



# Les zones de rejet végétalisées : repères scientifiques et recommandations pour la mise en œuvre

Laurent Basilico, Stéphanie Prost-Boucle,  
Lauriane Vasseur, Estérelle Villemagne

Sommaire

N°25

- 1 - Les ZRV et l'hydrologie
- 2 - Les ZRV et l'épuration de l'effluent
- 3 - Intégration et fonctions des ZRV au sein des territoires
- 4 - Recommandations pour la mise en œuvre pratique

Implantées en sortie des stations de traitement des eaux usées (Steu), les zones de rejet végétalisées (ZRV) sont souvent présentées comme un moyen complémentaire de protection des milieux naturels vis-à-vis des polluants, en complément de l'abattement réalisé par les stations de traitement des eaux usées et des efforts indispensables menés, en amont, pour réduire à la source les émissions.

En France, elles font l'objet d'un engouement croissant depuis une quinzaine d'années. En 2011, l'atelier ZRV du groupe de travail Évaluation des procédés nouveaux d'assainissement des petites et moyennes collectivités (Epnac) en a recensé 560 dans 35 départements, de formes et de dimensions très variables, dont la moitié implantée en sortie de Steu de moins de 500 équivalents habitants (EH). Leur surface utile, souvent conditionnée par le foncier disponible, peut varier de 0,01 m<sup>2</sup>/EH à 50 m<sup>2</sup>/EH.

Par quels mécanismes une ZRV opère-t-elle une réduction de volume ou un lissage des débits transmis au milieu récepteur ? Dans quelle mesure réalise-t-elle un abattement sur les différentes substances polluantes (macropolluants, micropolluants, microorganismes) ? Quels sont les rôles précis de l'eau, du sol, des végétaux dans ces mécanismes ? Quels sont ses autres impacts – positifs ou négatifs – sur le milieu ?

@ Irstea



Le 1<sup>er</sup> janvier 2017, l'Agence des aires marines protégées, l'Atelier technique des espaces naturels, l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques et Parcs nationaux de France regroupent leurs compétences pour créer l'Agence française pour la biodiversité.

Définie comme un « espace aménagé entre la station de traitement des eaux usées et le milieu récepteur superficiel de rejet des eaux usées traitées » (arrêté du 21 juillet 2015), une ZRV ne fait pas partie de la Steu elle-même mais de son périmètre, encadré par la directive européenne relative au traitement des eaux résiduaires urbaines (Deru).

Ouvrage artificiel relevant du génie écologique (à la différence des zones humides, naturelles) la ZRV est en général constituée d'un ou plusieurs éléments de trois types définis par l'atelier ZRV du groupe Epnac : prairie, bassin et/ou fossé.

Objets de plusieurs projets de recherche récents (Liste p. 19), les effets potentiels des ZRV restent pour certains controversés, et les éléments disponibles sont insuffisamment communiqués aux collectivités et gestionnaires de l'assainissement.

Réunissant une vingtaine d'acteurs (scientifiques, bureaux d'études, agences de l'eau, industriels de l'assainissement, Satese, ministère en charge de l'écologie, Onema), la journée d'échanges organisée par l'Onema le 17 décembre 2015 a dressé un état des lieux des connaissances et lacunes actuelles, et posé les premiers jalons vers une position nationale.

Cette publication, fruit d'une rédaction collective, synthétise les éléments présentés à cette occasion et les échanges qui en ont découlé. Elle aborde successivement les différentes fonctions associées aux ZRV : fonction hydraulique, fonction épuratoire par l'eau, le sol et les plantes, et plus brièvement les autres objectifs visés quant à la biodiversité, la pédagogie ou l'aspect paysager. Son dernier chapitre livre quelques repères économiques et juridiques, et débouche sur des recommandations pratiques pour la mise en œuvre et l'entretien des ZRV.

## 1 - Les ZRV et l'hydrologie

Deux grandes fonctions hydrauliques sont attendues d'une ZRV. D'une part elle peut assurer un lissage des pics de débit (par limitation physique du débit de sortie, mise en place d'un volume tampon et création de pertes de

charge) ; d'autre part elle peut réaliser une réduction des volumes rejetés au milieu naturel superficiel (cette fonction dépend surtout de la perméabilité du sol et du temps de séjour de l'eau dans la ZRV) Figures 1 et 2.

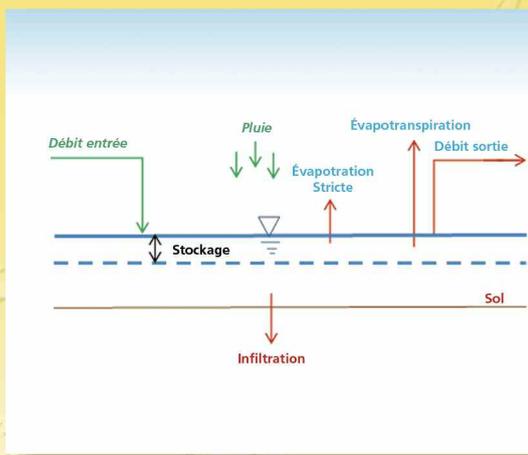


Figure 1. Schéma des échanges d'eau dans la zone de rejet végétalisée. Source : Irstea

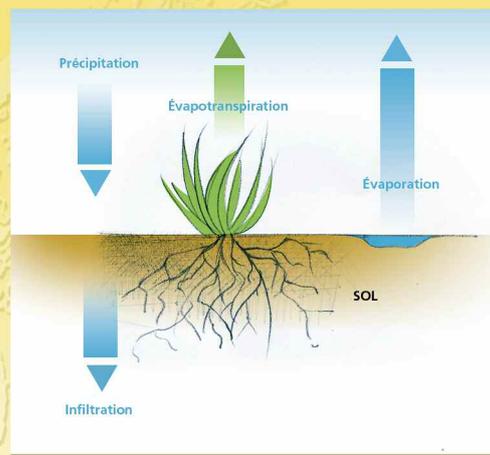


Figure 2. Échanges eau, sol, plantes.

## 1.1 Lissage des pics de débit : jusqu'à 75 %

La ZRV peut réaliser un fort lissage des pics de débit. Ce rôle de tampon hydraulique a été mis en évidence par le suivi des débits en entrée/sortie de cinq ZRV suivies dans le cadre du projet Épuration en eau courante (Epec), conduit par IRH IC. Dans le cas de l'étude de l'Agence de l'eau Adour-Garonne (AEAG), les mêmes conclusions sont obtenues pour trois des cinq sites (ZRV de type noues + bassins ou noues + bambouseraie) suivis, où le lissage du pic de débit peut atteindre 75 %. Ce résultat, obtenu en 2015, est calculé avec une formule de rendement de diminution de débit de pointe horaire soit :  $1 - (Q_{\text{max}} \text{ de pointe horaire sortie} / Q_{\text{max}} \text{ de pointe horaire entrée})$ . Pour le calcul d'abattement des coefficients de pointe (coefficient de pointe obtenu par le ratio  $Q_{\text{max}} \text{ de pointe} / Q \text{ moyen}$ ), le résultat est beaucoup plus faible. Ce lissage peut être intéressant lors des surverses (épisodes orageux) : le rejet des polluants au milieu récepteur est étalé dans le temps. En dehors de ces périodes, il contribue aussi à préserver les caractéristiques hydromorphologiques du cours d'eau récepteur.

La fonction de lissage des pics de débit suppose que la ZRV présente un volume libre (ou "revanche") suffisant pour stocker l'excédent d'effluent et éviter le débordement lors des épisodes orageux.

## 1.2 Réduction du volume rejeté et objectif « zéro rejet »

La ZRV peut diminuer le volume d'eau rejeté directement au milieu naturel superficiel par deux mécanismes : l'infiltration et l'évapotranspiration (évaporation + transpiration par les végétaux). Ces pertes de volume d'eau sont d'autant plus importantes que les surfaces d'infiltration et les surfaces d'évapotranspiration sont importantes. Par exemple, le bilan hydrique de la ZRV de Saint Just (34) suivie par Suez Eau France en 2014, fait état de 55 % à 70 % du débit arrivant à l'exutoire, 31 % évacués par infiltration, et 0,5 % (janvier) à 14 % (juin) correspondant à de l'évapotranspiration. La mesure des débits en entrée/sortie de cinq ZRV suivies dans le cadre du projet Epec (conduit par IRH IC), a également confirmé que l'évapotranspiration a lieu principalement en été.

Les pertes par infiltration sont d'autant plus importantes que le temps de séjour de l'eau dans la ZRV est important (section 1.4).

À temps de séjour égal, les pertes par infiltration sont fonction de la perméabilité du sol (section 1.3) et de son degré de colmatage. La présence de plantations peut, jusqu'à une certaine mesure, atténuer le colmatage des surfaces d'infiltration.

Une alimentation permanente depuis la Steu favorise le colmatage des surfaces d'infiltration alors qu'un

Cette fonction de lissage dépend des *pertes de charge* (« ralentissements ») hydrauliques entre l'entrée et la sortie de la ZRV. Ces pertes de charge peuvent être créées ponctuellement, par exemple en insérant un ou plusieurs seuils le long du chemin d'écoulement, ou, d'une manière plus diffuse, par la création d'aménagements diversifiés contribuant à ralentir l'écoulement au sein de la ZRV. Ces aménagements doivent cependant être répartis de manière homogène sur une section de l'écoulement, pour ne pas conduire à l'apparition de zones mortes (section 1.4).

En particulier, le lissage peut être assuré en limitant physiquement le débit sortant de la ZRV, par exemple par la pose de canalisations ou la mise en place d'un seuil à l'aval de l'ouvrage.

régime alterné permet de maintenir une infiltration plus importante pendant les phases d'alimentation : une mise à sec périodique (hebdomadaire par exemple) favorise la minéralisation des dépôts. À volume entrant égal, l'alimentation alternée permet aussi d'avoir une hauteur d'eau supérieure dans la ZRV et donc une meilleure infiltration par l'effet de la pression de l'eau. Elle pérennise aussi les capacités d'infiltration dans le temps.

Les pertes par évapotranspiration sont favorisées par un bon ensoleillement, des températures élevées, une faible humidité de l'air et par le vent. Ces points peuvent être pris en compte à la conception de la ZRV par une orientation favorable, et bien sûr en privilégiant des végétaux ayant une bonne capacité d'évapotranspiration. Quoi qu'il en soit, même dans les cas les plus favorables, Sinbio précise que l'évapotranspiration ne dépassera pas quelques centimètres par jour.

Dans tous les cas, le « zéro rejet » (infiltration et évapotranspiration de la totalité du volume entrant) reste un objectif difficile à garantir. Il est cependant attendu par la police de l'eau sur certaines ZRV : par exemple, en Adour-Garonne, il est demandé fréquemment du fait de la faible aptitude des cours d'eau à diluer les rejets en période d'étiage.

### ● 1.3 Étude du sol : nécessaire mais difficile

La perméabilité du sol constitue un critère déterminant pour la fonction de réduction du volume rejeté par une ZRV (section 1.2). Lorsque cette fonction est un objectif de l'ouvrage, il est donc indispensable de réaliser une étude de sol intégrant une mesure de la capacité d'infiltration. À noter cependant que la capacité d'infiltration est susceptible d'évoluer au cours de la vie de l'ouvrage.

L'étude du sol reste cependant un défi technique. La réalisation de tests d'infiltration par IRH IC dans le cadre de l'étude menée pour l'AEAG (sur le sol en place à côté de la ZRV et sur le fond de la ZRV une fois en eau, comparé aux résultats des études initiales) souligne les difficultés à obtenir une valeur représentative de la perméabilité d'un sol en place. Selon IRH IC, le test qui semble le plus adapté

pour le dimensionnement des ZRV est le test à la fosse, qui permet d'appréhender facilement la perméabilité (hors colmatage) à une profondeur donnée ainsi que l'infiltration latérale. Une réflexion a été entamée dans le cadre du programme ZRV Onema-Irstea afin d'améliorer l'estimation des capacités d'infiltration d'un site en couplant différentes méthodes (géophysiques, géotechniques et hydrauliques). Irstea développe en parallèle une technique de traçage par tomographie de résistivité électrique sur la ZRV expérimentale de Biotrytis (33), qui vise à estimer la vitesse d'infiltration ainsi qu'à localiser des zones colmatées. À noter que l'étude de sol a fait l'objet d'une recommandation de l'atelier ZRV d'Epnac, assortie d'une fiche pratique.

### ● 1.4 Le temps de séjour hydraulique : un critère-clé

Le temps de séjour de l'eau dans la ZRV conditionne étroitement la réduction du volume sortant (section 1.2) mais aussi les mécanismes épuratoires de l'ouvrage (chapitre 2). Plus il est important, plus des processus de dégradation et/ou rétention de la pollution peuvent avoir lieu (décantation, photo-dégradation, adsorption, activité biologique, etc.). En théorie, il est défini par le ratio entre le volume de l'ouvrage ( $m^3$ ) et le débit de référence ( $m^3/j$ ).

Le temps de séjour réel ( $TS_{réel}$ ) est toujours inférieur au temps de séjour théorique, puisque l'écoulement n'est jamais parfaitement uniforme. Ce point a notamment été observé dans le cadre du suivi de trois ZRV de 2009 à 2013 dans le Haut-Rhin par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et le Satès 68, et de l'étude Agence de l'eau Rhin-Meuse-Engées-ICube de 2013, pour laquelle des expériences de traçage ont été menées sur trois ZRV de différents types (bassins, fossés et associations), selon les saisons. Des écarts de l'ordre de 15 à 25 % sont fréquents. Mais dans certains cas, des temps de séjours réels jusque trois fois plus courts que les temps de séjour

théoriques ont pu être constatés : de tels écarts témoignent d'erreurs dans la conception de l'ouvrage.

Cette différence s'explique principalement par la présence de zones mortes (où l'eau se renouvelle peu ou pas) et de courts circuits hydrauliques (passages préférentiels lors d'écoulement de l'eau). Par ailleurs, le  $TS_{réel}$  peut aussi être abaissé par la réduction du volume effectif de l'ouvrage au cours du temps (comblement par des boues, développement des végétaux...). Ces phénomènes traduisent une mise en œuvre non optimale de la morphologie de la ZRV lors de sa conception et/ou de son évolution.

Pour éviter la formation de zones mortes et de courts circuits hydrauliques, les pertes de charge (seuil ou enrochement par exemple) doivent être uniformes sur toute la largeur de l'écoulement. Dans le cadre d'une thèse en cours (Engées Icube) des préconisations de dimensionnement des ouvrages seront proposées pour optimiser le temps de séjour de l'eau dans la zone de rejet végétalisée.

## 2 – Les ZRV et l'épuration de l'effluent

En parallèle des fonctions hydrauliques, l'autre grande fonction attendue de la ZRV concerne l'élimination des polluants. Les mécanismes pouvant conduire à cette épuration supplémentaire font l'objet de ce deuxième

chapitre, qui aborde successivement les possibilités d'abattement dans l'eau de la ZRV pour les macropolluants, les micropolluants et les microorganismes, et le rôle joué par le sol et les plantes.

## 2.1 Macro-polluants : abattement faible ou nul en hiver, dépendant du type de Steu en été

Le traitement des macro-polluants dans une ZRV est basé sur des phénomènes de dégradation micro-biologique pour le carbone (C) et l'azote (N), de sédimentation, de réactions physico-chimiques, ainsi que d'absorption par les végétaux des nutriments, azote et phosphore (P).

En fonction des concentrations dans les eaux entrantes (Figure 3), notamment la présence ou non d'un traitement de N et P sur la station en amont et surtout en fonction des surfaces mises en œuvre, les flux absorbés sont plus ou moins importants au regard des flux appliqués. Une partie des macro-polluants captés s'accumule durablement dans les sédiments (qu'il faudra tout de même extraire un jour du site) mais pour une autre partie, un relargage saisonnier dans l'eau est possible. Il existe également un phénomène naturel d'hydrolyse de l'azote et du phosphore organique résiduel présent dans les rejets de Steu, remettant en solution ces macro-polluants.



Figure 3. Arrivée de l'eau, issue d'une station d'épuration des eaux usées, dans la zone de rejet végétalisée.

En saison automnale/hivernale, il n'y a souvent pas ou peu d'abattement sur les paramètres globaux comme le carbone organique total (COT), l'azote (N), et le phosphore (P) – voire même une légère dégradation de la qualité de l'eau. Ce constat, confirmé notamment lors des campagnes de mesures réalisées sur trois sites suivis par Veolia, s'explique par le fait que la période hivernale est défavorable à différents processus qui interviennent pour l'élimination des macro-polluants (nitrification/dénitrification, assimilation végétale...). Pour y remédier, il faudrait éventuellement disposer de surfaces plus importantes, réaliser une exportation des végétaux, et évacuer régulièrement les boues.

De manière générale, le rendement d'élimination des nitrates est plus élevé dès lors que la végétation se développe en saison printanière/estivale. La charge en  $\text{NO}_3$  rejetée au milieu récepteur est alors réduite, comme l'a notamment montré le projet Epec. Mais il convient de garder à l'esprit que toute hausse de l'évapotranspiration induit une baisse de débit, ce qui concentre les polluants. Les rendements sur concentrations peuvent paraître faibles malgré des charges polluantes traitées significatives :

c'est pourquoi les calculs de performances doivent s'effectuer sur des flux entrants/sortants, et non sur des concentrations.

La ZRV a généralement peu ou pas d'impact positif (voire un impact négatif) sur les rendements en macro-polluants lorsque les concentrations en sortie de Steu sont faibles (proches des limites de quantification). C'est notamment le cas en sortie de Steu à boues activées dont le procédé de traitement est déjà très performant.

Dans le cas des cinq sites suivis par l'étude Agence de l'eau Adour-Garonne, les résultats mettent en évidence :

- peu ou pas d'impact sur le phosphore (Pt,  $\text{PO}_4$ ) ;
- des rendements sur l'azote (NGL,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ) d'autant plus élevés que les concentrations en entrée sont élevées ;
- la dénitrification nécessitant du carbone, le curage des boues peut engendrer une perte d'efficacité sur l'azote ;
- des rendements en demande chimique en oxygène (DCO) et en demande biologique en oxygène (DBO) proportionnels aux concentrations entrantes.

Cependant, une élimination de l'azote total de l'effluent par dénitrification au sein de la ZRV (jusqu'à 70 % de rendement) est possible, en fonction de la forme sous laquelle l'azote entre dans la ZRV, comme l'a notamment montré le projet zone humide artificielle (Zhart) conduit par Suez. Si les concentrations en sortie de Steu sont déjà faibles, cette élimination complémentaire permet d'atteindre des concentrations en NGL  $< 3 \text{ mgN/L}$  en sortie de ZRV.

Si l'azote global (NGL) entrant dans la ZRV est composé en majorité d'azote Kjeldhal (NK), le rendement en NGL est faible en été comme en hiver. C'est le cas notamment en sortie d'une Steu ne traitant que le carbone, ou d'un étage unique de filtre planté de roseaux (FPR). Aucun effet saisonnier n'a ainsi été observé dans le cadre du projet Epec, où cinq ZRV avec pour objectif commun le traitement de l'azote ont été suivies au travers de campagnes de mesures mensuelles de 72 h (durée minimale d'un temps de séjour).

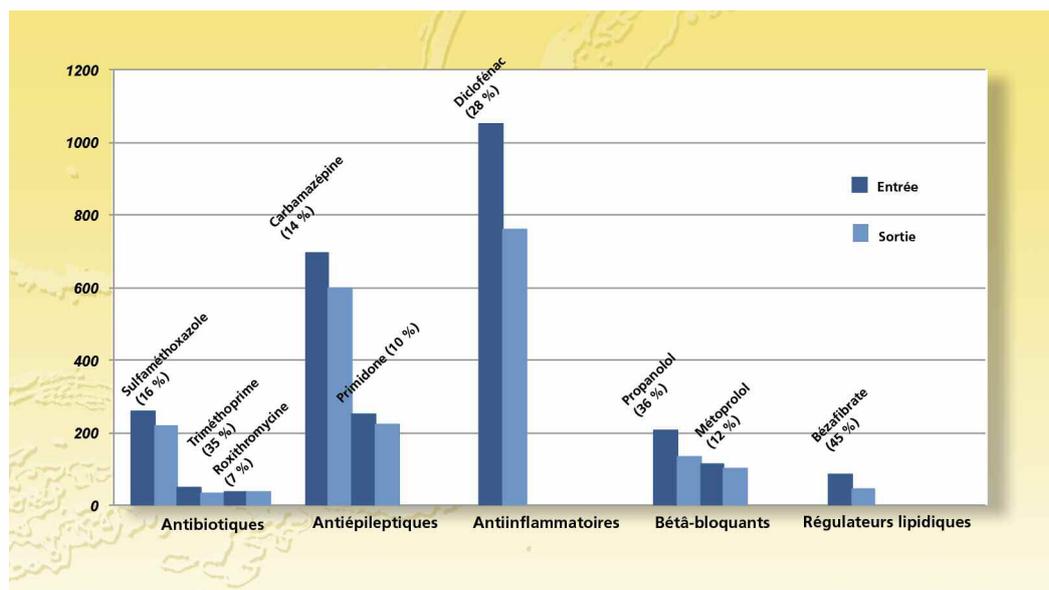
Selon les conceptions, les ZRV peuvent aussi présenter un intérêt pour la rétention des matières en suspension (MES), par décantation et rétention par filtre à sable, si cette valeur est  $> 10 \text{ mg/L}$  en sortie de Steu.

La ZRV peut enfin permettre de ré-oxygéner les eaux et d'améliorer le pH (souvent acide en sortie d'un traitement sur Steu incluant une étape de nitrification poussée). Dans le projet Epec et dans l'étude AEAG, le suivi de l'oxygène dissous a montré des variations importantes entre l'entrée et la sortie de la ZRV. Au début du printemps, le développement des algues (production d'oxygène ( $\text{O}_2$ ) par photosynthèse) conduit à une sursaturation de l'eau en  $\text{O}_2$ . En cas de développement de végétaux flottants envahissants (lentilles d'eau, azolla...), les algues sont progressivement privées de lumière, ce qui crée des conditions anoxiques voire anaérobies (section 4.3).

## 2.2 Micropolluants : un effet globalement positif, mais très variable selon les substances et la configuration de la ZRV

Du fait de la très grande diversité des substances et produits mis sur le marché, il est toujours difficile de définir une liste de micropolluants à retenir pour un suivi, y compris dans le cadre des ZRV. Les différents projets de recherche ont cependant retenu une liste de micropolluants d'intérêt, par croisement des travaux de priorisation français et européens et de leur propre connaissance sur la présence des substances dans les eaux usées.

Les ZRV ont un effet globalement positif sur la dégradation de certains micropolluants : les projets suivis par Veolia confirment une tendance générale à la diminution des concentrations (exemple pour des substances pharmaceutiques en figure 4).



**Figure 4.** Concentrations moyennes (en ng/L) et abatements moyens (en %) observés pour les substances pharmaceutiques, entre entrée et sortie des zones de rejet végétalisées suivies (trois sites, quatre campagnes).  
Source : Veolia.

Mais les performances observées sont variables, dépendant à la fois des substances considérées, des caractéristiques des ZRV et de la saison. Cela est lié à la fois :

- à la diversité des propriétés physicochimiques des molécules et des mécanismes susceptibles de les éliminer ou de les transformer : biodégradation, photodégradation, phyto-accumulation, adsorption, sédimentation, filtration... ;

- aux conditions au sein de la ZRV : température, temps de séjour, ensoleillement, profondeur de colonne d'eau...

À titre d'exemple, dans le cadre du projet Zhart, la photodégradation et l'adsorption sont les principales voies d'abattement de la ciprofloxacine (antibiotique systématiquement détecté en entrée de ZRV). Toutefois, pour observer des rendements > 70 %, la ZRV doit posséder une combinaison de compartiments (association de différents types de ZRV) et de temps de séjours adaptés et suffisants.

Certains micropolluants organiques, parmi ceux réfractaires au traitement secondaire des Steu (donc présents en entrée de ZRV), sont photodégradables. Sous l'action de quelques jours d'ensoleillement, Irstea a notamment relevé des baisses des concentrations en diclofénac, diazépam, métronidazole (30-70 %), kétoprofen (70-90 %), acide fénofibrique (> 90 %). D'autres micropolluants organiques, dont certains appartiennent à la liste des substances prioritaires ou à la liste de vigilance, sont en revanche réfractaires à la photodégradation (c.-à-d. leurs concentrations sont rarement modifiées en ZRV car plusieurs mois d'ensoleillement seraient nécessaires). C'est le cas par exemple de certains pesticides (diuron, imidaclopride, simazine, atrazine) ou de plusieurs substances pharmaceutiques : antiépileptique (carbamazépine), bêtabloquants (sotalol, aténolol, propranolol, métoprolol), benzodiazépine (oxazépam), ou antibiotiques (clarithromycine, sulfaméthoxazole, érythromycine) (Tableau 1).

**1 Rendements des ZRV pour l'abatement de différents micropolluants par photodégradation (projet Irstea en cours).**

Tableau

Catégories de rendement	Micropolluants
RW < 30%	diuron(a), imidaclopride(b), simazine(a), atrazine(a) carbamazépine, sotalol, aténolol, propranolol, métoprolol, oxazépam(b), clarithromycine(b), sulfaméthoxazole, érythromycine(b)
30 - 70%	pirimicarbe, diclofénac(b), diazépam, métronidazole, théophylline
70 - 90%	kétoprofen
RW > 90%	acide fénofibrique

(a) = Substances prioritaires (directive 2013/39/UE)

(b) = Substance de la liste de vigilance (décision d'exécution 2015/495/UE)

Pour certains métaux, et suivant les sites étudiés, les rendements peuvent être assez élevés. Pour deux métaux (zinc et cuivre) sur les six suivis dans le cadre du projet Zhart, des rendements supérieurs à 70 % ont notamment été obtenus. Il n'y a cependant pas de consensus : les études conduites par Irstea ont abouti à des rendements moins importants.

Certains métaux sont adsorbables sur les particules ou la matière organique (notamment fer, titane, zinc, chrome). Les plus adsorbables sont donc éliminés par rétention des matières en suspension (décantation gravitaire ou dans le réseau de tiges des végétaux). Ainsi, les métaux peuvent être précipités et stockés dans les dépôts en fond d'ouvrage. Un effet de concentration dans les sédiments a ainsi été observé par IRH IC sur les ZRV de l'AEAG. En l'absence de curage et dans certaines conditions

(anaérobiose...), ces métaux peuvent être relargués dans le milieu.

Pour les produits pharmaceutiques, les rendements apparaissent plus faibles et variables que sur les métaux, au regard des résultats obtenus par Suez dans le cadre du projet Zhart.

À ce stade des connaissances, il reste donc en pratique difficile de s'engager sur une performance d'abatement des micropolluants par les ZRV. Cela est d'autant plus vrai que l'espace disponible pour une ZRV à proximité d'une Steu est généralement contraint. Par ailleurs, la question des sous-produits issus de la dégradation des micropolluants, et des risques qui pourraient être associés, demeure entière. Cela peut s'avérer problématique sur les masses d'eau souterraines en cas d'infiltration, par exemple (voir section 2.4).

**2.3 Microorganismes et bactériologie : des abattements significatifs sont possibles**

L'objectif de traitement de la bactériologie en Steu n'est pas systématique, excepté pour des rejets en milieu à usage sensible (zones de baignade par exemple), les rejets de Steu sont donc souvent chargés en bactéries. En fonction du procédé de traitement des eaux usées de la Steu (lit bactérien, boues activées, lagunage...), la concentration entrant dans la ZRV est très variable selon les microorganismes (souvent ± 3 à 5 Ulog).

Une ZRV peut limiter la dissémination de germes de contamination fécale dans l'environnement, et peut parfois contribuer au respect de la qualité des eaux de baignades en saison estivale. Dans le cas de bassins végétalisés étudiés par Veolia, jusqu'à 1 à 2 Ulog d'abattement ont pu être observés sur les paramètres tests de contamination fécale, à titre d'exemple, la figure 3 le montre pour *E. Coli* et les entérocoques.

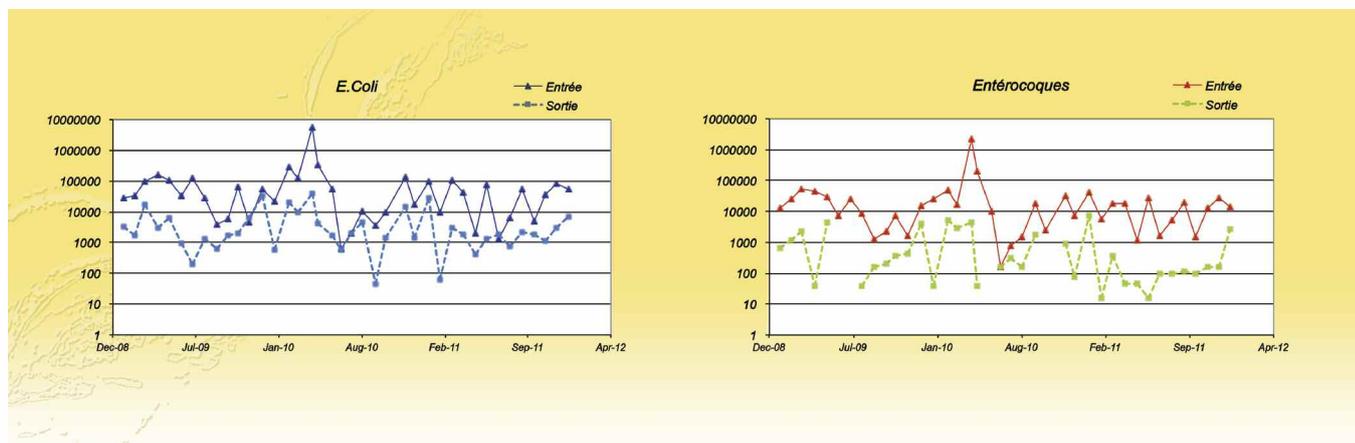


Figure 5. Concentrations (n/100mL) d'E.Coli et d'Entérocoques en entrée et sortie de la zone de rejet végétalisée de type bassin. Source : Veolia.

Cet abattement bactériologique demande un temps de séjour relativement long et une exposition directe au soleil. Cependant, des prélèvements ponctuels en entrée et sortie de ZRV, effectués par IRH IC dans le cadre de l'étude AEAG, ont mis en évidence des abattements pouvant dépasser 2 Ulog sur des ZRV présentant des temps de séjours de quelques jours et des surfaces d'eau libre. De même, les sites audités dans le cadre du projet Zhart de Suez ont permis d'observer des rendements d'élimination des *E.Coli* et entérocoques de 1 à 3 Ulog. À l'inverse, sur des sites entièrement recouverts par la végétation l'abattement bactériologique d'*E.coli* observé par IRH IC est quasi nul.

Au-delà du rôle des UV, la baisse de la concentration en microorganismes indicateurs fécaux présents dans l'eau et les sédiments pourrait être attribuée à plusieurs hypothèses, dont l'effet bactéricide des exsudats

racinaires (mortalité cellulaire), la formation de biofilms (au sein de la rhizosphère), l'impact de la microflore indigène (prédation et compétition), le piégeage dans les boues (sédimentation). Ces processus sont notamment étudiés sur la roselière de la ZRV de Marguerittes (type bassin) suivie par Irstea. En cas de curage des dépôts, une éventuelle remise en suspension des bactéries fécales dans l'eau doit être envisagée.

Le transfert de gènes de résistance issus des eaux usées aux bactéries environnementales de la ZRV et du milieu récepteur via des plasmides est possible, comme le suggèrent des travaux récents d'Irstea sur l'antibiorésistance de bactéries *E. coli* BLSE.

## ● 2.4 Du sol à la nappe : que se passe-t-il sous la ZRV ?

En préalable à la construction d'une ZRV, les études de sol sont indispensables, avec réalisation d'un échantillonnage pertinent (vertical et horizontal) (Figure 6). Outre l'étude de sa capacité d'infiltration, des analyses chimiques doivent être menées lorsque le sol en place est susceptible de déjà contenir des polluants : cuivre (viticulture), argent/cadmium (fabrication de poudres, accumulateurs...), ou autres produits chimiques stockés préalablement sur le site. Irstea souligne le risque de relargage de ces polluants lors de l'écoulement des eaux de la ZRV au travers du sol lié à une modification des conditions d'oxydoréduction, du pH du sol, des équilibres géochimiques. Dans le cas d'une ZRV déjà construite sur un sol potentiellement pollué, un suivi des eaux infiltrées s'avère nécessaire. Sinbio attire également l'attention sur la remobilisation possible de nutriments préalablement contenus dans le sol, notamment lorsque la ZRV est alimentée par une Steu assurant un traitement poussé de l'azote et du phosphore.



Figure 6. Prélèvement d'un échantillon de sol.

Le sol peut contribuer à épurer l'effluent, en retenant des éléments présents dans les eaux usées traitées, tels que le phosphore. Cependant, sa capacité de stockage et la stabilité de cette rétention dépendent du type de sol et des conditions physico-chimiques. Dans un sol de perméabilité de 220 mm/h, la Saur a observé que le phosphore ( $PO_4$ ) ne s'infiltré pas jusqu'à une profondeur de trois mètres, il est retenu dans la couche plus superficielle. Concernant l'azote ( $NO_3$  ici), il est infiltré dans le sol jusqu'à 6 m de profondeur (zone saturée au-delà de 6 m dans le cas de Coutières (79)). Le phosphore serait donc mieux traité par le sol, car rapidement fixé sur celui-ci, tandis que l'azote serait moins retenu au risque de se retrouver dans la nappe. Sinbio souligne cependant que le phosphore comme les métaux peuvent être remobilisés dans des sols saturés en eau en permanence. Afin d'optimiser les capacités du sol à traiter l'effluent, le projet d'Irstea à Mionnay étudie quelle épaisseur minimale est nécessaire. Des bilans massiques (possibles grâce à des lysimètres) permettront d'estimer le rendement épuratoire.

L'eau du sol issue de la ZRV est-elle épurée par rapport à l'effluent en entrée de ZRV ? Les argiles adsorbent certains micropolluants organiques, ainsi que les ions dont  $PO_4^{3-}$  et  $NH_4^+$  et les métaux. Il existe une dégradation biologique de certains polluants (nitrification, oxydation). Ces éléments sont rappelés par Irstea mais des éléments chiffrés sont attendus à partir de suivi de sites expérimentaux ou semi-industriels.

Mais dans la durée, le colmatage du sol (via son enrichissement) peut conduire à une moindre capacité d'infiltration de l'effluent. L'accumulation des sédiments et son impact sur les capacités d'infiltration seront suivis sur la ZRV expérimentale de Biotrytis (33) et sur les lysimètres de Mionnay (69). Cependant, à une échelle plus fine, les sédiments, plus riches en matières organiques,

© G. Gayet - MNHN

peuvent présenter des aspects positifs et être le siège de dégradation anaérobie favorable à la dénitrification et à d'autres échanges.

**Pour des sols avec une teneur en argile importante, une alimentation alternée est nécessaire afin de maintenir la capacité d'infiltration d'origine** grâce à la minéralisation des sédiments. Une étude sur colonne de sol remanié, menée par Irstea, montre que cette alternance doit être fréquente. Le suivi de ce rythme d'alimentation séquencée imposée aux lysimètres d'Irstea permettra d'identifier les éventuels impacts négatifs de l'irrégularité de ces apports.

**Pour des projets de recherche ou des ZRV très étendues, une connaissance de l'aquifère (étude hydrogéologique préalable, hauteur et composition de l'eau de nappe) est nécessaire** afin d'être certain de réaliser le suivi de l'eau issue de la ZRV et non celle de la nappe, comme le rappellent Sinbio, Irstea et Veolia. Les indicateurs macroscopiques (conductivité, température) ou chimiques (lithium, chlorure ou borate) permettent de connaître

l'origine des eaux de la ZRV, comme l'a démontré Saur avec les SMD d'ImaGeau. Un bilan hydrique de la ZRV peut également mettre en évidence la présence d'eau de nappe qui dilue les eaux de la ZRV.

**Inversement, il est important de s'assurer que la conception envisagée ne risque pas de produire des écoulements préférentiels pouvant contaminer la nappe** – d'autant que les ZRV se trouvent fréquemment dans des zones de nappe peu profonde. L'aspect polluants majeurs est abordé dans le cadre du programme ZRV Onema-Irstea et il serait important de le compléter par un aspect pathogènes (et notamment transport par les colloïdes) et micropolluants (du moins les éléments potentiellement dangereux présents dans le sol d'origine).

## ● 2.5 Les plantes : un rôle épuratoire attribué, des questions en suspens

**Les rôles attribués aux plantes au sein d'une ZRV sont multiples** : garantir une certaine capacité d'infiltration du sol (effet racinaire), réaliser l'évapotranspiration et le prélèvement des nutriments, servir de support au biofilm, assurer l'oxygénation, etc.

**Les plantes pourraient jouer un rôle dans les processus d'épuration au sein des ZRV.** Outre le prélèvement de nutriments, Suez confirme que certains micropolluants ont été retrouvés dans les parties aériennes ou racinaires de plantes, dans le cadre d'expériences en microcosmes (pilotes d'1 m<sup>2</sup> environ).

**Mais les résultats et conclusions obtenus à ce sujet peuvent s'avérer très variables selon les projets**, en raison notamment de difficultés liées à l'échantillonnage des végétaux (points de prélèvements, sélection des plantes, stockage...) et aux analyses (préparation d'échantillons, variabilité, incertitudes, méthodes analytiques...). Des bilans de masse sont menés pour quantifier l'importance de ce phénomène.

**Les mécanismes impliqués nécessitent en outre des surfaces importantes et une sélection de végétaux adaptés** au traitement de certains polluants ciblés. Selon Irstea, ces approches relèvent davantage du domaine de la phytoremédiation, destinée à des sites et des sols pollués. Sinbio rappelle que, pour un traitement des polluants par les végétaux, les surfaces à mettre en jeu sont très variables selon la qualité du traitement amont (sur la Steu : avec ou sans nitrification ou dénitrification, avec ou sans déphosphatation...). C'est le cas de l'azote et du phosphore dont les ordres de grandeur des quantités annuelles absorbées par m<sup>2</sup> de surface plantée sont connues (20 à 250 gN/m<sup>2</sup>/an et 3 à 25 gP/m<sup>2</sup>/an) selon l'atelier ZRV d'Epnac.

**L'exportation hors de la ZRV des polluants stockés dans les plantes est dans tous les cas une question centrale.**

La récolte des parties aériennes des végétaux après faucardage peut être une solution (section 4.6). Mais Sinbio précise que cela n'est pas le seul mécanisme d'élimination des polluants car, en absence de faucardage, une partie des végétaux s'accumule au fond sous forme de sédiments, piégeant ainsi les nutriments qu'elle contient. Cette biomasse des végétaux ayant assimilé les nutriments se reminéralise plus ou moins, selon les conditions du milieu. Si les sédiments sont curés, les nutriments non minéralisés sont alors exportés simultanément.

**Dans la durée, l'exportation des végétaux par faucardage/récolte reste toutefois nécessaire.** IRH IC souligne l'importance d'éviter un comblement du site par des sédiments et le retour dans la ZRV des éléments prélevés par la végétation (dégradation et remise en solution), ainsi que la formation d'une couche anoxique épaisse (méthanisation, ammonification) (section 4.6). Cependant, en l'absence de couverture végétale, il peut y avoir un développement d'algues microscopiques qui n'est pas toujours souhaitable : malgré leur contribution aux apports en oxygène (période diurne uniquement), elles peuvent engendrer des charges en matière en suspension et matière organique inacceptables pour certains milieux récepteurs.

### 3 – Intégration et fonctions des ZRV au sein des territoires

Outre leurs fonctions épuratoires et hydrauliques, principaux objectifs de création des ZRV, celles-ci peuvent remplir d'autres fonctions : développement d'une biodiversité faunistique et floristique, espace paysager à vocation pédagogique voire même destiné à une valorisation

#### 3.1 Un espace de biodiversité à favoriser

La création d'une ZRV peut représenter une création d'habitats favorables à l'accueil de certaines espèces inféodées aux milieux humides. Ces habitats seront d'autant plus variés que la zone présentera des configurations différentes. L'ensemble formé peut notamment s'inscrire dans les corridors écologiques (trame verte et bleue), d'où l'importance de maintenir les ZRV dans leurs conditions optimum de fonctionnement. Si cette fonction d'habitat est un des objectifs de la ZRV, son entretien doit être adapté en conséquence (section 4.6). Cette fonction potentielle d'habitat doit être favorisée, tout en préservant les fonctions épuratoires et hydrauliques des ZRV.

Pour appréhender l'évolution du biotope au cours du temps, un suivi des habitats et des populations peut être réalisé. C'est le cas des diagnostics faune et flore menés dans les projets de Veolia, Sinbio et Suez : inventaires des plantes aquatiques, amphibiens, odonates,

#### 3.2 Usages pédagogiques et récréatifs

L'intégration dans le paysage du milieu ainsi créé doit être réfléchi en fonction des spécificités locales : il s'agira de privilégier l'implantation de plantes locales, de délimiter les parcelles en fonction des dispositifs de haies ou de clôtures utilisés dans la région.

Cet espace paysager peut accueillir d'autres usages (Figure 7) dont peuvent jouir riverains, scolaires, élus, associations naturalistes : promenade, sensibilisation à l'environnement sur le thème « eau et biodiversité » et parfois même chasse et pêche. L'ouverture au public reste un facteur d'acceptabilité du site. Placée sous la responsabilité du maire, la ZRV peut néanmoins être source de contraintes, qui doivent être anticipées au moment de la conception, afin d'allouer les dispositifs d'accès sécurisés et les supports pédagogiques adaptés.

La réussite de son implantation au regard des objectifs fixés tient à la fois au portage institutionnel, notamment en termes de financements (assainissement, culturel), et à l'adhésion des acteurs locaux (élus, gestionnaires,

économique. En amont de la création d'une ZRV, il est donc essentiel d'anticiper son intégration dans le territoire en recensant les différentes attentes portées par les acteurs locaux sur ce dispositif.

mammifères, oiseaux... Le projet Zhart complète cette approche par l'utilisation d'un modèle de suivi et de maintien de la biodiversité. Cet outil innovant propose d'aider à planifier des actions préventives de gestion des espaces végétalisés.

Le développement d'espèces envahissantes peut néanmoins nuire au fonctionnement biologique et hydraulique de la zone en empêchant la lumière de pénétrer dans l'eau, en dégradant les berges et les canalisations. Observée sur les différents sites suivis par l'AEAG, la présence de lentilles d'eau, d'azollas, d'érables nengundo, d'écrevisses de Louisiane ou encore de ragondins s'est avérée problématique sur de nombreux sites en France. La prolifération de moustiques et d'amphibiens peut aussi générer des nuisances sanitaires et sonores. Une vigilance doit donc être apportée pour gérer la prolifération de ces espèces lors de la conception et de l'entretien des sites.



© E. Villemagne - AFB

Figure 7. Visite d'une zone de rejet végétalisée.

exploitants des Steu, habitants) dans ce projet. Suez et Sinbio ont soigné cette étape en faisant réaliser des entretiens sociologiques pour caractériser les usages actuels et attendus de la zone, ainsi que les freins à l'acceptabilité des ZRV.

### 3.3 Une valorisation possible par des activités économiques

L'eau en sortie de ZRV peut faire l'objet d'une réutilisation afin, par exemple, d'arroser les golfs ou les espaces verts : c'est le concept de la réutilisation des eaux usées traitées (Reut), objet d'un intérêt croissant en France et soumis à une réglementation précise en termes de suivi environnemental et sanitaire.

À la marge, les ZRV peuvent aussi offrir l'opportunité de valoriser la biomasse présente sur les sites, comme apport complémentaire à une filière déjà existante localement : filière bois énergie, peupleraie ou taillis à très courte rotation (TCR) par exemple. Sinbio émet toute-

fois une réserve pour les sites de petite taille qui ne constituent pas toujours un gisement suffisant pour justifier économiquement la mise en place d'une activité de valorisation. Dans ce cadre, il peut être intéressant d'évaluer le rapport coût/efficacité (chapitre 4) de la ZRV en incluant tous les services qu'elle dispense au regard des objectifs fixés au départ.

## 4 – Recommandations pratiques pour la mise en œuvre

La décision de créer une ZRV doit toujours s'appuyer sur une identification précise des objectifs poursuivis, en fonction du type de traitement amont, de la sensibilité du milieu récepteur, des caractéristiques du sol et de la surface disponible. Après un rapide éclairage réglementaire, ce dernier chapitre livre un ensemble de recommandations

pratiques pour adapter les options de conception aux buts retenus (optimiser l'oxygénation et/ou l'infiltration, favoriser certains mécanismes épuratoires...), éviter certaines erreurs courantes et maintenir dans la durée les fonctions des ZRV.

### 4.1 Le cadre réglementaire et juridique

L'arrêté du 21 juillet 2015 stipule que la ZRV ne fait pas partie du dispositif de traitement des eaux usées. En conséquence, elle ne fait pas obligatoirement l'objet d'auto-surveillance au sens de la directive sur les eaux résiduaires urbaines (Deru). Les ZRV ont en revanche une influence sur le sol, la nappe et/ou la masse d'eau réceptrice, dont l'état chimique et écologique est suivi au titre de la directive cadre sur l'eau. Par ailleurs, si les eaux usées traitées issues d'une ZRV sont utilisées à des fins de réutilisation (Reut) pour l'irrigation de cultures et espaces verts, ceci doit se réaliser dans le respect de l'arrêté du 25 juin 2014.

Une ZRV n'est ni une zone humide, ni une zone tampon, ni une zone d'infiltration totale et permanente (Atelier ZRV d'Epnac, 2014). Elle est concernée par certaines rubriques de la nomenclature loi sur l'eau dite Iota (installations, ouvrages, travaux et activités) et des mesures doivent être prises pour en sécuriser l'accès du public (responsabilité du maire face aux risques de contamination et de noyade notamment).

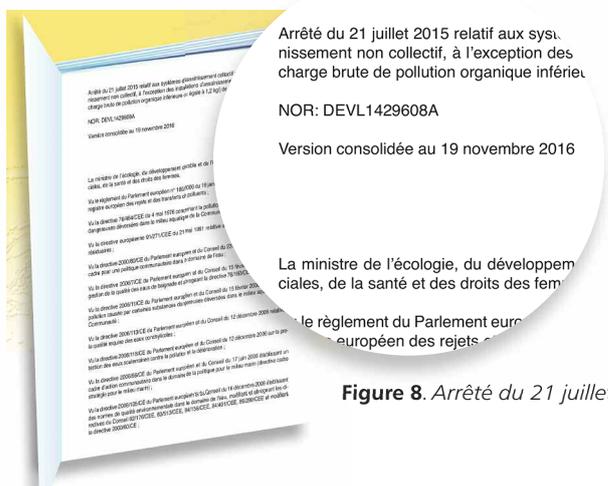


Figure 8. Arrêté du 21 juillet 2015.

La création d'une ZRV en sortie d'une station d'épuration peut être exigée par les services de police de l'eau dans certains contextes, tels qu'un positionnement en tête de bassin versant ou la présence d'espaces naturels vulnérables ou d'activités sensibles (zone de baignade, zone conchylicole...), pour lesquels toutes les dispositions doivent être prises afin de réduire l'impact du rejet sur le milieu superficiel.

## 4.2 Avant la conception : une ZRV pour quoi faire ?

L'état des lieux national du groupe Epnac a mis en évidence un manque de cohérence, à l'heure actuelle, entre les objectifs visés et le type de ZRV implanté, le type de traitement amont (et donc le type d'effluent), les caractéristiques du sol, et même avec la surface disponible.

La décision de créer une ZRV doit s'appuyer sur une analyse préalable, qui demande d'avoir fixé précisément les objectifs poursuivis par le projet. Irstea souligne en particulier la nécessité de connaître l'état initial du milieu récepteur et les performances escomptées de la ZRV que l'on souhaite implanter, afin d'évaluer la possibilité d'un réel bénéfice sur la qualité du milieu récepteur. Suez souligne ainsi que le coût d'une ZRV varie suivant les objectifs ciblés puisque la conception est différente selon les éventuelles garanties de traitement sur lesquelles le constructeur pourrait s'engager.

Définir des objectifs pertinents et réalistes nécessite en particulier de se poser au préalable les questions suivantes :

- quelles sont les caractéristiques du système d'assainissement (nature des réseaux, capacité, niveau de traitement, performances...)?
- quelles sont les caractéristiques du site disponible pour l'implantation de la ZRV (superficie, occupation du sol, perméabilité, environnement...)?
- quels sont les enjeux locaux (baignade, conchyliculture, biodiversité, qualité du milieu récepteur...)?

Ces points sont notamment développés dans un guide méthodologique créé par Veolia à l'intention des collectivités, qui détaille les étapes de l'étude, de la faisabilité jusqu'au dimensionnement des projets au regard des contraintes du site (figure 9).

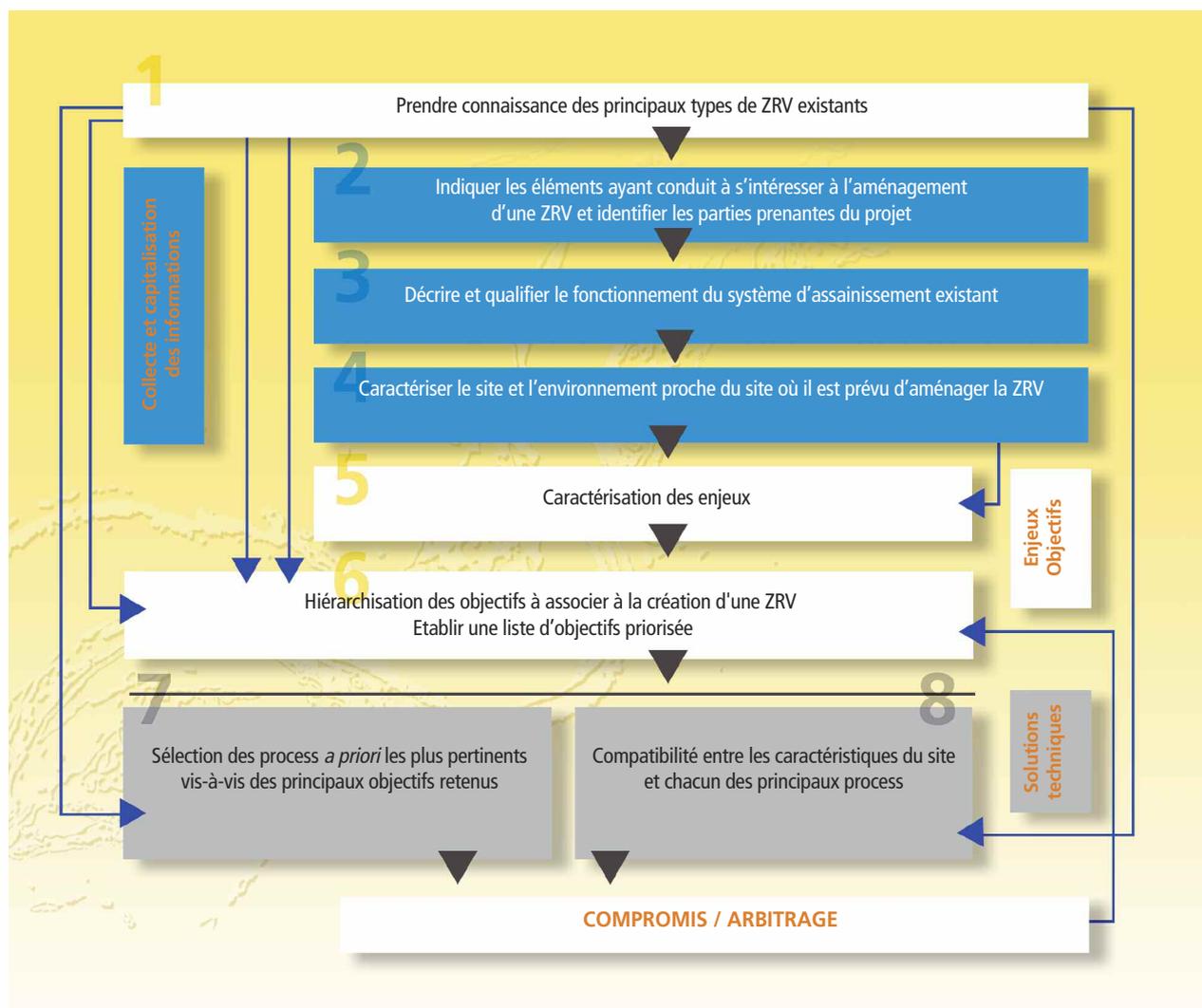


Figure 9. Étapes à suivre pour la définition d'un projet de zone de rejet végétalisée. Source : d'après le guide Veolia/Setude, 2015.<sup>1</sup>

1- Veolia/Setude, 2015. Zones de Rejet Végétalisées : étude préliminaire de cadrage (enjeux, objectifs et choix des process) : guide méthodologique. Guide interne Veolia, 63 p.

Les objectifs retenus pour la ZRV conditionnent étroitement ses options de conception, et donc l'analyse coûts-bénéfices du projet. En théorie, celle-ci visera à comparer les ZRV à implanter avec d'autres technologies de traitement complémentaires/tertiaires possédant les mêmes ordres de grandeurs d' « abattements ». En pratique, comme le soulignent les agences de l'eau, une telle analyse reste cependant difficile à mener à l'heure actuelle, en l'absence d'éléments chiffrés et déclinables sur les performances d'abattement des ZRV pour les différents types de polluants (chapitre 2).

L'Agence de l'eau Rhin-Meuse promeut, quant à elle, l'étude systématique de la mise en œuvre de ZRV. Celles-ci peuvent être très rustiques avec pour principal objectif la protection du milieu physique en lien avec le projet d'aménagement du cours d'eau et la récréation de milieux humides fonctionnels. Pour des stations rurales de petite taille, ces ZRV sont d'un coût généralement inférieur à celui de la canalisation de rejet (10 000 à

20 000 euros). En tête de bassin versant, la limitation des débits rejetés vers des cours d'eau à très faible débit d'étiage constitue également un vrai avantage des ZRV, et les systèmes type prairies humides peuvent être une bonne solution, rustique et facile d'exploitation (fauche annuelle).

Si l'enjeu principal est le traitement des pathogènes, pour lequel les performances des ZRV de type bassin sont connues (Marguerittes-34), la décision pourra s'appuyer sur une comparaison chiffrée avec la mise en œuvre d'une lampe UV, dont l'achat, le fonctionnement et le remplacement sont coûteux.

Dans tous les cas, l'analyse devra aussi intégrer les coûts de fonctionnement et d'entretien de la ZRV (section 4.4), ainsi que, le cas échéant, sa potentielle valorisation économique (production végétale, Reut).

### ● 4.3 À la conception : optimiser l'infiltration et l'oxygénation

Lors de la préparation du projet, l'étude de la perméabilité des sols en place est incontournable (chapitre 1). Cette étude ne fournit cependant qu'une estimation de la capacité d'infiltration des effluents dans le sol puisque la perméabilité réelle sera différente une fois la ZRV en service.

De manière générale, tous les acteurs publics ou privés s'accordent sur l'importance de varier le régime d'écoulement le long du profil de la ZRV, en y aménageant une suite de formes différentes. Il s'agit en particulier, comme le souligne IRH IC, d'éviter que la ZRV présente un écoulement lentique sur la majorité de la surface (absence de gradient hydraulique suffisant). Ce type de configuration, souvent observé à l'heure actuelle, est susceptible de favoriser le développement des végétaux flottants envahissants (lentilles d'eau par exemple), favorisant ainsi l'apparition de conditions

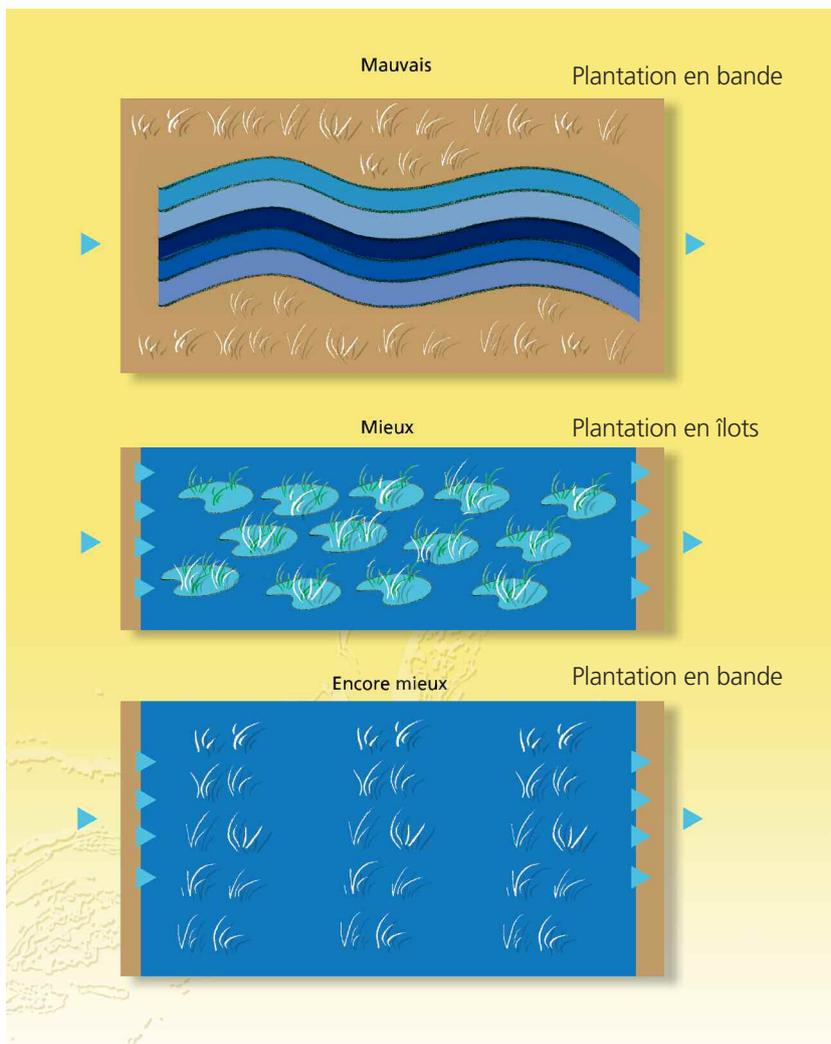
anoxiques. La création de cascades et de zones de turbulences améliore la ré-oxygénation du milieu, comme l'a confirmé le projet Epec. Elles sont en particulier préférables à une simple chute d'eau en sortie de ZRV.

Pour les ZRV où la priorité est l'infiltration, une alimentation en alternance permet d'obtenir de meilleures conditions d'oxygénation du sol par rapport à l'alimentation continue, d'appliquer des charges hydriques supérieures et de maintenir une bonne capacité d'infiltration. Les études préliminaires réalisées par Irstea sur du sol remanié ont notamment montré que pour des ZRV dont l'objectif majeur est l'infiltration, la création de deux files en parallèle et alimentées alternativement est fortement recommandée.

### ● 4.4 À la conception : limiter l'impact des polluants

La charge surfacique (surface de l'ouvrage rapportée au nombre d'EH de la Steu en amont), notion-clé pour le dimensionnement des filtres plantés de roseaux, peut également être déterminante pour le dimensionnement des ZRV, selon les objectifs poursuivis. Sinbio souligne que la charge surfacique conditionne certaines fonctions hydrauliques (infiltration, évapotranspiration) ainsi que des mécanismes épuratoires, notamment l'adsorption des nutriments par les plantes et la sédimentation, ainsi que les mécanismes aérobies de dégradation biologique, pour lesquels le transfert d'oxygène est limité par la surface.

Une répartition et un écoulement homogènes des eaux à traiter sur toute la largeur de la ZRV réduisent considérablement les courts-circuits hydrauliques (Figures 10 et 11, page suivante), et assurent un maintien du temps de séjour prévu lors de la conception de l'ouvrage (chapitre 1). Ainsi, tel que le rappelle Sinbio, les différents éléments créant des pertes de charge au sein de la ZRV (seuils, enrochements, végétation) doivent être perpendiculaires et non parallèles au sens de l'écoulement. De même, l'alimentation en entrée et la reprise des eaux en sortie de la ZRV doivent se faire sur toute la largeur de l'écoulement.



**Figure 10.** Écoulement plus ou moins homogène sur toute la section selon le type de plantation. Adapté de Kadlec, R., Wallace, S. 2009<sup>2</sup>



© a, b E. Villemagne - AFB

**Figure 11.** Tout aménagement doit être homogène sur toute la section d'écoulement. a/ Plantation en îlot ; b/ Plantation en bande.

IRH IC et Sinbio préconisent également de créer des variations de profondeurs d'eau et des types de plantation différents le long du profil de la ZRV afin de créer une gamme de conditions physicochimiques aussi large que possible. IRH IC recommande en particulier la mise en

place de seuils poreux (rondins de bois, gabions contenant du sable grossier et fin) afin de créer une rupture dans le profil en long et un gradient hydraulique amont-aval. En plus d'être un support de biofilms bactériens, il assure l'oxygénation grâce à la chute créée.

Pour optimiser la réduction des micropolluants par photodégradation naturelle (UV solaires), plusieurs éléments sont relevés par Irstea :

- une vitesse d'écoulement appliquée au sein de l'ouvrage suffisante pour limiter le développement de végétaux flottants (qui bloquent l'arrivée des UV dans la colonne d'eau) dans les ZRV de type « bassin » peu profond ;
- une limitation de la profondeur des bassins, avec une hauteur d'eau maximale recommandée de 20 à 30 cm (pour limiter le développement de macrophytes, le fond des bassins peut être recouvert de galets comme sur le site de Meyssac-19) ;
- un temps de séjour hydraulique minimum d'une dizaine de jours.

Ces recommandations conduisent à concevoir des ZRV de surface importante, ce qui n'est pas toujours possible localement.

Pour certaines molécules, et selon leurs propriétés physico-chimiques, il est possible d'obtenir un abattement optimisé suivant une conception spécifique favorisant les mécanismes susceptibles de les éliminer : biodégradation, photodégradation, phyto-accumulation, adsorption, sédimentation, filtration... Le projet Zhart a abouti à des choix de conception et de dimensionnement pour quelques micropolluants ciblés. Le projet d'Irstea publiera quant à lui ses recommandations de conception fin 2018.

L'élimination des polluants peut être encore améliorée par l'utilisation de matériaux adsorbants rapportés (argile expansée, ou zéolite), telle que décrite dans le projet Armistiq (Choubert *et al.*, 2015<sup>3</sup>). L'argile expansée est plus efficace que la zéolite. Huit micropolluants sont adsorbés

à plus de 70 % : la plupart des médicaments (propranolol, sotalol, sulfaméthoxazole, diazépam, ibuprofène, carbamazépine), ainsi que l'octylphénol et le nonylphénol. Le projet a également constaté l'élimination partielle de certains pesticides (atrazine et simazine) et le NP1EC avec un rendement  $R_w$  de 40 à 70 %. Ces matériaux sont en test dans le cadre du projet Biotrytis (33), par comparaison au charbon actif. Une adsorption est également relevée lors d'écoulement sur des remblais contenant de l'argile, pour ce même projet.

Concernant les macropolluants, le recours à une ZRV n'est pas justifié en sortie des stations dont les concentrations rejetées sont déjà très faibles. Ce point a été démontré par l'étude AEAG, qui déconseille également de remplacer un 2<sup>e</sup> étage de FPR par une ZRV (dont le rôle pour la nitrification n'est pas avéré). La ZRV peut toutefois conserver son intérêt en tant que tampon hydraulique, quelle que soit la station en amont. Le projet d'Irstea publiera quant à lui ses recommandations de conception fin 2018.

La présence d'un filtre à sable en sortie, mis en œuvre dans les premiers projets de Suez, aide à obtenir des performances élevées sur les matières en suspension. Toutefois, les colmatages surviennent dans les premières années de fonctionnement : le remplacement (réhabilitation) voire la suppression de ces ouvrages est souvent nécessaire au maintien du bon écoulement des effluents.

Les bassins doivent présenter une hauteur de revanche suffisante pour faire face à un pic de débit, permettre le stockage de sédiments et subir éventuellement une mise en charge partielle du fait du développement localisé de la végétation.

#### 4.5 À la conception : anticiper l'entretien et le suivi

La conception des différents bassins et fossés doit permettre autant que possible le passage d'engins mécaniques, afin de limiter les tâches d'entretien manuelles, fastidieuses et coûteuses. La possibilité de réaliser des vidanges de bassins doit également être anticipée (by-pass, surverses réglables), notamment pour le curage des boues.

La mise en place de canalisations ou de tuyaux intermédiaires est à éviter. Les retours d'expérience de l'étude AEAG montrent que ceux-ci se bouchent facilement par la végétation (feuilles, débris, racines...). Les liaisons entre ouvrages doivent s'effectuer autant que possible de manière douce grâce à des surverses ou des fossés. Malgré tout, si des canalisations sont installées, leur accès doit être facile et sécurisé pour permettre le nettoyage.

Les bassins et fossés doivent présenter une pente douce (< 30°) pour faciliter les accès et éviter l'érosion des berges. La présence de paliers au niveau des berges, favorable à la diversité d'espèce, est également recommandée. Une végétation basse avec un fort système racinaire doit être privilégiée. Les arbustes et les arbres ne doivent pas être plantés trop près des berges : comme

l'a quelquefois observé IRH IC, ceux-ci risquent de s'effondrer dans la ZRV et de bloquer l'écoulement des eaux, notamment si l'entretien fait défaut.

Enfin, il est fortement recommandé, lorsque c'est économiquement possible, de disposer de mesures en lien avec l'hydrologie des ZRV, pour en assurer un suivi de qualité et le cas échéant prévoir des actions de gestion. Le projet Zhart préconise de mettre en place une instrumentation pour les paramètres suivants :

- débit entrant dans la ZRV (généralement mesuré en sortie de Steu) et sortant vers le milieu récepteur (eau superficielle) ;
- données météorologiques (pluviométrie, température...);
- niveaux d'eau dans les bassins (si existants). Ces mesures doivent être suffisamment précises pour permettre le calcul des stockages / déstockages ;
- hauteur de la nappe et variabilité dans le temps (cycles saisonniers). C'est un point important car une nappe haute peut impacter les flux d'infiltration voire alimenter la ZRV.

3- Choubert, J.M., Crétollier, C., Tahar, A., Budzinski, H., Esperanza, M., Dherret, L., Le Menach, K., Noyon, N., Miège, C., Coquery, M. (2015). Quels micropolluants peut-on éliminer par les procédés extensifs de traitement des eaux usées domestiques ?. Techniques Sciences Méthodes, n° 3, p. 51-66

## 4.6 La ZRV dans la durée : entretien et exploitation

L'entretien régulier d'une ZRV est indispensable pour garantir *a minima* le bon fonctionnement hydraulique. Loin de se limiter à la tonte des espaces verts, comme c'est souvent le cas aujourd'hui, il comprend le **faucardage de la végétation aquatique**, l'entretien des abords, le curage des boues et la lutte contre les animaux indésirables. Les contraintes d'exploitation sont d'autant plus importantes qu'il existe des défauts de conception (difficulté d'accès des engins, impossibilité de vidange...) nécessitant des interventions manuelles.

À titre d'exemple, dans l'étude AEAG, l'entretien d'une ZRV de 0,5 ha en sortie d'une Steu à boues activées de 5 000 EH, avec vocation pédagogique, représente environ 30 minutes par jour de travail réalisé par le personnel communal et 4 000 € HT / an de sous-traitance auprès d'un établissement et service d'aide par le travail (Esat).

Ces ordres de grandeur sont confirmés par Veolia qui lors d'une enquête réalisée en 2012 avait noté des temps d'entretien pouvant aller jusqu'à une à deux heures par semaine, et des coûts complémentaires pour des interventions plus ponctuelles (faucardage...) pouvant aller jusqu'à 3 000 €/an (sur un site de 10 ha environ dont la conception ne permettait pas le passage d'engins mécaniques).

**Le faucardage des plantes aquatiques et le fauchage de la végétation des berges doivent être réalisés régulièrement.** Ils permettent entre autres de :

- contenir le développement des arbres et arbustes, les fortifier et identifier les problèmes liés au développement de leurs racines (obstruction de canalisations par exemple) ;
- contenir le développement de la végétation et limiter le développement des espèces invasives (Figure 12) ;
- limiter les débris végétaux qui viennent obstruer les liaisons hydrauliques entre ouvrages ;
- limiter les îlots denses de végétation qui conduisent à des hausses du niveau d'eau ;
- contrôler l'état des ouvrages et maintenir les accès aux regards ;
- extraire éventuellement certains polluants stockés dans les plantes.



Figure 12. Bassin d'une zone de rejet végétalisée envahi par des lentilles.

Concernant la fréquence du faucardage (Figure 13), plusieurs cas sont à distinguer :

- dans un milieu de type prairie humide, en milieu ouvert, un faucardage annuel est préconisé, ces milieux n'existant pas sous nos latitudes en état d'équilibre naturel ;
- dans les milieux plus stables, comme les roselières ou les zones en eau de plusieurs décimètres de profondeur, qui n'évoluent que très lentement, un faucardage pluri-annuel suffit.

En outre, faucardage et curage doivent être réalisés de préférence de manière progressive et hors saison végétative. Au besoin, une seule zone sera faucardée pour ne pas détruire tous les écosystèmes en place.



© B. Chancereil, PhytoSERPE

Figure 13. Dans un milieu de type prairie humide, un faucardage annuel est préconisé.

Si la récolte a pour objectif d'exporter les nutriments, il semble préférable de la réaliser lorsque les parties aériennes sont toujours vertes. Sinbio explique que, lorsqu'elles jaunissent, les nutriments sont transférés dans les racines et rhizomes. Leur récolte après flétrissement conduirait à des exportations plus faibles, souvent dans des conditions de travail plus laborieuses. Cependant, une exportation en fin d'hiver permet de préserver davantage la fonction d'habitat de la ZRV.

**L'envasement des ZRV nécessiterait un curage (Figure 14) au moins tous les cinq ans**, selon le retour d'expérience d'IRH IC. Cette opération permet de préserver le fonctionnement hydraulique de la ZRV mais aussi d'extraire certains polluants accumulés dans les sédiments (métaux, phosphore, par exemple) et d'éviter la fermentation, émettrice de gaz à effets de serre. Un remodelage des berges peut être effectué en parallèle.



Figure 14. L'envasement des ZRV nécessite un curage.

Il convient cependant de limiter les impacts du curage sur les habitats (vase, végétaux...). Dans le cadre de l'étude de l'AEAG, les recommandations suivantes ont été proposées et mises en œuvre pour le curage des boues de deux sites étudiés :

- le curage a lieu à l'automne ou au printemps, avant ou après les phases de reproduction et de croissance de la faune et de la flore. Si la zone n'est alimentée qu'une partie de l'année, le curage est effectué pendant la période de repos de la ZRV ;
- lorsque la ZRV est composée de différents secteurs, le dépôt de sédiments est progressif. Pour ne pas détruire les écosystèmes en place, une seule zone sera curée au besoin ;
- dans l'intérêt écologique du site, les éléments retirés sont stockés temporairement à proximité du site afin de permettre un retour au milieu de la faune ; les boues sont déposées en tas à même le sol, sur une zone plane, afin d'éviter les ruissellements.

Un assèchement (Figure 15) une fois par an pour minéraliser la matière organique n'est pas toujours une solution. Selon Sinbio, une minéralisation par mise à sec périodique peut parfois empêcher le colmatage des substrats filtrants ou surfaces d'infiltration (ce qui permet de maintenir la filtration des matières en suspension en surface). Cependant l'alternance des phases peut conduire à un relargage massif de certaines formes ioniques (des nutriments, métaux lourds et autres polluants) issus des sédiments. Des travaux conduits par Irstea devraient fournir des éléments de réponse sur le mode d'alimentation.



Figure 15. L'assèchement une fois par an n'est pas toujours une solution.

© IRH Ingénieur Conseil

Pour ne pas perturber l'équilibre écologique de la ZRV, Sinbio préconise de favoriser autant que possible un « entretien différencié » : cela consiste à moduler les interventions tout au long de l'année en fonction des différents ouvrages de la ZRV, du développement des végétaux, etc.

Les indicateurs pour déclencher un curage ou un faucardage complet de la zone varient selon les constructeurs et les ZRV. À titre d'exemple, dans le cas d'une ZRV constituée de fossés végétalisés, les tâches effectuées pour l'entretien et leurs fréquences préconisées par Veolia sont les suivantes :

- surveillance régulière (minimum deux fois par mois) de l'accumulation de dépôts dans le fossé, de l'obstruction des canalisations d'arrivée / sortie, de l'état des végétaux, de la couleur de l'eau et des proliférations (et enlèvement le cas échéant) ;
- débroussaillage des abords (deux fois par an) ;
- taille des arbres (tous les trois ans, voire plus souvent pour les saules) (Figure 16) ;



Figure 16. Entretien des végétaux non aquatiques des berges par de la taille.

© ESAT DE BOISSOR

- faucardage annuel des végétaux semi-aquatiques des berges à l'automne (15 cm au-dessus du niveau d'eau) avec export des résidus ;
- curage à réaliser lorsque 25 % du volume d'un fossé est comblé, ou si la hauteur de sédiments est supérieure à 20 cm.

Enfin, la présence de ragondins est quasi-systématique sur les ZRV. Pour éviter la destruction des berges, des campagnes de piégeage sont à réaliser *a minima* deux fois par an par du personnel habilité.

© Suez

## Conclusion et perspectives

En réponse aux fortes attentes que suscitent les zones de rejet végétalisées et au développement croissant qu'elles connaissent auprès des collectivités, la présente publication a proposé un état des lieux des connaissances scientifiques et techniques sur les principales fonctions qui leur sont attribuées, dont la réduction des débits sortants et l'élimination des polluants. À la lueur d'un ensemble de projets de recherche récents, elle s'est attachée à mettre ces fonctions attendues en lien avec les mécanismes physico-chimiques qui les sous-tendent, puis à en tirer des recommandations consensuelles de conception et d'entretien, visant à optimiser l'efficacité des futures ZRV pour une ou plusieurs fonction(s) donnée(s).

Il en ressort que, si les impacts, positifs mais aussi parfois négatifs, des ZRV ont pu être confirmés et mesurés dans un certain nombre de cas, ils sont toujours **très dépendants du contexte** (type de sol, traitements présents en amont, charge polluante en entrée) et des **options de conception retenues**.

À défaut de solutions clés-en-mains, il demeure donc essentiel d'appuyer tout projet sur une étude préalable complète (incluant l'étude de la capacité d'infiltration du sol) et sur une définition claire et partagée des objectifs poursuivis par la ZRV. Des éléments nouveaux pour l'aide à la décision et à la conception sont attendus à court et moyen termes, à l'image du projet Onema-Irstea mené à

Bègles (33), Nîmes (30) et Lyon (69), qui proposera une typologie des ZRV en fonction des attentes des projets, et apportera une première grille de dimensionnement fin 2018.

**L'entretien de la ZRV est également une condition-clé de son bon fonctionnement, et donc de ses performances attendues. Son absence peut entraîner une détérioration de la qualité de l'eau en sortie de ZRV et un impact sur le milieu récepteur.** Il doit être pensé dès la conception, et mené au cours du temps selon un calendrier adapté. Les recommandations listées dans le dernier chapitre de cette publication seront complétées par un guide pratique consacré à l'entretien des ZRV, diffusé par le groupe Epnac à l'horizon 2017/2018.

La prévision des performances d'abattement des ZRV et leur amélioration, selon les polluants ciblés et les configurations, restent quant à elles un sujet de recherche : des connaissances nouvelles seront disponibles au cours des prochaines années, avec les résultats de différents travaux en cours et le retour d'expérience des ZRV dotées d'une instrumentation scientifique. À l'issue de l'ensemble de ces études, les aspects réglementaires des zones de rejet végétalisées pourraient être amenés évoluer.

## Pour en savoir plus...

■ **Nom du projet :** Epec (Épuration en eau courante)  
**Partenaires :** IRH IC, Fluvial.IS, LRGP, Irstea, Isa  
**Site web :** <http://extranet.groupeirhenvironnement.com/epec/>  
**Contact mail :** [jolanda.boisson@irh.fr](mailto:jolanda.boisson@irh.fr)

■ **Nom du projet :** projet interne Veolia Eau  
**Partenaires :** Setude, Sinbio  
**Principales références :**  
C. Pagotto, L. Sergent, J. Serre, B. David, Les zones de rejet intermédiaire en assainissement : observations de terrain et comportement des polluants au sein de ces zones, TSM n° 7/8, Juillet-Août 2014, pp 43-50.  
Christelle Pagotto, Zones humides artificielles : épurer et protéger la qualité des eaux naturelles, Colloque zones huïdes, GRESE, 6 février 2014, Limoges

■ **Nom du projet :** Azhurev (Aménagement d'une zone humide à Reims pour l'épuration et le vivant)  
**Partenaires :** Sinbio, REIMS METROPOLE, Esope, Metis ingénierie, LRGP, Agence de l'eau Seine Normandie  
**Contact mail :** [gregoire.jost@sinbio.fr](mailto:gregoire.jost@sinbio.fr)

■ **Nom du projet :** Zhart (Zone humide artificielle)  
**Partenaires :** Suez (Cirsee et Eau France), Rive sarl, Nymphaea, Citeres (Université de Tours), Leres (Ecole des hautes études de santé publique), Eurofins.  
**Site web :** <http://www.poledream.org/zhart>  
**Principales références :**  
Projet ZHART, 2016. Recommandations pour la conception, le suivi et la gestion de nouveaux concepts de zones de rejet végétalisées. Application en sortie de stations de traitement des eaux usées municipales. Rapport public du projet de recherche ZHART (lauréat FUI 14).  
Penru Y., T. Polard, J. Schuehmacher, M. Lafforgue, P. Prohin, M.A. Lebas, M. Bacchi, K. Lemenach, H. Budzinski, M.P. Som, L. Perridy, M. Chambolle, S. Martin Ruel. Performance d'élimination des micropolluants par les ZRV. Actes des Journées Information Eaux (JIE), octobre 2016, Poitiers  
**Contact mail :** [ywann.penru@suez.com](mailto:ywann.penru@suez.com) ; [ludovic.perridy@suez.com](mailto:ludovic.perridy@suez.com)

■ **Nom du projet :** Suivi de la zone de rejet végétalisée de la station d'épuration Horizon de Coutières  
**Partenaires :** Saur, ImaGeau, CPIE 79  
**Principales références :**  
V. Jauzein, J-P. Bellot, F. Nauleau, « Suivi de l'infiltration d'une zone de rejet végétalisée par un système d'observation de la qualité de l'eau en continu, cas de Coutières (Deux-Sèvres) », Sciences, Eaux et Territoires, n°16, 2015, p12-16  
Saur, « Fonctionnement de la Zone de Rejet Végétalisée de Coutières (79) », dans ASTEE « Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques, pourquoi ? comment ? », Chap. 4, 2013, p 172-176  
"V. Jauzein, F. Nauleau. Suivi de l'infiltration d'une zone de rejet végétalisée par un système d'observation de la qualité de l'eau en continu, cas de Coutières (79). Actes des Journées Information Eaux (JIE), Octobre 2016, Poitiers  
**Contact :** Vincent Jauzein, [vjauzein@saur.fr](mailto:vjauzein@saur.fr), 01.30.60.84.48

■ **Nom du projet :** Devenir de 81 substances médicamenteuses et de leurs métabolites au sein des Zones de rejet végétalisées  
**Partenaires :** L'Ecole nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg (Engées) & l'Institut de biologie moléculaire des plantes (IBMP) à Strasbourg  
**Site web :** <https://engees.unistra.fr> & <http://ibmp.unistra.fr>  
**Contact :** Maximilien Nuel (lcube/Engées/Unistra/IBMP, [mnuel@engees.eu](mailto:mnuel@engees.eu)), Dimitri Heintz (IBMP, [dimitri.heintz@ibmp-cnrs.unistra.fr](mailto:dimitri.heintz@ibmp-cnrs.unistra.fr)) & Adrien Wanko (lcube/Engées/Unistra, [wanko@unistra.fr](mailto:wanko@unistra.fr))

■ **Nom du projet :** Suivi expérimental du fonctionnement des ZRV et des milieux récepteurs associés  
Maître d'ouvrage : Agence de l'eau Adour-Garonne (mandataire IRH IC)  
**Contact :** [jocelyne.di-mare@eau-adour-garonne.fr](mailto:jocelyne.di-mare@eau-adour-garonne.fr)

■ **Nom du projet :** Programme de recherche Irstea-Onema sur les ZRV  
**Partenaires :** Université de Bordeaux, Bioforsk, Nîmes Métropole, Bordeaux Métropole, Commune de Mionnay  
**Site web :** <http://zrv.irstea.fr>  
**Contact :** [catherine.boutin@irstea.fr](mailto:catherine.boutin@irstea.fr)

■ **Nom du projet :** Atelier ZRV du groupe de travail national Epnac  
**Partenaires :** Onema, Irstea, conseils généraux (Satese), agences de l'eau, ministère en charge de l'environnement, ministère en charge de la santé, Oieau  
**Site web :** <https://epnac.irstea.fr/>  
**Principales références :** <https://epnac.irstea.fr/zones-de-rejet-vegetalisees/>  
**Contact :** Catherine Boutin ([catherine.boutin@irstea.fr](mailto:catherine.boutin@irstea.fr)), Stéphanie Prost-Boucle ([stephanie.prost-boucle@irstea.fr](mailto:stephanie.prost-boucle@irstea.fr))

■ **Nom du projet :** « Évaluation de l'hydrodynamique de trois zones de rejet végétalisées par opération de multitraçage, SIA de Lutter-Raerdersdorf, Commune de Liebsdorf » et « Retour du suivi de fonctionnement de trois ZRV dans le Haut-Rhin de 2009 à 2013 »  
**Partenaires :** Icube, Engées, Agence de l'eau Rhin-Meuse pour le 1er projet et AERM, Satese 68, SIA de Lutter-Raerdersdorf, commune de Liebsdorf et Sivom de Wahlbach-Zaessingue pour le 2e projet  
**Site web :** [www.eau-rhin-meuse.fr](http://www.eau-rhin-meuse.fr), en cours de mise en ligne site de l'AERM et document de synthèse en cours de réalisation par l'AERM  
**Principales références :** pour le 1er projet J. Laurent, P. Bois, A. Wanko, juillet 2013, pour le 2e projet N. Venandet (AERM), F. Tisserand (Satese 68)  
**Contacts :** [nicolas.venandet@eau-rhin-meuse.fr](mailto:nicolas.venandet@eau-rhin-meuse.fr)



La collection **Comprendre pour agir** accueille des ouvrages issus de travaux de recherche et d'expertise mis à la disposition des enseignants, formateurs, étudiants, scientifiques, ingénieurs et des gestionnaires de l'eau et des milieux aquatiques.

## Rédaction

Laurent Basilico (journaliste), Stéphanie Prost-Boucle (Irstea), Lauriane Vasseur et Estérelle Villemagne (Agence française pour la biodiversité)

## Contribution

Jolanda Boisson (IRH IC)  
Catherine Boutin (Irstea)  
Jean-Marc Choubert (Irstea)  
Jocelyne Di Mare (AE AG)  
Dirk Esser (Sinbio)  
Nicolas Forquet (Irstea)  
Pauline Giupponi (IRH IC)  
Maximilien Nuel (Engées)  
Vincent Jauzein (Saur)  
Grégoire Jost (Sinbio)  
Christelle Pagotto (Veolia eau France)  
Ywann Penru et Ludovic Perridy (Suez)  
Nicolas Venandet (AE RM)

## Édition

Véronique Barre et Béatrice Gentil-salasc (AFB, direction Recherche, expertise et développement des compétences)

## Création et mise en forme graphiques

Béatrice Saurel (saurelb@free.fr)

## Citation

Basilico L., Prost-Boucle S., Vasseur L., Villemagne, E. 2017. Les zones de rejet végétalisées : repères scientifiques et recommandations pour la mise en œuvre. Agence française pour la biodiversité. Collection Comprendre pour agir. 20 pages

## Contact

esterelle.villemagne@afbiodiversite.fr

- 1 - Eléments d'hydromorphologie fluviale (octobre 2010)
- 2 - Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière (mai 2011)
- 3 - Evaluer les services écologiques des milieux aquatiques : enjeux scientifiques, politiques et opérationnels(décembre 2011)
- 4 - Evolutions observées dans les débits des rivières en France (décembre 2012)
- 5 - Restaurer l'hydromorphologie des cours d'eau et mieux maîtriser les nutriments : une voie commune ? (décembre 2012)
- 6 - Quels outils pour caractériser l'intrusion saline et l'impact potentiel du niveau marin sur les aquifères littoraux ? (avril 2013)
- 7 - Captages Grenelle : au-delà de la diversité, quels caractères structurants pour guider l'action ?(septembre 2013)
- 8 - Les évaluations économiques en appui à la gestion des milieux aquatiques (octobre 2013)
- 9 - Regards des sciences sociales sur la mise en œuvre des politiques publiques(décembre 2013)
- 10 - Comment développer un projet ambitieux de restauration d'un cours d'eau ? Retours d'expériences en Europe, un point de vue des sciences humaines et sociales(février 2014)
- 11 - Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons Principes et méthodes (mai 2014)
- 12 - La compétence « Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations » (Gemapi) (aout 2014)
- 13 - Les poissons d'eau douce à l'heure du changement climatique : éclairages et pistes d'actions pour la gestion (octobre 2014)
- 14 - Connaître les perceptions et les représentations : quels apports pour la gestion des milieux aquatiques ? (décembre 2014)
- 15 - Quelle est l'efficacité d'élimination des micropolluants en station de traitement des eaux usées domestiques? Synthèse du projet de recherche ARMISTIQ(janvier 2015)
- 16 - Modèles hydro-économiques : quels apports pour la gestion de l'eau en France ? (mars 2015)
- 17 - Les espèces exotiques envahissantes dans les milieux aquatiques : connaissances pratiques et expériences de gestion - Vol. 1 Connaissances pratiques (mars 2015)
- 18 - Les espèces exotiques envahissantes dans les milieux aquatiques : connaissances pratiques et expériences de gestion - Vol. 2 Expériences de gestion(mars 2015)
- 19 - Captages Grenelle : où en est-on de la protection contre les pollutions diffuses? Comment aller plus loin ? (septembre 2015)
- 20 - Prévoir les étiages : que peut-on attendre des modèles hydrologiques ? (novembre 2015)
- 21 - Connaître les débits des rivières : quelles méthodes d'extrapolation lorsqu'il n'existe pas de station de mesures permanentes ? (novembre 2015)
- 22 - Pollution diffuse et protection de la ressource en eau : pratiques à l'échelle du territoire dans l'Union européenne (septembre 2016)
- 23 - Captages : comment favoriser la coopération entre producteurs d'eau potable et acteurs agricoles pour la mise en place de démarches de protection des aires d'alimentation de captages ? (octobre 2016)
- 24 - Combien coûte la dégradation des milieux aquatiques pour les usagers de l'eau ? L'évaluation des dépenses compensatoires (janvier 2017)
- 25 - Les zones de rejet végétalisées : repères scientifiques et recommandations pour la mise en œuvre (février 2017)



ISBN 978-2-37785-001-3

Février 2017

**AGENCE FRANÇAISE  
POUR LA BIODIVERSITÉ**

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT



**MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT,  
DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER, EN CHARGE DE  
INTERNATIONALES SUR LE CLIMAT**

**Contact :** veronique.barre@afbiodiversite.fr  
<http://www.onema.fr/node/2835>