertion territoriale

AMALRIC et CIRELLI [2017] pour plus de détails sur le panel et le protocole méthodologique). Les échanges, enregistrés, abordent tout d'abord le degré de connaissance général des zones humides, leur caractérisation, leurs usages passés et actuels et les valeurs associées à ces milieux. Par la suite, les habitants sont interrogés sur leur connaissance de la ZRV implantée dans leur commune : situation, caractéristiques techniques, fonctionnement et, pour finir, sur la valeur écologique qu'ils associent à la zone de rejet. Le contenu des *focus groups* est passé au crible d'une analyse qualitative des données (voir aussi AMALRIC et CIRELLI [2017] et AMALRIC et coll. [2015]).

3.2. Résultats

3.2.1. Une nécessaire anticipation politique, sociale et territoriale

Les résultats de la première phase d'enquête montrent tout d'abord qu'il est nécessaire d'identifier les principaux enjeux locaux (économiques, priorités politiques et institutionnelles des acteurs du territoire, considérations paysagères, culturelles et sociales...) largement en amont d'un nouveau projet de ZRV. L'étude des prérequis locaux, des attentes des usagers et des habitants, des aspirations des gestionnaires des territoires permet en effet de mettre en œuvre un plan d'action adapté et un dispositif de suivi de l'insertion socio-territoriale ([AMALRIC *et al.*, 2015], voir aussi les recommandations ci-dessous § 3.3).

Par ailleurs, l'élaboration du tableau synoptique permet d'insister sur l'importance de la diversité des dimensions à prendre à compte et mineure en quelque

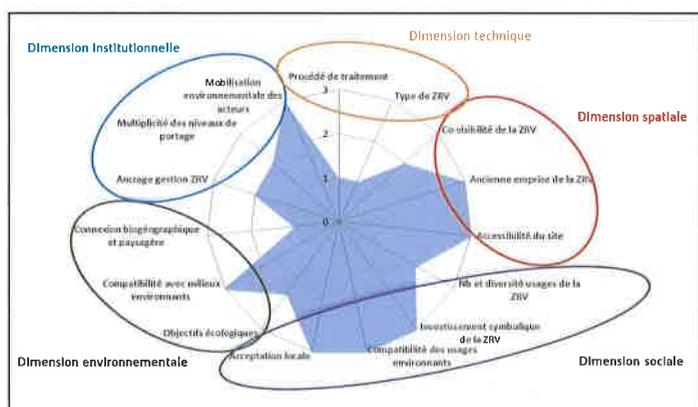
sorte l'importance de la disponibilité du foncier. Si cet aspect est souvent mis en avant par les exploitants, il apparaît que l'insertion de la ZRV est aussi bien soumise à l'ancrage institutionnel de la gestion de la ZRV, à la compatibilité avec les milieux ou les usages environnants qu'au foncier. La représentation sous forme de graphe radar permet de visualiser le large éventail d'éléments décisifs à prendre compte pour assurer l'insertion de la ZRV (figure 10).

3.2.2. La forte dépendance à la dimension sociale

Une typologie présente les huit sites étudiés lors du projet ZHART en fonction d'un critère de « robustesse » de l'insertion (figure 11) et permet de distinguer trois grandes tendances dans l'insertion territoriale des ZRV. Est considérée comme une insertion territoriale robuste une articulation entre les enjeux, les usages et les acteurs d'un territoire avec l'objet sociotechnique (ici la zone humide artificielle), et donc pas seulement l'articulation de l'objet avec les dimensions techniques ou environnementales de l'espace.

Cette recherche montre qu'une insertion territoriale robuste nécessite d'être en cohérence avec les projets des pouvoirs publics et des collectivités territoriales et avec les usages existants, de répondre à des enjeux pour la population locale et d'être compatible avec le paysage (ou de le valoriser) et avec le milieu. Dans le cas d'une insertion robuste, les cinq dimensions sont fortement représentées sur le graphe. Par exemple, dans le site D et le site « ouest », les contextes montrent une convergence entre le rôle que la ZRV prétend jouer localement et le projet territorial des élus et de la population pour l'espace investi par le dispositif. Les dimensions sociale, spatiale, environnementale, institutionnelle mais aussi technique obtiennent des scores importants. Leur insertion est donc qualifiée de robuste.

À l'inverse, pour les sites A, B et « l'autre site sud », les contextes montrent un investissement socio-territorial presque inexistant. La ZRV est davantage le produit d'une action politique conjoncturelle ou sectorielle que d'un projet territorial partagé (ce qui explique les faibles scores des dimensions sociale, spatiale et environnementale). Le dispositif ne suscite pas d'intérêt ou il est fortement déconnecté ►



ZRV : zone de rejet végétalisée.

Figure 10. Répartition des cinq dimensions de l'insertion territoriale présentes sur les représentations radars (site fictif)

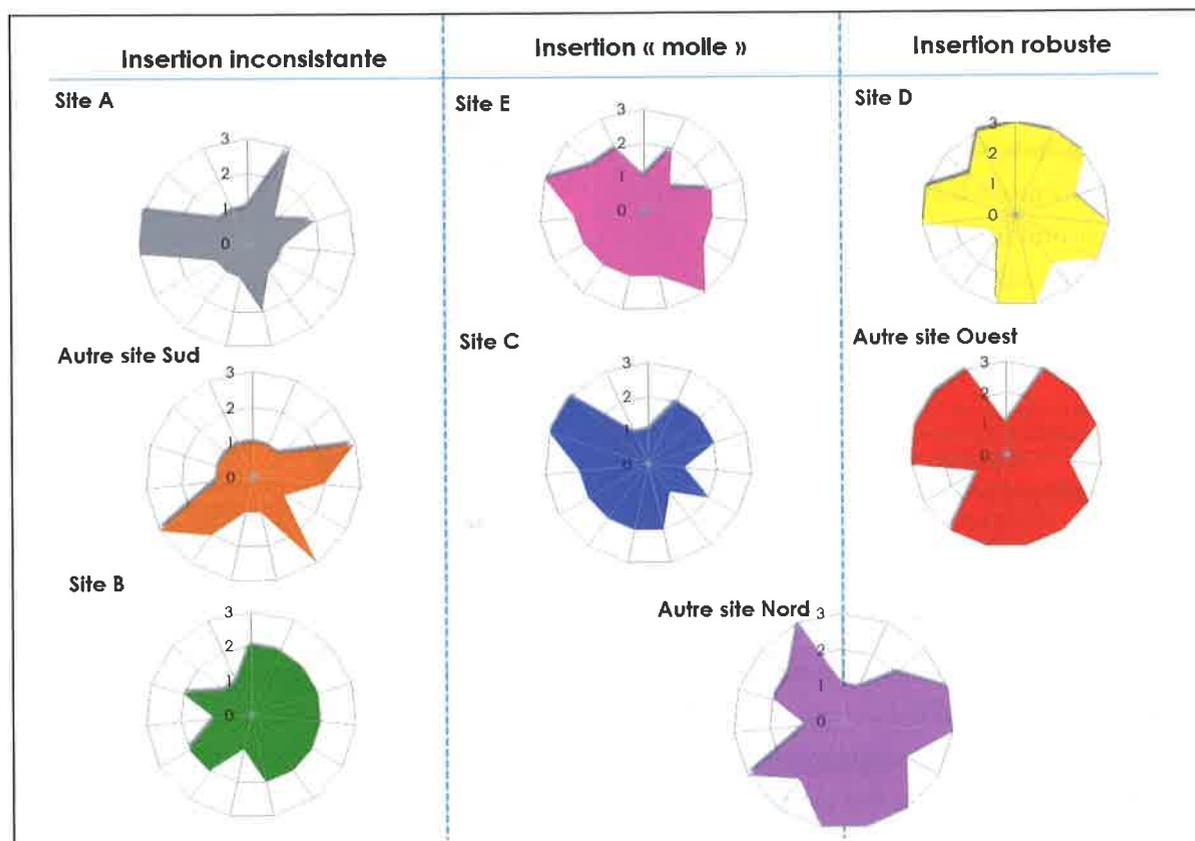


Figure 11. Typologie de l'insertion territoriale des sites étudiés dans le projet ZHART

► du point de vue territorial. Dans ces cas, la dimension technique ou spatiale (dont le foncier) ne permet pas d'assurer une insertion robuste et cette dernière est donc qualifiée d'inconsistante.

3.2.3. Réception sociale et adhésion aux ZRV

Les résultats issus des *focus groups* qui ont porté sur les sites E et C ont permis de mettre en lumière trois enseignements fondamentaux.

Premièrement, la plus-value attendue d'une ZRV par les habitants est épuratoire. En effet, ils sont unanimes quant à la dimension positive que présente le caractère innovant du dispositif, considèrent que cela représente un fort potentiel technologique à venir. Pour tous les habitants, l'importance de l'épuration de l'eau est mise en avant comme une problématique prioritaire.

Deuxièmement, la prétendue plus-value écologique apportée par les ZRV est questionnée. En effet, seuls les élus attribuent de l'importance aux aménités paysagères susceptibles de découler de l'implantation

d'une ZRV, les habitants sont plus réticents, arguant du contexte rural dont ils bénéficient déjà et de l'aspect « jardiné » de la ZRV qui ne le convainc pas. En outre, l'absence de certitude sur les abattements assurés par la ZRV minore l'intérêt des personnes interrogées lors des *focus groups* et participe donc d'une forme de scepticisme. Enfin, la biodiversité qui pourrait constituer une plus-value écologique importante n'agit ni comme une valeur aux yeux des habitants, ni comme un cadre d'action pour les gestionnaires : c'est un concept qui n'est pas facilement mobilisable et dont la pertinence est remise en question du fait de contextes environnementaux déjà riches (milieux humides plus « naturels » aux alentours, qualité du cadre de vie, des milieux environnants) [AMALRIC et CIRELLI, 2017].

Troisièmement, il est intéressant de distinguer les conditions d'adhésion aux ZRV en fonction des acteurs concernés. Pour les habitants, les conditions d'adhésion dépendent de la localisation de la ZRV, de

la prise en compte du contexte local par les exploitants (par exemple, une visibilité de la ZRV et une bonne ressemblance avec la flore alentour), de la maximisation de la multifonctionnalité (par exemple, lorsque la ZRV peut à la fois offrir une zone de pâture et un refuge ornithologique, tout en étant fréquemment accessible aux écoles), ainsi que de l'intégration institutionnelle (le portage par les élus des niveaux communaux et intercommunaux est un gage d'adhésion). *A contrario*, pour les élus, les conditions d'adhésion reposent sur l'articulation de la ZRV avec des enjeux locaux avérés, l'inscription dans un système d'action local (en fonction des réseaux techniques et institutionnels), mais aussi sur le soutien financier et l'accompagnement technique indispensable et, enfin, sur la qualité du système d'épuration qui se doit d'être éprouvé. Dernière catégorie d'acteurs, les exploitants des STEU, pour qui la ZRV est un objet expérimental, complexe, auquel ils n'adhèrent pas franchement,

tout en convenant que c'est dans l'air du temps et que cela peut constituer un outil de communication.

On retiendra quelques exemples de critères d'adhésion principalement exprimés lors des enquêtes de terrain et présentés dans la figure 12.

3.3. Recommandations

En amont de la « conception » d'une ZRV, les présentes recherches ont démontré la nécessité de veiller à la pertinence du dispositif d'un point de vue territorial et social (et pas seulement technique ou foncier). Pour ce faire, un diagnostic socio-territorial du territoire est préconisé. Ce diagnostic doit être fait à plusieurs échelles et en plusieurs étapes (figure 13). Il sera le garant de l'insertion socio-territoriale de la zone. Les échelles à prendre en compte sont liées au territoire considéré : locale (parcelles, commune), supralocale (intercommunalités, syndicats) et régionale.

La question des « acteurs » à prendre en compte dans un tel diagnostic est délicate, dans la mesure où le

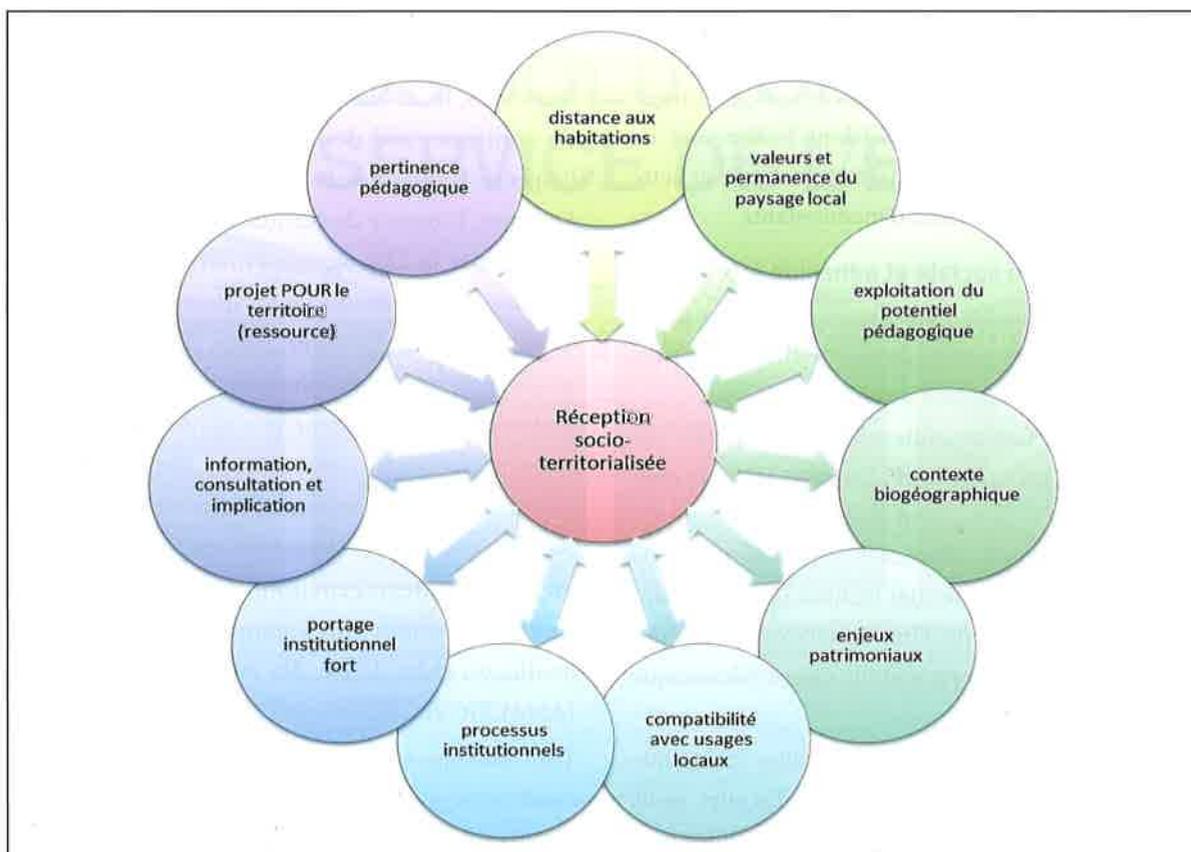


Figure 12. Exemple de critères de réception identifiés

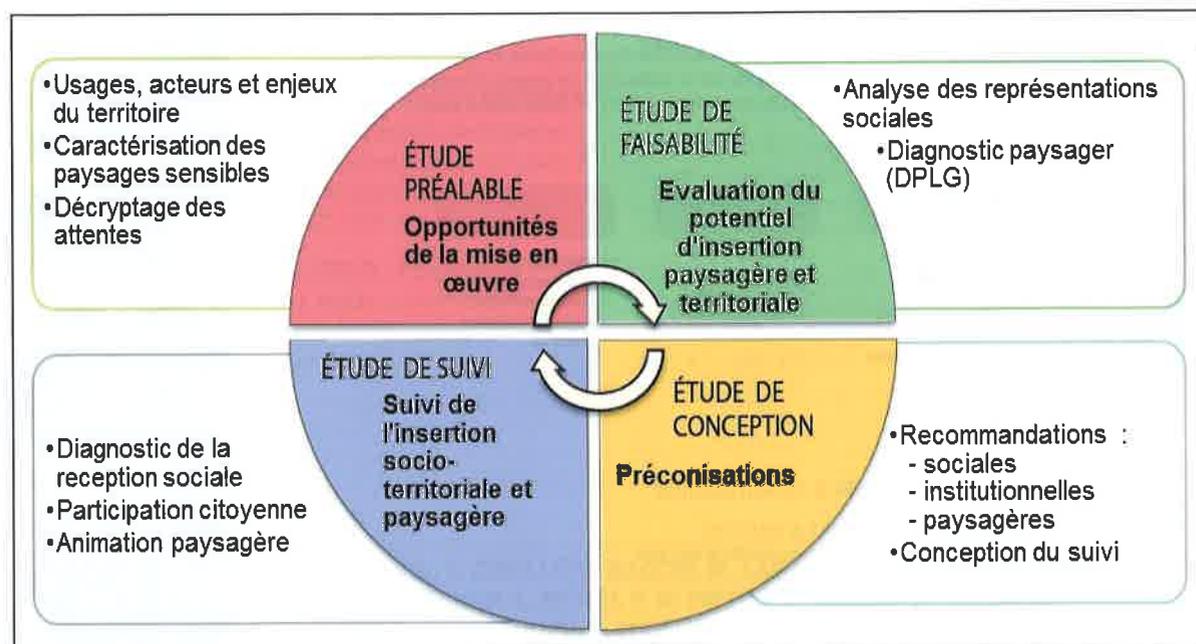


Figure 13. Récapitulatif des différentes étapes de diagnostic socio-territorial (© Citeres)

contexte local est déterminant. Il importe donc d'identifier les acteurs potentiellement concernés, et ce à divers niveaux d'implication et aux différentes temporalités du projet.

À la suite de la mise en œuvre de la ZRV, un dispositif de suivi sera également nécessaire, notamment dans le but de prendre en compte les évolutions paysagères (fermeture du paysage), sociales (démographies), économiques (modifications des usages agricoles, récréatifs), institutionnelles (alternance politique, recompositions territoriales administratives). La question de l'animation territoriale de la ZRV demandera une attention particulière, dans la mesure où elle interroge à la fois l'ouverture au public de la ZRV (observée dans certaines ZRV) et la question de la gestion des risques associés à des eaux issues de station d'épuration.

Bibliographie

AMALRIC M., CIRELLI C., LARRUE C. (2015) : « Quelle réception sociale pour l'ingénierie écologique Industrielle ? » *Vertigo* ; 15(3). Disponible en ligne : vertigo.infoma.site/internetrevues.org/16713

AMALRIC M., CIRELLI C. (2017) : « L'ingénierie écologique face aux territoires : enjeux et représentations so-

Les opportunités de développement - Conclusion

L'application de ce nouveau concept de ZRV s'ouvre naturellement vers la gestion des eaux pluviales strictes et des eaux issues des déversoirs d'orage. Dans ces cas de figure, le dimensionnement et le design des zones doivent être adaptés aux variations des débits (gestion des pics de crues). Lors des épisodes pluvieux, courants ou exceptionnels suivant les objectifs recherchés, le marnage est relativement important au sein de l'aménagement. Ainsi, la régulation des débits entrants, ou en sortie de certains compartiments, est nécessaire pour favoriser les différentes voies d'élimination des polluants et éviter les à-coups hydrauliques qui ont un impact sur le temps séjour. L'incidence de cette variation du niveau d'eau sur les végétaux est également prise en compte lors de la phase de conception écologique du projet.

ciales d'une innovation dans le domaine du traitement de l'eau » *Géocarrefour* ; 91(4). Disponible en ligne : geocarrefour.revues.org/10103

DORDIO A.V., CARVALHO A.J.P. (2013) : « Organic xenobiotics removal in constructed wetlands, with emphasis

on the importance of the support matrix ». *Journal of Hazardous Materials* ; 252-253 : 272-92.

HUBERT-MOY L., NABUCET J. VANNIER C., LEFEBVRE A. (2012) : « Cartographie des continuités écologiques : quelles données pour quelles échelles territoriales ? Application à la sous-trame forestière ». *Revue Internationale de Géomatique* ; 22(4) : 619-40.

MATAMOROS V., SALVADÓ V. (2012) : « Evaluation of the seasonal performance of a water reclamation pond-constructed wetland system for removing emerging contaminants ». *Chemosphere* ; 86(2) : 111-7.

SCHUEHMACHER J., BLIN E., JORDI J., PAOLETTI E. (2013) : *Zone Libellule du Sivom La Palus (34) : Évaluation des capacités épuratrices et étude de l'évolution de la biodiversité du site*. Rapport d'étude, 273 p.

VERLICCHI P., ZAMBELLO E. (2014) : « How efficient are constructed wetlands in removing pharmaceuticals from untreated and treated urban wastewaters? A review ». *Science of the Total Environment* ; 470-71 : 1281-306.

ZHANG T., XU D., HE F., ZHANG Y., WU Z. (2012) : « Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990-2010 ». *Ecological Engineering* ; 47 : 189-97.

Résumé

Y. PENRU, T. POLARD, M. AMALRIC, C. CIRELLI, M. BACCHI, M. LAFFORGUE, J. SCHUEHMACHER, M. CHAMBOLLE, M.-A. LEBAS, P. PROHIN, L. MEHDI, F. DI PIETRO, C. LARRUE, A. SELLIER, A. CADIÈRE, M.-P. SOM, N. TAPIE, H. BUDZINSKI, S. MARTIN, L. PERRIDY

L'ingénierie écologique appliquée aux zones de rejet végétalisées : élimination de micropolluants, biodiversité et intégration socio-territoriale

La directive cadre européenne sur l'eau (DCE) vise la reconquête de la qualité des milieux aquatiques et impose la réduction, voire la suppression, de nouveaux polluants (tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les pesticides, les métaux) de nos eaux dans les années à venir. Depuis une dizaine d'années, la construction d'ouvrages de génie écologique, utilisant les services écosystémiques et les mécanismes existants en zones humides, est une solution de traitement pouvant répondre aux exigences réglementaires de la DCE. Ces espaces aménagés entre la station de traitement des eaux usées et le milieu récepteur, appelés zones de rejet végétalisées (ZRV), ne sont pas considérés aujourd'hui comme faisant partie du dispositif de traitement. Actuellement, les ZRV existantes sont très hétérogènes et il n'existe pas de règles de conception ni de dimensionnement permettant de garantir des fonctionnalités épuratoires et le développement d'une biodiversité. Le projet Zone Humide ARTificielle (ZHART) avait pour finalité de développer et d'industrialiser de nouvelles ZRV assurant des

garanties d'élimination des micropolluants, mais aussi de protéger la diversité écologique, et d'en favoriser l'intégration paysagère. Dans ce but des audits hydrauliques, épuratoires et écologiques mais aussi d'insertion territoriale ont été effectués sur plusieurs ZRV. Les résultats ont permis de confirmer le potentiel épuratoire des ZRV ayant un temps de séjour supérieur à un jour. Toutefois, ils mettent également en évidence une grande hétérogénéité de performance entre sites, entre substances, ainsi que pour une même substance sur différentes ZRV, ce qui confirme le besoin d'une conception et d'un dimensionnement adaptés pour garantir des performances de traitement par les ZRV. Grâce au développement d'un modèle biologique, le concept de ZRV composée d'habitats typiques des milieux humides a été confirmé. Cette spécificité permet de favoriser les voies d'élimination des polluants et la colonisation d'espèces inféodées à ces milieux. L'étude d'insertion sociale et territoriale des ZRV a mis en évidence la nécessité d'identifier dès l'amont d'un nouveau projet les principaux enjeux locaux.

Y. PENRU, T. POLARD, M. AMALRIC, C. CIRELLI, M. BACCHI, M. LAFFORGUE, J. SCHUEHMACHER, M. CHAMBOLLE, M.-A. LEBAS, P. PROHIN, L. MEHDI, F. DI PIETRO, C. LARRUE, A. SELLIER, A. CADIÈRE, M.-P. SOM, N. TAPIE, H. BUDZINSKI, S. MARTIN, L. PERRIDY

Ecological engineering applied to tertiary constructed wetlands: micropollutants removal, biodiversity and socio-territorial integration

The European Water Framework Directive (WFD) aims for the recovery of aquatic environments quality and impose the reduction or removal of new pollutants (such as PAHs, pesticides, metals) from our waters in the coming years. For ten years, ecological engineering works, based on ecosystem services and mechanisms existing in natural wetland, became a treatment solution that could answer to the WFD's regulatory requirements. These spaces between the wastewater treatment plant (WWTP) and the receiving waterbody, known as tertiary constructed wetlands (TCW), are not taken into account today as part of the treatment system. At present, the existing TCW are very heterogeneous and there are no design or rules to guarantee the micropollutants removal neither the development of biodiversity. The ZHART (Artificial Wetland) project was designed to develop and industrialize the TCW at WWTP outlet in order to create treatment refining zones, guaranteeing the micropollutants removal but also providing

guarantees on ecological diversity and promoting their landscape integration. For this purpose, hydraulic, purification and ecological audits have also been carried out on several TCWs. The results confirmed the purification potential of TCW with hydraulic residence time greater than one day. However, these assessments also highlight a great heterogeneity of performance between sites, between substances, as well as for the same substance on different TCWs, confirming the need for a design and sizing adapted to guarantee the TCW performances. Thanks to a biological model developed during the project, the concept of TCW composed of typical habitats of natural wetlands has been confirmed. This specificity favors the different pathways for micropollutants removal and their colonization by wetland-dependent species. The study of the social and territorial integration of TCW highlighted the need to identify the main local issues from the beginning of a new project.

Liste des annonceurs

- APTEN (155)
- ABB ÉQUIPEMENTS (59)
- ABB FRANCE (43)
- ADOPTA (75)
- AERZEN (40)
- ALBIN PUMP (88)
- ALISON (39)
- AMS (68)
- AOIP (87)
- AQUA MESURE (50)
- AQUALABO (3^e de couv.)
- ARTELIA (187)
- AS TECHNOLOGIES (63)
- ASSA ABLOY (2, 36)
- ASTEEL (86, 114, 124, 162)
- ATB FRANCE (5)
- ATELIER REEB (21)
- AVK FRANCE (151)
- BASF (31)
- BENE INOX (132)
- BEREST (98)
- BG INGENIEURS CONSEILS (131)
- BIOME (147)
- BIOTEC (50)
- BIRCO (76)
- BONNA SABLA (101)
- CDI TECHNOLOGIES (162)
- CEBEDEAU (76)
- CGLE (80)
- CIFEC (126)
- CONFLUENCES (27)
- CYCL'EAU LE SALON (156)
- DATALINK (40)
- DENIOS (ENCART LIBRE)
- DENSILINE (106)
- DIMELCO (102)
- DYKA (136)
- EAU DE PARIS (17)
- EGGER (71)
- ELECTROSTEEL (175)
- ELSTER WATER - HONEYWELL (147)
- EM TECHNIK (79)
- EME (39)
- EMO (32)
- ENDRESS HAUSER (135)
- EUROCHLORE (117)
- FAIVRE (106)
- FELJAS & MASSON (184)
- FIRMUS FRANCE (122)
- FLOWLAB (140)
- FLUKSAQUA (4^e de couv.)
- FONDATEL (79)
- FSTT (13)
- FUNKE FRANCE (110)
- GAZECHIM (93)
- GL BIOCONTROL (44, 53)
- HERMES TECHNOLOGIE (121)
- HIDROSTAL (114, 187)
- HITEC (118)
- HOBAS (72, 113)
- IDEX (28)
- IDEXX (10, 22)
- IFC (50)
- INGENOV (143)
- IRSTEAL (6)
- IT MATION (54)
- KATADYN FRANCE (125)
- KERNEOS (162)
- LABOCEA (49)
- LACROIX SOFREL (152)
- MACHEREY NAGEL (148)
- MY NDS (165)
- NETZSCH (40)
- OFFICE DE L'EAU DE LA RÉUNION (118)
- OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU (54)
- OLENTICA (176)
- OXYDRO (118)
- PEDROLLO FRANCE (176)
- PELIFE (140)
- PLASSON (161)
- POLYMEM (135)
- PREMIER TECH FRANCE (152)
- PROMINENT (67)
- REHAU (2^e de couv.)
- RELIN EUROPE (8-9)
- SAINT DIZIER ENVIRONNEMENT (179)
- SAINT GOBAIN WEBER (84)
- SAINTE LIZAIGNE (97)
- SDEC (98)
- SENSUS (109)
- SERINOL (109)
- SEWERIN (93)
- SGS MULTILAB (82)
- SHIMADZU (169)
- SHAH CROULT ET PETIT ROSNE (64)
- SIDAC (79)
- SIDE INDUSTRIES (105)
- SIKA FRANCE (139)
- SIMOP (94)
- SNECOREP (180)
- SOLYD (60)
- SOTERKENOS (184)
- SWAN (18)
- TECHFINA (170)
- TECHNEAU (180)
- TECOFI (60)
- TEKMAD (35)
- TERRE APPRO (166)
- TROJAN (131)
- TUBOSIDER (144)
- UFT FRANCE (169)
- VAG VALVES (79)
- VEGA TECHNIQUE (14)
- VERDI (118)
- YARA (166)