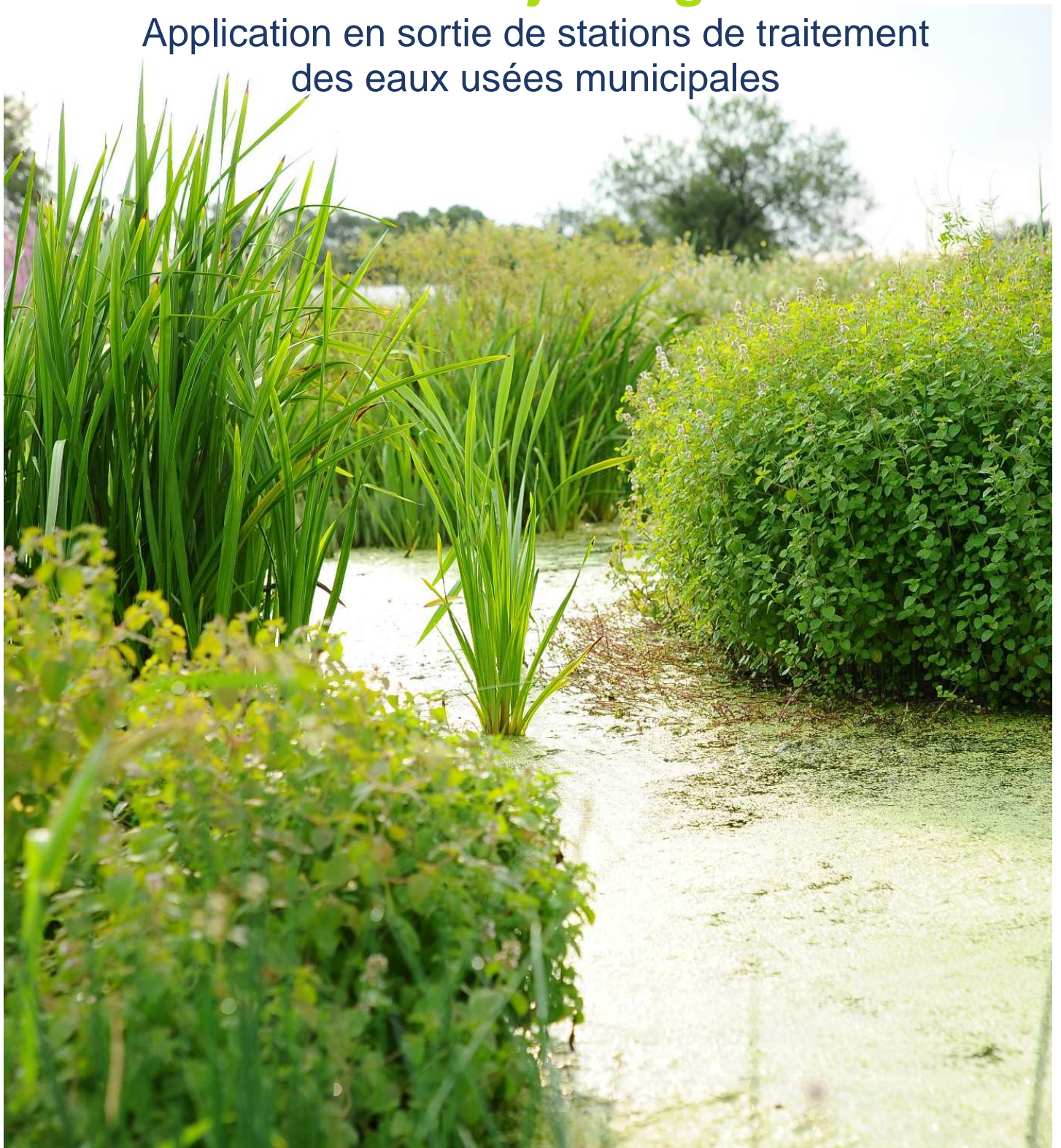


Recommandations pour la conception, le suivi et la gestion de nouveaux concepts de Zones de Rejet Végétalisées

Application en sortie de stations de traitement
des eaux usées municipales



Le projet ZHART, labellisé par les pôles de compétitivité DREAM et EAU et lauréat du 14^{ème} appel à projets R&D du Fonds Unique Interministériel, a reçu un soutien financier du Fonds Feder Languedoc Roussillon, du Fond Unique Interministériel, du Conseil Régional de la région Centre, du Conseil Régional de la région Occitanie, de la communauté d'agglomération Tour(s) Plus. Il a été réalisé avec l'appui de BPI France, Transfert LR et des pôles de compétitivité DREAM et EAU.

Ce document a été rédigé par l'ensemble des partenaires du projet ZHART. Les différents contributeurs sont listés dans le tableau ci-dessous. Un descriptif succinct de l'activité de chacun des partenaires est disponible en annexe 1.

Entité, institution de rattachement	Contributeurs
SUEZ (CIRSEE, Eau France et Consulting)	Ywann PENRU (resp. projet), Ludovic PERRIDY, Thierry POLARD, Michel LAFFORGUE, Jérôme SCHUEHMACHER, Mélodie CHAMBOLLE, Samuel MARTIN
NYMPHEA	Marie-Ange LEBAS, Philippe PROHIN
Sarl RIVE	Michel BACCHI
UMR CITERES, Université de Tours	Marion AMALRIC (coord.), Claudia CIRELLI, Lotfi MEHDI, Francesca DI PIETRO, Corinne LARRUE, Lotfi MEHDI
LERES, EHESP	Amélie SELLIER, Axelle CADIERE
Eurofins IPL	Marie-Pierre SOM
EPOC – LPTC, Université de Bordeaux	Nathalie TAPIE, Hélène BUDZINSKI

Pour citer cet ouvrage :

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), 64 p.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier toutes les personnes ayant collaboré de près ou de loin aux différentes tâches du projet, en particulier les exploitants et gestionnaires des sites d'audit.

Les auteurs souhaitent plus particulièrement remercier, Laure Gérard, Jérémy Alonso et Thierry Gaillard de SUEZ Consulting, Eric Blin de SUEZ Eau France.

Les auteurs du volet social et paysager remercient les élus, techniciens, habitants et usagers des collectivités étudiées pour leur participation aux enquêtes,

L'écart-paysage Paysagiste DPLG,

Cynthia Gauer, Stagiaire M1 Ingénierie des milieux aquatiques et des corridors fluviaux, Université de Tours,

David Violleau, MCF Energétique, génie des procédés, IUT de Tours et Bruno Béjon, Service eau et ressources naturelles, DDT Indre et Loire.

L'ensemble des auteurs remercient aussi particulièrement les membres du Conseil Scientifique pour leur contribution au suivi et à l'évaluation des travaux scientifiques et techniques de ce projet, ainsi que pour les remarques et conseils pour la rédaction de ce document.

RESUME / SYNTHÈSE DES APPORTS DU PROJET ZHART

Le contexte

Un accroissement des exigences de qualité de nos ressources en eau a eu lieu ces dernières années. La Directive Cadre Européenne (DCE) sur l'eau issue 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 décennies à venir. Ces micropolluants présents dans les eaux usées, sont issus de diverses sources (effluents hospitaliers, rejets domestiques, industries, eaux pluviales). Même si une partie de ce flux de polluants est arrêtée 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.

Depuis une dizaine d'années, des zones de rejet végétalisées (ZRV) sont fréquemment proposées, lorsqu'il reste du foncier disponible, comme un espace aménagé entre la station de traitement des eaux usées et le milieu récepteur (définition de l'arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif) même si les ZRV ne sont pas considérées aujourd'hui comme faisant partie du dispositif de traitement des eaux usées. L'intérêt des ZRV s'appuie sur les processus écologiques des zones humides (régulation hydraulique, filtration mécanique, diversification des mécanismes de transformation de la matière, sédimentation, mobilisation et assimilation...). Toutefois, il est rare que des objectifs soient explicités dans les cahiers des charges, et bien que soient identifiés les bénéfices à priori attendus de tels aménagements, ils ne sont que très rarement mesurés, notamment sur les micropolluants.

Le projet ZHART (Zone Humide ARTificielle), retenu à l'appel à projets FUI 14, avait pour but de développer et d'industrialiser l'aménagement des ZRV afin qu'elles puissent rendre des services tels que des garanties de traitement complémentaires sur les micropolluants et de valorisation de la biodiversité. Elles doivent permettre de transformer la station de traitement des eaux usées en un objet de valorisation écologique et sociale pour la collectivité territoriale concernée.

L'objectif du projet ZHART était d'intégrer les différentes composantes technique, économique, mais aussi environnementale et sociale d'un projet de génie écologique tel que préconisé par la norme française sur la conduite d'un projet de génie écologique (NF X 10-900). Pour cela, chacun des membres du consortium du projet s'est attelé à étudier une ou plusieurs de ces composantes afin de mieux intégrer ces différents aspects dans les futurs projets de zones de rejets végétalisées et d'en augmenter et/ou d'en améliorer les performances techniques (épuration des polluants, gestion hydraulique, qualité écologique) économiques et sociales.

La conception de nouvelles zones de rejet végétalisées

La nouvelle démarche de conception proposée laisse une part importante à la concertation avec les acteurs locaux et à la prise en compte des enjeux locaux (comme le préconise la méthodologie de conduite de projet de génie écologique de la norme X10-900). Un projet de génie écologique s'appuie sur différentes composantes, tels que l'hydraulique, l'épuration, l'écologie des milieux humides, le génie végétal et les aspects sociaux et territoriaux ce qui nécessite des compétences spécifiques qui ont été portées par des partenaires qualifiés. C'est dans cet objectif qu'a été constitué le consortium du projet ZHART.

Hydraulique

La maîtrise de l'hydraulique de ces zones est d'autant plus importante qu'elle va conditionner le bon fonctionnement des écosystèmes et donc sa qualité écologique mais aussi sa capacité épuratrice. Le projet ZHART a permis de mettre en évidence que la contribution des différents modes de dissipation du flux varie suivant les sites du fait de plusieurs facteurs :

- capacité d'infiltration des sols,
- du temps de séjours réel (présence de courts-circuits hydrauliques),
- de la saison, notamment sur la contribution de l'évaporation et de l'évapotranspiration.

Ces facteurs sont souvent liés les uns aux autres, comme par exemple la contribution très faible de l'évapotranspiration pour les sites ayant un temps de séjour hydraulique faible (< quelques jours).

Epuration

Concernant les paramètres conventionnels réglementés en station de traitement des eaux usées, ces travaux ont permis de démontrer la capacité de ces zones à réduire les rejets en azote (ainsi que dans une moindre mesure du phosphore) ainsi qu'à améliorer la qualité bactériologiques des rejets d'eaux usées traitées (de 1 à 3 Log).

Le projet ZHART ciblait en particulier l'élimination des micropolluants par ces zones qui s'appuient sur différents mécanismes d'élimination tels que la photodégradation, l'adsorption, l'absorption par les plantes et/ou la biodégradation. Suivant les sites étudiés, des rendements d'élimination variés ont pu être observés pour un même micropolluant. A titre d'exemple, le rendement d'élimination du galaxolide (produit cosmétique) varie de < 30% (site C – « file a ») à > 90% (site E – C1). De même pour un seul et même site, les conditions climatiques et- opérationnelles peuvent aussi varier et ainsi modifier sur les performances épuratoires, > 95% d'élimination du galaxolide pour la campagne 1 et seulement 66% pour la campagne 3.

Les études menées dans le cadre du projet sur plusieurs sites d'études ainsi qu'une confrontation à la littérature existante, ont permis de définir pour certains micropolluants cibles les principaux mécanismes d'élimination et ainsi d'adapter en conséquence la conception et le dimensionnement des nouvelles zones afin d'assurer des garanties de traitement.

Génie végétal

Des études menées en microcosmes (conditions semi-contrôlées) ont permis d'appuyer les résultats des études de terrain mais aussi de démontrer une contribution du substrat et des végétaux dans le phénomène d'épuration des micropolluants, ainsi que d'identifier les végétaux les plus intéressants pour cet objectif épuratoire.

La prise en compte du génie végétal dans la conception de ces zones va bien au-delà de cette sélection de végétaux sur la base de leur capacité épuratoire. Elle intègre aussi l'expertise sur la traçabilité de production, notamment lors de la récolte des semences (possibilité d'utiliser des plantes endémiques) et le suivi des traitements naturels réalisés lors de leur production, mais aussi lors de la préparation du plan de plantation.

Génie écologique

Le génie végétal doit faire intégralement partie de la démarche de génie écologique qui vise à créer des écosystèmes humides de bonne qualité écologique, point essentiel au développement de la biodiversité. Par définition, le génie écologique consiste à préserver et développer la biodiversité par des actions adaptées (ensemble études, travaux, gestion), dans la durée, sur les écosystèmes ciblés. Dans le cadre des projets de mise en place de ZRV, le génie écologique est trop souvent négligé lors des phases de conception et de réalisation, intervenant à l'aval du génie civil alors qu'il devrait en conditionner la réflexion et le fonctionnement. En effet, ces aménagements requièrent avant tout que l'écosystème aquatique associé soit sain, fonctionnel, entretenu, ce qui n'est possible que si le milieu recréé est adapté à l'ensemble des caractéristiques de l'écosystème (= recréation du biotope pour un fonctionnement optimal de la biocénose). La prise en compte du concept de génie écologique au plus tôt lors la phase de conception est indispensable et doit perdurer lors de la réalisation et de la gestion des aménagements.

Dans ce but, les études menées dans le cadre du projet ZHART ont permis de créer un modèle biologique de prédiction de la qualité des peuplements macro-benthiques potentiellement présents dans une ZRV et donc de sa qualité écologique. Ce modèle permet de tester différentes configurations lors de la conception de la zone pour choisir le scénario qui présenterait le potentiel biologique le plus intéressant.

En parallèle, une méthodologie d'analyse de la qualité biologique globale a été développée. Elle permet de faire une analyse des habitats et des espèces présentes sur le site où la future zone sera aménagée ainsi que dans un périmètre rapproché (de 500 à 1000 m). Ceci permet de dresser le potentiel écologique initial du site et de caractériser les milieux les plus pertinents à mettre en place compte tenu des espèces qui seront potentiellement présentes. Ce lien est rendu possible par la caractérisation de la trame verte et bleue autour du site qui permettra de déterminer les liens de connectivité d'espèces cibles avec la zone comme cela a été démontré par certains travaux réalisés dans le cadre du projet.

Insertion socio-territoriale

En outre, la prise en compte des aspects sociaux et territoriaux dès le début du projet permet de proposer des services adaptés aux besoins locaux et en favorise son appropriation. En effet, la ZRV est un objet qui peut être qualifié de dispositif sociotechnique (par opposition à technique), cela signifie que le dispositif doit trouver sa place dans un territoire donné, lui-même constitué d'acteurs divers, d'usages variés, d'interrelations entre les acteurs et les individus, entre les niveaux territoriaux et de conditions « naturelles » (biogéographiques, topographiques et hydrologiques) spécifiques. Le territoire où le dispositif s'insère n'est pas un espace neutre, et il est donc nécessaire d'identifier ce qui le caractérise, du point de vue politique, économique, social, paysager et écologique.

Pour ce faire, un diagnostic socio-territorial du territoire destiné à être aménagé avec une ZRV est préconisé. Il repose sur une campagne de terrain qui associe observations, entretiens semi-directifs avec les élus et gestionnaires, et focus groups auprès des habitants et usagers. Ce diagnostic doit être fait à plusieurs échelles et en plusieurs étapes, afin de garantir une bonne insertion socio-territoriale de la ZRV. Ce diagnostic, conduit lors de l'étude préalable et de l'étude de faisabilité, sera suivi de recommandations pour la conception et le suivi de ce site afin de maintenir dans le temps son insertion socio territoriale.

Le suivi et la gestion des nouvelles zones de rejet végétalisées

Une fois les aménagements conçus et construits en fonction d'objectifs clairement définis, il convient de mettre en œuvre un plan de suivi et de gestion de ces zones afin de maintenir opérationnels les services qu'elles apportent mais aussi de les quantifier. En effet, ces écosystèmes sont soumis à des évolutions naturelles, mais aussi à la pression qu'exerce sur elle l'alimentation par un rejet de station de traitement des eaux usées. La démarche et les outils développés dans le cadre du projet ZHART s'appliquent à l'ensemble des ZRV qui sont soumises aux mêmes contraintes, et pour lesquelles, aujourd'hui, les besoins en termes de suivi et de gestion sont largement sous-évalués.

- Ce plan de suivi et de gestion inclut des actions de surveillance générale, notamment sur la qualité des eaux, des débits (entrée comme en sortie de la zone), et des actions plus particulières et adaptées en fonction des objectifs définis lors de la conception.
- Pour le suivi des performances épuratoires de ces zones(et en particulier vis-à-vis des micropolluants), le projet s'est appuyé sur des procédures existantes, consolidées lors du projet notamment sur les prélèvements, l'analyse chimique, le calcul et l'analyse des rendements d'élimination des (micro-)polluants. En complément, le développement ou

l'adaptation d'outils existants, tels que les POCIS ou l'analyse de micropolluants dans le biote ont permis d'enrichir la palette de solutions disponibles pour le suivi de ces zones.

- Pour le suivi de la biodiversité et de la qualité écologique, une solution de monitoring par « substrat artificiel » a été développée au cours du projet. Cette méthode consiste à installer, en surface des bassins de la zone, des couples substrat-végétaux standardisé pour mesurer sa colonisation par la macrofaune benthique après 4 à 8 semaines d'exposition. Cette approche standardisée permet notamment de contrôler la qualité écologique réelle de la ZRV par rapport à celle estimée par le modèle de prédiction utilisé lors de la phase de conception et le cas échéant de proposer des actions d'entretien plus spécifique en cas de dérive, en complément des actions d'entretien programmées.

De même, des actions sont conseillées pour vérifier et maintenir la réception sociale du projet. En effet, les conditions locales évoluent et peuvent amener les usagers de l'espace à la remettre en question. Pour cela, un diagnostic de la réception sociale peut être mis en œuvre à la fois sur un temps court mais aussi sur un temps plus long pour assurer sa pérennité. L'analyse de l'appropriation de l'aménagement par les populations locales peut passer par l'évaluation de l'accessibilité visuelle, de l'ouverture plus ou moins fréquente du site, des possibilités d'interactions avec les gestionnaires et de l'existence d'un programme de gestion plus ou moins explicité, mais aussi l'évaluation de la pertinence du projet pédagogique ou de la mobilisation active des habitants.

Conclusion

En conclusion, le projet ZHART a permis d'étoffer et de produire des connaissances sur les zones de rejet végétalisées, sur leur fonctionnement hydraulique, épuratoire et écologique ainsi que sur les représentations que peuvent s'en faire leurs usagers. Celles-ci ont pu être traduites en nouveaux services et produits pour :

- la conception et le dimensionnement de nouveaux concepts de zones de rejet végétalisées ayant des objectifs quantifiables,
- le suivi et la gestion des aménagements visant le maintien de leurs performances hydrauliques, épuratoires et de leurs fonctions écologiques et sociales.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	3
RESUME / SYNTHÈSE DES APPORTS DU PROJET ZHART	4
Le contexte	4
La conception de nouvelles zones de rejet végétalisées	4
Le suivi et la gestion des nouvelles zones de rejet végétalisées	6
Conclusion	7
1 INTRODUCTION	10
1.1 Contexte	10
1.2 Les Zones de Rejet Végétalisées (ZRV)	10
1.3 Le projet ZHART	11
1.4 La démarche de génie écologique	12
1.4.1 Une norme française pour encadrer les projets de génie écologique	12
1.4.2 Les ZRV, champs d'application du génie écologique	13
2 CONCEPTION D'UNE ZRV : DÉMARCHE, PRÉCONISATIONS ET OBJECTIFS ASSOCIÉS	14
2.1 Démarche pour la conception d'une ZRV	14
2.1.1 Étude préalable	14
2.1.2 Étude de faisabilité	15
2.1.3 Étude de conception	15
2.1.4 Travaux et suivi de chantier	16
2.2 Fonctionnement hydro-écologique des Zones de Rejet Végétalisées (ZRV)	17
2.2.1 Influence de l'hydraulique sur le fonctionnement des ZRVs	17
2.2.2 Conception des nouvelles ZRV	17
2.3 Rôle épurateur	21
2.3.1 Macropolluants et bactériologie	21
2.3.2 Micropolluants	22
2.4 Génie végétal	27
2.4.1 Production des végétaux	27
2.4.2 Mécanismes d'élimination des micropolluants - contribution des végétaux	27
2.5 Génie écologique	31
2.5.1 Modélisation de la biodiversité des ZRV	31
2.5.2 Évaluation du potentiel d'insertion à la trame verte et bleue	35
2.6 Insertion socio-territoriale	39
2.6.1 Étude préalable : opportunités de la mise en œuvre	40
2.6.2 Étude de faisabilité : évaluation du potentiel d'insertion territoriale	41
2.6.3 Étude de conception : cahier des charges socio-territorial	42

3	SUIVI ET MAINTIEN DES SERVICES APPORTÉS PAR LES NOUVELLES ZRV44	
3.1	Surveillance générale des ZRV	45
3.1.1	Suivi hydraulique et météorologique	45
3.1.2	Suivi physico-chimique classique	45
3.1.3	Suivi des polluants et de la bactériologie	45
3.1.4	Suivi biologique et écologique	46
3.1.5	Suivi socio-territorial	47
3.2	Nouvelle stratégie de gestion : la gestion différenciée	47
3.2.1	Application de la gestion différenciée aux ZRV	47
3.3	Suivi spécifique : les micropolluants	48
3.3.1	Analyse « conventionnelle » EAU, SÉDIMENTS, VÉGÉTAUX	49
3.3.2	Nouvelle approche pour l'échantillonnage et l'analyse des micropolluants : les capteurs passifs POCIS	49
3.3.3	Analyse des micropolluants dans le biote	51
3.4	Suivi spécifique : insertion socio-territoriale	53
3.4.1	Diagnostic de la réception sociale	53
3.4.2	Animation socio-paysagère	54
3.4.3	Sources et moyens	54
4	ABBREVIATIONS	55
5	ANNEXES	56
5.1	Annexe 1 – Présentation des partenaires du projet ZHART	56
5.1.1	SUEZ	56
5.1.2	SUEZ Eau France	56
5.1.3	RIVE	56
5.1.4	Nymphéa	57
5.1.5	Université de Tours : UMR CITERES	57
5.1.6	LERES SUD – unité Biodiagnostic	57
5.1.7	Eurofins	58
5.2	Annexe 2 – Descriptif des sites d'études	59
5.3	Annexe 3 – Paramètres conventionnels	60
5.4	Annexe 4 – Micropolluants analysés dans le projet ZHART	61
5.5	Annexe 5 - Méthodologie d'évaluation des performances de traitement	62
5.5.1	Echantillonnage, conditionnement et transport	62
5.5.2	Calcul des rendements	62
5.6	Annexe 6 – Echantillonneurs passifs - POCIS	63
5.6.1	Description	63
5.6.2	Application des POCIS au ZRV	63

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

L'accroissement des exigences de qualité de nos ressources en eau a permis de déployer ces dernières décennies des systèmes de traitement des eaux usées orientés principalement sur les macropolluants (DCO, DBO, MES, NTK,...). Aujourd'hui, l'Union européenne, à travers les dernières directives cadres, veut aller plus loin dans la reconquête de la qualité des milieux aquatiques et impose que de nouveaux polluants (perturbateurs endocriniens, substances dangereuses, résidus médicamenteux...) disparaissent de nos eaux dans les deux décennies à venir. Ces substances peuvent en effet mettre en péril la survie des écosystèmes et affecter en conséquence la santé humaine, même à de faibles concentrations, d'où la notion de « micro »polluants. Par exemple, certains xénobiotiques quantifiés dans la chaîne alimentaire à faible concentration (quelques nanogrammes), entraînent des perturbations endocriniennes telles que le phénomène de féminisation des poissons.

Ces micropolluants sont présents dans les eaux usées, car issus d'effluents hospitaliers, de rejets domestiques, d'industries, d'eaux pluviales ou de pollutions agricoles et ils transitent via les réseaux d'assainissement. Même si environ 80 % des flux de micropolluants sont arrêtés par les stations d'épuration actuelles, elles ne sont pas conçues pour les traiter, et une part significative de ces flux se retrouve dans les milieux naturels. Des filières de traitement tertiaire à base de procédés intensifs (charbon actif, ozonation...) peuvent actuellement être proposées pour réduire l'impact des rejets de micropolluants dans les milieux naturels. Cependant, ces traitements complémentaires induisent un accroissement des coûts d'exploitation liés à la consommation d'énergie et/ou de réactifs. Des solutions alternatives, plus douces et vertes, faisant appel aux propriétés écosystémiques des milieux naturels, auraient tout leur intérêt pour atteindre cet objectif.

Dans les écosystèmes aquatiques, les zones humides naturelles sont des interfaces ayant la capacité d'intercepter et de réguler des flux d'eau et de pollution. Les processus écologiques présents dans les zones humides (régulation hydraulique, filtration mécanique, diversification des mécanismes de transformation de la matière, sédimentation, mobilisation et assimilation...) permettent un affinage de l'épuration sur les macromolécules. Leur rôle commence à être également reconnu vis-à-vis de l'abattement complémentaire sur certains polluants (azote, métaux). Ces milieux naturels sont en outre associés à de nombreux usages parfois concurrentiels (agriculture dont élevage, chasse, pêche, activité balnéaire, observatoire faune/flore, randonnée...) et présentent une biodiversité et des paysages particuliers dont les espèces sont souvent protégées.

1.2 Les Zones de Rejet Végétalisées (ZRV)

Depuis un certain nombre d'années, les propriétés particulières des écosystèmes aquatiques naturels sont mises à profit via la mise en place de zones de rejet végétalisées. Comme le définit l'arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif¹, les zones de rejet végétalisées sont « un espace aménagé entre la station de traitement des eaux usées et le milieu récepteur superficiel de rejets des eaux usées traitées. Cet aménagement ne fait pas partie du dispositif de traitement des eaux usées mais est inclus dans le périmètre de la station ». En effet,

¹ <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2015/7/21/DEVL1429608A/jo>

le point de contrôle de la qualité du rejet des eaux usées traitées reste la sortie de la station de traitement des eaux usées et non la sortie de la ZRV.

Depuis une dizaine d'années, les ZRV sont fréquemment proposées lorsqu'il reste du foncier disponible comme un complément de la station de traitement des eaux usées (STEU), pour créer un espace tampon entre la STEU et le milieu récepteur. Les arguments avancés sont la régulation et la dispersion des flux (eau et polluant), les avantages économiques (réduction des coûts de canalisation et d'aménagement autour du rejet, production de biomasse dans certains cas) ou la valorisation paysagère et/ou écologique. Toutefois, ces objectifs ne sont pas explicités dans les cahiers des charges, ni quantifiés, et bien que soient identifiés les bénéfices a priori attendus de tels aménagements, ils ne sont que très rarement mesurés, notamment pour l'élimination des micropolluants. L'absence d'objectifs bien définis lors de la phase de conception conduit parfois à un abandon, voire à un oubli, de la Zone de Rejet Végétalisée.

1.3 Le projet ZHART

Sur la base des résultats prometteurs issus de l'étude de la Zone Libellule® de St Just (2009 - 2012), le projet ZHART (Zone Humide ARTificielle) a été proposé et retenu à l'appel à projets FUI 14. Il avait pour but de « développer et d'**industrialiser** l'aménagement de zones de rejet végétalisées en sortie de stations de traitement des eaux usées afin qu'elles puissent rendre de nouveaux services en termes de **garanties** de traitement complémentaires sur les **micropolluants** et le maintien de la **biodiversité** ». Elles doivent permettre de transformer la station de traitement des eaux usées en un objet de valorisation environnementale et sociale pour la collectivité territoriale concernée.

La méthodologie développée dans le projet ZHART, permet d'élaborer de nouveaux concepts de ZRV car conçues avec des fonctions quantifiables sur trois points :

- Régulation hydraulique,
- Abattement des micropolluants,
- Bénéfices écologiques.

Elle constitue une véritable étape de finition dans le processus de traitement des eaux usées et pourra aboutir, à terme, à une prise en considération réglementaire au point de rejet de la ZRV dans le milieu naturel. En effet, l'une des ambitions des partenaires du projet est d'obtenir une éligibilité de ces zones aux financements des organismes de tutelles (Agences de l'eau, conseils généraux...), qui facilitera l'accès aux marchés des collectivités. Une autre ambition est d'œuvrer à leur ancrage local dans le territoire concerné (sensibilisation environnementale des populations).

Afin d'atteindre ces objectifs ambitieux, différentes études ont été conduites sur différentes ZRVs préalablement sélectionnées sur des critères de temps de séjour hydraulique (> 1 jour), de nombre et de type de compartiment (minimum 3).

Au-delà de la complémentarité scientifique entre les partenaires, ce programme collaboratif a permis le développement d'un réseau de professionnels des métiers du génie écologique pour renforcer la visibilité et la technicité de la filière, ainsi qu'avec des acteurs de la recherche publique et privée (sciences sociales, sciences de l'environnement, santé publique).

1.4 La démarche de génie écologique

1.4.1 Une norme française pour encadrer les projets de génie écologique

Il y a quelques années, à l'initiative d'un groupe de quelques entreprises pratiquant des travaux de génie écologique, s'est formé un comité de normalisation regroupant une trentaine d'entreprises spécialisées, des organismes publics et des associations afin de mettre en place une norme sur « la méthodologie de conduite de projet appliqué à la préservation et au développement des habitats naturels, pour les zones humides et les cours d'eau ».

Cette norme NF X 10-900, publiée en octobre 2012, définit la méthodologie de conduite d'un projet de génie écologique — ou un volet « génie écologique » de projets plus vastes. Elle s'applique à toutes les zones humides (terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire), aux cours d'eau et aux interfaces terre-eau. Ce document est destiné à tous les acteurs susceptibles d'intervenir et participer à un projet de génie écologique : donneurs d'ordre publics ou privés (particuliers, industriels, collectivités locales/territoriales, associations, etc.), maîtres d'œuvre, bureaux d'études, organismes, associations, pouvoirs publics, grand public.

La méthodologie proposée est une **succession d'étapes clés** dans la mise en œuvre d'un projet de génie écologique. Ainsi, depuis la première idée de ce projet jusqu'à sa réalisation et le suivi dans le temps, le projet doit passer par différentes étapes nécessaires à sa bonne réalisation autant d'un point de vue technique et scientifique qu'économique et social (Figure 1).

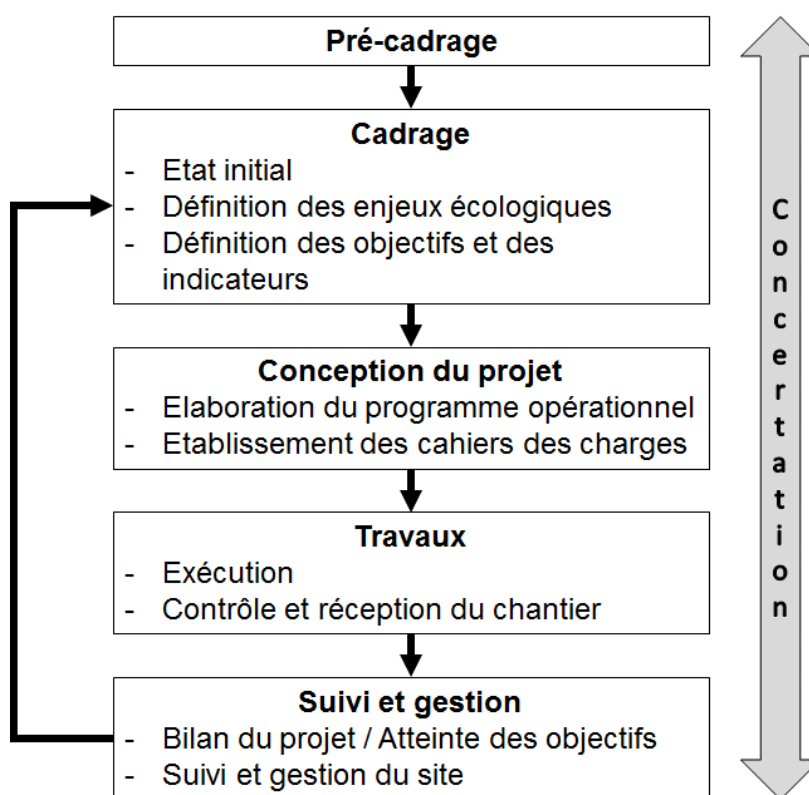


Figure 1. Logigramme des étapes d'un projet de génie écologique

1.4.2 Les ZRV, champs d'application du génie écologique

L'objectif du projet ZHART était d'intégrer les différentes composantes techniques, économiques, mais aussi environnementales et sociales d'un projet de génie écologique tel que préconisé par la norme NF X 10-900. Pour cela, chacun des membres du consortium du projet a étudié une ou plusieurs de ces composantes afin de mieux intégrer ces différents aspects dans les futurs projets de zones de rejets végétalisées et d'en augmenter et/ou d'en améliorer les performances techniques (épuration des polluants, gestion hydraulique, qualité écologique) économiques et sociales.

Ce projet a permis d'étoffer et de produire des connaissances sur ces zones, sur leur fonctionnement ainsi que sur les représentations que peuvent s'en faire leurs usagers. Celles-ci ont pu être traduites en nouveaux services et produits associés à la conception de ces zones et au maintien de leurs performances hydrauliques, épuratoires, et de leurs fonctions écologiques et sociales.

Ce document présente les grands enseignements tirés du projet ZHART et des recommandations pour la conception et l'exploitation de nouveaux concepts de zones humides artificielles dans son application en sortie de stations de traitement d'eaux usées municipales.

2 CONCEPTION D'UNE ZRV : DÉMARCHE, PRÉCONISATIONS ET OBJECTIFS ASSOCIÉS

2.1 Démarche pour la conception d'une ZRV

Le nouveau concept de ZRV s'appuie sur la méthodologie définie par la norme française X10-900 relative au Génie Ecologique. Cette dernière laisse une part importante à la concertation avec les acteurs locaux et à la prise en compte des enjeux locaux. Ce travail, élaboré avec des partenaires qualifiés, nécessite des compétences spécifiques afin de n'omettre aucune information. Plusieurs étapes sont donc nécessaires pour mener à bien un projet (Figure 2).

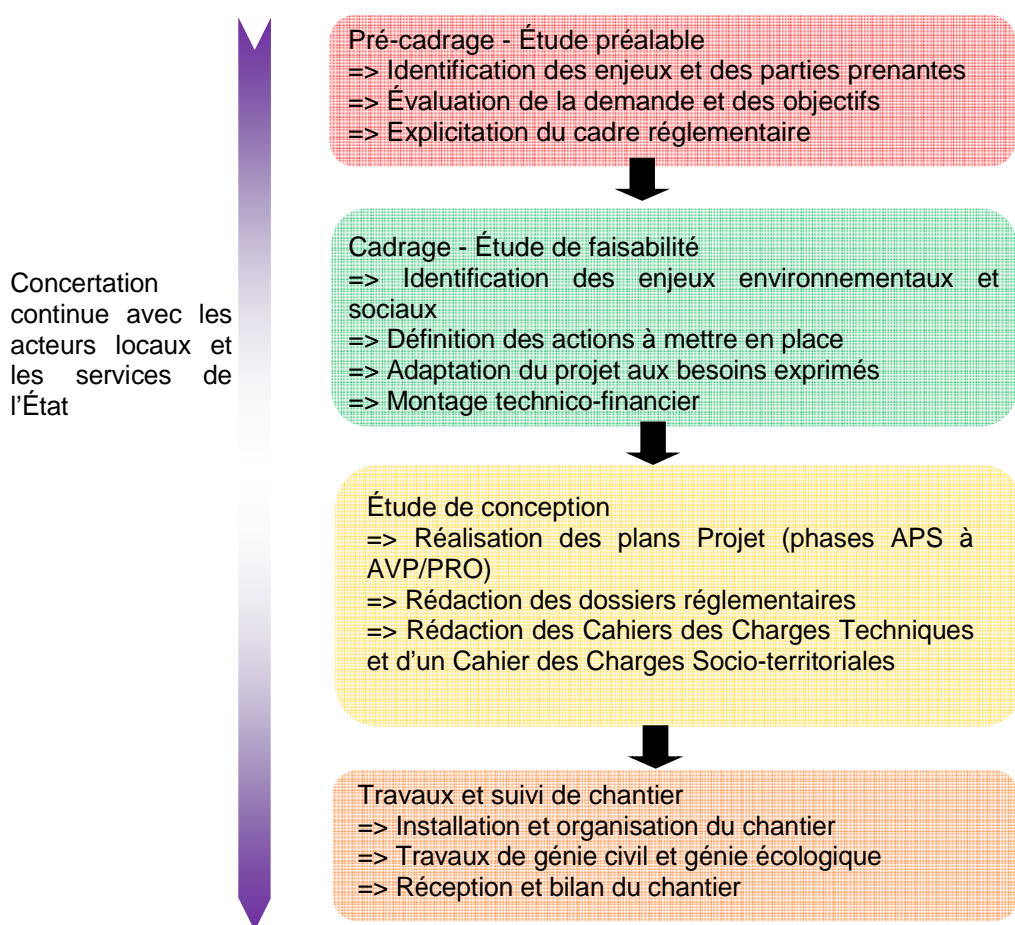


Figure 2. Etapes d'un projet de nouvelle ZRV suivant la méthodologie de la norme NF X10-900

2.1.1 Étude préalable

Cette étape est une première approche, basée essentiellement sur la concertation et la collecte de données, permettant d'identifier le besoin du maître d'ouvrage et d'intégrer les principales contraintes à la mise en œuvre du projet local. Il s'agit de :

- Visiter le site pouvant accueillir la nouvelle zone
- Compiler et analyser l'ensemble des données (débit et qualité des eaux en sortie de STEU, études antérieures, historique du site...)

- Echanger avec les acteurs locaux (élus, exploitant de la STEU, associations naturalistes, institutions dédiées à la gestion de l'Eau...), et analyser leur discours
- Prendre connaissance des enjeux locaux (bassin versant, inscription de la zone dans la trame verte et bleue, zonage réglementaire, usages, dynamiques territoriales économiques et sociales)
- Evaluer les principales difficultés techniques, réglementaires et socio-territoriales
- Cibler les objectifs de la zone (écologique, épuratoire, récréatif, pédagogique, paysager...)

La compréhension et l'analyse de ces éléments aboutiront à la réalisation d'un schéma de principe qui sera présenté aux services de l'État pour une pré-validation.

2.1.2 Étude de faisabilité

L'étude de faisabilité nécessite diverses investigations de terrain pour confirmer les opportunités et affiner les contraintes identifiées précédemment, par exemple celles liées à la nature des sols ou à la configuration du site d'implantation de la zone. Les missions portent notamment sur :

- La réalisation de démarches administratives (DT-DICT) pour prévenir des endommagements des réseaux lors des travaux et des conséquences pouvant en résulter pour la sécurité des personnes et des biens
- Un relevé topographique et hydraulique détaillé permettant d'identifier les réseaux existants, la pente du terrain, les apports extérieurs et d'évaluer les volumes déblais/remblais générés par les travaux
- Les études hydrogéologiques et géotechniques afin de préciser la nature lithologique des sols et du sous-sol, de définir la perméabilité des faciès caractéristiques présents sur l'emprise foncière, de connaître le fonctionnement hydrologique du site et d'étudier les possibilités géotechniques de réutilisation de matériaux pour l'édification de digues. Dans certains cas, la pose de piézomètres peut s'avérer nécessaire pour suivre les fluctuations de la nappe et son incidence sur l'alimentation de la zone
- La collecte des données climatiques locales (Météo France) pour déterminer les pertes par évaporation/évapotranspiration et les apports par la pluviométrie
- Un inventaire faune/flore afin d'évaluer l'intérêt environnemental du site et son contexte (intégration et connexion écologique à d'autres espaces naturels). Le gain écologique lié à la réalisation de la zone doit être systématique
- Étude des documents d'urbanisme, analyse des usages actuels du site et de ses environ

A la fin de cette étape, le cadre réglementaire peut être clairement défini et les enjeux environnementaux et techniques pourront être pris en compte dans la conception du projet et le montage financier.

2.1.3 Étude de conception

Cette étape se compose de deux phases : Avant-Projet Sommaire (APS) et Projet (PRO) permettant de proposer au final une ZRV répondant à la demande et au besoin du maître d'ouvrage.

En **phase APS** et sur la base du schéma de principe, il s'agit de **présenter plusieurs scénarii intégrant un ou plusieurs objectifs** : épuratoire (traitement physico-chimique), écologique (renforcement de la trame verte et bleue), pédagogique et récréatif (connexion au réseau de chemins pédestres, mise en place de panneaux explicatifs), paysager ((prise en compte du patrimoine paysager local, intégration des bâtiments de la STEU)...

Les contraintes relatives à l'aménagement (réglementaire, technique...) et le chiffrage de chaque scénario sont par la suite présentés au maître d'ouvrage et aux autres parties prenantes durant diverses réunions.

Après validation d'un des scénarii, la **phase PRO** est engagée pour **finaliser la conception écologique et hydraulique** de la zone. Elle s'appuie sur le temps de séjour nécessaire pour assurer un traitement efficace des paramètres ciblés (micropolluants ou macropolluants), le volume nécessaire des bassins, le cortège floristique retenu en fonction du sol ou de leur présence naturelle sur le site... Un cahier des charges des conditions d'insertion socio-territoriale l'accompagne.

Les qualités des objectifs de la zone doivent être "*Spécifiques, Mesurables, Accessibles, Réalistes et Temporalisés*" (norme NF X10-900). Les outils mis en place dans le cadre du projet ZHART (modélisation de l'évolution interannuelle du potentiel biologique et épuratoire élaborée) permettront de présenter et de justifier le scénario retenu.

À la fin de cette phase, l'objectif est de fournir les plans d'exécution AutoCAD suivants :

- Plan d'implantation de la végétation,
- Coupes et Profils des différents compartiments,
- Plan des cubatures (déblais/remblais),
- Plan de terrassement.

Ces documents sont nécessaires pour la **rédaction des Cahiers des Charges Techniques** (pièce du Dossier de Consultation des Entreprises) et l'élaboration des **dossiers réglementaires** (Dossier loi sur l'Eau, Étude d'impact, Dossier Natura 2000, Dossier de Déclaration Publique...). Au cours de cette étape, la **concertation** avec les services de l'État doit être **continue et régulière**.

2.1.4 Travaux et suivi de chantier

Le choix des prestataires doit s'opérer en prenant en compte les **compétences de l'équipe et l'expérience en travaux de génie écologique**. Le prestataire doit être capable de réaliser les actions détaillées dans les Cahiers des Charges Techniques.

La présence d'un **coordinateur de chantier sensibilisé au génie écologique** et l'intervention de **partenaires qualifiés** pour la réalisation et l'appropriation des aménagements (choix des matériaux, technique de plantation des espèces végétales, conducteur de chantier qualifié, paysagistes, chercheurs en sciences humaines et sociales...) sont donc primordiales pour la réussite du projet.

Selon la nature et l'importance des travaux, le coordinateur du chantier pourra être extérieur ou appartenir à la société de travaux.

Dans les sections suivantes, chaque étape de l'élaboration d'une nouvelle zone est explicitée et détaillée, en fonction des compétences et des métiers investis dans la démarche. Il faut cependant considérer ces différentes dimensions comme interdépendantes et faisant partie d'une démarche globale d'ingénierie écologique.

2.2 Fonctionnement hydro-écologique des Zones de Rejet Végétalisées (ZRV)

2.2.1 Influence de l'hydraulique sur le fonctionnement des ZRVs

Il existe un lien privilégié entre fonctionnement physico-chimique et écologique des écosystèmes aquatiques et hydrologie au sens large. En effet, l'eau qui circule est le vecteur des apports d'éléments nutritifs et de polluants qui nourrissent, gênent et/ou intoxiquent la chaîne alimentaire. La façon dont ces flux arrivent n'est pas neutre, car dans un écosystème aquatique, le temps de séjour des eaux, la variabilité des débits dans le temps, la géométrie des écoulements et la stratification verticale éventuelle font partie des éléments influençant la capacité de la biomasse à fixer les nutriments et les polluants avant que les eaux n'atteignent l'exutoire.

Par ailleurs, la vitesse des écoulements (et donc indirectement les flux d'eau et la géométrie des bassins), le vent, et les hétérogénéités au sein des bassins (fond, berges, végétation) conditionnent également la profondeur de la colonne d'eau et le devenir des matières en suspension. Celles-ci peuvent décanter dans tout ou partie des bassins, être remises en suspension à la faveur d'une crue, d'un coup de vent ou d'une autre perturbation du système, être métabolisées et intégrées dans la chaîne trophique, et il peut y avoir des phénomènes de désorption à l'interface eau sédiment. Or, si l'hydraulique et la météorologie impactent la physico-chimie et le fonctionnement biologique des écosystèmes aquatiques, l'inverse est également vrai. La biomasse végétale (microphytes, macrophytes, et hélophytes) impacte en retour la spatialisation des concentrations en sels dissous et en particules et peut influencer sur les circulations hydrauliques et la ligne d'eau.

Un écosystème aquatique subit donc un ensemble d'influences, parmi lesquelles l'hydrologie est un aspect central. Il convient de disposer de critères de dimensionnement visant à l'optimisation de la gestion hydraulique des aménagements dans la perspective d'optimiser à la fois la capacité épuratrice des eaux, la biodiversité et in fine l'intégration paysagère de la zone.

2.2.2 Conception des nouvelles ZRV

2.2.2.1 Quels objectifs ?

Le dimensionnement hydraulique d'une nouvelle ZRV est étroitement lié aux caractéristiques du sol. Suivant sa capacité d'infiltration et le besoin du maître d'ouvrage, plusieurs scénarii hydrauliques sont possibles :

- Le sol est imperméable ou, pour des raisons réglementaires, les compartiments sont étanches. Dans ce cas de figure, le système aura une fonction de rétention des eaux (et potentiellement de traitement) avant rejet vers le milieu récepteur.
- Le sol est moyennement perméable et, suivant la hauteur en eau dans les compartiments, une partie des flux sera infiltrée avant rejet vers le milieu récepteur. Il s'agit ici d'un système de rétention-infiltration.
- Le sol est perméable et l'ensemble des flux entrant sont infiltrés. Pour ce scénario, la nouvelle Zone de Rejet Végétalisée est considérée comme une zone d'infiltration.

Concernant les scénarii 1 et 3, le dimensionnement nécessite une construction adaptée à leur objectif. Le scénario 2 est le plus commun avec une variabilité dépendant des situations locales. Dans tous les cas, il convient d'évaluer comment se répartiront les flux sortants.

2.2.2.2 Eléments et données nécessaires

Les principales contingences à prendre en compte sont :

- La météorologie (les températures minimales (gel) et maximales (stress thermique), la pluviométrie et sa répartition dans le temps, la direction et la vitesse du vent, l'humidité...).
- L'espace disponible et sa topographie.
- Les sols en place.
- Le sous-sol et la présence ou pas d'une nappe souterraine à faible profondeur.
- L'exutoire et ses contraintes (niveaux d'eau de restitution, débits, qualité des eaux et des biotopes, fonctions et usages...).

Que l'on travaille sur une installation existante à réhabiliter ou sur un nouveau projet, il est fondamental de disposer d'un certain nombre d'informations et cela dès le stade de la conception.

Pour la conception (et la réhabilitation) de ZRV, il est recommandé de collecter les données suivantes :

- Les données météorologiques et notamment la pluie, mais aussi le vent, l'humidité, l'ensoleillement, et la température de l'air ;
- Les mesures de débit entrant dans la zone, généralement disponibles car mesurées en sortie de station de traitement des eaux usées.
- La perméabilité des sols en place. Cette perméabilité n'est pas celle que l'on aura une fois la zone en service, mais elle servira à évaluer si on peut travailler avec les sols en place ou s'il faut prévoir de les remplacer.
- Les niveaux NGF de la nappe et leur variabilité dans le temps (cycles saisonniers). C'est un point important, car une nappe haute peut à la fois alimenter la zone, modifier le bilan hydrique de celle-ci et sa capacité épuratrice, mais même si elle n'est pas assez haute pour alimenter les bassins en eau, elle peut encore impacter les flux d'infiltration.
- Les données géotechniques, car elles impactent le champ des possibles en termes de morphologie des berges et des cheminements entre bassins.

Il est recommandé de prévoir en complément les mesures suivantes pour une bonne gestion de ces zones :

- Débit sortant de la zone vers le milieu récepteur (eau superficielle). Rarement mesuré en sortie de ZRV, alors que cette mesure est nécessaire si on veut l'exploiter correctement.
- Mesures intermédiaires dans les principaux bassins composant la zone. Des mesures de niveau sont préconisées, suffisamment précises pour permettre le calcul des stockage/déstockage, mais aussi une interprétation de la ligne d'eau et les mesures de débit faites au droit des déversoirs. Si l'on dispose d'un méandre au sein de la zone, c'est un endroit favorable à l'intégration d'une mesure de débit intermédiaire.

2.2.2.3 Estimation du bilan hydrologique

Lors du projet ZHART, une méthodologie a été développée pour établir les bilans hydrologiques des sites étudiés. Les différents termes du bilan hydrologique sont présentés ci-dessous. Pour chaque site, les bilans ont été établis à partir des données collectées lors des audits excepté le flux d'infiltration ($Q_{\text{infiltré}}$) qui a été déterminé par différence avec les autres termes du bilan:

$$Q_{\text{entrée}} + Q_{\text{pluie}} = Q_{\text{sortie}} + Q_{\text{infiltré}} + Q_{\text{ETP}} + Q_{\text{EP}} + \Delta_{\text{Stockage}}$$

$Q_{\text{entrée}}$: Flux d'eau mesuré en entrée de la ZRV

Q_{pluie} : Flux d'eau apporté par la pluie

Q_{sortie} : Flux d'eau mesuré en Sortie de ZRV

$Q_{\text{infiltré}}$: Flux d'eau infiltré

Q_{ETP} : Flux d'eau évapotranspiré par les végétaux (ETP)

Q_{EP} : Flux d'eau évaporé des surfaces d'eau libre

Δ_{Stockage} : Variation de volume d'eau au sein de la ZRV

Ces bilans hydrauliques ont permis de mettre en évidence le poids des différentes composantes du bilan pour chacun des sites étudiés. Les termes les plus importants dans la durée sont les flux entrant et sortant et le flux d'infiltration. À titre d'exemple, sur le site E pour l'année 2014, l'effluent secondaire sortant de la station de traitement des eaux usées représentait 96 % des apports totaux. Le flux mesuré en sortie de ZRV (Q_{sortie}) ne représentait plus que 55% du flux total entrant quand le flux d'infiltration correspondait à 31 % du flux total entrant. Les autres flux sont très variables dans le temps. Ils peuvent présenter des pics en été via l'évaporation et l'évapotranspiration (ETP), ou en hiver via de fortes précipitations. Par exemple, la contribution de l'ETP sur le site E était de l'ordre de 0,5 % en janvier 2014, alors qu'elle atteignait 14 % en juin de la même année (il est donc important de bien calculer ce flux). Cela montre l'importance de l'échelle de temps considéré (mois, an), du moment de l'année considéré mais aussi du temps de séjour à ce moment-là. Toutefois lors de la conception d'une ZRV, l'ensemble de ces données n'est pas encore disponible, il faut donc le calculer à partir des données disponibles et d'hypothèses (§ 2.2.2.2)

2.2.2.4 Circulations hydrauliques et temps de séjour

Lors des audits hydrauliques réalisés dans le cadre du projet ZHART, il a été observé à plusieurs reprises que les temps de séjours hydrauliques réels étaient largement inférieurs au temps de séjours théoriques. Principalement dû à une mauvaise organisation spatiale des écoulements, cette différence n'est pas sans incidence sur le potentiel épuratoire et écologique des ZRV.

Afin d'éviter ces écarts entre théorie et réalité, il convient d'appliquer lors de la conception des zones des règles de bonnes pratiques :

- Eviter les zones mortes et les courts circuits hydrauliques. Ils ont non seulement pour effet de réduire le temps de séjour des eaux et donc indirectement la capacité de l'écosystème à épurer l'eau, mais il peut aussi en résulter des dégradations de la qualité de l'eau dans les zones mortes, voire une déstabilisation de la biomasse et d'autres effets nuisibles.
- Eviter les berges à pente trop faible, car le marnage des eaux induirait alors une variation importante de la surface en eau et du périmètre mouillé des bassins.
- Entretien correctement les bassins pour éviter la formation de zones de dépôts.
- Ne pas laisser en place les végétaux faucardés pour éviter un engorgement.
- Eviter la déstabilisation des berges par les ragondins (campagne de piégeage).

2.2.2.5 Ligne d'eau

La ligne d'eau est dépendante de la géométrie des bassins, des circulations d'eau (voir ci-avant §2.2.2.4), mais aussi de l'état d'envasement et de la végétation. La modélisation de la ligne d'eau est possible, moyennant un jeu de données et d'hypothèses suffisants (il faut disposer d'une géométrie des bassins par exemple). Une bonne maîtrise des phénomènes en jeu permet d'identifier les évolutions probables de la ligne d'eau. Un exemple pour le site E est présenté ci-après. Il s'agit de la ligne d'eau dans la roselière pour l'ensemble de la période allant de janvier 2014 à juillet 2015 (Figure 3).

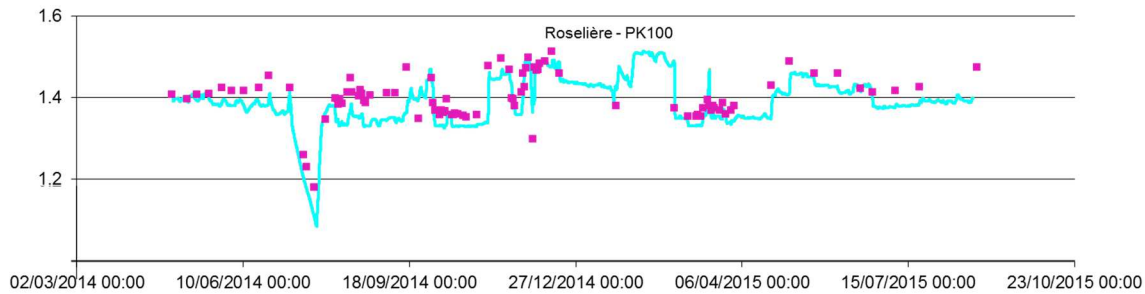


Figure 3. Niveaux d'eau NGF calculés (trait bleu) et mesurés (points roses) sur le 2nd bassin du site E entre avril 2014 et juillet 2015 (modélisation Suez Consulting)

Un autre point fondamental est la sortie de la zone. Si on utilise un filtre à sable, il a tendance à s'encrasser, et il est important de dimensionner et d'entretenir le filtre pour éviter son colmatage, car ce dernier tend à faire remonter la ligne d'eau des bassins situés en amont, avec les conséquences que cela peut avoir.

2.3 Rôle épurateur

Le rôle épurateur des ZRV, basé sur les capacités d'autoépuration des écosystèmes aquatiques naturels, a souvent été remis en question par les différentes études qui ont pu être réalisées ces dernières années. Toutefois un projet bien conçu peut mettre en valeur et optimiser cette fonctionnalité des ZRV autant pour les macropolluants (carbone, azote, phosphore) et la bactériologie que les micropolluants organiques et inorganiques.

2.3.1 Macropolluants et bactériologie

Dans le cadre du projet ZHART, des audits d'évaluation des performances épuratoires ont été menés sur différents sites d'étude (annexe 2). Pour cela, les paramètres majeurs généralement mesurés en station de traitement des eaux usées ont été suivis en entrée, sortie et en différents point intermédiaires des ZRV audités (annexe 3).

2.3.1.1 Macropolluants

La caractérisation des effluents en entrée de sites d'audit montre que leur composition varie suivant le type de stations de traitement des eaux usées (STEU) en amont et suivant les objectifs de traitement qui leur sont associés : abattement du carbone, nitrification complète avec ou sans dénitrification des eaux usées brutes (Tableau 1).

Tableau 1. Concentrations en entrée de ZRV et abattement des macropolluants

Type et taille de STEU		Boues activées (A, C, E) et lagunage (D) (5 000 EH et 30 000 EH)	Lit bactérien (600 EH)
Demande chimique en oxygène (DCO)	Entrée ZRV % élimination	23 à 105 mg O ₂ /L 0% à 40 %	107 mg O ₂ /L ~ 40 %
Azote global (NGL)	Entrée ZRV % élimination	1,8 à 15 mg N/L 50 à 90%	100 mg N/L ~ 50%
Phosphore total (Pt)	Entrée ZRV % élimination	0,8 à 4,2 mg P/L 10 à 65 %	16 mg P/L ~ 35%
Matières en suspension (MES)	Entrée ZRV % élimination	4 à 6 mg/L 0 à 75 %	41 mg/L ~ 70 %

Les résultats de ces audits ont mis en évidence une grande variabilité des performances épuratoires des ZRV en fonction de leur type et de la qualité de l'effluent secondaire. Cette étude a permis de démontrer que les ZRV suivies peuvent maintenir la qualité des rejets de STEU, mais aussi qu'elles possèdent une réelle capacité à améliorer cette qualité, en particulier pour l'azote et dans une moindre mesure pour le phosphore. Ce potentiel ne peut s'exprimer que si le site fait l'objet d'une gestion spécifique.

En effet, l'élimination de l'azote observée sur les différents sites s'explique principalement par la réduction de la concentration en nitrate du fait de la dénitrification biologique et de l'assimilation par les macrophytes, les microphytes et les hydrophytes. Les rendements observés, notamment pour l'azote, sont en moyenne plus élevés que ceux généralement observés pour les ZRV. Une des explications est que les sites étudiés possèdent des temps de séjour hydraulique assez long (de l'ordre de quelques jours à quelques dizaines de jours) par rapport aux ZRV ayant fait l'objet d'études connues dans la littérature (de quelques heures à un ou deux jours). Suivant la qualité de l'effluent en entrée de ZRV et suivant leur conception et leur dimensionnement, les nouvelles ZRV seront capables d'assurer un traitement complémentaire des macropolluants, et en particulier de l'azote.

2.3.1.2 Bactériologie

Concernant la bactériologie des effluents entrant dans les ZRV, les concentrations en *E.Coli* et en Entérocoques dépendent fortement de la filière de traitement des eaux usées de la STEU, allant de 10^2 NPP/100 ml (lagunage) à 10^5 NPP/100 ml (lit bactérien).

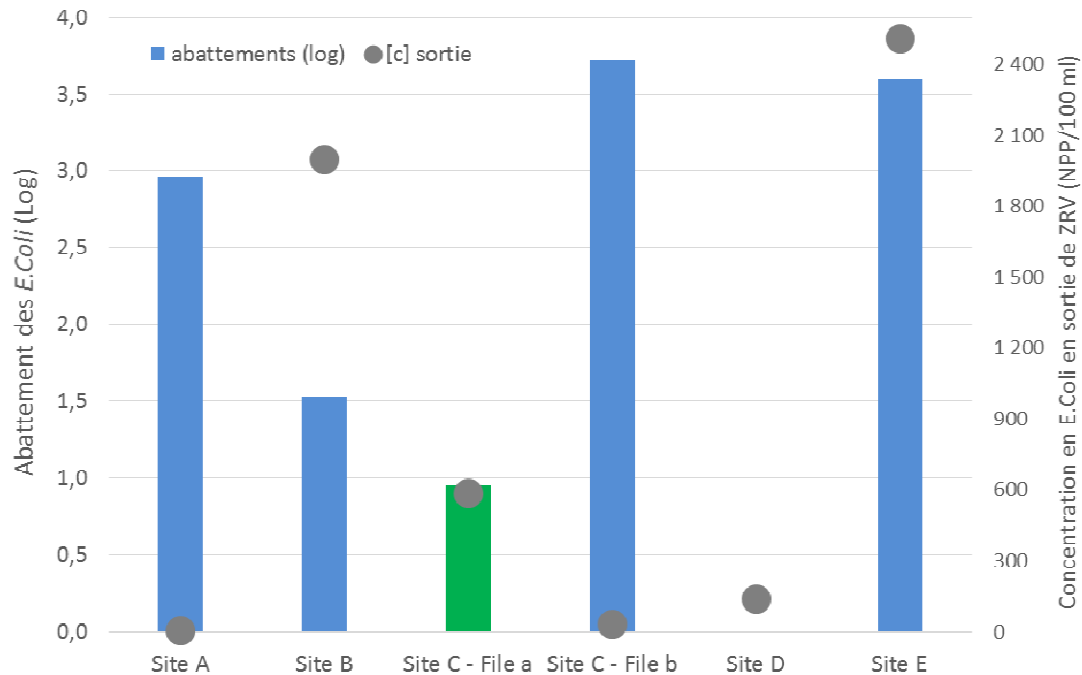


Figure 4. Concentrations en *E. Coli* en sortie de ZRV et abattement

Les abattements observés pour les sites d'étude varient entre 1 et 3 log d'abattement suivant le type d'aménagement (Figure 4). Pour ceux ayant un temps de séjour réduit, la désinfection n'est pas totale, mais reste non négligeable (> 1 log), au moins en période d'étiage qui est la plus sensible pour les cours d'eau récepteurs des effluents traités. Il apparaît clairement que le seul paramètre du temps de séjour n'est pas suffisant pour anticiper les performances de désinfection d'une ZRV, et qu'il faut prendre aussi en compte le type de compartiment, leur couverture végétale et la saison à laquelle on veut assurer les performances de traitement.

Toutefois, il est possible d'envisager un abattement complémentaire d'un log (*a minima*) sur les paramètres *E.Coli* et entérocoques, par une conception, un dimensionnement et un plan de gestion des sites adaptés.

2.3.2 Micropolluants

2.3.2.1 Sélection des substances suivies

Dans le cadre du projet ZHART, plus de 30 micropolluants organiques et inorganiques ont été suivis en entrée, en sortie et en différents points intermédiaires des sites d'études (annexe 4). La sélection de ces micropolluants s'est faite sur plusieurs critères, dont les principaux sont :

- Représentativité vis-à-vis de différentes classes de composés dont l'élimination peut être demandée en sortie de STEU du fait de leur impact potentiel sur le milieu (métaux, pharmaceutiques, hormones, produits cosmétiques, pesticides, HAP, alkylphénols)
- Fréquence de quantification en sortie de station de traitement des eaux usées, d'après les premiers résultats de l'action RSDE, du projet de recherche AMPERES, des données

provenant de l'étude réalisée en 2010 -2012 sur le site atelier Zone Libellule de St-Just et de la littérature scientifique.

- Disponibilité des méthodes d'analyse fiables avec des limites de quantification basses.

2.3.2.2 Performances de traitement des micropolluants

Pour chaque site d'audit, des rendements d'élimination de la phase eau (R_w) ont été calculés suivant la méthodologie développée lors des projets de recherche AMPERES², et ARMISTIQ³ (détaillés en annexe 5). Du fait, des incertitudes sur les mesures de concentrations les rendements sont classés en 4 catégories afin d'évaluer les performances des différents sites :

- $R_w < 30\%$: Elimination faible ou nulle
- $30\% < R_w < 70\%$: Elimination moyenne
- $70\% < R_w < 90\%$: Forte élimination
- $R_w > 90\%$: Très forte élimination

Toutefois, les faibles concentrations en entrée de ZRV pour certains micropolluants ne permettaient pas toujours de calculer des rendements fiables, suivant les critères de la méthodologie employée (annexe 5). A titre d'exemple, pour le site D, il n'a pu être calculé que 3 (sur 13) rendement d'élimination pour les pharmaceutiques et produits cosmétiques (Figure 5) et aucun (sur 6) pour les métaux (Figure 6).

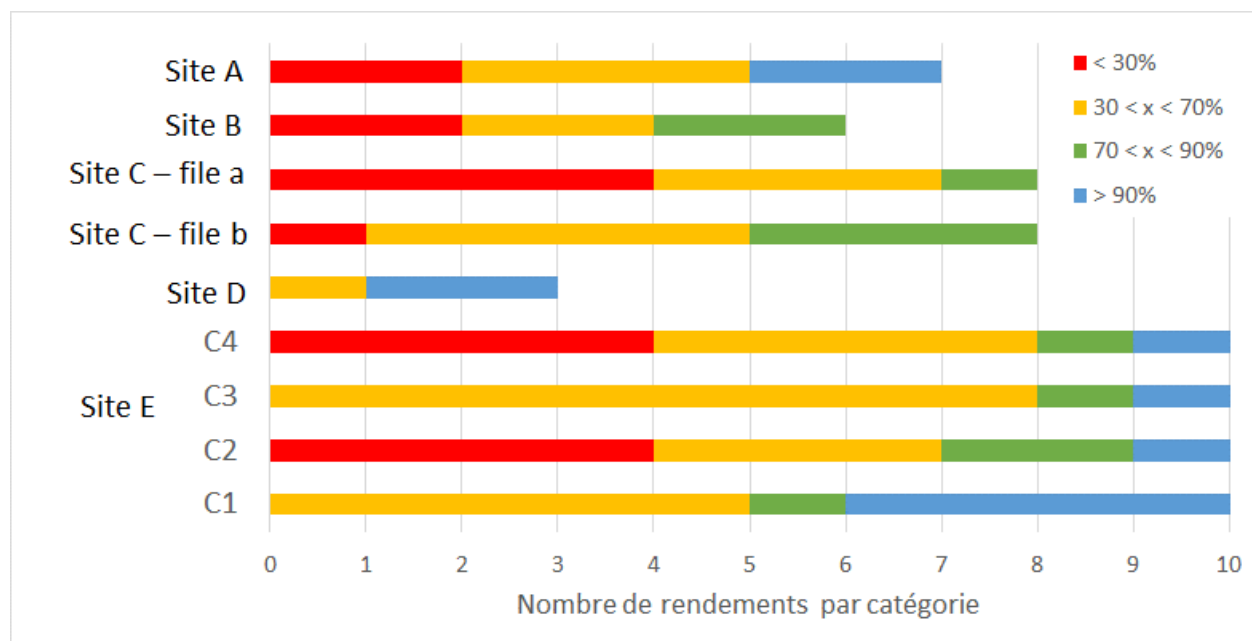


Figure 5. Distribution par gamme (0 ; < 30 % ; 30 - 70 % ; 70 - 90 % ; > 90 %) des rendements d'abattement des 11 pharmaceutiques et 2 produits cosmétiques pour les différents sites d'étude.

² <http://projetamperes.cemagref.fr/index.html>

³ <http://armistiq.irstea.fr/>

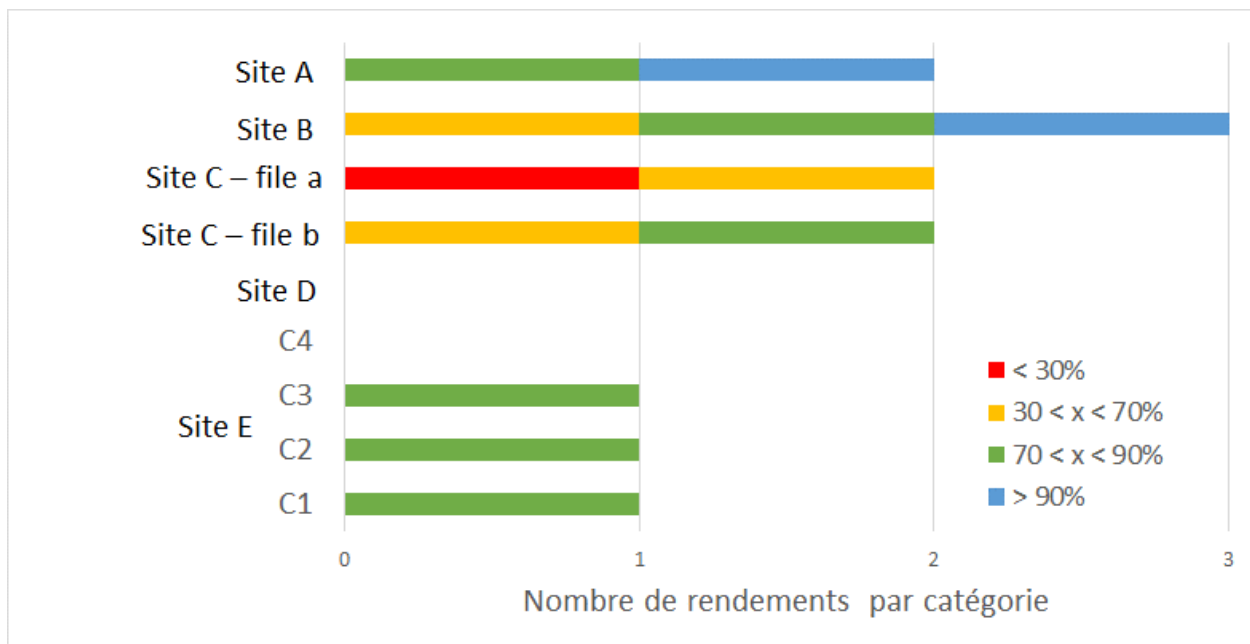


Figure 6. Distribution par gamme (0 ; < 30 % ; 30 - 70 % ; 70 - 90 % ; > 90 %) des rendements d'élimination de la phase Eau des 6 métaux pour les différents sites d'étude.

Comme le montre la Figure 5, les différents ZRV audités présentent une grande variabilité de performances d'élimination de la phase Eau des micropolluants pharmaceutiques et produits cosmétiques. En effet, on observe un plus grand nombre de rendements élevés (> 70%) pour le site E que pour les autres sites. De même les rendements sont globalement plus faibles sur la « file a » que sur la « file b » du site C. Les deux files étant identiques, la différence de performance épuratoire s'explique 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 de traitement des métaux (figure 6) et des autres micropolluants suivis dans le cadre du projet.

Les résultats de la figure 5 montrent clairement que pour une même famille de micropolluants, les rendements d'élimination peuvent varier de > 90% pour certaines substances à < 30% pour d'autres. Cela tient au fait que leur élimination de la phase eau est due à différents mécanismes, à savoir :

- la photodégradation,
- l'adsorption (sur les substrats et les matières en suspension)
- la biodégradation
- le prélèvement par les plantes

Cela montre aussi que la conception et le dimensionnement de chacune des ZRV permettent une expression plus ou moins forte de ces mécanismes. A titre d'exemple, le rendement d'élimination du galaxolide (musc synthétique utilisé dans les produits cosmétiques) varie de <30% (site C – « file A ») à > 90% (site E – C1).

Dans le cadre du projet ZHART, tous les sites étudiés comportaient plusieurs compartiments. Pour certains d'entre eux, les rendements d'élimination en des points intermédiaires ont pu être étudiés et calculés. Les résultats montrent une amélioration du traitement tout au long de la succession de compartiments. Par exemple, les rendements d'élimination du galaxolide en différents points du site E le démontrent clairement (Figure 7). On remarque aussi que les conditions opérationnelles peuvent varier d'une saison à l'autre et modifier les performances épuratoires d'un même site. Pour le site E, le rendement d'élimination du galaxolide passe de

95% pour la campagne 1 (C1) à 66% pour la campagne 3 (C3, Figure 7) du fait de variation des conditions climatiques (saison, température) et opérationnelles (débit hydraulique, couvert végétal).

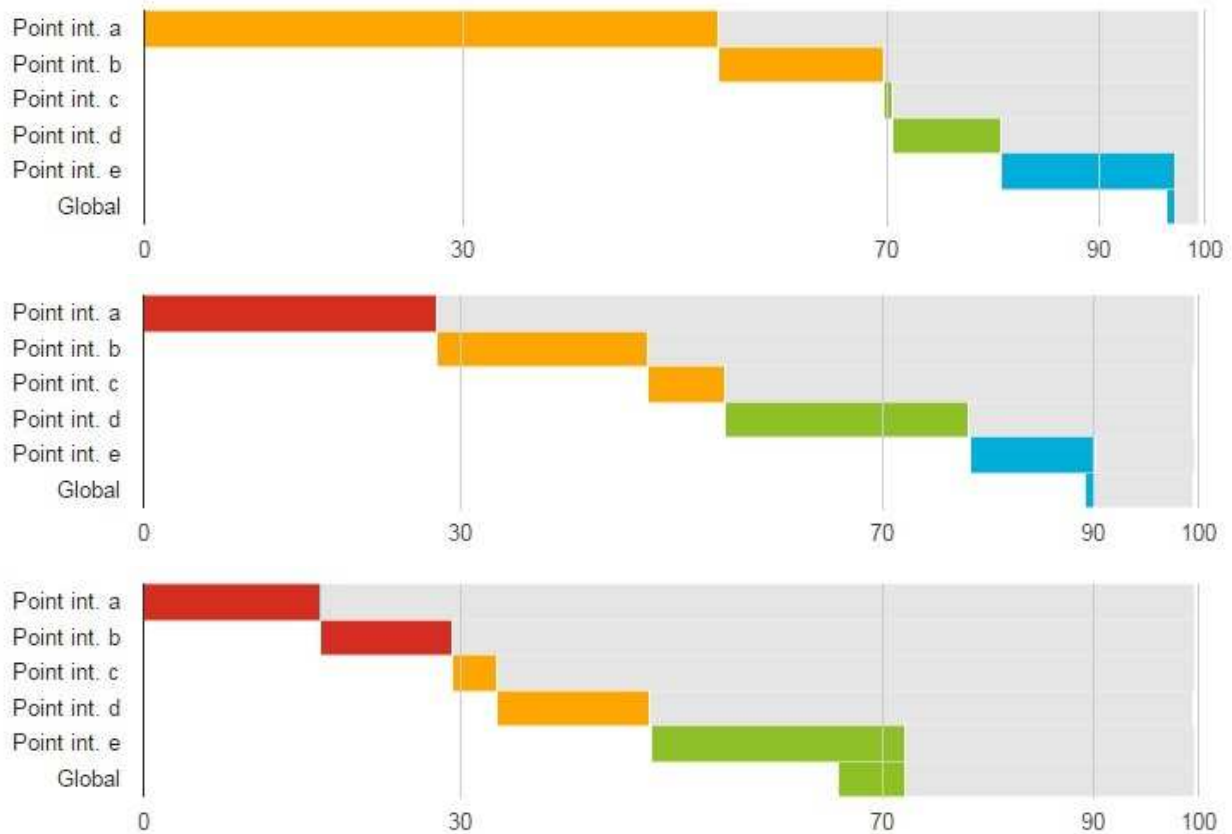


Figure 7. Rendement d'élimination de la phase eau tout au long du traitement pour le galaxolide pour 3 campagnes sur le site E.

La comparaison des rendements d'élimination site par site et inter-site (point(s) intermédiaire(s) vs. sortie des ZRV étudiées) a donc permis de confirmer le besoin d'un temps de séjour minimum (de 2 à 3 jours) pour obtenir un abattement significatif de certains micropolluants, mais aussi et surtout le rôle du nombre, du type et de l'ordre des compartiments dans une ZRV pour être en mesure de proposer des garanties de traitement.

Pour améliorer la compréhension des résultats obtenus sur les sites audités, l'étude a été complétée par l'analyse des micropolluants dans les sédiments et les végétaux prélevés en différents points de chaque site. L'analyse des sédiments des différents sites d'étude ont mis en évidence que les concentrations en éléments traces métalliques dans les sédiments de ces ZRV étaient inférieures à celles généralement obtenues pour des boues de station de traitement des eaux usées ainsi qu'aux seuils limites de l'arrêté du 8 janvier 1998 sur l'épandage des boues. Il en est de même pour les végétaux. Lors de la réalisation des nouvelles zones de rejet végétalisées, il est possible de prévoir une zone de compostage des déchets verts issues de l'entretien annuel. Afin de déterminer les voies de valorisation du compost, des analyses pourront être effectuées.

De plus, des études en microcosmes ont été réalisées afin d'identifier et/ou de confirmer les mécanismes d'élimination de chaque substance étudiée (voir §2.4.2.3 et 2.4.2.4). Les résultats obtenus par ces approches complémentaires ont été confrontés aux données disponibles dans la littérature scientifique. Cet ensemble de données acquis au cours du projet ZHART a permis

de mettre en évidence et/ou de confirmer la prédominance de certains mécanismes conduisant à l'élimination des micropolluants, tels que la photodégradation, la biodégradation, l'adsorption et l'absorption par les plantes.

En intégrant ces connaissances dans la conception de nouvelles ZRVs, via des critères sur la taille minimum (globale et par type de compartiment), le type et nombre de compartiments et la sélection de végétaux aquatiques, il est possible de garantir des rendements d'élimination de certains micropolluants. Une conception et un dimensionnement adaptés des zones permettront de proposer des garanties de rendements d'élimination pour certaines substances cibles. Le Tableau 2 présente un exemple de garanties qui pourraient être proposées.

Tableau 2. Exemples de garanties de rendements d'élimination de micropolluants

Famille	Substances	Rendement visé (en concentration)
Métaux	Zinc	> 70 %
Pharmaceutiques :		
• Antibiotiques	Ciprofloxacine	> 70 %
• Anti-inflammatoire	Ibuprofène	> 50 %
• β -bloquants	Propranolol	> 50 %
Muscs	Galaxolide	> 70 %

2.4 Génie végétal

Le génie végétal a souvent été négligé dans la conception et la réalisation de projet de ZRV alors qu'il est essentiel au bon fonctionnement autant hydraulique, épuratoire qu'écologique. Il convient donc de le prendre en compte de la production des végétaux au suivi de la ZRV en passant par la préparation du plan de plantation lors de la phase de conception de la ZRV.

2.4.1 Production des végétaux

2.4.1.1 Traçabilité de production

En réponse aux exigences de certains maîtres d'œuvre, la traçabilité de production des végétaux se réalise à deux échelles :

- Lors de la récolte des semences sur le lieu de production ou en milieu naturel et de leur mise en culture. Actuellement, près de 75 % des héliophytes produites, dédiées aux aménagements environnementaux, proviennent des semences récoltées sur site.
- Tout au long de leur cycle de développement à travers un suivi des traitements naturels réalisés (engrais organiques et pesticides naturels).

2.4.1.2 Maîtrise de la production de A à Z

Selon la demande du client, il est possible d'identifier et de récolter les végétaux en milieu naturel ainsi que de les produire en pépinière. En effet, le caractère local et endémique de la plante revêt dans certains cas une importance particulière au sein du CCTP des maîtres d'œuvre.

2.4.2 Mécanismes d'élimination des micropolluants - contribution des végétaux

Dans le cadre du projet ZHART, plusieurs tests ont été menés en conditions contrôlées afin d'étudier les possibles mécanismes d'élimination des micropolluants et d'évaluer la contribution des végétaux. Pour cela, des études en microcosmes ont été réalisées dans la serre expérimentale du partenaire NYMPHEA (Cailar, 30).

2.4.2.1 Principe des essais en microcosmes

Pour les essais en conditions contrôlées, une solution concentrée de micropolluants était ajoutée à de l'eau du premier bassin de la ZRV du site E, afin d'atteindre une concentration initiale en micropolluants de 10 µg/L. 150 L de cette eau dopée a permis d'alimenter chaque microcosme. La concentration en micropolluants de cet eau a été suivie dans le temps afin d'évaluer les cinétiques d'élimination de chaque micropolluants pour chaque microcosme.

Trois types de microcosmes ont été testés afin de comparer le rôle des différents compartiments d'une ZRV (Figure 8) :

- Un microcosme EAU : il ne contient que l'eau prélevée sur le premier bassin du site E et dopée à 10 µg/L (sans substrat). Il permet d'évaluer une partie des rôles du compartiment bassin d'une ZRV, et des mécanismes d'élimination des micropolluants, en particulier la photodégradation et la biodégradation.
- Un microcosme SUBSTRAT ; il s'agit d'une cuve remplie de substrat (sol argileux) qui a servi de support pour les végétaux dans les microcosmes VEGETAUX. Ce microcosme permet d'identifier le rôle des surfaces non plantées dans les ZRV (en particulier dans les zones de faible profondeur). Il doit aussi permettre, par comparaison directe avec les microcosmes VEGETAUX, d'identifier le rôle des végétaux dans les microcosmes plantés.
- Des microcosmes VEGETAUX, plantés de différentes espèces de végétaux (Phragmites, Typha, Mentha...). Ils doivent permettre de montrer le rôle des végétaux dans l'élimination des micropolluants dans les ZRV.

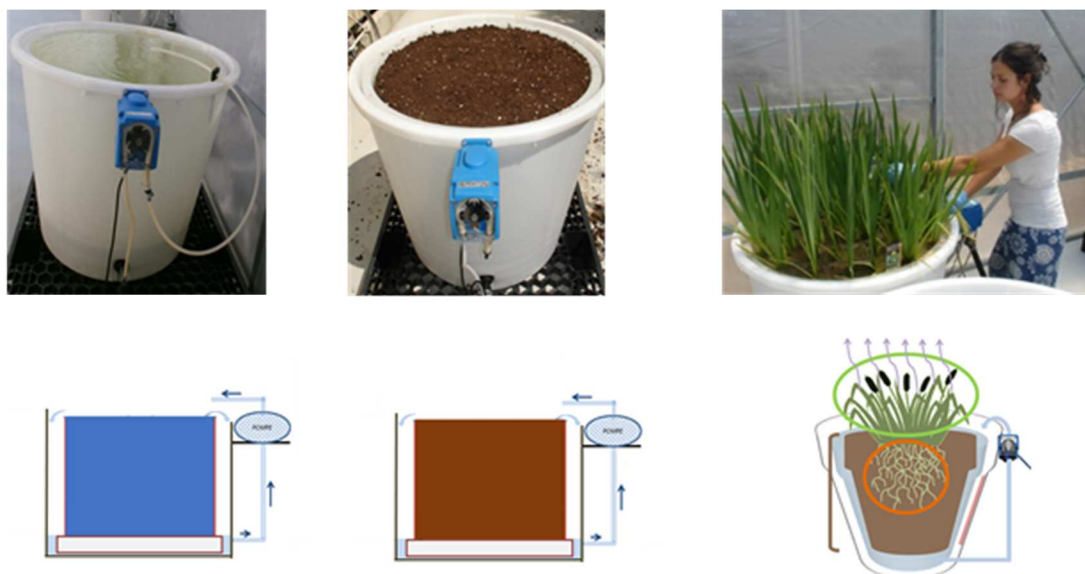


Figure 8. Les trois types de microcosmes testés : microcosmes EAU, SUBSTRAT et VEGETAUX (de gauche à droite)

2.4.2.2 Sélection des espèces végétales testées

Les espèces végétales retenues pour les études en microcosmes ont été sélectionnées selon les critères suivants :

- Présence sur le site pilote de la Zone Libellule® de St Just (inventaire floristique).
- Présence naturelle de l'espèce au niveau national.
- Connaissances préalables sur les espèces végétales utilisées dans les systèmes de traitement des eaux usées.
- Maîtrise du cycle de production (sensibilité aux ravageurs, vitesse de croissance, adaptation au milieu récepteur).
- Différence morphologique de leur appareil racinaire (système traçant, pivotant, fasciculé).

2.4.2.3 Résultats des études en microcosme

L'étude en microcosme a permis de développer des connaissances sur la capacité épuratoire des espèces végétales sélectionnées. Elle a permis d'identifier des comportements différents dans les mécanismes d'élimination des micropolluants en fonction des espèces végétales, ainsi que des molécules considérées.

Le rôle du **substrat** a été mis en avant dans l'élimination des micropolluants de la phase eau, avec des rendements significativement supérieurs pour les microcosmes SUBSTRAT par rapport au microcosme EAU. L'exemple de l'ibuprofène illustre ce résultat : l'abattement à la fin de l'étude est de 60 % dans le témoin eau et alors qu'il est supérieur à **90 % dans les microcosmes avec substrat**. Cela est particulièrement vrai pour le substrat argileux, dont la typologie est favorable à l'adsorption, du fait des caractéristiques physico-chimique des molécules, et des paramètres intrinsèques du sol (charge colloïdale négative, pH, température, densité du sol...).

Le rôle de certaines **espèces végétales** a aussi pu être mis en évidence dans l'élimination des micropolluants de la phase eau, avec l'atteinte de rendements significativement supérieurs dans certains microcosmes VEGETAUX par rapport aux microcosmes EAU et SUBSTRAT. Une analyse statistique des résultats a permis de confirmer les rôles positifs du substrat et des plantes pour un certain nombre de micropolluants. A titre d'exemple, la carbamazépine, composé pharmaceutique de la famille des antiépileptiques, présente un rendement d'élimination inférieur à 30% pour le microcosme EAU et inférieur à 50% pour le microcosme SUBSTRAT alors que

dans les microcosmes VEGETAUX, les rendements d'élimination de la phase eau vont de 60 à 85% suivant les espèces végétales (Figure 9).

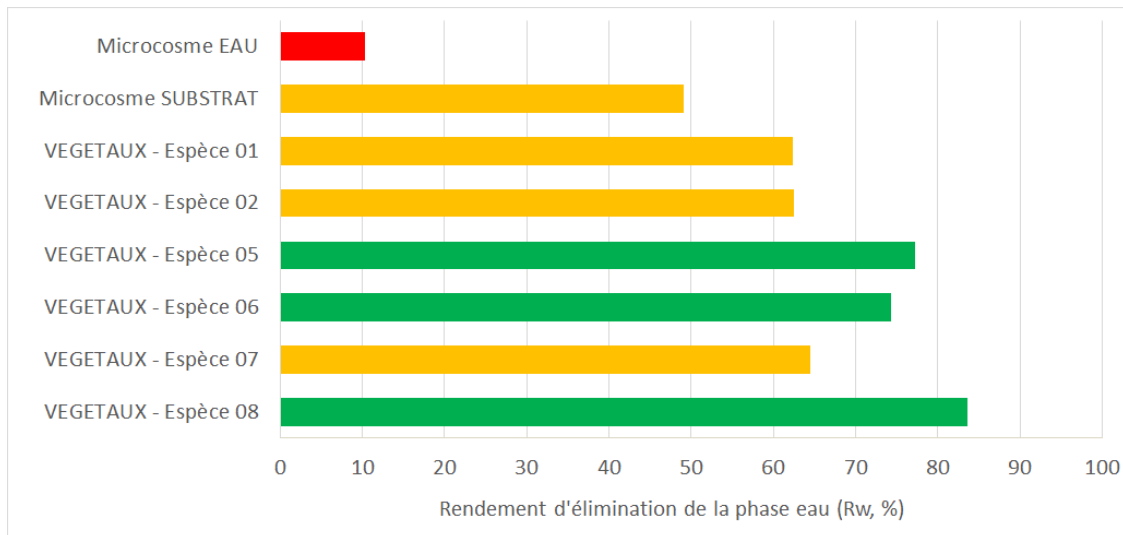


Figure 9. Rendements d'élimination de la carbamazépine en fin du 1^{er} test en microcosmes

Ces expériences ont permis d'identifier et de hiérarchiser les espèces végétales vis-à-vis de l'élimination des différents micropolluants étudiés dans le projet. La variabilité inter-espèces de l'abattement des micropolluants peut s'expliquer entre autres par le transfert eau/plante des molécules impliquant divers processus de physiologie végétale (absorption passive ou active, par des transporteurs, des polluants présents en solution vers les vaisseaux conducteurs du xylème ; photosynthèse ; évapotranspiration impliquée dans la circulation ascendante de la sève), mais également les caractéristiques physico-chimiques des polluants considérés (affinité des membranes végétales vis-à-vis des polluants organiques).

Des analyses complémentaires de micropolluants ont également été menées sur les végétaux (parties aériennes et parties racinaires) ainsi que dans les substrats. Les résultats confirment la présence des micropolluants dans ces différentes matrices et permettent de mieux comprendre les mécanismes de transfert en jeu dans ces microcosmes SUBSTRAT et VEGETAUX :

- l'adsorption (sur le substrat et les matières en suspension)
- l'absorption par les plantes
- le transfert vers des racines vers les parties aériennes des végétaux

2.4.2.4 Interprétation des résultats

Pour rappel, les zones de rejet végétalisées sont le siège de divers mécanismes d'élimination des micropolluants : photodégradation, biodégradation, adsorption et prélèvement par les plantes. Les résultats obtenus lors de ces études en microcosmes ont permis de définir et/ou de confirmer le (ou les) mécanismes d'élimination d'une majorité des micropolluants étudiés. Par exemple, les principaux mécanismes d'élimination de la phase eau ont pu être identifiés pour des composés pharmaceutiques dont les 3 suivants : l'ibuprofène (anti inflammatoire, Figure 10), la ciprofloxacine (un antibiotique) et la carbamazépine (un anti-épileptique).

- Lors de ces études, il a été mis en évidence que le rendement d'élimination de l'ibuprofène dans le microcosme EAU était moyen (60 % après 15 jours) mais qu'il été largement amélioré dans les microcosmes SUBSTRAT et VEGETAUX (autour de 90 %). De plus, l'**ibuprofène** n'a jamais été détecté dans le substrat ou dans les parties végétales (aériennes ou racinaires). Par conséquent, le mécanisme d'élimination le plus pertinent

est la biodégradation, car celle-ci est favorisée par l'activité biologique en surface du substrat et explique pourquoi il n'est retrouvé ni dans les plantes ni dans le substrat.

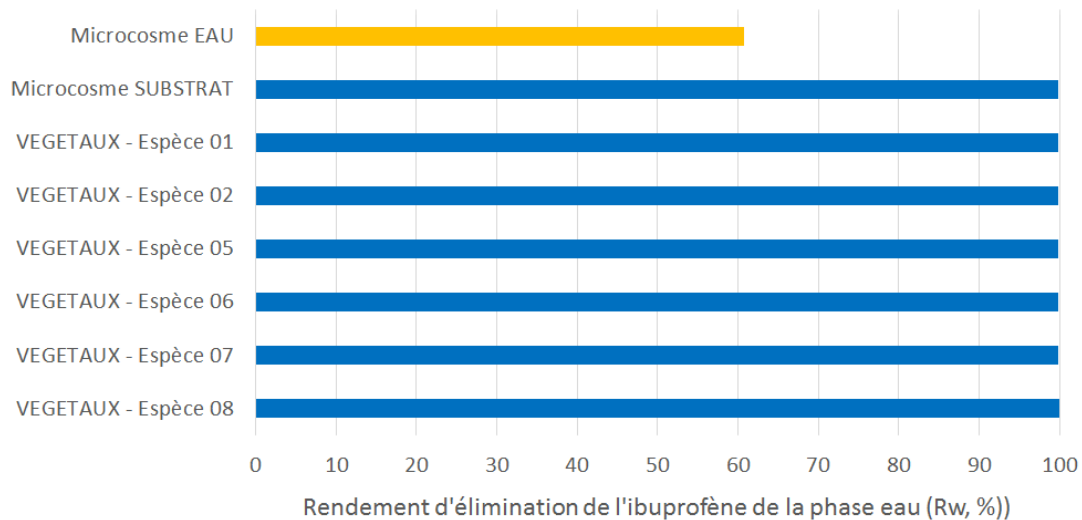


Figure 10. Rendements d'élimination de l'ibuprofène en fin du 1^{er} test en microcosmes

- Pour la **ciprofloxacine** un rendement d'élimination élevé (supérieur à 90 %) est observé pour l'ensemble des types de microcosmes (EAU, SUBSTRAT, VEGETAUX). De plus, cet antibiotique n'a jamais été détecté dans le substrat ni dans les végétaux. Ceci suggère qu'un des mécanismes principaux est la photodégradation, mais que l'adsorption sur les matières en suspension et le substrat puisse contribuer à son élimination dans les ZRV.
- Enfin pour la **carbamazépine** (Figure 9), comme observé au paragraphe précédent des rendements faibles à moyens (20 et 50%) ont été observés dans les microcosmes EAU et SUBSTRAT. Dans les microcosmes VEGETAUX, les rendements ont assez variables, de 20 à plus de 80%, suivant les types de plantes utilisées. La carbamazépine est donc mieux éliminée en présence de certaines espèces végétales. De plus, la carbamazépine a été détectée à la fois dans le substrat mais aussi dans les végétaux (parties racinaires et aériennes) ce qui confirme la contribution du mécanisme de prélèvement par les plantes dans l'élimination de la carbamazépine dans les ZRV. Au-delà de ce rôle, ces résultats illustrent la contribution des espèces végétales dans l'élimination de certains micropolluants et de l'intérêt de leur sélection suivant les objectifs de traitement.

2.4.2.5 Quelles plantes choisir ?

À terme, la sélection du cortège floristique d'une ZRV sera conditionnée à la fois par :

- Les exigences du client (par exemple, l'aspect épuratoire primant sur l'aspect paysager ou pédagogique). Sur ce point, le projet 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 Zone de Rejet Végétalisée.
- Les caractéristiques de l'effluent de la STEU considérée (diversité et concentration en micropolluants)

L'expertise en génie végétal et génie écologique ainsi développée assurera une conception optimale des nouvelles ZRV, ceci dans l'optique d'une meilleure gestion.

2.5 Génie écologique

Par définition, le génie écologique consiste à préserver et développer la biodiversité par des actions adaptées (ensemble études, travaux, gestion), dans la durée, sur les écosystèmes ciblés. Ces opérations permettent notamment de bénéficier des biens et services rendus par la nature, indispensables sur le plan social comme économique : selon une étude du Programme des Nations unies pour l'environnement, 40 % de l'économie mondiale dépend du bon fonctionnement des écosystèmes.

Dans le cadre des projets de mise en place de ZRV, le génie écologique est souvent négligé lors des phases de conception et de réalisation, intervenant à l'aval du génie civil alors qu'il devrait en conditionner la réflexion et le fonctionnement. En effet, ces aménagements requièrent avant tout que l'écosystème aquatique associé soit sain, fonctionnel, entretenu, ce qui n'est possible que si le milieu recréé est adapté à l'ensemble des caractéristiques de l'écosystème (= recréation du biotope pour un fonctionnement optimal de la biocénose). La prise en compte du concept de génie écologique au plus tôt de la phase de conception est indispensable et doit perdurer lors de la réalisation et de la gestion des aménagements (participation aux réunions de chantiers, visites pré et post-plantation). À ceci s'ajoute la prise en compte du génie végétal (cf. § 2.4) dans la conception et la réalisation de ce type de zone.

2.5.1 Modélisation de la biodiversité des ZRV

Le modèle biologique développé dans le projet ZHART est un modèle prédictif 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 leur abondance (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 :

- La conception du site (dimensionnement et objectifs visés)
- la qualité des rejets qui y seront déversés
- la présence de connexions entre la zone et les milieux environnants (Trame verte et bleue).

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 biologique le plus intéressant, en fonction de la qualité physico-chimique probable des rejets.

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 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.

2.5.1.1 Analyse de la qualité biologique globale

Dans ce cadre, il a été développé une méthodologie qui permet de faire une analyse des habitats et des espèces présentes sur le ou les sites où la future zone sera implantée ainsi que dans un périmètre rapproché (de 500 à 1000 m). Cette méthodologie s'appuie principalement sur l'analyse de la flore et de la faune, plus particulièrement de l'herpétofaune, de l'avifaune, des odonates car

parmi les taxons qui peuvent être identifiés sur les sites, il est possible de distinguer ceux qui sont inféodé aux écosystèmes aquatiques (tels que les zones humides naturelles, (Figure 11). Cette analyse permet de dresser le potentiel écologique initial du site (Figure 12) et de caractériser les milieux les plus pertinents à mettre en place compte tenu des espèces qui seront potentiellement présentes. Ce lien est rendu possible par la caractérisation de la trame verte et bleue autour du site qui permettra de déterminer les liens de connectivité d'espèces cibles avec la zone (cf. §2.5.2).

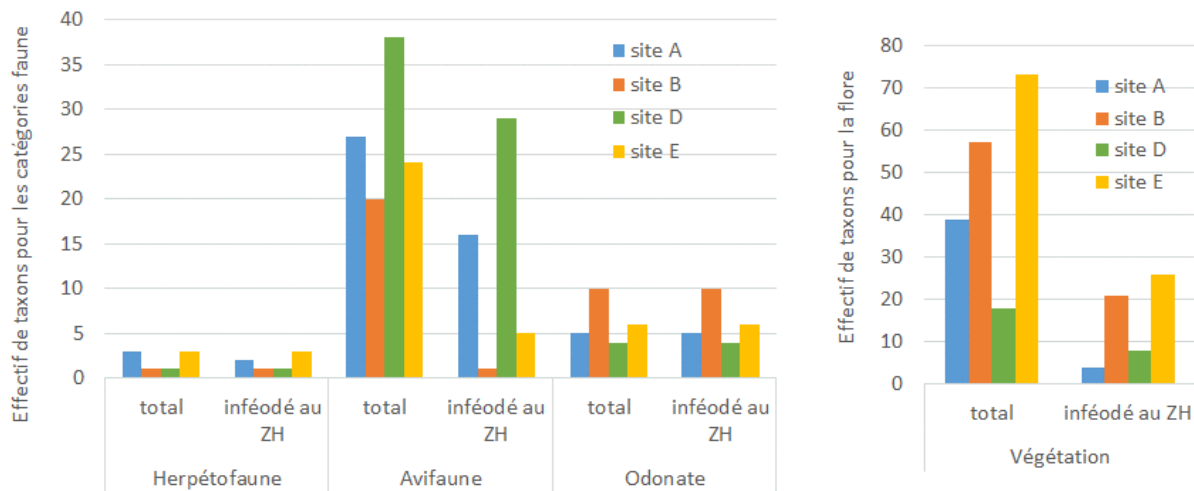


Figure 11. Effectif de taxons totaux et inféodés aux zones humides pour les catégories faune (herpétofaune, avifaune et odonates) et flore (végétation) pour les ZRV étudiées dans le cadre du projet ZHART

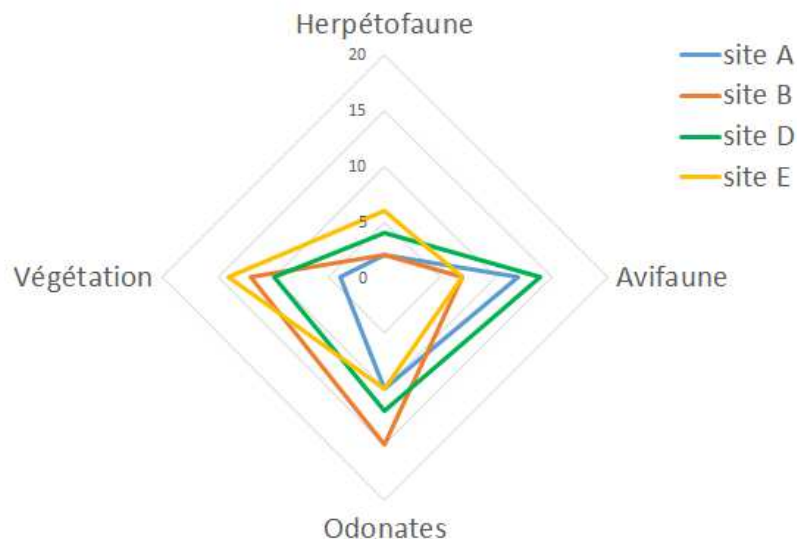


Figure 12. Analyse du potentiel écologique de différentes ZRV étudiées dans le cadre du projet ZHART

2.5.1.2 Analyses préparatoires avant travaux

Cette phase aura pour objet de collecter les données qui seront effectivement utilisées pour la construction du modèle biologique. Les principales étapes sont les suivantes :

- Visite sur site.
- Identification des besoins du maître d'ouvrage (épuration, écologiques, paysagers...).
- Acquisition des données topographiques, pédologiques et hydrogéologiques.
- Collecte des données physicochimiques du rejet de la station de traitement des eaux usées.
- Collecte des contraintes générales (temps de séjour...).
- Analyse sommaire du milieu récepteur.

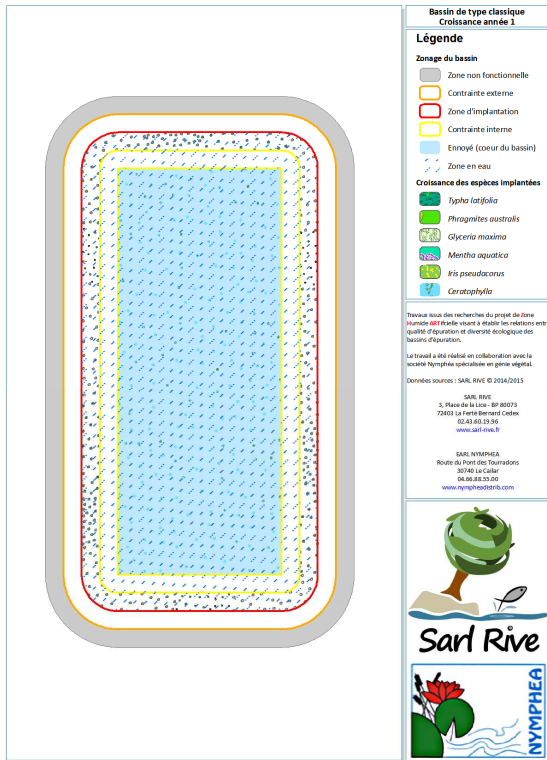
2.5.1.3 Mise en place de différents scénarii permettant de répondre aux besoins spécifiques du maître d'ouvrage (niveau esquisse/APS)

Lors de cette phase, il est conçu en fonction des besoins des maîtres d'ouvrage (physico-chimiques, biologiques...) et des potentialités écologiques réelles caractérisées à proximité du site, des scénarii d'implantation au niveau APS. Ces scénarii seront présentés au maître d'ouvrage pour validation (Figure 13).

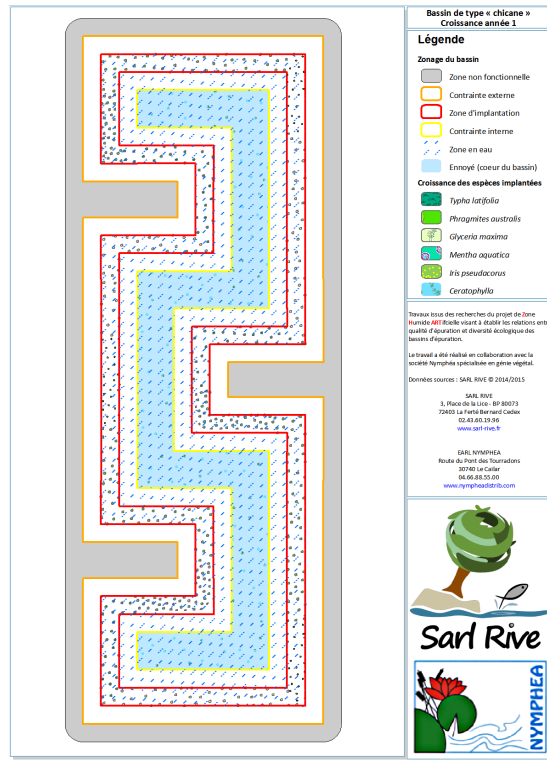
Les principales étapes sont les suivantes :

- Dessin de différents scénarii.
- Détermination des contraintes techniques propres à chaque scénario (gestion entretien...).
- Chiffrage de chaque scénario au niveau APS.
- Choix des deux ou trois scénarii qui seront testés par la modélisation

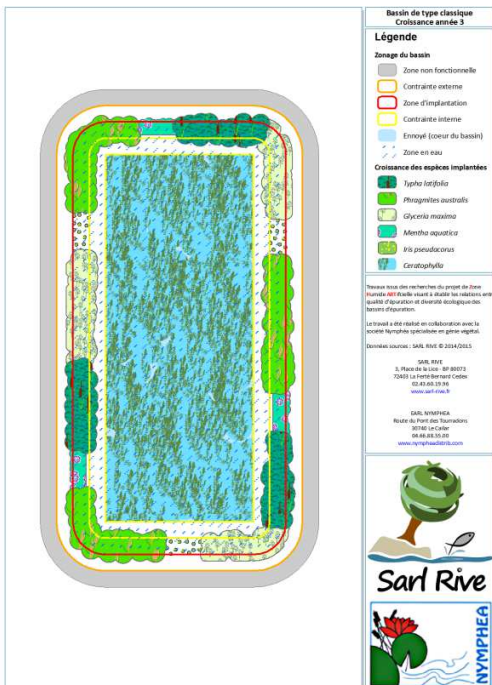
Etat initial - Scenario 1



Etat initial - Scenario 2



Etat après 3 ans – scénario 1



Etat après 3 ans – scénario 2

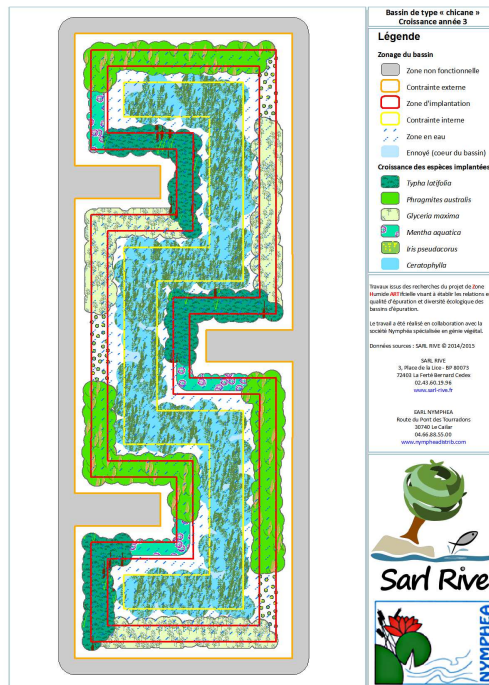


Figure 13. Dessin de scénarii pouvant répondre aux objectifs du Maître d'ouvrage (état initial) et évolution dans le temps de 2 scénarii (état après 3 ans)

2.5.1.4 Application du modèle aux scénarii retenus en phase 2

Lors de cette phase, le modèle biologique peut être appliqué aux scénarii retenus par le maître d'ouvrage. Des variantes seront proposées pour optimiser les scénarii qui présenteraient les plus fortes potentialités (Figure 14). Les principales étapes sont les suivantes :

- Analyse de l'évolution interannuelle du potentiel biologique
- Comparaison des scénarii proposés
- Présentation au Maître d'ouvrage et choix du modèle retenu

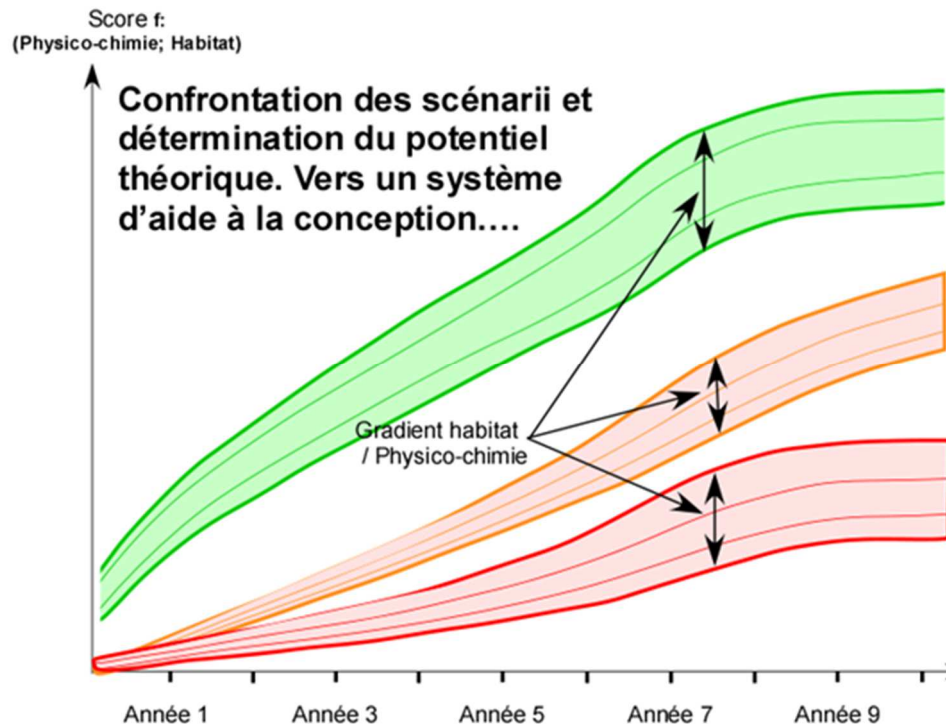


Figure 14. Comparaison de scores de différents scénarii et de leur évolution dans le temps.

2.5.2 Évaluation du potentiel d'insertion à la trame verte et bleue

2.5.2.1 Echelle d'analyse : site et bassin versant

Les ZRV sont généralement des sites de taille « moyenne », qui varient de quelques centaines de mètres carrés à quelques hectares. 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 multi-sources), il peut être identifié au moins trois échelles (Figure 15) :

- **Échelle régionale.** À cette échelle, l'intérêt de la zone peut être appréhendé au moyen du SRCE et du 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. Récemment, le MNHN et l'Opie ont publié une liste d'espèces par région, proposées pour la cohésion de la TVB à l'échelle nationale, cette dernière peut servir de base de travail pour la modélisation des continuités écologiques à l'échelle régionale. Les données utilisées généralement pour cette mission sont les images satellitaires (ex. Spot).

- Échelle intercommunale à communale.** Le SCOT est le document de référence à l'échelle intercommunale, il permet de penser l'insertion des ZRVs 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 (Figure 15).

Les données utilisées pour la cartographie des continuités écologiques à l'échelle intercommunale peuvent être suffisantes aussi pour l'échelle intra-communale. En terme de modalisation, pour ces deux échelles on peut se contenter des bases de données fournies par l'IGN (ex. BD Topo, BD Forêt, orthophotoplans), mais un travail de mise en compatibilité et de correction des informations est nécessaire.

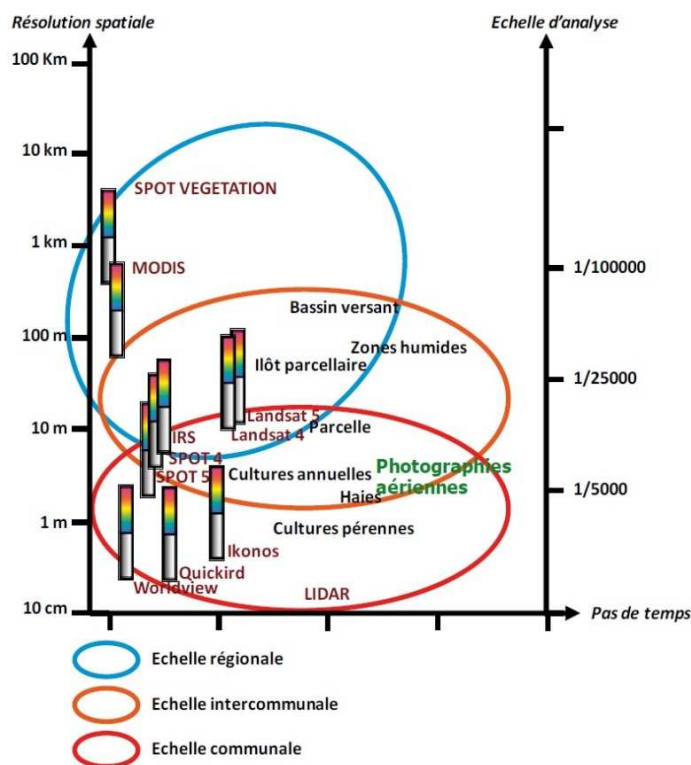


Figure 15. Résolutions spatiales et échelles d'exploitation des données de télédétection (source Hubert-Moy et al., 2012)

- Échelle intra-communale, voire du site.** Les PLU et les cartes communales étant plus précis, ce sont les outils les plus adaptés pour l'examen de la place des projets de ZRVs à l'échelle intra-communale. Ainsi les tracés des potentiels corridors écologiques peuvent être identifiés avec une plus grande finesse. En plus des BD de l'IGN, 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.

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, il peut être identifié les zones à forte valeur écologique et patrimoniale, qui sont censées être déjà intégrées dans le SRCE.

2.5.2.2 Sources indirectes

Pour la modélisation de l'insertion de la zone à la TVB, deux étapes sont nécessaires.

- Conception des cartes paysagères. Une fois que les limites de la zone d'étude sont déterminées, la phase suivante consiste dans la production sous SIG d'une carte paysagère détaillant l'occupation du sol à une échelle très fine, car l'analyse de la connectivité fonctionnelle exige l'usage des données spatiales et biologiques très précises. Dans cette carte, il sera différencié les types d'occupation du sol classés « habitat » du reste des composantes de la mosaïque paysagère, regroupées sous la notion de « matrice ».
- Constitution des graphes paysagers. La seconde étape est basée sur la création des graphes paysagers au moyen du programme Graphab. Le modèle permet, entre autres, de définir « les chemins de dispersion à moindre coût » des espèces d'un habitat à un autre, et ce en fonction de « la nature » des classes d'occupation du sol. Les analyses sont réalisées selon deux types d'entrées : une entrée par habitat et une entrée par espèce (appelée aussi approche multi-espèces).

2.5.2.3 Préconisations pour assurer l'intégration à la Trame Verte et Bleue (TVB)

Une fois les tracés de dispersion des espèces identifiés, une démarche par analyse sélective et de compatibilité est réalisée sous SIG, en confrontant les résultats de la modélisation avec la réalité sur le terrain et les documents de planification. L'adoption définitive des tracés sélectionnés permet de sauvegarder ou d'aménager les potentiels corridors écologiques selon les objectifs escomptés (écologiques, sociaux, environnementaux, etc.). Une préservation des habitats et des corridors n'est pas à elle seule une mesure suffisante, la mise en place d'un programme de gestion (si nécessaire) ainsi qu'un protocole de suivi de la biodiversité est une mission primordiale.

La modélisation des continuités écologiques menée dans le cadre du projet ZHART et l'analyse de l'état de l'art ont mis en évidence certains éléments importants à prendre en compte lors de la mise en connectivité de la ZRV avec la TVB, parmi lesquels nous citons :

- La conception :
 - Installer les zones à proximité des corridors fluviaux
 - Opter dans la mesure du possible, lors des études de conception, pour des aménagements de vaste superficie ;
 - Définir au préalable le concept d'habitat et les formations végétales qui y seront affectées ;
 - Prendre en compte particulièrement les formations végétales linéaires, qui se présentent sous plusieurs formes (ripisylves, lisières, bandes enherbées, etc.) ;

- L'aménagement du territoire
 - Aménager des connexions via des corridors écologiques avec les habitats proches, en particulier avec les zones humides ;
 - Créer et/ou maintenir, en collaboration avec les collectivités locales et les riverains, des habitats semi-naturels à proximité.
- Le suivi et de la gestion
 - Adopter un plan de gestion écologique favorisant la dynamique intra/extra site au moins des espèces cibles ;
 - Favoriser le maintien des lisières multi-strates au sein et dans le périmètre de l'aménagement ;
 - Mettre en place un protocole scientifique de suivi et d'évaluation des mesures prises ;
 - Évaluer le fonctionnement écologique des corridors aménagés, avec une attention portée au risque des espèces invasives.

2.6 Insertion socio-territoriale

La ZRV est un objet qui peut être qualifié de **dispositif sociotechnique** (par opposition à technique), cela signifie que le dispositif doit trouver sa place dans un territoire donné, lui-même constitué d'acteurs divers, d'usages variés, d'interrelations entre les acteurs et les individus, entre les niveaux territoriaux et de conditions « naturelles » (biogéographiques, topographiques et hydrologiques) spécifiques. Les habitants, les usagers, les gestionnaires et les élus ont des représentations différentes de l'objet sociotechnique et du territoire concerné, qui pèsent sur la conception et la réception de la zone. Il importe donc de les décrypter. En outre, le territoire où le dispositif s'insère n'est pas un espace neutre, et il est donc nécessaire d'identifier ce qui le caractérise, du point de vue politique, économique, social, paysager et écologique.

En amont de la « conception » de l'aménagement, il est donc nécessaire de veiller à sa pertinence d'un point de vue territorial et social. Pour ce faire, un **diagnostic socio-territorial** du territoire est préconisé. Ce diagnostic doit être fait à plusieurs échelles et en plusieurs étapes (Figure 16). Il sera le garant de l'**insertion socio-territoriale** de la zone. Les échelles à prendre en compte sont liées au territoire considéré. L'analyse prend en considération les enjeux et les données à trois échelles : locale (parcelles, commune), supra-locale (intercommunalités, syndicats), et régionale.

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

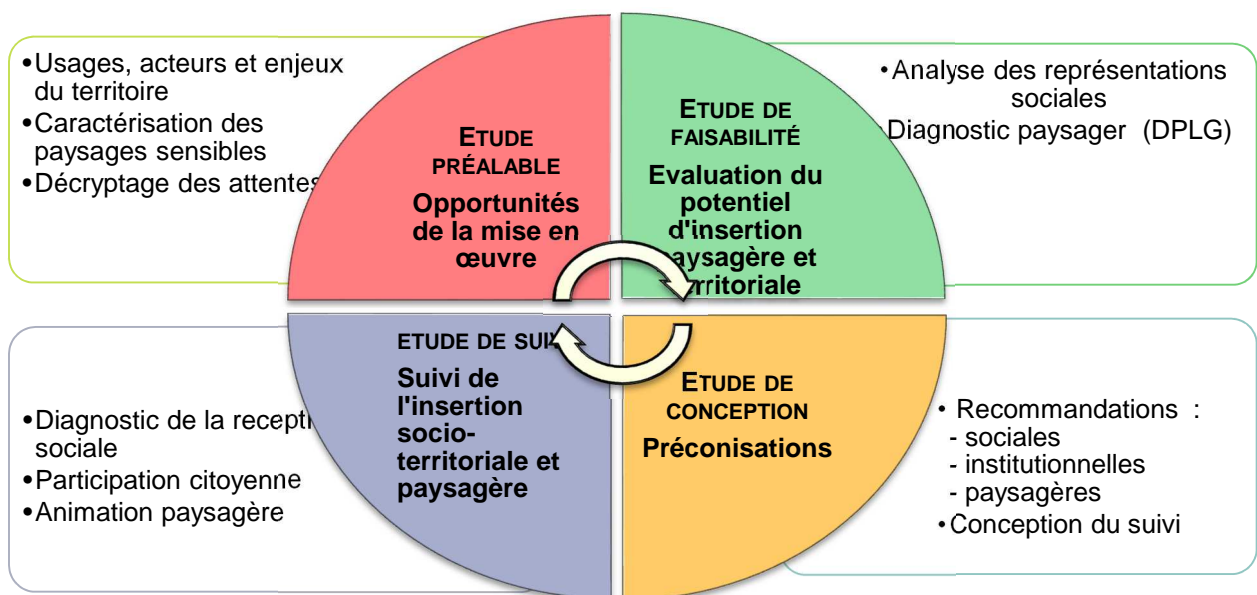


Figure 16. Récapitulatif des différentes étapes de diagnostic socio-territorial (CITERES)

2.6.1 Étude préalable : opportunités de la mise en œuvre

Préalablement à l'établissement d'un projet de développement de zone dans un territoire, trois études sont nécessaires :

- Identification des usages et des enjeux territoriaux
- Caractérisation des paysages sensibles
- Décryptage des attentes

2.6.1.1 Identification des usages et des enjeux territoriaux

Il s'agit de décrire les usages socio-économiques dominants du territoire ; de qualifier le territoire en fonction d'un zonage à une échelle fine, puis d'identifier les différents acteurs en présence (privé, public, ...) et les principaux enjeux sur le territoire passés ou à venir. Cela implique d'étudier :

- Les usages prépondérants (agricole, récréatif, etc..) et leurs impacts sociaux, économiques et environnementaux.
- Les tendances socio-économiques à l'échelle régionale (dynamiques économiques, résidentielles, etc.) et les évolutions potentielles du territoire.
- Les différentes qualifications juridiques de l'espace (formes et modalités de classement, de protection, etc).

2.6.1.2 Caractérisation des paysages sensibles

Les usages ont des impacts paysagers et les jeux d'acteurs ont des influences sur les paysages vécus. Inversement, les stratégies des usagers et des décideurs et gestionnaires sont influencés par les structures paysagères et écologiques. Cela implique d'étudier :

- Les réseaux bio-géo-hydrologiques (en liens avec les trames et corridors écologiques)
- Les unités paysagères existantes (y compris en fonction des représentations sociales et des échelles)
- Les formes de qualification patrimoniale des paysages par les acteurs.

2.6.1.3 Décryptage des attentes

En dernier lieu, il convient de recueillir et d'analyser les attentes des parties prenantes, au regard de l'offre potentielle. Cela implique d'étudier :

- Les discours, les pratiques et les actions des acteurs vis-à-vis des enjeux associés à la qualité de l'eau
- Les enjeux institutionnels connexes (partage des compétences, objectifs « inavoués »)
- La potentialité de portage par les techniciens/opérateurs au même titre que les élus

2.6.1.4 Moyens et sources nécessaires de l'étude préalable

- Entretiens exploratoires
- Bibliographie et littérature grise
- Documents d'urbanisme et de planification
- Plans de gestion des espaces protégés, ...
- Cartographie des limites administratives et zonages règlementaires, ...

2.6.2 Étude de faisabilité : évaluation du potentiel d'insertion territoriale

Une seconde phase consiste à évaluer le potentiel d'insertion de la zone, du point de vue territorial (social, économique, politique, environnemental) et paysager. Cette phase repose sur deux études :

- L'analyse des représentations sociales
- Le diagnostic paysager

2.6.2.1 Analyse des représentations sociales

Les représentations sociales sont à l'origine des opinions et des comportements des individus, elles participent au processus d'insertion territoriale. Cela implique d'étudier auprès de tous les acteurs en présence :

- Les perceptions des milieux et des paysages (vécu et perçu)
- L'attachement aux lieux
- Les pratiques de l'espace
- Les valeurs associées aux problématiques environnementales

2.6.2.2 Diagnostic paysager

L'établissement par un paysagiste d'un diagnostic paysager permettra d'identifier

- Le rôle de l'eau dans le paysage
- Les interrelations entre ZRV et paysage environnant
- La dynamique paysagère potentielle de la zone
- Les potentialités du dispositif en termes d'animation du territoire

2.6.2.3 Moyens et sources nécessaires de l'étude de faisabilité

- Analyse des discours recueillis (entretiens, documents écrits)
- Cartographie (topographie, MNT...)
- Entretiens collectifs et semi-directifs
- Réunions publiques
- Questionnaires
- Iconographie
- Cartes mentales
- SIG usages du sol
- Croquis, relevés de terrain

2.6.3 Étude de conception : cahier des charges socio-territorial

Pendant la phase de conception, des préconisations issues des précédentes phases sont produites. Elles sont accompagnées de recommandations anticipées sur la mise en place du suivi de la zone.

2.6.3.1 Recommandations sociales, institutionnelles et paysagères

L'ancrage socio-territorial du projet dépend de multiples facteurs, dont certains sont déjà connus.

A titre illustratif et non exhaustif, les conditions de réception sociale sont présentées dans la

Figure 17.

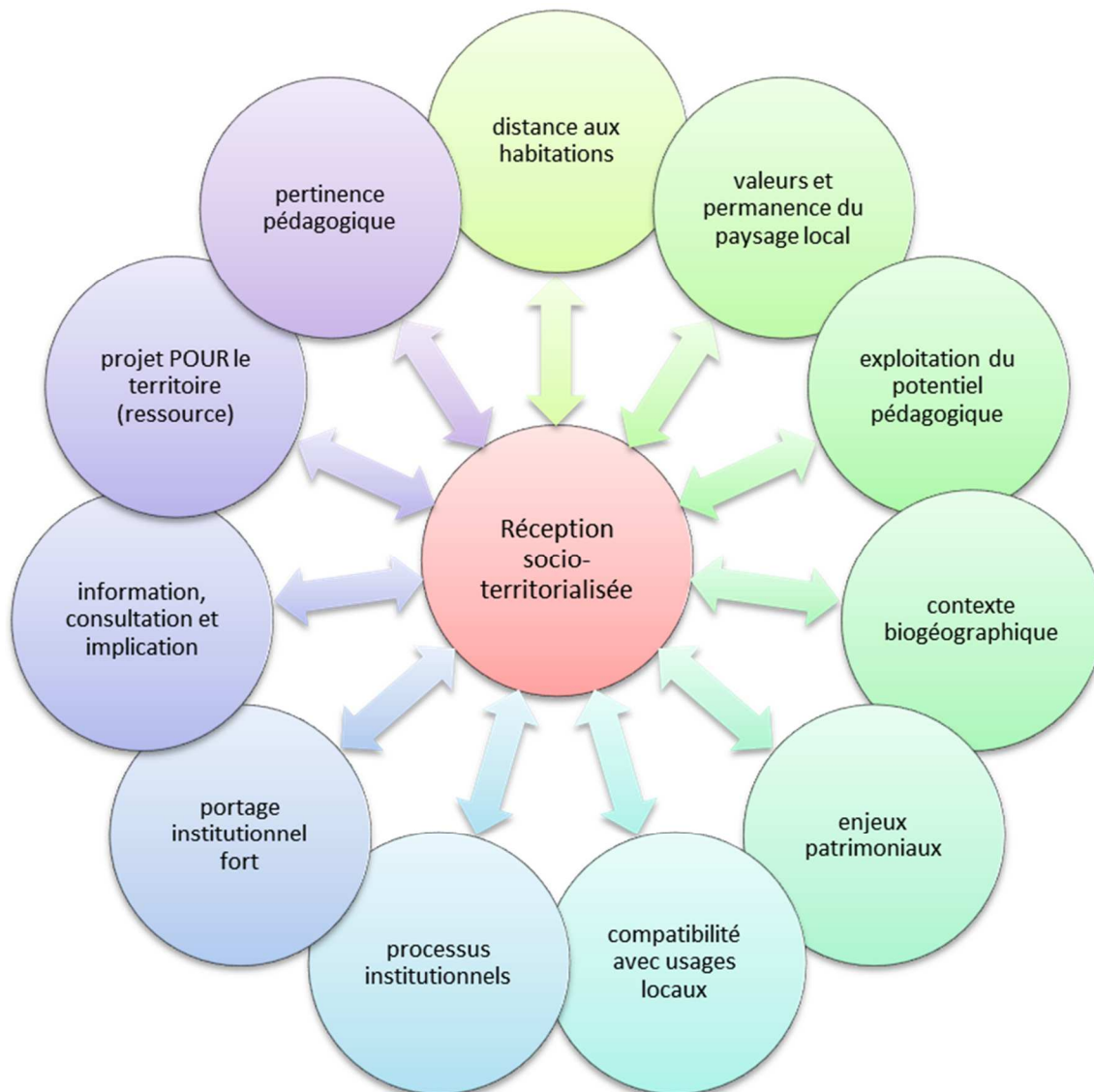


Figure 17. Exemples de critères déterminants de la réception socio-territoriale d'une ZRV (CITERES)

Les préconisations pour la réception d'un projet socio-territorialement ancré peuvent notamment porter sur :

- L'inscription de la zone dans un projet territorial plus vaste
 - compatibilité avec les milieux biophysiques et les paysages
 - développement local
 - portage institutionnel
 - participation des habitants
 - adéquation avec les activités et préoccupations locales
 - communication sur les effets territoriaux
- La qualité de l'ingénierie écologique
 - aspects techniques de la phyto-épuration
 - lien avec l'assainissement
- La communication sur les garanties épuratoires
- La prise en considération du paysage local comme une ressource
 - localisation de la ZRV à distance des habitations
 - esthétique des bâtiments
 - ouverture au public
 - caractérisation des paysages locaux
 - valeurs écologiques

2.6.3.2 Conception du suivi

La phase de suivi de l'insertion socio-territoriale du projet nécessite, en fonction des recommandations et des analyses d'opportunité et de faisabilité, d'identifier les critères de suivi.

Le document « conception du suivi » fera donc apparaître les objectifs principaux attribués au projet, les dimensions afférentes à prendre en compte, les moyens de mettre en œuvre le suivi.

2.6.3.3 Moyens et sources nécessaires de l'étude de conception

- Zonages administratifs
- Documents de communication des collectivités
- Organigramme des structures concernées
- Projet de développement
- Veille documentaire juridique et politique (médias)

3 SUIVI ET MAINTIEN DES SERVICES APPORTÉS PAR LES NOUVELLES ZRV

Une fois les nouvelles ZRV conçues et aménagées en fonction d'objectifs clairement définis dès le début du projet (régulation hydraulique, traitement de micropolluants, qualité écologique, fonction paysagère ou pédagogique), il convient de mettre en œuvre un plan de suivi et de gestion afin de maintenir opérationnels les services qu'elles apportent. En effet, les ZRV sont des écosystèmes soumis à des évolutions naturelles ainsi qu'à différentes pressions de sélection (aléas climatiques, envahissement végétal,...) dont celle l'alimentation par un rejet de station de traitement des eaux usées.

La gestion de ces zones dans le temps s'appuie sur des actions de suivi et d'entretien qui visent à vérifier l'atteinte et le maintien de leurs objectifs par la prévention de possibles dérives liées à la forte anthropisation de ces systèmes naturels. Cette démarche s'applique pour toutes ZRV existantes ou à venir qui sont soumises aux mêmes contraintes, et pour lesquelles, aujourd'hui, les besoins en termes de suivi et de gestion sont sous-évalués.

Le projet ZHART, via son consortium de partenaires, a permis de développer des solutions innovantes de suivi et de gestion permettant **de garantir l'atteinte et le maintien des services qu'ils soient hydrauliques, épuratoires, écologiques ou sociaux.**

Pour cela, une surveillance et une gestion régulière du système doivent être déployés dès la mise en service. On peut distinguer des opérations de surveillance générale qui sont communes à toutes les ZRV et des suivis plus spécifiques permettant de contrôler certains points particuliers, notamment ceux associés aux garanties (micropolluants, qualité écologique). Ces derniers dépendent des objectifs définis par le concepteur en amont du projet et des attentes du maître d'ouvrage.

Le suivi et le plan de gestion sont donc adaptés à chaque ZRV. Un cahier des charges fourni à l'exploitant détaille les opérations à mettre en place. La surveillance doit permettre au gestionnaire :

- De contrôler le bon fonctionnement du processus ;
- D'identifier rapidement les dysfonctionnements ;
- De prévoir et planifier les opérations de correction et d'entretien

3.1 Surveillance générale des ZRV

La surveillance régulière est le point important de la bonne gestion du site au quotidien. Le personnel en charge de l'exploitation de la ZRV doit veiller au bon fonctionnement hydraulique et écologique du site. Les principaux points de contrôle sont les suivants :

- Qualité de l'eau : alerter en cas de dépassement des seuils.
- Hydraulique : contrôler les débits et les niveaux d'eau sur la zone, l'écoulement des eaux (absence de bouchons hydrauliques).
- Végétation : évaluer l'état de développement de la végétation, la présence d'espèces exotiques envahissantes, la forte dominance d'une espèce ;
- Nuisibles : vérifier l'absence d'animaux nuisibles (ragondins, rats musqués, écrevisses américaines,...) ;
- Ouvrages et instruments : contrôler l'état des ouvrages et des instruments de mesure
- Ancrage territorial : vérifier l'appropriation par les populations du site, s'assurer de la lisibilité et de la disponibilité des documents de communication (in situ ou pas) ; en cas de dégradation, prévoir des actions de sensibilisation, voire de concertation.

Fréquence : hebdomadaire

3.1.1 Suivi hydraulique et météorologique

La mesure des débits en entrée et en sortie de la ZRV doit permettre de contrôler les flux transitant à travers le système et de réaliser les bilans hydrologiques. Des mesures de débits intermédiaires peuvent être envisagées pour répondre à un besoin particulier (ex : surverse prairie humide,...).

Les données météorologiques sont nécessaires pour l'évaluation des bilans de flux hydriques sur la ZRV. Par ailleurs, elles impactent le fonctionnement physico-chimique et biologique de la ZRV et par contre coup sa capacité autoépuratrice. Les paramètres à suivre à minima sont la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité et la pluviométrie.

Fréquence : journalière

3.1.2 Suivi physico-chimique classique

La mesure en continu de plusieurs paramètres en sortie de la zone est une aide intéressante à l'exploitation. Le potentiel redox, la concentration en oxygène dissous et le pH sont des paramètres à privilégier pour le suivi de la qualité de l'eau. L'avantage de la mesure en continu est de pouvoir programmer un seuil d'alarme sur un ou plusieurs paramètres suivis. En effet, le dépassement de certains seuils et/ou des variations brutales, comme par exemple l'augmentation du pH, la forte diminution du potentiel redox et de l'oxygène dissous, peuvent traduire des problèmes de fonctionnement pouvant être corrigés par des mesures d'exploitation (prolifération végétale, production de matière organique...).

Fréquence : continu ou hebdomadaire.

3.1.3 Suivi des polluants et de la bactériologie

Les macropolluants (NGL, Pt, PO₄, MES, DBO₅, DCO) peuvent également être suivis par les prélèvements ponctuels en sortie de ZRV pour contrôler leur concentration. Ils sont de bons indicateurs du fonctionnement de la zone. Si la réduction des germes indicateurs de contamination fécale est un objectif visé par la zone, les concentrations en entrée et en sortie peuvent être suivies afin de s'assurer de la qualité du traitement.

Fréquence recommandée : mensuelle (à adapter en fonction des objectifs, des garanties de traitement et de la taille de la taille de la STEU en amont)

Le suivi des micropolluants est détaillé dans la partie des suivis spécifiques (§3.3)

3.1.4 Suivi biologique et écologique

Un diagnostic écologique du site peut être réalisé en intégrant différentes missions :

- Un inventaire végétal pour déterminer les recouvrements/abondances des plantes d'intérêts (espèces végétales plantées et indigènes) et vérifier l'absence d'espèces exotiques envahissantes : l'objectif est de contrôler le plan de plantation et de réactualiser le plan de gestion (adaptation en fonction du développement des espèces).
- Un suivi des invertébrés qui sont de bons indicateurs de qualité du milieu. Lors des investigations de terrain, des contacts visuels/sonores d'oiseaux, mammifères et reptiles permettront de connaître l'attraction du site pour ces espèces animales (Inventaire non exhaustif).
- L'installation de substrats artificiels (Figure 18) permettant d'évaluer la colonisation par la macro-faune benthique dans chaque compartiment. Ce suivi nécessitera la réalisation, l'implantation des supports et la récolte. Un travail de laboratoire pour le tri et la détermination des individus permettra le dénombrement des populations.

Ce monitoring interannuel de la Zone de Rejet Végétalisée aura pour objectif de suivre sur le long terme sa qualité écologique en confrontant les résultats obtenus au modèle biologique. Cette surveillance permettra l'optimisation des procédures d'entretien qui accompagneront toute nouvelle ZRV (garantie du maintien des capacités épuratoires et écologiques) mais aussi celle déjà existante. Pour arriver à cet objectif, les inventaires cités préalablement seront nécessaires ainsi que les données physico-chimiques entrée/sortie de ZRV.

Ces données du suivi seront intégrées dans le modèle permettant de caractériser la trajectoire écologique de la ZRV.



Figure 18. Monitoring in situ par substrats artificiels pour confrontation des données milieu avec les données du modèle

3.1.5 Suivi socio-territorial

Un diagnostic socio-territorial du site peut être réalisé à plusieurs niveaux et termes:

- Suivi de l'appropriation par les populations locales, les usagers, les riverains du site ; accessibilité visuelle ou ouverture occasionnelle du site, possibilité d'interactions avec les gestionnaires ; programme de gestion et d'animation de la zone (pédagogie, sensibilisation à l'environnement, communication sur l'assainissement, ...) – fréquence : 2 fois par an
- Projet intégré d'animation de la zone, en lien avec les acteurs locaux (projets de développements locaux des communes, EPCI, PNR...) Fréquence : occasionnel et suivi dans le temps (durant une année scolaire) ou répété tous les 4 ans en fonction des objectifs de la zone.
- En cas de dégradation, dysfonctionnement ou selon le contexte (changement d'installation, d'équipe municipale..) mise en œuvre d'un processus de participation citoyenne, groupes de travail, sensibilisation, voire concertation. Fréquence deux à trois par an durant deux à trois années.

Ce suivi fait l'objet d'un chapitre dédié dans la partie des suivis spécifiques (§3.4)

3.2 Nouvelle stratégie de gestion : la gestion différenciée

La gestion différenciée est une nouvelle approche de la gestion des espaces végétalisés qui est de plus en plus appliquée aux espaces verts en milieu urbain. Il s'agit d'une gestion plus respectueuse de l'environnement sans perte de qualité. Le principe est d'appliquer à chaque espace le mode de gestion le plus adapté, tenant compte de son utilisation, sa situation... Pour certains on choisira de maintenir une gestion assez intensive, tandis que pour d'autres, on optera pour une gestion plus extensive. Pour l'exemple des espaces verts, à l'échelle d'une commune, ce mode de gestion permet de diversifier les types d'espaces verts, de favoriser la biodiversité et de réduire l'utilisation de produits chimiques.

3.2.1 Application de la gestion différenciée aux ZRV

Une ZRV reproduit à moindre échelle des mécanismes se produisant naturellement dans le milieu naturel. L'évolution des habitats et la pérennité des objectifs ciblés par la ZRV (épuration, biodiversité, pédagogique...) sont directement liées à la qualité de sa gestion dès sa mise en eau. La mise en œuvre des actions d'entretien suit donc un plan de gestion adapté et révisé suivant l'évolution du site.

Les retours d'expériences liés à l'exploitation des ZRV conduisent à être vigilants sur certains phénomènes, notamment :

- Création de bouchons hydrauliques pouvant entraîner des débordements et une réduction du temps de séjour.
- Diminution du temps de séjour et de la capacité de traitement du système par des courts-circuits et des comblements du volume dans les bassins plus profonds.
- Homogénéisation des écosystèmes aquatiques entraînant la dominance de quelques espèces végétales.
- Fermeture du milieu (vers un milieu forestier) conduisant à une perte de biodiversité.
- Risque d'envahissement de plantes invasives.

Ainsi, l'absence d'entretien entraîne une perte des différents services écosystémiques rendus par les ZRV et peut conduire à une dégradation du rejet vers le milieu récepteur.



Figure 19. Exemple de plan de gestion différenciant les zones techniques (exemple : végétation rivulaire) des zones non techniques (prairie de fauche).

La gestion s'opère en différentes actions réalisées de manière hebdomadaire à annuelle. Les prestataires doivent être encadrés par un coordinateur formé et qualifié (connaissance en gestion des espaces naturels) pour répondre aux cahiers des charges (Figure 19):

- Entretien des espaces végétalisés en période automnale/hivernale avec exportation des résidus : fauchage sélectif des espaces rivulaires, fauchage des prairies, faucardage des roselières... Suivant les habitats, des zones de refuge de la faune (absence de fauche) doivent être définies avant les travaux d'entretien.
- Lutte contre espèces envahissantes (animales et végétales) avec mise en place de protocole spécifique ou de campagne de piégeage des ragondins...
- Formation continue de l'exploitation pour un suivi hebdomadaire de la ZRV.
- Reprise du volume des compartiments afin de maintenir la profondeur du bassin, les écoulements dans les méandres...
- Curage des bassins suivant la hauteur des sédiments.

3.3 Suivi spécifique : les micropolluants

Les micropolluants peuvent être suivis en entrée et en sortie de la ZRV soit par des prélèvements ponctuels soit par l'installation de capteurs passifs de type POCIS. Les analyses permettront de contrôler la réduction des micropolluants ciblés. L'ensemble des opérations conduites entre le prélèvement et la production d'un résultat d'analyse sur les micropolluants se révèlent complexes et nécessite une expertise spécifique pour assurer un suivi fiable de substances à l'état de trace dans les ZRV.

La mesure de performance d'élimination de micropolluants nécessite l'application d'une méthodologie particulière, depuis le prélèvement jusqu'aux règles de calcul. Dans le cadre du projet ZHART ont été appliquées les recommandations issues du projet ANR AMPERES⁴ (cf. Annexe 5 - Méthodologie d'évaluation des performances de traitement).

⁴ <http://projetamperes.cemagref.fr/index.html>

3.3.1 Analyse « conventionnelle » EAU, SÉDIMENTS, VÉGÉTAUX

Dans le cadre du projet ZHART, plusieurs laboratoires ont été mis à contribution pour permettre la caractérisation des matrices eaux, sédiments et végétaux et assurer une évaluation au plus juste de l'élimination des micropolluants.

Pour le laboratoire d'analyse privé, partenaire du projet, les analyses ont 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. Dans le cadre du projet ZHART, afin d'obtenir des limites de quantification plus basses que celles habituellement proposées pour des rejets de STEU, les prélèvements « Eaux » ont été considérés comme des échantillons d'Eaux Douces.

3.3.2 Nouvelle approche pour l'échantillonnage et l'analyse des micropolluants : les capteurs passifs POCIS



























Le suivi de l'efficacité de traitement complémentaire d'épuration des eaux comme les ZRV nécessite le calcul de l'abattement des micropolluants dans le système et donc la mesure fiable de concentrations de micropolluants cibles attestant du bon fonctionnement du traitement. Les approches d'échantillonnage classique par prélèvement d'eau permettent difficilement un suivi multi-résidus à une grande échelle temporelle et/ou spatiale. Elles donnent certes une image de la contamination à un instant t, mais ne permettent pas d'extrapoler le niveau de contamination du système dans le temps, alors que cette information est nécessaire pour vérifier le « bon fonctionnement » du traitement complémentaire dans le cas de variation de la charge entrante dans le système.

Un des palliatifs à l'échantillonnage ponctuel est la mise en place de station de dosage et/ou de prélèvements automatiques, mais cette solution est plus coûteuse, et parfois difficile à mettre en œuvre suivant la localisation de la sortie de la zone. Il impose aussi de gérer des aspects logistiques tels que le stockage, la conservation et le transport des volumes d'eau prélevés pour les différentes analyses de micropolluants.

Dans le cadre du projet ZHART, en parallèle de l'approche classique de prélèvement d'eau, une approche d'échantillonnage passif par POCIS (Polar Organique Chemical Integrative Sampler) a été mise en place de façon à obtenir une image intégrée de la concentration des micropolluants en entrée et sortie de la zone, et au sein de ses différents bassins. Plus de détails sur la méthodologie et les résultats sont disponibles en annexe 6 du document.

Les POCIS ont démontré dans le cadre de ce projet leur opérationnalité, et leur capacité à donner une concentration fiable pour une gamme de traceurs définis. Le Tableau 3 propose une synthèse des avantages et inconvénients des deux types de prélèvement ponctuel/passif.

Tableau 3. Avantages et inconvénients de l'échantillonnage passif POCIS et de l'échantillonnage ponctuel.

		Échantillonnage Passif : POCIS		Échantillonnage ponctuel	
Échantillonnage	Conservation avant prélèvement	à -18°C ou à 4°C pour une période maximale de quelques jours		dans un endroit propre à température ambiante	
	Facilité de mise œuvre	simple à déployer et à relever dans le cadre d'un milieu contrôlé après formation		Simple à mettre en œuvre après formation	
	Classes de molécules échantillonnées	1 seul POCIS pour 4 classes de molécules		Un seul prélèvement (moyen 24h) suivi d'un aliquotage dans des flacons dédiés à chaque analyse.	
	Qualité de l'échantillonnage	sélectif (micropolluant organique possédant Log K _{ow} entre 1 et 4, seuil de coupure 0,1µm)		Non sélectif, dépend du flaconnage fourni	
	Conservation après échantillonnage	à -18°C ou analyse en direct		à -18°C ou analyse en direct (possibilité de conservation à 4°C si analyse sous 7 jours)	
Transport échantillons	Taille Packaging	packaging compact et peu volumineux		volumineux et fragile en fonction du contenant verre/HDPE	
	Facilité de transport	facile, car échantillons compacts et robustes		Difficile, car échantillons fragiles et souvent volumineux	
Extraction et Analyse	Préparation échantillon	ouverture cartouche et transfert de la phase en cartouche		filtration et conditionnement spécifique pour chaque classe de composé (verre ou HDPE) (seuil de coupure 0,7 µm) (<i>Pas de filtration si analyse réglementaire</i>)	
	Extraction	1 seul protocole pour tous les composés		protocoles d'extraction spécifiques par classe de composés	
	Analyse	filières analytiques par classes de composés		filières analytiques par classes de composés	
	Effet matrice	Faible		potentiellement important	
	Limite de quantification	très faible <ng.L ⁻¹		de l'ordre du ng.L ⁻¹ (incertitude garantie à la LQ de 50% maximum)	
	Représentativité de la donnée obtenue	accès à la concentration moyenne à la variabilité du Rs près		Concentration moyenne sur 24h (suivant mode de prélèvement)	

3.3.3 Analyse des micropolluants dans le biote

L'objectif d'atteindre une bonne qualité chimique et écologique des masses d'eau d'ici 2015 a permis le développement de techniques d'analyses chimiques de micropolluants dans le biote. Dans cette optique, un service de diagnostic environnemental a été développé afin d'améliorer les connaissances sur l'exposition de la faune aux micropolluants. Le but est de compléter les informations apportées par les outils classiquement utilisés pour le diagnostic des milieux aquatiques (analyse d'eau, de sédiments, utilisation de POCIS).

De nombreuses études ont mis en évidence l'imprégnation de molécules telles que les HAP, les PCB et les métaux, mais peu d'entre elles s'intéressent à l'accumulation de molécules émergentes telles que les substances pharmaceutiques et les produits phytosanitaires. Dans le cadre du projet ZHART, une méthode d'analyse a été développée afin de détecter ce type de composés émergents dans les organismes vivants. Cela a permis de mesurer l'imprégnation de micropolluants organiques dans des organismes aquatiques présents dans une ZRV (crevettes, gammares,...) ou introduits dans le milieu par un système d'encagement (ex. : *Lymnaea stagnalis*).

Cette étude d'imprégnation a permis d'avoir une information sur une contamination ou un risque d'accumulation lié à une exposition à des micropolluants organiques via l'eau et les sédiments. Cet outil peut être utilisé dans le but de surveiller des substances à fort potentiel d'accumulation ou figurant sur la liste de vigilance de la DCE telles que le diclofénac.

Le projet ZHART a conduit à la proposition d'un nouveau service nommé SESAM-EA (Suivi Environnemental et Surveillance Active des Micropolluants - Ecosystèmes Aquatiques) constitué de plusieurs étapes détaillées ci-après.

3.3.3.1 Le diagnostic sur site

Il comprend la caractérisation du site (environnement, accessibilité, organismes présents), la sélection des organismes (selon le type d'étude) et le choix de la stratégie d'échantillonnage (type d'étude, localisation des points de prélèvements, fréquence, nombre de campagnes).

Deux types d'étude peuvent être proposés par le laboratoire :

- mesure de l'imprégnation de la faune locale (prélèvements *in situ* d'organismes endogènes)
- introduction d'organismes aquatiques exogènes par un système d'encagement (étude spatio-temporelle de la contamination du milieu aquatique ciblé).

En effet, le projet ZHART a permis de développer un indicateur d'exposition basé sur le principe d'encagement d'organismes aquatiques. La limnée (*Lymnaea stagnalis*) a été choisie comme organisme aquatique modèle. En effet, cette espèce est présente sur l'ensemble du territoire français, et possède une forte résistance aux polluants et à des conditions de vie difficiles.

Afin de répondre au mieux à la problématique du demandeur, cette première phase de diagnostic sera effectuée en discussion avec la partie intéressée.




3.3.3.2 Les prélèvements

Tout type d'organisme aquatique peut être utilisé pour ce suivi environnemental. Le protocole d'extraction des composés cibles du biote développé peut être appliqué à de nombreuses matrices biologiques : gammare, crevettes, moules, poissons, gastéropodes (Tableau 4). Selon le(s) organisme(s) défini(s) lors du diagnostic et le type d'étude mis en place, les prélèvements seront réalisés soit dans le cadre de ce service soit par le demandeur.

3.3.3.3 L'analyse des échantillons, le traitement et synthèse des résultats

Fort de son expérience acquise dans le domaine de l'analyse environnementale et grâce à des techniques d'analyse telles que l'HPLC/MS, l'HPLC/MS/MS et la GC/MS, le laboratoire propose une large gamme de micropolluants organiques parmi les grandes familles de molécules : produits pharmaceutiques, hormones, pesticides, détergents et autres familles contenant des perturbateurs endocriniens. Le Tableau 4 rassemble les molécules détectées dans le cadre du projet ZHART.

Tableau 4. Molécules détectées dans les organismes ciblés

Organismes		Molécules détectées
Gammare (endogène)		Carbamazépine (antiépileptique) Aténolol (bêta-bloquant)
Crevette (endogène)		Carbamazépine (antiépileptique) Aténolol (bêta-bloquant)
Limnée(endogène)		Sulfaméthoxazole (antibiotique)
Limnée (encagé)		Aténolol (bêta-bloquant)
		Carbamazépine (antiépileptique)

Les résultats seront compilés et un rapport d'analyse synthétisant les résultats sera rédigé et les résultats explicités. Les organismes aquatiques agissent ici comme un capteur passif vivant et permettent d'intégrer la biodisponibilité des substances ce qui n'est pas le cas pour les capteurs passifs « chimiques ».

3.4 Suivi spécifique : insertion socio-territoriale

Malgré les efforts faits pour assurer en amont la réception sociale d'un aménagement, les conditions locales évoluent et peuvent amener les usagers de l'espace à remettre en question l'installation ; à y adhérer ou au contraire à le rejeter. Il convient donc de veiller à maintenir l'insertion socio-territoriale.

Point « recherche » : Pourquoi récuser l'acceptabilité ?

Si la zone humide artificielle peut faire l'objet d'un avis favorable de la part des acteurs locaux, du fait de ses fonctions épuratrices et donc de l'amélioration attendue des effluents rejetés dans le milieu récepteur, son insertion socio-territoriale est un processus plus complexe. Ce dernier implique non seulement une adhésion de principe aux objectifs associés à sa mise en place – amélioration de la qualité de l'eau à l'échelle locale –, mais également une adaptation du projet aux demandes territoriales. Ce processus de « ménagement » (au sens de M. Marié, 1996), implique de prendre en compte non seulement les différentes dynamiques du milieu d'accueil du système de traitement de l'eau (économiques, écologiques, politiques...), mais aussi les différentes formes d'appropriation de l'espace - pratiques, usages, représentations, attentes - des acteurs du territoire.

On parlera donc plus volontiers de réception sociale que d'acceptabilité.

Sur une critique de cette notion, voir Amalric, Cirelli, Larrue, 2016. Vertigo- Revue de l'environnement, 2015.

3.4.1 Diagnostic de la réception sociale

Le diagnostic mesure l'intérêt qui est porté au site sur un temps court et long.

3.4.1.1 Analyse de la mise en œuvre du plan de gestion

Elle consiste à suivre l'appropriation de l'aménagement par les populations locales. La mesure de l'appropriation dépend des conditions de gestion et d'accessibilité mises en œuvre par les opérateurs et les gestionnaires. Elle peut passer par l'évaluation de l'accessibilité visuelle (qui peut diminuer du fait de la croissance des plantes), de l'ouverture plus ou moins fréquente du site, des possibilités d'interactions avec les gestionnaires et de l'existence d'un programme de gestion plus ou moins explicite.

3.4.1.2 Evaluation de la pertinence du projet pédagogique

Elle consiste à prendre la mesure de la réception du dispositif pédagogique proposé, de sa cohérence avec les attentes des habitants et de sa pertinence aux yeux des enseignants et plus généralement des utilisateurs potentiels de la zone (publics périscolaires).

Elle concerne également le volet de sensibilisation à l'environnement des riverains et de communication sur l'assainissement que les opérateurs sont susceptibles de vouloir développer : il s'agit alors d'identifier les modalités pédagogiques offertes, les objectifs envisagés (sensibilisation aux processus d'épuration et/ou hydrauliques et/ou écologiques ; sensibilisation aux bonnes pratiques en matière d'assainissement) et les modalités d'accès proposées (fermeture plus ou moins totale : nombres de jours d'ouverture ; animations lors de « portes-ouvertes »...).

3.4.1.3 Mobilisation de la participation active des habitants

En cas de dégradation, de dysfonctionnement de la zone, de manière contextuelle (modifications de l'installation, d'équipe municipale...) ou dans le cadre du fonctionnement ordinaire de la zone, un processus faisant appel à la participation des habitants peut être mis en place. Ceux-ci

pourront alors être activement associés à des groupes de travail, des ateliers de sensibilisation ou de réflexion sur les perspectives d'évaluation de la zone, voire de concertation.

Il s'agit de maintenir les services apportés par l'aménagement et donc son insertion socio-territoriale, grâce à des échanges entre les divers acteurs concernés, aux nombreux niveaux territoriaux.

- Discussions lors des journées portes ouvertes
- Organisation d'un débat public local
- Organisation d'ateliers réflexifs et prospectifs

3.4.2 Animation socio-paysagère

Le suivi de l'insertion peut s'adosser à un projet intégré d'animation de la zone, en lien avec les acteurs locaux (de l'échelle intercommunale à régionale, aussi bien dans les domaines de l'environnement, de la qualité de l'eau que dans ceux de l'aménagement du territoire et du développement local). Le projet sera associé à la prestation d'un paysagiste.

- Projet de territoire : jardin partagé, jardin à but thérapeutique, espaces de loisirs
- Activités scientifiques à l'intérieur de la ZRV : faune, flore...
- Observation et apprentissage des facteurs de pollution de l'eau et de ses traitements
- Aménagement paysager du site et chantiers de gestion par les habitants
- Intégration de la gestion des milieux, intégration d'une filière végétale...

3.4.3 Sources et moyens

Le suivi de l'insertion socio-territoriale de la zone peut passer par des campagnes d'enquête récurrentes, basées sur des entretiens semi-directifs et/ou des questionnaires quantitatifs. Outre la méthodologie de conception de l'enquête, il importe que les objectifs de l'enquête soient clairement identifiés. Il ne doit pas s'agir d'un « questionnaire de satisfaction », ni d'une forme déguisée de communication ou de sensibilisation. Les moyens alloués à une telle démarche doivent être dimensionnés de manière à assurer, une bonne conception scientifique, un échantillonnage pertinent, une bonne qualité de recueil de l'information (compétences des enquêteurs), un traitement rigoureux de l'information (saisie et analyse), une restitution fine, la possibilité de reproduire la démarche dans le temps.

Des réunions, des ateliers, des scènes de débats peuvent s'appuyer ou déboucher sur des productions spécifiques (exposition, plaquettes, ateliers-enfants...).

4 ABBREVIATIONS

APS	Avant-Projet Sommaire
BD	Base de Données
CCTP	Cahier des Clauses Techniques Particulières
DICT	Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux
DT-	Déclaration de projet de Travaux
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
MNHN	Muséum National d'Histoire Naturelle
NGF	Nivellement Général de la France
Opie	Office pour les insectes et leur environnement
PLU	Plan Local d'Urbanisme
POCIS	Polar Organique Chemical Integrative Sampler
PRC	Performance Reference Compound
PRO	Projet
SAGE	Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau
SCoT	Schéma de Cohérence Territoriale
SIG	Système d'Information Géographique
SRCE	Schéma Régional de Cohérence Ecologique
STEU	Station de Traitement des Eaux Usées
ZHART	Zone Humide ARTificielle
ZRV	Zone de Rejet Végétalisée

5 ANNEXES

5.1 Annexe 1 – Présentation des partenaires du projet ZHART

5.1.1 SUEZ

Avec 79 554 collaborateurs, SUEZ est un leader mondial exclusivement dédié aux métiers de l'eau et des déchets et présent sur les cinq continents. En 2014, SUEZ a réalisé un chiffre d'affaires de 14,3 milliards d'euros et a investi plus de 70 millions d'euros dans la R&D.

SUEZ fournit des services et des équipements dans le domaine de l'eau et de la propreté, exploitant environ 1500 STEP dans le monde entier. Outre l'apport de son savoir-faire au travers de son expérience en tant que concepteur, constructeur et exploitant, SUEZ cherche à proposer à ses clients des solutions performantes et innovantes pour réduire l'impact environnemental des rejets d'assainissement vers le milieu naturel.

Quatre entités de SUEZ participent à ce projet :

- le CIRSEE, centre de recherche du groupe qui a porté le projet ZHART
- SUEZ Eau France (voir ci-après)
- SUEZ Consulting, bureau d'étude du groupe qui intervient notamment en expertise hydraulique
- SUEZ Infrastructures de traitement, constructeur et ensembleur du Groupe

5.1.2 SUEZ Eau France

Opérateur auprès des collectivités locales, SUEZ Eau France (Lyonnaise des Eaux SAS), filiale de SUEZ dessert 19 % de la population française en eau, soit 12,3 millions de personnes. Elle collecte et dépollue les eaux usées de 18 % de la population française, soit 9 millions de personnes.

SUEZ Eau France aide les communes à produire et à distribuer une eau de qualité irréprochable jusqu'au robinet des consommateurs, à entretenir et à gérer les réseaux de distribution, à prévenir les risques de pollution, ainsi qu'à répondre aux attentes des consommateurs en matière d'information. 15 entreprises régionales sont réparties sur le territoire français pour être au plus proche de ses clients, les collectivités principalement et les industriels.

SUEZ Eau France compte 9 900 collaborateurs et réalise un chiffre d'affaires de 2 milliards.

C'est le 2ème acteur de la gestion de l'eau et de l'assainissement en France.

SUEZ Eau France est impliqué dans le projet ZHART à la fois d'un point de vue opérationnel, en tant qu'expert en conception et exploitation de ZRV (zones libellules), mais aussi en tant que centre de recherche, avec les experts du LyRE.

5.1.3 RIVE

La société RIVE est un bureau d'études spécialisé en hydro-écologie. Son domaine d'expertise est centré sur l'hydro-écologie, c'est-à-dire la compréhension du fonctionnement général des milieux aquatiques, notamment par l'observation de la faune et de la flore pour proposer des mesures de gestion durable des hydrosystèmes.

La société comprend huit collaborateurs répartis sur deux sites (Chinon et la Ferté Bernard). Les activités sont centrées autour d'une clientèle principalement publique (collectivités locales, services de l'État) et sont principalement des études d'aménagement des bords de rivière, de

réhabilitation de cours d'eau, ou de zone humide, de modification des ouvrages sur les cours d'eau, ou de protection des berges par des techniques adaptées, comme le génie végétal.

5.1.4 Nymphéa

L'entreprise horticole "NYMPHEA" est aujourd'hui leader sur le marché de la production de plantes aquatiques ornementales. L'entreprise compte plus de 500 clients à travers la France, mais aussi l'Europe (Espagne, Belgique...) et le monde (Maroc, Israël...). Ces clients peuvent être distributeurs, grandes enseignes de jardineries (Truffaut, Botanic, Villaverde, Jardiland...) ou professionnels de l'environnement.

Cette clientèle nombreuse s'est faite grâce à une gamme de plantes de plus de 300 variétés. Il s'agit de plantes de berges, de nénuphars ou de plantes immergées. L'entreprise produit plus de 700 000 plantes par ans. Il s'agit du leader français en gamme ornementale.

L'entreprise possède 13 serres et 4 bassins extérieurs non couverts ce qui représente 7000m² de bassins dédiés à la production des plantes aquatiques ornementales ou environnementales.

Nymphéa a reçu en 2011 le Prix National de la Dynamique Agricole dans la catégorie Agriculture Durable décerné par le groupe financier BPCE.

Elle travaille aujourd'hui via le réseau d'entreprise « ORVIVA » à l'élaboration d'un cahier des charges sur la production de plantes aquatiques (milieu humide) qui prend en compte l'impact sur l'environnement (culture raisonnée, biodiversité, traçabilité), le social (insertion de travailleurs handicapés, mixité sociale) et économiques (communication, vente, développement). L'entreprise Nymphéa, en collaboration avec l'AFNOR a réalisé un Référentiel de Bonne Pratique traitant de la culture des végétaux aquacoles. L'existence de ce RBP sera étoffée avec ce projet grâce à la compréhension du comportement biochimique des micropolluants.

5.1.5 Université de Tours : UMR CITERES

L'UMR Cités, TERritoires, Environnement et Sociétés (CITERES) est composée de quatre équipes chargées d'analyser et de rendre intelligibles les processus de spatialisation et de territorialisation c'est-à-dire les relations entre les sociétés et leur espace. Deux équipes sont impliquées dans le projet :

- L'équipe Construction politique et Sociale des Territoires (CoST) regroupe des compétences principalement en aménagement de l'espace-urbanisme, en sociologie, géographie et anthropologie et dont l'objectif scientifique est de contribuer à une meilleure connaissance des effets sociaux et spatiaux des tensions entre tendances à la "déterritorialisation" et processus de (re) territorialisation.
- L'équipe Ingénierie du Projet d'Aménagement, Paysage et Environnement (IPA-PE) regroupe des compétences principalement en écologie, en géographie, en aménagement de l'espace-urbanisme. Elle a pour projet scientifique l'intelligibilité des transformations des milieux naturels et des espaces aménagés et construits, telles qu'elles résultent de processus soit "spontanés", soit volontaires.

5.1.6 LERES SUD – unité Biodiagnostic

Le LERES est un laboratoire accrédité Cofrac depuis 2000 et agréé par les ministères en charge de la santé et de l'environnement. Ce laboratoire dispose d'un plateau technique de haut niveau (LC/MS, UPLC/MS/MS, GC/MS, GC/MS/MS, ICP/MS, ICP optique, PCR, analyseur d'images, etc.) qui permet d'intervenir dans tous les compartiments de l'environnement pour analyser une large gamme de contaminants. Le LERES fait partie de l'IRSET (Institut de Recherche en Santé et Environnement du Travail), unité INSERM 1085.

L'unité Biodiagnostic constitue l'antenne Sud du LERES et est localisée à Nîmes. Elle développe des méthodes d'extraction et de détection de contaminants chimiques et biologiques dans différentes matrices plus ou moins complexes. Son objectif est l'évaluation de l'exposition des organismes à des contaminants dans un environnement donné. Ses cibles d'intérêt sont les contaminants émergents, chimiques et biologiques.

5.1.7 Eurofins

Eurofins IPL Environnement fait partie du groupe Eurofins Scientific. Au plan national, ce groupe fédère en réseau 14 laboratoires d'analyses, dont 13 sont agréés par le Ministère en charge de la Santé pour le contrôle sanitaire des eaux.

Les missions clefs sont :

- Agréé par le Ministère de la Santé pour le contrôle sanitaire Départemental des eaux d'alimentation et des eaux de baignades (Hérault, Gard), le contrôle sanitaire Régional des eaux minérales et des eaux thermales.
- Agréé par le Ministère de l'Environnement pour le contrôle des eaux naturelles, des eaux de rejets industriels ou urbains et des sédiments (agrément 1, 2, 3, 4, 5 et 11).

5.2 Annexe 2 – Descriptif des sites d'études

	Site A	Site B	Site C	Site D	Site E
Diversité typologies de	Reconversion STEP	ZRV	ZRV	ZH Naturelle	ZRV
	Bassins	Association de bassins et noues	noue + bassins	Roselière	Association de bassins, noues et roselière
	22 ha	0,3 ha	0,5 ha	10 ha	1,5 ha
Hydraulique et maturité du site	15 à 60 jours	environ 15 à 25 jours	environ 1 jour par file	40 à 120 jours	7 à 10 jours
	1997	2012	2009	2009	2009
Diversité conditions de pédoclimatiques, paysage	Méditerranéen	Continental	Atlantique	Méditerranéen	Méditerranéen
	macrophytes, microphytes, mais berges bétonnées. zone humide naturelle à proximité	Macrophyte et microphytes	ZRV de type boisée, macrophytes	Richesse de faune, zone humide naturelle à proximité	Macrophyte et microphytes, zone humide naturelle à proximité
Diversité de contexte et d'enjeux	Urbain	Rural	Rural	Rural	Rural
	Station balnéaire, chasseurs	Agriculture	Tourisme et agriculture	Petite station balnéaire, éleveurs, chasseurs	Résidentiel, Agriculture
Diversité de STEP	Boues activées	Lit bactérien + lits plantés de roseaux	Boues activées	Lagunage	Boues activées
	30 000 à 90 000 EH	600 EH	5 000 EH	30 000 EH	5 000 EH
	Effluent urbain	Effluent urbain	Effluent urbain	Effluent urbain	Effluent urbain

5.3 Annexe 3 – Paramètres conventionnels

Paramètres majeurs suivis dans le cadre des audits de performances épuratoires d'ouvrages alimentés par les rejets de station de traitement des eaux usées.

Paramètre	Abréviation	Famille	Méthode
Escherichia coli	E. Coli	Bactériologie	Colilert 18heures/ Quanti-Tray 2000
Entérocoques	Entéro.	Bactériologie	Entérolert/Quanti-Tray 2000
Nitrites	N-NO ₂	Azote	Colorimétrie
Nitrates	N-NO ₃	Azote	Colorimétrie
Ammonium	N-NH ₄	Azote	Colorimétrie
Azote Kjeldahl	NTK	Azote	Titrimétrie
Azote global	N total	Azote	Calcul
Phosphates	P-PO ₄	Phosphore	Colorimétrie
Phosphore total	Pt	Phosphore	Colorimétrie
Demande Biologique en Oxygène	DBO ₅	Carbone	Ensemencement
Demande Chimique en Oxygène	DCO	Carbone	Oxydation ST-DCO
Matière En Suspension	MES	MES	Filtration Filtre Milipore AP40

5.4 Annexe 4 – Micropolluants analysés dans le projet ZHART

Famille	Sous famille	substance	laboratoire	LoQ
métaux		Cadmium	IPL - EUROFINS	0,5
		Chrome	IPL - EUROFINS	0,5
		Cuivre	IPL - EUROFINS	0,5
		Nickel	IPL - EUROFINS	0,5
		Plomb	IPL - EUROFINS	0,5
		Zinc	IPL - EUROFINS	2
Pesticides		AMPA	IPL - EUROFINS	0,1
		Glyphosate	IPL - EUROFINS	0,1
		Atrazine	LPTC	5
		Diuron	LPTC	5
Pharmaceutiques	Antalgique	Paracétamol	LPTC	10
	Anti-inflammatoire non stéroïdien	Diclofénac	LPTC	6
		Ibuprofène	LPTC	6
		Kétoprofène	LPTC	20
	Antidépresseur	Fluoxétine	LPTC	5
	Antiépileptique	Carbamazépine	LPTC	6
	bétabloquants	Acebutolol	LPTC	2
	bétabloquants	Propranolol	LPTC	10
	bétabloquants	Sotalol	LPTC	10
Antibiotiques	Ciprofloxacine	LPTC	10	
Antibiotiques	Sulfaméthoxazole	LPTC	15	
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)		Naphtalène	LPTC	5
		Fluoranthène	LPTC	0,3
Alkylphenols		4-Nonylphénol monoéthoxylate	LPTC	50
		4-Nonylphénol diéthoxylate	LPTC	20
		4 Nonylphénol (isomères)	LPTC	15
		4-ter octylphénol	LPTC	5
		4-Nonylphénoxyacétic-acide	LPTC	1
		4 ter butylphénol	LPTC	25
Produits cosmétiques	Musc synthétique	Galaxolide	IPL - EUROFINS	20
		Tonalide	IPL - EUROFINS	20
Hormones		17b-estradiol	LPTC	5
		Estrone	LPTC	0,6

5.5 Annexe 5 - Méthodologie d'évaluation des performances de traitement

5.5.1 Echantillonnage, conditionnement et transport

Les prélèvements en entrée et en sortie des ZRV ont été effectués par un préleveur automatique réfrigéré permettant de réaliser des prélèvements moyennés sur 24 h, soit en étant asservi au débit, soit disposant de 24 flacons afin de pouvoir reconstituer un échantillon moyen 24 h.

Afin de se prémunir des contaminations possibles des échantillons, les opérations de prélèvement et de conditionnement ont été particulièrement soignées :

- l'utilisation de matières plastiques est bannie au profit du verre et du téflon. Le préleveur automatique est équipé de matériaux inertes, un tube d'aspiration en PTFE, bidon collecteur de 10 Litres en verre.
- avant chaque campagne de prélèvement, les préleveurs ainsi que l'ensemble du matériel en contact avec l'effluent, sont nettoyés et décontaminés selon la procédure adaptée de celle décrite pour la réalisation des prélèvements de micropolluants du programme AMPERES⁵.

Le prélèvement en sortie de ZRV a été décalé d'un temps équivalent au temps de séjour (qui a été estimé en amont de la campagne de prélèvement). La réalisation de deux (à trois) prélèvements en sortie (et en entrée) de ZRV a permis de réduire les possibles erreurs d'interprétation des performances de traitement dû aux fluctuations journalières de la charge en micropolluants. Après prélèvement (et reconstitution si nécessaire), l'échantillon est homogénéisé avec un agitateur muni d'une tige et de pales en PTFE. L'échantillon est alors conditionné dans le flaconnage adéquat en fonction des substances à analyser, et préalablement fournis par les laboratoires d'analyses.

Les échantillons sont expédiés vers le(s) laboratoire(s) par transport rapide dans des glacières réfrigérées le jour même, avec livraison sous 24 h maximum. Les échantillons sont maintenus lors du transport, à une température de 4°C.

5.5.2 Calcul des rendements

L'évaluation de l'élimination des micropolluants par les procédés de traitement nécessite le calcul des rendements d'élimination (notés R_w). Les R_w sont calculés sur la base des rapports de concentrations mesurées en phase dissoute en entrée et 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 préconisée pour le calcul des R_w est celle qui a été développée dans le cadre de projet ARMISTIQ⁶, 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 limite de quantification (de 50 à 100 %), il a été établi un seuil en dessous duquel il faut prendre plus de précautions dans le calcul de rendement d'élimination et son interprétation. Ce seuil a été défini comme égal à 5 fois la limite de quantification (LQ) du micropolluant cible. À titre d'exemple, lorsque les concentrations d'entrée et de sortie sont inférieures à ce seuil, il est, en général, déconseillé de calculer un rendement d'élimination ou celui-ci est à interpréter avec une attention très particulière.

⁵ <http://projetamperes.cemagref.fr/index.html>

⁶ <http://armistiq.irstea.fr/>

5.6 Annexe 6 – Echantillonneurs passifs - POCIS

5.6.1 Description

Un échantillonneur passif est défini comme étant un outil capable d'intégrer les composés ciblés présents dans le milieu pendant un temps défini. Classiquement il est composé d'un adsorbant (ou d'un absorbant) capable de piéger les micropolluants chimiques du milieu à analyser sans mécanisme d'extraction actif. Les contaminants diffusent donc du milieu échantillonné vers l'échantillonneur de manière constante jusqu'à une condition d'équilibre non atteinte à l'échelle du temps d'échantillonnage. Les POCIS testés dans le cadre de projet sont de 2 types :

- les POCIS de configuration classique - POCIS PES : membranes en polyéthersulfone, porosité 0.1µm, phase Oasis HLB (Waters, Saint-Quentin en Yvelines, France)
- des POCIS – like (membrane en nylon, porosité 0.1 µm, phase Oasis HLB (Waters, Saint-Quentin en Yvelines, France).

Ces outils sont connus pour échantillonner efficacement des micropolluants dont le log Kow est compris entre 1 et 4. Afin d'améliorer l'aspect quantitatif de l'échantillonnage par les POCIS, l'approche PRC (Performance Reference Compound) a été utilisée dans le cadre du projet (Mazzella et al, 2010 ; Belles et al, 2014). Trois composés de référence et de performance (PRC) ont été testés (atrazine déisopropyl d5, caféine C13, salbutamol d3). Les PRC sont des molécules non interférentes, isotopiquement substituées dont la désorption (k_e) durant la période d'exposition permet de calculer un taux d'échantillonnage in situ (R_s in situ) de l'outil POCIS. En effet l'accumulation des micropolluants dans les POCIS est basée sur le postulat d'échanges isotropes, l'accumulation d'un micropolluant échantillonné est proportionnelle à la désorption des PRC, ce qui permet de calculer le taux d'échantillonnage in situ de l'outil, et de remonter aux concentrations moyennes de micropolluants sur la durée d'exposition.

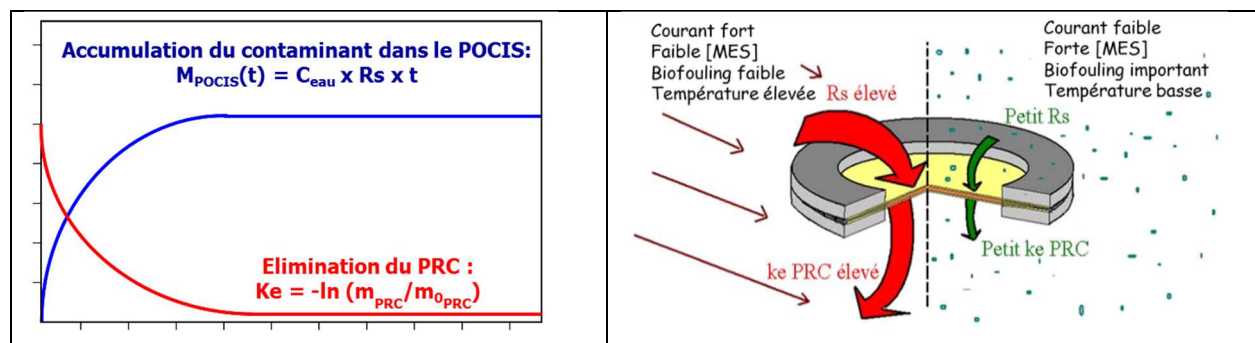


Figure 20. Principe d'accumulation des micropolluants et de désorption des composés de performance et de référence (PRC) dans les POCIS. (M_{POCIS} : masse de micropolluants accumulés dans le POCIS, C_{eau} : concentration dans l'eau ; R_s : taux d'échantillonnage ; t : temps, k_e constante de désorption, MES : Matière en suspension).

5.6.2 Application des POCIS au ZRV

Les POCIS utilisés dans le cadre du projet ZHART ont permis d'échantillonner 21 composés « traceurs » appartenant à 4 classes de composés (pharmaceutiques, pesticides, hormones et alkylphénols). Les POCIS ont été immergés durant des périodes de 21 jours sur différents sites d'étude. Le déploiement des échantillonneurs durant l'ensemble du projet a confirmé l'opérationnalité de ces outils d'échantillonnage, et leur facilité de manipulation. Toutes les opérations de déploiement se sont déroulées sans encombre après la formation des opérateurs.

La relève des POCIS ainsi que leur stockage et leur transport vers le laboratoire pour analyse se sont également déroulés sans encombre, aucune détérioration de POCIS n'a été relevée.

Au niveau de l'extraction et de l'analyse, les POCIS n'ont pas posé de problème analytique majeur. Le protocole d'élution utilisé pour éluer les POCIS permet de récupérer l'ensemble des composés à analyser, seules les filières d'analyses sont spécifiques à chaque groupe de composés analysés, nécessitant un aliquotage en plusieurs extraits pour l'injection. De plus, au niveau analytique peu d'effets matriciels ont été observés. De plus la capacité d'accumulation des POCIS permet d'obtenir un signal chromatographique net, même à des niveaux de concentration proches du ng.L^{-1} . À titre d'illustration, la Figure 21 démontre la concordance des niveaux de concentrations retrouvées après échantillonnage ponctuel et après échantillonnage passif en entrée d'un site d'étude pour les composés suivant : la carbamazépine et l'ibuprofène.

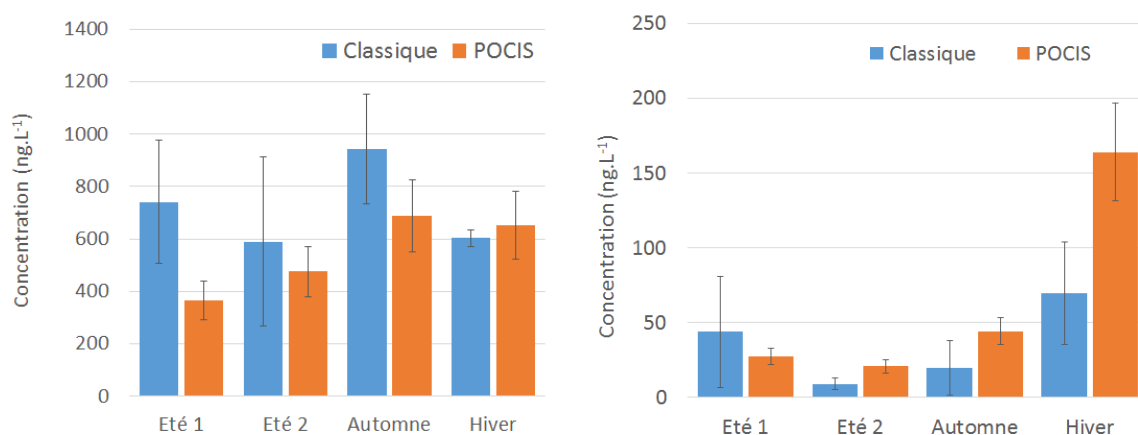


Figure 21. Comparaison des concentrations en carbamazépine (gauche) et ibuprofène (droite) obtenues en entrée du site E après échantillonnage moyen 24h (Eau) et après échantillonnage passif (POCIS).