Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques. Pourquoi ? Comment ?

V. Nicolas, B. Chocat, D. Lourdière, Pierre Dupont, S. Le Fur, F. Rey, S. Moussard, E. Babut, C. Pagotto, E. Oppeneau, et al.

▶ **To cite this version:**

V. Nicolas, B. Chocat, D. Lourdière, Pierre Dupont, S. Le Fur, et al.. Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques. Pourquoi ? Comment ?. ASTEE, 357 p., 2013. ⟨hal-00966868⟩

HAL Id: hal-00966868

https://hal.science/hal-00966868v1

Submitted on 27 Mar 2014

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

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

HAL Authorization

Ouvrage collectif piloté par l'ASTEE sous la coordination de Bernard Chocat, et soutenu par l'Onema

Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques

POURQUOI ? COMMENT ?

Décembre 2013

astee association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement
SHF
Académie de l'Eau
AFEID Association Française pour l'Eau, l'Irrigation et le Drainage
Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie
ONEMA

Ouvrage collectif piloté par l'ASTEE sous la coordination de Bernard Chocat, et soutenu par l'Onema

Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques

POURQUOI ? COMMENT ?

Décembre 2013

AUTEURS

Cet ouvrage a été rédigé sous l'égide d'un groupe de travail interassociatif (ASTEE, SHF, Académie de l'eau, AFEID). Les personnes ayant participé à ce groupe sont les suivantes :

Véronique Nicolas (Onema)
Bernard Chocat (INSA de Lyon, ASTEE)
Daniel Loudière (SHF)
Philippe Dupont (Onema, Président de la Crema de l'ASTEE)
Solène Le Fur (ASTEE)
Freddy Rey (Irstea)
Stéphanie Moussard (GIP Seine-Aval)
Emilie Babut (MEDDE-DEB)
Christelle Pagotto (Veolia Eau)
Emmanuelle Oppeneau (Lyonnaise des Eaux)
Cécile Costes (Agence de l'Eau Loire-Bretagne)
Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse par le biais de Claire Bouteloup
Philippe Goetghebeur (Agence de l'Eau Rhin-Meuse)
Stéphane Jourdan (Agence de l'Eau Artois-Picardie)
Gilles Cherier et Johanna Mesquita (Agence de l'eau Seine-Normandie)
Delphine Angibault (SEDIF)
Clarisse Paillard (Nantes Métropole)
Muriel Saulais (CERTU)
Alexandre Folmer (Hydreos)
Coralie Darsy (DREAM)
Cyril Logereau (CG60)
Sébastien Dellinger et Patrice Valantin (Dervenn)
Mathieu Heitz (CG76)
Grégory Lapierre (EDF)
Nathalie Frascaria-Lacoste (AgroParisTech)
Isabelle Vendeuvre (Suez Environnement)

Ce groupe a été animé par :

Véronique Nicolas (Onema)
Solène Le Fur (ASTEE)

Différents experts ont contribué à la rédaction du chapitre 2 :

Introduction : Laurent Schmitt (Université de Strasbourg/CNRS) et Bernard Chocat (INSA Lyon)

Protéger la qualité physico-chimique de la ressource en eau en luttant en particulier contre les pollutions diffuses : Julien Tournebize (Irstea)

Améliorer le traitement des rejets ponctuels et diminuer leurs impacts sur les milieux aquatiques récepteurs : Catherine Boutin (Irstea)

Maîtriser les crues et les inondations : Christine Poulard, Pascal Breil (Irstea), et Michel Lafont (Irstea/ Les Jardins d'Artémis)

Maîtriser les évolutions du lit des cours d'eau (incisions, atterrissement, ...) et mieux gérer les formes fluviales : Laurent Schmitt (Université de Strasbourg/CNRS), Jean-Paul Bravard (CNRS/Université Lyon 2/Université Lyon 3/INSA/ENTPE) et Freddy Rey (Irstea)

Mieux gérer les eaux pluviales urbaines en diminuant leurs effets négatifs et en les valorisant : Bernard Chocat (INSA Lyon).

Valoriser des paysages et/ou des usages ou des aménités liés à l'eau : Thierry Maytraud (Agence Thierry Maytraud)

Restaurer les milieux aquatiques et développer la biodiversité : Stéphanie Moussard (GIP Seine-Aval) et Bernard Chocat (INSA Lyon)

Le travail de recueil des études de cas a été réalisé par Pauline Boussion (ASTEE).

Le chapitre 3 « freins et perspectives » a beaucoup profité du travail de stage de Quentin Dupetit (ASTEE).

La coordination scientifique et l'homogénéisation des textes ont été assurées par Bernard Chocat, Professeur émérite à l'INSA de Lyon, Vice-Président de l'ASTEE en charge de la recherche.

PREAMBULE

L' « ingénierie écologique » pour la préservation et la restauration des milieux aquatiques s'est construite ces trente dernières années grâce aux progrès des connaissances et aux retours d'expérience de nombreux tâtonnements et d'initiatives parfois foisonnantes. Elle atteint aujourd'hui une maturité qui permet de constituer un corpus solide de concepts, de méthodes et de pratiques éprouvées.

Le présent ouvrage apporte aux décideurs de la gestion de l'eau et des milieux aquatiques, ainsi qu'à leurs conseillers, un cadre synthétique permettant de clarifier les concepts et les pratiques de cette nouvelle ingénierie pluridisciplinaire, travaillant pour et par le vivant. Établie sur la compréhension et l'observation de terrain des écosystèmes, de leur dynamique, de leur sensibilité, de leur résilience, et de leurs fonctionnalités, cette ingénierie du XXIème siècle permet de constituer des conditions plus satisfaisantes de leurs dynamiques évolutives en interaction avec les activités humaines. Une meilleure santé de ces écosystèmes leur permet de rendre de meilleurs services, les pratiques respectueuses de leur fonctionnement tout comme l'intervention à la source pour les protéger se sont également révélées moins coûteuses, tant en investissement qu'en entretien. C'est donc tout l'intérêt des maîtres d'ouvrages que de consacrer les moyens nécessaires à acquérir et entretenir les connaissances et les observations approfondies qui permettent ces interventions plus intelligentes.

Pour mener à bien ce travail alliant théorie et pratique, le cadre associatif constituait un lieu privilégié. Cet ouvrage repose sur les échanges menés au sein d'un groupe animé par l'ASTEE réunissant les contributions de nombreux experts du domaine et acteurs de terrain dans le cadre d'un protocole associatif regroupant l'Académie de l'Eau, l'AFEID et la SHF. Elle a été enrichie par quatre journées d'échanges qui ont eu lieu au sein des sections régionales de l'ASTEE durant l'année 2012.

Merci tout particulièrement à Bernard Chocat, Véronique Nicolas et Solène Le Fur pour leur implication pour le bon aboutissement de ce projet.

Bien entendu, cette synthèse a vocation à être enrichie dans les années à venir par de nouveaux travaux, des retours d'expériences plus abouties, etc. La commission "ressources en eau et milieux aquatiques" (CREMA) de l'ASTEE s'y attelera dans la lignée de ces travaux initiés en 2011.

Elisabeth Dupont-Kerlan
Directrice Générale de l'Onema

Pierre-Alain Roche
Président de l'ASTEE

SOMMAIRE

INTRODUCTION 11

Chapitre 1 **Principes, fondements et historique de l'ingénierie écologique pour les milieux aquatiques** 12

1 QUELQUES CONCEPTS CLÉS POUR BIEN COMPRENDRE LA SUITE 14

1 Milieu aquatique, écosystème aquatique, hydrosystème et masse d'eau p. 14
2 Fonctionnement écologique p. 15
3 Restauration, réhabilitation, réaffectation (ou création) d'écosystème p. 15
4 Etat, évolution et trajectoire p. 15
5 Equilibre, stabilité et résilience p. 17
6 Système de référence p. 18
7 Ingénierie écologique versus restauration des écosystèmes p. 20

2 EVOLUTION DANS LA GESTION DES MILIEUX AQUATIQUES 21

3 L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE : UN CONCEPT « À LA MODE » ? 24

4 QUELLE DÉFINITION RETENIR ? 25

1 Des définitions multiples p. 25
2 Définition retenue p. 27

5 CONCLUSION DU CHAPITRE 1 29

1 INTRODUCTION AU CHAPITRE 2 : LES DIMENSIONS DE LA GESTION DES HYDROSYSTÈMES 32

1 La reconnaissance d'usages et de fonctions utiles à la société p. 32
2 Les différentes dimensions des hydrosystèmes : le cas des rivières p. 34
3 Les motivations des maîtres d'ouvrage et la mise en œuvre des principes d'ingénierie écologique p. 37

2 PROTÉGER LA QUALITÉ PHYSICO-CHIMIQUE DE LA RESSOURCE EN EAU 38

1 Cas des rejets diffus p. 38
2 Cas des rejets localisés p. 39

3 CONTRÔLE À LA SOURCE DES REJETS DIFFUS D'ORIGINE AGRICOLE 40

1 Contexte et enjeux p. 40
2 Grands principes à appliquer p. 40
3 Outils et réalisation p. 44
4 Perspectives et freins p. 56

4 AMÉLIORER LE TRAITEMENT DES REJETS LOCALISÉS ET DIMINUER LEURS IMPACTS SUR LES MILIEUX AQUATIQUES RÉCEPTEURS : LE CAS DES ZONES DE REJET VÉGÉTALISÉES 58

1 Contexte et enjeux p. 58
2 Grands principes à appliquer p. 58
3 Outils et réalisation p. 60
4 Perspectives et freins p. 67

5 GÉRER LES CRUES ET LES INONDATIONS 68

1 Contexte et enjeux p. 68
2 Grands principes à appliquer p. 69
3 Outils et réalisation p. 74
4 Perspectives et freins p. 83

6 MAÎTRISER LES ÉVOLUTIONS DU LIT DES COURS D'EAU (INCISION, ATTERRISSEMENT, ...) ET MIEUX GÉRER LES FORMES FLUVIALES 84

1 Contexte et enjeux p. 84
2 Grands principes à appliquer p. 87
3 Outils et réalisation p. 89
4 Perspectives et freins p. 92

7 MIEUX GÉRER LES EAUX PLUVIALES URBAINES EN DIMINUANT LEURS EFFETS NÉGATIFS ET EN LES VALORISANT — 94

1 Contexte et enjeux — p. 94
2 Grands principes à appliquer — p. 95
3 Outils et réalisation — p. 100
4 Perspectives et freins — p. 106

8 VALORISER DES PAYSAGES ET/OU DES USAGES OU DES AMÉNITÉS LIÉS À L'EAU EN MILIEU URBAIN — 107

1 Contexte et enjeux — p. 107
2 Grands principes à appliquer — p. 108
3 Outils et réalisation — p. 110
4 Perspectives et freins — p. 112

9 RESTAURER LES MILIEUX AQUATIQUES ET DÉVELOPPER LA BIODIVERSITÉ — 114

1 Contexte et enjeux — p. 114
2 Grands principes à appliquer — p. 116
3 Outils et réalisation — p. 120
4 Perspectives et freins — p. 127

Chapitre 3 **Et demain ?** — 128

1 LES FREINS AU DÉVELOPPEMENT DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE ET LES OUTILS POUR LES LEVER — 131

1 Les difficultés d'autofinancement des collectivités — p. 131
2 Un problème de gouvernance dans le domaine de l'eau — p. 132
3 Un manque d'information et de sensibilisation aux enjeux — p. 133
4 Un manque de formation des maîtres d'ouvrage et de leurs conseillers conduisant à une mauvaise formulation des cahiers des charges — p. 133
5 Un fonctionnement de la commande publique qui freine l'innovation — p. 134
6 La difficulté à maîtriser le foncier — p. 134
7 La difficulté à bien définir les objectifs du projet — p. 135
8 Une ingénierie en cours d'émergence avec des incertitudes sur l'efficacité réelle des actions — p. 136
9 Un manque de valorisation auprès des professionnels de l'aménagement urbain — p. 136
10 Des solutions perçues comme plus difficiles à mettre en œuvre et plus couteuses en étude et en entretien — p. 137

2 LES LEVIERS POUR DÉVELOPPER L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE — 138

1 L'existence de soutiens techniques et financiers dans le domaine des milieux aquatiques — p. 138
2 L'engagement et le volontarisme de certains acteurs — p. 139
3 La légitimation de l'action des acteurs — p. 140
4 La volonté d'améliorer le cadre de vie — p. 140

1 PROTECTION DE LA QUALITÉ PHYSICO-CHIMIQUE DE L'EAU ET PROTECTION DE LA RESSOURCE 144

1 Réhabilitation d'une zone humide pour lutter contre l'eutrophisation d'un lac : cas du Lac d'Aydat (63) p. 145
2 Prévention de la contamination des ressources en eau en milieu rural et semi-rural : le projet Aquisafe p. 151
3 Restauration écologique et concertation sur une zone humide en captage Grenelle : restauration du Bras de Bou p. 156
4 Evaluation du potentiel des zones humides du Rhin supérieur pour la réduction des pesticides p. 161
5 Reconquête de la qualité des eaux souterraines au captage du Garo p. 168

2 GESTION/TRAITEMENT DES POLLUTIONS PONCTUELLES 171

1 Fonctionnement de la Zone de Rejet Végétalisée de Coutières (79) p. 172
2 Des noues plantées comme zones de rejet végétalisées à Liebsdorf p. 177
3 Systèmes extensifs pour la gestion et le traitement des eaux urbaines de temps de pluie p. 179
4 Mangroves et bioremédiation à Mayotte p. 185
5 Création d'habitats humides en sortie de STEP pour le traitement des polluants émergents p. 191
6 L'épuration extensive des eaux usées et des matières de vidange : cas de Nègrepelisse p. 197

3 PRÉVENTION DES RISQUES D'INONDATIONS 206

1 La renaturation de la Fontenelle p. 207
2 Reconstitution de milieux fonctionnels et diversifiés dans le lit majeur du cours d'eau et création de chenaux de crues p. 213
3 Découverture de l'Ondaine p. 218
4 La renaturation de la Souffel p. 224
5 Lutte contre les inondations centennales et restauration des milieux naturels : cas du Bassin de l'Yzeron p. 230

4 DYNAMIQUE DES COURS D'EAU 238

1 La concertation pour passer de la stabilisation de berges à un espace de mobilité admis pour l'Adour p. 239
2 Mise en place d'une action globale et concertée : le contrat de rivière de l'Arve p. 245
3 Programme global de restauration des principaux cours d'eau du département du Haut-Rhin p. 252
4 Mise en place d'un processus de concertation afin de rétablir la continuité écologique du bassin de la Sèvre nantaise p. 257

5 VALORISATION DES EAUX PLUVIALES URBAINES 262

1 Gestion des eaux pluviales dans une ZAC (Bézannes) : d'une solution de "génie civil" à un scénario plurifonctionnel p. 263
2 Comment prendre en compte l'environnement pour concevoir un projet intégré ? Exemple de l'écoquartier des Brichères à Auxerre p. 268
3 Le système de gestion des eaux pluviales du Parc technologique de la Porte des Alpes p. 272
4 Création d'un parc urbain pour retenir et traiter les eaux pluviales p. 279
5 Restauration d'une zone humide dans l'optique de la gestion des eaux pluviales : la zone humide des Jonchets-CA Montbéliard (21) p. 283
6 EPA Sénart - Gestion des eaux pluviales de l'Ecopôle (ZAC des portes de Sénart et ZAC du Charme) p. 286

6 AMÉLIORATION DU CADRE DE VIE ET DÉVELOPPEMENT DES USAGES LIÉS À L'EAU 292

1 Les tas dans les trous : recréation de zones humides p. 293
2 Grand Parc Miribel Jonage p. 299
3 Aménagement des berges de la promenade bleue des Hauts-de-Seine p. 305
4 Travaux d'aménagement d'un espace naturel sur la Vaige à Sablé-sur-Sarthe p. 312

7 PROTECTION/RESTAURATION DES MILIEUX (HABITATS) ET DÉVELOPPEMENT DE LA BIODIVERSITÉ 316

1 Restauration de la zone humide de Lucy p. 317
2 Création d'écosystèmes sur l'estuaire de la Seine comme mesures compensatoires p. 322
3 Une méthode originale pour déterminer la Trame Verte & Bleue de Limoges Métropole p. 328
4 Restauration d'une zone humide d'altitude : restauration des milieux humides de Val Thorens p. 333
5 Le génie végétal en rivière face aux dégâts de ragondins p. 338
6 Restauration hydraulique des tourbières p. 342

LEXIQUE 348

BIBLIOGRAPHIE 350

INTRODUCTION

Depuis 2000, la Directive Cadre sur l'Eau nous invite à agir pour la restauration du bon fonctionnement des milieux aquatiques afin d'atteindre leur bon état. Les SDAGE adoptés en 2009, ainsi que les programmes de mesures associés, montrent que des actions visant à utiliser les fonctions des écosystèmes comme un outil pour améliorer leur état sont aujourd'hui de plus en plus souvent mises en avant.

Au-delà de leur ambition en terme d'écologie et de biodiversité, ces actions peuvent en effet permettre de contribuer à des objectifs sociétaux, comme la prévention ou le traitement des pollutions, la gestion du risque d'inondation ou encore la préservation de la ressource en eau.

Dans la perspective d'accompagner les différentes phases de mise en œuvre de projets relevant de l'ingénierie écologique, cet ouvrage est construit en quatre chapitres :

- *Le premier chapitre vise à clarifier les principaux concepts associés aux écosystèmes aquatiques et à leur restauration en essayant en particulier de préciser la place qu'y occupe l'ingénierie écologique.*
- *Le second chapitre explicite la façon dont l'ingénierie écologique peut être mise en œuvre pour répondre à différentes préoccupations des maîtres d'ouvrage.*
- *Le troisième chapitre analyse les freins et les leviers à son développement.*
- *Enfin le quatrième chapitre illustre les trois chapitres précédents par des retours d'expériences variés et représentatifs.*

Sans prétention d'exhaustivité ni de guide technique détaillé, cet ouvrage doit ainsi permettre d'apporter un premier niveau d'informations à tous les acteurs potentiellement impliqués dans cette stratégie d'approche de l'ingénierie territoriale au service des milieux aquatiques.

Chapitre 1

Principes, fondements et historique de l'ingénierie écologique pour les milieux aquatiques

1 QUELQUES CONCEPTS CLÉS POUR BIEN COMPRENDRE LA SUITE 14

2 EVOLUTION DANS LA GESTION DES MILIEUX AQUATIQUES 21

3 L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE : UN CONCEPT « À LA MODE » ? 24

4 QUELLE DÉFINITION RETENIR ? 25

5 CONCLUSION DU CHAPITRE 1 29

1

QUELQUES CONCEPTS CLÉS POUR BIEN COMPRENDRE LA SUITE

1 Milieu aquatique, écosystème aquatique, hydrosystème et masse d'eau

En toute rigueur les deux mots **« milieu aquatique »** et **« écosystème aquatique »** (ou son synonyme **« hydrosystème »**) ne sont pas équivalents. Un **« écosystème »** est en effet constitué d'éléments non vivants (le biotope) et d'organismes vivants (la biocénose), alors que le terme **« milieu »** fait surtout référence au biotope. En pratique, les deux mots sont le plus souvent utilisés de façon équivalente dans l'ouvrage et désignent généralement l'écosystème aquatique dans sa totalité.

Un écosystème aquatique est d'abord un « système », c'est-à-dire un ensemble d'éléments en interactions regroupés sur un territoire géographique identifiable (c'est-à-dire possédant une limite).

Dans le langage de la DCE (Directive Cadre sur l'Eau), le terme **« masse d'eau »** désigne une partie d'un écosystème aquatique qui est réputée être homogène en termes d'usages et de qualité.

Il existe différents types d'écosystèmes aquatiques (étangs, lacs, zones humides, estuaires, rivières, nappes souterraines, mer, etc.). Les écosystèmes continentaux sont généralement regroupés en trois grands types selon que les eaux sont stagnantes, courantes ou souterraines[1].

Les limites des écosystèmes sont plus ou moins faciles à définir, elles sont poreuses. En effet un écosystème n'est jamais totalement isolé et il échange lui-même avec son environnement. La définition des limites de l'écosystème contient donc toujours une certaine part d'arbitraire même si elle doit reposer sur la recherche d'une véritable cohérence écologique, une certaine homogénéité de fonctionnement. Les limites des hydrosystèmes s'étendent généralement bien au-delà de la zone dans laquelle l'eau liquide est présente en permanence sous une forme libre et visible.

Enfin, un écosystème est un système complexe, c'est-à-dire constitué d'un très grand nombre d'éléments en interactions et caractérisé par le fait que les relations entre les éléments déterminent tout autant son fonctionnement que les éléments constitutifs eux-mêmes.

La plupart des écosystèmes aquatiques ont été aménagés ou modifiés par l'homme qui constitue de fait un élément déterminant de l'écosystème. On parle parfois « d'anthropo-hydro-système » pour désigner un écosystème aquatique intégrant la composante humaine.

[1] *Voir les dossiers du CNRS : http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/ecosys/defEcosAqu.html*

2 Fonctionnement écologique

Le terme de **fonctionnement** pour un écosystème (on parle parfois de fonctionnalité) désigne le résultat de la réalisation des différentes fonctions **écologiques** (d'après Fustec in RMC, 2007). Le fonctionnement d'un écosystème peut être considéré comme l'expression de la résultante des réalisations de l'ensemble des fonctions à l'œuvre dans l'écosystème (compte tenu de leur existence, de leur intensité, de leur localisation, de leurs interactions, etc.). Cette définition intègre l'idée que le fonctionnement est l'expression d'un ou plusieurs potentiels.
Certaines des fonctions rendues par l'écosystème peuvent être utiles à l'homme. Par exemple la minéralisation de la matière organique par les organismes actifs dans l'écosystème permet de jouer un rôle épurateur et d'améliorer la qualité physico-chimique de l'eau. Tous les usages humains du milieu bénéficient donc directement de cette fonction.

3 Restauration, réhabilitation, réaffectation (ou création) d'écosystème

Le terme de **restauration écologique** est entré dans le langage courant pour décrire des opérations réalisées sur l'environnement dans le but de réparer des dommages, des dysfonctionnements ou d'améliorer l'existant.
Cet emploi constitue un abus de langage pour beaucoup d'experts de l'écologie, car il ne relève pas de la définition propre de la restauration écologique (SER, 2004). Il reste actuellement une facilité de langage entre acteurs, accessible pour le grand public. Il est souvent utilisé dans ce sens générique dans cet ouvrage.
Selon les définitions de la SER, la différence entre restauration, réhabilitation et réaffectation vient de la **trajectoire** et de la **référence** que l'on prend comme objectif de l'intervention (voir la définition de ces mots plus bas).
Pour la **réaffectation** (ou création), l'écosystème préexistant n'est pas pris comme référence (car il est inconnu ou impossible à retrouver). Le but poursuivi est de créer de nouvelles fonctions écologiques ou de nouveaux services écosystémiques qui sont jugés pertinents par les parties prenantes du projet (exemples : ballastière d'Yville sur Seine, ilôt aux oiseaux de l'estuaire de la Seine) (voir fiche étude de cas). Les fonctions ou services écologiques visés peuvent être choisis au regard du site de restauration lui-même ou à une échelle plus large (bassin versant, estuaire, baie, etc.).
Pour la **réhabilitation**, on choisit comme référence un état connu et préexistant de l'écosystème, même si la trajectoire naturelle est inconnue ou impossible à reconstituer. On cherche uniquement à retrouver les principales fonctions écologiques de l'état de référence sans nécessairement utiliser la trajectoire tendancielle de l'écosystème de référence (exemple : le méandre artificiel créé par le Grand Port Maritime du Havre, la restauration de la Fontenelle) (voir fiche étude de cas).
Pour la **restauration**, c'est l'écosystème préexistant qui est pris comme référence dans toutes ses dimensions, y compris ses dimensions temporelles (structure, composition, dynamique). La trajectoire à suivre pour un retour à un état antérieur est considérée comme connue et réalisable. L'objectif est de permettre à l'écosystème de recommencer à évoluer comme s'il n'avait jamais été perturbé [2].

4 Etat, évolution et trajectoire

Un écosystème évolue spontanément, en permanence. Les variations peuvent être cycliques, événementielles ou tendancielles.
Les deux cycles naturels les plus classiques sont les cycles journaliers et annuels. Les facteurs du biotope les plus affectés par des variations journalières sont la luminosité, la température, la quantité d'oxygène dissous et dans certains cas (rivières alimentées par des fontes de neige ou de glace par exemple) le débit. Les variations saisonnières touchent pratiquement tous les éléments du biotope : température, débit, turbidité, disponibilité des nutriments, etc. Ces deux cycles ont des effets majeurs sur la biocénose : présence et activités des espèces, développement de la végétation, etc. Il est donc très difficile de caractériser **l'état d'un écosystème,** puisqu'il s'agit d'un système dynamique et que son état dépend fortement du moment où il est évalué.

[2] *La restauration est définie par (Aronson et al., 1995) comme « la transformation intentionnelle d'un milieu pour y rétablir l'écosystème considéré comme indigène et historique. Le but de cette intervention est de revenir à la structure, la diversité et la dynamique de cet écosystème ». Le but est de rétablir l'intégrité biotique préexistante en termes de compositions spécifiques et de structure des communautés (SER, 2004).*

Même sans changement notable des sollicitations externes (changement climatique par exemple), un écosystème aquatique évolue également de façon tendancielle. Par exemple, les lacs se comblent et se transforment petit à petit en zones humides puis en plaines alluviales ; les estuaires se comblent progressivement pour évoluer vers des deltas ; le cycle trophique s'intensifie et les milieux aquatiques ont une tendance à s'eutrophiser jusqu'à ce qu'un facteur écologique (la température, l'ensoleillement, la disponibilité en nutriments, etc.) ne limite cette évolution.

Cette transformation tendancielle dont l'échelle de temps est généralement longue (ordre de grandeur de quelques centaines à quelques dizaines de milliers d'années) peut être brutalement accélérée par un événement « catastrophique » : période d'étiage sévère, crue extrême, arrivée d'une espèce nouvelle, etc., qui change son état d'équilibre et le fait passer d'une zone de stabilité à une autre (voir § suivant et **FIGURES 1 ET 2**). On parle de **trajectoire d'un écosystème** pour désigner ce chemin évolutif au cours du temps (cf. **FIGURE 1, PARTIE GAUCHE**).

Les actions anthropiques peuvent agir sur chacune de ces variations : le fonctionnement des barrages peut modifier le cycle journalier des débits tout autant que le régime saisonnier d'une rivière. Des apports en nutriments, provenant de l'agriculture ou des stations d'épuration par exemple, peuvent accélérer brutalement l'eutrophisation du milieu, des digues peuvent déconnecter des zones alluviales du lit de la rivière, etc.

La trajectoire d'un écosystème intègre son histoire et en particulier les contraintes et les forçages anthropiques qu'il a subis. Les trajectoires écologiques permettent également de se projeter dans le futur (Barnaud et Fustec, 2007). La **FIGURE 1 (PARTIE DROITE)** illustre les systèmes cibles (originel, intermédiaire, de substitution) possibles ainsi que les options pour y parvenir (restauration, réhabilitation, remplacement, abandon). Le positionnement de ces alternatives montre que la restauration écologique *sensus stricto* est très souvent illusoire ou trop difficile à retrouver, le système « originel » étant la plupart du temps méconnu (composition, structure, fonctionnement).

FONCTIONNEMENT DE L'ÉCOSYSTÈME EN FONCTION DU TEMPS ET DES PERTURBATIONS

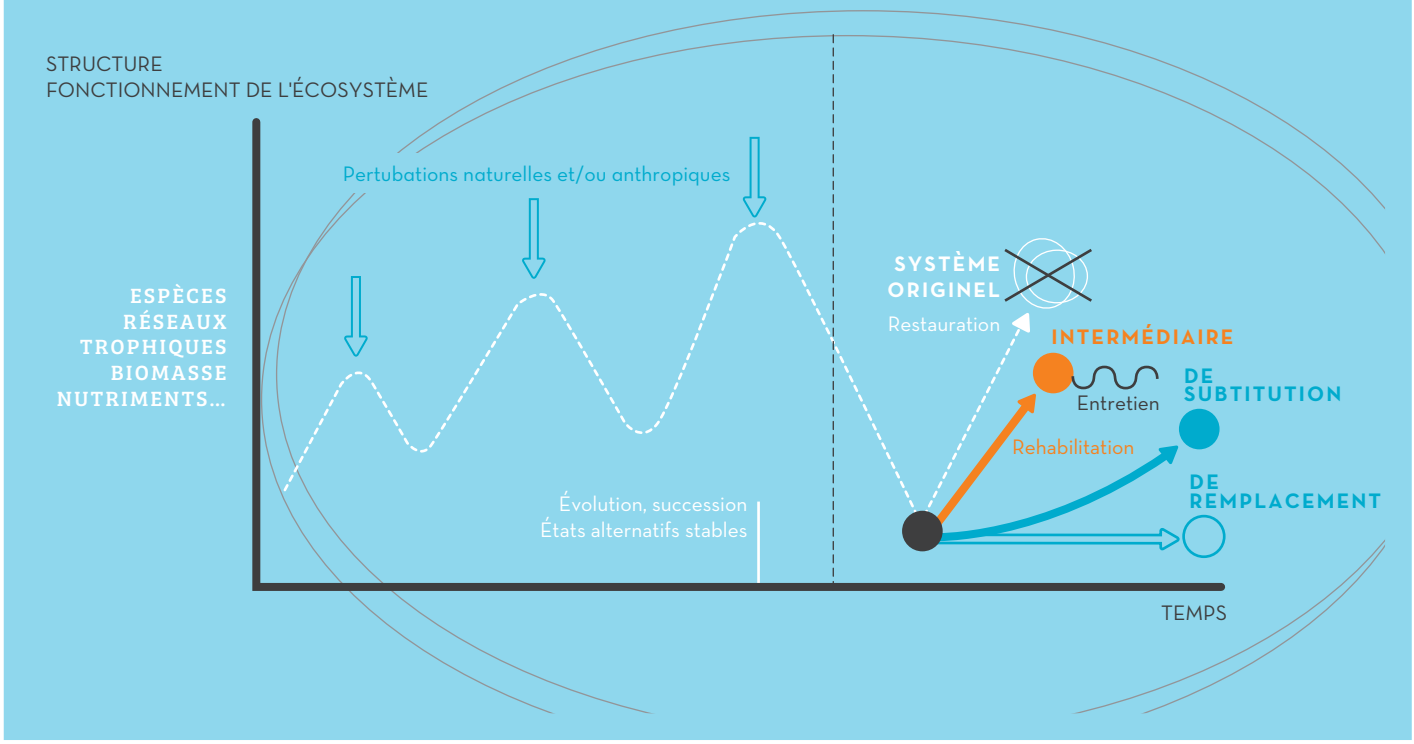


FIGURE 1

BRADSHAW, 1984 ; DOBSON *ET AL.*, 1997

5 Equilibre, stabilité et résilience

Attention : Il s'agit ici de mots pièges qui peuvent être utilisés de façons très différentes, même dans des contextes voisins.

En théorie des systèmes, un système est dit en **équilibre** si son état ou sa trajectoire (dans le cas d'un équilibre dynamique) n'évolue que de façon lente en l'absence de perturbation extérieure. Ceci signifie que les boucles de rétroaction qui sont en place entre ses éléments sont suffisamment robustes pour assurer son équilibre. La **stabilité** mesure pour sa part la capacité du système à maintenir cet équilibre lorsque le système subit une perturbation extérieure.

On image souvent ces concepts en représentant le système par un « paysage » constitué de creux et de bosses dans lequel se déplace un ballon. Si le ballon est immobile, on dit que le système est en **équilibre** (FIGURE 2) :

- Si le ballon est immobile au fond d'un trou profond, le système est dans un **équilibre stable** : même si on déplace le ballon, celui-ci reviendra à sa position d'origine après quelques oscillations.
- Si le ballon est placé en haut d'une bosse, la stabilité du système sera très faible et la moindre perturbation mettra le ballon en mouvement jusqu'à ce qu'il s'immobilise dans un nouveau creux et que le système retrouve un nouvel équilibre.

Il existe deux types de perturbations : celles qui affectent le ballon (on le déséquilibre par exemple en le poussant, mais le paysage reste le même) ; celles qui affectent le «paysage» (on abaisse un «col» ou on remonte le fond d'un creux et donc on modifie la stabilité du système, ce qui peut également amener à rompre l'équilibre du système).

L'utilisation de ces concepts en écologie est délicate. Comme indiqué dans le paragraphe précédent, un écosystème est un système dynamique en permanente évolution. L'image du ballon est donc très simplificatrice, car ce n'est pas l'état de l'écosystème qui est stable ou instable, mais sa trajectoire.

Par ailleurs, utiliser ces définitions pour dire qu'un écosystème est en équilibre, ou qu'il est stable, ne fournit aucune information sur sa qualité (biodiversité, productivité, etc.). Un écosystème totalement pollué et n'abritant plus aucune vie, est dans un équilibre d'autant plus stable que sa capacité à se régénérer est faible !

Dans la pratique, en écologie, on réserve donc en général l'adjectif « équilibré » pour parler, non pas de l'écosystème, mais de son fonctionnement. Dire qu'un écosystème a un **fonctionnement équilibré** signifie alors que cet écosystème a atteint un stade de développement tel que les boucles de rétroactions entre ses éléments constitutifs sont suffisantes, en nombre et en qualité, pour garantir à sa biocénose des conditions qui vont rester favorables sur la durée. Ceci ne signifie pas que l'écosystème n'évolue pas (par exemple certaines espèces peuvent disparaître et d'autres apparaître), mais signifie que l'écosystème évolue sur une trajectoire stable. On parle parfois de **climax** pour qualifier un tel écosystème. C'est dans ce sens que nous utiliserons le mot dans l'ouvrage.

Dans la pratique, en écologie, on réserve donc en général l'adjectif « équilibré » pour parler, non pas de l'écosystème, mais de son fonctionnement.

La **résilience** désigne pour sa part la capacité de l'écosystème à s'adapter à des perturbations majeures, qu'elles soient naturelles (très forte crue) ou anthropiques (travaux) (Hobbs, 1999 ; Walker, 1999).

- Un écosystème résilient va rapidement retrouver un fonctionnement équilibré après une perturbation. Deux cas de figure sont possibles :
  - Ce nouvel état peut être très proche de l'état préalable à la perturbation si le système était dans un état **stable** (on ne change pas de zone de stabilité).
  - Si la perturbation est trop importante par rapport à la stabilité de l'écosystème, elle peut le faire bifurquer vers un nouvel état on parle alors parfois de **stabilité alternative**. Un exemple intéressant de stabilité alternative est constitué par l'étang de Berre qui, selon le développement du cordon lagunaire peut osciller entre des états de stabilité très différents : depuis un lac d'eau douce jusqu'à une baie marine.
- Si l'écosystème n'est pas résilient, il aura beaucoup de difficultés à retrouver un fonctionnement équilibré, et s'il en retrouve un ce sera généralement un fonctionnement plus fragile le conduisant vers un état appauvri (moins de biodiversité ou moins de productivité par exemple).

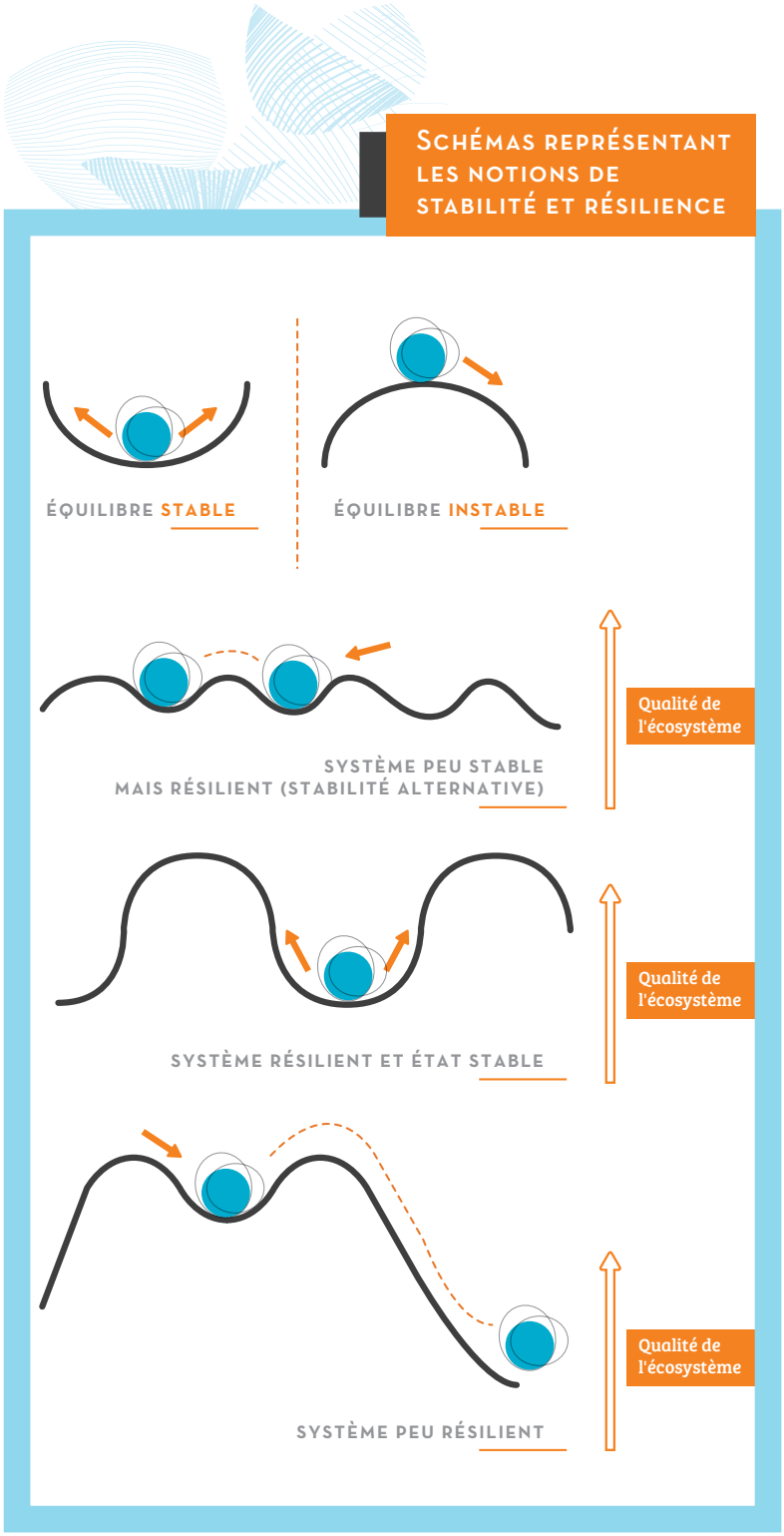


FIGURE 2 B. CHOCAT, 2013

Les figures suivantes illustrent les notions de stabilité et de résilience.
Ces notions de stabilité et de résilience sont très utiles lors des réflexions sur la restauration des écosystèmes.

> Un écosystème est un système complexe et multidimensionnel en évolution constante

6 Système de référence

Un écosystème est un système complexe et multidimensionnel en évolution constante (voir l'introduction du chapitre 2 de cet ouvrage). Définir un **état de référence** ou un **fonctionnement de référence**, qui correspondrait à un **bon état écologique** et dans lequel le système serait en **équilibre** et vers lequel on souhaiterait le faire tendre, est donc chose impossible dans l'absolu. Toute opération de restauration, de réhabilitation ou de réaffectation doit cependant se donner un objectif. Ceci impose l'utilisation d'un système de référence permettant de préciser cet objectif et de mesurer l'écart entre l'objectif et le fonctionnement réel de l'écosystème.
Pour préciser les différentes façons de construire pratiquement ce système de référence, il faut définir quelques notions.

1. RÉFÉRENCE D'OBJECTIF

La référence d'objectif est supposée permettre de décrire l'idéal à atteindre. La référence d'objectif peut aider à déterminer les critères de succès (standards de performance) du projet (Clewell *et al.*, 2004). Elle constitue une sorte de modèle, d'exemple à suivre pour la planification du projet (SER, 2004). La référence d'objectif peut être définie à partir de mesures sur des sites existants et à proximité du site à restaurer (site restauré ou site naturel). Elle peut aussi être construite à partir des connaissances scientifiques (à dire d'expert ou modélisée de façon optimale) (Clewell *et al.*, 2004 ; Morandi et Piégay, 2012). La référence sera d'autant meilleure qu'elle s'appuiera sur plusieurs systèmes de référence et si nécessaire en utilisant plusieurs sources. Cette description de la référence permet de donner une base plus réaliste à la planification de la restauration (SER, 2004).

2. RÉFÉRENCE D'ÉCART

Certains auteurs proposent d'utiliser également la référence d'écart. Celle-ci est définie non pas par rapport à la situation que l'on souhaite atteindre mais par rapport à la situation d'où l'on part. Elle est utile pour situer l'évolution, les progrès déjà réalisés par l'écosystème, en comparant la situation (état ou fonctionnement de l'écosystème) en cours de restauration à un instant t, à une référence de départ, souvent l'état initial de l'écosystème dégradé.

La **FIGURE 3** illustre ces deux approches.

DÉFINITION DE LA RÉFÉRENCE POUR UN ÉCOSYSTÈME EN COURS DE RESTAURATION, UNE RÉFÉRENCE D'ÉCART ET/OU UNE RÉFÉRENCE D'OBJECTIF

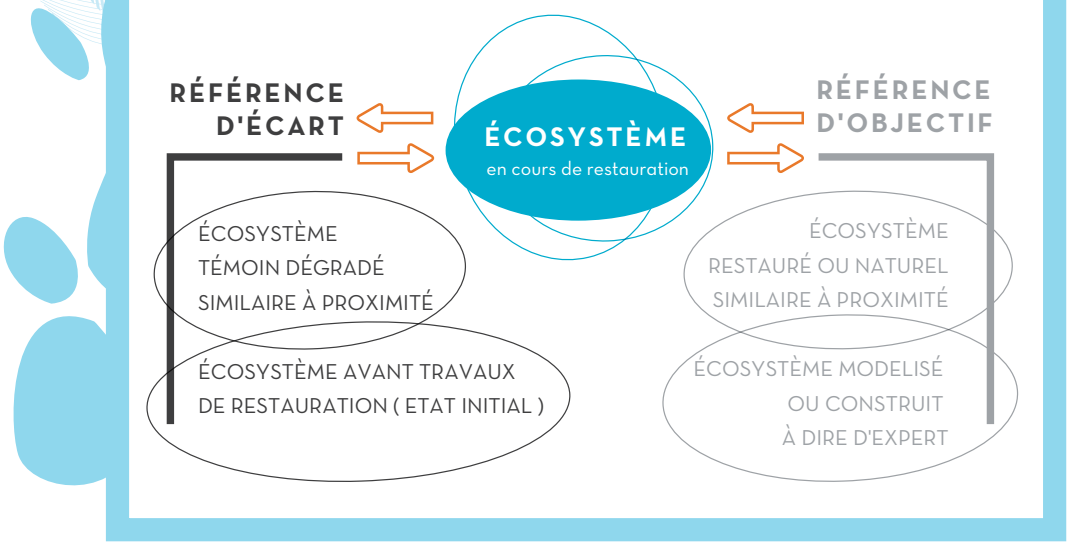


FIGURE 3 VAUDRY, 2012

Associer les usagers pour construire une référence d'objectif pour le futur : **« quel éco(anthropo)système voulons-nous ? »** est sans doute l'attitude la plus pragmatique à mettre en œuvre.

3. CHOIX DES RÉFÉRENCES

Dans le cas de projets de réhabilitation, il peut être préconisé (par exemple dans la DCE) de construire ou de choisir des références d'écart ou d'objectif basées sur des situations historiques, modélisées ou quasi vierges d'impact humains.

Du fait de l'évolution permanente des écosystèmes, les références historiques sont très difficiles à établir et n'ont finalement pas grand sens. De plus elles sont souvent mal adaptées à la réalité (notamment dans des contextes particuliers très aménagés comme les grands fleuves par exemple).

On constate souvent, dans la pratique, que les références d'objectif retenues sont des écosystèmes (ou composantes d'écosystèmes) qui coexistent à côté de celui à restaurer. Mais ce type de référence doit aussi être considéré avec beaucoup de précautions. D'un site à l'autre, au sein d'un même système (bassin versant, rivière, etc.), les conditions de fonctionnement d'un sous-écosystème (zone humide, méandre, etc.), qu'il s'agisse des conditions hydro-morpho-sédimentaires et physico-chimiques ou des usages impactant le site, peuvent varier sensiblement et impacter différemment la composante biologique résultante (par exemple : marnage, hydrodynamisme, salinité, etc., pour les estuaires). A moins d'avoir bien clarifié ces différences, ou de s'être retenu de fixer des objectifs trop précis (quantification d'espèces par exemple), il devient ensuite assez complexe d'expliquer, dans le détail, des résultats différents entre le système de référence et celui restauré.

Ainsi, dans la plupart des cas, les références sont « à construire », particulièrement si on souhaite donner une dimension anthropique à la restauration. Selon les connaissances, les moyens et les objectifs visés, cette construction peut se faire à dire d'experts et /ou par modélisation, en s'appuyant éventuellement sur des sites existants à proximité ou des exemples théoriques. Associer les usagers pour construire une référence d'objectif pour le futur : « quel éco(anthropo)système voulons-nous ? » est sans doute l'attitude la plus pragmatique à mettre en œuvre **(FIGURE 1, PARTIE DROITE)**.

7 Ingénierie écologique *versus* restauration des écosystèmes

L'ingénierie est par nature issue de l'intelligence humaine alors que l'écologie considère la nature comme un « en-soi » avec ses droits propres.

Utiliser une intervention humaine « intelligente » pour permettre à un écosystème de retrouver un fonctionnement « naturel » est donc une idée curieuse et le rapprochement des mots « ingénierie » et « écologie » frise l'oxymore.

L'ingénierie écologique peut-elle revendiquer, en même temps, d'être une « vraie » ingénierie et de travailler à la restauration des écosystèmes ? Et si oui à quelles conditions ?

Au-delà de cette considération philosophique, réfléchir à l'ingénierie écologique pose inévitablement la question de la prévisibilité du résultat. La prévisibilité est en effet une qualité essentielle d'un bon projet d'ingénierie. La restauration des écosystèmes reconnait et accepte pour sa part un développement imprévisible et vise des buts qui dépassent le pragmatisme strict et qui englobent la biodiversité, l'intégrité et la santé de l'écosystème.

L'ingénierie écologique peut-elle revendiquer, en même temps, d'être une « vraie » ingénierie et de travailler à la restauration des écosystèmes ? Et si oui à quelles conditions ?

C'est en particulier à ces questions que va s'attacher l'ouvrage.

2

EVOLUTION DANS LA GESTION DES MILIEUX AQUATIQUES

L'analyse rétrospective des évolutions de la politique de l'eau, au travers de la réglementation - lois sur l'eau de 1964, 1992 et 2006 - de la planification ou des financements des agences de l'eau, met en évidence un changement progressif des concepts et des pratiques dans la gestion des milieux aquatiques.

La première grande loi sur l'eau propose en 1964 une vision très anthropique (ou très « environnementale » au sens de Michel Serres) des milieux aquatiques. Cette vision correspond à l'esprit de l'époque : il faut protéger la nature, mais dans le but de préserver et de faciliter les usages que l'homme souhaite en faire.

Les agences financières de bassin, créées par cette loi, ont, comme leur nom l'indique, une vocation surtout financière. Leur but premier est de financer le développement rapide d'un parc de stations d'épuration traitant les rejets urbains et les rejets industriels et améliorant ainsi la qualité physico-chimique des eaux. Les grilles de qualité qu'elles utilisent correspondent toutes (sauf la grille dite « de qualité générale ») à des usages spécifiques (alimentation en eau, baignade, pêche, etc.).

Ce n'est qu'à partir des années 1980 que les agences de l'eau commencent à sortir de la stricte épuration des rejets (urbains et industriels) et à s'investir progressivement dans l'aménagement et la remise en valeur plus globale des milieux aquatiques. Pour la première fois, les redevances sont utilisées pour financer des actions qui ne sont pas en lien direct avec l'assiette principale de leur collecte, fondée sur la pollution urbaine et industrielle émise. Elles vont subventionner par exemple des actions d'aménagement sur les cours d'eau : maîtrise de l'érosion et/ou entretien des berges, aménagements piscicoles, mise en valeur des abords, etc. Des débats portent sur la légitimité de ces nouvelles interventions (sans contribution spécifique des secteurs d'activité à l'origine des dégradations qui les justifient) et sont bénéfiques à l'émergence de premiers échanges sur l'intérêt pour les agences de s'intéresser de façon plus directe aux écosystèmes. A cette époque, et jusqu'au 5ème programme d'intervention financier des agences de l'eau (1987 – 1991), il est cependant surtout question d'aménagement et de travaux d'entretien. La préservation des usages ou la protection des biens et des personnes constitue la motivation principale. L'approche écologique n'est pas encore de mise.

il ne s'agit plus de s'opposer à la nature mais de l'utiliser pour arriver à ses fins.

Dans le même temps, différents groupes de recherche, par exemple le PIREN Seine ou le PIREN Rhône, mettent en avant les impacts écologiques dus aux nombreux aménagements hydrauliques et affirment la nécessité de préserver les caractères fonctionnels des hydrosystèmes.

La prise de conscience que la qualité physico-chimique de l'eau ne constitue que l'un des aspects de la qualité d'un milieu aquatique se renforce. Les liens complexes, parfois synergiques, mais parfois antagonistes, entre qualité du milieu et valeur d'usage commencent à être mieux compris. Ainsi, dès 1987, le PIREN Rhône évoque la nécessité de ménager un « espace de réversibilité » (Amoros *et al.*, 1987), sur lequel peut s'exercer une dynamique fluviale. L'objectif est d'éviter les dysfonctionnements hydrauliques et sédimentologiques et de favoriser une dynamique écologique importante, garante de la richesse et de la diversité des milieux aquatiques.

La loi sur l'eau de 1992 va concrétiser ce changement de paradigme en affirmant que « l'eau fait partie du patrimoine commun de la nation et que sa protection, sa mise en valeur [...] sont d'intérêt général ». Elle pose en particulier le principe d'un équilibre à rechercher entre préservation écologique et valorisation anthropique.

De façon plus pratique, elle développe le concept de « gestion équilibrée » qui vise à assurer notamment :

- la préservation des écosystèmes aquatiques, des sites et des zones humides [...] ;
- la protection contre toute pollution et la restauration de la qualité des eaux [...] ;
- le développement et la protection de la ressource en eau ;
- la valorisation de l'eau comme ressource économique [...].

Si le développement des usages reste la raison principale des actions, celles-ci ne doivent plus être conduites au détriment du milieu. Cela va se traduire à partir des 6èmes programmes (1992-1998), par des programmes d'interventions où l'écologie et les notions de fonctionnement et d'autonomie du système prennent une place importante. Les zones humides apparaissent dans le programme de l'agence de l'eau Seine-Normandie. En Rhin-Meuse, le début des années 1990 marque la mise en place de programmes « raisonnés » d'entretien des rivières, intégrant des études préalables et la gestion sélective de la végétation. Le SDAGE Adour-Garonne met en avant que « Les écosystèmes aquatiques participent d'autant mieux au maintien des équilibres hydrodynamiques et à la régulation de l'écoulement des eaux qu'ils sont peu perturbés. (...) ». Il convient donc de restaurer les phénomènes naturels de régulation et la dynamique fluviale, de manière à « redonner aux milieux aquatiques la capacité de fonctionner normalement et de se régénérer (...) ».

A partir des SDAGE de 1996 et des 7èmes programmes (1997-2001), il n'est plus question d'aménagement mais de préservation des milieux aquatiques et humides. Les travaux subventionnés relèvent de la réhabilitation. C'est à cette époque par exemple que les techniques faisant appel au génie végétal (tunage, fascinage, etc.) se substituent aux travaux d'enrochement pour lutter contre l'érosion des berges. C'est aussi à cette époque qu'apparaît dans les SDAGE la notion de « fuseau de mobilité » (Rhin Meuse) ou encore « d'espace de mobilité » (RMC).

Les réflexions associées à la mise en place de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) et qui vont aboutir à la loi sur l'eau de 2006 marquent une nouvelle étape. Il ne s'agit plus seulement de maintenir une approche équilibrée entre usages anthropiques et préservation des milieux. L'objectif principal consiste désormais à remettre l'ensemble des milieux aquatiques dans leur « bon état » écologique, c'est-à-dire celui qu'ils devraient avoir si l'homme ne les avaient pas perturbés. La préservation des milieux doit primer sur les usages que l'homme souhaite en faire. Il est néanmoins nécessaire de composer avec la réali-

té économique et sociale. La DCE introduit donc également la notion de « bon potentiel » pour des milieux aquatiques qualifiés de « fortement modifiés » par les aménagements anthropiques. Si cette notion est encore floue, elle indique néanmoins la nécessité de la prise en compte d'activités humaines qui ne peuvent être remises en cause à court terme et avec lesquelles il faut donc essayer de composer. Elle reconnait ainsi la place de l'homme et des usages et activités dans les hydrosystèmes. Certains chercheurs développent le concept « d'anthropo-hydro-systèmes ». Ainsi, émergent de nouvelles notions pour la protection et l'aménagement des milieux naturels qui intègrent les fonctions des écosystèmes mais également les aspects sociaux et économiques.

Dans le même temps les chercheurs ne sont pas inactifs et ils commencent à mieux comprendre et à mieux savoir mobiliser les capacités d'auto-organisation et d'auto-réparation des systèmes complexes que constituent les milieux aquatiques. Reprenant des idées très anciennes (on peut citer F.Bacon à la fin du XVIème siècle), il ne s'agit plus de s'opposer à la nature mais de l'utiliser pour arriver à ses fins.

Les SDAGE adoptés en 2009 font désormais tous référence à la nécessité de maintenir les fonctions des écosystèmes et la problématique s'étend largement en dehors du lit mineur des rivières : préservation et maintien des fonctions des zones humides, des zones d'expansion de crue, ou encore utilisation de zones tampon clairement explicitées. L'idée principale est que si les fonctions écologiques sont correctement assurées, alors le milieu sera en bon état et permettra certains usages. Le fonctionnement écologique du milieu aquatique devient central dans la problématique.

Il ne s'agit donc pas de privilégier la nature au détriment de l'homme, mais bien de travailler à rendre compatibles usages et préservation des écosystèmes

Au cours des trente dernières années, la logique de gestion des milieux aquatiques a donc évolué dans une double direction :

- **En terme d'objectifs :** il ne s'agit plus d'aménager les milieux aquatiques au seul bénéfice de l'homme, mais de préserver ou de réhabiliter au mieux leur fonctionnement écologique, en intégrant l'homme comme une composante parmi les autres de l'hydrosystème ;
- **En termes de moyens :** il ne s'agit plus de viser une maîtrise complète des écosystèmes mais de développer une logique d'aménagement utilisant, avec sa part d'obscurité, la nature elle-même comme agent et levier d'action.

L'idée principale est que ces deux aspects ne s'opposent pas mais se renforcent mutuellement.

Il ne s'agit donc pas de privilégier la nature au détriment de l'homme, mais bien de travailler à rendre compatibles usages et préservation des écosystèmes, en se donnant la liberté de placer le curseur suivant les enjeux et milieux en cause.

3

L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE : UN CONCEPT « À LA MODE » ?

L'ingénierie écologique constitue l'un des outils soutenant cette évolution. Il s'agit d'un concept qui fait aujourd'hui l'objet d'un véritable engouement au sein de la sphère scientifique. Les programmes de recherche, les colloques et les journées d'échange n'ont d'ailleurs pas cessé de se multiplier ces dernières années.

Le programme interdisciplinaire « IngEcoTech » porté par le CNRS et Irstea (ex-CEMAGREF) (2007-2012), le congrès international sur l'ingénierie écologique de Paris (GAIE, 2009), le colloque « L'eau, ingénierie d'un continuum » (GAIE, décembre 2011) ou encore le colloque « Ingénierie écologique : action par et/ou pour le vivant ? » organisé par Irstea (juin 2012) sont autant d'évènements dont l'organisation traduit à elle seule l'intérêt porté aux questions d'ingénierie écologique et les besoins de partage sur des concepts et des expériences dans le domaine.

LE JOURNAL DU CNRS DE MAI-JUIN 2012 CONSACRE UNE LARGE PART À L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE, TOUT COMME UN COLLOQUE SPÉCIFIQUE D'IRSTEA EN JUIN 2012

FIGURE 4

Ce thème dépasse largement la sphère académique puisque l'ingénierie écologique représente un moyen d'action. C'est le cas, notamment, dans le cadre de la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE), ou bien, dans le cadre de la mise en œuvre de la doctrine « Eviter-Réduire-Compenser » (ERC), relative notamment aux mesures compensatoires et préconisée par le ministère de l'écologie (juin 2012).

Depuis le début des années 2010, les professionnels se structurent et œuvrent pour la reconnaissance de bonnes pratiques et le développement de la filière, notamment via :

- la création d'une Union des Professionnels du Génie Ecologique (UPGE) et la publication fin 2012 de la norme AFNOR NF X10-900 sur « Génie Ecologique - Méthodologie de conduite de projet appliqué à la préservation et au développement des habitats naturels - Zones humides et cours d'eau » ;
- l'émergence de pôles de compétitivité en partie dédiés à cette thématique ;
- le projet de création de « Centres de Coordination, d'Expérimentation et d'Application du Génie Ecologique » (CCEAGE) en régions.

Ces actions font partie d'un plan d'action national porté par le ministère en charge de l'écologie pour développer la filière du « génie écologique ».

Devant cet engouement, l'un des enjeux est d'éviter aussi bien les « monopoles » que les actions se revendiquant de l'ingénierie écologique sans en appliquer les principes de base.

Pour cela, il paraît nécessaire de clarifier ce qu'est réellement l'ingénierie écologique.

4

QUELLE DÉFINITION RETENIR ?

1 Des définitions multiples

La littérature scientifique présente plusieurs définitions de l'ingénierie écologique, évoluant avec le temps et variant selon les auteurs.

Howard T. Odum en 1962 définit l'ingénierie écologique comme « une manipulation par l'Homme de son environnement, en ayant recours à de faibles quantités d'énergie supplémentaires pour contrôler des systèmes ; le principal flux d'énergie provient de sources naturelles. » (Odum, 1962). Cette définition met en avant le but stratégique de l'ingénierie écologique de maintenir, voire de favoriser les processus naturels avec un minimum d'intervention humaine.

Pour Mitsch et Jorgenson en 1971, l'ingénierie écologique est une « conception de l'écologie où l'Homme et la nature échangent des services qui leur sont mutuellement bénéfiques ». En 2003, Mitsch replace les écosystèmes au cœur de la précédente définition. Il décrit l'ingénierie écologique comme un « concept de soutien des écosystèmes où sont intégrés la société humaine et l'environnement naturel pour le bénéfice de ces deux parties » (Mitsch *et al.*, 2003). Cette définition intègre alors la notion de réciprocité entre le fonctionnement des écosystèmes et les bénéfices que l'homme et les milieux peuvent en retirer.

En 1993, Straskraba développe le terme d'écotechnologie, l'ingénierie écologique n'étant pour lui pas limitée à la création, ni à la restauration des écosystèmes. L'ingénierie écologique trouve alors d'autres champs d'application que celui de la stricte restauration des milieux perturbés : on peut utiliser des processus naturels à d'autres fins que le seul maintien du fonctionnement de l'écosystème, par exemple pour remplir un usage anthropique (cas par exemple des zones de rejets végétalisées).

En France, Gosselin (2008) amène une distinction entre un aspect « appliqué » et un aspect « scientifique » de l'ingénierie écologique. L'aspect « appliqué » concerne un projet (conception, mise en œuvre et suivi) par la manipulation de composantes écologiques. Elle concerne la réalisation d'un aménagement, d'un plan de gestion apportant un bénéfice pour la société et également pour l'environnement. L'aspect « scientifique » a pour objet de développer les outils, méthodes et concepts pour aider à la mise en œuvre de l'ingénierie écologique appliquée.

Enfin, le Groupe des Acteurs de l'Ingénierie Ecologique présente l'ingénierie écologique sous deux facettes (GAIE, 2010) :

- la gestion des milieux et la conception d'aménagements durables, adaptatifs, multifonctionnels, basés sur les mécanismes qui gouvernent les systèmes écologiques ;
- une discipline spécifique des sciences écologiques qui interagit avec les sciences humaines et sociales et les sciences de l'ingénieur.

Sur ces fondements, le GAIE explique également les objectifs que peut remplir l'ingénierie écologique (cf. **FIGURE 5**).

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE ET DE SES OBJECTIFS

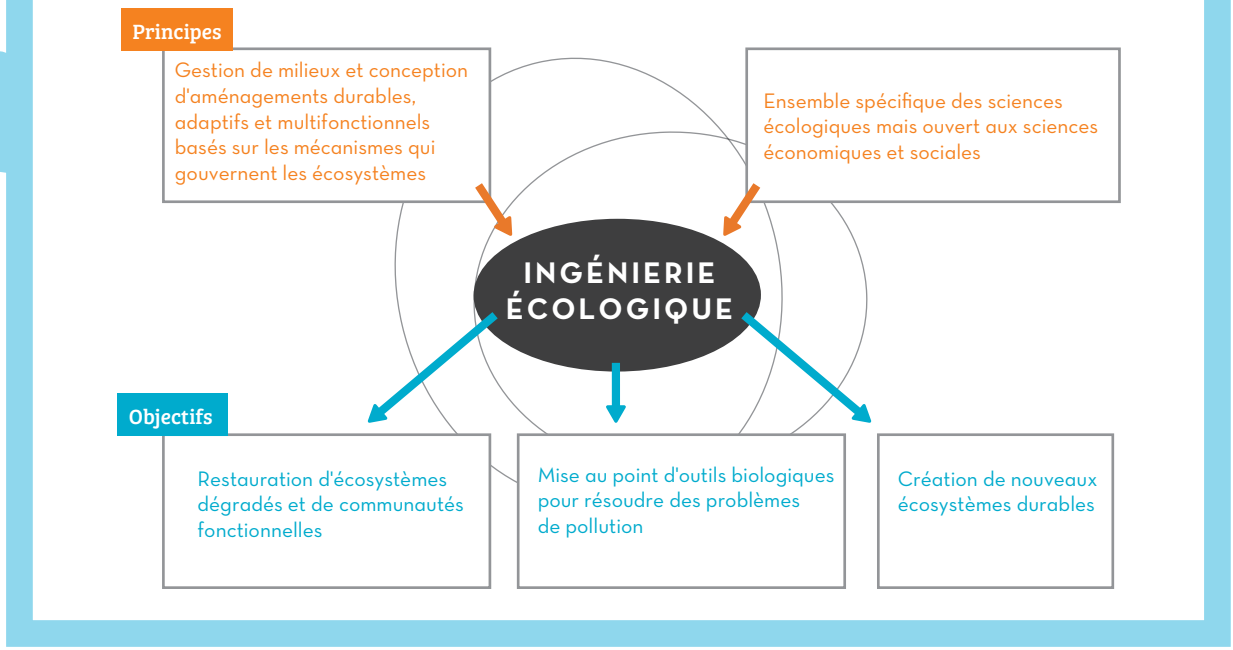


FIGURE 5 GAIÉ, 2011

Une des définitions les plus abouties et complète est celle dressée par le Manifeste de la recherche pour l'ingénierie écologique (CNRS et Cemagref, 2010) : « L'ingénierie écologique désigne les savoirs scientifiques et les pratiques, y compris empiriques, mobilisables pour la gestion de milieux et de ressources, la conception, la réalisation et le suivi d'aménagements ou d'équipements inspirés de, ou basés sur les mécanismes qui gouvernent les systèmes écologiques. Elle fait appel à la manipulation, le plus souvent in situ, parfois en conditions contrôlées, de populations, de communautés ou d'écosystèmes, au pilotage de dynamiques naturelles et à l'évaluation de leurs effets désirables ou indésirables. C'est une ingénierie centrée sur le vivant envisagé comme moyen ou comme objectif de l'action. »

Un groupe de chercheurs d'Irstea s'est récemment interrogé sur le(s) champ(s) disciplinaire(s) couvert(s) par l'ingénierie écologique et ses applications.

Une première question a été de savoir si l'ingénierie écologique relevait strictement de la mobilisation de phénomènes écologiques au profit d'objectifs écologiques (par le vivant et pour le vivant) et/ou s'il pouvait également s'agir de l'utilisation de phénomènes écologiques pour des objectifs anthropiques (par le vivant et pour l'homme).

Ces réflexions ont également permis d'aboutir à une distinction entre différents métiers (ou secteurs d'activités) susceptibles de mobiliser les concepts de l'ingénierie écologique.

Ces différents métiers sont ceux susceptibles d'intervenir à différentes étapes d'un projet d'ingénierie écologique (voir la **FIGURE 6**).

L'ingénierie écologique intègre les différentes phases de projet (diagnostic, conception de projet et de l'évaluation, réalisation, suivi-interprétation, gestion, rétroaction), et ne doit pas se limiter à la seule phase d'intervention, ni de conception. C'est, entre autre, le respect de la réalisation de ces étapes de gestion d'un projet dans les règles de l'art qui placera un projet dans le cadre de l'ingénierie écologique.

Mais le monde scientifique ne saurait à lui seul qualifier l'ingénierie écologique. Le recueil des visions d'autres acteurs s'avère important pour compléter et enrichir la définition.

LES DIFFÉRENTES ÉTAPES D'UN PROJET D'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE ET LES MÉTIERS MOBILISÉS.

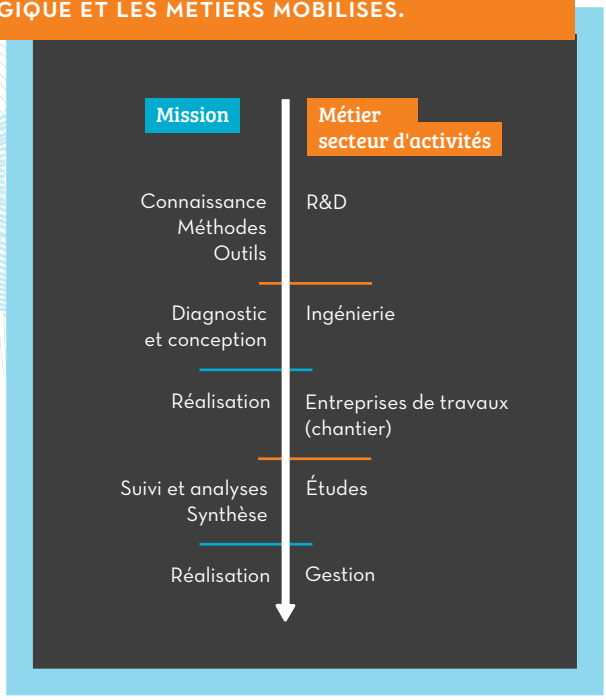


FIGURE 6

En 2011, le groupe de travail en charge de cet ouvrage a donc interrogé des représentants de services de l'Etat, de collectivités, d'opérateurs, d'entreprises, etc., sur leur façon de définir l'ingénierie écologique.

Tous les acteurs interrogés s'accordent sur le fait que le vivant et les fonctionnalités écologiques sont au cœur de la définition. Plusieurs notions complémentaires à celles présentées ci-dessus apparaissent, telles que :

- la nécessité d'une vision systémique qui inclut : i) le besoin de prendre en compte les différentes dimensions temporelles (notion de « durabilité » du projet, de trajectoire d'évolution du système, etc.) et spatiales (territoire pertinent, emboitement d'échelles), ii) les interactions entre fonctionnement écologique et usages ;
- la nécessité de travailler en équipe pluridisciplinaire et plurisectorielle ;
- la nécessité d'accepter une part d'incertitude sur le résultat d'un projet d'ingénierie écologique, notamment en raison du manque de références documentées et du caractère aléatoire de l'évolution du vivant ; cette nécessité implique celle du suivi ;
- la confirmation de la diversité des champs d'applications qui couvrent l'ensemble des étapes d'un projet d'aménagement, de restauration ou de gestion de milieux (de la conception à la gestion adaptative).

2 Définition retenue

Sur la base de ces éléments issus des sphères scientifique, technique et gestionnaire, nous proposons comme base commune de définition de l'ingénierie écologique une ingénierie répondant en même temps aux trois principes suivants :

- **Une finalité :** améliorer, restaurer, conserver, ne pas dégrader la qualité d'un écosystème.
- **Une démarche :** basée sur les principes de l'ingénierie, à savoir une approche technique rigoureuse dans la conception, la réalisation et l'évaluation des projets, basée sur des règles de l'art partagées et des connaissances scientifiques solides.
- **Des outils :** utilisant les processus naturels des écosystèmes.

Dans le cas des milieux aquatiques, l'ingénierie écologique doit en outre impérativement intégrer la notion de continuum aquatique, au sein et au-delà du territoire d'étude. Par exemple, dans le cas d'une rivière, il faut tenir compte des quatre dimensions de l'écosystème à traiter :

- **Dimension longitudinale :** relations amont-aval, continuité, etc. ;
- **Dimension transversale :** relations lit mineur-berges-lit majeur ;
- **Dimension profondeur :** relation rivière-substrat-nappe d'accompagnement ;
- **Dimension temporelle :** cycles journaliers et annuels, évolutions tendancielles et situations de crise (crues, étiages).

Le groupe a poursuivi son travail afin d'approfondir cette définition assez ouverte de l'ingénierie écologique. L'objectif à ce stade n'est pas de fixer des critères qui seraient excluant sur une thématique en devenir, mais des critères pour aider à comprendre les points sur lesquels il est impératif d'être vigilants.

Quatre principaux critères ont ainsi été retenus pour qualifier un « bon projet » d'ingénierie écologique :

• **s'appuyer sur des pratiques de gestion et/ou de conception d'aménagements** basés sur, ou inspirés de, mécanismes qui gouvernent les systèmes écologiques (processus fonctionnels biotiques/abiotiques) : *« Par le vivant »*.

• **contribuer au maintien et/ou à la restauration du bon fonctionnement des milieux** aquatiques et des services écosystémiques associés, par la prévention des pressions et des altérations potentielles et par la réduction des pressions et des altérations existantes : *« Pour le vivant »*.

• **s'inscrire dans une politique territoriale durable,** c'est-à-dire dans un projet politique qui se construit dans l'espace et dans le temps, qui intègre une gestion écologique et qui soit en équilibre avec le tissu social et ses activités ainsi qu'avec le développement économique et les usages du milieu : *« Objectifs concertés et vision intégrée »*.

DIMENSIONS D'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ D'UN PROJET D'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE.

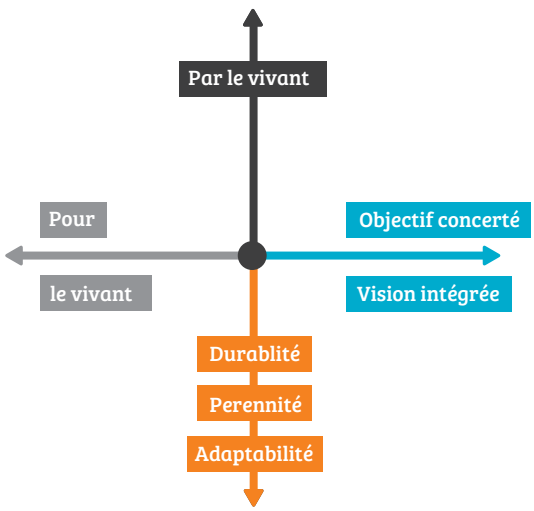


FIGURE 7

• **viser à garantir la résilience de l'écosystème de façon** à atteindre les objectifs associés au projet avec de moins en moins d'interventions humaines. Pour cela, la capacité de l'écosystème à s'auto-organiser et à s'adapter aux changements à venir doit être fixée comme un objectif à part entière, ceci dès la conception du projet. En conséquence, il faudra réfléchir aux trajectoires possibles[3] et laisser du temps à l'écosystème pour s'ajuster. Il faudra également intégrer les interventions humaines dans le temps propre de l'écosystème. Ceci ne signifie pas que l'entretien soit inutile, mais implique que la réflexion sur les opérations d'entretien et de gestion du milieu doit être partie intégrante du projet d'ingénierie : *« Durabilité, pérennité et adaptabilité »*.

Ces différents critères impliquent une part d'incertitude dans le résultat du projet. La dynamique du vivant, l'intégration dans un territoire d'un projet, son acceptation par les populations, etc., ne sont en effet pas totalement maîtrisables.

La portée expérimentale du projet implique un suivi des « performances » du projet qui doit être intégré dès le début de l'opération. Pour que ce suivi ait un sens, il est essentiel que le projet présente des possibilités d'ajustement et d'adaptation. L'évolution écologique d'un site pouvant prendre plusieurs années, il convient de prévoir, sur des temps d'évaluation long, des étapes intermédiaires pour aider à qualifier l'écart à la trajectoire visée au départ. Cette démarche doit également ouvrir des possibilités d'ajustement dans les interventions. Une condition nécessaire de réussite est d'avoir anticipé le financement de ces étapes dès le début du projet.

Ces exigences peuvent être utilisées comme des critères d'évaluation de la rigueur d'un projet d'ingénierie écologique. La lisibilité de l'évaluation peut passer par une restitution de l'information sous une forme de diagramme « radar », synthétisant la qualité du projet vis-à-vis des quatre dimensions proposées (**FIGURE 7**).

Ce mode de représentation a été utilisé dans le chapitre 4 pour les différentes études de cas (il ne s'agit pas d'une évaluation des projets présentés et les diagrammes ont été construits sur la base des objectifs des projets). Un cinquième axe a été ajouté pour tenir compte de la notion de continuum aquatique.

[3] *Ceci indique qu'il faut prendre en compte sa trajectoire qui dépend de son histoire passée et de ses tendance d'évolution compte tenu du potentiel écologique du système et de ses interactions avec les activités socio-économiques*

5

CONCLUSION DU CHAPITRE 1

CALOPTERYX SPLENDENS ET RENONCULES / MICHEL BRAMARD - ONEMA

Les éléments de définition que nous avons retenus permettent de clarifier le champ de l'ingénierie écologique. Ils sont cependant insuffisants pour une mise en œuvre pratique par les gestionnaires des milieux aquatiques.

Pour aller plus loin il est nécessaire de décliner les principes et critères que nous avons mis en avant en fonction des objectifs des maîtres d'ouvrage pour de possibles projets d'ingénierie écologique.

C'est l'objet du chapitre 2.

Chapitre 2

A quoi sert l'ingénierie écologique ? Quelques domaines d'application

1 INTRODUCTION AU CHAPITRE 2 : LES DIMENSIONS DE LA GESTION DES HYDROSYSTÈMES 32

2 PROTÉGER LA QUALITÉ PHYSICO-CHIMIQUE DE LA RESSOURCE EN EAU 38

3 CONTRÔLE À LA SOURCE DES REJETS DIFFUS D'ORIGINE AGRICOLE 40

4 AMÉLIORER LE TRAITEMENT DES REJETS LOCALISÉS ET DIMINUER LEURS IMPACTS SUR LES MILIEUX AQUATIQUES RÉCEPTEURS : LE CAS DES ZONES DE REJET VÉGÉTALISÉES 58

5 GÉRER LES CRUES ET LES INONDATIONS 68

6 MAÎTRISER LES ÉVOLUTIONS DU LIT DES COURS D'EAU (INCISION, ATTERRISSEMENT, ...) ET MIEUX GÉRER LES FORMES FLUVIALES 84

7 MIEUX GÉRER LES EAUX PLUVIALES URBAINES EN DIMINUANT LEURS EFFETS NÉGATIFS ET EN LES VALORISANT 94

8 VALORISER DES PAYSAGES ET/OU DES USAGES OU DES AMÉNITÉS LIÉS À L'EAU EN MILIEU URBAIN 107

9 RESTAURER LES MILIEUX AQUATIQUES ET DÉVELOPPER LA BIODIVERSITÉ 114

1

INTRODUCTION AU CHAPITRE 2 : LES DIMENSIONS DE LA GESTION DES HYDROSYSTÈMES

Avertissement au lecteur : Même si ce chapitre peut se suffire à lui-même, nous conseillons vivement de commencer par lire le chapitre 1 afin de bien s'imprégner des bases qui ont gouverné la rédaction de cet ouvrage.

L'ingénierie écologique couvre un champ d'application potentiellement large pour les milieux aquatiques. Elle peut par exemple être mise en œuvre dans la conception de solutions visant à **compenser des atteintes** à la biodiversité. Il s'agit alors de réaliser des mesures permettant de restaurer, créer, améliorer ou empêcher la perte ou la dégradation d'un écosystème. Elle peut aussi être utilisée dans **un cadre préventif** (éviter une dégradation du milieu et/ou une nuisance pour un usage) ou curatif (aider à diminuer une pollution par exemple).

Les modalités de conception et d'application sont bien sûr différenciées suivant les milieux (contraints et dégradés). En particulier, les disparités de fonctionnement des milieux nécessitent de penser les interventions « comme un art et non comme des recettes » (Barnaud et Barbier, 2006). Par ailleurs, les acteurs en jeu sont en général spécifiques à un secteur d'activité donné.

Malgré toutes ces singularités d'application, il s'agit dans tous les cas de trouver un nouvel équilibre entre l'Homme et la nature en proposant des aménagements qui s'appuient sur des mécanismes naturels au lieu de s'opposer à eux. Pour ceci, il est nécessaire de bien comprendre comment fonctionnent les hydrosystèmes et de reconnaître comment ils peuvent rendre service à l'Homme.

Il s'agit dans tous les cas de trouver un nouvel équilibre entre l'Homme et la nature en proposant des aménagements qui s'appuient sur des mécanismes naturels au lieu de s'opposer à eux. Il est nécessaire de bien comprendre comment fonctionnent les hydrosystèmes et de reconnaître comment ils peuvent rendre service à l'Homme.

1 La reconnaissance d'usages et de fonctions utiles à la société

Le fonctionnement des écosystèmes est la résultante de « fonctions » qui permettent au système d'exister et qui peuvent être directement ou indirectement utiles à la société par les services qu'elles lui rendent.

Les usages humains qui reposent sur des hydrosystèmes sont en effet nombreux. Citons par exemple l'alimentation en eau potable, l'approvisionnement en eau des industries, l'irrigation, la pêche, l'extraction de granulats, la production d'hydroélectricité, la navigation et

L'ÉCHELLE À LAQUELLE PENSER LE PROJET : LE BASSIN VERSANT

FIGURE 8

D'APRÈS L'AGENCE DE L'EAU SEINE-NORMANDIE

de nombreux usages récréatifs souvent liés à la qualité paysagère des hydrosystèmes. Ces usages sont le plus souvent étroitement dépendants de fonctions que l'écosystème fournit de façon quasiment gratuite : auto-épuration des eaux de surface, recharge des aquifères en eau de bonne qualité, pondération des extrêmes hydrologiques, transport solide et maintien de la qualité du substrat et des habitats, pérennisation des écosystèmes et de paysages originaux, etc.

Or, la plupart de ces usages impactent l'écosystème de façon plus ou moins forte et durable et peuvent altérer, parfois de façon très importante, certaines de leurs fonctions. Dans un certain sens, nous coupons donc la branche sur laquelle nous sommes assis !

Ces interactions complexes entre fonctions écologiques et usages par nos sociétés sont donc au cœur de l'enjeu d'une gestion environnementale durable et équilibrée des hydrosystèmes. Elles sont également au cœur des défis de l'ingénierie écologique qui ambitionne justement de les concilier.

Les raisons qui peuvent motiver une intervention d'ingénierie écologique sur un hydrosystème sont diverses. Elles peuvent être strictement liées au développement ou à la préservation d'un usage anthropique (préservation d'une ressource en eau potable par exemple) ou uniquement associées à l'amélioration de l'état écologique du milieu (restauration d'une zone humide par exemple). Le plus souvent les objectifs seront multiples, à la fois d'ordre écologiques et d'ordre sociétaux.

une approche globale et systémique est toujours indispensable

Quelles que soient ces raisons, une approche globale et systémique est toujours indispensable, car toutes les fonctions des écosystèmes aquatiques sont liées entre-elles et conditionnent les services que ces écosystèmes peuvent rendre à l'Homme. La compréhension de ces relations est donc un préalable nécessaire pour une mise en œuvre raisonnée de toute intervention.

Nous proposons d'expliciter cette approche globale et systémique par le cas des rivières.

2 Les différentes dimensions des hydrosystèmes : le cas des rivières

1. LE RÔLE DE L'HYDROLOGIE ET DE L'HYDRAULIQUE

Le débit dans une rivière varie en permanence. Les variations peuvent être cycliques, le cycle le plus classique étant annuel. Le débit moyen varie alors selon le régime de la rivière qui dépend lui-même de la géographie et du climat du bassin versant. Les variations peuvent être épisodiques, avec en particulier des épisodes de débit extrêmes, crues ou étiages. Le débit peut également être affecté par des actions anthropiques, par exemple par des prélèvements ou par des réservoirs destinés à le régulariser. Caractériser l'hydrologie d'une rivière est donc délicat car il faut impérativement décrire toutes ces évolutions temporelles. De plus, selon la pente, la rugosité ou la morphologie du lit, un même débit peut se traduire par des conditions hydrauliques très diverses en termes de vitesse et de profondeur.

De la même façon que le débit, la qualité de l'eau est également variable en fonction du temps et des sources d'apports. Les cycles touchent tous les facteurs du biotope (température, quantité d'oxygène dissous, turbidité, concentration en nutriments ou en pesticides, etc.). Ils peuvent être journalier et/ou saisonnier et/ou annuel. Les épisodes de pollution, qu'ils soient d'origine accidentelle ou non, auront un impact direct à la fois sur les fonctions écologiques et sur les usages. Cet impact sera différent selon l'hydrologie du système et la saison.

Ces caractéristiques, hydrologiques, hydrauliques et physico-chimiques jouent un rôle considérable sur les espèces animales ou végétales.

2. LE RÔLE HYDRO-GÉOMORPHOLOGIQUE DU CONTINUUM LIT MINEUR-LIT MAJEUR

Excepté dans certains cas rares et explicables, une rivière coulant dans une plaine alluviale qu'elle a façonnée, inonde son lit majeur plus ou moins fréquemment (en général à partir du débit de crue de fréquence biennale pour une rivière non aménagée). Que le milieu soit aménagé ou non, ces submersions contribuent à l'écrêtement des crues à l'aval. Cette fonction écologique classique du lit majeur d'un cours d'eau peut revêtir une importance cruciale dans certains bassins, notamment les plus aménagés, comme par exemple celui du Rhin (Dister *et al.*, 1990).

Les crues jouent un rôle fondamental dans les processus morphogéniques car elles assurent l'essentiel du transport de la charge de fond et des matières en suspension (MES). Les submersions contribuent à fertiliser les lits majeurs, comme dans le cas bien connu du Nil (Saïd, 1993) et le bourrelet sédimentaire ainsi constitué peut aussi avoir son utilité en termes de protection. En outre, si le débit à pleins bords est considéré comme le plus efficace sur le plan du transport solide (concept de « débit dominant » ; Wolman et Miller, 1960), les débordements, par la « détente hydrocinétique » qu'ils génèrent (Friedkin, 1945), peuvent contribuer à atténuer dans une certaine mesure l'érosion verticale et latérale de leurs berges (Maire, 1990).

Les crues, en tant que moteurs de la morpho-dynamique fluviale, peuvent aussi être considérées comme des atouts patrimoniaux. Leurs effets sont perceptibles à différentes échelles de temps, courtes, longues et très longues, ce qui contribue fortement à la diversité des hydrosystèmes, en partie du fait de la présence d'héritages géomorphologiques (formes, paysages, dynamiques relictuelles...). Lorsqu'elles se produisent dans des milieux ruraux, elles peuvent être compatibles avec les modes d'occupation du sol et ne posent pas nécessairement de problèmes importants. En revanche elles perturbent fortement les espaces aménagés.

3. LE RÔLE HYDROGÉOLOGIQUE DU CONTINUUM LIT MINEUR-LIT MAJEUR-PLAINE ALLUVIALE

Pendant une submersion, l'infiltration depuis la surface du lit majeur s'accompagne, en présence d'un couvert végétal continu de type prairie ou forêt alluviale (tout particulièrement quand cette dernière est parvenue au stade de forêt à bois dur), d'une épuration efficace de l'eau par absorption des phosphates et nitrates (Sanchez Perez *et al.*, 1991). Lorsque les crues antérieures ont déposé dans le champ d'inondation des sédiments fins argilo-limoneux, ce phénomène est renforcé (Trémolières *et al.*, 1994). Des processus de dénitrification par des bactéries peuvent aussi exister dans les sols des zones humides (en milieu hydromorphe), particulièrement dans ceux des lits majeurs, lorsqu'ils sont en condition anoxique (Ruffinoni *et al.*, 2003). Du fait de ces processus d'épuration, les eaux infiltrées dans le lit majeur pendant les inondations rechargent l'aquifère en eau de bonne qualité, avec des volumes dans certains cas de millions de m^3/an pour un même cours d'eau, comme par exemple dans la basse vallée de l'Ill (Humbert, 1990). Rappelons que la recharge de la nappe est également assurée par les précipitations efficaces et l'infiltration à partir du lit mineur. Pendant les basses eaux, le drainage phréatique par les cours d'eau contribue à soutenir les étiages, avec des apports hydriques de bonne qualité, ce qui réduit la pollution des eaux superficielles par effet de dilution ; le caractère sténotherme froid de ces eaux contribue à la régulation thermique des milieux aquatiques.

Inversement la nappe alluviale peut « déborder » dans la plaine alluviale et venir renforcer le caractère humide de certains milieux. Ecologiquement ce phénomène peut être très intéressant du point de vue physicochimique mais également biologique (prairies d'hivernage pour les oiseaux, fossés en eau pour la faune amphibienne ou aquatique).

4. L'AUTOÉPURATION EN LIT MINEUR

Le lit mineur des rivières est aussi le siège d'une importante activité auto-épuratoire. Rappelons que l'autoépuration est définie comme « l'ensemble des processus biologiques intermédiaires ou finaux permettant d'aboutir à la minéralisation des polluants organiques dans les milieux aquatiques ». Elle fait intervenir divers micro-organismes qui nécessitent le plus souvent de l'oxygène dissous. « Le stade ultime de l'autoépuration est marqué par le développement d'organismes autotrophes utilisant les éléments minéraux fournis par la décomposition de la matière organique et libérant de l'oxygène, ce qui favorise la régénération du milieu » (Encyclopédie Larousse).

Un chenal peu artificialisé présentant une forte hétérogénéité d'habitats (séquences seuils-mouilles, alternance de bancs de convexité sur les deux rives, etc.), présente une capacité d'auto-épuration plus élevée (Carbiener, 1990 ; Breil *et al.*, 2007), qu'un cours d'eau chenalisé (Wasson *et al.*, 1995). Cela est notamment lié aux processus d'infiltration en amont des seuils et des bancs, et d'exfiltration à leur extrémité aval, lesquels conditionnent la présence d'une zone hyporhéique (ou hyporhéos), qui est le siège de l'essentiel des processus de filtration, physique, chimique et biologique (par exemple Breil *et al.*, 2007).

5. HABITATS ET ACTIVITÉ BIOLOGIQUE DANS L'HYDROSYSTÈME FLUVIAL

Les cours d'eau et leurs abords sont le support du développement d'une diversité d'habitats particulièrement riche (prairies humides, tourbeuses ou alluviales, connectées par la surface ou les nappes, bois alluviaux à bois durs ou tendres, grèves, vasières, roselières, mégaphorbiaies, milieux dunaires, mares, chenaux à débit et énergie plus ou moins élevés etc.). Variés et soumis à des conditions environnementales particulièrement changeantes, ces habitats sont le siège d'une production et d'une diversité biologiques particulièrement élevées.

Ils remplissent de nombreuses fonctions biologiques pour les espèces qu'ils accueillent (nourriceries pour les jeunes et alimentation pour les adultes, repos face à des courants forts, refuge en cas de pollution, hivernage, fraie ou nidification, etc.) et participent à quasiment toutes les autres fonctions écologiques associées à la rivière : écrêtement des crues, infiltration et recharge des nappes, soutien d'étiage, épuration, protection contre l'érosion, sédimentation, régulation thermique, etc.).

Cette diversité d'habitats et de fonctions est également la source d'une biodiversité importante :

- Le lit mineur et les eaux stagnantes de la zone inondable abritent du phytoplanction et zooplancton, des algues, des invertébrés aquatiques, des macrophytes aquatiques, des hélophytes, des poissons, des oiseaux d'eau, des mammifères aquatiques, etc. (Amoros et Petts, 1993) ;
- Sur les zones riveraines où l'effet d'écotone (de transition entre l'écosystème aquatique et l'écosystème terrestre) est particulièrement fort, c'est tout un gradient biologique qui s'installe : des ligneux tendres aux ligneux durs, des scirpes jusqu'aux roseaux, des insectes amphibies aux insectes terrestres, etc. ;
- Dans les annexes hydrauliques (anciens méandres partiellement ou temporairement connectés, bras morts, bras secondaires, criques, fossés...), où lit mineur et zones riveraines sont encore plus rapprochés, cette diversité est concentrée et particulièrement élevée (par exemple Schniztler et Carbiener, 2007).

6. LES ASPECTS PAYSAGERS, RÉCRÉATIFS ET ÉDUCATIFS

Donner un rôle paysager, récréatif ou éducatif aux écosystèmes devient de plus en plus un objectif important pour les maîtres d'ouvrage. Ces activités correspondent à la garantie d'une appropriation de l'hydrosystème, voire à une certaine reconnaissance de ses divers atouts (et contraintes) par les citoyens. Après un désintérêt, voire un déni, de plusieurs dizaines d'années du rôle des cours d'eau dans la vie quotidienne (Lechner, 2006), l'aspect éducatif paraît aujourd'hui particulièrement prégnant dans les différents projets d'ingénierie écologique des milieux aquatiques. Il contribue à la prise de conscience, par les différents acteurs de la société, de l'importance des équilibres écologiques et contribue ainsi à un développement plus « durable ».

La qualité paysagère est souvent fortement associée à la diversité des habitats. La valeur paysagère accordée aux rivières à méandres, tresses, ou anastomoses est par exemple souvent plus élevée qu'ailleurs. Il pourrait être envisagé d'appliquer à ces styles fluviaux les mêmes principes de gestion patrimoniale qu'aux espèces végétales ou animales en voie de disparition, en utilisant par exemple le concept de géomorphosite (Reynard, 2005 ; Reynard et Panizza, 2005).

7. LES CONTRAINTES LIÉES AUX USAGES ET AUX USAGERS ET LE LIEN AVEC LA DCE

Les opérations d'ingénierie écologique s'inscrivent en général dans la recherche d'un retour au bon état, tel qu'il est préconisé par la Directive Cadre sur l'Eau.

Cependant, ré-aménager un cours d'eau a souvent également des conséquences sur les usages qui y sont pratiqués : certains usages anciens peuvent être plus faciles ou au contraire plus difficiles à pratiquer, des usages nouveaux peuvent apparaître.

On oppose souvent le retour au bon état écologique aux usages anthropiques de la rivière en considérant les usages comme les principaux responsables de la dégradation. Cette opposition est bien sur une erreur. La rivière constitue un anthropo-hydro-système ; l'homme en fait partie intégrante et jouera nécessairement un rôle.

Si cette composante humaine n'est pas prise en compte dès les premières étapes de la réflexion, les interactions entre le milieu réaménagé et les usages qui y sont pratiqués peuvent compromettre la réussite de l'opération. Il est donc nécessaire d'impliquer les représentants des différents usagers dès les premières phases du projet afin de connaître les contraintes que leurs usages impliquent et de comprendre celles qu'elles imposent au

milieu. A titre d'exemple, la pratique des sports nautiques peut être rendue dangereuse du fait de certains aménagements, notamment des seuils ou des barrages à pertuis mal conçus. Consulter la fédération ou les clubs locaux pratiquant cette activité permet de bénéficier de leur expertise et de trouver des solutions bénéfiques à la fois pour l'usage et pour le milieu.
Identifier les usages existants est en général facile ; trouver des organismes représentant les usagers peut être un peu plus compliqué ; imaginer les usages nouveaux est extrêmement difficile. A cette nécessaire consultation initiale doit donc être associé un suivi des usages effectivement pratiqués.

L'un des concepts fondamentaux de l'ingénierie écologique est finalement que l'on peut aménager un milieu aquatique pour répondre à des demandes sociales, tout en favorisant un fonctionnement plus naturel de ce milieu. Ce concept repose sur deux constats. Le premier est qu'un milieu aquatique en bon état est susceptible de rendre plus de services à la société qu'un milieu dégradé. Le second est que l'homme fait partie de l'écosystème et en conséquence toute opération qui ne prendrait pas en compte la dimension sociale a de bonnes chances d'être condamnée à l'échec.

3 Les motivations des maîtres d'ouvrage et la mise en œuvre des principes d'ingénierie écologique

Ce paragraphe introductif montre à l'évidence qu'un milieu aquatique constitue un écosystème complexe dans lequel toutes les fonctions sont liées entre-elles. Une approche globale et systémique est donc toujours nécessaire. Cet aspect devra impérativement être toujours présent dans l'esprit du lecteur.
Pourtant, les motivations des maîtres d'ouvrage sont-elles souvent plus concrètes : réhabiliter une zone humide, remettre en valeur une rivière dans la traversée d'une ville, valoriser les eaux de pluies, protéger une ressource en eau, etc.
Nous avons donc choisi d'organiser ce chapitre du point de vue du décideur politique en essayant d'identifier les raisons principales qui peuvent le conduire à mettre en œuvre une action d'aménagement sur un milieu aquatique.

Nous avons ainsi identifié sept points d'entrée qui nous paraissent représentatifs des motivations principales possibles des maîtres d'ouvrage. Ces points d'entrée ne sont pas hiérarchisés, ni par leur importance économique, ni par leurs enjeux écologiques ou sociaux et l'ordre dans lequel ils sont traités ne résulte d'aucune volonté particulière :

- Protéger la qualité physico-chimique de la ressource en eau en luttant en particulier contre les pollutions diffuses ;
- Améliorer le traitement des rejets ponctuels et diminuer leurs impacts sur les milieux aquatiques récepteurs ;
- Gérer les crues et les inondations ;
- Maîtriser les évolutions du lit des cours d'eau (incision, atterrissement, ...) et mieux gérer les formes fluviales ;
- Mieux gérer les eaux pluviales urbaines en diminuant leurs effets négatifs et en les valorisant ;
- Valoriser des paysages et/ou des usages ou des aménités liés à l'eau ;
- Restaurer les milieux aquatiques et développer la biodiversité.

Notre objectif est double :

- d'une part montrer que pour chacun des objectifs il est possible d'utiliser efficacement des méthodes et outils issus de l'ingénierie écologique ;
- d'autre part expliciter dans chacun des cas la façon de s'appuyer sur les grands principes présentés dans le chapitre 1.

Le plan de présentation sera identique pour chacun des points d'entrée :

- Description du contexte et des enjeux de façon à montrer comment une approche d'ingénierie écologique peut s'avérer efficace ;
- Analyse détaillée des grands principes d'ingénierie écologique à mettre en œuvre pour assurer la réussite de l'opération ;
- Présentation des méthodes et des outils utilisables, qu'ils soient structurels (dispositifs, aménagements) ou non structurels (maîtrise foncière, action de gestion ou d'entretien, etc.) ;
- Identification des limites et des freins actuels, mais aussi des perspectives d'évolution dans les années à venir.

2

PROTÉGER LA QUALITÉ PHYSICO-CHIMIQUE DE LA RESSOURCE EN EAU

Contrairement au pétrole par exemple, l'eau est une ressource qui est renouvelée en permanence par la machine atmosphérique. Au sens strict, il apparaît donc possible d'appliquer l'un des grands principes du développement durable : vivre sur l'intérêt sans toucher au capital.

Pourtant les choses ne sont pas si simples. L'eau de pluie se charge en polluants dès sa présence dans l'atmosphère et plus encore lorsqu'elle ruisselle sur des surfaces agricoles ou urbaines sur lesquelles se sont accumulés des produits divers issus des activités humaines. Le lessivage de ces surfaces et leur érosion, de même que leur mélange avec des eaux usées d'origine urbaine ou industrielle incomplètement épurées, conduisent à introduire dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines des polluants multiples, susceptibles de porter atteinte à la qualité de l'environnement, mais aussi de limiter les usages possibles.

Les produits concernés sont divers :

- Matières en suspension qui modifient la turbidité des eaux ou la morpho-dynamique des milieux de surface (envasement en particulier) ;
- Matières organiques plus ou moins rapidement biodégradables ;
- Nutriments, en particulier azote et phosphore ;
- Hydrocarbures, en particulier hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs) ;
- Micro-polluants minéraux, en particulier métaux (plomb, cuivre, zinc, cadmium, arsenic, etc.) ;
- Micro-polluants organiques de plus en plus diversifiés (résidus de pesticides, résidus médicamenteux, produits d'entretien ou de lavage, etc.).

Les origines sont elles-mêmes multiples : agriculture, industrie, transports, ville, etc.

Enfin, la façon dont ces polluants sont introduits dans les hydrosystèmes est également diverse. On distingue ainsi les rejets localisés (grosse industrie, station d'épuration) et les rejets diffus.

L'ingénierie écologique peut être utilisée pour réduire chacune de ces sources de pollution.

1 Cas des rejets diffus

Les rejets diffus sont de plus en plus compris comme constituant un facteur majeur de dégradation des milieux aquatiques. Ceci est particulièrement vrai dans les têtes de bassins versants qui sont les zones à la fois les plus vulnérables et les plus nécessaires à la qualité globale de l'eau.

Les rejets diffus ont eux-mêmes deux origines différentes : les rejets urbains et les rejets agricoles. Nous les distinguerons dans la présentation, même si certains dispositifs utilisés pour les réduire sont identiques.

- Les rejets urbains sont essentiellement associés au temps de pluie. Il peut s'agir du rejet d'un mélange d'eau usée et d'eau pluviale non traitée par les déversoirs d'orage ou du rejet direct d'eau de ruissellement et de drainage. Ces rejets peuvent provenir de zones urbanisées, mais également d'infrastructures de transport (routes, autoroutes, voies ferrées, etc.). Les outils spécifiques d'ingénierie écologique permettant de contrôler les rejets urbains de temps de pluie sont présentés dans le paragraphe relatif à la valorisation des eaux pluviales urbaines.

• Les rejets agricoles sont des sources importantes de pesticides et de substances fertilisantes (en particulier phosphates et nitrates). Ils sont également le plus souvent associés au ruissellement. Les techniques permettant le contrôle des rejets diffus d'origine agricole feront l'objet du paragraphe éponyme.

Les rejets diffus sont de plus en plus compris comme constituant un facteur majeur de dégradation des milieux aquatiques.

2 Cas des rejets localisés

Nous ne traiterons dans cet ouvrage que le cas des eaux usées urbaines ; les effluents industriels sont en effet trop diversifiés pour pouvoir faire l'objet d'un traitement générique.

Nous nous limiterons également aux traitements biologiques (de loin les plus répandus), mis en œuvre dans des stations collectives d'épuration. Dans ce cadre, on distingue les procédés de traitement intensifs (boues activées, biofiltres, etc.) des systèmes extensifs (épandage, lagunage naturel, filtres plantés de roseaux, etc.), qui concernent sauf exception les petites collectivités (moins de 2 000 habitants).

En première approche chacun de ces procédés répond bien à une partie des principes de base de l'ingénierie écologique :

• Pour la nature, puisque le rôle d'une station d'épuration est de réduire de manière drastique la charge polluante qu'apporte le rejet localisé d'eau traitée dans un milieu naturel.

• Par la nature, puisqu'il s'agit de reproduire de manière plus ou moins intensive les processus de biodégradation de la matière organique, de nitrification-dénitrification, voire de piégeage du phosphore qui se produisent naturellement dans les milieux aquatiques.

• Avec une démarche d'ingénierie, puisque l'empirisme des débuts de l'épuration des eaux résiduaires a fait place depuis longtemps à une approche scientifique et technique rigoureuse.

Malgré tout, d'un point de vue sémantique, les procédés de traitement intensifs des eaux usées, bien que répondant aux principes de l'ingénierie écologique, relèvent en premier lieu du génie des procédés. En effet, même si l'épuration repose essentiellement sur l'intensification des processus naturels des écosystèmes, la réalisation d'opérations unitaires mécaniques (pompage, aération, recirculation, décantation/raclage, filtration à travers des membranes) conditionne le fonctionnement de ces filières. En termes de finalité, on peut souligner la prise en compte récente du principe de non-dégradation des systèmes dans leur globalité, à travers l'examen de l'empreinte environnementale des filières dans le choix des solutions à retenir pour l'épuration des eaux des collectivités.

Pour ce qui concerne les procédés de traitement extensifs, l'épuration repose également sur des phénomènes biologiques mais les opérations unitaires sont -ou peuvent être- « naturelles » [i.e. ne pas nécessiter d'opérations mécaniques nécessitant de l'énergie électrique] : répartition gravitaire des eaux, aération par les algues ou par alimentation intermittente en milieu non saturé, absence de recirculation, filtration sur graviers et sable, décantation naturelle sans ponts racleurs, etc.. De ce fait, la conception et le dimensionnement des systèmes visent à optimiser des processus naturels qui se déroulent ensuite théoriquement sans intervention complexe de l'exploitant durant plusieurs années. Les procédés de traitement extensifs répondent donc de manière plus exclusive aux principes de l'ingénierie écologique mentionnés précédemment que les procédés de traitement intensifs des eaux usées. La question de la maintenance nécessaire, ainsi que celle du statut de ces espaces restent cependant posées.

Les Zones de Rejets Végétalisées sont des ouvrages extensifs d'un type nouveau, placés entre la station d'épuration et le milieu naturel. Ces ouvrages connaissent depuis quelques années un développement très important. Visant à parfaire le traitement réalisé dans la station d'épuration amont, ces aménagements répondent aux principes de finalité de l'ingénierie écologique, mettent en œuvre les processus naturels des écosystèmes tandis qu'une démarche basée sur une approche scientifique et technique rigoureuse dans la conception, la réalisation et l'évaluation des projets, est en cours de construction. Nous leur consacrerons un paragraphe spécifique.

3

CONTRÔLE À LA SOURCE DES REJETS DIFFUS D'ORIGINE AGRICOLE

Voir les fiches retours d'expériences se rapportant à cette partie au point 1 du chapitre 4 de l'ouvrage (p. 144 à 170)

1 Contexte et enjeux

L'urbanisation, la construction des grandes infrastructures, les modifications profondes des pratiques agricoles au cours du siècle passé ont eu des conséquences majeures sur le rapport entre l'eau et le territoire.

Par exemple, les modifications anthropiques des paysages naturels ont engendré des perturbations fortes notamment par la destruction d'éléments du paysage due aux opérations de remembrement / aménagement foncier ou par la construction de grandes infrastructures (voies ferrés, routes, autoroutes, etc.). Ces opérations, justifiées en leur temps pour répondre à des objectifs de renforcement de la production agricole ou de désenclavement, apparaissent aujourd'hui au cœur de débats sur les problèmes de gestion des eaux, des pollutions diffuses, de continuités écologiques, de trames vertes et bleues (**FIGURE 9**).

Le développement de l'utilisation des fertilisants de synthèse ou des produits phytosanitaires a augmenté de façon importante les quantités de polluants répandus dans la nature. Dans le même temps, la modification des paysages ruraux a diminué les capacités de la nature à les filtrer ou à les éliminer.

L'enjeu majeur du siècle à venir consiste donc à retrouver un mode de gestion qui soit aussi efficace en termes de production agricole, tout en étant beaucoup moins perturbateur pour les écosystèmes, et en particulier pour les hydrosystèmes.

L'enjeu majeur du siècle à venir consiste donc à retrouver un mode de gestion qui soit aussi efficace en termes de production agricole, tout en étant beaucoup moins perturbateur pour les écosystèmes, et en particulier pour les hydrosystèmes.

2 Grands principes à appliquer

1. S'APPUYER SUR DES PRATIQUES DE GESTION INSPIRÉES DES MÉCANISMES QUI GOUVERNENT LES SYSTÈMES ÉCOLOGIQUES

Les éléments naturels du paysage que constituent les bois, les noues, les mouillères, les mares et plus largement les zones humides présentent des intérêts non négligeables pour dissiper des polluants divers (nutriments, pesticides). Par exemple, il est classiquement attribué aux zones humides une fonctionnalité de régulation des flux d'eau et de polluants (Fisher et Acreman, 2004).

Trouver un nouvel équilibre des bassins versants en restaurant la fonctionnalité purificatrice constitue donc le premier grand principe à appliquer pour mettre l'ingénierie écologique au service de la qualité de l'eau.

Evolution schématique du paysage agricole, depuis un état non perturbé (1900), un état remembré (2000) et un futur équilibre des paysages à atteindre (...)

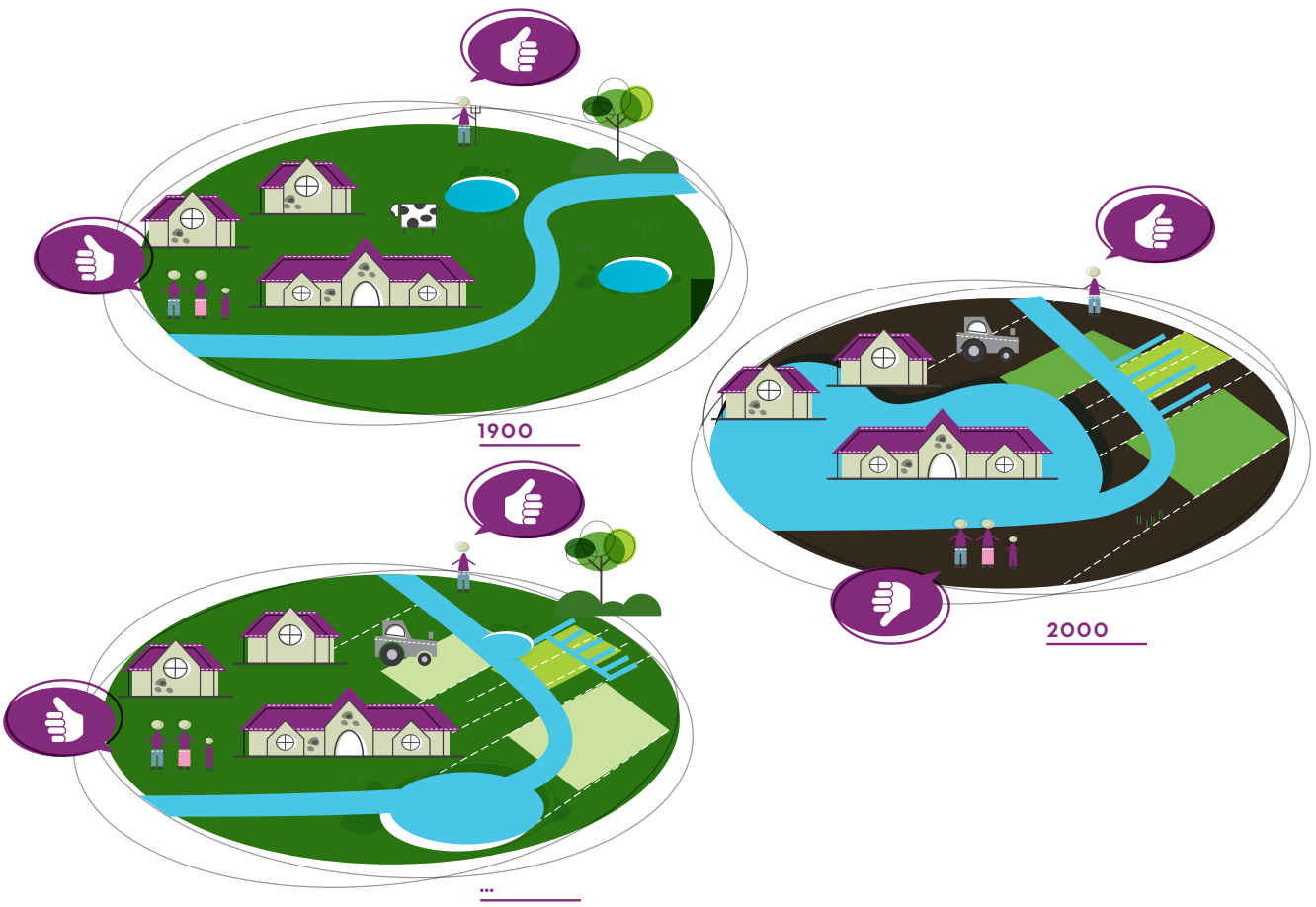


FIGURE 9

IRSTEA

Trouver un nouvel équilibre des bassins versants en restaurant la fonctionnalité purificatrice constitue donc le premier grand principe à appliquer pour mettre l'ingénierie écologique au service de la qualité de l'eau.

2. NE PAS DÉGRADER ET/OU CONTRIBUER AU MAINTIEN OU À LA RESTAURATION DU BON FONCTIONNEMENT DES MILIEUX AQUATIQUES

Au niveau local, le principe de base consiste à utiliser des zones tampons, ayant comme fonction principale de filtrer les eaux avant leur arrivée dans le milieu aquatique. Ces zones tampons peuvent être sèches ou humides (**FIGURE 10**).

Le statut réglementaire de ces zones intermédiaires entre des espaces naturels et des dispositifs construits reste posé (excepté pour les bandes enherbées ou dispositif végétalisé de bord de cours d'eau dont le statut réglementaire date de 2005).

Par exemple la question de la sémantique des termes anglo-saxon « constructed » ou « artificial wetland » a longuement été débattu au sein du groupe technique Zone Tampon piloté par Irstea et Onema, pour adopter, *in fine*, la terminologie de « Zone Tampon Humide Artificielle » (ZTHA dans la suite du texte), qui met en avant la fonctionnalité « tampon », objectif même de cet écosystème restauré, sans trancher réellement sur leur caractère artificiel.

Si ces zones ont incontestablement pour fonction de protéger les milieux aval, leur rôle en tant qu'élément actif de l'écosystème, et donc aussi sur la nécessité de ne pas trop les polluer, reste encore incertain. En d'autres termes, jusqu'où est-il possible de polluer une zone tampon ?

Les différents types de zones tampons

FIGURE 10 IRSTEA

3. MINIMISER LES INTERVENTIONS LOURDES ET COÛTEUSES D'ENTRETIEN

Même si son statut est artificiel, la zone tampon doit trouver sa propre trajectoire écologique de façon à minimiser les opérations de maintenance. Pour ceci, quelques règles simples peuvent être utilisées au moment de la conception.

- Même si la zone tampon a plusieurs objectifs, il est indispensable de les hiérarchiser et d'en identifier un comme prioritaire (dissipation des polluants dans notre cas).
- La conception de l'ouvrage doit être la plus simple possible : réduire les ouvrages de génie civi et respecter des schémas naturels pour la morphologie.
- La zone tampon doit être conçue de façon à prolonger les systèmes biologiques naturels qui l'entourent (Mitsch et Gossielink, 2000).

Malgré ces précautions, il faut avoir à l'esprit que la zone tampon reste avant tout un ouvrage de traitement qui devra être entretenu. Par exemple les micropolluants organiques vont être piégés dans la zone tampon mais ne seront que partiellement dégradés. Il pourrait s'avérer nécessaire de les exporter régulièrement.

4. INSCRIRE LE PROJET DANS UNE POLITIQUE TERRITORIALE ET LE TRAITER À LA BONNE ÉCHELLE SPATIALE

Une zone tampon particulière constitue un élément de paysage qui doit obligatoirement s'inscrire dans une logique globale à l'échelle du bassin versant, voire plus large (trames vertes et bleues).

En particulier, il faut intégrer l'aménagement dans le paysage et non contre lui. Le système créé doit être pensé comme un écotone dans son ensemble en intégrant une gradation des strates végétales. Il est important aussi de localiser la ZTHA à un point clé au sein du bassin versant, le long du transfert des polluants, entre la parcelle (ou groupement de parcelles) et le cours d'eau.

Un autre point fondamental consiste à s'appuyer sur un diagnostic hydrologique qui doit aider :

- à mieux comprendre les saisonnalités des exportations de flux provenant de l'amont,
- à définir l'échelle d'intervention pour le choix de la localisation des zones tampons dans le bassin versant.

5. PERMETTRE AU MILIEU DE TENDRE VERS UN ÉQUILIBRE ET DE S'AUTO-ORGANISER

Une zone tampon ne sera pas fonctionnelle tout de suite. Il ne s'agit pas d'accélérer les processus écologiques mais de les stimuler lors de leur implantation. Le temps est nécessaire pour atteindre les conditions optimales de rétention des polluants.

6. INTÉGRER LE SUIVI DES PERFORMANCES DÈS LE DÉBUT DE L'OPÉRATION

Dans une démarche d'obligation de résultat, le suivi de la performance des aménagements doit être débattu dès la conception du projet pour évaluer la réponse aux objectifs initiaux. Des techniques et protocoles d'évaluation peuvent être mis à disposition, en se rapprochant des instituts de recherche ou techniques.

Cependant, il faut avoir en tête que le suivi (incluant la partie analyse des échantillons) peut s'avérer aussi, voire plus, couteux que l'aménagement lui-même. Il n'est donc pas réaliste de vouloir suivre individuellement la totalité des opérations, généralement de petites ampleurs qui seront menées sur un bassin versant.

Nous proposons plutôt, dans l'idéal, un suivi à deux vitesses :

- mettre en place un observatoire de la qualité des eaux permettant de juger globalement de l'efficacité de l'ensemble des mesures mises en œuvre sur le bassin versant pour réduire des flux de polluants ;
- assurer un suivi scientifique précis de certaines opérations de façon à connaître les performances individuelles des familles d'ouvrages selon leurs conditions d'utilisation et, à terme, de construire des indicateurs de performance qui pourraient se substituer à l'évaluation scientifique locale.

3 Outils et réalisation

Comme indiqué plus haut il existe deux formes de zones tampons, selon qu'elles sont sèches ou humides. Les Zones Tampons Sèches sont décrites dans un document technique du CORPEN (2007).
Nous nous intéresserons ici spécifiquement aux zones tampons humides artificielles (ZTHA) et nous traiterons particulièrement du cas des polluants d'origine agricole (d'une part les nutriments, en particulier les nitrates, et d'autre part les pesticides).

Une zone tampon humide artificielle (ZTHA) en milieu agricole est un bassin de rétention, une mare existante, de profondeur et de hauteur d'eau variables, végétalisée ou pas.

1. QU'EST-CE QU'UNE ZONE TAMPON HUMIDE ARTIFICIELLE ?

Une zone tampon humide artificielle (ZTHA) en milieu agricole est un bassin de rétention, une mare, de profondeur et de hauteur d'eau variables, végétalisée ou pas. Nous incluons dans ces systèmes les zones tampons sans végétation s'approchant du lagunage, ou avec végétation se rapprochant de systèmes plus naturels comme les zones humides. C'est la position dans le bassin versant qui lui confère la propriété « tampon ». Ainsi la connexion hydrologique de la zone tampon est un critère indispensable : l'eau doit être interceptée puis retourner au cours d'eau après un séjour dans la ZTHA (**FIGURE 11**). Les ZTHA trouvent leur intérêt dans une démarche de complémentarité d'action, à 2 niveaux : réduction de la pression polluante à la source par une réduction des intrants, et réduction des transferts au sein du versant par l'aménagement d'éléments tampons. Nous aborderons dans ce paragraphe une synthèse des retours d'expérience dans le cas particulier d'eaux de surface issues de drainage agricole associées à une vulnérabilité forte de la ressource en eau (par exemple présence de karst mettant en relation directe les eaux de surface avec les eaux souterraines).

Les écoulements par drainage agricole sont considérés comme des eaux de surface avec la particularité d'être concentrés hydrauliquement (sortie de collecteurs, fossés d'assainissement agricole). La conception d'aménagement en sortie de réseau enterré est maintenant requise par les SDAGEs (par exemple : Loire-Bretagne, Seine-Normandie), et demandée par les services de police de l'eau pour toute nouvelle conception de réseau de drainage agricole. L'ambition de ce paragraphe n'est pas de proposer des règles de dimensionnement mais une aide méthodologique à leur implantation.

2. EFFICACITÉ DES ZONES TAMPONS HUMIDES ARTIFICIELLES

De nombreuses études ont démontré l'efficacité des ZTHA pour le traitement des eaux usées, des eaux résiduaires industrielles et des eaux agricoles (voir par exemple Vymazal, 2005). Dans le cas de la gestion des pollutions diffuses, les ZTHA ont pour objectif principal l'amélioration de la qualité des eaux issues de versants agricoles. Cela concerne les eaux de surface (ruissellement / drainage) qui rejoignent les cours d'eau. Dans la littérature, des travaux de synthèse relativement récents (voir par exemple Stehle *et al.*, 2011) présentent l'impact de zones tampons humides artificielles ou naturelles sur les flux de nutriments et de pesticides.

3. UN PRÉALABLE INDISPENSABLE : LE DIAGNOSTIC HYDROLOGIQUE

Le diagnostic hydrologique consiste à établir l'origine des flux d'eau et de polluants dans le bassin versant. Cette étape est nécessaire pour mieux comprendre les saisonnalités des exportations de flux provenant de l'amont, et de définir l'échelle d'intervention pour le choix de la localisation de la ZTHA dans le bassin versant.
La **FIGURE 12** introduit à titre d'exemple une représentation simplifiée des gammes de concentrations en nitrates et en pesticides depuis l'échelle de la parcelle, jusqu'à une échelle de grand bassin versant.
Nous constatons qu'il est important d'être le plus en amont possible pour capter des concentrations plus fortes, et ainsi limiter l'effet de dilution (surtout pour les pesticides). Pour les nitrates, il est possible d'agir à différentes échelles, depuis la parcelle jusqu'à des tailles de bassin versant de l'ordre 100 km^2 (Passy *et al.*, 2012).

Stratégie de réduction de la pollution diffuse d'origine agricole

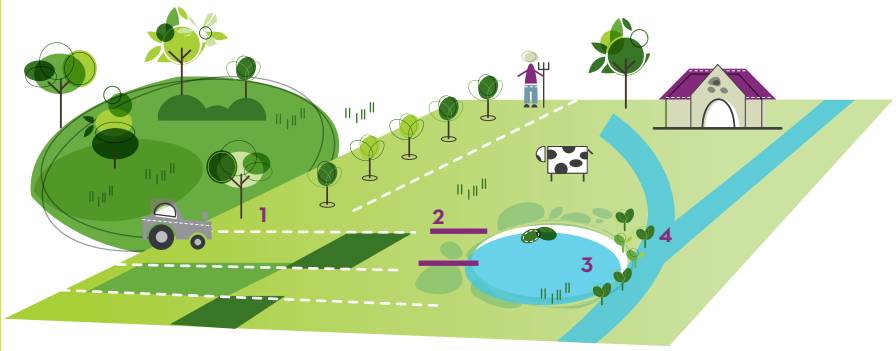


FIGURE 11

Adapté de Mitsch et Gosselink, 2000

Schéma d'évolution de la gamme de concentration selon l'échelle spatiale dans un contexte de bassin versant agricole fortement anthropisé

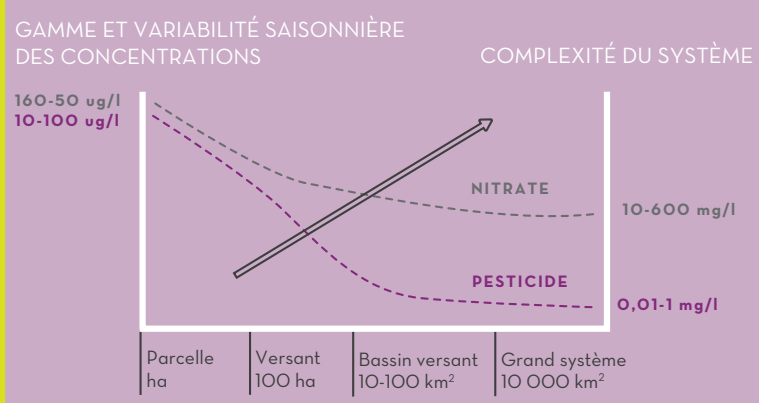


FIGURE 12

Irstea

Le deuxième point porte sur la saisonnalité des exportations. Dans le cas des nitrates en sortie de parcelles drainées, Tournebize *et al.* (2008) ont montré que les flux de nitrates pouvaient être séparés en 3 périodes. Pendant l'amorce de drainage (octobre à mi-décembre, en général), les concentrations en nitrates sont élevées, dues à un transfert du reliquat en entrée d'hiver. Un flux de 31% des nitrates par rapport au flux annuel est transporté dans 21% du flux hydrique. Tandis que pendant la saison de drainage intense (mi-décembre à mi-mars), 55% du flux des nitrates se retrouve dans 61% du flux hydrique. Enfin les épisodes de printemps (mi-mars à mai) mobilisent sporadiquement 12% du flux annuel en nitrates dans 16% du flux hydrique. Cette dernière composante est généralement corrélée aux périodes de fertilisation, mais fortement dépendante des années climatiques (**FIGURE 13**).

Moyenne des contributions mensuelles des flux d'une saison complète de drainage, site de La Jaillière (eau: 220 mm/saison et nitrate: 38kgN/ha/saison, soit 76mg NO3/L moyenne de 1989 à 1997)

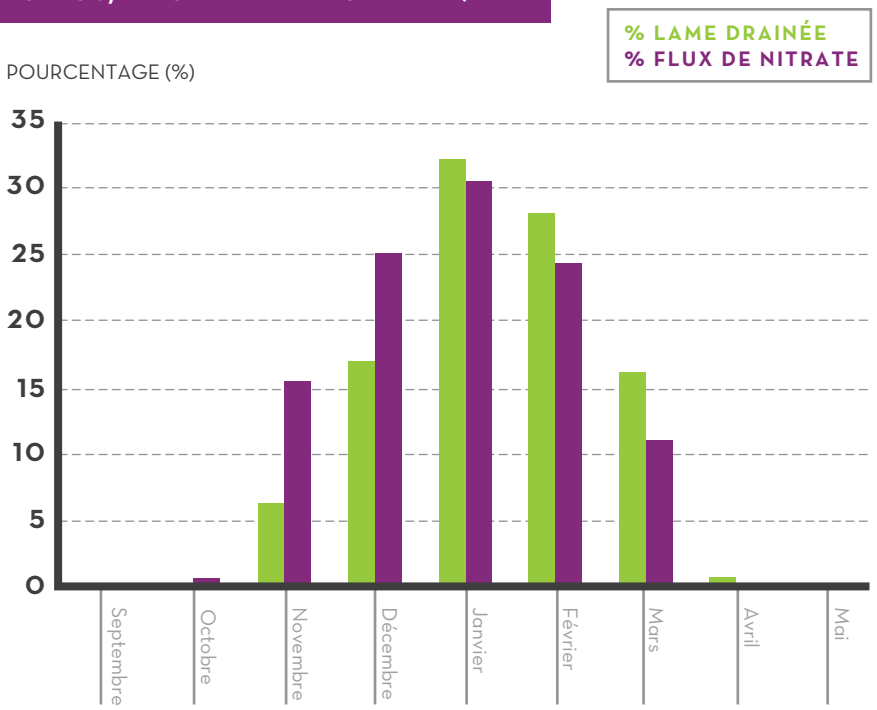


FIGURE 13

ARVALIS/IRSTEA

Les exportations de pesticides par drainage agricole sont souvent inférieures à 0.5 % de la dose appliquée et dépassent plus rarement 3 % (voir par exemple Garmouma *et al.*, 1997). Les quantités exportées toutes molécules confondues sont plutôt de l'ordre de quelques dizaines de grammes de pesticides par hectare et par an, soit trois ordres de grandeur inférieures à celles des nitrates.

A l'échelle de la crue, un phénomène d'entrainement est noté avec un pic de concentration qui semble intervenir avant le pic de débit diluant les concentrations. Même de très faibles augmentations du débit peuvent être associées à de fortes concentrations **(FIGURE 14)**. Généralement, les premières crues après application sont les plus concentrées (voir par exemple Tournebize *et al.*, 2012) et donc celles présentant les plus forts risques de transfert des pesticides. Parfois, à la reprise des écoulements après des périodes de débits faibles ou nuls, de fortes concentrations en pesticides peuvent être notées même après de longues périodes suivant les applications. Les exportations dépendent de la position des pesticides dans le profil de sol drainé. Considérant les saisonnalités des exportations, selon les contaminants, on peut se poser la question de l'interception de la totalité des flux d'eau (applicable principalement au cas des nitrates) ou bien d'une stratégie innovante qui permettrait de sélectionner selon la dynamique saisonnière les flux de contaminant dans le minimum de flux d'eau (pour le cas des pesticides par exemple).

La connaissance préalable des transferts hydrologiques et des saisonnalités des exportations, associés aux objectifs du projet (nitrate ou pesticides) conduit explicitement à considérer que :

- pour les nitrates, la localisation de la ZTHA peut se faire à toute échelle territoriale de la parcelle au versant (< 40 km^2), en interceptant tous les flux ;
- pour les pesticides, la localisation de la ZTHA doit être raisonnée le plus en amont du territoire, le plus proche possible de la source parcellaire, et il est envisageable de sélectionner les flux les plus contaminés.

Ces éléments de réflexion sont développés dans les paragraphes suivants.

CHRONIQUE DE PESTICIDE SUIVANT APPLICATION SUR LE BASSIN VERSANT DE RAMPILLON (SURFACE DE 400 HA, SEINE ET MARNE) PENDANT LES MOIS D'AVRIL ET MAI 2007.

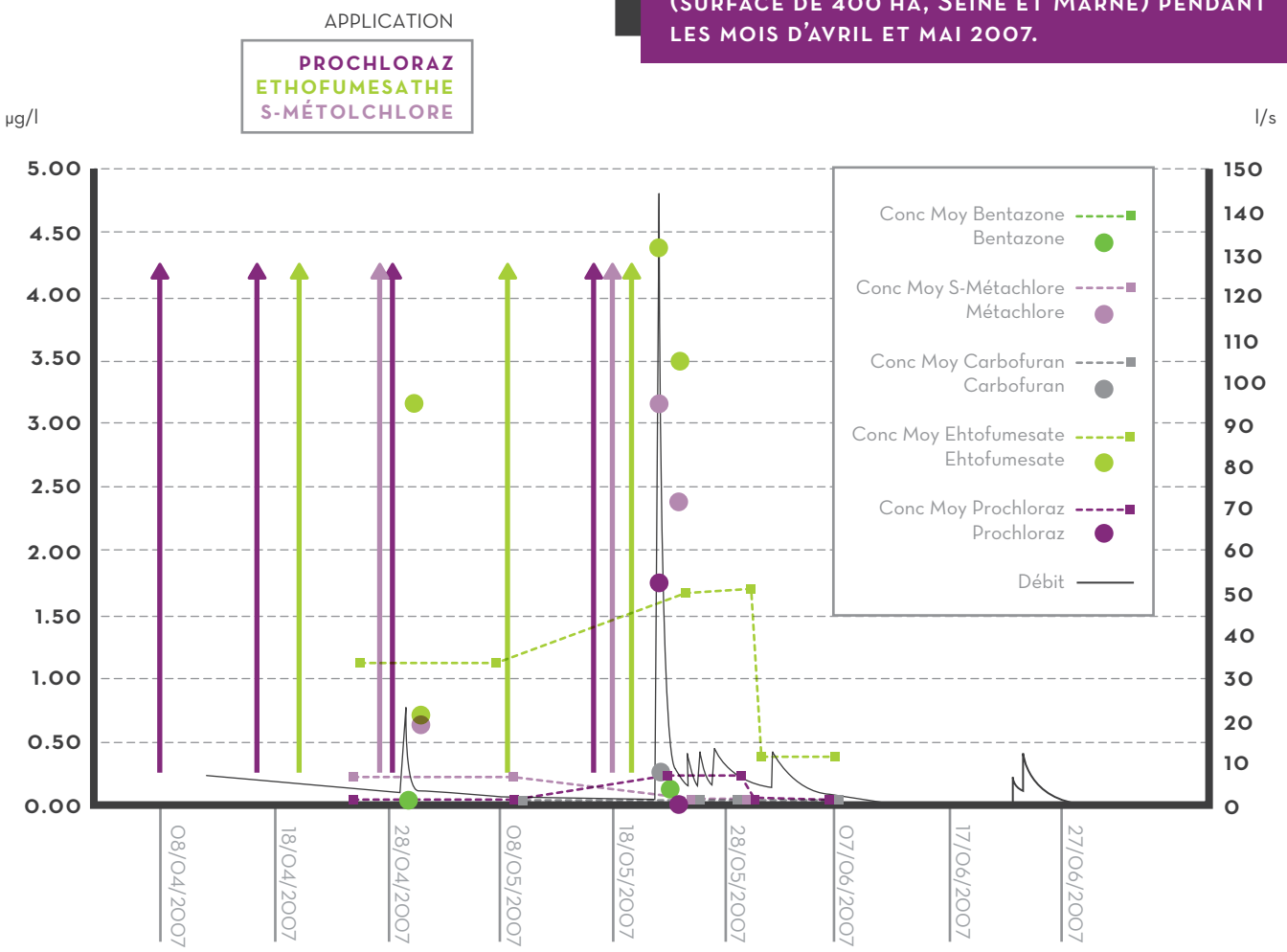


FIGURE 14

TOURNEBIZE *ET AL.*, 2012

4. PROCESSUS ATTENDUS

Les écosystèmes aquatiques sont complexes, il est illusoire d'avoir l'ambition de tout contrôler, mais il est envisageable de favoriser par l'ingénierie écologique les conditions les plus favorables à la mise en place des processus de dissipation (rétention / dégradation).

4.1 Les nitrates

Une des principales voies d'élimination des nitrates dans les ZTHA est la dénitrification (Bachand et Horne, 2000 ; Tanner *et al.*, 2005). Ce processus anaérobie permet la transformation des nitrates en deux gaz successifs (**FIGURE 15**) : le N2O (puissant gaz à effet de serre) et le N2. Pulou (2011) a compilé les taux de dénitrification observés par diverses études. Les valeurs varient de 0.003 à 1.02 gN/m^2/an. Les ZTHA sont souvent représentées comme des systèmes où la couche superficielle des sédiments est anoxique, voire anaérobie. Cependant, autour des racines des plantes (la rhizosphère), une fine couche aérobie est créée suite au transfert d'oxygène par les plantes lors de la photosynthèse (Mitsch and Gosselink, 2000).

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DU CYCLE DE L'AZOTE DANS LES ZONES HUMIDES. 1: AMMONIFICATION, 2: VOLATILISATION, 3: NITRIFICATION, 4: DNRA, 5: ANAMMOX, 6: DÉNITRIFICATION, 7: ASSIMILATION, 8: FIXATION

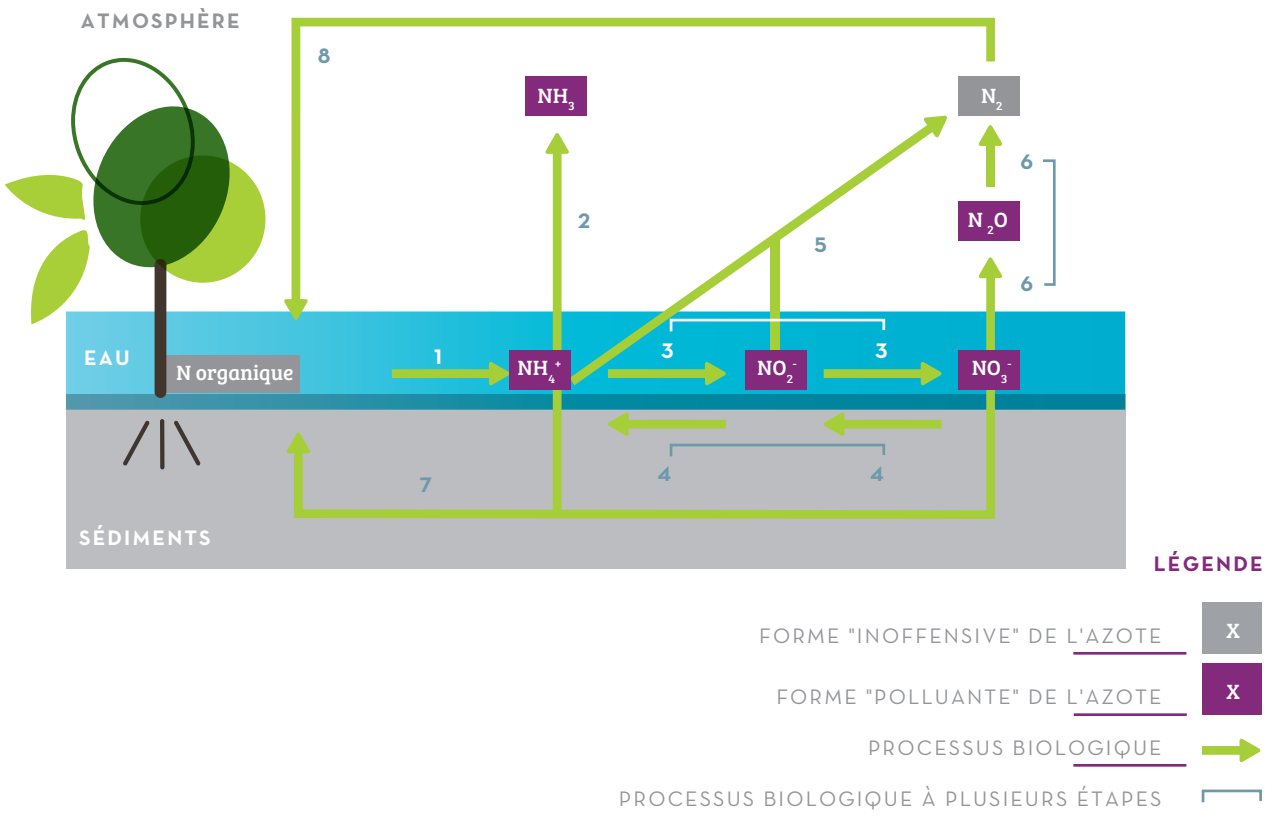


FIGURE 15 PULOU, 2011

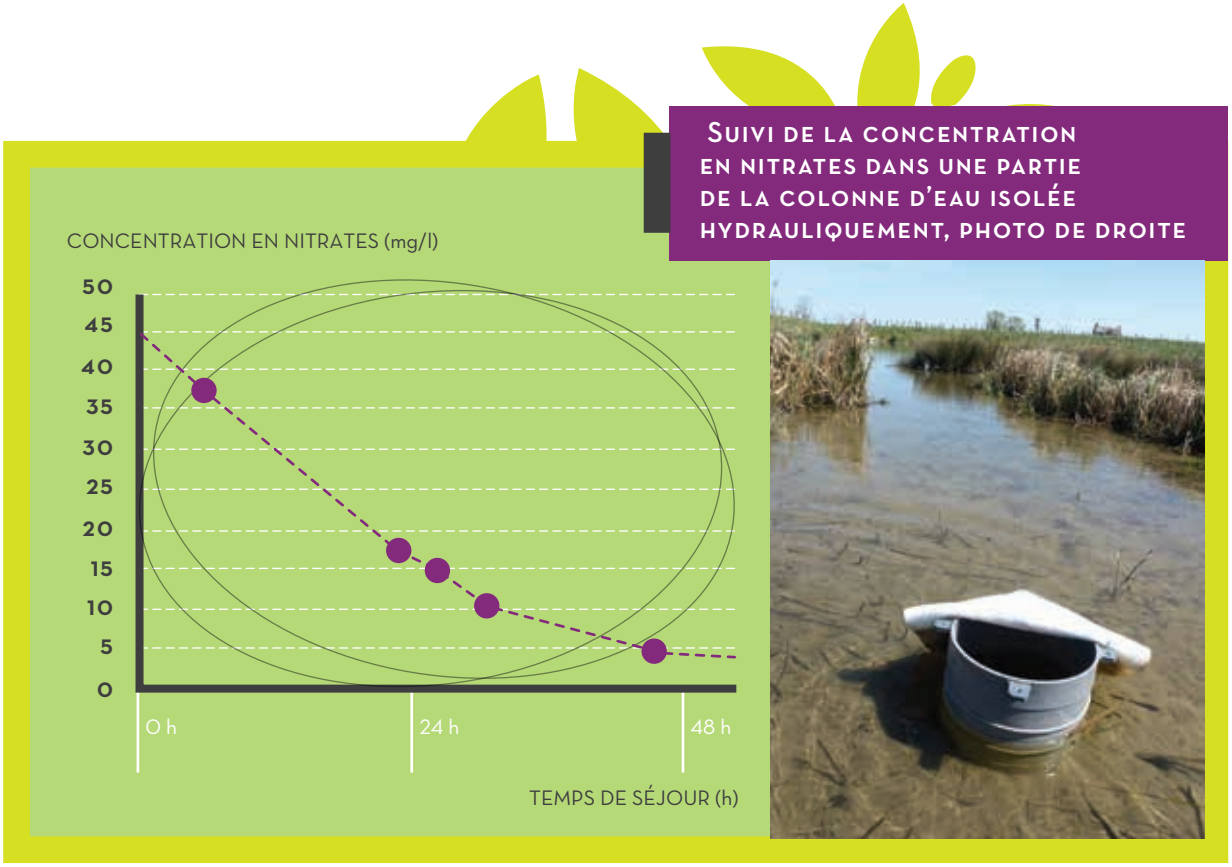


FIGURE 16

PULOU, 2011

Les phénomènes d'élimination des nitrates dans les ZTHA sont favorisés par la présence de macrophytes (voir par exemple Bastviken *et al.*, 2009). Ceux-ci sont généralement classés en fonction de leur forme de croissance par rapport à la surface de l'eau (Srivastava *et al.*, 2008) : immergés, flottants, émergés, ou encore émergés rampants. En plus de l'assimilation des nutriments, la présence des macrophytes favorise de façon indirecte les processus d'élimination de l'azote (dénitrification principalement) mais qui apparaissent en proportion supérieure aux prélèvements par les plantes. Les macrophytes peuvent ainsi influencer de façon importante l'élimination des nitrates en apportant la matière organique nécessaire à la dénitrification. Des exsudats racinaires (liquide excrété par les racines des végétaux) peuvent constituer un apport important de carbone organique directement assimilable (Heffernan et Cohen, 2010). La décomposition des macrophytes représente souvent le principal apport de matière organique. Enfin, la présence de macrophytes dans les eaux courantes modifie également les écoulements et crée localement des conditions plus favorables à la sédimentation des particules organiques (voir par exemple Kleeberg *et al.*, 2010). Les performances épuratoires des ZTHA sont variées. Différents auteurs ont rapporté les taux d'élimination qu'ils ont trouvé dans la littérature scientifique (voir par exemple Vymazal, 2006), allant de presque nuls jusqu'à plusieurs grammes NO3- N/m^2/jour. Une expérience in situ de Pulou (2011) montre qu'en pleine période végétative, en mai 2011, la dénitrification benthique permet de réduire la concentration en nitrates de 44 mg/L à 5 mg/L en 48h **(FIGURE 16)**. Ce temps relativement rapide est dû à deux facteurs : la température (20°C lors de l'expérimentation) et une vitesse nulle de l'écoulement (comme le montre l'illustration associée à la **FIGURE 16)**. Il est évident que si ces deux facteurs sont différents, l'efficacité épuratoire sera plus faible, voire quasiment nulle pendant la période hivernale. La formalisation classiquement retenue de la réaction peut être modélisée par une cinétique d'ordre 1 (Kadlec, 2011). Cette cinétique a pour conséquence une dépendance de la performance à la concentration initiale.

4.2 Les pesticides

Les pesticides peuvent être éliminés de la colonne d'eau par des processus de transfert et de transformation (Gregoire *et al.*, 2008 ; Imfeld *et al.*, 2009). Cependant le nombre de pesticides appliqués aux champs est très important, et chacun a sa propre voie de dégradation. Les paragraphes suivants présentent les voies de dégradation les plus fréquentes. D'un point de vue devenir dans l'environnement, un pesticide est caractérisé par deux propriétés principales : le Koc (répartition de la molécule de la phase liquide à la phase solide, plus communément appelée adsorption / désorption) et sa demi-vie DT50 (le temps nécessaire en conditions contrôlées pour diminuer de moitié la concentration initiale). Ces informations peuvent être consultées sur le site AgriTox (http://www.dive.afssa.fr/agritox/index.php), par exemple.

Le transfert des pesticides de la colonne d'eau vers des surfaces solides correspond aux phénomènes d'adsorption. Les surfaces solides présentes dans les ZTHA où ce processus peut avoir lieu incluent les sédiments (Runes *et al.*, 2003). Toutefois, la végétation morte et vivante ou les massifs filtrants ajoutés dans certaines ZTHA peuvent aussi être considérés comme support potentiel d'adsorption (Passeport *et al.*, 2010). Des taux d'adsorption de 55% pour le chlorpyrifos (Moore *et al.*, 2002) et 28% pour le fipronil (Peret *et al.*, 2010), 50% pour le S-Métolachlor (Hoyos, 2011) ont été observés sur le système sédiment / colonne d'eau de la ZTHA. Le processus d'adsorption peut toutefois être réversible, notamment pour les molécules présentant une forte solu-

Bilan de masse obtenu en expérimentation en microcosme reconstituant une ZTHA pour le S-Métholachlore

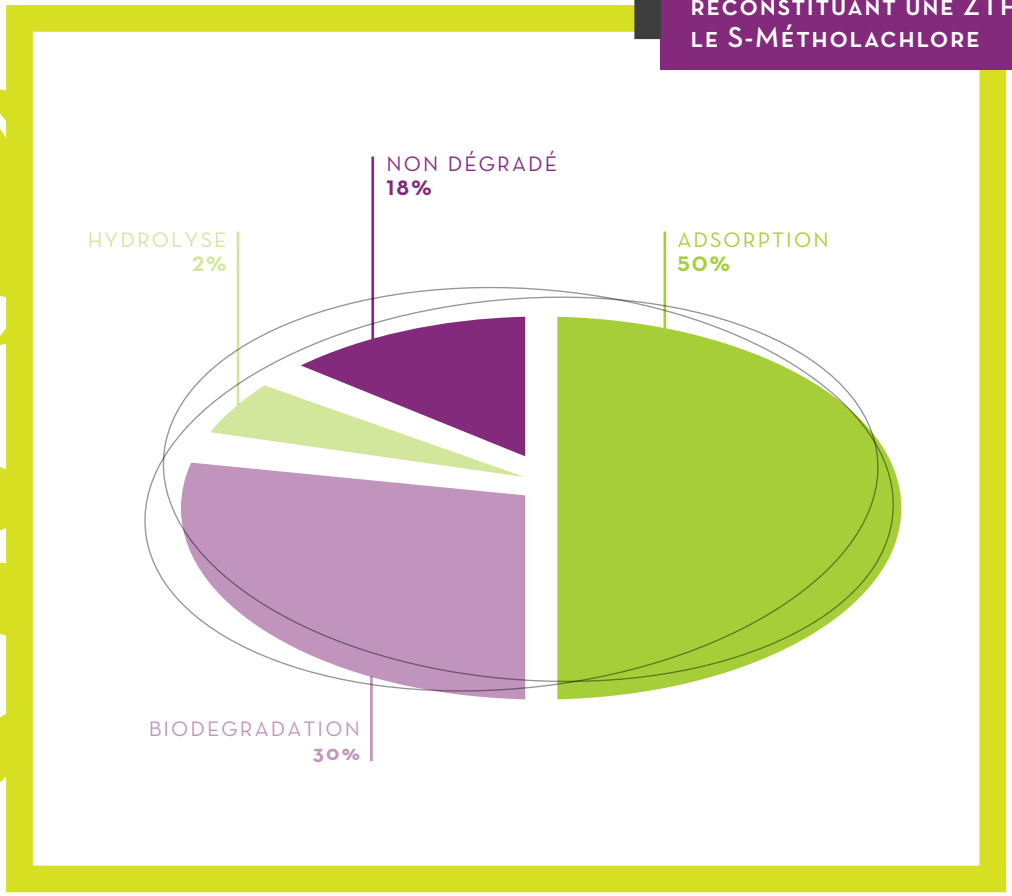


FIGURE 17 HOYOS, 2011

bilité ou un faible coefficient d'adsorption. Dans ce cas, le phénomène inverse, la désorption, provoque le retour des molécules adsorbées dans la colonne d'eau. Le processus d'adsorption/désorption ne doit donc être considéré que comme un phénomène temporaire qui permet toutefois le retard du transfert des pics de concentrations de pesticides au travers de la ZTHA et l'atténuation des pics de concentrations.

Les processus de transformation sont ceux conduisant à de nouvelles molécules (métabolites ou sous-produits de dégradation) issues de la molécule, dite «parente», de pesticides dont certaines liaisons ont été coupées. Les molécules ainsi formées, bien que généralement moins toxiques que les molécules parentes, peuvent toutefois présenter elles-mêmes de fortes propriétés toxiques, comme le montrent les valeurs de la base de données AgriTox. Comme dans le sol, la dégradation des pesticides dans les ZTHA peut avoir lieu sous l'effet de la lumière (photodégradation), des molécules d'eau (hydrolyse), ou des micro-organismes (biodégradation) (Calvet *et al.*, 2005). La photodégradation sera favorisée pour des faibles hauteurs d'eau n'atténuant pas trop fortement les rayons solaires.

Les procédés microbiens de dégradation des pesticides semblent dominer dans les ZTHA (Reddy et Dangelo, 1997 ; Hijosa-Valsero *et al.*, 2010). La biodégradation des pesticides est généralement plus importante en milieu aérobie qu'anaérobie. Les sédiments des zones humides sont plutôt sous des conditions réductrices. Toutefois, des zones aérobies subsistent notamment dans la rhizosphere (Mitsch and Gosselink, 2000). L'alternance entre la présence et l'absence d'eau, qui peut faire partie d'un mode de gestion choisi, permet ainsi la mise en place de conditions réductrices et oxydantes successives résultant en différentes réactions d'oxydo-réduction (McBride, 1994). La **FIGURE 17** présente le bilan de masse en laboratoire, sur un substrat eau-sédiment (prélevés dans une ZTHA) de la molécule S-métolachlor (Koc : 226 g/cm^3 DT50 eau / sédiment : 40 jours). Chaque voie principale de dégradation a été isolée afin d'être quantifiée. L'expérimentation a eu une durée de 40 jours, (Hoyos, 2011). Les phénomènes d'adsorption ont été quantifiés pour 50% de la rétention, suivis par la biodégradation pour 30%, l'hydrolyse pour 2%.

18% du S-Métolachlore était toujours présent dans la colonne d'eau après 40 jours d'expérimentation. Cette expérience démontre le potentiel des sédiments de ZTHA pour dissiper les pesticides. Elle montre également que, même en situation optimale, le 100% ne peut pas être un objectif réaliste.

5. ASPECT TEMPOREL

Le temps est l'allié de la dégradation des polluants dans une ZTHA. Les mécanismes décrits ci-dessus que ce soient pour les nitrates ou pour les pesticides nécessitent un temps de résidence qui peut varier de 5 jours pour les nitrates à plusieurs semaines pour certains pesticides (par exemple, la DT50 de l'atrazine est de 105 jours). L'augmentation du temps de rétention de l'eau permet d'obtenir de meilleurs abattements des polluants, car l'eau reste plus longtemps en contact avec les sites de dégradation. L'augmentation du temps de rétention implique cependant, soit une augmentation de la surface de la zone humide, soit une augmentation de la hauteur d'eau au-dessus du sédiment, ou encore une diminution des vitesses. Comme les ZTHA sont en général établies sur une surface donnée fixe, seules les deux dernières possibilités sont ajustables. En outre, des variations saisonnières de dégradation ont été observées par de nombreux auteurs dans des cours d'eau et des zones humides naturelles ou artificielles, avec des valeurs plus élevées en été qu'en hiver, liées aux variations saisonnières de température (voir par exemple Böhlke *et al.*, 2009).

La gestion hydraulique de la ZTHA permet de contrôler le temps de résidence de l'eau. Cependant, dans le cas des eaux de drainage, les débits de drainage sont fortement variables et climato-dépendantes, contrairement aux cas du traitement des eaux usées. Il convient alors d'intégrer cet élément dans la gestion hydraulique. Le temps de résidence dépendra du débit d'entrée, et du volume de la ZTHA disponible. La hauteur de la colonne d'eau étant généralement inférieure à 1 m afin de favoriser l'implantation de la végétation, un problème foncier se pose quant à la gestion du volume. Une géométrie adaptée et la présence des végétaux permettent d'assurer une dispersion de l'écoulement et ainsi de réduire très fortement la vitesse, pour augmenter le temps de contact avec les sédiments.

VARIABLES CLASSÉES COMME DOMINANTES DANS LES PROCESSUS DU DEVENIR DES NITRATES DANS 57 ZONES HUMIDES ÉTUDIÉES.

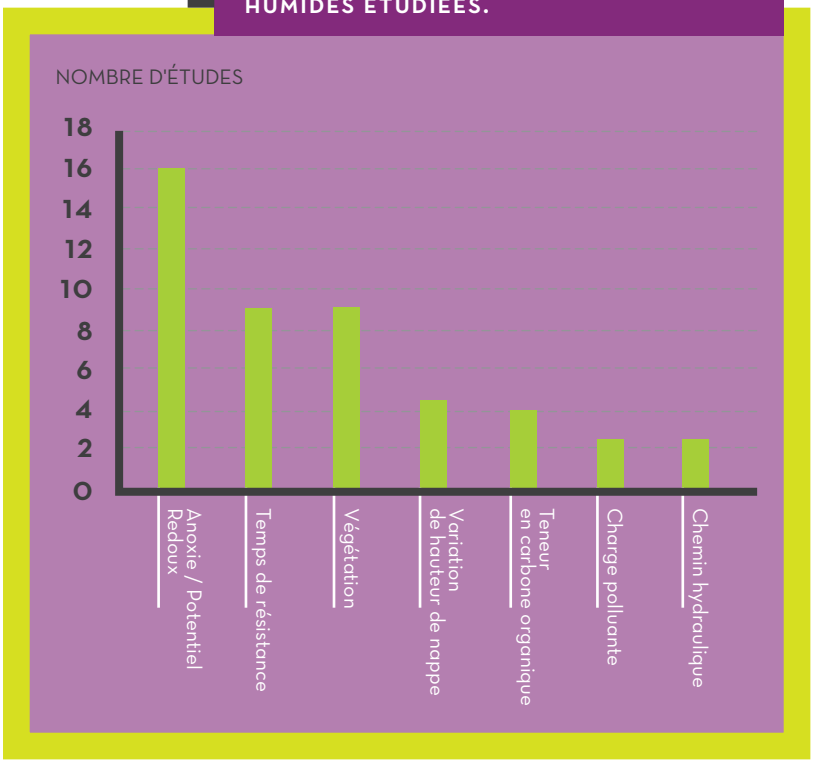


FIGURE 18 ADAPTÉ DE FISHER ET ACREMAN, 2004

6. ACTION D'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE

De nombreux paramètres peuvent donc influencer les performances d'élimination des polluants des ZTHA. Ces paramètres varient suivant les systèmes considérés, et les conditions d'élimination peuvent ainsi être plus ou moins favorables. Dans certains cas les conditions sont contrôlées et peuvent être optimisées pour une efficacité maximale. Fisher et Acreman (2004) ont synthétisé 57 études publiées sur les zones humides, portant sur l'élimination des nitrates mais pouvant s'appliquer aussi aux cas des pesticides. Ils ont relevé les paramètres considérés comme dominants **(FIGURE 18)** : les conditions chimiques sont les plus citées, suivies du paramètres « temps de résidence », puis de la présence de végétation.

A partir de ces éléments bibliographiques et des échanges entre les différents acteurs (chercheurs, agriculteurs, gestionnaires), plusieurs principes émergent pour la conception des ZTHA :

- bénéficier des services écosystémiques (rétention et dégradation naturelles des polluants) ;
- favoriser la rusticité de l'aménagement (simplicité des ouvrages en ayant recours au minimum de génie civil) et maintenance réduite ;
- réduire l'emprise foncière à sa portion minimale (environ 1% du bassin versant).

7. COMMENT S'INTÈGRENT LES ZTHA DANS LE BASSIN VERSANT ?

Selon les objectifs définis dans le plan d'action pour la réduction de la pollution diffuse (objectif nitrate ou pesticide), on distingue deux types de gestions hydrauliques des ZTHA basées sur la dynamique d'exportation des pesticides ou sur celle des nitrates **(FIGURE 19)**. Dans le cas où l'on cherche à réduire la concentration en nitrates dont les flux ont lieu avec tous les écoulements de drainage, la ZTHA pourra être prioritairement placée en continuité avec l'exutoire (stratégie dite en série). Dans ce cas, l'ensemble des eaux drainées transite dans la ZTHA. Cette configuration sera moins efficace pour les pesticides en raison d'une dilution trop importante. Ce cas a été étudié pendant 3 ans sur le site de Chantemerle en Seine et Marne. Une synthèse est disponible (Fesneau *et al.*, 2010). Le ratio de volume de ZTHA par rapport à la surface du versant connecté est de 300 m^3 par hectare drainé.

Schéma des stratégies en série, et en parallèle de gestion des eaux en sortie de système drainé (basé sur les expérimentations de Chantemerle, en Seine et Marne, et de Bray en Indre et Loire)

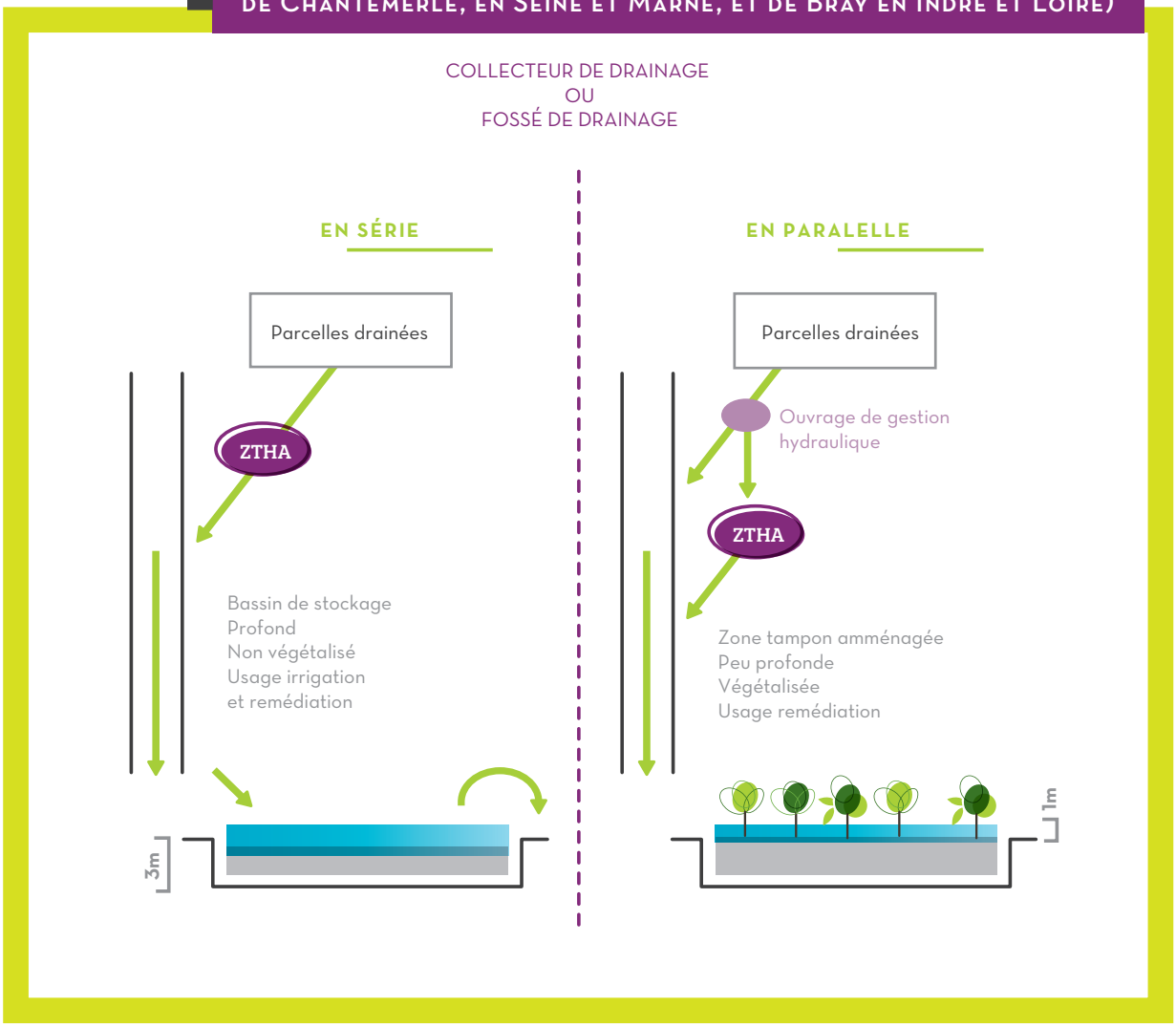


FIGURE 19 IRSTEA

Dans le cas où l'on s'attache à réduire la concentration en pesticides, la connaissance de leur dynamique saisonnière est essentielle. Généralement, les plus gros flux ont lieu consécutivement aux applications qui sont réalisées à la fin de l'automne et au début du printemps. Dans ces conditions, un dispositif placé en parallèle de l'exutoire (soit d'un collecteur, soit d'un fossé), associé à une gestion hydraulique dynamique, par l'installation par exemple d'un simple vannage, permettra d'intercepter les eaux les plus chargées. L'implication de l'agriculteur pour la gestion hydraulique est essentielle car il connaît précisément ses itinéraires techniques et donc les périodes les plus sensibles. Cette configuration aura aussi un impact positif sur les nitrates, mais limité en raison des plus courtes périodes d'interception des eaux de drainage au cours de la saison. Cette configuration a été testée et évaluée pendant le projet Life ArtWET, de 2006 à 2010 (Passeport, 2010). Le ratio de volume de ZTHA par rapport à la surface du versant connecté est de 7 m^3 par hectare drainé.

8. LOCALISATION

Considérant la dynamique des concentrations dans un versant drainé, nous recommandons une mise en place de ZTHA à la sortie de groupement de parcelles drainées pour environ 100 ha. Une connaissance préalable des réseaux de collecteurs enterrés est nécessaire pour positionner au mieux la ZTHA en situation d'interception des flux. Sur le terrain, en tenant compte d'une acceptation des aménagements par les agriculteurs, il peut être conseillé de privilégier les zones non cultivées du bassin versant et de répartir l'effort foncier sur l'ensemble des acteurs. Les localisations potentielles peuvent être soumises à de fortes modifications dans une deuxième étape de faisabilité basée sur des aspects plus techniques.

9. LES ÉTUDES GÉOTECHNIQUE ET TOPOGRAPHIQUE

L'étude géotechnique est une phase nécessaire pour identifier les différentes strates du sol et apprécier leur étanchéité naturelle. La qualité du sol définira si une importation d'argile est nécessaire. On privilégiera les sols limoneux à limono argileux, sols qui se rencontrent classiquement parmi les sols hydromorphes dans le contexte du drainage. Le compactage peut se faire par simple passage d'engins. Si une étanchéité artificielle par géomatériau est requise, la géomembrane (PEHD ou EPDM) doit résister aux rayonnements ultraviolets et devra être recouverte d'au moins 200 mm de sol afin d'éviter la perforation par les racines et de fournir un substrat pour la végétation. Compte tenu des coûts d'une telle étanchéité, cette solution est plutôt réservée aux aménagements industriels.

La gestion des volumes d'eau issue des crues impose des contraintes topographiques. En considérant que l'augmentation du temps de séjour peut être réalisée en augmentant la taille ou le volume des ZTHA, que les hauteurs d'eau généralement conseillées pour maintenir une végétation de type macrophyte, sont de l'ordre de 0,5 à 0,9 m, il est nécessaire de pouvoir bénéficier d'un dénivelé d'au moins 0,5 m (l'idéal étant 1 m). En secteur drainé, relativement plat, de nombreux sites ont été exclus des sites potentiels, car ne répondant pas à ces contraintes techniques.

Lorsque la disponibilité foncière de la terre est faible, il est possible de mettre en place des digues de façon à augmenter le chemin de l'eau au travers des ZTHA (Persson, 2000). Il est important d'éviter de positionner de front les structures d'entrée et de sortie des écoulements ce qui limiterait l'utilisation de certaines zones de la ZTHA (exemple en **FIGURE 21**).

10. VÉGÉTATION ET MAINTENANCE

La plantation des ZTHA après leur construction permet d'accélérer la colonisation par la végétation et ainsi favoriser la mise en place des fonctions qui lui sont associées. Toutefois, il faut éviter de créer des «patch» de végétation, notamment en bordure de la ZTHA, ce qui favoriserait les court-circuits hydrauliques au centre de la ZTHA. Par principe d'auto-organisation, la ZTHA développera sa propre dynamique de végétation comme le montre la **FIGURE 21**. L'entretien sera minimum considérant que la végétation en décomposition sera source de carbone, propice aux processus de biodégradation aussi bien pour les nitrates que pour les pesticides. Toutefois après une période longue, la nécessité de procéder à un curage ne peut être exclue du fait de notre retour d'expérience trop limité dans le temps pour y répondre.

11. DIMENSIONNEMENT – EFFICACITÉ

A ce jour, les règles d'ingénierie pour le dimensionnement ne sont pas encore produites. La bibliographie présente un ratio empirique de surface de ZTHA sur une surface de versant contributif de 1% (Moreno *et al.*, 2009). Le retour d'expérience des travaux d'Irstea montre un raisonnement plutôt axé sur un volume de stockage de crues typiques pendant les périodes de transfert par unité de bassin versant drainé. Dans les deux exemples que nous exploitons, ces ratios valent 300 m^3/ ha drainé pour le cas en série, et 7 m^3/ ha drainé pour le cas en parallèle. Le ratio optimal devant se situer entre les 2, plutôt proche de 100 m^3/ ha drainé. Des travaux sont en cours pour apporter des réponses.

Nous pouvons néanmoins apporter des éléments de réflexion quant à l'efficacité mesurée sur les nitrates et les pesticides. Sur la ZTHA en série, une réduction de 50% du flux annuel des nitrates a été mesurée entre 2007 et 2010, ce qui représente une élimination équivalente à 13 kg N/ ha. Concernant les pesticides, les résultats présentés dans la **FIGURE 22** (le détail des résultats est présenté dans Tournebize *et al.*, 2013) montrent

EXEMPLE DE PLAN D'UNE ZTHA AVEC INTERCEPTION DU COLLECTEUR DE DRAINAGE EN AMONT, INSERTION DE DIGUETTES

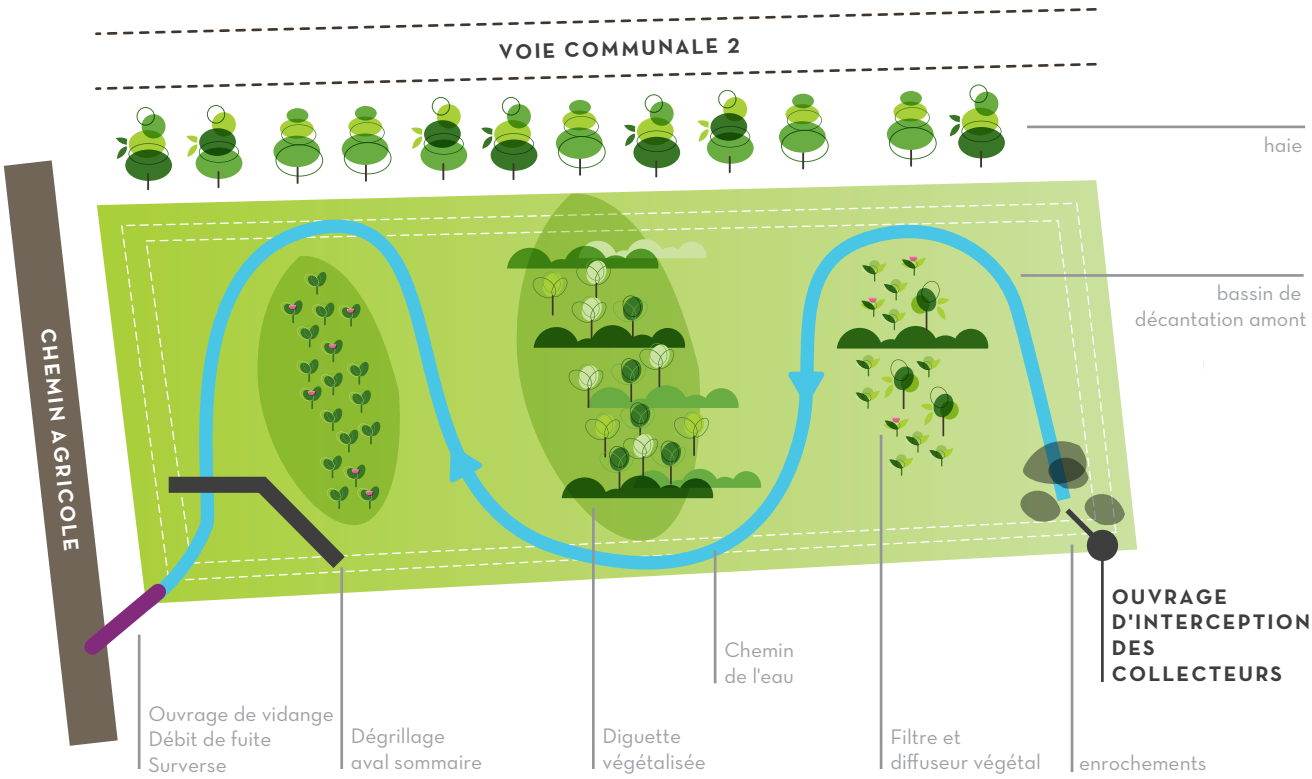


FIGURE 20

AQUI'BRIE / CIAE / IRSTEA

EVOLUTION DE LA VÉGÉTATION DE LA ZTHA ENTRE 2007 ET 2010 (SITE DE BRAY, PROJET ARTWET)

FIGURE 21

IRSTEA

une efficacité moyenne globale de 52% et 40% pour les configurations en série et en parallèle. Il est à noter deux points importants : 1) l'efficacité varie de 10 à 100% selon les molécules (quantité et propriétés physico-chimiques), la généralisation est ainsi difficile à établir ; 2) pour un bassin versant équivalent, la solution en parallèle présente une efficacité comparable pour une emprise foncière plus réduite (7 m^3/ ha drainé contre 300 m^3/ ha drainé pour la configuration en série).
Il apparait des résultats présentés que la solution des ZTHA a un fort potentiel pour réduire les transferts des nitrates et pesticides, mais qu'elles ne garantissent pas une efficacité à 100%. Les ZTHA doivent compléter les actions classiques de modifications des pratiques agricoles comme la réduction des intrants. Ce sont bien l'association des deux modes d'action qui permettront de réduire sensiblement les transferts de polluants agricoles dans les bassins versants. Ainsi proposer un aménagement foncier à vocation environnementale pourrait s'avérer une solution utile pour restaurer les fonctionnalités perdues et préserver la qualité des eaux dans les bassins versants.

Le ratio optimal devant se situer entre les 2, plutôt proche de 100 m^3/ ha drainé.

Efficacités moyennes et écarts types, pour les pesticides, comparées des ZTHA selon la configuration de gestion des eaux : en série ou en parallèle. Données acquises sur 2 sites expérimentaux gérés par Irstea (période 2007-2010)

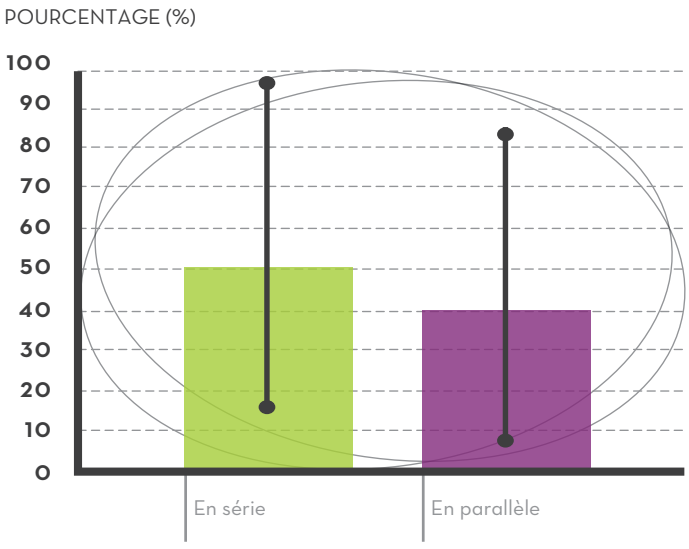


FIGURE 22

4 Perspectives et freins

Nous avons retenus trois points qui nécessitent des investigations approfondies. Le premier concerne le devenir des pesticides adsorbés et des métabolites dans le système sédiment / végétation de la ZTHA. Existe-t-il un seuil d'accumulation des pesticides adsorbés sur les sédiments, et représentent-ils une menace à long terme ? Les sous-produits de dégradation, comme les métabolites, sont-ils plus ou moins toxiques que les molécules mères ? Concernant les nitrates, si la dénitrification est la voie majoritaire de dissipation, la question des émissions des gaz à effet de serre, responsable en partie de changement global, est à étudier de près. Le processus est-il complet avec production de diazote ou incomplet avec production de protoxyde d'azote ? Mander *et al.*, 2013 ont mis en évidence, par une étude bibliographique, que les zones ripariennes et les zones humides en milieu agricole peuvent contribuer à l'émission de 0,03 à 34,1 mg CH4-C /m^2/h et de 0.002 à 0.28 mg N2O-N/m^2/h. Une gestion hydraulique adaptée permettrait-elle de réduire les émissions gazeuses ? Enfin le dernier point porte sur l'impact hydrologique des ZTHA si elles se généralisaient. L'évapotranspiration de la végétation des ZTHA modifierait-elle les écoulements à l'aval des aménagements et par conséquent le bilan hydrologique des bassins versants ?

Exutoire de la ZTHA végétalisée de Rampillon (Seine et Marne)

FIGURE 23 IRSTEA

4

AMÉLIORER LE TRAITEMENT DES REJETS LOCALISÉS ET DIMINUER LEURS IMPACTS SUR LES MILIEUX AQUATIQUES RÉCEPTEURS : LE CAS DES ZONES DE REJET VÉGÉTALISÉES

Voir les fiches retours d'expériences se rapportant à cette partie au point 2 du chapitre 4 de l'ouvrage (p.171 à 205)

1 Contexte et enjeux

Le traitement des rejets localisés, qu'ils soient d'origine industrielle ou urbaine, a fait d'énormes progrès en France depuis la première loi sur l'eau de 1964 et la mise en place des agences de l'eau (Rakedjian, 2012). La qualité des milieux naturels s'est améliorée. Pourtant des efforts sont encore nécessaires pour atteindre les objectifs de la DCE.

Les raisons à cet état de fait sont multiples :

- augmentation des pressions anthropiques sur les milieux ;
- importance des rejets diffus, non traités par les stations d'épuration ;
- etc..

Pour améliorer cette situation, l'une des voies est à rechercher auprès de la réduction à la source des polluants par des usages mieux maitrisés (voir par exemple le paragraphe sur le contrôle à la source des rejets diffus d'origine agricole, ou celui sur la gestion des eaux pluviales urbaines).

Il est également possible d'essayer de réduire davantage l'impact des rejets localisés. Différentes solutions, utilisant des approches inspirées de l'ingénierie écologique, peuvent être mises en œuvre pour atteindre cet objectif.

Il peut s'agir de stations d'épuration de type extensif comme les filtres plantés de roseaux ou les lagunages, ou d'aménagements qui complètent les stations comme les zones de rejet végétalisées.

Certaines de ces solutions sont anciennes et utilisées depuis très longtemps (lagunes par exemple), d'autres sont plus récentes (filtres plantés de roseaux par exemple).

Nous traiterons tout d'abord des grands principes à appliquer pour utiliser l'ingénierie écologique au traitement des rejets localisés, puis nous illustrerons notre propos par l'exemple des Zones de Rejets Végétalisés (ZRV), dont l'utilisation se développe depuis quelques dizaines d'années.

2 Grands principes à appliquer

1. S'APPUYER SUR DES PRATIQUES DE GESTION INSPIRÉES DES MÉCANISMES QUI GOUVERNENT LES SYSTÈMES ÉCOLOGIQUES

Ce principe s'applique naturellement dans la mesure où on utilise justement des mécanismes biologiques pour épurer l'eau.

2. NE PAS DÉGRADER ET/OU CONTRIBUER AU MAINTIEN OU À LA RESTAURATION DU BON FONCTIONNEMENT DES MILIEUX AQUATIQUES

C'est la fonction même des dispositifs d'épuration de diminuer la charge de pollution rejetée et donc de contribuer à limiter la dégradation des milieux aquatiques qui reçoivent les polluants. On peut donc considérer que tous les dispositifs répondent à ce principe.

Si l'on se place du point de vue des milieux récepteurs, l'apport localisé important que constitue le rejet d'une station d'épuration dans un milieu récepteur peut néan-

moins constituer un facteur de dégradation de sa qualité. De plus, les niveaux de rejets s'expriment actuellement presque uniquement en termes de polluants conventionnels (DCO, DBO5, MES, Azote, Phosphore), même s'ils pourraient, à l'avenir et dans des situations très spécifiques être complétés par des exigences sur les micropolluants usuels (métaux toxiques) ou émergents (résidus médicamenteux, produits de dégradation des pesticides, etc.).

Une possibilité d'amélioration consiste à multiplier les points de rejets et à partager la charge résiduelle de façon à l'adapter à la capacité de chaque milieu ou de chaque tronçon de cours d'eau à la recevoir. Cette mise en œuvre a des conséquences importantes en termes de risques et de coûts.

Une autre possibilité consiste à améliorer la qualité finale de l'eau arrivant au milieu naturel, en insérant des dispositifs de traitement supplémentaire entre la station et le milieu aquatique. C'est l'objet des zones de rejets végétalisés qui sont présentées plus en détail dans la suite de ce paragraphe.

3. MINIMISER LES INTERVENTIONS LOURDES ET COÛTEUSES D'ENTRETIEN

Nous avons volontairement limité l'appellation « ingénierie écologique » aux procédés d'épuration capables de fonctionner sur la durée sans nécessiter de procédés mécaniques ou d'utilisation d'énergie externe. L'entretien de tels dispositifs est donc normalement facilité par rapport aux stations d'épuration classiques du fait de la nature moins technique des tâches à réaliser.

Cependant, même si le dimensionnement des systèmes extensifs doit permettre de fonctionner en limitant les opérations lourdes d'entretien, il reste la nécessité d'exporter régulièrement tout ou partie de la matière organique (par exemple par faucardage de la végétation).

Un autre point délicat concerne l'accumulation possible de boues issues du procédé d'épuration, et donc la nécessité de les curer de façon régulière. Cette opération est nécessaire et doit être réalisée en respectant le cadre réglementaire. Le devenir de ces boues est également à prévoir (plan d'épandage) dès la conception de l'aménagement. Outre les frais associés au curage proprement dit, cette opération doit être menée avec précaution pour ne pas nuire au fonctionnement du dispositif.

4. INSCRIRE LE PROJET DANS UNE POLITIQUE TERRITORIALE ET LE TRAITER À LA BONNE ÉCHELLE SPATIALE

La logique d'adaptation de la charge au milieu, déjà exprimée dans les paragraphes précédents, montre l'utilité d'une approche globale de la gestion des rejets à l'échelle d'un territoire de taille suffisante. Plutôt que de considérer chaque point de rejet isolément, il s'agit de gérer au mieux un milieu aquatique.

Il est pour cela nécessaire, d'une part de regarder quelles sont les capacités des milieux à recevoir des charges polluantes résiduelles sans être trop perturbés et, d'autre part, de s'interroger sur l'ensemble des sources de polluants ponctuelles, mais aussi diffuses, comme le préconise la réglementation et les agences de l'eau depuis plus de 15 ans.

Des dispositifs comme les SAGE ou les contrats de rivière constituent probablement des outils utiles pour savoir quels types de dispositifs d'assainissement construire et où les positionner.

Une autre possibilité consiste à améliorer la qualité finale de l'eau arrivant au milieu naturel, en insérant des dispositifs de traitement supplémentaire entre la station et le milieu aquatique.

5. PERMETTRE AU MILIEU DE TENDRE VERS UN ÉQUILIBRE ET DE S'AUTO-ORGANISER

Le dispositif doit être conçu pour permettre la constitution d'un équilibre entre les flux entrants et les flux sortants. Ceci suppose que l'ouvrage ne soit pas considéré uniquement comme un objet technique destiné à épurer l'eau, mais aussi comme un système écologique ayant ses besoins propres. L'écologie n'étant pas encore une science exacte, il est nécessaire de laisser le temps au système, pour qu'il s'auto-organise et en particulier pour que les communautés végétales et bactériennes qui s'y développe s'adaptent aux charges de pollution à traiter et au régime hydraulique des apports. Un risque important concerne l'accumulation de matière organique générant une désoxygénation associée.

6. INTÉGRER LE SUIVI DES PERFORMANCES DÈS LE DÉBUT DE L'OPÉRATION

L'efficacité des ouvrages extensifs d'épuration, et en particulier le mantien de leur efficacité au cours du temps, est largement démontré sous réserve de la réalisation des tâches d'exploitation mentionnées précédemment. Pour les aménagements plus récents de type ZRV, cette efficacité reste encore incertaine. Un suivi sur la durée des performances est nécessaire. Ce suivi doit en particulier évaluer :

- l'évolution des performances en termes d'épuration supplémentaire ;
- les tâches d'entretien associées au niveau de performances attendu.

3 Outils et réalisation

Comme indiqué plus haut, nous développerons ici le cas des zones de rejets végétalisées qui constituent sans doute l'innovation la plus marquantes en tant que dispositifs potentiels de traitement supplémentaire issu de l'ingénierie écologique.

1. QU'EST-CE QU'UNE ZONE DE REJET VÉGÉTALISÉE ?

Une Zone de Rejet Végétalisée (ZRV) est un espace aménagé entre la station de traitement des eaux usées et le milieu récepteur des eaux usées traitées ; cet aménagement ne fait pas partie de la station de traitement des eaux usées.

Les ZRV sont des ouvrages de traitement extensifs qui connaissent depuis quelques années un développement très important.

> Visant à apporter une protection supplémentaire au milieu récepteur de surface, les ZRV répondent aux principes de finalité de l'ingénierie écologique, mettent en œuvre les processus naturels des écosystèmes. Une démarche fondée sur une approche scientifique et technique rigoureuse dans la conception, la réalisation et l'évaluation des projets, est en cours de construction.

Les ZRV sont perçues de façon différente selon les acteurs et les attentes prioritaires qui leurs sont assignées : entre espace naturel, espace aménagé et espace technique.

Elles sont situées après la station d 'épuration et n'en font pas partie, en particulier les objectifs de qualité réglementaires restent imposés au rejet de la station d'épuration ;

Elles sont situées avant le milieu récepteur et ne constitue pas une zone naturelle. En particulier, une Zone de Rejets Végétalisée ne doit pas être confondue avec une zone humide « naturelle ». Les zones humides répondent en effet à une identification stricte conduisant à les inventorier, les protéger, les restaurer et les valoriser (Ministère en charge de l'écologie, 2009).

Les Zones de Rejet Végétalisées (ZRV) sont des réalisations simples, souvent construites sur un sol en place, utilisant les trois compartiments sol-végétal-eau et qui se caractérisent par :

- l'utilisation des végétaux, le plus souvent aquatiques mais éventuellement aussi terrestres, naturellement présents ou implantés ;
- une implantation à proximité de la station d'épuration, dans l'espace restant disponible après la construction de cette dernière.

A ce jour, elles ne font pas partie du Système de Traitement des Eaux Usées (STEU), la conformité du rejet étant établie à la sortie de la station d'épuration (en amont de la ZRV). Néanmoins, les ZRV visent à améliorer/restaurer/conserver la qualité du milieu récepteur, par infiltration d'une partie des eaux traitées et en réalisant un traitement supplémentaire des eaux épurées. Il convient donc de développer une approche scientifique et technique rigoureuse afin d'évaluer les performances

des systèmes existants vis-à-vis de l'ensemble des objectifs pouvant leur être assignés (infiltration, traitement, désinfection, production de biomasse, etc.), de mieux comprendre leur fonctionnement afin de pouvoir élaborer des règles de conception, de dimensionnement et de gestion technique de ces ouvrages.

A titre d'illustration, l'application de la DCE pourrait quelquefois nécessiter une réduction complémentaire de certaines substances chimiques (micropolluants) pour respecter certains seuils de qualité des cours d'eau. Des systèmes «naturels» et post-épuratoires telles que les ZRV pourraient ainsi présenter un intérêt majeur dans ce cadre.

A ce volet scientifique et technique est associée une composante sociologique nouvelle : les ZRV sont des vitrines pour les maîtres d'ouvrage, qui leurs permettent de communiquer de manière très efficace sur leur action en termes d'épuration des eaux, d'écologie, de biodiversité, etc..

Il est parfois relevé une similitude entre les ZRV et les aménagements développés dans le monde agricole pour retenir les éventuels produits d'usage agricole et dénommés « zones tampons » ou « bandes enherbées ». Bien qu'il s'agisse dans les deux cas de réalisations simples, utilisant les trois compartiments sol-végétal-eau, leurs régimes hydrauliques sont fondamentalement différents, celui des ZRV étant régulier, continu et souvent d'importance, et celui des « zones tampons » étant irrégulier et discontinu en fonction des épisodes pluvieux.

2. COMBIEN Y-A-T-IL DE ZRV EN FRANCE ?

Un atelier sur le thème des ZRV a été créé au sein du groupe de travail portant sur l'Evaluation des Procédés Nouveaux d'Assainissement des petites et moyennes Collectivités (EPNAC), dont la mission principale consiste à encadrer le développement des filières en produisant et diffusant des documents ressources en matière de traitement des eaux usées et des boues (http://epnac.irstea.fr).

Dans le cadre de cet atelier, un travail d'enquête auprès des conseils généraux a été conduit en 2011 dans le but de recenser le parc des ZRV, d'évaluer la diversité des ouvrages pour en établir une typologie et identifier ceux pouvant être aménagés pour faire l'objet d'un suivi visant à évaluer leur efficacité. Les résultats sont disponibles depuis peu (Prost-Boucle *et al.*, 2012).

Plus de 400 ZRV ont été recensées, réparties dans la cinquantaine de départements ayant répondu à l'enquête. Leur développement date d'une petite dizaine d'années avec un pic en 2008, année pour laquelle près de soixante unités ont été recensées (**FIGURE 24**). Les zones d'infiltration ordinaires (implantées en l'absence d'exutoires de surface) n'ont pas été prises en compte.

EVOLUTION DU NOMBRE DE ZRV MISES EN ROUTE ANNUELLEMENT

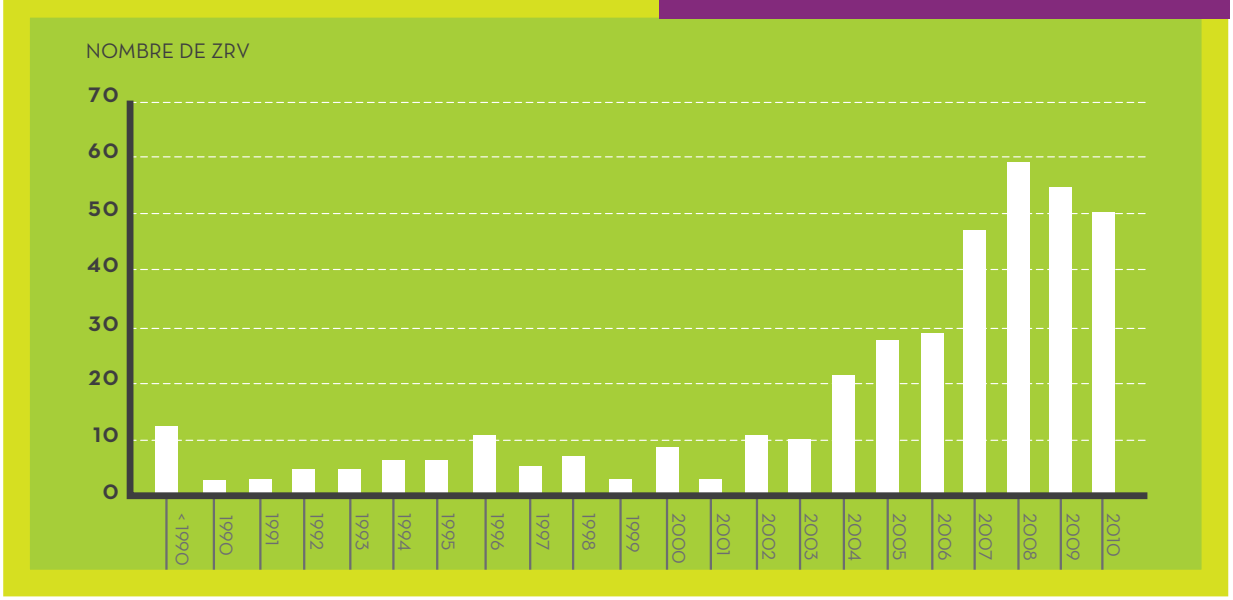


FIGURE 24 PROST-BOUCLE S. *ET AL.*, 2012

Chacun de ces trois compartiments « sol-plante-eau » peut contribuer à réduire la quantité d'eaux rejetées directement et à améliorer la qualité des eaux traitées. Il s'agit donc bien de mobiliser des processus naturels des écosystèmes, ce qui est conforme à un principe de l'ingénierie écologique.

L'installation de ZRV concerne essentiellement les stations d'épuration de petite taille, avec 50 % de l'effectif pour des ouvrages de moins de 500 Equivalent-Habitants (EH). Il existe cependant près d'une quinzaine d'ouvrages installés à l'aval de stations d'épuration de plus de 10 000 EH, dont une de 330 000 EH.
Cette enquête a révélé :

- une extrême variété des types de ZRV ;
- une extrême variabilité des emprises au sol (de 0,01 à 50 m^2/EH) : les surfaces des ZRV sont le plus souvent fonction de l'espace restant disponible après construction de la station d'épuration ;
- un objectif prioritaire affiché de réduction des volumes d'eaux usées rejetées (absence fréquente d'exutoire localisé). Les études préalables du sol et du sous-sol ne sont néanmoins disponibles que dans seulement 25 % des cas ;
- un objectif secondaire d'amélioration de la qualité du rejet vis-à-vis de nombreux paramètres (germes témoins de contamination fécale et micropolluants, phosphore, azote) ;
- parfois une bonne intégration paysagère donnant une impression plutôt positive de préservation globale de l'environnement ;
- parfois une source de nuisances plus ou moins importantes : qualité de rejet dégradée, graves affouillements mettant en péril les berges de la rivière, etc..

3. QUELS SONT LES DIFFÉRENTS TYPES DE ZRV?

La classification des ZRV proposée par l'atelier ZRV d'EPNAC s'appuie sur des éléments descriptifs du cœur de la partie qui reçoit les eaux, indépendamment des végétaux présents et des éventuels organes de distribution. Elle s'appuie sur deux critères majeurs :

- l'origine des matériaux utilisés : sol en place ou matériaux rapportés ;
- une description de la géométrie de la zone pour les ZRV utilisant le sol.

Une ZRV peut être décrite à l'aide d'un seul ou de plusieurs critères (**TABLEAU 1**).

4. COMMENT FONCTIONNE UNE ZRV ?

Les trois compartiments « sol-plante-eau » sont le siège de différents processus :

- le sol et le sous-sol sont le siège de processus d'infiltration (en lien avec leurs propriétés pédologiques, géologiques et hydrogéologiques) et de conversion des matières ;
- les végétaux, sont les sièges des mécanismes d'évapotranspiration et d'assimilation (en rapport direct avec leur activité végétative) ;
- l'eau superficielle libre ou qui ruisselle est le siège de mécanismes d'épuration, d'évaporation, de séparation des particules, de désinfection.

Chacun de ces trois compartiments peut contribuer à réduire la quantité d'eaux rejetées directement et à améliorer la qualité des eaux traitées. Il s'agit donc bien de mobiliser des processus naturels des écosystèmes, ce qui est conforme à un principe de l'ingénierie écologique.

5. A QUOI SERVENT LES ZRV ?

Les ZRV visent prioritairement à :

- réduire les volumes rejetés notamment en période d'étiage : infiltration dans le sol et sous-sol, évapotranspiration par le végétal, évaporation de l'eau libre ;
- retenir les matières en suspension par décantation dans la tranche d'eau libre ou par filtration superficielle dans le sol ;
- retenir les nutriments selon deux types de mécanismes : d'une part, ceux opérants dans des stations d'épuration classiques par transformation (N) ou fixation (P), et d'autre part, ceux qui relèvent de l'assimilation par des plantes ;
- réduire les concentrations de germes témoins de contamination fécale dans la tranche d'eau libre d'une part et dans le sol selon sa texture, sa granulométrie et sa hauteur d'autre part ;
- réduire certaines substances chimiques (micropolluants) par transformation en substance fille ou bien par piégeage dans les 3 compartiments (eau-sol-plante) pour les plus réfractaires.

Classification des zones de rejet végétalisées

ORIGINE DES MATÉRIAUX CONSTITUTIFS	TYPE DE ZRV	ELÉMENTS DISCRIMINANTS	
Sol en place (remanié ou non)	Prairie	**Sans creusement du sol** Surface de pente douce	
	Bassin	**Avec creusement du sol** Longueur et largeur comparables	
	Fossé/Noue	**Avec creusement du sol** Longueur très supérieure à largeur	
Matériaux rapportés	Autres	Présence de **matériaux rapportés** (gravier, sable, géo membrane, etc.) Filtres plantés, Fossés drainants, etc.	

TABLEAU 1

PHOTO: CHRISTINE BOUTIN – IRSTEA

En complément, les ZRV peuvent répondre à un objectif de production de biomasse en lien avec les propriétés du sol et le climat, ou/et à un objectif d'aménagement paysager et devenir des écosystèmes particulièrement riches et diversifiés.

Dans certains cas, les ZRV reçoivent, outre les eaux usées traitées, les eaux du by-pass du déversoir de tête de la station d'épuration et/ou les eaux transitant par le réseau pluvial. A ce titre, elles peuvent constituer un maillon protecteur majeur du milieu naturel en cas d'évènements exceptionnels (pluies, surcharges hydrauliques temporaires, etc.) entrainant éventuellement un dysfonctionnement temporaire de la station d'épuration.

Face à une telle diversité de situations, l'efficacité réelle des ZRV est extrêmement variable selon les sites. Par ailleurs, les mécanismes de réduction des polluants dans les trois compartiments « eau-sol-plante » sont encore peu connus. C'est pourquoi des suivis complets sont indispensables.

6. QUELLE DÉMARCHE SUIVRE POUR CONCEVOIR UNE ZRV SELON LES OBJECTIFS CHOISIS ?

La démarche de conception doit, selon le dernier principe de l'ingénierie écologique, être basée sur une approche scientifique et technique rigoureuse dans la conception, la réalisation et l'évaluation des projets, basée sur des règles de l'art partagées.

Jusqu'à présent, la conception des ZRV était basée sur une approche plus empirique que scientifique (comme c'était le cas des stations d'épuration dans le passé). La définition de règles de l'art relatives à la conception, au dimensionnement et à l'entretien des différents types de ZRV passe par la mise en place de programmes de recherche et de suivi de ces installations menés à différentes échelles.

La définition des travaux à conduire nécessite la bonne prise en compte des différents objectifs pouvant être assignés aux ZRV :

- réduction des volumes rejetés ;
- rétention des matières en suspension ;
- rétention des nutriments ;
- réduction des germes témoins de contamination fécale ;
- réduction des micropolluants ;
- production de biomasse ;
- aménagements paysagers ;
- réduction des coûts d'investissement pour l'évacuation des eaux épurées.

6.1 Réduction des volumes rejetés

La réduction des volumes rejetés s'avère être le premier objectif assigné aux ZRV. Cette réduction s'effectue selon 3 mécanismes : infiltration, évapotranspiration et évaporation.

- La lame d'eau perdue par percolation-infiltration est fortement liée aux caractéristiques des sols. Le **TABLEAU 2** établit le lien entre les propriétés d'un sol et sa perméabilité mesurée : les ordres de grandeur varient entre plusieurs dizaines et des milliers de millimètres par jour.
- L'évapotranspiration est un phénomène saisonnier lié au développement végétatif des espèces en place. Pendant la période favorable, l'ordre de grandeur de l'évapotranspiration est généralement estimé être de l'ordre du millimètre par jour[4]. En hiver, l'évapotranspiration est négligeable, voire nulle. Ainsi les pertes potentielles par évapotranspiration sont nettement plus faibles que celles par infiltration, sauf pour des sols très peu perméables, de type argileux.
- L'évaporation est un phénomène physique saisonnier qui dépend des conditions climatiques. L'ordre de grandeur se situe à l'échelle du millimètre par jour. On rencontre des pointes de l'ordre du centimètre en zones ventées et très ensoleillées. L'évaporation conduit certes à une réduction des volumes rejetés, mais elle n'a pas d'impact positif sur les flux de pollution car elle conduit simplement à concentrer les eaux. À l'inverse, les phénomènes d'infiltration, mais aussi d'évapotranspiration, conduisent non seulement à une réduction des volumes, mais aussi à une réduction concomitante des flux polluants rejetés dans le milieu superficiel.

Les ordres de grandeur des flux réduits par infiltration, évapotranspiration et évaporation permettent donc de relativiser l'impact de l'évaporation et de l'évapotranspiration par rapport à l'infiltration dans les bilans hydriques. La réduction des flux rejetés au milieu se fait en priorité par l'infiltration et le sol a donc le plus souvent un rôle majeur. Il est donc impératif d'inclure dans la démarche des études globales du sol et sous-sol d'un point de vue géologique, hydrologique et pédologique. Un guide intitulé « Contenu des études préalables à la réalisation d'une ZRV » comprenant 5 fiches techniques a d'ores et déjà été élaboré par le groupe EPNAC (atelier ZRV du groupe de travail EPNAC, 2012).

6.2 Rétention des matières en suspension

La capacité de rétention des matières en suspension par les ZRV, lors de pertes de boues accidentelles ou lors des by-pass en épisodes pluvieux, a un impact très positif vis-à-vis du milieu superficiel et peut en faire des ouvrages de protection essentiels. Néanmoins, les dépôts de boues sont susceptibles de ralentir les vitesses d'infiltration de l'eau, voire de colmater les ZRV et la question de la gestion de l'évacuation des boues accumulées se pose, incluant la conception des voies d'accès.

---

4 *Certaines plantes dans la famille des « bambous » auraient des facultés à évapotranspirer des pointes évaluées à une dizaine de centimètres par jour dans quelques cas très favorables.*

Les ordres de grandeur des flux réduits par infiltration, évapotranspiration et évaporation permettent donc de relativiser l'impact de l'évaporation et de l'évapotranspiration par rapport à l'infiltration dans les bilans hydriques. La réduction des flux rejetés au milieu se fait en priorité par l'infiltration et le sol a donc le plus souvent un rôle majeur.

6.3 Rétention des nutriments

L'expérience acquise sur des systèmes extensifs tels que le lagunage naturel ou les filtres plantés de roseaux est difficilement transposable aux ZRV. En effet, ces systèmes de traitement fonctionnent à des charges organiques et hydrauliques très différentes de celles des ZRV. Pour autant, il est légitime de s'attendre à une légère réduction des flux d'azote de l'eau ruisselant en surface des sols si les temps de passage ne sont pas trop courts. Dans le cas de sols perméables ou très perméables, les transferts hydrauliques importants conduiront à un lessivage en profondeur des nitrates formés, l'éventuelle dénitrification étant considérée comme négligeable. Le piégeage partiel du phosphore dans le sol pourrait s'envisager, sous réserve de réunir les très nombreuses conditions physico-chimiques favorables à une telle réaction.

L'éventuelle contribution du végétal à l'assimilation des nutriments est estimée à partir de la bibliographie internationale : un couvert de végétaux aquatiques exporterait en moyenne, à l'année, de 3 à 15 g/m^2 de phosphore et de 100 à 250 g/m^2 d'azote[5] (Vymazal *et al.*, 1998). Les fourchettes restent donc très larges même si les valeurs extrêmes ont été volontairement écartées afin de fixer des ordres de grandeur. Pour bénéficier de cette exportation de nutriments, quelle que soit la filière, il convient d'extraire le végétal du système, soit par faucardage de la partie aérienne des végétaux avant qu'ils ne versent, soit par la récolte régulière des végétaux flottants. En absence d'extraction des végétaux, la majorité des nutriments retourne dans l'eau suite aux processus de décomposition.

À titre d'exemple, et à partir de ces quelques éléments théoriques, on peut évaluer la surface nécessaire pour compléter le rendement d'une station d'épuration.

Pour gagner 10 points de rendements en période estivale, une surface minimale de 2 m^2/ habitant est requise pour l'exportation du phosphore et de 1 m^2/ habitant pour celle de l'azote. À défaut de disposer de surfaces importantes et de réaliser une exportation mécanique des végétaux, il n'est pas possible de réduire de façon notable les nutriments. C'est pourquoi le terme de « phytoépuration » est totalement inapproprié.

6.4 Réduction des concentrations en germes témoins de contamination fécale

La réduction des germes témoins de contamination fécale, dans la tranche d'eau libre, est relativement bien connue et nécessite un temps de passage suffisant : s'il est inférieur à quelques jours, il ne semble pas raisonnable d'afficher un objectif d'ordre sanitaire. Dans le sol, la transposition des mécanismes connus dans les filières par « cultures fixées » peut également s'envisager si la dégradation se poursuit effectivement en conditions insaturées. La réduction attendue dépendra alors principalement de la texture/granulométrie du sol et de sa hauteur : on peut s'attendre à obtenir de meilleurs taux d'abattements pour des matériaux aux textures les plus fines ou pour des hauteurs de sols les plus importantes. Le rôle du végétal vis-à-vis des germes témoins de contamination fécale reste à ce jour très faiblement documenté.

6.5 Réduction des micropolluants

La mise en place de ZRV est potentiellement intéressante pour réduire les micropolluants contenus dans les effluents de stations d'épuration. Les résultats du projet ARMISTIQ[6] démontrent qu'il pourrait être judicieux de réaliser deux types d'ouvrages :

- l'un à faible tranche d'eau, avec un temps de passage suffisant et un courant d'eau permettant de limiter le couvert végétal en surface, en vue de maximiser la photo-dégradation de certaines substances (par exemple diclofénac, carbamazépine) ;
- l'autre utilisant une filtration immergée sur des matériaux aux propriétés adsorbantes (par exemple charbon actif, argile expansée, zéolites) permettant de piéger certains micropolluants. On s'éloigne alors du cadre de l'ingénierie écologique,

[5] *L'Unité de référence est bien l'azote élémentaire N et non pas les nitrates NO_3^-*

[6] *http://armistiq.irstea.fr/*

et on retrouve ici l'ambiguïté du positionnement de l'épuration dans les principes de l'ingénierie écologique : bien que répondant bien à ces principes, les procédés de traitement des eaux usées de ce type relèvent également du génie des procédés.

Seraient visées les substances bien éliminées en stations d'épuration domestiques mais dont les concentrations restent élevées dans les eaux traitées du fait de leurs concentrations dans les eaux usées brutes (anti-inflammatoires) et les substances réfractaires aux traitements d'épuration biologiques (certains pesticides, antibiotiques, antidépresseurs, produits de contraste, certains bétabloquants). Si le temps de passage est inférieur à quelques jours, il ne semble pas raisonnable d'afficher un objectif de réduction des micropolluants sauf pour la rétention sur charbon actif.

Par ailleurs, certaines substances dont la concentration diminue dans les rejets à l'aval de la ZRV, ne sont pas réellement éliminées. Elles sont simplement piégées dans les sédiments, le sol ou les plantes de la ZRV. Il est donc nécessaire de réfléchir d'une part aux risques de relargage et d'autre part aux implications en termes d'entretien des ouvrages.

6.6 Production de biomasse

La ZRV est une culture à part entière, au sens agronomique, et les analyses pédologiques préalables s'avèrent donc essentielles pour identifier les sols appropriés à une production végétale donnée. Le dimensionnement, en lien avec le climat, repose sur des lames d'eau apportées et les nutriments disponibles, tout en évitant les risques de salinisation du sol. Des systèmes de taillis de saules à très courte rotation (TTCR) ont fait l'objet d'un suivi dans le cadre d'un projet européen LIFE Environnement (2004-2007). Les principales conclusions tirées de cette étude sont les suivantes :

- les surfaces requises sont importantes, de l'ordre de 50 m²/habitant ;
- le rendement moyen annuel de production, mesuré lors de la première année est de 8,8 t MS/ ha (matières sèches par hectare), et la mesure de l'exportation annuelle d'azote et de phosphore par le bois s'établit respectivement à 5,4 g[7] de N/m² et 0,8 g de P/m². L'énergie combustible fournie par un tel tonnage de MS-bois correspondrait à environ 2 500 L de fuel. Cette valeur faible tendra à s'accroitre si les taillis sont stockés et séchés avant combustion. En absence de stockage intermédiaire contribuant à sécher les taillis, la production de biomasse reste modérée : la couverture des besoins énergétiques d'un foyer vivant dans une maison d'isolation classique nécessiterait de l'ordre d'un hectare de « taillis » ;
- les mécanismes d'épuration supplémentaires dans le sol n'ont pu être évalués.

L'implantation de toute végétation de grande taille (bambous, peupliers, etc.) relève de la logique d'une production végétale et les études pédologiques préalables sont nécessaires. Les surfaces requises semblent être variables selon les espèces, le minimum étant évalué à une dizaine de m² pour éliminer l'eau rejetée par un habitant.

6.7 Biodiversité et paysage

Les ZRV peuvent devenir des exemples d'avancée écologique et constituer un îlot de vie pour certaines espèces animales et/ou végétales, en devenant des écosystèmes particulièrement riches et diversifiés, agréables visuellement grâce à leur intégration paysagère réussie [8].

On retrouve cependant les difficultés à concilier dans un même espace des fonctions techniques, des fonctions écologiques et des fonctions d'usage diversifiées. Il faut noter qu'un espace clos peut jouer un rôle paysagé et que l'absence de fréquentation humaine est généralement favorable à la biodiversité.

6.8 Réduction des coûts d'investissement pour l'évacuation des eaux traitées

La réalisation d'une ZRV peut permettre, si la nature du sol et du sous-sol l'autorise, de ne pas réaliser de travaux pour rejoindre un exutoire éloigné.

---

[7] *Cette valeur correspond effectivement à la fourchette basse des exportations de nutriments.*

[8] *Certains membres du groupe de travail ont cependant soulevé un point de vigilance : certains ouvrages peuvent devenir des zones pièges pour la faune. Un ouvrage de traitement « naturel » (lagunage, zone humide artificielle, zone de rejet végétalisée, etc.) peut se présenter comme un refuge pour certaines espèces qui viendront alors s'y installer. Si la concentration en polluants, et en particulier en micropolluants, est trop forte, alors ce refuge peut se transformer en un piège mortel pour les espèces qui le colonisent. De plus, du fait des transferts dans la chaine alimentaires et des potentielles accumulations associées, les perturbations peuvent se propager dans l'écosystème et contaminer des espèces qui n'ont qu'une relation épisodique avec le milieu. Sans être exagérés, ces risques doivent cependant être analysés*

4 Perspectives et freins

L'ingénierie des procédés d'épuration des eaux répond globalement bien aux principes de l'ingénierie écologique de par :

- sa finalité, qui vise à améliorer/restaurer/préserver la qualité de l'écosystème que constituent les eaux superficielles recevant les rejets ponctuels d'eau traitée ;
- la mise en œuvre maitrisée d'outils basés sur les processus naturels des écosystèmes ;
- la mise en place d'une démarche fondée sur une approche scientifique et technique rigoureuse dans la conception, la réalisation et l'évaluation des projets, et s'appuyant sur des règles de l'art partagées.

Ingénierie écologique et ingénierie des procédés d'épuration sont d'autant plus proches que les procédés sont extensifs, donc éloignés d'opérations unitaires relevant du génie des procédés.

Les zones de rejet végétalisées (ZRV), ouvrages extensifs d'un type nouveau placés entre le rejet de la station d'épuration et le milieu récepteur, visent à préserver la qualité de l'écosystème aval et fonctionnent selon des processus naturels tandis qu'une démarche basée sur une approche scientifique et technique rigoureuse dans la conception, la réalisation et l'évaluation des projets est en cours de mise en place.

Pour avancer dans la conception, le dimensionnement et la gestion technique de ces ouvrages, il convient aujourd'hui (i) de poursuivre le recueil des données relatives au fonctionnement des ZRV et à leurs contraintes d'exploitation selon un protocole défini et partagé par les acteurs du domaine[9] et (ii) de progresser dans la connaissance du rôle respectif des trois compartiments « eau-sol-plantes » et de son évolution dans le temps vis-à-vis de la réduction des volumes rejetés, de la rétention/dégradation des polluants et de la réduction des germes témoin de contamination fécale pour chaque type de ZRV considéré. Il s'agira notamment :

- d'identifier les processus majoritaires de dégradation (d'élimination ?) des polluants majeurs et des micropolluants, et d'évaluer l'importance des mécanismes de sorption et de désorption ;
- d'évaluer l'importance des processus de photodégradation vis-à-vis de certains micropolluants ;

Les zones de rejet végétalisées visant à préserver la qualité de l'écosystème aval, fonctionnent effectivement selon des processus naturels. Une démarche basée sur une approche scientifique et technique rigoureuse dans la conception, la réalisation et l'évaluation des projets est en cours de mise en place.

- d'évaluer les évolutions hydrodynamiques comparées de différents sols soumis à des charges hydrauliques caractéristiques des ZRV ;
- de définir les charges (hydrauliques et organiques) admissibles en fonction des différents objectifs attendus pour les différents types de ZRV ;
- de proposer les éléments de gestion technique correspondants.

Ces travaux visent à obtenir l'image la plus juste possible du devenir des polluants dans les différents compartiments et d'identifier et quantifier les mécanismes associés à une élimination apparente entre l'entrée et la sortie du système (stockage, dégradation, volatilisation, etc.).

La complexité et la diversité des questions à traiter imposent également de travailler à différentes échelles selon des protocoles précis et partagés. Du lysimètre à la taille réelle, en passant par l'échelle semi-industrielle des sites expérimentaux instrumentés, il s'agit, pour les différentes typologies de ZRV, de produire un travail scientifique irréprochable permettant d'aboutir à la rédaction de guides de conception, de dimensionnement et d'exploitation (entretien) des différents types de ZRV (programme Irstea-ONEMA sur la période 2013-2017).

Dans l'attente, un guide « Contenu des études préalables à la réalisation d'une ZRV », comprenant cinq fiches techniques, a été élaboré par le groupe EPNAC. Il précise le contenu des études préalables (géologie, pédologie et hydrogéologie) à la réalisation d'une ZRV[10] .

[9] *Voir http://epnac.irstea.fr*

[10] *Voir http://epnac.irstea.fr*

5

GÉRER LES CRUES ET LES INONDATIONS

Voir les fiches retours d'expériences se rapportant à cette partie au point 3 du chapitre 4 de l'ouvrage (p. 206 à 237)

On estime qu'en France 10% de la population est exposée au risque d'inondations par débordement de cours d'eau (Ministère en charge de l'Ecologie, 2008).
Il serait intéressant de mettre en parallèle à ce chiffre le linéaire de cours d'eau impactés par les activités humaines, mais la diversité des perturbations complique ce décompte : ouvrages hydrauliques, artificialisation du lit mineur, franchissements, dégradation de la ripisylve, réduction des espaces de bon fonctionnement, pollutions et dégradation des habitats en lit majeur, etc. Des études régionales donnent cependant quelques valeurs. Par exemple, Malavoi (2011) propose une méthodologie et annonce un premier chiffre de seulement 14% de rivières légèrement ou peu perturbées en Rhône-Alpes.

On estime qu'en France 10% de la population est exposée au risque d'inondations par débordement de cours d'eau.

Il faut donc faire face à deux objectifs a priori contradictoires : améliorer la protection des populations exposées tout en diminuant si possible le niveau de perturbation des rivières par les aménagements. Ce paragraphe se donne comme objectif de montrer que les progrès des connaissances et des techniques d'ingénierie écologique peuvent apporter des éléments de réponse à cette contradiction.

1 Contexte et enjeux

Pendant longtemps la lutte contre les inondations a essentiellement reposé sur la mise en œuvre de moyens de génie civil. Deux familles de stratégies ont ainsi été développées :

- diminuer les débits de pointe par la construction de barrages écrêteurs ou de casiers ;
- diminuer les conséquences de la crue par la construction de digues de protection visant à protéger certaines zones.

Barrages écrêteurs et digues permettent donc de réduire les zones inondées, et en conséquence les dommages. Mais leurs limites et leurs effets pervers sont bien connus.

La « lettre de Plombières » de 1856 de l'empereur Napoléon III (1860) les commente ainsi : « Aujourd'hui chacun demande une digue, quitte à rejeter l'eau sur son voisin. Or, le système des digues n'est qu'un palliatif ruineux pour l'État, imparfait pour les intérêts à protéger ».
Les digues reportent souvent le problème à l'aval, ce qui peut conduire l'aval à s'endiguer aussi (**FIGURE 25**), et exigent une surveillance et un entretien rigoureux qui sont souvent difficiles à assurer.
Dès cette époque, le discours insiste sur l'importance de l'horloge des crues, et la nécessité de raisonner, non pas par ouvrage, mais pour l'ensemble d'un aménagement : «Maintenant, comme il est très important que les crues de chaque petit affluent n'arrivent pas en même temps dans la rivière principale, on pourrait peut-être, en multipliant dans les uns ou en restreignant dans les autres

le nombre de barrages, retarder le cours de certains affluents, de telle sorte que les crues des uns arrivent toujours après les autres. ».

L'autre effet pervers bien identifié des ouvrages, c'est la tentation de développer les zones protégées, en oubliant souvent que l'aléa d'inondation n'y est que diminué. Ces zones restent inondables par une crue qui parviendra à dépasser la cote des digues ou à remplir complètement la capacité de stockage des ouvrages écrêteurs. Dans cette éventualité, rare mais réelle, les conséquences humaines et financières seront d'autant plus importantes que l'urbanisation se sera développée dans les zones exposées que l'on croyait protégées. La vulnérabilité sera de plus aggravée par l'impréparation des riverains du fait de leur méconnaissance du risque.

La rupture d'ouvrages est également un incident rare mais ne pouvant être négligé. Elle peut survenir à cause de défauts de conception ou d'entretien, ou lors d'un épisode de crue particulièrement intense ; c'est alors une vague d'eau qui envahit la zone et les conséquences en sont catastrophiques, avec des menaces pour les vies humaines.

Enfin une dernière conséquence désagréable des digues est « l'effet baignoire ». Si l'eau passe de l'autre côté de la digue au plus fort de la crue, elle se trouve alors piégée du mauvais côté de celle-ci et ne peut plus s'évacuer lorsque le niveau diminue dans la rivière. Les zones qui devaient être protégées restent sous les eaux beaucoup plus longtemps que les autres, ce qui aggrave souvent les conséquences de la submersion.

Les politiques actuelles de gestion et de prévention du risque inondations mettent donc logiquement l'accent sur la nécessité de considérer le problème dans son ensemble, c'est-à-dire :

- à l'échelle du bassin versant ;
- en envisageant les conséquences de tous les événements, depuis les événements modestes jusqu'aux événements extrêmes ;
- avec une stratégie concertée reposant à la fois sur des mesures de réduction de l'aléa (« structurelles ») et de réduction de la vulnérabilité (« non-structurelles ») : diagnostic du risque, culture du risque, dispositions constructives, systèmes de prévision et d'alerte.

C'est l'esprit de la Directive de 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation.

Les techniques de l'ingénierie écologique ont une place à prendre dans l'application de ces politiques.

Une rivière constitue un écosystème dynamique qui d'une part doit pouvoir fonctionner dans des conditions hydrologiques très diverses (étiages et crues en constituant des exemples) et d'autre part doit pouvoir évoluer au fil du temps.

2 Grands principes à appliquer

1. S'APPUYER SUR DES PRATIQUES DE GESTION INSPIRÉES DES MÉCANISMES QUI GOUVERNENT LES SYSTÈMES ÉCOLOGIQUES

Une rivière constitue un écosystème dynamique qui d'une part doit pouvoir fonctionner dans des conditions hydrologiques très diverses (étiages et crues en constituant des exemples) et d'autre part doit pouvoir évoluer au fil du temps.

La notion d'espace de liberté des rivières, issue en particulier des travaux du PIREN Rhône dans les années 70-80 s'est maintenant imposée. Elle structure fortement les réflexions sur les aménagements écologiques (ou sur les « ménagements ») à mettre en œuvre pour concilier le caractère naturel du régime du cours d'eau et la nécessité de ne pas mettre en péril les biens et les personnes qui cohabitent avec elle.

Gérer les crues et/ou leurs conséquences par des techniques d'ingénierie écologique nécessite donc de conserver autant que possible ce caractère naturel tout en utilisant les propriétés mêmes de la rivière pour limiter les conséquences de ces excès.

La première règle, totalement essentielle et que le bon sens devrait imposer, consiste à ne pas implanter d'installations sensibles dans le lit majeur des rivières… Malheureusement cette règle n'a pas toujours été suivie dans le passé et il est souvent nécessaire de mettre en œuvre des mesures palliatives.

Plusieurs autres règles inspirées des mécanismes « naturels » de contrôle des crues peuvent être cités :

- Diminuer le ruissellement sur les bassins versants.

Le volume total ruisselé pendant un épisode pluvieux est un élément déterminant de l'importance

d'une crue. Or beaucoup d'actions anthropiques augmentent les volumes ruisselés comme par exemple l'imperméabilisation des sols associée au développement urbain ou à la construction d'infrastructures de transport. A l'opposé, toute action favorisant l'infiltration ou le stockage local de l'eau est susceptible de jouer un rôle positif (actions sur les surfaces ou par de petits ouvrages de rétention temporaire, en milieu rural ou urbain). La maîtrise des volumes ruisselés constitue donc un moyen de réduire le risque d'inondation, au moins localement et pour des épisodes modestes.

• Ralentir au maximum les écoulements le plus à l'amont possible. Un principe hydrologique peu connu est que le débit de pointe d'une crue dépend plus du temps de concentration du bassin versant que de son coefficient de ruissellement. Accélérer les écoulements dans les têtes de bassin en rectifiant les profils des petits ruisseaux, en drainant les fonds de vallon, en construisant des réseaux d'assainissement urbains, etc., ou plus à l'aval en endiguant les rivières, a donc des effets considérables sur les débits de crue. Un principe fondamental consiste donc à ralentir les écoulements partout où ceci est possible et pertinent (il faut en particulier que cela soit pensé dans un cadre d'un aménagement global et reste compatible avec l'occupation du sol et l'horloge des crues).

• Conserver, voire développer, les zones d'expansion des crues à l'amont des zones vulnérables. Beaucoup de zones naturelles d'expansion des crues ont été en partie comblées ou rendues inaccessibles par des ouvrages de protection. Les volumes d'eau que ces zones pouvaient temporairement stocker sont transférés vers l'aval où ils augmentent les risques. Remettre ces zones en connexion avec la rivière peut donc permettre de soulager des zones aval de plus fort enjeu et donc réduire les inondations dommageables. L'occupation du sol et/ou le prix du foncier peuvent constituer des freins à ces actions, mais on peut en optimiser l'effet par un aménagement adéquat des entrées d'eau (voir par exemple le cas des polders d'Erstein, Schmitt *et al.*, 2009).

• Conserver, voir développer les capacités hydrauliques des rivières dans les zones vulnérables : de nombreux obstacles perturbent l'écoulement des eaux dans les lits majeurs des rivières (ponts, passerelles, remblais routiers, bâtiments, etc.) et contribuent à remonter localement les lignes d'eau. Il suffit donc parfois de supprimer ou d'adapter ces éléments, ou de prendre en compte leur impact hydraulique dès leur conception, pour améliorer le fonctionnement hydraulique de la rivière. La suppression d'obstacles doit cependant toujours être étudiée sur toute la zone d'effet, qui inclut en particulier les tronçons aval (voir le principe précédent sur le ralentissement hydraulique). La gestion de la végétation aquatique dans le lit majeur nécessite également réflexion, car cette végétation a un rôle ambivalent puisqu'elle va créer de la rugosité donc ralentir les écoulements, mais en même temps cette végétation peut contribuer à la création d'embâcles, or embâcles et débâcles sont des sources d'aggravation des inondations.

Il est important de noter que ce sont les mécanismes généraux dont on s'inspire, mais sans s'interdire d'utiliser des ouvrages de nature artificielle (voir l'exemple du barrage à pertuis ouvert traité plus bas). Il n'est en effet pas possible de protéger réellement des zones exposées contre des risques extrêmes uniquement en ayant recours à l'ingénierie écologique. L'ingénierie écologique doit davantage être comprise dans ce cadre comme un outil complémentaire dont l'objectif principal est de permettre à la rivière aménagée de conserver un fonctionnement écologique aussi satisfaisant que possible.

Il n'est en effet pas possible de protéger réellement des zones exposées contre des risques extrêmes uniquement en ayant recours à l'ingénierie écologique. L'ingénierie écologique doit davantage être comprise dans ce cadre comme un outil complémentaire dont l'objectif principal est de permettre à la rivière aménagée de conserver un fonctionnement écologique aussi satisfaisant que possible.

Rechercher les mesures qui sont nécessaires à la protection des populations tout en minimisant l'ensemble des conséquences écologiques et environnementales des dites-mesures.

2. NE PAS DÉGRADER ET/OU CONTRIBUER AU MAINTIEN OU À LA RESTAURATION DU BON FONCTIONNEMENT DES MILIEUX AQUATIQUES

L'objectif poursuivi lorsque l'on veut gérer des crues est uniquement sociétal. En effet les crues constituent un phénomène naturel qui est plutôt positif pour les écosystèmes (même si les conséquences environnementales d'une crue sévère peuvent apparaître dommageables). Il y a donc de fait une incompatibilité entre le contrôle des crues et le maintien d'un fonctionnement naturel des milieux aquatiques.

De plus, les aménagements nécessaires au contrôle des crues peuvent également altérer la qualité des hydrosystèmes.

Il ne paraît donc pas possible de mettre en œuvre des aménagements qui, d'une part, améliorent le niveau de protection contre les risques d'inondation et, d'autre part, contribuent « au maintien ou à la restauration du bon fonctionnement des milieux aquatiques » .

En revanche, il est possible de rechercher un compromis et de s'attacher à rechercher les mesures qui sont nécessaires à la protection des populations tout en minimisant l'ensemble des conséquences écologiques et environnementales des dites-mesures.

Pour faciliter la mise en œuvre de cette approche le paragraphe « outils et réalisation » tente de résumer l'ensemble des connaissances pertinentes sur le fonctionnement écologique du cours d'eau étudié. Il s'appuie sur une typologie des paysages aquatiques (« riverscapes »), afin de faciliter le choix des solutions techniques minimisant les impacts sur le cours d'eau.

3. MINIMISER LES INTERVENTIONS LOURDES ET COÛTEUSES D'ENTRETIEN

La question de l'entretien des ouvrages de protection contre les crues est particulièrement sensible et difficile. Ces ouvrages ne sont en effet sollicités que très rarement. Une absence d'entretien peut ainsi passer totalement inaperçue et conduire l'ouvrage à une situation de très grande fragilité au moment où il est effectivement sollicité. Des ruptures de digues catastrophiques, aussi bien en Camargue qu'à New York, constituent des exemples frappants.

Cette difficulté doit obligatoirement conduire à intégrer les contraintes d'entretien et d'exploitation dès les premières phases de conception. Les choix d'aménagement doivent ainsi privilégier :

- soit des opérations qui ne nécessitent aucun entretien spécifique, par exemple des ouvrages plurifonctionnels dont les fonctions de contrôle des crues seront maintenues par un entretien associé aux autres fonctions plus courantes ;
- soit les opérations pour lesquelles il est possible de trouver un gestionnaire efficace disposant sur la durée des ressources nécessaires à l'entretien, et contraint par la réglementation à la mettre en œuvre (ce qui est par exemple le cas des barrages).

4. INSCRIRE LE PROJET DANS UNE POLITIQUE TERRITORIALE ET LE TRAITER À LA BONNE ÉCHELLE SPATIALE

Une rivière possède une dimension longitudinale évidente et les flux se propagent de l'amont vers l'aval. Le contrôle des crues en un point particulier nécessite donc une réflexion sur l'ensemble de la partie amont du bassin versant pour trouver des solutions efficaces. Il demande également une réflexion sur l'ensemble de la partie aval pour étudier les conséquences potentielles des actions. Cette nécessaire solidarité amont-aval est souvent difficile à mettre en œuvre. Il arrive par exemple que les communes (souvent rurales) à l'amont des bassins versants ne comprennent pas que les communes (souvent urbaines et «plus riches») de l'aval leur demandent des efforts pour contrôler les ruissellements. Une réflexion globale sur la rivière et sa mise en œuvre dans le cadre d'un SAGE ou d'un contrat de rivière permet souvent d'agir à la bonne dimension spatiale. Pour être mise en œuvre efficacement, cette réflexion doit en outre pouvoir s'appuyer sur une structure porteuse (Etablissement Public Territorial de Bassin ou Syndicat Intercommunal).

Nous illustrons ce principe par l'exemple ci-dessous.

CONSTAT

Inondation dommageable sur un village
(ici renforcé par la présence d'un obstacle)

PROJET CONCU SUR UN TERRITOIRE LIMITÉ 1

Actions au droit des enjeux (digues) et à l'aval immédiatement
(faciliter l'évacuation des volumes)
provoquant une augmentation du risque à l'aval

1

FIGURE 25

PRINCIPE DE CONCEPTION D'UN AMÉNAGEMENT : EXEMPLES D'ACTIONS POSSIBLE SELON LA DÉFINITION DU TERRITOIRE D'ÉTUDE

ÉLARGISSEMENT DE LA ZONE D'ÉTUDE

Vers l'aval **2** pour prendre en compte toutes les conséquences
et vers l'amont **3** pour trouver des solutions d'ecrêtement de crue

ADAPTÉ DE O. GILARD, GUIDE INONDABILITÉ, 2008

5. PERMETTRE AU MILIEU DE TENDRE VERS UN ÉQUILIBRE ET DE S'AUTO-ORGANISER

Dans le cas de la lutte contre les risques d'inondation, il est essentiel de comprendre que l'on travaille sur un « anthropo-hydro-système », c'est-à-dire qu'il est indispensable de considérer l'homme comme un acteur essentiel de l'évolution.

L'équilibre doit donc être recherché entre le système naturel (la rivière) qui, de temps en temps manifeste sa puissance, et l'homme qui, dans les périodes les plus calmes, a tendance à venir s'installer sur un territoire potentiellement dangereux.

Une solution consiste à montrer, voire à mettre en scène, l'eau et le risque. Ne pas gérer les crues faibles pour montrer que certaines zones sont régulièrement inondées constitue un exemple simple de ce principe.

6. INTÉGRER LE SUIVI DES PERFORMANCES DÈS LE DÉBUT DE L'OPÉRATION

La difficulté est ici que l'on s'intéresse surtout à des situations peu fréquentes et non reproductibles. Le suivi des performances est donc très difficile à assurer.

La mise en œuvre de stations de mesures pluviométriques et débitmétriques associée à une modélisation du bassin versant peut permettre de contrôler dans une certaine mesure l'efficacité des actions entreprises.

3 Outils et réalisation

1. EXEMPLE DE LA CONCEPTION D'UN OUVRAGE ÉCRÊTEUR DE CRUE

Nous illustrons ici la démarche par le cas d'un barrage à pertuis ouvert destiné à limiter les débits de crue à l'aval. Il s'agit d'un ouvrage de génie civil qui écrête les crues en limitant le débit transitant dans le lit mineur et en stockant le volume excédentaire à l'amont.

La **FIGURE 26** illustre le principe d'un barrage de ce type.

Ce type de barrage écrêteur est utilisé depuis longtemps. Par exemple, des ouvrages ont été construits au début du XXème siècle aux Etats-Unis (Miami River) et en Pologne (barrages sur des affluents de la Bóbr près de Jelenia Góra) et plus récemment au Japon (barrage de Masugawada) ou encore au Mexique (Santa Catarina River).

L'équilibre doit donc être recherché entre le système naturel (la rivière) qui, de temps en temps manifeste sa puissance, et l'homme qui, dans les périodes les plus calmes, a tendance à venir s'installer sur un territoire potentiellement dangereux.

En France, des barrages ont été récemment construits, par exemple près de Roanne (digue de l'Oudan), de St Etienne (sur l'Ouzon, un affluent du Furan), à St Pée sur Nivelle (Lurberria) ou encore sur la Meuse (Mouzon[12]).

Leur précurseur est la Digue de Pinay, construite en 1711-1712 sur la Loire. Claude Cretin décrit ainsi l'ouvrage[13] : « cet ouvrage était composé de deux ailes en maçonnerie de part et d'autre du lit mineur. Son pertuis était une tranchée, à ciel ouvert. Malheureusement, cet ouvrage a été détruit en 1984 lors de la construction du barrage de Villerest ».

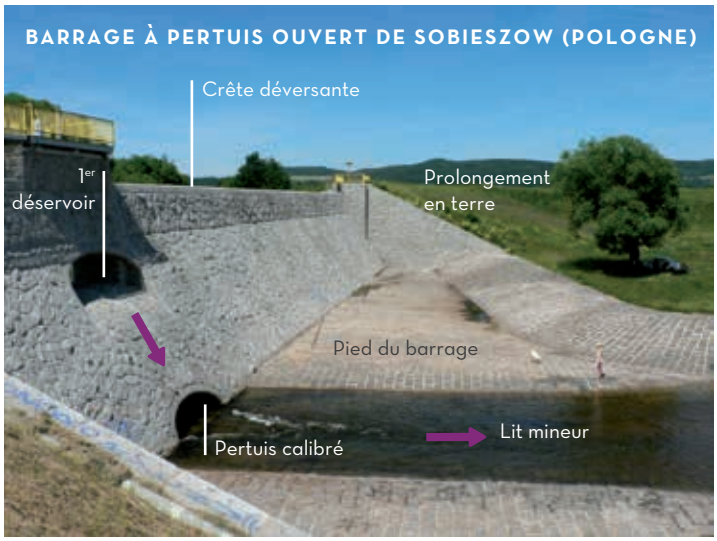
SOURCE DU PINAY

FIGURE 27 GALLICA.BNF.FR / ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

[12] *http://www.epama.fr/files_fr/epama_projets/mouzon/epama6_mouzon_intro.php4*

[13] *http://www.fleuve-loire.net/article.php3?id_article=37, La digue de Pinay, Protection contre les crues par une digue insubmersible (Article consulté en 2008)*

SCHÉMA DE PRINCIPE D'UN BARRAGE À PERTUIS OUVERT ET EFFET SUR UN ENSEMBLE D' HYDROGRAMMES DE CRUE



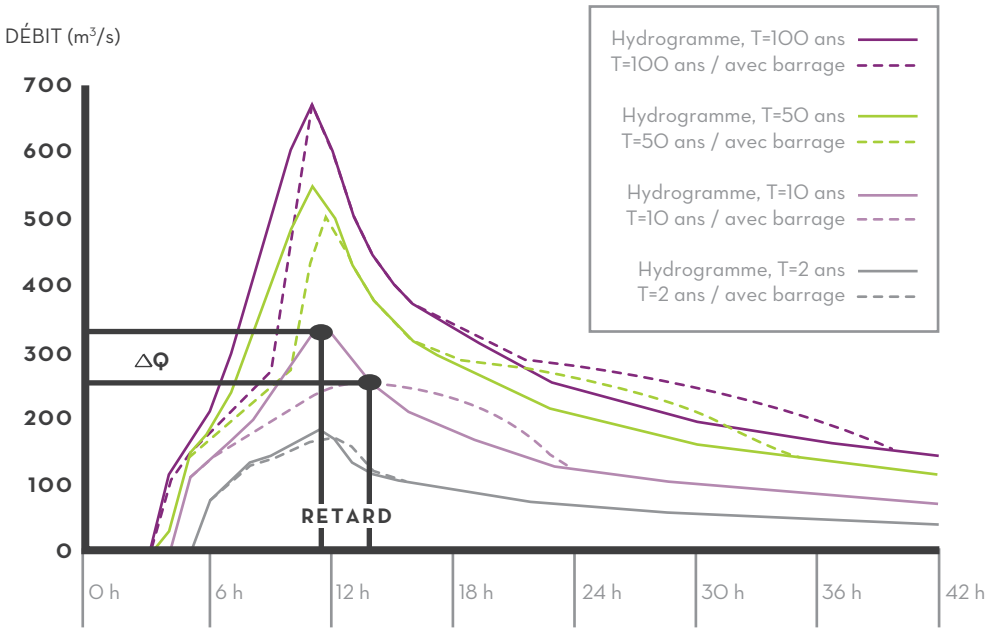


FIGURE 26 D'APRÈS GHAVASIEH, 2006

Il est très intéressant de constater que cet ouvrage a été construit pour revenir à un état naturel. M. de St Simon, cité par C. Cretin, explique qu'un verrou rocheux a été détruit pour faciliter la navigation, et qu'il en a résulté une aggravation des inondations. La construction de l'ouvrage a donc été décidée pour réduire de nouveau la débitance et pour rétablir la fonction de laminage.

« La nature, plus sage que les hommes, ou, pour parler plus juste, son Auteur, avait posé des rochers au dessus de Roanne dans la Loire qui en empêchaient la navigation jusqu'à ce lieu qui est le principal du duché de M. de La Feuillade.

Son père tenté du profit de cette navigation, les avait voulu faire sauter. Orléans, Blois, Tours, en un mot tout ce qui est sur le cours de la Loire s'y opposa. Ils représentaient le danger des inondations, ils furent écoutés ; et quoique M. de La Feuillade alors fût un favori et fût bien avec M. Colbert il fût réglé qu'il ne serait rien innové et qu'on ne toucherait point à ces rochers.

Son fils, par Chamillard son beau-père, eut plus de crédit. Sans écouter personne il y fût procédé par voie de fait. On fit sauter les rochers et on rendit libre la navigation en faveur de M. de La Feuillade. Les inondations qu'ils arrêtaient se sont débordées depuis avec une perte immense pour le Roi et pour les particuliers. La cause en a été reconnue après, mais elle s'est trouvée irréparable».

On peut donc, dans une certaine logique, dire que le premier barrage à pertuis ouvert français, bien qu'artificiel, constitue un excellent exemple d'ingénierie écologique puisqu'il tente de restaurer une situation naturelle préalable.

1.1 Efficacité en termes de gestion des inondations

Un barrage de ce type limite le débit vers l'aval à une valeur qui dépend de la hauteur d'eau dans le barrage, donc du volume stocké, donc de la nature de la crue. L'effet hydrologique d'un tel ouvrage ne peut donc être estimé que par modélisation hydraulique de scénarios de crue.

La **FIGURE 26** illustre les résultats d'une telle modélisation en comparant la forme des hydrogrammes avec et sans ouvrage.

Chercher à se protéger contre une unique « crue de projet », souvent une crue forte qui est l'élément déclencheur d'un cycle d'études, ne donnerait qu'une réponse très partielle, puisque les épisodes suivants n'ont quasiment aucune chance de lui ressembler. Il est donc recommandé d'étudier l'effet de l'aménagement proposé sur plusieurs crues, représentatives du régime, depuis les premiers dommages jusqu'aux crues dépassant la capacité nominale de l'ouvrage (**FIGURE 26**), et jusqu'à la rupture de l'ouvrage. En effet, une rupture d'ouvrage accentue les dommages par rapport à la situation « naturelle ». Pour que le diagnostic soit complet il faut donc prendre cette éventualité en compte (études de danger), même si la probabilité en est faible.

Remarquons également que les ouvrages écrêteurs vont à la fois écrêter et retarder les pics de crue, et allonger la durée d'inondation sur les zones qui restent submergées. Il est donc possible d'observer localement des effets négatifs : synchronisation d'arrivée de pics de 2 contributions auparavant décalées, augmentation des dommages liée à l'allongement de la submersion (coupures de routes par exemple).

Les variables hydrauliques donnent une idée du fonctionnement, mais les politiques actuelles (programme PAPI, Directive Inondation) imposent petit à petit l'analyse économique comme critère objectif de la pertinence d'une solution technique. Le bénéfice d'une solution est quantifié par la diminution des dommages moyens annualisés, directs et indirects ; on le compare sur le moyen ou long terme aux coûts, incluant la réalisation (travaux et foncier) et l'entretien (Erdlenbruch *et al.*, 2008). Cette méthode a l'avantage de pouvoir évaluer simultanément l'effet de mesures structurelles (qui vont modifier l'aléa) et non structurelles (qui vont modifier la vulnérabilité), les deux modifiant les dommages évités. Ceci suppose que l'on soit capable de prédire l'évolution de la vulnérabilité (directement lié à l'occupation des sols) à l'aval de l'ouvrage selon les scénarios envisagés, ce qui est généralement extrêmement difficile.

1.2 Efficacité d'un point de vue écologique

Les rivières sont des systèmes complexes ; la biodiversité et les capacités métaboliques dépendent de la qualité de l'eau, de la géomorphologie, des hétérogénéités spatiales et temporelles, des nutriments disponibles, des interactions avec les nappes phréatiques et les milieux terrestres, etc. Tous ces éléments peuvent être modifiés par la construction du barrage.

La préservation et la réhabilitation écologique passent

EXEMPLE DE DESCRIPTION D'UNE RIVIÈRE PAR SES UNITÉS FONCTIONNELLES – ET MISE EN ÉVIDENCE DE L'IMPORTANCE DES INTERFACES.

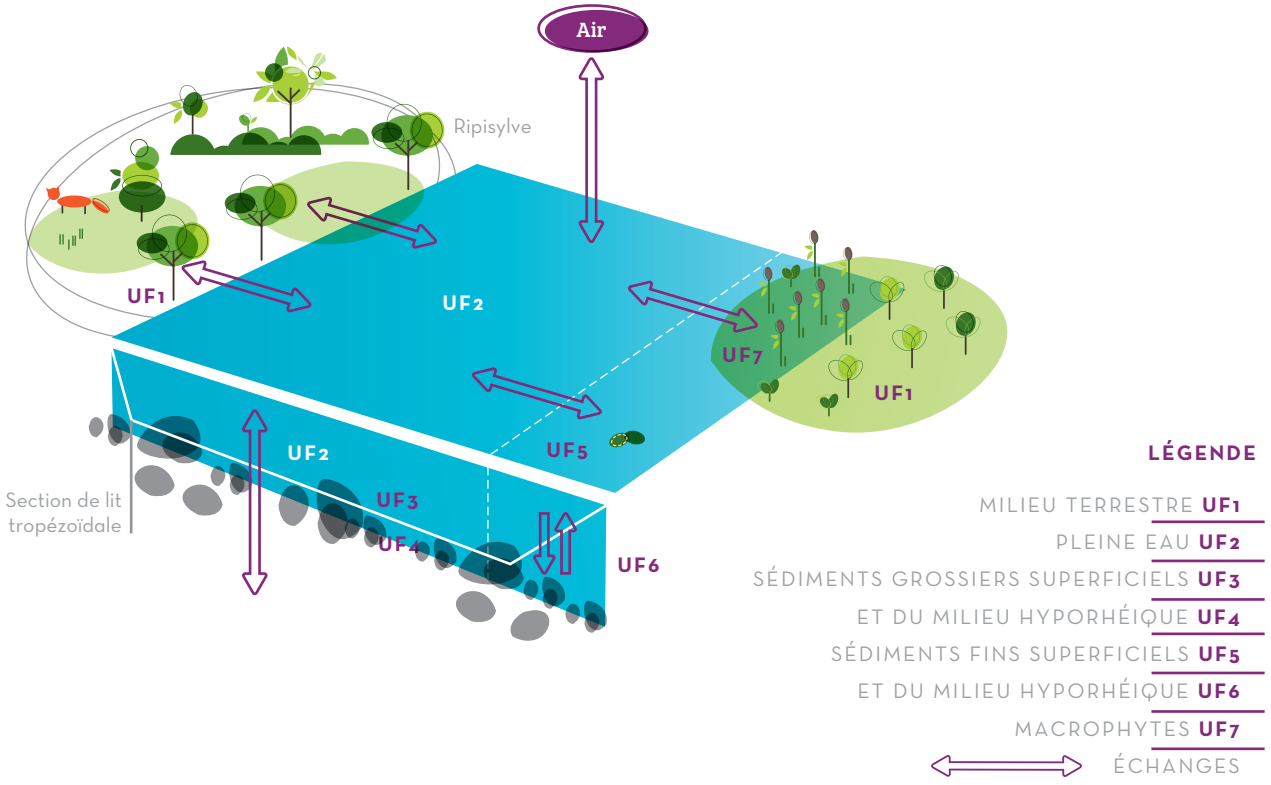


FIGURE 28

D'APRÈS LAFONT, 2008

donc par la compréhension de ces interactions (**FIGURE 28**). Les flèches indiquent les directions principales des écoulements qui sont gouvernés par les lois de l'hydraulique. Les systèmes vivants s'organisent dans ces habitats en fonctions des rythmes et des intensités des flux d'énergie (nutriments, rayonnement) dont une partie plus ou moins importante est régulé par les flux hydriques selon que le milieu est plutôt terrestre ou plutôt aquatique.

La comparaison des **FIGURES 26** et **28** illustre que, bien que travaillant sur le même objet, la rivière, biologistes et ingénieurs en ont une perception différente, étudiant un aspect spécifique du fonctionnement, et visant des objectifs parfois contradictoires.

Il est possible d'effectuer des diagnostics de bon fonctionnement du cours d'eau via des indices biotiques, mais ils ne sont pas utilisables en prospective.

Pour évaluer les impacts de la création d'un ouvrage, il faut donc identifier a priori les perturbations qu'il est susceptible d'engendrer et en déduire, à dire d'expert, les conséquences attendues à court et moyen terme.

1.3 Comment partager les points de vue ?

Classiquement, l'expertise écologique est appelée en toute fin de projet, au moment de l'étude d'impact. Il est alors bien tard pour prendre en compte efficacement les éventuelles recommandations. Nous nous plaçons donc dans une autre perspective : la co-conception du projet. La démarche doit donc permettre des échanges permanents entre hydrologues et hydrauliciens d'une part et experts écologues d'autre part.

Il faut donc être capable de construire une base de connaissances pertinentes valable pour un bassin versant donné, et accessible sous une forme synthétique

aux non-spécialistes. Cette base doit permettre en particulier de faciliter le dialogue en définissant un vocabulaire partagé. *In fine*, elle doit également permettre de converger vers des objectifs communs, puis de décrire et améliorer des propositions techniques.

Pour bâtir cette base de connaissance, nous proposons d'utiliser la notion de paysages aquatiques ou riverscapes. Cet outil doit décrire, à l'attention des non-spécialistes, les fonctionnements possibles, en conditions naturelles et artificialisées, en explicitant le lien entre les modifications hydrauliques engendrées et les modifications des fonctions des compartiments écologiques affectés. La recherche d'un moindre impact peut alors reposer sur la minimisation du linéaire impacté et/ou sur la compensation de fonctions diminuées par leur accroissement volontaire en aval ou en amont de(s) l'ouvrage(s).

Un paysage aquatique est un descripteur mais aussi un facteur explicatif.

1.4 L'utilisation de la notion de paysages aquatiques

Cette méthode s'appuie sur la notion de paysage aquatique. La notion de « paysage aquatique » a été proposée par analogie avec la description géographique d'un territoire hétérogène, mais structuré, en « paysages ». Un paysage aquatique est un descripteur mais aussi un facteur explicatif dans la mesure où « l'étendue, la composition et la configuration des paysages aquatiques sont le creuset où vont se développer les processus et la biodiversité des écosystèmes » (Malard *et al.*, 2006).

Nous proposons de nous inspirer de cette notion riche, dans un premier temps de manière statique et locale, pour repérer les descripteurs physiques pertinents expliquant les fonctionnalités locales d'un cours d'eau.

Ce paragraphe va présenter une utilisation de « paysages aquatiques » simplifiés, comme supports pragmatiques d'information et de réflexion interdisciplinaire, dans un premier temps pour une étude locale. Les pistes de généralisation de la méthode, en cours d'exploration, seront également commentées.

Pour poser les bases de la méthode, nous avons travaillé sur un territoire relativement homogène, un ensemble de tronçons d'affluents du Bóbr (Pologne) portant des barrages à pertuis ouvert (Poulard *et al.*, 2010). Dans ce contexte, il est apparu suffisant de décrire l'état naturel par un unique paysage, qualifié de Rs IV (**FIGURE 29**). Nous n'avions pas pour objectif de décrire finement les fonctions, mais de caractériser les modifications qui pouvaient résulter d'une artificialisation locale.

Le paysage Rs IV a été décrit par un biologiste d'après les observations de terrain, et illustré par un schéma de section en travers, en rajoutant des informations sur la biodiversité et les processus attendus.

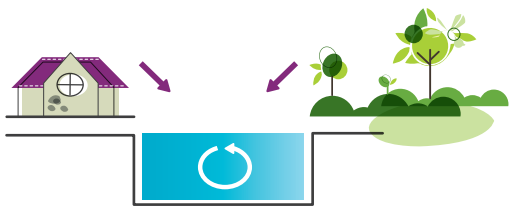
Nous avons ensuite décrit les états possibles, après artificialisation. Dans ce contexte relativement homogène, notre typologie est linéaire, structurée par un gradient d'artificialisation lié à l'imperméabilisation du lit. Les paysages vont du canal imperméable (Rs I) au cours d'eau naturel (Rs IV). La hiérarchie est donc nette, du lit mineur canalisé à la section naturelle. Pour le projeteur, la caractérisation des critères de passage d'un niveau à un autre est intéressante : présence de blocs ou de matériaux rugueux (Rs I vers Rs II), restauration au moins partielle des connexions surface-subsurface (Rs II vers Rs III). Cela donne des éléments concrets pour améliorer les solutions techniques, y compris par de simples ajustements (choix des matériaux).

La liste des paysages aquatiques doit être construite pour un site donné et pour un projet donné : ils doivent permettre de décrire l'ensemble des situations naturelles et aménagées du territoire étudié. Ils doivent également permettre de fournir des éléments concrets mais synthétiques pour la discussion (quels sont les critères qui font qu'un paysage est plus intéressant qu'un autre, et pourquoi). Des informations supplémentaires peuvent être incluses, par exemple sur les méthodes de bio-indication pour le diagnostic et le suivi. La typologie peut être amenée à évoluer au fil du projet, pour intégrer de nouveaux éléments (nouvelles solutions techniques, nouveaux matériaux, etc.), de nouveaux paramètres, et des corrections.

1.5 Retour sur le cas de l'ouvrage écréteur

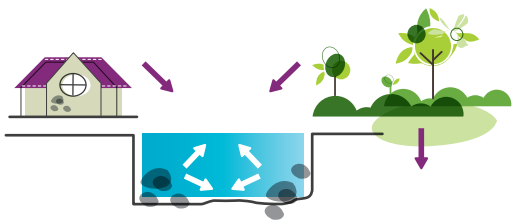
Nous avons étudié plus spécifiquement les barrages à pertuis ouvert, qui limitent le débit transitant en lit mineur sans interrompre l'écoulement (**FIGURE 26**). Il existe une grande diversité de réalisations, avec des variantes sur les volumes stockés (de quelques dizaines de milliers de m^3 à plusieurs millions), le matériau utilisé (barrage en terre ou en béton), la taille et la forme des pertuis et des déversoirs de crue, et l'artificialisation des chenaux juste en amont et juste en aval de l'ouvrage.

Résumé de la typologie de riverscapes définie pour des cours d'eau de montagne du bassin versant du Bóbr en Pologne



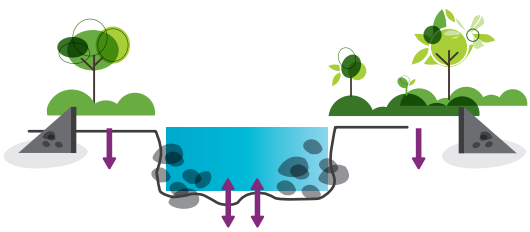
RS I: LIT MINEUR 100 % ARTIFICIEL (RS IA : SECTION COUVERTE, RS IB NON COUVERTE)

Caractéristiques physiques :
Caractéristiques biologiques
Biofilms benthiques sur substrat plat (bactéries, champignons, vers, larves d'insectes) et biofilms en suspension dans la colonne d'eau. Diatomées, tapis de mousses en présence de lumière (Rs Ib).
Processus fonctionnels :
Processus éventuellement actifs mais faible diversité (surtout en Rs Ia).
Comme indice biotique, seul l'indice Diatomées semble indiqué pour le Rs Ib.



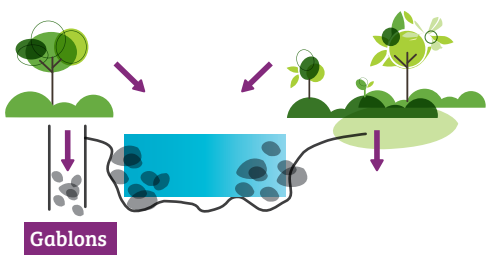
RS II: LIT MINEUR ARTIFICIEL AMÉLIORÉ

Caractéristiques physiques :
Canal 100% artificiel avec revêtement ou blocs rugueux, offrant plus de surface colonisable et favorable à davantage d'organismes vivants (Rs I+oligochètes, etc.);
Processus :
la diversité et l'efficacité des processus, en particulier ceux liés aux habitats poreux, en est accrue d'autant.



RS III: CONDITIONS SEMI-NATURELLES

Lit mineur partiellement artificialisé ; les connexions avec le milieu souterrain accroissent la biodiversité et la diversité /efficacité des processus par rapport au type II.
(sous-types éventuels, selon le degré d'imperméabilisation et la restauration des connexions surface-subsurface)



RS IV : CONDITIONS (PRESQUE) NATURELLES (IVA ARTIF. INFÉRIEURE À 30% ; IVB : ARTIFICIALISATION < 10 %)

Tous les types d'habitats naturels présents.
Tous les types d'habitat liés au contexte géomorphologique sont potentiellement présents; la richesse en biodiversité et en diversité de processus dépendent de ce contexte naturel (qui peut être localement médiocre !) et de la qualité de l'eau.
Un grand nombre d'indices biotiques sont disponibles : macro-invertébrés, macrophytes, poissons...

FIGURE 29

POULARD *ET AL.*, 2010

COMPARAISON DES CONTRAINTES

ZONES	CONTRAINTES (FONCTION D'ÉCRÊTEMENT)	DISCUSSION POUR LE RIVERSCAPE -OBJECTIF
A - Cuvette	Pas de contraintes liées à l'ouvrage, sauf des restrictions d'occupation du sol liées aux conditions en submersion. Les mises en eau seront rares mais avec localement de fortes hauteurs d'eau.	*Le cours d'eau peut rester le plus naturel possible (Rs IV). Les mises en eau étant rares, la cuvette reste un milieu terrestre. Elle sera donc vulnérable en cas de submersions, surtout là où elles seront prolongées et/ou avec des hauteurs d'eau fortes.*
B – Entonnement	Le lit mineur doit être dirigé vers le pertuis et résister aux mises en vitesse locales pendant les crues.	*Un type Rs IV apparaît un objectif raisonnable, avec une section aussi naturelle que possible et un renforcement des berges avec des matériaux préservant les échanges hydriques.*
C - Corps du barrage	Les ouvertures (pertuis, dallots-meurtrières) sont dimensionnées pour répondre aux besoins de laminage. Elles sont soumises à de fortes vitesses pendant les crues. Une surverse garantit la sécurité de l'ouvrage en cas de crue exceptionnelle. Fondations indispensables.	*L'artificialisation nécessaire du pertuis appelle un type Rs I. Des adaptations peuvent être proposées sur la pente et éventuellement la forme de la section pour réduire les perturbations sur les circulations d'animaux.* *Les fondations modifient les flux souterrains et donc le fonctionnement de la zone hyporhéique.*
D - Pied du barrage	Doit être protégé contre des écoulements potentiellement érosifs, à la sortie du pertuis et sous le déversoir de crue. Un bassin de dissipation peut être construit.	*De type Rs I dans tous les barrages visités, cette zone pourrait être en type Rs II par ajout de matériaux rugueux ou de blocs, sous réserve de bon fonctionnement hydraulique et d'un gain écologique suffisant.*
A' - Aval	Par définition, la zone aval n'a plus besoin de protection particulière.	*Le type Rs IV doit être l'objectif dès que possible. L'aval connaît toutefois un régime hydrologique (eau + sédiments) modifié par le barrage.*

TABLEAU 3

Le **TABLEAU 3** illustre la démarche en deux temps :

- formaliser par zone les contraintes qui justifient l'artificialisation : l'ouvrage doit assurer sa fonction et résister aux crues même quand la capacité de stockage est dépassée ;
- définir collégialement un « riverscape-objectif » qui réalise le meilleur compromis entre les contraintes de l'ouvrage et son environnement et serve de point de départ à la conception de l'ouvrage.

La démarche ne s'arrête pas au choix d'un riverscape « type ». Ce choix n'est qu'un point de départ pour affiner ensuite la définition des tronçons (géométrie de la section en travers, pente, choix des matériaux, etc.) pour améliorer les potentialités écologiques tout en assurant le fonctionnement hydraulique et la stabilité.
Certaines contraintes sont « visibles » et apparaîtront dès la première rédaction (définition des organes hydrauliques), d'autres éléments peuvent échapper au premier diagnostic si le concepteur du barrage ne pressent pas leur importance (exemple des fondations d'un barrage, qui vont limiter les flux souterrains et modifier les hauteurs de nappe en amont et en aval, donc les flux verticaux). L'examen d'ouvrages similaires existants peut alimenter la réflexion.

1.6 Généralisation à un ensemble d'aménagements

Les questions que nous avons été amenés à nous poser pour un ouvrage ponctuel recouvrent des questions plus générales sur les travaux en rivière (définition de sections en travers, choix des techniques et des matériaux, etc.). Nous avons donc réfléchi à la généralisation de notre approche à un projet d'aménagement sur tronçon plus étendu, combinant éventuellement des ouvrages écrêteurs, des endiguements rapprochés et des calibrages au droit des enjeux, ou même des réhabilitations de tronçon. Le principe restera le même : mettre en regard zone par zone les contraintes et les solutions techniques possibles, pour sélectionner un riverscape objectif. Les zones seront en grande partie définies par milieu (urbain, périurbain, rural, naturel, etc.), dans la mesure où chaque milieu est caractérisé par des contraintes spécifiques : enjeux, moyens, espace disponible, règles d'intégration paysagère. La typologie de riverscapes présentée dans la **FIGURE 29**, simple et hiérarchisée selon le gradient d'imperméabilisation, a été définie pour une réflexion autour d'un ouvrage ponctuel. Sur un territoire d'étude plus étendu, les paysages naturels seront nécessairement plus variés, dans les lits mineur et majeur. De plus, la dimension longitudinale est masquée par la représentation choisie, qui met en avant un profil en travers « type ». Le paragraphe suivant et la **FIGURE 30** fournissent quelques pistes pour construire des riverscapes sur un territoire plus étendu.

Raisonner par tronçons :
La représentation par profils masque les composantes longitudinales comme la pente et l'hétérogénéité. A l'avenir, nous proposons de décrire des caractéristiques par tronçon, chacun étant éventuellement illustré par plusieurs types de profils-types, en précisant éventuellement leur fréquence (profil majoritaire / profils secondaires).

Des profils avec davantage de descripteurs :
Pour représenter la variabilité des paysages aquatiques sur un territoire plus grand, davantage de paramètres sont nécessaires dans les Paysages Aquatiques. Des indicateurs relatifs à la ripisylve ou même à l'écologie terrestre du lit majeur pourraient par exemple être inclus. Des descripteurs comme les « Unités Fonctionnelles » permettraient une définition plus fine (Lafont, in Poulard *et al.*, 2011). Adaptés à une description fine des milieux, ils conviendraient pour des actions de réhabilitation, conjointes ou non avec un projet d'aménagement centré sur les inondations.

Critères de choix des « paysages aquatiques objectifs » :
L'accroissement du nombre de descripteurs va multiplier les types et sous-types. La typologie ne sera plus linéaire : la hiérarchisation des riverscapes serait donc plus difficile, mais elle n'est d'ailleurs plus forcément pertinente à cette échelle. Des types différents peuvent être d'intérêt égal : plutôt que des rangs, il faudra donc définir des classes. Le choix des riverscapes-objectifs zone par zone sera aussi guidé par la recherche de l'hétérogénéité, qui favorise la biodiversité globale.
Enfin, la structuration spatiale des riverscapes sera également un trait important.

Exemple de préconisation de paysages aquatiques objectifs à l'échelle d'un linéaire de rivière avec occupations du sol variées

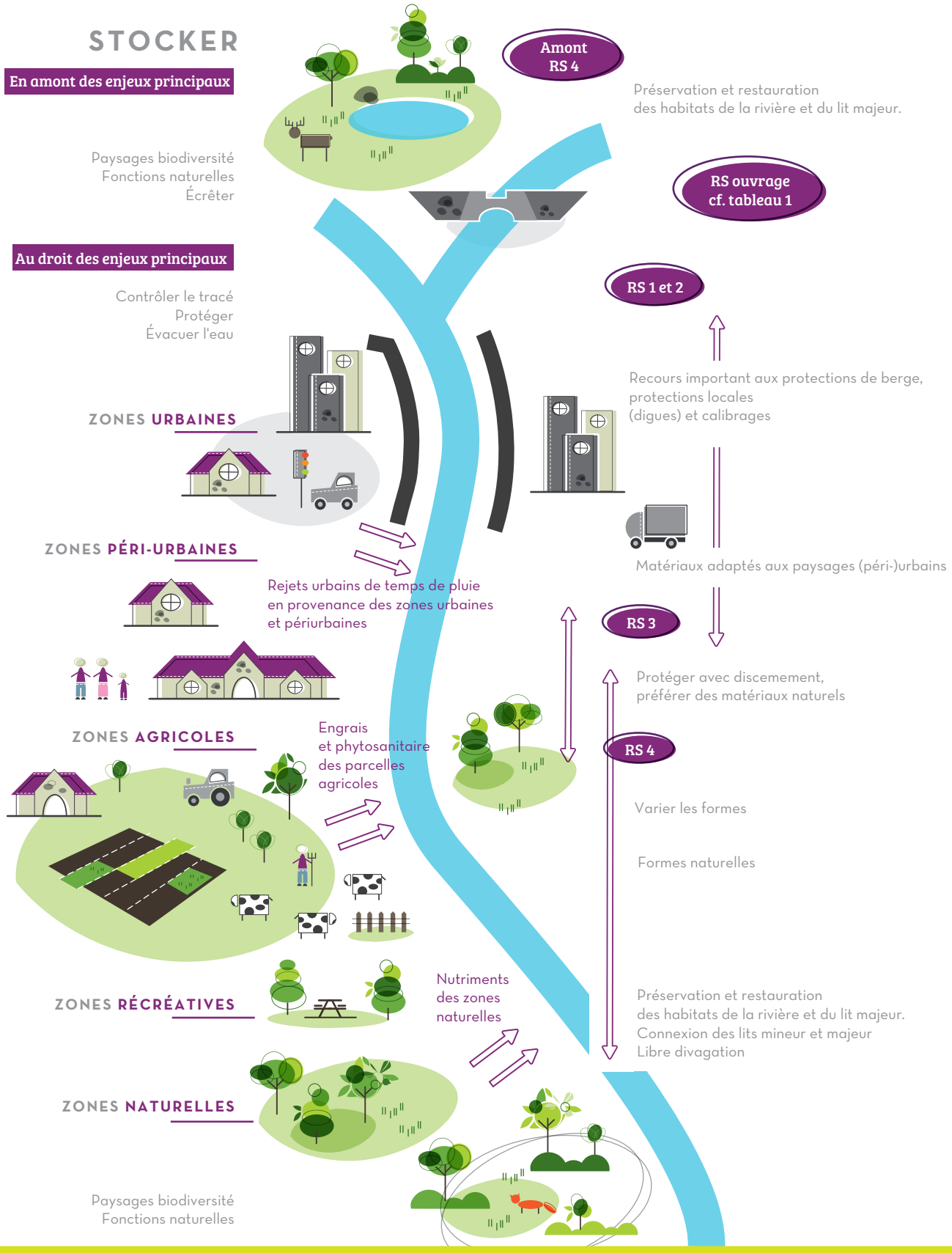


FIGURE 30

4 Perspectives et freins

La démarche a été développée lors d'un projet de recherche bilatéral avec l'Université Polytechnique de Cracovie centré sur les barrages à pertuis ouverts[14], puis la thématique a été élargie aux conséquences environnementales de ce type d'équipement. L'idée de départ était d'identifier les effets négatifs sur l'environnement, puis de collecter des recommandations pour atténuer ces effets. Il est rapidement apparu que cette démarche était vouée à l'échec : quelques recommandations peuvent être brossées dans les grandes lignes, mais il n'est pas pertinent de se passer d'une réelle expertise locale. Il est apparu qu'il n'est pas pertinent de classer a priori l'effet des différents types d'aménagement, car cet effet dépend du contexte physique, des enjeux et des variantes techniques (par exemple, un ouvrage important et bien conçu, situé dans un tronçon à faible enjeu, peut être préférable à des petits ouvrages visuellement moins choquants, mais mal conçus et situés dans des tronçons de grande biodiversité). Concrètement, pour notre projet scientifique, nous avons éprouvé le besoin de formaliser les contraintes liées au génie civil et de les mettre en lien avec une modification « estimée » du fonctionnement écologique sur ce bassin. Le recours aux riverscapes pour échanger des informations s'est révélé précieux ; ils nous ont permis de formaliser nos propres questions et de réfléchir au choix des solutions techniques.

Il était naturel de transposer cette expérience pour aider les collaborations nouvelles. La méthode a été publiée dans des revues scientifiques (Poulard *et al.*, 2010 et 2011) ; après cette validation du concept, les recherches se poursuivent. D'autres applications seront nécessaires pour améliorer la méthodologie et la rendre utilisable en opérationnel, dans des contextes variés.

[14] *programme Polonium puis EcoNet*

6

MAÎTRISER LES ÉVOLUTIONS DU LIT DES COURS D'EAU (INCISION, ATTERRISSEMENT, ...) ET MIEUX GÉRER LES FORMES FLUVIALES

Voir les fiches retours d'expériences se rapportant à cette partie au point 4 du chapitre 4 de l'ouvrage (p. 238 à 261)

1 Contexte et enjeux

1. INTRODUCTION ET RAPPELS DE QUELQUES PRINCIPES DE GÉOMORPHOLOGIE FLUVIALE

Les rapports entre la société et les cours d'eau ont connu une profonde évolution au cours des trois dernières décennies, en rupture avec plusieurs siècles d'une gestion visant à assurer un contrôle sévère des processus naturels. Depuis le XVIIIème siècle au moins, la société occidentale a en effet cherché à maîtriser la dynamique naturelle des rivières et des fleuves pour réduire les débordements, bloquer les déplacements latéraux du chenal, synonymes de perte de terre (mais les gains équivalents sont dans ce cas passés sous silence), favoriser la navigation, etc. (cf. infra). Ces aménagements ont atteint une partie de leurs buts avec une réduction (locale) des inondations et des débits solides associés. Dans les années 1950-1960, ces travaux ont affecté, avec des moyens de plus en plus lourds, des cours d'eau souvent très sollicités pour la fourniture de granulats, dans des régions rurales par ailleurs soumises au remembrement des terres, au drainage et à la disparition des zones humides. Les cours d'eau, maltraités, ont connu, comme des pans entiers du territoire, une remise en question des modes traditionnels de mise en valeur au profit du « déménagement » du territoire, pour paraphraser le titre d'un ouvrage du géographe Maurice Le Lannou. Le mouvement de contestation, né au début des années 1970, s'est amplifié dans la société civile et a gagné les services officiels de la gestion de l'environnement à la fin de la décennie. Des manuels pour techniciens ont fait la promotion de nouvelles pratiques dès le début des années 80 ; l'objectif a été de réduire les aménagements « durs » puis, très vite, de conserver, de restaurer ou de réhabiliter le fonctionnement « naturel » des hydrosystèmes. L'ensemble des acteurs scientifiques, opérationnels et politiques a pris aujourd'hui conscience que les processus hydromorphologiques (transport de la charge de fond, mobilité latérale, etc.) sont bénéfiques pour les rivières et les vallées alluviales et, de manière indirecte, pour la société. Dès le début des années 1990, après la tenue des Assises de l'eau et le vote de la loi sur l'eau de 1992, il est admis qu'il convient de les protéger, de les valoriser et de les gérer durablement.

La gestion environnementale des cours d'eau, conçue dans la perspective de la « durabilité », répond à une demande sociétale croissante, aussi bien sur un plan national (nouvelle Loi sur l'Eau de 2006), européen (Union Européenne, 2000) qu'international (Brierley et Fryirs, 2005, 2008). Ce consensus sociétal est lié au fait que le développement des sociétés est indissociablement lié à l'accès à l'eau (Gentelle, 2003 ; Schneier-Madanes, 2010) et aux multiples services rendus par les hydrosystèmes (ressource alimentaire halieutique, alimentation en eau potable, dimension récréative, en complément d'usages traditionnels tels que la navigation, la production énergétique et l'irrigation).

Les lits fluviaux sont des enveloppes ajustables de façon à optimiser les transferts d'eau et de sédiments, la charge de fond jouant un rôle déterminant en dynamique fluviale.

AJUSTEMENTS CONSÉCUTIFS À DES ÉVOLUTIONS RELATIVES DE LA CHARGE DE FOND Q_s ET DU DÉBIT LIQUIDE Q

+ : augmentation - : diminution

changements relatifs	plancher alluvial	style fluvial	largeur du chenal	profondeur du chenal	longueur d'onde	sinuosité du chenal	pente du chenal
$Q^- < Q_s^-$	incision	méandrage	-	+	-	-	+
$Q^- > Q_s^-$	accumulat°	méandrage	-	-	-	-	+
$Q^+ < Q_s^+$	incision	tressage	+	+	+	+	-
$Q^+ > Q_s^+$	accumulat°	tressage	+	-	+	+	-

TABLEAU 4

D'APRÈS BRAVARD ET GILVEAR, 1993

LA BALANCE DE LANE (1955)

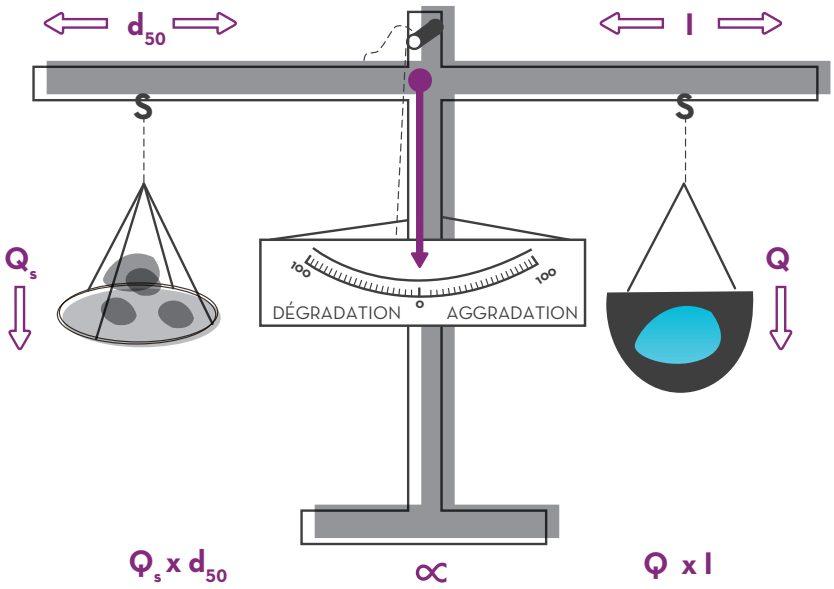


FIGURE 31

D'APRÈS BRAVARD ET GILVEAR, 1993

Les ajustements s'opèrent dans les trois dimensions, de telle sorte que la rivière possède plusieurs degrés de liberté (**TABLEAU 4**), en réponse aux changements dans le temps et l'espace des variables de contrôle qui sont le débit liquide et le débit solide. Ces derniers sont eux-mêmes placés sous le contrôle du bassin versant (relief, géologie, climat, occupation du sol), les variables relatives à ce derniers pouvant varier à l'échelle de temps humaine étant le climat et, surtout, l'occupation du sol (Bravard et Petit, 1997 ; Malavoi et Bravard, 2010). Les processus de dépôt et d'érosion du lit d'un cours d'eau résultent de la recherche d'un équilibre dynamique entre les flux sédimentaires et les flux hydriques. Ce principe est bien décrit par la balance de Lane (1955) (voir **FIGURE 31**). Un tronçon de cours d'eau stable est un système pour lequel la puissance des écoulements, contrôlée par le débit liquide (**Q**) en période de crue et la pente (**I**), est compensée par la dissipation d'énergie occasionnée par le transport de la charge solide (Q_s) et la taille des sédiments (d_{50}). La réponse du cours d'eau à un éventuel déséquilibre de la balance se traduit par un phénomène d'exhaussement ou de d'incision du lit.

2. L'HYDROMORPHOLOGIE, CLÉ DE VOÛTE DES ÉCOSYSTÈMES AQUATIQUES ET RIVERAINS ET DE LEURS FONCTIONS

Il est aujourd'hui largement connu que l'hydromorphologie contrôle fortement les structures et fonctionnements des habitats physiques aquatiques et riverains, donc la biodiversité et les fonctions des hydrosystèmes (par exemple Brierley et Fryirs, 2008 ; Schmitt *et al.*, 2011). Le concept d'hydrosystème fluvial prend en considération, de façon interdisciplinaire, les processus morphodynamiques et écologiques dans les dimensions longitudinales, transversales, verticales (échanges entre le lit mineur et son substrat alluvial), le tout dans la quatrième dimension qui est le temps (ou les temps), de l'épisode de crue à de séquences pluri-séculaires pouvant présenter des styles fluviaux différents.

Les liens étroits entre hydromorphologie et écologie concernent aussi bien le lit mineur (granulométrie, faciès d'écoulement, bancs plus ou moins végétalisés, etc.), les berges (selon les pentes) et le lit majeur (annexes hydrauliques, forêts riveraines, etc.) (**FIGURE 32**, Amoros et Petts, 1993). Les liens entre la mobilité latérale des chenaux et la mosaïque des habitats et biocénoses (différents stades de successions végétales par exemples) sont particulièrement marquants. La stabilité de l'ensemble est étroitement liée aux « instabilités locales » (processus d'érosion/dépôt), garantes de la complexité et de la richesse de l'hydrosystème.

De fait, l'hydromorphologie tient une place de plus en plus centrale dans les programmes de préservation et restauration/réhabilitation des hydrosystèmes fluviaux, dans une perspective durable (Downs et Gregory, 2004).

ILLUSTRATION DU CONCEPT D'HYDROSYSTÈME FLUVIAL ET DE SES ÉCHELLES SPATIALES.
a. Schéma des flux bidirectionnels selon les dimensions transversale et verticale. b. Schéma d'un hydrosystème fluvial, comprenant différents secteurs fonctionnels, au sein de son bassin versant. c. Schéma des ensembles et unités fonctionnels au sein d'un secteur fonctionnel, ici un méandre

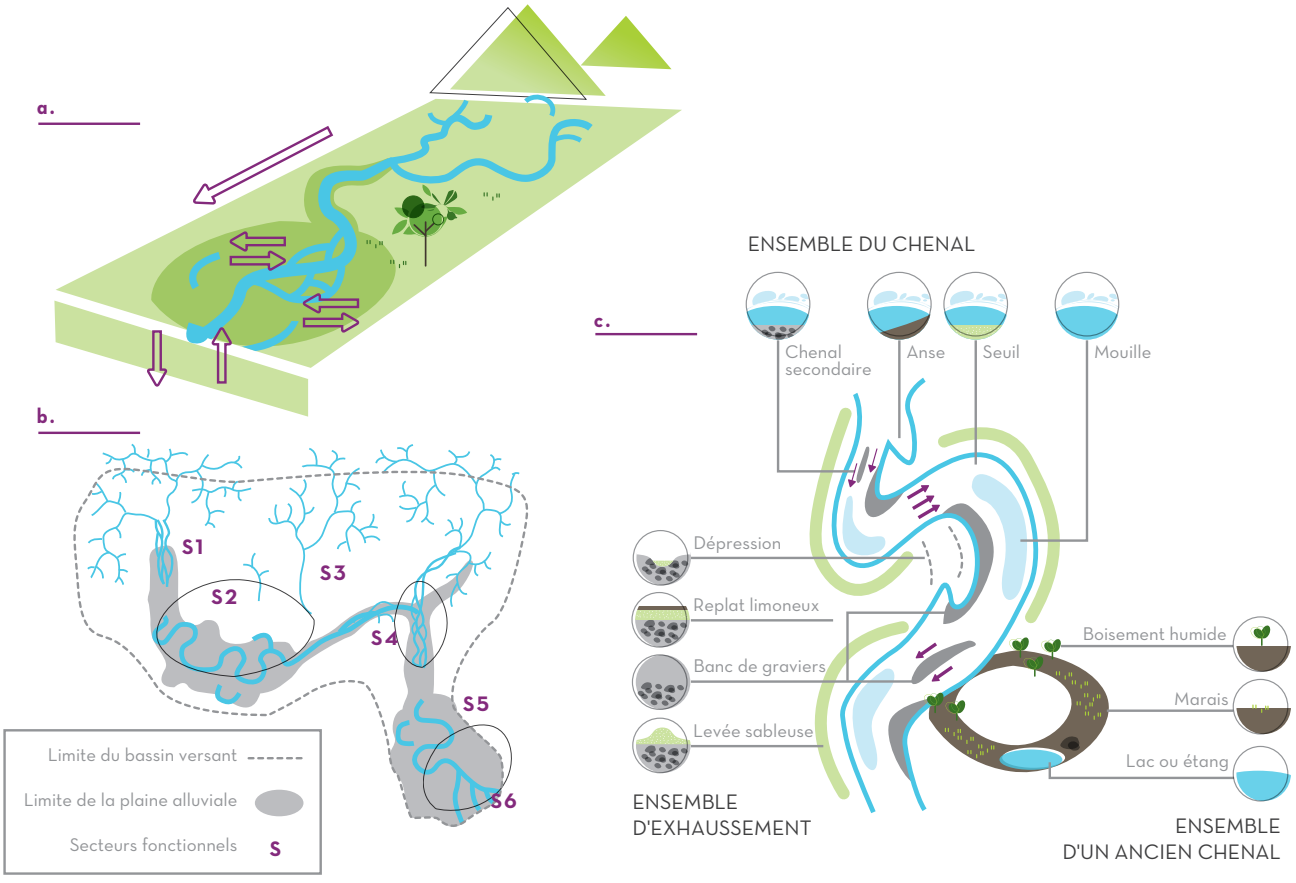


FIGURE 32 D'APRÈS AMOROS ET PETTS, 1993

Il est indispensable de dépasser les approches locales et d'intégrer les projets dans une analyse spatiale élargie, à l'échelle d'un tronçon de plus grande dimension ou, mieux encore à l'échelle du bassin versant.

3. DES HYDROSYSTÈMES SOUS CONTRÔLE ANTHROPIQUE

Depuis le Néolithique, que ce soit aux échelles des bassins versants (défrichements, gestion forestière, agriculture, etc.), des lits majeurs (irrigation, protection contre les crues, etc.) ou des lits mineurs (stabilisation des berges), la dynamique des systèmes fluviaux est contrôlée par la société à des degrés divers (voir par exemple Bravard et Salvador, 2009). Les hydrosystèmes d'Europe peuvent ainsi être considérés comme des « anthroposystèmes », les composantes humaines et naturelles interagissant et co-évoluant depuis des siècles voire des millénaires, selon des modalités et des rythmes variés, souvent complexes, et dans des spatialités diverses (voir par exemple Gunnell, 2009). Néanmoins, la pression anthropique sur les hydrosystèmes n'a cessé de croître (cf. supra), avec des endiguements, des stabilisations de berges, des rectifications, des constructions de retenues, des extractions de granulat dans les lits mineurs et majeurs, des canalisations et chenalisations, des changements d'occupation du sol (dont l'imperméabilisation due à l'étalement urbain), et des pratiques culturales (voir par exemple United Nations, 2007).

Si l'on considère, comme l'énoncent Tricart et Kilian (1979), qu'un « … aménagement consiste à infléchir ou à remplacer par une autre une dynamique existante », on constate que la plupart des aménagements hydrauliques ont largement modifié les dynamiques hydromorphologiques et écologiques des hydrosystèmes, ainsi que leurs fonctions écologiques et les services rendus à la société. Parmi les impacts, citons la contraction des zones inondables, l'accélération des ondes de crue, l'incision des lits et l'enfoncement corrélatif des niveaux piézométriques, l'augmentation de l'aléa inondation en aval des zones aménagées et/ou incisées, la stabilisation des formes fluviales, la pollution des eaux, le non renouvellement et donc le vieillissement des successions écologiques, l'altération de la biodiversité, etc. (Voir par exemple Piégay et Stroffek, 2000). L'ampleur des impacts anthropiques amène à considérer que les milieux fluviaux sont parmi les écosystèmes les plus dégradés au monde, notamment dans les pays industrialisés et/ou fortement peuplés (Rapport *et al.*, 1998).

2 Grands principes à appliquer

Il ne s'agit plus de décrire des processus localisés et de « corriger » les rivières par rapport à une norme communément admise. A la conception « carcérale » qui dominait naguère a succédé une conception dynamique basée sur les principes suivants : (i) intégration des cours d'eau dans leur bassin versant, au sens où l'eau, les sédiments et les solutés transitent en direction des grands axes de drainage, (ii) interprétation des formes fluviales au filtre des « processus-réponses » (Schumm, 1977) et (iii) « liberté » des processus et des réponses dans les différentes dimensions de l'espace, les variations de flux d'eau et de matière provoquant des modifications de l'enveloppe fluviale de nature déterministe, au point que les styles fluviaux, et plus généralement les formes fluviales, sont eux-mêmes considérés comme des réponses de variables « internes » au jeu de variables « externes » (climat, occupation du sol du bassin, etc.), d'où une grande diversité de formes et processus fluviaux (Schmitt *et al.*, 2007).

1. INSCRIRE LE PROJET DANS UNE POLITIQUE TERRITORIALE ET LE TRAITER AUX BONNES ÉCHELLES SPATIALES

Il est indispensable de dépasser les approches locales et d'intégrer les projets dans une analyse spatiale élargie, à l'échelle d'un tronçon de plus grande dimension ou, mieux encore à l'échelle du bassin versant, laquelle représente un échelle fondamentale car c'est à ce niveau qu'agissent les variables de contrôle de la dynamique fluviale : évolution de l'occupation du sol modifiant les flux hydriques et la fourniture sédimentaire aux chenaux à l'origine des ajustements morphologiques (sédimentation lorsque la fourniture sédimentaire dépasse la capacité de transport, incision dans le cas contraire).

Il est aussi important de tenir compte du fait que toute intervention sur un tronçon de la rivière est susceptible d'avoir des répercussions morpho-sédimentaires à l'amont et à l'aval des opérations réalisées.

2. S'INSPIRER DES MÉCANISMES NATURELS

Sur un territoire donné où un cours d'eau et/ou ses annexes sont à réhabiliter, plusieurs objectifs de restauration physique des milieux sont possibles :

- rétablir un espace de liberté si l'énergie le permet et si la mobilité latérale constitue un processus important du chenal considéré. En principe les chenaux dont la puissance spécifique à pleins bords dépasse environ 35 W/m^2 ont la capacité de se réajuster spontanément après un aménagement, si celui-ci n'est pas trop « dur » ;
- restaurer une dynamique sédimentaire. De nombreux lits connaissent aujourd'hui un déficit, qui entraîne une tendance à l'incision. Des recharges sédimentaires peuvent alors être effectuées, de façon artificielle, ou naturellement par des apports issus des versants (glissement de terrain) ou par le destockage sédimentaire induit par la mobilité latérale ;
- reconnecter le lit mineur avec le lit majeur pour écrêter les crues, restaurer des annexes hydrauliques, renforcer les échanges nappe-rivière et recouvrer la biodiversité du chenal, des berges et de la plaine inondable.

3. PRENDRE EN COMPTE LE TEMPS POUR LA DURABILITÉ DES ACTIONS

La durabilité des fonctions écologiques des hydrosystèmes est d'autant mieux assurée que ces dernières peuvent se maintenir de façon autonome ou s'auto-entretenir, en incorporant des interventions humaines les moins importantes et fréquentes possibles. Les actions d'ingénierie écologique doivent donc intégrer la nécessité de prendre en compte la dimension temporelle, à court, moyen et long termes (Jollivet, 2001). Sur un plan géomorphologique, cela amène à interroger les évolutions passées des hydrosystèmes ou leurs trajectoires temporelles de façon à mettre en évidence les conditions de durabilité du passé, les conditions de réaction, de relaxation, de récupération et de résilience, ainsi que les seuils de rupture. Il s'agit finalement d'en déduire, en utilisant des modèles prospectifs, des tendances évolutives qui concernent les fonctions des hydrosystèmes et les variables de contrôle correspondantes (hydro-climatologie, occupation du sol, fourniture sédimentaire des bassins versants, etc.) (par exemple Dufour et Piégay, 2009).

LIEN ENTRE LES FLUCTUATIONS CLIMATIQUES, LES FLUX HYDRIQUES ET MINÉRAUX ET L'ACTIVITÉ MORPHODYNAMIQUE DEPUIS LE PREMIER ÂGE DU FER (BASSIN DU RHÔNE MOYEN)

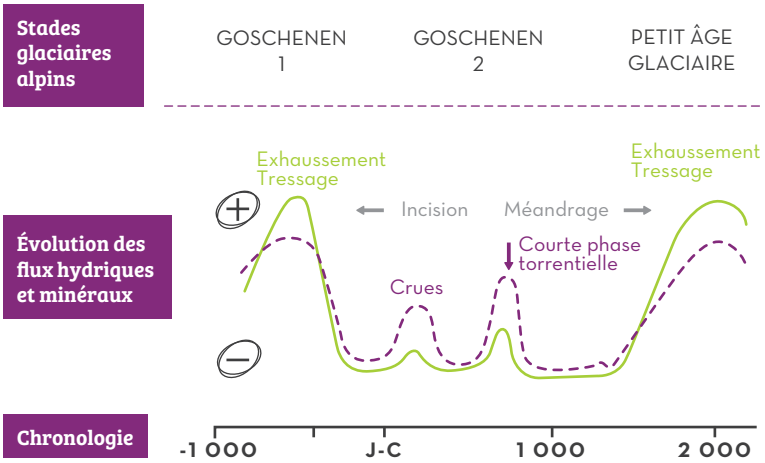


FIGURE 33

D'APRÈS BRAVARD ET PETIT, 1997

4. MINIMISER LES INTERVENTIONS D'ENTRETIEN LOURDES ET COÛTEUSES

La notion de durabilité est sous-tendue par la question des moyens financiers à mobiliser pour atteindre les objectifs ciblés, ce qui renvoie à la question des bilans coûts-bénéfices qui peuvent être réalisés et qui requièrent des études économiques (voir par exemple Piégay *et al.*, 2008). Pour que ces bilans soient les plus positifs possibles, il paraît préférable de viser l'auto-entretien (ou « l'auto-restauration ») des hydrosystèmes (Downs et Gregory, 2004 ; Wohl *et al.*, 2005), avec le moins d'interventions humaines possibles. Mais même dans ce cas, les fonctions écologiques sont sujettes à des variations temporelles plus ou moins importantes, du fait de ruptures de seuils liées la variabilité temporelle des hydrosystèmes qui leur est propre.

5. INTÉGRER LE SUIVI DE PERFORMANCE DÈS LE DÉBUT DE L'OPÉRATION

Toute opération d'ingénierie écologique, et a fortiori de restauration ou de réhabilitation, devrait s'accompagner d'un suivi environnemental pour vérifier que les objectifs ont bien été atteints, et si ce n'est pas le cas, pour diagnostiquer les causes de l'échec. Bien entendu, le suivi post-restauration n'a de sens que s'il est précédé d'un état initial pré-restauration. En outre, il semble important que ce suivi ne concerne pas des métriques d'état, mais de fonctionnement ou de dynamiques hydromorphologiques et écologiques. Enfin, la diversité des échelles de temps à considérer, et en particulier le besoin de prendre en compte les moyens et longs termes, impose de mettre en œuvre des outils de suivi sur les mêmes temporalités. La notion d'observatoires des milieux aquatiques prend ici tout son sens.

La question des effacements d'ouvrage (barrages, seuils, etc.), très présente dans les réflexions sur le retour au bon état écologique, va probablement être au centre de beaucoup de projets dans les années à venir.

3 Outils et réalisation

Une action d'ingénierie écologique visant à agir sur le lit d'une rivière peut poursuivre différents objectifs [15] :

- la simple protection des berges et les techniques douces, de type « génie végétal » étant substituées aux techniques dures de type enrochement ; le génie végétal améliore en particulier l'esthétique des berges mais peut ne pas être compatible avec l'amélioration souhaitable du fonctionnement de l'hydrosystème ;
- la restauration ou la réhabilitation d'écosystèmes, de communautés, d'espèces ;
- la production d'écosystèmes nouveaux (ou « création », cf. infra), durables (ou du moins les plus durables possibles), qui contribuent à maintenir une biodiversité élevée et dont les fonctions sont utiles à l'homme ;
- l'élaboration d'outils biotiques pour retrouver ou optimiser des services écologiques (dépollution, etc.).

La question des effacements d'ouvrage (barrages, seuils, etc.), très présente dans les réflexions sur le retour au bon état écologique, va probablement être au centre de beaucoup de projets dans les années à venir. Nous illustrons la problématique par deux exemples : le contrôle de l'équilibre sédimentaire des rivières et la stabilité des berges.

1. GESTION MORPHO-SÉDIMENTAIRE DES RIVIÈRES

A l'échelle du territoire national français, les problèmes à résoudre sont variés et les solutions doivent être adaptées à chaque cas. Par exemple, dans les bassins versants comme celui de la Durance, la tendance est à l'exhaussement du lit des rivières en raison d'un excès de charge solide fine, avec pour conséquence une augmentation du risque d'inondation (Balland *et al.*, 2002). Mais à l'inverse, dans les bassins versants de beaucoup d'autres rivières comme par exemple la Drôme, l'Ain ou la Moselle, on constate un déficit de charge solide grossière avec pour conséquence l'incision du fond du lit des rivières, pouvant entraîner le déchaussement des piles de pont (**FIGURE 35**), des pertes en ressource en eau souterraine, etc. (Piégay *et al.*, 2004 ; Liébault *et al.*, 2005).

[15] *http://www.cnrs.fr*

Comme nous l'avons vu, la couverture végétale des bassins versants est un facteur de contrôle important à l'origine de la recharge sédimentaire des rivières. Ainsi, lorsqu'il y a excès de charge solide fine, on cherche à lutter contre l'érosion des versants et des berges par des techniques de génie végétal. En situation de déficit de charge solide grossière, on tente à l'inverse de réactiver le transport solide en supprimant la couverture végétale (Pont *et al.*, 2009), en laissant se développer des glissements de terrain jusqu'au cours d'eau (Bravard *et al.*, 1999), voire en procédant à des recharges sédimentaires artificielles (Rollet *et al.*, in press). Parfois, ces deux situations peuvent cohabiter au sein du bassin versant d'une même rivière.

Comme nous l'avons vu, l'érosion latérale des alluvions récentes et/ou quaternaires stockées dans le fond de vallée représente le principal mode de recharge sédimentaire naturel des rivières alluviales. Dans de nombreux cas, les gestionnaires cherchent aujourd'hui à redonner à la rivière un « espace de liberté » lui permettant d'effectuer ces translations latérales, selon une approche méthodologique relativement bien cadrée (Malavoi, 1998 ; Bravard, 2011), même si des adaptations locales sont fréquentes.

Il est également important de préserver, voire recouvrer dans de nombreux cas, la continuité longitudinale de la charge de fond. Les éléments entravant celle-ci sont essentiellement les curages, barrages et seuils et d'anciennes extractions en lit mineur. Des arasements/effacements de seuils, des transferts artificiels, des chasses en aval des retenues, etc., sont fréquemment effectués (Malavoi *et al.*, 2011).

La méthode de détermination de l'espace de liberté des cours d'eau repose notamment sur la délimitation de l'espace de divagation historique, à partir de cartes anciennes et de photographies aériennes. Ici l'exemple de l'Allier à Toulon sur Allier

FIGURE 34

© IGN-PARIS 1998. LE TRACÉ BLEU EST DE 1946.

2. LE GÉNIE VÉGÉTAL ET LA STABILITÉ DES BERGES ET DES VERSANTS

Le génie végétal (ou génie biologique) regroupe des techniques variées faisant appel aux propriétés mécaniques et biologiques des végétaux pour la gestion des phénomènes érosifs et la stabilité des pentes et des berges (AGéBio, 2012). Même si, comme nous l'avons vu, l'érosion des berges est un processus important du fonctionnement hydromorphologique d'une rivière alluviale qu'il convient de préserver, il est nécessaire de lutter contre les sapements quand ils menacent des zones à forts enjeux (habitations, voies de communication, etc.). Quand cela est possible, les techniques de protection végétale des berges sont alors à préférer aux enrochements.

Le génie végétal regroupe des techniques variées faisant appel aux propriétés mécaniques et biologiques des végétaux.

Le génie végétal fait appel à l'utilisation de matériel végétal sous la forme de semences, de boutures ou de plants. On trouve ainsi des techniques d'ensemencement par projection hydraulique, de fascines, de cordons, de clayonnages, de garnissages ou encore de palissades. Ces différents ouvrages présentent des fonctions diverses selon leur structure et leur composition végétale (matériel végétal, espèces). Certains ont un rôle plutôt tourné vers la stabilisation : ils ont alors une forme de seuil et permettent de casser la pente du substrat ou du lit érodé ou instable. Les fascines, les clayonnages et les caissons végétalisés par exemple, rentrent dans cette catégorie. D'autres ouvrages ne remplissent pas cette fonction de stabilisation et sont surtout destinés à installer une couverture végétale appuyée sur des plançons, ainsi que les cordons, assurent de telles fonctions.

En terme de conception, le choix de la bonne technique et sa bonne mise en œuvre passent par une phase de diagnostic, au cours de laquelle il convient de déterminer et localiser les enjeux, qu'ils soient écologiques (l'ingénierie écologique est alors mise en œuvre pour le vivant), ou bien sociaux et économiques (l'ingénierie écologique est alors mise en œuvre par le vivant) (Rey, 2011). Vient ensuite la phase de caractérisation et de cartographie du processus ou du phénomène que l'on souhaite gérer. A ce stade, une caractérisation et une cartographie de la végétation, à l'échelle spatiale intéressant ce processus ou phénomène (de l'échelle locale à celle du bassin versant), doivent permettre de déterminer son influence et la nécessité ou non de la gérer.

Les stratégies d'intervention vont alors consister à (Adam *et al.*, 2008 ; Rey, 2011) :

- **déterminer le type de couverture végétale recherchée, en fonction de la finalité de l'intervention.** Les objectifs d'une intervention par génie biologique peuvent correspondre à plusieurs finalités qui, d'un point de vue écologique, peuvent correspondre à la restauration du milieu érodé, à sa réhabilitation ou encore à sa réaffectation. La couverture végétale à installer pourra alors être de différente nature (pelouse, lande, forêt) afin de répondre à cette finalité.
- **définir des zones d'interventions prioritaires à différentes échelles spatiales.** Lorsque les surfaces à traiter sont importantes, en contexte torrentiel par exemple, il peut être nécessaire de définir des priorités d'intervention, afin d'orienter les moyens financiers mis à disposition des gestionnaires vers des priorités hiérarchisées.
- **choisir les bons ouvrages et les espèces végétales adaptées.** Les ouvrages, mettant en jeu différentes espèces végétales, doivent remplir deux fonctions :
  - résister aux contraintes climatiques, hydrologiques (ou encore gravitaires) lors des épisodes de sécheresse ou de pluies (crues) ;
  - protéger ou stabiliser les berges, grâce à leurs systèmes racinaires ou à leurs parties aériennes assurant différents rôles (stabilisation, piégeage de matériaux).
- **installer les ouvrages de génie végétal dans l'espace et dans le temps, sur une certaine surface d'intervention et à des endroits précis** (haut ou bas de berge par exemple). La stratégie globale d'installation des ouvrages dans l'espace et dans le temps doit répondre aux contraintes et aux exigences d'ordres technique et écologique. Par exemple, la hauteur sur laquelle un talus ou une berge doit faire l'objet d'une végétalisation, doit se baser sur des paramètres hydrauliques et hydrologiques liés aux crues et à leur fréquence de retour.

Exemple de déstabilisation d'un pont par l'incision d'une rivière alluviale : la Moselle à Bainville-aux-Miroirs

FIGURE 35

L'érosion latérale, un processus fondamental pour l'équilibre morpho-sédimentaire d'une rivière alluviale (la Moselle à Mangonville)

FIGURE 36

4 Perspectives et freins

Une expérience est capitalisée depuis une trentaine d'années grâce au croisement et au retour d'expériences nationales et internationales. Parmi les acquis, retenons :

- L'importance d'agir directement sur les variables de contrôle du système et non pas sur les variables d'ajustement (ou de réponse) à l'échelle des formes.
- L'importance de réaliser une étude du fonctionnement initial du milieu. Cela peut inclure une étude historique basée sur des cartes, des photographies, des données sédimentologiques en lit mineur et/ou lit majeur, etc., afin de connaître la trajectoire temporelle du système et sa sensibilité aux perturbations. Dans certains cas, l'étude historique montrera qu'il est préférable de ne pas viser un fonctionnement antérieur, aujourd'hui inatteignable (par exemple du fait de la présence de grands aménagements hydrauliques), mais plutôt une nouvelle dynamique correspondant à la fois à des fonctions ciblées et aux capacités du système. Cette dernière condition doit permettre au système de s'auto-réguler durablement.
- L'importance de ne pas viser systématiquement le bon état, mais plutôt un bon fonctionnement. Ce dernier est souvent acquis en restaurant la continuité et la mobilité longitudinale des flux ainsi que la mobilité latérale du chenal (migration latérale, capacité de défluviation, etc.). C'est la capacité du système à s'autoréguler, c'est-à-dire à connaître la réversibilité des processus et des paysages en réponse à des variables exogènes.
- L'importance des suivis post-travaux dans les milieux restaurés, qui sont basés sur des métriques permettant de mesurer l'évolution de variables à partir de l'état initial, c'est-à-dire la dynamique après restauration.
- L'intérêt d'études comparatives avec des milieux peu impactés (références spatiales) et des milieux non restaurés pour permettre l'estimation des bénéfices tirés de la restauration.
- Les suivis longitudinaux et comparatifs permettent seuls de confirmer le caractère durable des opérations entreprises. Les démarches « adaptatives » garantissent un ajustement des moyens à la cible lorsque l'évolution s'éloigne de la trajectoire souhaitée.

L'ingénierie écologique évolue des pratiques « douces », en vigueur dans les années 80, vers des conceptions prenant en compte le bassin versant.

Les acteurs s'accordent généralement sur la mise en œuvre de ces principes, mais dans la pratique ces derniers sont loin d'être toujours mis en œuvre.

Il reste encore beaucoup à réaliser et d'expériences à accumuler et à formaliser pour dégager une méthodologie (ou sans doute plutôt « des méthodologies », en fonction des contextes géographiques et des types d'anthropisation) affirmée(s) et reconnue(s) de la restauration des hydrosystèmes fluviaux.

Différents domaines où les besoins d'investissement et de recherche se font le plus sentir peuvent être identifiés.

- Les connaissances sur le charriage, et plus généralement sur le transport sédimentaire, à divers pas de temps, sont encore insuffisantes. Or, les transferts sédimentaires, de l'échelle spatiale du tronçon jusqu'à celle du bassin, représentent un aspect important pour le succès des opérations de gestion.
- Les modèles prospectifs sont encore peu précis car les hydrosystèmes sont sujets à une forte variabilité, tant sont nombreuses les combinaisons entre facteurs de contrôle, aux différentes échelles spatiales (poids des héritages géomorphologiques inclus).
- Les modèles des réponses écologiques aux modifications géomorphologiques sont aussi encore insuffisamment robustes.
- L'évolution holocène des systèmes fluviaux et de leurs interactions avec les sociétés du passé est un héritage lointain, mais constitue une composante importante du patrimoine du cours d'eau et de sa plaine. Les conditions d'équilibre, les seuils (au sens de limite au-delà desquelles le système peut connaître une rupture), les formes d'ajustement et les spatialités de ces capacités d'ajustements font l'objet de recherches actuelles. Ce que l'on peut apprendre du passé est un champ à peine exploré et riche de promesses. Plus précisément, existe-t-il une géographie des trajectoires temporelles ? Sera-t-il possible de proposer des modèles régionaux d'évolution des hydrosystèmes et des formes d'action pour obtenir le succès d'opérations de restauration, par exemple à l'échelle de territoires apparentés aux hydroécorégions ?
- Quelle est la géographie de la sensibilité des systèmes fluviaux aux pressions anthropiques sachant qu'un des facteurs déterminants est, avec la charge de fond, l'énergie mise en jeu pendant les crues ?
- Quelles sont les durées de vie des opérations de réhabilitation et de restauration dans les milieux naturels dotés d'une dynamique faible, moyenne ou forte ?

Les Trente Glorieuses ont été une période capitale pour la relance de l'économie française après les années de la Dépression et de la guerre. En contrepartie elles ont eu la caractéristique d'imposer un modèle de développement irrespectueux des lieux de notre territoire. Le paysage rural de la France a subi des traumatismes violents au nom du progrès économique. C'est la multiplication des usages et des conflits qui, au début des années 80, a fait prendre conscience de la nécessité de faire cesser la dégradation des rivières, puis, dans un deuxième temps, de gérer de manière plus respectueuse des équilibres, enfin, à partir des années 2000 de maintenir ou de recréer un « bon état » et un « bon fonctionnement », seuls garants de la pérennité des services rendus par les milieux aquatiques. Le multi-usages, qui est la quête du maximum d'aménités aux dépens de milieux trop sollicités, a des vertus quand il est bien géré, mais lorsque des seuils d'utilisation raisonnable sont franchis, il est susceptible de rendre plus difficile le maintien des fonctions essentielles.

L'ingénierie écologique donc évolue des pratiques « douces », et souvent locales en vigueur dans les années 80, vers des conceptions plus ambitieuses prenant en compte le bassin versant, les réponses complexes à l'échelle des tronçons ainsi que les écosystèmes aquatiques et terrestres. Dans l'interdisciplinarité, qui a été forgée il y a 30 ans dans divers bassins, et où l'hydrmorphologie joue un rôle central, les disciplines se rejoignent dans une pratique cohérente, adaptée au contexte écogéographique, et durable.

7

MIEUX GÉRER LES EAUX PLUVIALES URBAINES EN DIMINUANT LEURS EFFETS NÉGATIFS ET EN LES VALORISANT

Voir les fiches retours d'expériences se rapportant à cette partie au point 5 du chapitre 4 de l'ouvrage (p. 262 à 291)

1 Contexte et enjeux (Chocat et Eurydice, 1997)

A partir du milieu du XIXème siècle, dans le but essentiellement de lutter contre les épidémies, les eaux pluviales sont considérées comme une nuisance au même titre que les eaux usées auxquelles elles sont le plus souvent mélangées. Cette approche hygiéniste se développe et conduit à la mise en place du tout-à-l'égout. On développe alors de gigantesques réseaux d'assainissement qui permettent d'évacuer le mélange d'eaux usées et d'eaux pluviales le plus vite possible en aval des centres ville.

L'approche du « tout tuyau » transforme ainsi une ressource précieuse (l'eau de pluie) en un déchet et une menace.

Après la seconde guerre mondiale, les villes connaissent un développement considérable ce qui a pour conséquence une augmentation très rapide des surfaces imperméabilisées à leur périphérie. Les dysfonctionnements hydrauliques se multiplient entraînant des inondations dans les points bas des villes. On développe alors une approche hydraulique, visant à renforcer les capacités d'évacuation des réseaux, tenter de gérer les eaux pluviales et les eaux usées dans des réseaux différents ou écrêter les débits de pointe par l'utilisation de bassins de retenue.

Le principe d'évacuation rapide n'est cependant pas fondamentalement remis en question et les conséquences négatives de ce mode de gestion se font de plus en plus lourdes, à la fois sur le plan écologique et sur le plan social :

- Les réseaux d'assainissement, de par leur fonctionnement gravitaire, concentrent des quantités considérables d'eau dans les points bas des villes, qui sont souvent leurs centres historiques. Lorsque la capacité hydraulique des conduites devient insuffisante, les réseaux débordent provoquant des inondations qui peuvent prendre des ampleurs considérables. Les inondations par débordement de réseau constituent ainsi la première cause de catastrophes naturelles en France[16].
- De plus, ces flux d'eau sont fortement pollués et beaucoup trop importants pour être traités dans les stations d'épuration. Rejetés sans traitement, ils constituent une cause majeure de dégradation de la qualité des milieux aquatiques, à la fois en termes écologiques (impacts morpho-dynamiques, apports de matières organiques et de micropolluants, etc.) et en termes d'usages (les rejets urbains de temps de pluie constituent par exemple la première cause des interdictions de baignade).
- Enfin, l'augmentation de la part ruisselée diminue la part infiltrée sur le bassin versant, ce qui dérégule le cycle hydrologique et diminue à la fois la quantité d'eau à la disposition de la végétation urbaine et le niveau des nappes souterraines, donc les débits d'étiage des rivières.

[16] *voir par exemple le site http://www.catnat.net/*

Toutes les techniques durables de gestion des eaux pluviales urbaines peuvent donc, dans un certain sens, être vues comme des solutions relevant de l'ingénierie écologique.

L'approche du «tout tuyau» transforme ainsi une ressource précieuse (l'eau de pluie) en un déchet et une menace.

A la fin du XXème siècle, le constat de ces dysfonctionnements, associé aux craintes suscitées par le changement climatique en termes de dérèglement des ressources en eau, vont contribuer à faire émerger un nouveau paradigme.

Les réflexions vont d'abord viser à réintégrer l'eau dans la ville puis, logiquement, à redonner aux eaux de pluie urbaines leur statut de ressource, à la fois pour l'homme et pour la nature (CERTU, 2003).

Cette évolution des approches et des pratiques se retrouve dans tous les pays du monde, pauvres ou riches, richement dotés en eau ou non, déjà urbanisés ou en cours d'urbanisation, comme le montre une enquête de l'IWA effectuée au début des années 2 000 sur un échantillon de plus de 20 pays (Marsalek et Chocat, 2002).

Les grands enjeux associés à cette évolution sont cependant multiples et, selon les cas, ce ne sont pas toujours les mêmes qui sont mis en avant :

- diminuer les risques d'inondation dans et à l'aval de la ville ;
- diminuer les rejets polluants par temps de pluie et améliorer la qualité des milieux récepteurs ;
- diminuer le coût de la gestion des eaux pluviales ;
- récupérer les eaux de pluie urbaines et les valoriser dans la ville, cette valorisation pouvant prendre des formes multiples (développement d'une nouvelle ressource en eau, création de paysages et d'usages, climatisation de la ville, etc.) ;
- utiliser les eaux pluviales urbaines pour développer des trames vertes et bleues et contribuer ainsi à développer la nature et la biodiversité en ville ;
- concilier la gestion des eaux pluviales avec d'autres usages afin de faire face au coût du foncier et aux disponibilités foncières.

Toutes les techniques durables de gestion des eaux pluviales urbaines peuvent donc, dans un certain sens, être vues comme des solutions relevant de l'ingénierie écologique. Cependant certaines d'entre elles, même si elles visent à protéger les milieux, ne reposent pas sur la mise en œuvre d'une fonctionnalisation de la nature. Elles seront simplement citées. Nous développerons un peu plus les solutions ayant une vocation avérée de valorisation locale des eaux de pluie et mettant en œuvre des procédés répondant aux principes de l'ingénierie écologique.

2 Grands principes à appliquer

1. S'APPUYER SUR DES PRATIQUES DE GESTION INSPIRÉES DES MÉCANISMES QUI GOUVERNENT LES SYSTÈMES ÉCOLOGIQUES

L'objectif recherché doit être de rendre la ville «transparente pour l'eau», c'est-à-dire de faire en sorte que le processus d'urbanisation perturbe le moins possible, et idéalement pas du tout, le cycle hydrologique (Marsalek *et al.*, 2007). Le partage entre la part ruisselée, la part infiltrée et la part évaporée ou évapotranspirée doit donc être équivalent à celui de la zone avant son aménagement, et ceci pour tous les types de précipitations.

Il est à noter que cet objectif de «ne pas modifier» revient à considérer la situation avant aménagement comme la référence à respecter. En réalité, rien ne prouve que la situation avant aménagement soit naturelle (le comportement d'un sol agricole est différent de celui d'un sol naturel), et encore moins que cette situation ne soit «idéale».

Les solutions techniques envisagées lorsque l'on aménage une zone doivent donc vérifier trois contraintes fondamentales (CERTU, 2006 ; Novotny et Brown, 2007) :

L'objectif recherché doit être de rendre la ville «transparente pour l'eau».

• **Ne pas modifier la part de l'eau qui rejoint la nappe.** Pour ceci il est nécessaire de maintenir la capacité d'infiltration des sols, soit au droit des surfaces urbanisées (par exemple en utilisant des revêtements poreux ou perméables) soit à leur proximité immédiate (par exemple en utilisant des noues d'infiltration, des tranchées ou des puits).

• **Ne pas modifier la part de l'eau qui est évapotranspirée par la végétation**. Cette contrainte implique d'une part la nécessité de maintenir de la végétation sur le site, et d'autre part celle de mettre suffisamment d'eau à la disposition de cette végétation. L'utilisation d'espaces verts ou même de toitures végétalisées pour recevoir les eaux pluviales permet un drainage des sols de surface par évapotranspiration. L'eau est ainsi mise au service de la végétation et en retour la végétation joue un rôle actif dans la gestion de l'eau.

• **Ne pas accélérer les écoulements pour la part qui ruisselle.** Le troisième outil consiste à éviter d'accélérer les écoulements en utilisant autant que possible les lignes d'écoulement naturelles (ruisseaux, thalwegs, fonds de vallons, etc.) ainsi que les zones de stockage ou d'infiltration préexistantes. Ceci nécessite des actions d'identification et de planification urbaine de façon à interdire ou limiter l'urbanisation dans ces zones sensibles. Ce type d'actions de gestion des eaux pluviales peut également conduire à re-découvrir d'anciens ruisseaux, permanents ou non, qui avaient été canalisés ou busés, à développer et restaurer des zones naturelles d'expansion de crue (voir à ce sujet le paragraphe « Valoriser des paysages et/ou des usages ou des aménités liés à l'eau en milieu urbain »).

2. NE PAS DÉGRADER ET/OU CONTRIBUER AU MAINTIEN OU À LA RESTAURATION DU BON FONCTIONNEMENT DES MILIEUX AQUATIQUES

L'application des principes précédents garantit que le régime des cours d'eau sera peu affecté par le processus d'urbanisation, en particulier sur deux points : le maintien des débits d'étiage et la limitation des pointes de crue.

Outre l'aspect quantitatif de la gestion des eaux pluviales, il est également important de porter une grande attention à la qualité physico-chimique des rejets et donc d'éviter de dégrader leur qualité. Pour ceci, quelques règles simples sont à suivre (Marsalek *et al.*, 2004) :

• veiller à une séparation stricte des eaux usées et des eaux pluviales ;

• diminuer les sources potentielles de polluants : utiliser le moins possible de produits phytosanitaires ou de sels de déneigement, veiller à une collecte efficace des ordures ménagères, éviter les matériaux de construction susceptibles de relarguer des produits toxiques, etc. ;

• limiter autant que possible les écoulements sur des surfaces urbaines imperméables qui vont être lessivées et érodées par l'eau ;

• si nécessaire, utiliser des techniques susceptibles de piéger les polluants dans une situation où ils pourront être biodégradés ou éventuellement récupérés (les techniques à mettre en œuvre sont des zones tampons identiques à celles utilisées dans les zones agricoles ; voir le paragraphe « Contrôle à la source des rejets diffus d'origine agricole »).

Par ailleurs les ouvrages eux-mêmes devront être traités en continuité avec les milieux naturels, de façon à préserver et à développer les corridors aquatiques et s'inscrire dans les trames vertes et bleues.

3. MINIMISER LES INTERVENTIONS LOURDES ET COÛTEUSES D'ENTRETIEN

Alors que l'un des objectifs majeurs de l'ingénierie écologique est d'assurer l'autonomie d'un écosystème et à terme de minimiser l'entretien, l'un des freins majeurs à l'utilisation des solutions alternatives de gestion des eaux pluviales urbaines réside justement dans la crainte qu'elles inspirent en termes d'entretien et de maintenance.

La plupart des collectivités se contentent donc d'une règle simple limitant le débit maximum pouvant être rejeté par une valeur le plus souvent exprimé en litres/seconde/hectares (débit spécifique). Les règles de ce type sont non seulement inefficaces mais peuvent même être totalement contre-productives.

Ce paradoxe a quatre causes principales :

1) On se trouve en zone urbaine et les citadins sont plus à la recherche d'un espace aménagé que d'une zone réellement naturelle ;

2) Les pressions associées à la fréquentation des sites sont importantes ;

3) Les techniques alternatives sont extrêmement diversifiées et plurifonctionnelles, ce qui d'une part rend parfois difficile l'identification du service responsable et d'autre part nécessite des compétences et des outils techniques eux-mêmes diversifiés ;

4) Les ouvrages sont souvent implantés, au moins en partie, sur des terrains privés, ce qui rend difficile leur contrôle et leur suivi par la puissance publique.

Il est donc primordial de réfléchir à des solutions susceptibles de fonctionner avec le minimum d'interventions extérieures. Trois règles simples peuvent être appliquées :

- les modalités d'entretien doivent être totalement définies au moment de la conception du dispositif (qui, comment, dans quel cadre et avec quel budget)? ;
- le dispositif doit être conçu pour pouvoir fonctionner sur la durée avec un entretien équivalent à celui nécessaire à un autre espace de même nature mais ne remplissant aucune fonction spécifique de gestion des eaux pluviales ; en d'autres termes, la fonction de gestion des eaux pluviales doit devenir la fonction secondaire et ne pas imposer (ou imposer le minimum) de contraintes d'entretien complémentaires ;
- en cas de dysfonctionnement, c'est le gestionnaire désigné qui doit en subir le premier les conséquences de façon à l'amener à agir.

4. INSCRIRE LE PROJET DANS UNE POLITIQUE TERRITORIALE ET AGIR À LA BONNE ÉCHELLE SPATIALE

Il est devenu un truisme de dire que l'eau devait être gérée à l'échelle du bassin versant. Dans le cas des eaux pluviales urbaines, cette nécessité est très difficile à mettre en œuvre : les territoires techniques et administratifs de la ville ne se superposent en effet que très rarement avec des bassins versants naturels.

De plus la ville évolue le plus souvent sous l'effet d'opérations d'aménagement de petite taille qui, prises individuellement, n'affectent que très peu le fonctionnement hydrologique du bassin versant. Il est donc difficile de demander des études détaillées pour chacune de ces opérations, alors même que le cumul de leurs effets peut avoir des conséquences désastreuses.

La plupart des collectivités se contentent donc d'une règle simple limitant le débit maximum pouvant être rejeté par une valeur le plus souvent exprimé en litres/seconde/hectares (débit spécifique). Les règles de ce type sont non seulement inefficaces mais peuvent même être totalement contre-productives.

Une règle fondamentale de l'hydrologie quantitative montre que les débits spécifiques naturels (débits par unité de surface) correspondant à une certaine période de retour, décroissent régulièrement avec la surface du bassin versant considéré.

Imposer une valeur fixe et indépendante de la surface conduit donc à les limiter beaucoup trop strictement à l'amont et au contraire à les limiter insuffisamment lorsque la taille du bassin versant s'accroit. Ce résultat est illustré par la **FIGURE 37** (page suivante).

Exemple théorique de calcul du débit spécifique de période de retour 10 ans entre l'amont et l'aval d'une petite rivière drainant un bassin versant homogène de 300 hectares. Le débit spécifique naturel (courbe en bleu) décroit régulièrement ; en tête de bassin (surface drainée 5 ha), il est de 16 L/s/ha, alors qu'à l'aval (surface drainée 300 ha), il n'est plus que de 2,4 L/s/ha. Imposer une valeur constante de 5 L/s/ha conduit donc surprotèger à l'amont et à augmenter fortement le risque à l'aval.

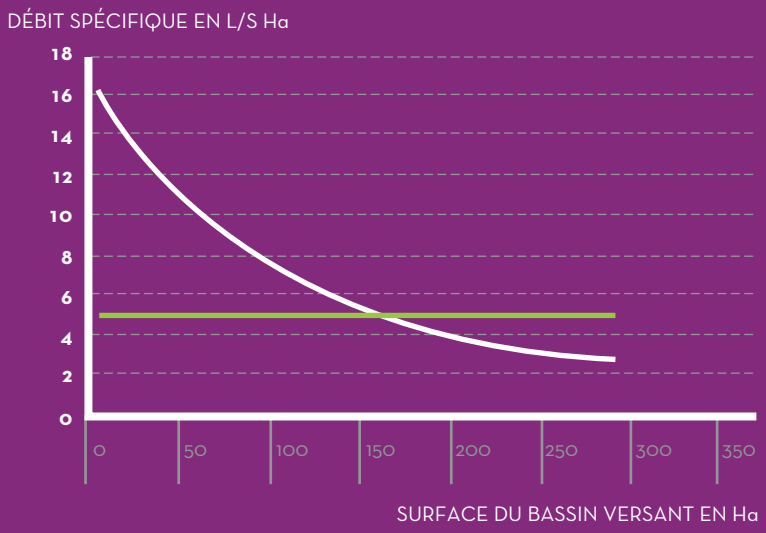


FIGURE 37

La réalisation d'études hydrologiques générales, conduites sur l'ensemble des échelles territoriales, et visant à définir, quartier par quartier, la meilleure stratégie de gestion à appliquer pour les eaux pluviales, puis leur traduction dans les documents d'urbanisme, est donc indispensable. Voir à ce sujet le guide du GRAIE « éléments pour l'élaboration d'un schéma directeur de gestion des eaux pluviales adapté au contexte local » [17].

5. PERMETTRE AU MILIEU DE TENDRE VERS UN ÉQUILIBRE ET DE S'AUTO-ORGANISER

Le mot « milieu » désigne ici le système complexe constitué par le milieu « naturel » recevant les effluents, mais aussi l'ensemble des ouvrages « artificiels » construits pour aider à la gestion des eaux pluviales et qui lui sont plus ou moins intégrés.

De façon générale, la meilleure façon de limiter les difficultés d'entretien et de maintenance consiste à avoir un milieu fonctionnant de façon équilibrée, résilient, capable de s'adapter à certains changements.

Concernant plus spécifiquement les ouvrages, et au vu de la diversité des techniques utilisables, il est difficile de donner ici des règles précises. Une méthode générale de travail en trois points peut cependant être proposée :

1) Identifier les processus naturels nécessaires au bon fonctionnement de l'ouvrage ;
2) Identifier les pressions susceptibles d'altérer ces processus naturels au vu de la double fonctionnalité de l'ouvrage et du contexte ;
3) Mettre en place une stratégie adaptée.

Par exemple dans le cas d'une noue ou d'un fossé d'infiltration :

1) maintenir la capacité d'infiltration dans le temps ;
2) donc : limiter les apports de fines et les tassements dus à une fréquentation excessive ;
3) donc : ne pas utiliser ce dispositif à proximité de terrains facilement érodables, alimenter la noue ou le fossé en utilisant un dispositif adapté (bande enherbée, zone tampon, etc.) ; choisir une végétation arbustive décourageant l'accès et développant un système racinaire permettant de maintenir la capacité d'infiltration en surface.

Il existe de nombreux guides techniques explicitant des règles simples en fonction du type de solution retenue [18].

6. INTÉGRER LE SUIVI DES PERFORMANCES DÈS LE DÉBUT DE L'OPÉRATION

Il s'agit là probablement d'un point très délicat car le suivi des performances nécessite de mettre en œuvre des moyens matériels et surtout humains que les services gestionnaires ont souvent du mal à dégager. En pratique, et en dehors d'expérimentations particulières, un suivi détaillé n'est cependant pas nécessaire et des moyens limités mais bien ciblés peuvent rendre des services très importants. Pour ceci, on peut s'appuyer sur les règles suivantes :

- Bien définir au départ les performances qui doivent faire l'objet d'un suivi et les critères qui seront utilisés pour les suivre [19] ;
- Associer à un suivi léger individuel des ouvrages, un suivi plus global des services écologiques et environnementaux effectivement rendus (par exemple suivre l'amélioration de la qualité de la rivière au fur et à mesure que l'on diminue les surfaces imperméables raccordées au réseau d'assainissement et qui s'y rejettent directement) ;
- S'appuyer sur des « non techniciens » : usagers, associations, riverains, etc. (par exemple mobiliser une Association de Pêche et de Pisciculture pour suivre l'évolution des populations piscicoles).

Ce suivi sera d'autant plus facile à mettre en place qu'il aura été pensé au moment de la conception du projet et ceci dès la définition des objectifs.

---

[17] *téléchargeable sur http://www.graie.org/graie/graiedoc/doc_telech/guideSDGEP.pdf*

[18] *Voir en particulier le site du GRAIE : http://www.graie.org/graie/index.htm, celui du CERTU : http://www.certu.fr/fr/Ville_et_environnement-n29/Eau-n139-s_thematique.html ou celui de l'ADOPTA : http://www.adopta.fr/site/*

[19] *Voir par exemple le site du programme de recherche ANR OMEGA : http://www.graie.org/OMEGA2/*

3 Outils et réalisation

La diversité des solutions mises en œuvre au cours du temps pour gérer les eaux pluviales complique singulièrement l'établissement d'une typologie des techniques (Azzout *et al.*, 1994). Cette difficulté est encore accentuée par le fait qu'il faut intégrer le passage progressif d'une vision "assainissement", visant à gérer les eaux de ruissellement considérées comme une contrainte, à une vision "gestion durable et intégrée des eaux pluviales", dont l'objectif est de valoriser une ressource.

Nous ne traiterons pas ici des ouvrages monofonctionnels, dont la seule finalité est le contrôle des flux d'eau ou de polluants et qui ne rentrent pas explicitement dans la logique de l'ingénierie écologique, pour nous concentrer sur ceux qui ont au moins deux fonctions différentes.

La présentation sera ainsi faite en trois parties, décrivant tout d'abord les approches qui traitent les eaux pluviales comme **un élément de mise en valeur de l'espace urbain,** ensuite celles qui visent à considérer les eaux de pluie comme une ressource et enfin les approches climatiques qui utilisent les eaux pluviales urbaines comme **un élément de régulation des températures** dans l'habitat ou dans la ville. Cette distinction est bien sûr formelle, de nombreuses techniques étant largement multi-fonctionnelles.

Toutes les solutions ne remplissent pas nécessairement l'ensemble des critères pour répondre à une « bonne » ingénierie écologique. Cependant, dans une certaine mesure, elles contribuent toutes à améliorer la qualité des milieux récepteurs par rapport à la solution classique du tout tuyau. Nous avons donc fait le choix de citer un grand nombre de solutions possibles, mais de ne détailler que celles qui paraissent les plus à même de s'inscrire dans une démarche d'ingénierie écologique.

1. OUVRAGES VISANT LA VALORISATION PAYSAGÈRE ET URBAINE [20] DE L'EAU PLUVIALE

1.1 Généralités

Trouver un autre usage aux solutions alternatives de gestion des eaux pluviales est souvent en pratique une nécessité imposée par le coût très important du foncier nécessaire à la mise en place de ces solutions, par ailleurs extrêmement peu souvent sollicitées. Il était donc logique de promouvoir une double utilisation des espaces mobilisés : stockage et/ou infiltration des eaux pluviales pendant les périodes pluvieuses et autre usage urbain le reste du temps. Cette idée est renforcée par le fait que l'eau constitue un élément majeur de valorisation urbaine et de socialisation, c'est-à-dire qu'elle offre souvent des opportunités d'usages favorisant la création ou le renforcement des liens sociaux. De plus, le maintien en surface de l'eau présente de nombreux avantages pédagogiques (réhabituer les citadins aux enjeux associés à l'eau de pluie), et pratiques (simplification de l'exploitation et du contrôle). Cette idée a donc été intégrée par des urbanistes, des aménageurs, des paysagistes et des architectes depuis plus de 30 ans. La diversité des approches et des pratiques a conduit à des formes extrêmement diversifiées.

1.2 Ouvrages secs à double fonction

Une des idées les plus simples consiste à combiner sur le même espace une fonction de stockage des eaux pluviales avec une fonction d'usage collectif. Les usages les plus développés sont ceux de terrains de sport, de parkings, de squares, de places, de jardins publics ou d'espaces verts. De très nombreux exemples sont bien documentés sur des sites internet [21] ou dans des ouvrages généraux CERTU (1999, 2000, 2006).

PARC DE LA SAUSSAIE - PLAINE SAINT DENIS (93). LES ESPACES VERTS DU PARC ONT ÉTÉ AMÉNAGÉS EN BASSIN DE RETENUE SEC, EN MATÉRIALISANT LA PRÉSENCE POTENTIELLE DE L'EAU PAR DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS URBAINS.

FIGURE 38 COMPOSANTE URBAINE.

[20] *C'est-à-dire visant à permettre un ou plusieurs usages urbains*

[21] *Voir par exemple le site du GRAIE : http://www.graie.org/graie/index.htm,celui du CERTU : http://www.certu.fr/fr/Ville_et_environnement-n29/Eau-n139-s_thematique.html ou celui de l'ADOPTA : http://www.adopta.fr/site/*

Une des idées les plus simples consiste à combiner sur le même espace une fonction de stockage des eaux pluviales avec une fonction d'usage collectif.

1.3 Plans d'eau permanents

L'utilisation de bassins en eau pour stocker les eaux pluviales est également ancienne. En France, cette solution s'est développée dès les années 1970 au moment de la construction des villes nouvelles dont beaucoup ne disposaient pas d'exutoires naturels faciles à utiliser (on peut en particulier citer Marne la Vallée ou l'Isle d'Abeau) (STU et Agences de l'Eau, 1994). Elle est utilisée dans de nombreux pays, quel que soit le climat ou le niveau de développement (Marsalek et Chocat, 2002 ; Baptista *et al.*, 2005). Elle repose sur le fait que l'eau constitue un élément intéressant de valorisation urbaine, environnementale et écologique. Les plans d'eau constituent ainsi souvent des éléments forts dans une trame bleue et/ou verte. Ce type d'ouvrage peut faire l'objet d'une conception intégrant l'ensemble des dimensions de l'ingénierie écologique et en particulier servir de zone tampon (voir fiche de cas).

1.4 Noues et fossés

Les fossés, ou de préférence les noues (fossés larges et peu profonds), constituent des espaces verts de proximité qui peuvent être utilisés de multiples façons pour gérer les eaux pluviales (fonction de stockage, de transport, et / ou d'infiltration). Ce type d'ouvrage est très facile à intégrer dans de nombreuses zones urbaines : zones d'activités, habitat individuel ou collectif, le long des voiries, y compris très circulées, etc.. Intégrées dans les espaces verts, les noues sont le plus souvent traitées en pelouses, faciles à entretenir par simples tontes et enlèvements des déchets. La présence de l'herbe permet de piéger de façon efficace une grande quantité de polluants particulaires, mais aussi dissous (Field *et al.*, 2006). Il est également possible d'aménager les noues de façon plus sophistiquée, par exemple en utilisant une végétation de zone humide pour marquer la présence de l'eau (Stahre, 2006).

Bassin de retenue en eau dans la ZAC de Porte des Alpes dans la Communauté Urbaine de Lyon (69). La roselière est l'une des plus grandes du Rhône et fait l'objet d'un suivi écologique.

FIGURE 39 GRAIE

Noues dans la ZAC de Porte des Alpes dans la Communauté Urbaine de Lyon (69)

FIGURE 40 JEAN CHAPGIER - GRAIE.

1.5 Lagunes et zones humides artificielles

Les lagunes et les zones humides artificielles constituent à l'origine une méthode de traitement des eaux usées (voir le paragraphe sur le traitement des rejets localisés). L'objectif est de construire des systèmes où une fonction écologique est également intégrée. Différentes expériences aux Etats-Unis, en Australie, en Suède, etc., ont montré l'aptitude de ces techniques à traiter les eaux unitaires et les eaux pluviales malgré l'intermittence de ces rejets et leur caractère peu organique (voir par exemple Clar *et al.*, 2004 ; Wong, 2005). Ce type d'ouvrage peut parfaitement être installé dans un environnement urbain et jouer un rôle écologique, mais aussi éducatif. Il peut peut faire l'objet d'une conception intégrant l'ensemble des dimensions de l'ingénierie écologique (voir la fiche étude de cas).

Bassin d'infiltration traitée en zone humide artificielle. ZAC de Porte des Alpes dans la Communauté Urbaine de Lyon (69). Les panneaux éducatifs permettent d'expliquer de façon ludique le rôle de l'eau en ville et l'intérêt des techniques durables de gestion des eaux pluviales.

FIGURE 41 GRAIE

2.L'EAU PLUVIALE COMME RESSOURCE

2.1 Généralités

Depuis une quinzaine d'années, la collecte et la conservation des eaux de pluie urbaines se développe, dans les zones géographiques où la ressource est rare (Australie, Chine, Afrique du Nord) mais aussi lorsque les ressources disponibles sont de mauvaise qualité, ou simplement lorsque les usagers trouvent le prix de l'eau excessif (Allemagne) (Chéron et Puzenat, 2004 ; Janny, 2006). Elle est inscrite comme une priorité par l'Union Européenne depuis la fin des années 1990 (EAUE, 1997). L'enjeu consiste en pratique à raccourcir le cycle hydrologique, c'est à dire à stocker l'eau de pluie au plus près de son point de chute et à l'utiliser au plus près de son point de stockage. L'échelle de travail peut ainsi être la maison ou l'immeuble, le lotissement, le quartier ou la ville.

Les solutions qui visent à collecter les eaux de toitures pour une utilisation domestique ne rentrent bien évidemment pas dans le contexte de cet ouvrage.

En revanche, les solutions dont l'objectif est de rééquilibrer le cycle hydrologique en réalimentant les nappes phréatiques ou celles qui visent à valoriser les eaux de pluie localement sont plus intéressantes.

La ré-infiltration des eaux de pluie dans le sol pour alimenter des nappes phréatiques, qu'elles soient naturelles ou artificielles (c'est-à-dire qu'elles reposent sur l'utilisation d'un réservoir souterrain artificiellement étanché, comme c'était par exemple le cas à Venise au temps de sa splendeur) présente de très nombreux avantages :

- augmenter la ressource disponible et améliorer sa qualité (Bharat *et al.*, 2007) ;
- limiter l'assèchement des sols urbains[22] ;
- permettre une gestion durable et collective de la ressource en eau[23].

La collecte et le stockage des eaux pluviales urbaines dans les couches superficielles du sol ou dans des réservoirs souterrains immédiatement situés sous les voiries ou à leur proximité immédiate, constitue une solution intéressante pour l'alimentation en eau de la végétation urbaine. Les techniques utilisables sont assez simples et consistent à alimenter les réserves ainsi constituées en

[22] *http://www.ccr.fr/fr/pdf/catnat_2005.pdf*

[23] *http://www.graie.org/graie/index.htm*

permettant à l'eau de s'infiltrer. Le maintien de la capacité d'infiltration des sols se fait de façon classique en conservant une partie du sol non revêtue autour de la végétation (généralement protégée par une grille). Il est également possible d'utiliser des revêtements poreux (pavés par exemple) ou d'injecter l'eau par des drains. L'un des avantages principaux est de permettre à la végétation de disposer d'une quantité d'eau beaucoup plus importante pendant les périodes chaudes et, par voie de conséquence, d'augmenter l'évapotranspiration. Cet aspect est présenté plus loin.
Différentes solutions peuvent être utilisées à différentes échelles :

2.2 Jardins d'eau

Si la collecte dans une mare utilisée aussi bien pour les canards que pour l'élevage des poissons a constitué une réalité dans la plupart des fermes d'Europe jusque dans les années 1950, cette pratique était petit à petit tombée en désuétude, en particulier en ville. Elle est en train de redevenir à la mode en Amérique du Nord où elle est considérée à la fois comme une technique efficace de réduction des flux d'eau et de polluants par temps de pluie et comme un moyen de sensibiliser le public aussi bien aux problématiques de la gestion durable de l'eau que de la place de la nature en ville. En France, la traduction récente de l'ouvrage « les jardins et la pluie » (Nigel et Clayden, 2007) montre l'intérêt croissant pour cette technique qui présente la particularité, d'être plus argumentée sur l'intérêt général (limiter les rejets polluants et les risques d'inondation à l'aval, développer la biodiversité) que sur l'intérêt particulier (faire des économies d'eau).

2.3 Puits d'infiltration

Ces ouvrages ont pour fonction l'évacuation directe des eaux pluviales dans le sol. Ils drainent généralement des surfaces de l'ordre du millier de mètres carrés. Cette technique a l'avantage de pouvoir être appliquée dans des zones où la couche de sol superficielle est peu perméable (forte urbanisation, terrain superficiel imperméable) mais qui ont des capacités importantes d'infiltration dans les couches profondes. Ils permettent de réalimenter les nappes phréatiques. Une épaisseur de zone non saturée d'au moins un mètre permet de contrôler efficacement les risques de pollution des nappes.

2.4 Tranchées de rétention/infiltration

Il s'agit d'ouvrages linéaires et superficiels, d'une profondeur généralement inférieure au mètre, qui peuvent recueillir les eaux de ruissellement de différentes manières (par ruissellement, par des drains, etc.) et qui les évacuent ensuite soit directement par infiltration vers le sol profond, soit vers un exutoire (réseau, puits, etc.). Les tranchées sont utilisées depuis longtemps dans de nombreux pays comme l'Allemagne, l'Australie, le Danemark, les Etats-Unis, la Grande-Bretagne, le Japon, la Scandinavie, la Suède, etc. (Marsalek et Chocat, 2002, Ellis *et al.*, 2005). En France, cette technique est aussi largement répandue.

TRANCHÉE D'INFILTRATION LE LONG D'UN CHEMINEMENT PIÉTONNIER (69)

FIGURE 42 JEAN CHAPGIER - GRAIE

2.5 Chaussées à structure réservoir et toitures stockantes

Les chaussées à structure réservoir (CSR) et les toitures stockantes sont des techniques applicables dans les zones denses.
Les CSR permettent de stocker dans le corps de chaussée des quantités importantes d'eau pour les restituer ensuite à débit contrôlé soit à un réseau traditionnel, soit au milieu naturel par infiltration ou par un exutoire régulé. L'alimentation du corps de chaussée peut se faire soit par infiltration dans la couche de roulement (chaussées à revêtement drainant, souvent improprement appelées chaussées poreuses), soit par des drains si la couche de roulement est imperméable. L'évacuation se fait soit par infiltration dans le sol support ce qui contribue à recharger les nappes, soit à débit contrôlé vers un exutoire de surface.

Les toitures terrasses régulées (végétalisées ou non, voir également le § sur les « toitures végétalisées ») sont également efficaces pour réguler le débit évacué par un bâtiment. Elles permettent de stocker temporairement l'eau sur le toit sur une hauteur de 5 à 10 cm, avec un débit de fuite régulé en protégeant la toiture par un déversoir lorsque cette hauteur est atteinte.
Il s'agit ici plus de solutions construites de génie civil qui peuvent venir compléter des approches d'ingénierie écologiques et faciliter leur mise en œuvre.

3. VALORISATION CLIMATIQUE DES EAUX PLUVIALES

3.1 Généralités

L'eau est à la fois sur le plan symbolique et sur le plan physique un élément de fraîcheur. Beaucoup de civilisations ont utilisé les bassins et les fontaines pour rafraîchir la ville, ou du moins pour en donner l'impression (Nordon, 1991). Sur un plan plus physique, l'évaporation de l'eau absorbe de grandes quantités d'énergie et peut donc conduire à une diminution locale importante des températures. L'évaporation d'un kilogramme d'eau absorbe ainsi environ 2250 kJ, soit environ 20 % de l'énergie solaire quotidienne moyenne reçue par m^2 en France métropolitaine.

Les températures maximales dans les espaces verts peuvent ainsi être de 3°C plus basses que dans les espaces non végétalisés.

La végétation est également capable de jouer un rôle bioclimatique important. Elle améliore en effet le climat urbain grâce à plusieurs facteurs : l'ombre qu'elle donne et qui modifie le bilan radiatif des surfaces urbaines, la modification de l'écoulement d'air qui influe sur le transport et la diffusion de l'énergie, et enfin l'évapotranspiration qui transforme l'énergie rayonnée en énergie latente, réduisant ainsi la chaleur sensible qui réchauffe l'atmosphère.
L'évapotranspiration constitue le phénomène le plus intéressant en termes d'ingénierie écologique. Un arbre moyen, sous nos latitudes, peut évapotranspirer près d'une tonne et demie d'eau par jour, ce qui permet d'absorber 3 440 MJ. Les températures maximales dans les espaces verts peuvent ainsi être de 3°C plus basses que dans les espaces non végétalisés (Saito *et al.*, 1991). En pratique, la quantité d'eau réellement évapotranspirée (évapotranspiration réelle ou EPR) est généralement très inférieure à l'évapotranspiration maximum théorique (évapotranspiration potentielle ou EPT), simplement parce que la quantité d'eau mobilisable par les plantes est insuffisante. Augmenter la quantité d'eau disponible pour la végétation en stockant l'eau de pluie permet ainsi d'augmenter l'évapotranspiration, donc de prélever encore plus de chaleur et ainsi d'abaisser davantage les températures urbaines, ceci d'autant plus que la température de l'air est élevée. L'association de techniques de stockage d'eau à une augmentation de la végétalisation des villes présente donc un grand intérêt sur le plan climatique. Par ailleurs, la capacité d'évapotranspiration de la végétation est suffisante en beaucoup d'endroits pour que l'atmosphère puisse constituer l'exutoire unique pour évacuer les eaux de pluie, à condition bien sûr que la capacité de stockage soit suffisante. Cette technique peut être mise en œuvre à toutes les échelles spatiales, depuis des échelles très locales (la maison, le bâtiment) jusqu'à celle de la ville.

3.2 Toitures végétalisées

La première solution est à l'échelle du bâti. Elle consiste à climatiser les immeubles ou les maisons, en utilisant des toitures végétalisées permettant de stocker d'importantes quantités d'eau sur les toits. Cette technique est maintenant bien appropriée par les architectes. Dans la plupart des pays développés, les sites internet consacrés à l'architecture mettent en effet cette technique en avant (il suffit pour s'en convaincre de faire une recherche sur un moteur de recherche avec les mots clés "toitures végétalisées" ou "green roofs"). Les rôles positifs des toits verts sont nombreux et dépassent largement l'échelle du bâtiment où ils sont installés : ils peuvent remplir une fonction d'absorbeurs pour différents polluants urbains et diminuer ainsi la pollution atmosphérique, participer à l'isolation acoustique du bâtiment, protéger l'étanchéité des toitures en limitant les chocs thermiques, contribuer efficacement à la climatisation des maisons ou des immeubles et permettre ainsi des économies d'énergie et bien sûr réduire significati-

vement les flux d'eau et de polluants par temps de pluie (Lasalle, 2006). Enfin, ils présentent un intérêt paysager indéniable. Une étude d'Environnement Canada[24] estime que la végétalisation de 6 % de toute la surface de toits disponibles pourrait faire baisser la température de Toronto de 1 à 2 °C, ce qui permettrait, les jours de canicule, une baisse de 5 % de la demande en électricité pour la climatisation et par conséquent une diminution des émissions de gaz à effet de serre. Ce type d'ouvrage peut faire l'objet d'une conception intégrant l'ensemble des dimensions de l'ingénierie écologique (voir la fiche de cas).

TOITURE STOCKANTE EN PARTIE VÉGÉTALISÉE À CALUIRE (69)

FIGURE 43 ANNE CLÉMENT - GRAIE

3.3 Façades végétales

Une variante aux toitures végétalisées consiste à utiliser des façades végétales. Dans ce cas, le stockage des eaux de pluie doit se faire dans une citerne, soit sur le toit (ce qui permet une alimentation gravitaire), soit au niveau du sol (dans ce cas l'installation d'un système de pompage est nécessaire). Les avantages sont voisins de ceux des toitures végétalisées.

3.4 Stockage souterrain et utilisation de l'évapotranspiration

Une autre utilisation possible consiste à stocker l'eau de pluie dans des réservoirs souterrains susceptibles d'alimenter la végétation urbaine par capillarité selon des principes voisins de ceux mis en œuvre dans les bacs utilisés pour les plantes d'intérieur. Au-delà de l'intérêt climatique, l'un des avantages potentiels est de n'avoir besoin d'aucun exutoire souterrain ou de surface pour évacuer les eaux, le réservoir se vidant progressivement du fait de la consommation des plantes pour leurs besoins. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, les volumes nécessaires ne sont pas beaucoup plus importants que ceux nécessaires pour gérer les événements pluvieux violents isolés. Dans beaucoup de zones géographiques, la pluie de projet de période de retour 10 ans apporte en quelques heures entre 10 et 30 % de la pluviométrie moyenne annuelle alors que la période hivernale (l'évapotranspiration étant très faible en hiver, c'est au printemps que le remplissage des réservoirs est maximum) apporte 30 à 40 % de la pluviométrie. Un volume de stockage de l'ordre du double de celui nécessaire lorsque l'on prévoit un système de vidange traditionnel est en fait généralement suffisant. Si les eaux recueillies proviennent des voiries, le risque de pollution par les sels de déneigement reste entier, il n'existe pas si les eaux utilisées proviennent des toitures.

3.5 Stockage en surface et utilisation de l'évaporation

Pour terminer ce tour d'horizon, on peut citer quelques exemples où l'eau de pluie est mise en scène sans recourir à la végétation et où l'on compte uniquement sur l'évaporation pour absorber de la chaleur et réduire la température. L'un des exemples les plus souvent cités est celui de Potzdamer Platz à Berlin, probablement du fait du renom de l'architecte qui l'a conçu (Renzo Piano)[25]. Sur ce lieu emblématique du renouveau architectural de la capitale allemande, les eaux pluviales de voirie et de toitures sont recueillies à la fois dans des cuves souterraines et dans des bassins à surface libre, traités comme des espaces très minéraux et très dessinés. Les bassins jouent le rôle d'évaporateurs géants et abaissent la température du quartier de plusieurs degrés selon les concepteurs. Les cuves servent de réserve pour l'arrosage des espaces verts, les chasses d'eau de certains immeubles et la réalimentation des bassins paysagers.

[24] *Voir : http://www.greenroofs.org/*

[25] *http://www.potsdamerplatz.de/en/architecture/masterplan_by_renzo_piano.html*

4 Perspectives et freins

La gestion durable des eaux pluviales urbaines est un serpent de mer dont les premières apparitions « modernes » datent des années 1970, c'est-à-dire d'il y a plus de 40 ans. Malgré tous leurs avantages, les différentes solutions présentées dans les paragraphes précédents ont beaucoup de mal à s'imposer et plusieurs études ont cherché à comprendre les raisons qui amènent les décideurs à continuer à privilégier les tuyaux. Trois raisons principales sont souvent avancées :

• **La simplicité de la solution « tuyau » par rapport aux autres solutions.** Poser un tuyau est simple et pragmatique. Cette solution n'impose aucune contrainte sur le plan masse ou sur les choix d'aménagement et l'ingénieur arrivera toujours à trouver une solution fonctionnelle quelles que soient les contraintes. Il existe des organismes spécialisés pour les études, les travaux et l'entretien. A l'opposé, les techniques alternatives supposent d'intégrer les contraintes hydrologiques dès le début de la réflexion. L'ingénieur doit travailler avec l'architecte et le paysagiste et chacun doit adapter son projet en fonction des contraintes des autres. L'entretien des ouvrages ou des espaces destinés à gérer les eaux pluviales n'est généralement pas du seul ressort des services en charge de l'assainissement et il est nécessaire de confier tout ou partie des ouvrages aux services en charge des espaces verts ou des voiries, voire aux propriétaires privés. Tout ceci peut apparaître comme extrêmement compliqué et source de difficultés ultérieures.

• **La force de l'habitude et la peur de la nouveauté.** Les ingénieurs et les élus ont pris l'habitude du « tout à l'égout » depuis 150 ans. Cette solution marche. A l'opposé rien ne garantit que le sol sous l'ouvrage d'infiltration ne se colmatera pas, que personne n'ira se noyer dans le bassin de retenue ou que la toiture terrasse ne se mettra pas à fuir. A l'évidence il est plus confortable de continuer comme d'habitude que de prendre le risque de changer.

• **Le poids de l'économie.** Curieusement le fait que les techniques alternatives soient presque systématiquement moins chères que les solutions classiques par tuyaux constitue plutôt un frein à leur utilisation. Au petit jeu de l'évolution des technologies, il y a en effet des gagnants et des perdants et les perdants potentiels sont le plus souvent ceux qui sont, pour des raisons historiques, les plus proches des décideurs et de leurs conseillers.

Malgré tout les choses changent. Les exemples réussis se multiplient ; les bureaux d'études et les entreprises développent leurs savoir-faires ; la crise économique associée aux obligations réglementaires en matière d'environnement oblige à plus d'intelligence ; l'évolution des enjeux et des mentalités conduit à une meilleure valorisation des eaux urbaines[26].

Pour l'ensemble de ces raisons, il est probable que la gestion durable des eaux pluviales urbaines sera l'un des principaux créneaux de développement de l'ingénierie écologique dans les prochaines années et aussi l'un de ses principaux marchés.

[26] *Voir par exemple les actes des conférences Novatech sur le site du GRAIE : http://www.graie.org/graie*

8

VALORISER DES PAYSAGES ET/OU DES USAGES OU DES AMÉNITÉS LIÉS À L'EAU EN MILIEU URBAIN

Voir les fiches retours d'expériences se rapportant à cette partie au point 6 du chapitre 4 de l'ouvrage (p. 292 à 315)

1 Contexte et enjeux

Les relations entre l'eau et le cadre de vie sont loin d'être simples.

En milieu rural, même si l'activité agricole a pu entraîner des dégradations ponctuelles, il existe encore toute une série d'usages sociaux autour des ruisseaux et des rivières avec les activités de promenade, de baignade, de pêche ou de sports nautiques par exemple.

En revanche, dans les milieux péri-urbains et urbains auxquels nous nous intéressons particulièrement dans ce paragraphe, les liens ont pendant longtemps été coupés entre les citadins et les milieux liés à l'eau.

Dans les espaces péri-urbains, les cours d'eau, les zones humides, et même les vallées, ont souvent été dégradés par le mitage et l'accroissement urbain galopant le long des axes de circulation.

En milieu urbain la situation est encore pire, la ville s'est souvent développée contre le réseau hydrographique, en le dévoyant, en l'enterrant ou en le comblant. Lorsque le réseau hydrographique naturel existe encore en ville, il se présente ainsi souvent sous la forme d'un canal profond et enserré entre des murs de soutènement, sans plus aucune valeur écologique.

Pourtant depuis quelques dizaines d'années, les idées évoluent et de nombreuses villes commencent à revaloriser leur patrimoine hydrologique. Les raisons peuvent être très diverses :

- volonté de résoudre un problème récurrent (inondation par exemple) ;
- nécessité de redévelopper des activités au niveau des friches industrielles ;
- ambition « d'embellir » la ville et/ou de développer des lieux de rencontre ;
- prise en considération de contraintes environnementales ou écologiques (trame verte et bleue, directive cadre sur l'eau, etc.) ;
- etc..

Souvent les objectifs sont multiples, pas toujours clairement exprimés, et presque toujours différents selon les acteurs impliqués (élus, agences de l'eau, riverains, associations, etc.).

Deux obstacles de nature opposée doivent être surmontés :

- « Fabriquer » de la ville ou du paysage de façon artificielle, sans bien intégrer le fonctionnement écologique réel de l'écosystème aquatique concerné. Ce risque est d'autant plus marqué que le périmètre de l'opération d'aménagement est souvent très réduit par rapport aux limites de l'écosystème.
- Vouloir développer une approche écologique, sans tenir compte des impacts des hommes sur le

> La spécificité des projets d'ingénierie écologique appliqués à ce type de problématique est donc essentiellement de devoir impérativement considérer « l'anthropo-hydro-système » dans sa globalité.

fonctionnement de l'écosystème. Une ville est en effet aussi un « anthropo-système ». L'usage que les hommes vont faire du milieu aquatique une fois celui-ci « aménagé » peut être très différent de celui escompté et peut même s'avérer incompatible avec un fonctionnement écologique satisfaisant.

Nous avons tendance à penser que la mise en valeur écologique de l'eau sur un territoire est obligatoirement source d'amélioration du cadre de vie et de développement d'usages, simplement parce qu'un milieu aquatique en bon état est plus « intéressant » ou plus « utile » qu'un milieu dégradé. La réalité est malheureusement beaucoup plus compliquée.

La spécificité des projets d'ingénierie écologique appliqués à ce type de problématique est donc essentiellement de devoir impérativement considérer « l'anthropo-hydro-système » dans sa globalité.

La solution la plus rationnelle consiste donc à intégrer la dimension urbaine dans une démarche de valorisation écologique des milieux.

Il s'agit d'un enjeu difficile. Le développement de la ville s'est souvent fait dans une logique de protection des citadins « contre » la nature, et, à l'opposé, les projets de renaturation sont souvent pensés dans une logique de protection de la nature « contre » la ville, qui a souvent été un facteur déterminant de détérioration de ces milieux naturels.

Continuer à opposer « ville » et « nature » ne semble cependant pas viable. La déconnexion entre « usages » et « fonctionnement naturel » pose en effet des problèmes insolubles. Par exemple, maintenir en milieu urbain un espace « naturel » est économiquement impossible à assumer sur la durée, du point de vue du portage foncier ou de l'entretien. A l'inverse, vouloir développer des usages urbains autour d'un milieu aquatique en mauvaise santé est également illusoire.

La solution la plus rationnelle consiste donc à intégrer la dimension urbaine dans une démarche de valorisation écologique des milieux. Les paragraphes suivants déclinent la façon dont l'application des grands principes de l'ingénierie écologique peut permettre d'atteindre cet objectif.

2 Grands principes à appliquer

1. INSCRIRE LE PROJET DANS UNE POLITIQUE TERRITORIALE ET AGIR À LA BONNE ÉCHELLE SPATIALE

L'échelle de réflexion est fondamentale si l'on souhaite mettre en place un projet cohérent et qui a du sens. La difficulté est que, dans le cas d'un projet urbain visant à développer des paysages ou des aménités liés à l'eau, la commande publique limite souvent le territoire à un périmètre restreint : aménagement des berges dans la traversée de la ville (ou même d'un quartier), création d'un parc, réaménagement d'une zone urbaine, etc..

Il est alors indispensable de convaincre les maîtres d'ouvrage que le projet doit obligatoirement s'intégrer dans une démarche de reconquête plus globale. Cet objectif peut être facilité s'il existe une réflexion préalable sur le milieu aquatique (SAGE, contrat de rivière) et encore plus si une structure de gouvernance a été mise en place (syndicat intercommunal, EPTB).

Le fait que les collectivités soient souvent amenées à rechercher des subventions auprès de partenaires multiples (agence de l'eau, région, département) peut également les inciter à développer leur projet dans un cadre plus global.

A l'opposé, si les motivations à l'origine du projet sont d'ordre écologique (restauration du bon état du milieu par exemple), mais que les aménagements à réaliser sont proches d'une agglomération, il sera également nécessaire d'aborder les problématiques du territoire, tant du point de vue écologique que du point de vue urbain. Le diagnostic environnemental devra identifier les points forts du site, ceux sur lesquels il faudra s'appuyer, mais aussi les points de blocages pour lesquels il faudra apporter des solutions. Ce diagnostic devra mettre en évidence les aspects écologiques mais aussi les aspects sociaux et urbains : les usages existants ou non, les projets d'aménagement et leurs caractéristiques, les flux existants et futurs, les projets de territoire et les volontés politiques sur ce territoire, etc..

Cette réflexion permettra souvent d'intégrer d'autres problématiques écologiques et/ ou sociétales : le réchauffement climatique et son accompagnement, la volonté de mise en place de trames vertes et bleues, voire de micro-trames, la programmation d'équipements publics ou d'opérations d'aménagement, les activités et les

UN DISPOSITIF TECHNIQUE DE DÉPOLLUTION DEVENU ÉLÉMENT DE CADRE DE VIE : LA TECHNIQUE AU SERVICE DU PROJET URBAIN

ATM

projets du tissu associatif, la préservation de zones naturelles, la préservation ou non de l'agriculture, l'analyse du paysage, etc.. Une étude de ce type, plus transversale et globale, ancrera le projet écologique dans son territoire et de ce fait permettra d'avoir un impact sur l'amélioration du cadre de vie et le développement d'usages.
C'est aussi cette échelle de réflexion qui permettra d'associer les acteurs en place et qui créera les conditions pour les fédérer autour du projet. En effet, la réflexion plus globale, tant du point de vue géographique (le territoire) que thématique (l'image du site, le développement économique, etc.) donne la possibilité à chacun de trouver son intérêt et, de ce fait, de porter le projet, de se l'approprier et de faire en sorte qu'il prenne vie, qu'il se réalise et qu'il soit pérenne dans le futur. Les acteurs en place seront les collectivités territoriales, les aménageurs, les usagers, les institutionnels.
Le projet de renaturation d'un site ou de préservation écologique devra aussi rechercher à retrouver ou mettre en évidence l'identité de ce site. En effet, le cadre de vie passe aussi par la reconnaissance d'un territoire, sa géographie, son histoire. Le projet écologique sera lié à cette identité, c'est d'ailleurs pour cela que le projet prendra du sens. Il sera aussi un facteur d'appropriation par les usagers. De ce fait, le projet devra avoir une dimension pédagogique qui permettra à la population de mieux comprendre son territoire, composé de milieux naturels, agricoles et urbains.

En outre, le travail sur l'eau est souvent l'occasion de souligner la topographie, les cheminements naturels de l'eau, la mise en évidence d'un relief peu visible. Ce travail offre ainsi aux usagers une autre lecture du paysage de leur territoire. De plus, cette réflexion sur l'eau, sur ses cheminements naturels, sur ses cours d'eau, sur l'épaisseur de la vallée, pourra même devenir un outil de désenclavement du site ; elle génèrera en effet du lien entre les différentes composantes de ce territoire.

2. S'APPUYER SUR DES PRATIQUES DE GESTION INSPIRÉES DES MÉCANISMES QUI GOUVERNENT LES SYSTÈMES ÉCOLOGIQUES

La difficulté est ici de laisser de la liberté à la nature tout en acceptant des usages humains. L'équilibre est délicat car les citoyens imaginent souvent la nature comme un jardin et ont du mal à accepter qu'elle se montre sauvage, désagréable ou dangereuse.
La réflexion doit intégrer le fonctionnement des espaces dans toutes les situations, c'est-à-dire en intégrant les fluctuations saisonnières (qui concernent aussi bien le régime de la rivière que la végétation ou que la fréquentation et les usages pratiqués), les évolutions tendancielles (la végétation va se développer, les usages vont évoluer), ou les situations catastrophiques (par exemple les épisodes de crue).
Certaines solutions de bon sens peuvent cependant être facilement mises en œuvre, par exemple :

- végétaliser avec des espèces locales, a priori adaptées à l'écosystème ;
- éviter d'implanter des infrastructures vulnérables aux excès du milieu (par exemple aux crues de la rivière) ;
- etc..

L'éducation des usagers ou le contrôle des activités pratiquées peuvent jouer un rôle positif.

3. NE PAS DÉGRADER ET/OU CONTRIBUER AU MAINTIEN OU À LA RESTAURATION DU BON FONCTIONNEMENT DES MILIEUX AQUATIQUES

De la même façon, il est difficile de concilier usages humains et renaturation du milieu aquatique.
Une solution possible consiste à hiérarchiser les fonctions selon les secteurs. On peut ainsi alterner des espaces plus naturels et des espaces plus urbains, supports d'usages, en jouant sur la qualité de l'aménagement ou

sur l'accessibilité (voir par exemple les fiches de cas sur le parc de Miribel ou sur la zone d'activité « porte des Alpes »). Dans les situations un peu extrêmes, on peut même limiter voire interdire l'accès libre à certaines zones et créer par exemple des « réservoirs » de biodiversité.
Ces transitions entre le « très naturel » et le « moyennement urbain » seront étudiées finement pour justement permettre un bon fonctionnement des milieux aquatiques.

4. MINIMISER LES INTERVENTIONS LOURDES ET COÛTEUSES D'ENTRETIEN

Dans la logique de ce qui a été évoqué précédemment, il est primordial que les interventions de gestion soit minimales. Si ce n'était pas le cas, cela signifierait que le projet n'est pas véritablement un projet de renaturation.
Pour les parties du projet plus urbaines et intégrant des usages, le choix du mobilier, le dessin des cheminements, le choix même des usages à introduire, doivent également prendre en compte la question de l'entretien. En particulier ces espaces ne doivent pas être traités en contradiction avec le fonctionnement hydrologique des espaces mis en valeur.

5. PERMETTRE AU MILIEU DE TENDRE VERS UN ÉQUILIBRE ET DE S'AUTO-ORGANISER

Le choix de la végétation introduite au départ, ainsi que la façon de la mettre en place, sont déterminants pour faciliter le développement ultérieur d'essences locales et spontanées et ainsi permettre la construction d'un écosystème stable.
De la même façon, dans le cas d'un aménagement de rivière ou de vallon, les profils en travers et en long du projet, mais aussi son plan masse, devront être dessinés avec le souci de protéger les espèces animales et végétales présentes sur le site et sur les espaces voisins et de favoriser leurs déplacements et la reconquête des zones réaménagées. Cette réflexion devra être menée dans les trois dimensions et intégrer l'épaisseur des berges, leurs profils et les différents seuils de nivellement, le plan du cours d'eau et le sol.

7. INTÉGRER LE SUIVI DES PERFORMANCES DÈS LE DÉBUT DE L'OPÉRATION

L'équilibre que l'on tente de reconstruire par le projet de renaturation devra pouvoir s'évaluer, en tous cas dans les premières années qui suivront la réalisation du projet. Un état des lieux initial concernant la faune et la flore sera effectué et il sera suivi chaque année par une campagne de recensement des espèces en place. C'est ainsi que l'on pourra contrôler la mise en place lente de la biodiversité voulue initialement, avec des espèces qui disparaissent et celles qui au contraire, réapparaissent sur le site. On pourra ainsi, grâce à cette évaluation, accompagner le projet dans le temps, corriger certaines erreurs, implanter éventuellement d'autres espèces manquantes pour un équilibre et observer cet écosystème qui prend place.
En parallèle un suivi des usages pratiqués et de la fréquentation pourra permettre d'évaluer l'évolution des pressions anthropiques sur le milieu.

3 Outils et réalisation

Un exemple assez fréquent est constitué par la volonté de renaturer un cours d'eau urbain qui, au fil du temps, est devenu un ouvrage hydraulique. Dans le meilleur des cas, le cours d'eau est toujours à ciel ouvert, mais il est canalisé. Son statut réel est devenu celui d'un réseau d'assainissement dont la fonction principale est de servir d'émissaire d'orage.
Toute la difficulté d'un tel projet est d'assurer la renaturation tout en préservant les protections hydrauliques existantes pour la population. Il est indispensable de ne pas augmenter les risques d'inondations, de bien identifier et localiser les lieux qui ne peuvent pas être protégés, et d'aborder les aspects de gestion future avec les acteurs gestionnaires en place.
La première étape est un état des lieux-diagnostic qui doit être conduit à l'échelle plus globale de la vallée. Cet état des lieux doit porter sur les aspects urbains (usages, cheminements, opérations d'aménagement, pressions foncières, patrimoine existant, historique de la rivière, hydraulique, etc.), et sur les aspects naturels (qualité écologique en place, biodiversité existante, qualité du cours d'eau, etc.). Après un travail de terrain et de recensement rigoureux, les deux points de vue doivent être croisés et analysés pour définir les propositions de renaturation possibles.
On cherchera dans un premier temps à retrouver les anciens tracés de la rivière par la lecture de la topographie en place, de la géologie, et des limites cadastrales qui en sont souvent un bon indicateur. La reconstitution

L'un des objectifs importants, en tout cas indispensable pour que les riverains acceptent le projet, est de maintenir un bon niveau de protection contre les inondations.

de ces anciens tracés servira de base à une analyse des « reméandrages » possible du cours d'eau. Ce « reméandrage », dont l'objectif est aussi de redonner un espace de liberté à la rivière, aura plus ou moins d'ampleur en fonction des contraintes du terrain et du contexte urbain mais aussi du degré de renaturation voulu.

Le travail de dessin de la rivière devra également intégrer les éléments de richesses écologiques, existants ou potentiels, mis en évidence dans le diagnostic.

On cherchera également à retrouver ce qu'était la véritable identité hydraulique de la rivière avant son aménagement en fonction des caractéristiques de son bassin versant « naturel » : son débit de temps sec, ses variations de débit, ses zones d'expansion de crue, etc. Il sera bien sûr en général impossible de retrouver un fonctionnement identique du fait des modifications subies par le bassin versant, mais cette analyse donnera une idée de ce que devrait être la rivière naturelle et équilibrée sur le site (voir à ce sujet le paragraphe sur les références dans le chapitre 1).

Bien souvent un tel projet procède ensuite par la proposition de scénarii (faiblement renaturé, moyennement renaturé, fortement renaturé). Ces scénarii doivent être proposés par secteur le long du cours d'eau et bien préciser les contraintes rencontrées. C'est ainsi que l'on peut aboutir, en combinant sectorisation et niveau de renaturation, à un nombre important de propositions de projets.

L'un des objectifs importants, en tout cas indispensable pour que les riverains acceptent le projet, est de maintenir un bon niveau de protection contre les inondations. Ces différents scénarii devront donc être modélisés afin d'évaluer les impacts des reméandrages, des différentes séquences de renaturation et des suppressions d'ouvrages hydrauliques sur l'importance et la fréquence des débordements. Ce travail devra être effectué zone par zone de façon à déterminer les emprises des zones d'expansion de crues.

Ces scénarii modélisés serviront de base à une discussion-concertation avec les acteurs en place afin qu'ils puissent se positionner et s'engager sur le projet. Les éléments qui seront à chaque fois débattus seront les suivants :

- l'hydraulicité future du cours d'eau ;
- la restauration et la préservation de la qualité écologique du cours d'eau ;
- le renforcement et la continuité écologique du cours d'eau ;
- le désenclavement et l'accessibilité de la vallée ;
- les usages ;
- le rapport « ville-nature », « ville-cours d'eau », etc..

Ces discussions permettront de déboucher sur le choix d'un scénario (choix de tracé, de dessin en plan, de priorisation des fonctions, etc.).

On intégrera alors le travail de la ripisylve, de la végétalisation, du dessin des berges et des lits du cours d'eau, de l'épaisseur de la végétalisation en fonction des séquences, des usages et des non-usages.

L'idéal est que le projet soit conçu par des « aller-retour » entre l'échelle du cours d'eau en tant que tel et l'échelle de la vallée. Ainsi sera pris en compte la visibilité du cours dans la vallée (ripisylve), le rapport entre les deux versants de la vallée, la co-visibilité, les axes perpendiculaires, les aspects de trames vertes et bleues, les « accroches » aux patrimoines existants, le rapport ville-cours d'eau.

Il est également très important de bien identifier les impacts sur le foncier en termes de modifications de statuts (droits d'accès ou de passage), de maintenance (par exemple qui doit assurer l'entretien de la végétation ?) et d'usages (responsabilité, surveillance, etc.).

La reconquête d'un cours d'eau permet le développement d'activités plus directes et concrètes avec l'eau comme la baignade ou bien les sports aquatiques. Elle permet aussi de créer des activités de promenade et de détente, de convivialité, en réalisant des pontons, des espaces publics associés sur les berges comme des cheminements, des places où s'implanteront des restaurants et autres buvettes. La reconquête des berges permet presque toujours à la ville de changer de relation avec sa rivière : la ville se retourne vers la rivière alors qu'auparavant elle s'opposait à elle.

Ceci provoque également souvent un appel pour découvrir cette même rivière, plus sauvage, plus loin de la ville, sans qu'il n'y ait nécessairement besoin d'autres activités que la marche et la découverte du milieu naturel. L'installation de parcours pédagogiques, de sentiers de démonstration expliquant aux promeneurs la valeur écologique du site et son fonctionnement naturel, de même que la préservation de zones plus « naturelles » à proximité immédiate des zones urbaines, possèdent ainsi une valeur éducative extrêmement forte.

4 Perspectives et freins

La recherche de cohérence et d'un projet plus global, mêlant les intérêts écologiques et ceux plus urbains en termes d'usage et de cadre de vie, peut être difficile à mettre en œuvre. Associer plus d'acteurs est souvent consommateur de temps et travailler à une échelle plus large, même si c'est la garantie d'un projet plus solide, amène à aborder plus de problématiques et souvent dans un contexte pluridisciplinaire plus étendu. Cette pluridisciplinarité nécessaire ne peut fonctionner que s'il y a une volonté de la part des acteurs d'obtenir un projet global partagé. Le débat sur le thème de la biodiversité et le milieu urbain est difficile et les parties en présence peuvent être dans l'opposition systématique. Il faut accepter pour chacun des acteurs de connaître et comprendre la réalité de l'autre, comprendre son langage et attacher une importance à ses préoccupations. Le monde de l'écologie et le monde de l'aménagement sont deux mondes qui peuvent se situer à des extrêmes. Le décloisonnement des métiers sera nécessaire, l'écologue, l'urbaniste, l'aménageur, le décideur politique et les autres acteurs impliqués devront trouver un projet partagé.

Le décloisonnement des métiers sera nécessaire, l'écologue, l'urbaniste, l'aménageur, le décideur politique et les autres acteurs impliqués devront trouver un projet partagé.

Sous la dalle, le cours d'eau. Ce sera une forte volonté politique et de longues négociations pour parvenir à le redécouvrir et en refaire un vrai cours d'eau dans sa vallée.

ATM

GÉRER LES EAUX À L'AMONT EST L'OCCASION DE CRÉER UN « ILÔT DE FRAÎCHEUR ».

ATM

Par ailleurs de tels projets devront être portés par les institutions, les agences de l'eau et les régions et départements et donc les projets devront pouvoir s'intégrer dans les différentes politiques locales. Par ailleurs, les services de l'Etat seront un acteur important du fait des objectifs écologiques des projets. Ces projets devront pouvoir s'intégrer dans les directives du Grenelle de l'Environnement tout en répondant aux réalités locales et aux intérêts des acteurs locaux. Par exemple, un schéma de trames vertes et bleues telles qu'elles sont envisagées dans le cadre des directives de l'Etat ne permet pas toujours d'aborder l'ouverture sur la ville, sur les usages et le cadre de vie et il faudra pouvoir répondre aux attentes de tous.

Les services des collectivités (urbanisme, aménagement, voiries, assainissement, espaces verts, etc.) devront être associés dès la phase d'élaboration afin qu'ils puissent porter le ou les projets et qu'ils puissent en assurer la pérennité dans le temps.

Mais un des freins les plus importants, dans le cas d'une approche plus globale est de pouvoir « tenir » le schéma directeur dans le temps puisqu'il ne peut se développer que sur le long terme. La difficulté sera de pouvoir le réactualiser pour prendre en compte les évolutions du territoire en termes de projet, de nouvelles politiques, de nouvelles normes et directives et de le faire acter par les partenaires, ceci sans remettre en cause les résultats acquis.

9

RESTAURER LES MILIEUX AQUATIQUES ET DÉVELOPPER LA BIODIVERSITÉ

Voir les fiches retours d'expériences se rapportant à cette partie au point 7 du chapitre 4 de l'ouvrage (p. 316 à 347)

1 Contexte et enjeux

L'idée de manipuler des espèces végétales et animales pour obtenir des conditions favorables à la production des milieux aquatiques est ancienne. Ainsi, les moines des abbayes au Moyen-Age ont su créer, et gérer des chapelets d'étangs d'eau douce dans l'objectif d'obtenir carpes et gardons à volonté comme en Brenne. Empiriquement, ils intervenaient sur les interactions entre espèces et sur les réseaux trophiques pour maintenir et améliorer ces activités piscicoles. Les Briérons ont exploité la tourbe et des roseaux pour obtenir une source d'énergie et des matériaux de couverture tout en façonnant le paysage. Les braconniers et chasseurs d'oiseaux d'eau ont développé des techniques favorisant la capacité d'accueil des sites en modifiant le niveau et la qualité des eaux favorables aux herbiers. Les exemples sont multiples dans les cours d'eau et sur le littoral. Souvent il s'agit de pratiques modestes mais dont les effets sont importants pour la flore et la faune : interventions propices aux frayères à brochet, aux écoulements d'eau permettant le passage des anguilles et autres migrateurs au travers d'obstacles, etc..

> Dans la mesure où on ne sait pas « refaire », il est préférable de ne pas dégrader ou détruire.

Ces savoir-faire, couplés à des avancées scientifiques plus récentes, permettent aujourd'hui de répondre à des problématiques nouvelles en lien, entre autres, avec des réglementations concernant les espèces, les habitats, les masses d'eau ou les hydrosystèmes. Dans ce contexte, il paraît capital de bien cerner les niveaux d'organisation à considérer pour atteindre les objectifs de conservation, gestion, restauration de milieux aquatiques et humides de qualité. En effet, selon que l'on s'intéresse au fonctionnement de populations ou de communautés végétales, animales, d'écosystèmes ou de paysages fluviaux, des approches scientifiques et techniques différentes seront adaptées au niveau traité (**Figure 44**). En choisissant ce filtre, les problèmes rencontrés par les gestionnaires sont abordés de manière transversale, qu'il s'agisse du traitement d'espèces menacées, envahissantes, du rôle d'espèces ingénieurs et/ou facilitatrices, des interventions touchant à la géomorphologie sur la diversité, des questions de réversibilité versus irréversibilité, d'acceptabilité et d'éthique.

Restaurer un milieu dégradé est une opération délicate, les altérations anthropiques ayant généralement fait sortir l'écosystème de sa trajectoire écologique. Lui redonner un bon état prendra beaucoup de temps et il est peu probable que le résultat obtenu soit proche de celui qui aurait été observé dans le système s'il avait continué à évoluer spontanément.

DU POOL GÉNÉTIQUE AU TERRITOIRE ANTHROPISÉ, LES APPROCHES SCIENTIFIQUES ET PRATIQUES POUR CONSERVER AUX ÉCHELLES PERTINENTES

Recherches fondamentales et appliquées

Transfert des résultats, méthodes et outils

Élimination,contôle des pertubations

Combinaison des approches / Évaluation des effets des mesures

DES PRINCIPES, ...	COMPRENDRE LA STRUCTURE ET LA COMPOSITION DE NIVEAUX EMBOITÉS	DES ACTIONS, ...
Mécanismes menant au déclin à l'exctinction Population minimum viable	Espèce, population	Réintroduction, renforcement Création des conditions optimales d'habitat
Nature des interactions (compétition, prédation, parasitisme, ...) Dynamique, succession Résistance aux pertubations	Communauté	Application de pertubations mimant les interactions (fauche, pâturage, feu, ...) Lutte contre les espèces invasives
Processus biogéochimiques Modèles de fonctionnement Évaluation des fonctions Qualification de la résilience	Écosystème	Restauration des conditions hydrologiques, physicochimiques, biologiques Réhabilitation des flux et échanges
Caractérisation de la structure, évaluation des effets de fragmentation, de la connectivité, du potentiel des zones sources	Paysage	Reconstitution des voies d'échange (corridors) Favoriser l'hétérogénéité Intégration à la planification

FIGURE 44

BARNAUD ET FUSTEC, 2007

Dans la mesure où on ne sait pas « refaire », il est préférable de ne pas dégrader ou détruire. La Loi relative à la protection de la nature mentionnait, dès 1976, la nécessité de prise en compte du triptyque Eviter-Réduire-Compenser (ERC) lors des études d'impact sur l'environnement (EIE) (Cizel, 2010). Mais le principe « est bien souvent resté lettre morte » (Berthelot *et al.*, 2011)[27]. Il a fallu attendre les années 2000 pour que les dispositions d'application soient précisées : loi relative à la responsabilité environnementale, lois Grenelle I et Grenelle II. Les bases et modalités de mise en œuvre sont détaillées dans la doctrine relative à la séquence ERC (Eviter, Réduire, Compenser les impacts sur le milieu naturel) (Hubert et Morandeau, 2013). Par ailleurs, les mesures compensatoires en réponse à des pertes de zones humides stipulées dans les SDAGE[28] 2010-2015 indiquent les conditions de réalisation et les attendus.

L'ensemble de la communauté scientifique concernée par l'ingénierie des écosystèmes aquatiques est unanime, les étapes de la séquence ERC, en particulier la première, doivent être respectées scrupuleusement. Selon l'UICN France (2011), lorsqu'il y a des impacts résiduels, la contrepartie, c'est-à-dire les mesures compensatoires, doivent être pertinentes (localisation) et suffisantes (ampleur), entendez équivalentes, tout en étant faisables et efficaces.

2 Grands principes à appliquer

Dans la typologie des objectifs à l'origine des projets d'ingénierie écologique, « Restaurer les milieux aquatiques et développer la biodiversité » joue un rôle particulier.

Les projets visant à répondre aux objectifs présentés dans les paragraphes précédents sont en effet fondés, au moins en partie, sur des raisons sociétales : on cherche à améliorer la qualité physico-chimique de l'eau, à créer un paysage urbain agréable autour de l'eau, à protéger les populations du risque d'inondation, etc.. L'objectif consistant à restaurer les fonctions du milieu aquatique vient ensuite, le bon fonctionnement du milieu aquatique étant perçu tout autant (sinon plus) comme un moyen d'atteindre les finalités sociétales que comme un but propre.

Dans le cas qui nous concerne ici, le retour à un bon fonctionnement est considéré comme l'objectif principal auquel est joint la conservation de la biodiversité. « Par le vivant » et « Pour le vivant » sont ici complètement imbriqués et nécessairement au cœur de la démarche.

Manipuler le vivant en intégrant les avantages et les risques oblige à respecter un certain nombre de règles pour éviter de jouer à l'apprenti sorcier. Si des connaissances empiriques ont toujours leur place dans les dispositifs de génie écologique, elles sont de plus en plus confortées, remises en cause ou nuancées par les acquis scientifiques. Pour l'ingénierie écologique au sens de Mitsch et Jørgensen (2003), l'enjeu majeur consiste bel et bien à faire ces allers-retours entre la théorie et la pratique, à calibrer les modes d'intervention et valider des modèles à l'aide d'expérimentations en mésocosme ou grandeur nature.

Manipuler le vivant en intégrant les avantages et les risques oblige à respecter un certain nombre de règles pour éviter de jouer à l'apprenti sorcier.

1. S'APPUYER SUR DES PRATIQUES DE GESTION INSPIRÉES DE MÉCANISMES ÉCOLOGIQUES

Les principes de l'écologie subissent de véritables tests lorsqu'ils sont mobilisés pour un projet d'ingénierie écologique. Concevoir un tel projet, quels que soient son envergure et son objectif, nécessite d'avoir une vision du fonctionnement de l'entité considérée, population ou écosystème. Certains concepts permettent de comprendre les résultats. Il s'agit des notions de métapopulations, d'interactions (compétition, prédation, mutualisme, etc.), de flux (matière, minéraux, eau, etc.), de processus ou fonctions écologiques, de trajectoires d'évolution des systèmes, d'effets et de réactions vis-à-vis de pressions.

Inversement, le suivi scientifique de projets d'ingénie-

[27] *Rapport d'information relatif aux enjeux et aux outils d'une politique intégrée de conservation et de reconquête de la biodiversité.*

[28] *SDAGE : Schéma d'aménagement et de gestion des eaux.*

rie écologique sert à revisiter et faire émerger de nouvelles démarches en écologie. Un exemple de cet enrichissement est la découverte de l'importance des « espèces ingénieurs », ces organismes qui par leur présence structurent et influencent le fonctionnement des écosystèmes (Jones *et al.*, 1994). Les illustrations sont maintenant nombreuses : le castor qui réorganise des milieux aquatiques à l'échelle du bassin versant par ses barrages (Wright *et al.*, 2002), les sphaignes à l'origine de la formation de la tourbe et de milieux acides (Van Breemen, 1995), les spartines (Spartina spp.) qui stimulent l'installation de communautés végétales résistantes aux assauts des vagues (Castillo et Figueroa, 2009). Un autre exemple est celui de la découverte des mécanismes à l'œuvre lors de la succession de communautés de macrophytes. Le suivi pendant 15 ans de deux zones humides créées, et respectivement plantée ou colonisée spontanément, a mis en évidence des variations de composition et des structures différentes des trajectoires théoriques (Mitsch *et al.*, 2012) (voir le § sur les notions de base dans le chapitre 1).

2. NE PAS DÉGRADER ET/OU CONTRIBUER AU MAINTIEN OU À LA RESTAURATION DU BON FONCTIONNEMENT DES MILIEUX AQUATIQUES

Si l'objectif principal du projet est de maintenir ou restaurer le bon fonctionnement de l'écosystème aquatique, le résultat n'en est pas pour autant garanti. Des méta-analyses publiées récemment mettent en évidence les limites et risques des projets de restauration. Pour Moreno-Mateos *et al.* (2012)[29], la structure biologique et le fonctionnement biogéochimique (stockage du carbone dans les sols) dans les sites restaurés sont en moyenne inférieurs d'environ un quart par rapport aux systèmes de référence. Les processus en cause sont la lenteur de la reprise et une évolution post perturbation vers des stades ultérieurs différents de ceux prévus.

3. MINIMISER LES INTERVENTIONS LOURDES, ONÉREUSES ET PRÉCAIRES

Pour restaurer un marais, il semble suffisant de mettre au bon moment de l'eau de qualité appropriée en quantité suffisante, avec parfois quelques travaux préalables de génie civil pour modeler la morphologie du site. En réalité, dans les pays développés de longue date, il est difficile de se conformer à cette démarche parce que les interventions se font sur des systèmes modifiés et modelés par des activités humaines dont l'alimentation en eau n'a plus rien de « naturel ». Partir de sites très perturbés oblige à programmer des opérations importantes (Voir par exemple les plans : « Rhin Vivant », « Plan Rhône », reconstruction de vasières dans l'estuaire de la Seine, etc.).

Si les renaturations et les remises en connexion d'anciens bras fluviaux correspondent à des interventions maîtrisées au plan technique, la durabilité des résultats dépend de facteurs agissant à des échelles plus vastes au sein du bassin versant. Dans ce cas, la programmation des projets doit s'inscrire dans des programmes ambitieux de redynamisation de cours d'eau et de reconquête de leur espace de liberté. La restauration du Drugeon et de ses affluents (Jura) en est un exemple[30]. Elle comprend plusieurs interventions selon le secteur concerné : diversification des écoulements en augmentant la rugosité en tête de bassin, remblaiement total du lit rectiligne et reconnexion des méandres court-circuités dans les parties amont et moyenne, décaissage des berges accompagné d'une recharge en gravier et d'un rehaussement du lit sur la basse vallée.

Les programmes audacieux englobent des manipulations simples et courantes mises en œuvre dans de nombreux projets individuels plus modestes. Si l'on considère des opérations qui visent à réhydrater des tourbières, la fermeture des drains (par exemple la tourbière de Frasne) ou la construction de digues sont réalisées pour avoir les apports d'eau adéquats (par exemple la tourbière de Landemarais en Bretagne, Clément *et al.*, 2011). La remise en eau de bras morts se fait par une prise dans un canal proche afin d'assurer des conditions aquatiques tout au long de l'année ou en permettant l'alimentation par la nappe (par exemple la Iône de la Platière). Des interventions comportent des réintroductions d'espèces une fois leur habitat rétabli. De nombreux déboisements de milieux en voie de fermeture, faits dans le but de récupérer des habitats herbacés estimés plus intéressants, sont également classés comme des restaurations.

[29] *Echantillon : 621 projets (restauration, création) localisés dans 12 pays, 21 294 ha de zones humides traités et 19 694 ha de référence.*

[30] *http://www.onema.fr/IMG/Hydromorphologie/27_4_rex_r7_drugeon_vbat.pdf*

La limite entre pratiques de gestion conservatoire, de restauration et d'ingénierie écologique, est souvent floue. Les premières proviennent en général d'adaptations de savoir-faire techniques et d'un corpus de connaissances plutôt empiriques (pâturage, fauche, contrôle ou réintroduction d'espèces), les autres résultent normalement d'une intégration d'acquis scientifiques et doivent avoir un caractère innovant (expérimentation, conception et utilisation de matériels originaux).

Dans tous les cas de figure, la durabilité des effets des manipulations constitue l'une des cibles à atteindre. Une restauration réussie se juge à l'aptitude du système à s'auto-entretenir, c'est-à-dire à se remettre sur une trajectoire permettant son évolution avec des phases de blocage, d'apparente régression ou de progression. Par ailleurs, le système réhabilité, même si les causes directes de dégradation ont été contrôlées, se trouve encore sous l'influence de pressions extérieures, dont les effets peuvent dépasser un seuil excédant sa capacité à résister et à récupérer (résilience). Dans les territoires très modifiés par les activités humaines, obtenir un système restauré autonome est peu réaliste car il n'est pas sous cloche. Les plans les plus sophistiqués et les techniques les plus poussées ne garantissent pas un comportement sans surprise du système.

5. INSCRIRE LE PROJET DANS UNE POLITIQUE TERRITORIALE ET AGIR À LA BONNE ÉCHELLE SPATIALE

De plus en plus, les projets d'ingénierie écologique en matière de protection, restauration et gestion de milieux aquatiques sont portés par des structures intercommunales qui se sont dotées de compétentes spécifiques, non obligatoires. La plupart s'engage dans une contractualisation financière et technique avec, au moins, les agences de l'eau (contrat territoriaux, contrats de rivière, de baie, Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux, etc.). Une des exigences de cette contractualisation est la définition d'un territoire pertinent d'intervention du point de vue hydrographique et si possible administratif ainsi que le respect des grands objectifs réglementaires tels que le SDAGE.

Outre la prise en compte de la cohérence hydrographique et chronologique dans l'établissement des programmes d'actions, les élus doivent également veiller à l'intérêt de leurs administrés. Ces intérêts peuvent s'exprimer au travers du respect des activités sectorielles (relevant d'une filière d'activité) : agriculture, tourisme par exemple ou bien, d'activités territoriales (relevant d'un territoire politique) : aménagement du territoire, loisirs, culture, etc. Le rôle de l'élu est de mettre en avant ou de faire émerger des convergences, ou à défaut des compromis, entre des actions ou des activités qui ne semblent a priori pas toujours compatibles (par exemple : activités nautiques ou activités de pêche et préservation de zones des quiétudes pour les oiseaux ou de réserves de pêche).

Des mises en valeur réciproques sont de plus en plus fréquentes entre, par exemple, un aménagement de cours d'eau et un sentier touristique. Cette option impose d'accepter localement et/ou temporairement des contraintes (voir la fiche d'action sur la Restauration de la Fontenelle). Elles permettent d'inscrire ces projets d'ingénierie écologique dans un projet de territoire (voir l'exemple de la restauration du Haut Rhône)[31] Ces valorisations réciproques suscitent souvent l'appropriation du projet environnemental par les populations locales, et contribuent ainsi à garantir la longévité de l'action.

Mettre en évidence ou anticiper ces intérêts partagés ne se décrète cependant pas, c'est un travail de longue haleine, à initier dès le début du projet. Ce travail nécessite au préalable de choisir avec acuité le, ou les, partenaires pertinents pour discuter, au vu de leur légitimité à agir (compétences techniques, administratives) et de leur reconnaissance (sectorielle ou territoriale). L'existence d'un lien ou d'une opposition vis-à-vis du porteur du projet d'ingénierie écologique peut, dans certaines situations, suffire à (dé)bloquer une situation complexe. Par exemple, l'étape d'appropriation des objectifs est essentielle lors d'une restauration de cours d'eau. Cette appropriation doit concerner tous les acteurs, que ce soit les représentants du monde associatifs, investis dans la mise en place de bandes enherbées, les responsables d'associations de pêche (soucieux du main-

[31] *http://www.eaurmc.fr/fileadmin/documentation/colloque/Rhone2fev2012/COTTET_ARMANI.pdf*
http://www.graie.org/ISRivers/actes/pdf2012/1A106-099ARM.pdf.

tien des accès à la rivière) ou les particuliers concernés par l'entretien des berges. Il ne faut pas négliger ces aspects relationnels.

C'est un travail qui nécessite également de :

- bien comprendre et faire comprendre les conséquences du projet en matière environnementale ;
- décortiquer les interactions entre les fonctions écologiques attendues (vidange, écoulement, érosion-sédimentation, charge sédimentaire, épuration, chaine trophique, etc.) et les usages (à valeur marchande ou non) du cours d'eau ou de la zone humide (vue, paysage, odeur, entretien, loisirs nautiques, histoire et culture, attachement affectif, valorisation touristique, irrigation, rejets directs ou ruissellements indirects, pédagogie, pêche professionnelle, navigation commerciale, pâturage, abreuvement, etc.).

C'est seulement après avoir bien posé les objectifs du projet analysé, ses répercussions et leurs effets, jugés positifs ou négatifs par les parties prenantes que le dialogue pourra s'instaurer. Le consensus est rare. Il y a souvent des « plus » gagnants et des « plus » perdants que d'autres dans ce type de projet. Le porteur de projet doit en assumer la responsabilité.

6. INTÉGRER LE SUIVI DES PERFORMANCES DÈS LE DÉBUT DE L'OPÉRATION

L'évaluation du bon déroulement des opérations d'ingénierie écologique ne correspond pas à une liste de points à contrôler en fin de projet, elle s'appuie sur un suivi à moyen terme. Elle doit être conçue en rapport avec les objectifs du projet et s'appuyer sur des hypothèses d'évolution des systèmes écologiques considérés. La démarche de l'évaluation au sens large (SL) doit être mise en place de façon anticipée et méthodique dès la détermination des objectifs du projet, elle fait pleinement partie du processus tout en utilisant des méthodes spécifiques. Intégrée au projet, elle requiert une rigueur et une attention tout aussi importantes que celles appliquées à la conception du projet (études préalable, élaboration, réalisation, communication). Il convient dès le départ de se poser les bonnes questions, celles qui permettront de réaliser une évaluation efficace du projet et surtout de ne pas attendre la phase post-travaux.

Le suivi (monitoring) en tant que tel (cf. évaluation au sens strict dans la **FIGURE 45**) prend place après l'étape de conception du projet, il accompagne les premiers travaux (état initial) et prend place après la phase chantier. La structuration et la planification de l'évaluation se fait très tôt. Il s'agit de formuler les hypothèses selon les objectifs du projet, de sélectionner les métriques adéquates, de déterminer les moyens nécessaires. La méthode conserve une certaine flexibilité dans la mesure où le déroulement du projet peut influencer sa structure. En principe, les mêmes paramètres doivent être mesurés à l'état initial et en phase post-travaux. Le suivi ne se limite pas au diagnostic de départ (études préalables) qui vise à comprendre le fonctionnement du système étudié, sa patrimonialité, ses enjeux. Pour mettre en évidence des évolutions et tendances, il est nécessaire de disposer de séries de données, de chroniques, portant sur des périodes aux conditions différentes (sécheresse versus forte pluviométrie, forts ou faibles débit/pluviométrie, écarts de température, etc.) de façon à avoir une représentation de la variabilité intrinsèque du système. Sans cela, les comparaisons risquent de ne pas avoir de sens. Les objectifs du projet, les moyens financiers et techniques sont souvent les deux principaux éléments conditionnant la conception et la réalisation d'un suivi utile à une évaluation environnementale correcte. Il convient donc de s'interroger dès l'amont sur la place accordée à cette phase cruciale d'un projet et l'adéquation du programme de suivi aux moyens. La diffusion et valorisation des résultats des suivis qu'ils soient positifs ou négatifs méritent aussi toute l'attention, c'est ainsi que se construit un corpus de connaissances scientifiques et techniques. Les bases de données accessibles sur les retours d'expérience sont utiles à tout un chacun. Voir le § sur les références dans le chapitre 1.

Les résultats en termes d'intégration sociale d'un projet de restauration écologique d'un milieu aquatique ou humide (en particulier formes d'appropriations ou de rejets sociales et/ou politiques) sont rarement évalués rigoureusement. Sûrement très riches d'enseignements pour de nouveaux projets, ils mériteraient pourtant de faire l'objet d'autant d'attention que les suivis écologiques.

Les étapes du projet et de l'évaluation

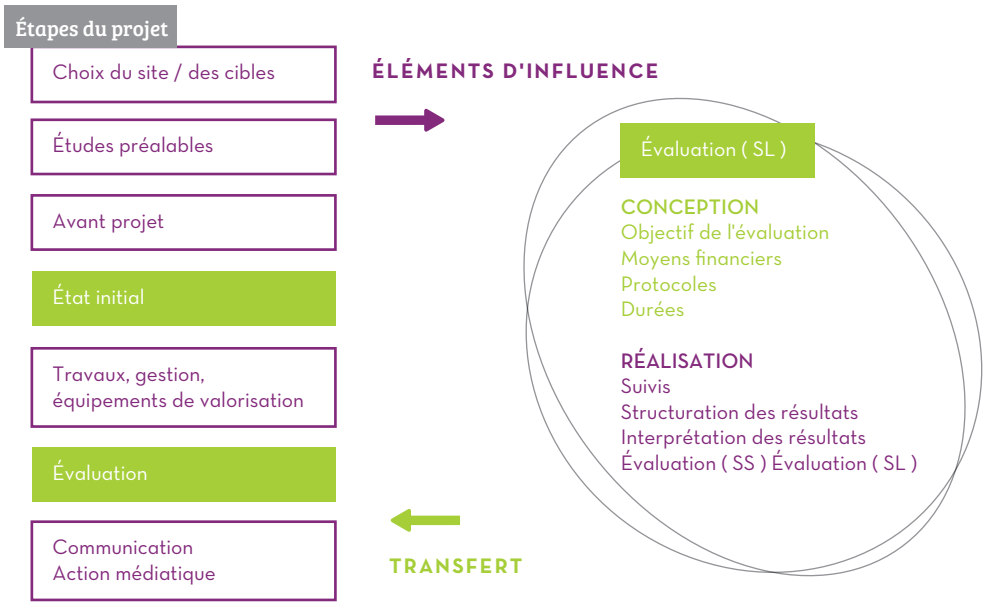


FIGURE 45

MOUSSARD ET VAUDRY, 2012

3 Outils et réalisation

Les outils utilisables sont nombreux et dépendent fortement des objectifs poursuivis. Il s'agit en général de manipuler ou de transformer certains éléments du biotope pour modifier les populations qui occupent l'écosystème et contribuer ainsi à le faire évoluer dans la direction voulue.

Nous illustrons tout d'abord la forme que prennent ces outils en présentant un ensemble d'exemples d'actions qui visent à favoriser certaines populations végétales ou animales en agissant sur leur habitat.

Nous illustrerons ensuite la problématique en traitant de façon plus générale de la manipulation des écosystèmes et en particulier en montrant comment il est possible d'orienter le fonctionnement d'un écosystème plus ou moins anthropisé pour atteindre des objectifs prédéfinis.

1. FAVORISER CERTAINES POPULATIONS VÉGÉTALES OU ANIMALES : DE NOMBREUSES RÉALISATIONS

Les projets de restauration d'espèces ont la plupart du temps, pour raison essentielle, le respect de réglementations. Plusieurs traités et textes législatifs portent sur la sauvegarde d'espèces en danger, vulnérables ou menacées, à l'échelle nationale (liste d'espèces protégées), européenne (Directives Oiseaux, Habitats, Conventions de Berne et de Bonn), internationale (Listes rouge de l'UICN). Ces espèces bénéficient de programmes de conservation combinant des mesures de protection (Arrêté de biotopes) et de gestion à des projets de restauration de populations, notamment à l'occasion de mesures compensatoires (EIE, SDAGE) incluant des translocations.

L'autre caractéristique des projets d'ingénierie écologique appliqués aux espèces et à leurs habitats tient à

S. MOUSSARD

leurs sources d'inspiration, souvent bien datées. En effet, de manière empirique les pêcheurs, les chasseurs, les éleveurs, les sagneurs ont su de tout temps « opérer » les habitats des espèces qui les intéressaient. Ils ont géré les niveaux d'eau, modifié la topographie, limité la compétition ou la prédation en jouant sur les interactions spécifiques. Les naturalistes se sont inspirés largement de ce corpus pour concevoir des plans de gestion. Les scientifiques ont analysé les mécanismes et processus permettant d'obtenir ces résultats et mis en évidence, par exemple, les rôles spécifiques de certaines espèces : ombrelle, clé, facilitatrice, ingénieur, etc.

Les nombreuses interventions ayant pour cible une (ou des) espèce(s) ont pour objectif de reconstituer les conditions topographiques, hydrauliques et/ou chimiques favorables à la fraie (brochets, salmonidés), au développement d'herbiers de macrophytes (potamots, élodées, characées), à la nidification d'oiseaux d'eau, etc. Les aspects biologiques, écologiques éthologiques sont à prendre en compte. Ainsi la compréhension du rôle de certaines adaptations morphologiques a orienté la conception de marais voués aux oiseaux. Par exemple, la forme, la longueur et la courbure de becs d'oiseaux d'eau sont considérés comme indicateurs de leur capacité à prélever leur nourriture dans l'eau ou sur le fond (macrophytes, invertébrés, graines), à prospecter les vasières pour atteindre les graines et espèces d'invertébrés intéressantes.

Il est par exemple bien connu que l'anatomie et le comportement de l'avocette élégante (Recurvirostra avosetta) sont à l'origine de la restauration de marais destinés à conforter ses populations. En fauchant la surface du sédiment de son bec recourbé, cet oiseau fait remonter ses proies (annélides, crustacés, insectes) à la surface puis les capture d'un rapide coup de bec. Cette espèce vulnérable en Europe, niche principalement en colonie et recherche alors des milieux salés ou saumâtres avec des zones surélevées sableuses et peu végétalisées. En migration, elle fréquente des vasières et grèves, parfois le long de fleuves. Les zones humides restaurées ou créées à son intention doivent donc : être de faible profondeur (environ 15 cm) avec un niveau d'eau sans variations brusques, avoir des sédiments fins et meubles, riches en matière organique, offrir des îlots et micro-vasières favorables à la reproduction grâce à des modifications de la topographie. Dans le cas de l'avocette qui fréquente des lieux anthropisés (marais salants, vasières d'estuaires aménagés), la reconstitution de son biotope est relativement facile, comparativement à d'autres espèces. Cependant, le développement des populations placées ainsi dans des conditions optimales d'habitats nécessite en complément l'application de mesures de contrôle de la compétition et/ou prédation par d'autres espèces.

De fait, les opérations d'ingénierie écologique en milieu aquatique ou humide les plus courantes visent à déterminer puis caler les niveaux d'eau pour favoriser la présence de telle ou telle espèce végétale ou animale. Globalement, il a été montré qu'une profondeur d'eau estivale de 15 cm bénéficie aux oiseaux migrateurs alors qu'à plus de 30 cm la diversité en espèces végétales, d'insectes, de poissons, d'amphibiens se trouve favorisée et le contrôle des espèces invasives meilleur (Mitsch & Gosselink, 1993).

La réussite de l'opération dépend cependant de nombreux facteurs qui ne sont pas tous parfaitement maîtrisés. Par exemple, selon que l'on décide de planter ou pas des zones humides créées sur le même modèle, elles évolueront différemment et pas forcément selon les trajectoires prévues comme cela a été démontré dans l'Ohio. Alimentés en eau par la rivière proche, ces sites d'une superficie de 1 ha, ont été suivis très

précisément depuis 1994. La zone humide plantée (12 espèces) a montré au bout de 6 ans une diversité végétale supérieure avec une stabilisation au cours des 5 années suivantes, un taux d'oxygène dissous et un nombre d'espèces de poissons plus élevés. La zone colonisée naturellement se caractérise par une biomasse en macrophytes forte et des amphibiens en plus grand nombre (Mitsch *et al.*, 2005). Quinze ans après, la zone plantée est toujours plus diversifiée mais moins productive que l'autre (Mitsch *et al.*, 2012). Dans les deux systèmes, les sols présentent toutes les caractéristiques d'hydromorphie avec un stock de carbone organique triplé, la capacité d'élimination des nutriments est similaire. Le couvert végétal, les concentrations en nutriments (azote, phosphore) et la turbidité augmentent en lien avec l'âge du système, tandis que la conductivité, l'oxygène dissous et le pH baissent. Une tendance à la diminution d'efficacité vis-à-vis du phosphore est observée, ainsi qu'une élimination de l'azote essentiellement due à d'autres processus que la dénitrification, fonction semblant demander du temps pour s'exprimer pleinement. Finalement, les deux zones jouent un rôle plus important de puits de carbone avec des résultats plus élevés que ceux obtenus dans des systèmes comparables (1800–2700 kg C /ha/an), celle non plantée étant plus efficace, mais avec des émissions de méthane un peu plus élevées tout en étant considérées comme négligeables. Ces résultats amènent les auteurs à s'interroger sur le soin à apporter à la sélection des espèces à planter lors de la conception de zones humides créées pour améliorer la qualité de l'eau, cette étape étant superflue sauf cas exceptionnel, ce qui n'enlève rien à l'intérêt de planter vis-à-vis des autres fonctions.

Avoir pour objectif la restauration de populations d'espèces protégées se comprend à condition de prendre en compte un certain nombre de principes au-delà de l'étude classique de faisabilité d'un projet :

- justifier le choix de l'espèce avec des arguments scientifiques, réglementaires et socio-économiques ;
- cerner les causes de son déclin et dans la mesure du possible les contrôler afin d'éviter de perdre du temps et de l'argent ;
- connaître les expériences antérieures françaises ou étrangères ;
- concevoir le dispositif de manière concertée ;
- se contraindre à trouver les moyens permettant de respecter au plus près le fonctionnement des écosystèmes d'accueil de l'espèce, ceux relevant de l'ingénierie écologique ;
- maîtriser les techniques impliquées ;
- avoir une appréciation des taux de réussite, de la nécessité de répéter des interventions au cours du temps
- bien entendu, avoir un suivi sur le moyen terme et faire des évaluations périodiques des résultats.

Dans ce contexte faire appel à des artefacts relevant ou non de l'ingénierie écologique pour conforter des populations végétales ou animales est conseillé dans la mesure où ils sont fondés sur la connaissance des besoins des espèces pour boucler leur cycle. Entrent dans cette catégorie, par exemple :

- les passes à poissons dont la diversité des configurations reflète les avancées de connaissance sur les espèces cherchant à se reproduire en tête de bassin : rampe de montée à anguilles, ascenseur à alose, échelles et séries de bassins plus ou moins sophistiqués pour les salmonidés (Aigoui et Dufour, 2008), etc. Il s'agit de la première action de restauration des continuités écologiques dont les aspects positifs et négatifs ont été analysés (Roscoe et Hinch, 2010) ;
- les renforcements de population de plantes de berges et rives. L'exemple des roselières est intéressant. Le constat de leur dépérissement à l'échelle de l'Europe a été à l'origine de deux programmes de recherche successifs EUREED (1993-1998) comportant le développement d'outils de gestion, y compris des mesures préventives et de restauration (Brix, 1999). De fait, la réhabilitation de communautés de Phragmites australis a des effets sur le maintien des communautés végétales et animales dépendantes tout en contribuant à l'amélioration de la qualité de l'eau et à la lutte contre l'érosion des rives. Au lac d'Annecy, les travaux visant à une protection physique des roselières contre l'action mécanique de la houle et des bois morts flottants ont été réalisés en plusieurs étapes : fin 1999, le fascinage puis des plantations en juin 2000 et 2001 (Blake, 2003 ; Miquet et Favre, 2007). Ils ont été suivi en 2010 par un programme soutenu par de

Création de roselières et compatibilité des objectifs

OBJECTIFS PRIMAIRES	OBJECTIFS SECONDAIRES					
	Roseaux pour la coupe	**Habitat pour des oiseaux nicheurs**	**Interception des ruissellements agricoles**	**Traitements d'eaux usées**	**Production de poissons pour la consommation**	**Production de poissons pour la pêche à la ligne**
Roseaux pour la coupe		Selon la taille du site	oui	oui	oui	oui
Habitat pour des oiseaux nicheurs	Selon la taille du site		oui	Selon la taille du site	oui	oui
Interception des ruissellements agricoles	oui	oui		Selon la taille du site	non	oui
Traitements d'eaux usées	oui	Selon la taille du site	oui		non	non
Production de poissons pour la consommation	oui	Selon la taille du site	non	non		oui
Production de poissons pour la pêche à la ligne	oui	oui	oui	non	oui	

Tableau 5 BARDSLEY *ET AL.*, 2001

nombreux partenaires (AE-RMC, CG Haute-Savoie, Syndicat Mixte du Lac d'Annecy). En plus de palissades en pieux jointifs émergés, des plantations de macrophytes (roseaux, scirpes, nénuphars) ont été réalisées afin d'accélérer la recolonisation, là où la densité de végétaux était estimée insuffisante. D'autres mesures complètent le dispositif (retrait des bois morts, fauche hivernal, exportation des tiges, etc.) et des propositions ont été faites quant à la gestion du niveau du lac. Stimuler la pousse des roseaux permet d'atteindre des objectifs autres que la seule extension des roselières **(Tableau 5)**. A noter que l'espèce peut être une invasive redoutable par exemple en Amérique du Nord.

Toutefois, il n'est pas toujours facile de bien définir ses objectifs ni leur associer des moyens appropriés. Par exemple, l'aménagement de berges sableuses de cours d'eau ou d'étangs pour faciliter la nidification d'hirondelles des rivages (Riparia riparia) se défend notamment dans une gravière en cours de réhabilitation. En effet, l'espèce est opportuniste et s'adapte en se déplaçant d'une année sur l'autre lorsque les conditions ne conviennent plus (paroi friable, inondation), optant parfois pour des structures artificielles (Hopkins, 2001). Par contre, la construction de structures complètement artificielles, en vogue depuis plus de quinze ans dans certains pays, semble poser problème, en particulier lorsqu'elle se fait dans une réserve naturelle comme à Londres.

2.MANIPULER LES ÉCOSYSTÈMES : UN DÉFI ACTUEL

Au cours des années 1980, les premières opérations scientifiques menées à grande échelle dans des lacs (Etats-Unis, Suède) avaient pour objectif de tester le principe de cascade trophique[32] afin de contrôler l'eutrophisation et les blooms algaux (Carpenter, 2002). Ces opérations constituent les prémices de l'ingénierie écologique. Elles ont en effet permis de mettre en évidence les effets de la modification de la structure de réseaux trophiques sur le système entier.

Les incertitudes de réponse des communautés manipulées obligent dans la majorité des cas à choisir des cibles et des valeurs présentant des caractéristiques bénéfiques pour l'homme plutôt que des objectifs purement écologiques.

Ces résultats revêtent une grande importance lors de la conception des projets de restauration comportant des actions sur les communautés comme des réintroductions ou des éradications d'espèces. Des règles existent quant aux séquences à respecter si l'on s'intéresse au fonctionnement du système écologique. Les incertitudes de réponse des communautés manipulées obligent dans la majorité des cas à choisir des cibles et des valeurs présentant des caractéristiques bénéfiques pour l'homme plutôt que des objectifs purement écologiques. Au cours des deux dernières décennies, des programmes européens de recherche ou de conservation (Life) ont porté sur la restauration de rivières et de zones humides avec des objectifs différents, allant de la reconstitution d'habitats d'espèces menacées à l'évaluation du potentiel d'effet de zones humides créées vis-à-vis des changements climatiques (stockage, émission de gaz à effet de serre), en passant par la reconquête de zones inondables fonctionnelles pour limiter les risques.

3. TENTATIVES D'ORIENTATION DU FONCTIONNEMENT D'ÉCOSYSTÈMES

Parmi les objectifs possibles figure la tentative de faire évoluer un écosystème dans une direction particulière, choisie par les acteurs concernés. Dans ce cas tout particulièrement, l'opération doit être appréhendée à différentes échelles spatiales et temporelles, sur la base d'une approche systémique et holistique, prenant particulièrement en compte la place de l'homme dans le système et les incertitudes liées à son comportement.

3.1. Exemple d'un grand écosystème très anthropisé : l'estuaire de la Seine

Les aménagements urbains, industrialo-portuaires aussi bien que les aménagements de milieux naturels pour restaurer des fonctions écologiques, ont des effets différents à plusieurs échelles : des effets locaux sur le site d'aménagement, des effets globalisés au sein du système, des effets induits (effets cocktails, rétro-effets, effets décalés), des effets cumulés, derrière lesquels se trame aussi la notion de seuil, des effets décalés dans le temps.

Sur l'estuaire de la Seine, les évaluations environnementales ne permettent pas de juger précisément et de façon pertinente, à l'échelle locale pas plus qu'à l'échelle globale, des effets écologiques des aménagements ni de l'efficacité réelle des restaurations écologiques au regard de leurs objectifs (y compris dans le cadre de mesures compensatoires). Néanmoins, il est facile de constater que l'estuaire, dans sa globalité, a évolué et ne s'est pas maintenu sur la même trajectoire écologique que si les aménagements n'avaient pas eu lieu ou que si l'efficacité des compensations avait été atteinte. Les fonctions écologiques ont évolué : des fonctions de milieux intertidaux (soumis au balancement des marées) ou aquatiques ont par exemple laissé la place à des fonctions de milieux terrestres, humides ou méso-hydriques.

La question qui se pose aujourd'hui est celle de savoir ce que l'on souhaite vraiment : maintenir coûte que coûte la trajectoire actuelle du milieu, restaurer une trajectoire plus « estuarienne » (influence des gradients de marée et de salinité) ou infléchir autrement le milieu estuarien

[32] *L'abondance des grands poissons piscivores détermine l'ampleur de la consommation de plancton qui détermine la structure de taille du zooplancton herbivore et donc l'importance de son potentiel d'action.*

Le mantien du fonctionnement écologique sur une trajectoire tendancielle [...] n'est-il pas illusoire en soi, en particulier sur des systèmes fortement anthropisés?

(plus terrestre par exemple). Le maintien du fonctionnement écologique de l'estuaire de la Seine sur sa trajectoire tendancielle pose de réelles questions, notamment celle de savoir s'il n'est pas illusoire en soi de vouloir maintenir un fonctionnement écologique pour l'estuaire de la Seine en particulier sur des systèmes fortement aménagés ?

Même si, à l'échelle locale, les compensations des aménagements anthropiques étaient efficaces, qu'en serait-il à l'échelle globale ? L'ensemble des effets des aménagements ou des compensations, influençant dans un sens ou un autre les conditions environnementales (température, luminosité, bruits, trafic, fragmentation, artificialisation, déprise, etc.), ne serait-il pas tel, que le « maintien » serait vain face aux perturbations récurrentes, de natures différentes et disparates ?

C'est sur cette hypothèse, qu'en estuaire de Seine, les partenaires de la restauration écologique souhaitent créer les conditions de l'émergence d'un projet d'estuaire à long terme. Projet qui permet de guider les aménagements et les restaurations de fonctions écologiques, dans une direction souhaitée, construite de façon concertée ou négociée :

- en tenant compte le mieux possible des interactions réciproques entre fonctionnement écologique et contraintes anthropiques ;
- en considérant différemment les tendances lourdes d'évolution et les incertitudes à venir ;
- en raisonnant à l'échelle d'un système ouvert (sur l'amont, l'aval, le bassin hydrographique, etc.) ;
- en laissant place à une certaine capacité d'adaptation.

Toute évolution du fonctionnement d'un écosystème modifiera le cortège d'habitats et d'espèces associés.

Mais la question demeure. N'est-il pas tout aussi illusoire de penser réussir à « diriger » le système dans une direction, sur une ou plusieurs trajectoires souhaitées, que de le maintenir dans une trajectoire tendancielle ?

Une chose est sûre, dans ce type de milieu très aménagé, qu'il s'agisse de restaurer ou de compenser un fonctionnement écologique, il semble que les objectifs à se fixer, bien qu'essentiels, ne peuvent être trop précis du fait des incertitudes en matière d'écologie comme en matière d'évolution du système anthropique. Ce type de milieu est condamné à être soumis à une gestion adaptative permanente de façon à rester dans les marges acceptables de la trajectoire souhaitée.

3.2. Exemple d'écosystèmes de plus petite taille et moins anthropisés

Prenons maintenant l'exemple d'un système plus petit, également aménagé, mais de façon moindre que le précédent au regard de la capacité du système à absorber les perturbations. Les activités anthropiques s'y sont développées au cours du temps (depuis la seconde moitié du 20ème siècle notamment). Nous pourrions nous référer par exemple aux projets de reméandrage du Drugeon (voir fiche étude de cas), comme celui de la remise dans son lit d'origine de la Fontenelle (voir fiche de cas). L'idée ici est d'orienter le fonctionnement de l'écosystème en le remettant sur une trajectoire proche de celle qu'il aurait prise sans les aménagements anthropiques successifs (rectification du tracé du cours d'eau, changement de lit, rejets anthropiques dans le cours d'eau, etc.). Ces deux opérations semblent montrer que l'objectif peut être atteint, à condition de prendre le temps de la conception et de la négociation et d'y consacrer les moyens nécessaires sur la durée. Une bonne partie des surfaces en zones humides disparues dans les années 90 sont aujourd'hui reconquises. Le Drugeon et ses zones humides connexes fait aujourd'hui l'objet d'un classement RAMSAR et NATURA 2000. Des projets de valorisation socio-économique sont maintenant à l'étude.

En conclusion, il parait important, dans les tentatives d'orientation du fonctionnement d'écosystèmes :

- d'approcher le système (anthropo-éco-système) par une analyse :
  - o systémique (interactions entre les composants), la plus complète possible ;
  - o pluridimensionnelle (anthropique, naturelle, historique, spatiale, etc.). Il s'agit notamment de ne pas se limiter à l'écosystème dans ses composantes uniquement naturelles. L'homme y joue un rôle essentiel, notamment dans la modification des fonctions écologiques, mais également dans l'appropriation qu'il en a. Il s'agit également de replacer le système dans une trajectoire temporelle (de quelles contraintes hérite-il ?, quelles sont ses avenirs possibles ?) et dans un emboitement d'échelles important. Le système est ouvert sur d'autres (le bassin versant, le bassin hydrographique, le tronçon de cours d'eau, etc.).
- de considérer les effets de seuils et la capacité de résilience d'un système (cf. chapitre 1). Ces éléments ne sont (et ne seront) pas les mêmes selon la nature du système, son histoire, ses avenirs possibles. Ils contraindront la capacité du système à rejoindre certaines trajectoires.

Une fois cela dit, dans la pratique, les possibilités sont souvent très limitées par les connaissances et les moyens disponibles. Néanmoins une bonne hiérarchisation, au sein de ces connaissances, de celles prioritaires pour l'approche système ainsi qu'une bonne approche des incertitudes peut permettre de fixer des objectifs raisonnables et adaptables. La dimension expérimentale de toute opération doit rester claire et ne doit pas empêcher de se fixer des objectifs tout aussi clairs. Elle doit par contre aider à prévoir dès l'amont du projet sa gestion adaptative (adaptation, rétroactions, etc.). Cette dimension expérimentale est coûteuse et souvent complexe à justifier auprès des personnes concernées.

Enfin, il parait également important de tenter de concilier deux approches de la biodiversité, approches que l'on pourrait appeler de « fonctionnaliste » et « patrimonialiste ». Toute évolution du fonctionnement d'un écosystème modifiera le cortège d'habitats et d'espèces associés. Des espèces patrimoniales disparaitront, d'autres apparaitront. La diversité et la densité des espèces seront également modifiées. L'évolution tendancielle d'un système amène naturellement ce type de changements. Mais lorsqu'il s'agit de guider cela par des aménagements ou des restaurations humaines, les choses se complexifient. Notamment parce que les changements seront plus rapides, que le porteur de projet en sera porté responsable et que l'on sait mieux évaluer ce qui peut évoluer sur une trajectoire tendancielle que sur une trajectoire modifiée, sur différentes échelles de temps.

Parfois les milieux qui vont faire l'objet de restauration de fonctionnement (reméandrage d'un cours d'eau), bien que résultant d'un aménagement anthropique antérieur, sont déjà assez riches en diversité et patrimonialité écologique. Alors, outre la question des réglementations en vigueur qui protègent des habitats ou des espèces, il convient de prendre du recul et de bien définir ce que l'on souhaite, et ce à différentes échelles de temps et d'espace. Ceci implique de :

- Porter son évaluation à différentes échelles spatiales : ce qui peut être très important à une échelle locale, peut ne plus l'être autant si l'on dézoome. D'autres zones de richesse semblable peuvent exister dans le même lit du cours d'eau qui ne seront pas détruites. Les habitats et les espèces patrimoniaux seront protégés ailleurs, dans le même système.
- Porter son évaluation à différentes échelles de temps : si l'on raisonne en termes de pertes (mais cela peut être fait tout autant en termes de gain), on sait ce que l'on va perdre aujourd'hui ; mais on doit essayer de savoir, notamment par des modélisations à dire d'experts, ce que l'on risque de perdre en l'absence du projet de restauration à 5, 10 ou 30 ans et ce que l'on peut gagner ou perdre avec le projet à 5, 10 ou 30 ans.

  Les évolutions, seront d'autant plus difficiles à modéliser que le système n'est pas stable ou pas résilient (cf. concepts chapitre 1).

C'est à partir de ces bilans les plus rationnels possibles, qu'il sera le plus facile de discuter des choix à opérer, entre protection de l'existant ou restauration d'un fonctionnement.

4 Perspectives et freins

L'un des freins important réside dans le fait que le degré de recouvrement effectif du fonctionnement des systèmes produits par les restaurations écologiques reste incertain. Par exemple, Hossler et Bouchard (2011) ont constaté que, malgré une végétation et une hydrologie similaires, des zones humides créées stockaient moins de carbone dans le sol et la litière et avaient des taux de dénitrification inférieurs à celui des marais « naturels ».

Les questions majeures concernent le sens et la vitesse d'évolution des milieux, l'influence de la taille des zones et/ou de l'environnement. Or, le suivi à long terme de projets de restauration de grande taille est rare comme l'ont montré Wagner *et al.* (2008). L'un des trois exemples mis en exergue concerne le Rhône court-circuité et ses annexes (Brégnier-Cordon, Haut-Rhône) où grâce à 17 ans de suivi précis les effets de la restauration et de la recolonisation « spontanée » des végétaux sur les processus écologiques ont pu être cernés (Henry *et al.*, 2002).

Passer d'objectifs et pratiques de restauration à la prise en compte des services écosystémiques constitue donc un nouveau défi.

Ces limites de la restauration écologique ont des répercussions sur la manière dont sont considérés les crédits « zones humides », sachant que les critères de succès peuvent être respectés sans pour autant que le système soit fonctionnel et pérenne. Selon Moreno-Mateos *et al.* (2012) retrouver la structure et le fonctionnement des écosystèmes « d'origine » après destruction est impossible actuellement.

Passer d'objectifs et pratiques de restauration à la prise en compte des services écosystémiques constitue donc un nouveau défi. Dufour *et al.*, (2011) pensent que négliger les aspects sociologiques et culturels lors de l'évaluation de projets de restauration limite la portée de la notion de services dans le contexte des cours d'eau.

CHRISTIAN LÉVÊQUE

Négliger ces aspects bloque l'acceptation et, par voie de conséquence fait courir un risque supplémentaire d'échec au projet, car les populations vont continuer à exercer des pressions allant à l'encontre de l'écosystème restauré.

Dans l'ensemble, la restauration a un coût élevé et nécessite un investissement de gestion à long terme. Savoir si les avantages économiques issus de la revalorisation de services écosystémiques l'emportent sur les frais à engager peut être intéressant (Alexander et McInnes, 2012). L'enchevêtrement des aspects scientifiques, réglementaires et politiques explique l'enchevêtrement des points de vue des acteurs des projets. Tous les acteurs sont en effet soucieux d'avoir une procédure de compensation et des méthodes d'évaluation écologiquement et socio-économiquement correctes, compréhensibles, mais aussi dont les résultats servent leurs objectifs, sachant que les enjeux « fonciers » correspondent souvent à un facteur limitant clé.

Maron *et al.* (2012), constatant l'écart entre les visées politiques et les pratiques de compensation, appellent à des relations plus étroites entre ingénieurs écologues et responsables de la conception, lors de la mise en œuvre des orientations. Ils recommandent d'utiliser la restauration en tant que compensation seulement lorsque les conditions suivantes sont remplies :

- l'évaluation des écosystèmes touchés doit être explicitement établie ;
- la restauration doit être réalisable ;
- les retards et incertitudes liés aux opérations doivent être inclus dans le calcul des pertes et gains.

Chapitre 3

Et demain ?

1 LES FREINS AU DÉVELOPPEMENT DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE ET LES OUTILS POUR LES LEVER 131

2 LES LEVIERS POUR DÉVELOPPER L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE 138

L'ingénierie écologique constitue un domaine en émergence dont la structuration est encore loin d'être terminée.

L'objectif de cet ouvrage est de faire un point sur l'état de l'art et d'essayer d'en préciser les enjeux, les méthodes et les domaines de prédilection.

Nous avons pleinement conscience que ce point sur l'état de l'art est très loin de clore le débat et que des évolutions importantes vont probablement se développer rapidement dans les années à venir. Pour essayer d'en anticiper certains, nous avons donc voulu inclure à l'ouvrage un chapitre de perspectives qui vise à analyser les freins et les leviers que l'on peut aujourd'hui anticiper et qui sont susceptibles de guider ces évolutions. Ce travail s'appuie sur une petite vingtaine d'entretiens réalisés auprès d'acteurs majeurs du domaine : agences de l'eau, bureaux d'études et collectivités territoriales (Dupetit, 2013).

L'hypothèse centrale est que c'est la maîtrise d'ouvrage publique qui sera sans doute le facteur principal de l'évolution du domaine au cours des années à venir. Cette hypothèse est bien sûr discutable car d'autres éléments peuvent également jouer un rôle majeur, par exemple l'évolution des connaissances, un changement important de la demande sociétale ou une série d'événements climatiques ou environnementaux. Elle est cependant réaliste car, par les financements qu'elle apporte, la maîtrise d'ouvrage publique constitue le principal moteur de l'activité.

Ce chapitre, comme les précédents, ne doit pas être lu comme une synthèse des connaissances actuelles, mais plutôt comme un ensemble organisé de points de vue. Il est destiné à enrichir le débat et non à le clore.

Chapitre 3

1

LES FREINS AU DÉVELOPPEMENT DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE ET LES OUTILS POUR LES LEVER

Deux grandes familles de freins ont été identifiées :

- la première est constituée par des freins liés à l'organisation de notre société et qui vont très au-delà du monde de l'eau. Les freins de cette famille ont des origines institutionnelles, politiques ou même culturelles. A titre d'exemple, on peut citer les difficultés d'autofinancement actuelles des collectivités locales.
- la seconde est constituée de freins sur lesquels les acteurs du monde de l'eau et de l'aménagement ont une prise plus directe. Les freins de cette nature sont probablement plus faciles à lever par des actions de recherche, de formation, de capitalisation ou de partage de l'information, etc.

Au vu de l'ambition de cet ouvrage, il est nécessaire de bien identifier la nature de chaque frein de façon à pouvoir envisager les actions potentiellement efficaces pour le lever.
L'ordre de présentation des paragraphes suivants n'est absolument pas hiérarchique, l'importance relative de chacun des freins identifiés n'ayant pas fait l'objet d'une réflexion particulière.

1 Les difficultés d'autofinancement des collectivités

La difficulté des collectivités locales (communes, communautés de communes, syndicats de rivière ou de bassin, etc.) à autofinancer une partie des projets semble être l'un des freins importants à l'émergence et au développement des projets d'ingénierie écologique. En effet, même si les maîtres d'ouvrage peuvent bénéficier de subventions diverses (agences de l'eau, conseils régionaux, conseils généraux, etc.), il reste toujours une partie à leur charge.
Or, mis à part dans le cas de structures dédiées, comme un syndicat intercommunal s'étant doté d'une compétence clairement identifiée dans le domaine de la gestion des milieux aquatiques, les collectivités locales n'ont pas de budget spécifique alloué à ce poste. De plus, le contexte règlementaire français actuel n'oblige pas les maires à agir pour la gestion des milieux aquatiques au-delà de leurs obligations de protection de leurs concitoyens (par rapport aux risques d'inondation par exemple) ou de police de l'eau (en cas de pollution des cours d'eau par une source située sur leur commune). En conséquence, l'argent des collectivités va donc être plus facilement affecté en priorité à des compétences obligatoires, comme l'assainissement par exemple. Les temps de crise financière actuels n'arrangent rien à cette situation et viennent même accentuer les priorités établies.
La décision d'agir reste donc dépendante d'une volonté politique forte et particulièrement tributaire des incitations financières que constituent les subventions. Voir à ce sujet le § sur les leviers.

2 Un problème de gouvernance dans le domaine de l'eau

Un autre frein identifié concerne la grande diversité des acteurs et des structures potentiellement concernés.

Il existe aujourd'hui en France une grande diversité d'acteurs sectoriels et de structures ayant des compétences dans le domaine de l'eau. Leurs territoires de compétence (protection des captages, lutte contre les pollutions diffuses d'origine agricole, mise en place des « trames bleues », protection et restauration des zones humides et des cours d'eau, pour n'en citer que quelques-uns) se superposent souvent en partie. Les limites de leurs territoires administratifs s'avèrent souvent mal adaptées aux problématiques de gestion de l'eau (par exemple limite administrative de communauté de commune pour la gestion des ruissellements d'un bassin versant).

Il est rare qu'un acteur clairement identifié ait en charge en même temps la gestion globale et concertée de la ressource en eau et du milieu aquatique, même si on commence à voir de plus en plus de structures se munir de compétences multiples liées à l'eau et réviser leur périmètre[33].

Des éléments de réponse à ces problèmes de gouvernance dans le domaine de l'eau pourraient être apportés par la loi de décentralisation en préparation.

Lorsque le territoire est dépourvu de tout syndicat ou de tout EPTB (Etablissement Public Territorial de Bassin), la gestion des milieux aquatiques revient de fait à la commune. Or cette dernière, selon sa taille, n'a pas toujours de personnel pour traiter de ces questions. L'élu qui voudrait éventuellement porter un tel projet, n'a généralement pas, à la fois, le temps, les compétences techniques et juridiques, l'énergie et l'ensemble des réseaux suffisants pour se lancer, seul, dans une démarche de ce type. De plus, en territoire rural par exemple, certains projets d'ingénierie écologique peuvent être particulièrement sensibles (par exemple, pour la création de zones tampons qui nécessiteraient l'acquisition d'une partie des terres agricoles d'un exploitant). Pour les élus, une difficulté politique vient ainsi s'ajouter aux difficultés précédentes.

A l'inverse, lorsqu'un territoire se trouve par exemple à la fois sur le domaine de compétence d'un syndicat et sur celui d'un EPTB, il est difficile de choisir la structure qui est la plus apte à traiter des problématiques liées à la gestion de l'eau et des milieux aquatiques et de choisir le maître d'ouvrage qui convient le mieux.

Il y a donc souvent une vraie difficulté de maîtrise d'ouvrage pour les projets d'ingénierie écologique.

Des éléments de réponse à ces problèmes de gouvernance dans le domaine de l'eau pourraient être apportés par la loi de décentralisation en préparation. Son projet prévoit la création d'une compétence obligatoire « prévention des inondations et gestion des milieux aquatiques » qui serait attribuée aux communes. Ces dernières pourraient ensuite déléguer (ou non) cette compétence à des EPCI[34] à fiscalité propre ou indirectement aux EPTB. Les syndicats de rivières ou de bassins versants auraient alors à s'adapter pour devenir des EPCI à fiscalité propre.

Mais, même si la création de cette compétence mettra un terme au vide règlementaire concernant la maîtrise d'ouvrage du grand cycle de l'eau, la question du financement de cette compétence nouvelle se pose. Les réponses pourraient venir de la création de nouvelles taxes telles que la « taxe inondation » ou encore une « taxe gestion des milieux aquatiques » payée par les personnes bénéficiant des services rendus par le milieu aquatique.

---

[33] *C'est le cas par exemple en Haute-Normandie où, en dix ans, plusieurs dizaines de syndicats intercommunaux de bassins versants ou communautés de communes se sont engagés dans ce type de démarches structurantes. Ils ont été motivés par le fond d'intervention des contrats territoriaux (financés par l'agence de l'eau et les conseils généraux) et par d'importants problèmes de ruissellement et d'inondations par coulées de boues touchant d'autres compartiments de la gestion de l'eau (infiltration dans la nappe d'eau potable, envasement des cours d'eau de fond de thalweg et risques de débordements, érosion des sols agricoles, etc.).*

[34] *Un EPCI (établissement public de coopération intercommunale) est une structure administrative regroupant des communes ayant choisi de développer plusieurs compétences en commun comme les transports en commun, l'aménagement du territoire ou la gestion de l'environnement. Les EPCI à fiscalité propre (communautés de communes, communautés d'agglomération, métropoles, etc.) disposent du droit de prélever l'impôt tandis que les ressources des EPCI sans fiscalité propre (syndicat de rivière, de bassin, syndicat mixte, EPTB, etc.) proviennent essentiellement des cotisations versées par les communes membres.*

3 Un manque d'information et de sensibilisation aux enjeux

La faible sensibilisation et le manque d'information aux enjeux et aux principes de l'ingénierie écologique semble également constituer un frein à l'émergence des projets. Ce déficit de sensibilisation et d'information concerne aussi bien les citoyens que les maîtres d'ouvrage qui les représentent.

Les objectifs de la restauration écologique des milieux aquatiques sont souvent mal perçus par les citoyens qui ont une vision beaucoup plus « environnementaliste » que réellement « écologique » Les riverains, surtout en zone urbaine, souhaitent avant tout être protégés des excès de la rivière (crues, inondations) ou bénéficier d'un milieu aménagé pour leurs besoins (promenade, paysage, loisirs nautiques, etc.). Redonner un caractère plus naturel à la rivière ou à la zone humide est ainsi souvent perçu comme une priorité subalterne, quand ce n'est pas comme une gêne (retour des « mauvaises » herbes, des moustiques, des serpents, des mauvaises odeurs, etc.).

Le maître d'ouvrage, même s'il est lui-même convaincu, a ainsi souvent du mal à présenter son projet avec les arguments suffisants pour que ses atouts et sa logique, soient compris, puis acceptés.

De plus, la science et les retours d'expérience ont beaucoup apporté ces dernières années à l'ingénierie écologique. Ces progrès ont conduit à faire évoluer les recommandations en matière de préservation, de restauration ou de gestion des milieux aquatiques. Ainsi, aujourd'hui, une certaine incohérence peut être perçue entre le discours qui préconisait il y a encore à peine dix ans de contenir la rivière et celui, actuel, qui encourage un retour à la liberté du cours d'eau. Cette incohérence apparente est une difficulté supplémentaire à gérer pour les élus maîtres d'ouvrage. Mal à l'aise vis-à-vis de ces changements rapides, ils peuvent être réticents à entreprendre des actions qui iraient à l'encontre de celles qu'ils ont parfois eux-mêmes réalisées dans un passé pas si lointain.

Les freins associés à ce manque d'information et de sensibilisation peuvent être en partie levés par la preuve par l'exemple. Des retours d'expérience réussis, illustrant le fait qu'un milieu aquatique en bon état peut également être un milieu aquatique agréable à vivre et à côtoyer et rendant des services à ses riverains, constituent ainsi des atouts puissants. Le cas de la restauration de la Fontenelle (voir la fiche de cas correspondante), engagé en 2003, illustre la difficulté, à l'époque, de trouver des retours d'expériences réussis pour aider les élus à s'approprier le projet. Depuis, le maître d'ouvrage a lui-même déployé des efforts considérables de communication envers d'autres porteurs de projets, multipliant les visites et les explications qui lui avaient manquées il y dix ans.

Les freins associés à ce manque d'information et de sensibilisation peuvent être en partie levés par la preuve par l'exemple.

4 Un manque de formation des maîtres d'ouvrage et de leurs conseillers conduisant à une mauvaise formulation des cahiers des charges

Une difficulté assez voisine de la précédente est que les maîtres d'ouvrage, de même que les techniciens qui les conseillent, ne sont pas toujours très au fait des spécificités des projets d'ingénierie écologique. Ce manque de formation peut entraîner des difficultés à élaborer des cahiers des charges d'étude précis ou pertinents. Certains cahiers des charges peuvent ainsi parfois, soit représenter une véritable barrière à l'entrée des entreprises de génie écologique dans les marchés publics, soit, à l'inverse, permettre à toute entreprise, même sans compétence spécifique en génie écologique, de répondre et d'être sélectionnée.

On notera que la norme AFNOR NF X10-900[35] « Génie écologique - Méthodologie de conduite de projet appliqué à la préservation et au développement des habitats naturels - Zones humides et cours d'eau », qui a été homologuée à l'automne 2012, est censée apporter une première réponse à ce problème d'élaboration de cahiers des charges. Un premier retour sur son application en fin d'année 2013 permettra, si besoin, de l'adapter.

[35] *Cette norme AFNOR est un document, publié en octobre 2012, ayant pour objectif principal de normaliser les bonnes pratiques à adopter en matière de méthodologie/gouvernance lors d'une opération de génie écologique appliquée aux zones humides et cours d'eau.*

5 Un fonctionnement de la commande publique qui freine l'innovation

Un autre frein identifié, à la limite du non-dit, concerne directement le fonctionnement des marchés publics.

La rémunération des missions d'Aide à la Maîtrise d'Ouvrage (AMO) est proportionnelle au montant des travaux. Or les méthodes d'aménagement de milieux naturels sont souvent moins coûteuses que celles plus classiques. Les travaux étant moins coûteux, la rémunération de la mission d'aide à la maîtrise d'ouvrage est également moins forte, alors même que le besoin d'étude et de suivi est beaucoup plus important.

Ce mode de fonctionnement risque donc de conduire à privilégier des solutions techniques coûteuses en termes de travaux mais simples en termes d'études au détriment des solutions coûteuses en termes d'études mais beaucoup plus économiques en termes de réalisation.

Le développement d'une aide à la maîtrise d'ouvrage publique au moment des études préalables ou de l'élaboration du cahier des charges, bénéficiant d'un financement spécifique, éventuellement subventionnée par les agences de l'eau, les régions ou les départements pourrait permettre de lever assez facilement cet obstacle. Des cellules d'animation en milieu rural, soutenues par les agences de l'eau, ont déjà joué ce rôle par le passé.

6 La difficulté à maîtriser le foncier

Un autre frein concerne la difficulté d'acquisition (ou de maîtrise) du foncier dans le but d'entreprendre des travaux de restauration d'un milieu aquatique.

En France, la plupart des cours d'eau sont non domaniaux et leur fond, comme leurs berges, appartiennent aux propriétaires des terrains riverains. On estime ainsi que 90% du linéaire des cours d'eau se trouvent sur des propriétés privés.

La collectivité désireuse de réaliser des travaux pour la gestion d'un cours d'eau doit donc, dans la plupart des cas, acquérir des terrains, ou, a minima, s'en assurer la maîtrise en contractualisant avec les riverains. Cela n'est pas anodin, ni en termes de procédures, ni en termes financiers, ni en termes relationnels, ni en termes de tissu socio-professionnel en milieu rural, ni, enfin, en termes d'usages à long terme.

Le développement d'une aide à la maîtrise d'ouvrage publique au moment des études préalables ou de l'élaboration du cahier des charges, bénéficiant d'un financement spécifique, éventuellement subventionnée par les agences de l'eau, les régions ou les départements pourrait permettre de lever assez facilement cet obstacle.

La procédure la plus simple est l'acquisition amiable. Dans le cas des territoires agricoles, cette acquisition amiable est parfois difficile à mettre en place. Les choses se passent souvent bien lorsque les terres sont difficiles à exploiter (zone humide par exemple). En revanche, lorsque les terrains se trouvent sur des territoires agricoles productifs, et par nature bien irrigués, les négociations sont souvent plus longues. Les procédures d'expropriation pour cause d'utilité publique sont bien sûr possibles, mais elles demandent une forte volonté politique et ne doivent rester qu'un dernier recours.

L'acquisition du foncier semble donc être un frein de taille à l'émergence d'un projet d'ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques.

On peut cependant noter qu'il existe d'autres moyens d'entreprendre la restauration/gestion d'un milieu aquatique sans passer par l'acquisition foncière du terrain. Le maître d'ouvrage peut par exemple négocier une convention de gestion avec les propriétaires. Le développement de ces procédures pourrait constituer une piste de progrès importante pour lever ce frein.

Ceci nécessite de diminuer les difficultés juridiques à leur mise en œuvre, de mieux informer les maîtres d'ouvrage sur les opportunités que ces procédures offrent et de sensibiliser les riverains sur les intérêts qu'elles présentent pour eux, en les déchargeant par exemple des obligations d'entretien qui leur incombent et des responsabilités associées en cas de dysfonctionnement (CETE Méditerranée, 2013).

7 La difficulté à bien définir les objectifs du projet

Le fait que les projets aient du mal à émerger est également souvent dû à une mauvaise définition des objectifs.

La plupart des élus entreprennent des actions sur les milieux aquatiques suite à des problèmes qui ont directement impacté la population locale (inondations, pollutions impliquant par exemple des mortalités piscicoles ou des interdictions de baignade, etc.).

Ils sont souvent amenés, soit par convictions environnementales personnelles, soit pour répondre à une demande réglementaire (DCE), soit pour obtenir des subventions, à élargir leurs objectifs et à viser « le retour au bon état écologique ». Cependant, formulé ainsi, cet objectif est souvent trop vague et les résultats attendus peu visibles et peu motivants, aussi bien pour l'élu que pour les citoyens.

Pour lever ce frein, il paraît possible de cibler les objectifs et les détailler en sous objectifs. Durant le congrès de l'ASTEE 2013, à Nantes, les élus engagés ont en effet mis en évidence l'importance d'objectifs clairs et détaillés qui sont, selon eux, indispensables à l'émergence de projets.

Il semble en particulier nécessaire que toute action d'ingénierie écologique se traduise concrètement sur le terrain par une amélioration visible et compréhensible par les citoyens.

L'apport de retours d'expérience réussis et bien documentés peux aider les Maîtres d'ouvrage à mieux définir leurs objectifs.

Par exemple, réduire de 50% la concentration en nitrates dans l'eau de la rivière par la création de zones tampons visant à limiter les pollutions diffuses d'origine agricole ne présente aucun intérêt pour les riverains, si cette diminution ne se traduit pas par une amélioration de la qualité visuelle de la rivière (moins d'algues par exemple) ou par une amélioration de la qualité piscicole. Associer des objectifs concrets et mesurables à une action d'ingénierie écologique est donc nécessaire, mais aussi risqué et difficile car en matière d'écologie les relations de causalité sont rarement évidentes.

On peut alors se demander si, à l'opposé, se donner des objectifs prédéfinis et concrets n'apporte pas plus de contraintes que de bénéfices et n'est pas également susceptible de démotiver des élus à prendre le risque de se lancer dans de tels projets sans garantie de réussite.

En tout état de cause la difficulté à associer des objectifs précis et concrets à toute action d'ingénierie écologique constitue bien un frein réel et une réflexion approfondie sur cette question est indispensable pour réussir le projet. L'apport de retours d'expérience réussis et bien documentés peux aider les maîtres d'ouvrage à mieux définir leurs objectifs, même s'il est parfois difficile de transposer les situations d'un site à un autre.

un très gros effort de formation initiale, mais également de formation continue, doit être fait pour décloisonner les métiers et les compétences.

8 Une ingénierie en cours d'émergence avec des incertitudes sur l'efficacité réelle des actions

Beaucoup d'élus ont peur de recourir à l'ingénierie écologique qui leur apparaît comme un art plus que comme une approche technique rationnelle dont les résultats seraient réellement prévisibles.

Ceci n'est cependant pas toujours vrai. Lorsque l'on parle par exemple de restauration physique des milieux aquatiques (reconstitution de méandres, remise du cours d'eau dans son lit d'origine, suppression des protections de berge, remise à ciel ouvert d'un cours d'eau, etc.), les techniques d'ingénierie écologique sont utilisées et maîtrisées depuis longtemps et de nombreux retours d'expérience existent sur le sujet.

En revanche, dans d'autres domaines d'application, tels que les zones de rejet végétalisées ou les zones tampons, les retours d'expériences sont moins nombreux et pas encore assez valorisés. Dans certains cas, les projets reposent sur des approches innovantes et les résultats ne sont ni certains, ni facilement reproductibles. On pourra prendre l'exemple de la restauration des roselières aquatiques du lac d'Annecy, qui est un projet basé sur 3 sites pilotes dont les retours d'expérience mèneront, ou non, le SILA (Syndicat Mixte du Lac d'Annecy) à envisager d'autres tranches de travaux.

Pour se donner les meilleures chances de succès, toute opération d'ingénierie écologique devrait donc prendre en compte un certain nombre d'obligations :

- **Obligation d'intelligence :** des études sérieuses et pluridisciplinaires sont toujours indispensables ;
- **Obligation d'incertitude :** il existe toujours une part de risque sur le résultat final ;
- **Obligation de suivi :** pour répondre à la difficulté précédente, un suivi est indispensable de façon à adapter l'aménagement en fonction de la réponse du milieu.

De nombreux outils peuvent être mis en œuvre pour lever ce frein :

- développer le conseil aux maîtres d'ouvrage, pour les informer objectivement sur la pertinence des projets et sur les incertitudes associées ;
- développer les compétences des opérateurs techniques et en particulier des bureaux d'études ;
- développer les retours d'expérience ;
- favoriser parfois les projets innovants en leur associant un suivi scientifique sérieux pour accroître les connaissances et limiter les risques d'échec ;
- etc.

9 Un manque de valorisation auprès des professionnels de l'aménagement urbain

Pour beaucoup de professionnels de l'aménagement urbain, formés aux outils du Génie Civil, les techniques d'ingénierie écologique sont considérées comme des sous-techniques. De plus, elles posent souvent des problèmes de compétence.

Il s'agit là d'un vrai frein, pas toujours exprimé, mais qui nuit indéniablement à l'image et au développement de l'ingénierie écologique.

Une autre difficulté proche concerne la conception et la réalisation des ouvrages : plus habitués à des ouvrages « en dur », les bureaux d'études comme les entreprises de travaux ont du mal à adapter leurs approches à des solutions plus douces, plus respectueuses de la nature et surtout mobilisant des compétences beaucoup plus diversifiées.

Enfin l'entretien des ouvrages pose également souvent problème. Par exemple, l'entretien des techniques alternatives en assainissement pluvial doit généralement être assuré par d'autres services que le service assainissement (services des voiries, du nettoiement ou des espaces verts).

Globalement un très gros effort de formation initiale, mais également de formation continue, doit être fait pour décloisonner les métiers et les compétences.

10 Des solutions perçues comme plus difficiles à mettre en œuvre et plus couteuses en étude et en entretien

L'ingénierie écologique impose toujours un coût d'étude supérieur à celui d'un projet traditionnel. Ceci est d'autant plus négatif que les études sont souvent perçues par les maîtres d'ouvrage comme une perte de temps et d'argent.

De plus, le coût d'acquisition ou de maîtrise du foncier peut également contribuer à renchérir les solutions issues de l'ingénierie écologique. Enfin la nécessité du suivi sur la durée des opérations et l'obligation de modifier les organisations en charge de l'entretien et de l'exploitation sont susceptibles de renchérir les frais d'entretien et de fonctionnement.

Cet argument économique peut cependant être inversé. En effet le coût des travaux nécessités par un projet d'ingénierie écologique est très souvent plus faible que celui d'un aménagement traditionnel. A titre d'exemple, la création de noues pour la gestion des eaux pluviales en milieu urbain peut être trois à quatre fois moins chère que la mise en place d'un système d'assainissement classique par tuyaux. De même, installer une zone de rejet végétalisée en sortie de station d'épuration peut coûter moins cher que la pose d'une canalisation de rejet reliant la station au milieu récepteur.

Le coût de l'entretien n'est pas non plus toujours plus élevé. Par exemple, pour la restauration de la zone humide de Lucy (qui fait l'objet d'une fiche dans cet ouvrage), le bureau d'étude en charge du projet a fait une étude comparative des potentiels futurs coûts d'entretien pour le projet « étang » et pour le projet « restauration de la zone humide ». Sur 10 ans, le coût d'entretien a été calculé à 21 000 € pour l'étang et à 9 000 € pour la zone humide. Dans ce cas particulier, le coût d'entretien a donc été au contraire un argument en faveur de l'ingénierie écologique.

Enfin, l'approche préventive, au cœur des approches d'ingénierie écologique, permet également souvent d'épargner des dépenses ultérieures. Une référence intéressante à consulter est le document rédigé par l'agence de l'eau Seine-Normandie : « Le préventif coûte-t-il plus cher que le curatif ? Argumentaire économique en faveur de la protection des captages ». Pour les 21 cas présentés dans ce document, l'analyse économique montre l'intérêt de recourir à l'ingénierie écologique au plus près des sources de pollution plutôt que de ne rien faire et ainsi laisser la qualité des eaux se détériorer, ce qui engendrerait in fine la création de nouvelles usines de dépollution pour la production d'eau potable.

De tels documents utilisables dans d'autres domaines que celui de la protection des captages pourraient jouer un rôle efficace pour lever les craintes sur ce volet économique.

2

LES LEVIERS POUR DÉVELOPPER L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE

Heureusement il existe également un certain nombre de leviers qui depuis quelques années incitent les maîtres d'ouvrage à faire appel à l'ingénierie écologique et qui peuvent se développer dans les années à venir.

1 L'existence de soutiens techniques et financiers dans le domaine des milieux aquatiques

Nous avons vu que la difficulté de l'autofinancement des maîtres d'ouvrages publics constituait un frein sérieux au développement des projets d'ingénierie écologique. De façon évidente, la possibilité de pallier cette difficulté par des subventions devient alors un levier indispensable.

Dans le domaine de la gestion des milieux aquatiques, le soutien financier principal qui peut inciter les maîtres d'ouvrage publics à avoir recours à l'ingénierie écologique est constitué par les agences de l'eau. Leur rôle est en effet double :

- d'une part elles aident à la réalisation des projets d'amélioration des milieux aquatiques en contribuant de façon importante à leur financement ;
- d'autre part elles contribuent souvent à reformuler ou à compléter les objectifs des maîtres d'ouvrages publiques, ce qui les incite souvent à avoir recours à l'ingénierie écologique.

En effet, les modalités d'aide au financement d'un projet ne sont pas les mêmes selon l'ambition de réalisation. Si le projet inclut un volet biodiversité ou s'il répond aux objectifs de la DCE, le financement des agences de l'eau sera plus élevé. De manière générale, le financement peut ainsi aller jusqu'à 80% pour les projets de restauration des milieux aquatiques. Dans certains cas, le financement des projets peut atteindre 100%. C'est par exemple le cas des projets qui sont inclus dans les PTAP[36] (Plans d'Actions Territoriaux Prioritaires) de l'agence de l'eau Seine-Normandie et de certains projets de restauration de la continuité écologique ou d'hydro-morphologie.

Le fait que les agences de l'eau dirigent préférentiellement leurs subventions vers des méthodes d'aménagement de milieux naturels fondées sur de l'ingénierie écologique joue donc un rôle indirect puissant dans les objectifs et les méthodes de réalisation du projet. Par exemple, l'agence de l'eau Rhin-Meuse (AERM) cherche

le financement peut ainsi aller jusqu'à 80% pour les projets de restauration des milieux aquatiques.

[36] *Les Plans d'Actions Territoriaux Prioritaires (PTAP) sont des documents qui permettent de prioriser les actions à réaliser en premier lieu pour l'atteinte des objectifs de bon état des eaux et mettre en place des politiques territoriales qui mobilisent les moyens prioritaires pour les objectifs de résultat de la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE). Dans le 10e programme, ces PTAP sont renforcés.*

Source : Agence de l'Eau Seine-Normandie

à développer l'utilisation des zones de rejet végétalisées en sortie de station d'épuration en imposant des conditions de financement bien définies.
Outre le soutien financier qui peut orienter les choix de réalisation vers des méthodes d'aménagement de milieux naturels, les agences de l'eau apportent également un soutien technique aux collectivités par le biais de cellules d'animation (généralement en partenariat avec d'autres acteurs tel que le conseil général). Ces cellules d'animation ont pour principale mission de sensibiliser les maîtres d'ouvrage aux problématiques locales liées à l'eau et les assister pour faire émerger des projets techniquement et financièrement rigoureux. Ce soutien technique aide également à surmonter certains des freins identifiés (défaut de gouvernance, manque de formation ou d'information, difficulté à définir les objectifs, etc.).
Les aides au financement peuvent également provenir d'autres structures.
La plupart des départements semblent être notamment impliqués dans l'émergence et la réussite de projets liés aux milieux aquatiques (assistance technique, méthodologique et financière) via des cellules d'animation dans les domaines suivants :

- les SATESE (Service d'assistance technique aux exploitants de station d'épuration) ;
- les CATER (Cellule d'Animation Technique pour l'Eau et les Rivières) : entretien des cours d'eau (enlèvement d'embâcles, gestion raisonnée de la ripisylve afin de réduire la vitesse du courant et ralentir l'érosion des berges en amont des enjeux...) ;
- la lutte contre le ruissellement à la parcelle en milieu urbain ou en milieu rural.

Les conseils régionaux peuvent eux aussi apporter un soutien financier aux projets d'investissements dans le domaine de l'eau. La région Bretagne dispose par exemple d'un budget de 4 millions d'euros en 2013, dédié à ces thématiques, avec des taux de subvention allant de 10 à 30%. La Région Rhône-Alpes a une politique active de soutien aux contrats de rivière.
L'Europe intervient également dans plusieurs projets, principalement en utilisant les FEDER (Fonds Européen de Développement Régional).
D'autres outils peuvent également être mobilisés : CPER (Contrats de Projets Etat-Région), mesures d'accompagnement ou de compensations environnementales, etc.

2 L'engagement et le volontarisme de certains acteurs

L'engagement et la connaissance des enjeux de la part d'un ou de quelques acteurs motivés apparaît comme un levier primordial pour la mise en place de projets d'ingénierie écologique.
L'analyse des projets réussis montre qu'ils reposent souvent sur l'existence d'un binôme technicien-élu.
Sur les thématiques de la restauration de la continuité écologique et de l'hydro-morphologie des cours d'eau, la présence d'un technicien de rivière engagé, qui est dans la plupart des cas le porteur du projet, semble même presque indispensable à l'émergence de ce dernier. C'est en effet lui qui va porter le projet du début à la fin et jouer un rôle déterminant dans sa promotion et son acceptation par les élus et les riverains des collectivités concernées.

Le développement de l'information des élus, des citoyens et des techniciens semblent un levier à activer pour promouvoir le développement de l'ingénierie écologique.

L'engagement politique de l'élu du syndicat ou de la collectivité est également fondamental pour l'émergence d'un projet. Cet engagement politique peut être porté par une sensibilité environnementale de l'élu. Cependant, dans la plupart des cas, la volonté des élus semble plutôt venir d'une bonne compréhension de la plus-value que l'ingénierie écologique peut apporter à la collectivité et à l'image de son représentant.
Les projets peuvent également parfois émerger d'une demande sociétale. Par exemple, le projet de restauration de la zone humide du lac d'Aydat (voir fiche de cas) est né d'un article écrit par des citoyens d'une association environnementale et paru dans la presse locale, ayant pour titre « Le lac d'Aydat : un lac qui meurt » qui a interpellé et fait réagir les élus du territoire.
Le développement de l'information des élus, des citoyens et des techniciens semblent donc un levier à activer pour promouvoir le développement de l'ingénierie écologique.

3 La légitimation de l'action des acteurs

Un autre levier indispensable consiste, pour le maître d'ouvrage, à disposer d'une véritable légitimité à agir. Cette légitimité peut être institutionnelle et provenir d'une compétence administrative conventionnelle pour un élu (par exemple assurer la continuité et la sécurité de l'alimentation en eau potable) ou nouvelle (mettre en œuvre un SAGE). Elle peut également s'appuyer sur un événement marquant (par exemple en réaction à une inondation).

Le cas particulier des EPTB[37] (Etablissement Public Territoriaux de Bassins) est intéressant dans ce domaine. Ils participent à l'émergence des projets et à l'appui des maîtres d'ouvrage dans les projets de restauration des milieux aquatiques et humides. Ces structures effectuent un travail de communication et de sensibilisation afin de convaincre les élus des intérêts de l'ingénierie écologique comme moyen d'action sur les cours d'eau (que ce soit pour répondre à un problème de pollution ou encore pour gérer la prévention d'inondation par exemple). A l'instar des cellules d'animation internes aux collectivités locales et financées par les agences de l'eau et les collectivités territoriales (évoquées ci-dessus), les EPTB, quand ils existent, viennent également en appui aux techniciens de rivières pour l'élaboration des cahiers des charges, d'appels d'offres, aussi bien pour la réalisation d'études que de travaux, de retours d'expérience.

Cependant, même si la structure porteuse possède des compétences administratives et techniques, elle dispose rarement à la fois d'une reconnaissance territoriale, par exemple d'un ancrage politique local et d'une reconnaissance sectorielle (légitimité auprès du monde agricole, des acteurs fonciers, etc.).

Le développement de ce levier nécessite donc de créer des réseaux de partenariats constructifs avec le gens des filières impliquées dans le projet et compétents en la matière.

4 La volonté d'améliorer le cadre de vie

La demande de nature constitue aujourd'hui un élément déterminant des choix de cadre de vie pour un très grand nombre de français. Même s'il y a souvent confusion entre « nature » et « jardin », ce levier peut cependant être activé de façon efficace pour promouvoir l'ingénierie écologique, particulièrement en zone urbaine ou péri-urbaine.

Sa mobilisation suppose cependant de bien clarifier les objectifs du projet et d'établir un juste équilibre entre les objectifs visant à développer les usages, les paysages ou les aménités urbaines et les objectifs visant à restituer un fonctionnement « naturel » au milieu aquatique.

Le projet de « La porte des Alpes » porté par le Grand Lyon (voir fiche de cas) a par exemple été fortement motivé par la volonté de développer une image « écologique » et de créer un cadre de vie agréable dans cette zone d'activité.

Le système innovant et durable de gestion des eaux pluviales a servi de « vitrine » et a permis de convaincre les aménageurs, maîtres d'ouvrage dans le domaine de l'urbanisme, de la plus-value que ces techniques alternatives apportent en termes d'amélioration du cadre de vie.

Les aménageurs, en lien avec les bureaux d'études, les architectes urbanistes, les paysagistes et autres acteurs de l'urbanisme, vont décider du type d'aménagement et surtout des techniques qui seront mises en place pour l'élaboration d'un projet d'urbanisme.

L'un des critères qui orientera la décision des aménageurs est le critère financier. La valorisation des eaux pluviales en ville par des techniques alternatives, dont des techniques d'ingénierie écologique, peut par exemple s'avérer être un réel avantage commercial pour les aménageurs.

---

[37] *Les EPTB (Etablissements Publics Territoriaux de Bassin) ont pour rôle d'apporter à l'action des collectivités une cohérence de bassin, en assumant un rôle général de coordination, d'animation, d'information et de conseil dans ses domaines et sur son périmètre de compétence. Ils sont les seuls à pouvoir assurer la maîtrise d'ouvrage d'actions interdépartementales et interrégionales.*

L'ingénierie écologique est aujourd'hui mature et constitue un corpus bien établi. Ce n'est pas une aventure farfelue, mais au contraire une façon sage, prudente, économe et efficace d'agir : à l'évidence un choix "sans regret" (il n'a que des avantages, quel que soit le point de vue dont on se place). Cette pratique est prête à la généralisation mais cela n'est pas assuré. L'analyse des freins et leviers ci-dessus montre en effet qu'elle peut, malgré sa pertinence, rester encore longtemps cantonnée à des opérations pilotes. Le changement généralisé des pratiques nécessite des efforts qu'il ne faut pas sous-estimer, mais ces efforts sont à notre portée, c'est une question de volonté. Au-delà des dispositions techniques, c'est le choix d'une voie qui n'a de sens que si elle est partagée : envisager la nature comme un partenaire et non plus comme un adversaire.

Chapitre 4

Exemples de projets faisant appel à l'ingénierie écologique

Ce chapitre regroupe 36 retours d'expérience présentés sous la forme de fiches qui illustrent les éléments développés au sein des chapitres 1 et 2.

1 PROTECTION DE LA QUALITÉ PHYSICO-CHIMIQUE DE L'EAU ET PROTECTION DE LA RESSOURCE 144

2 GESTION/TRAITEMENT DES POLLUTIONS PONCTUELLES 171

3 PRÉVENTION DES RISQUES D'INONDATIONS 206

4 DYNAMIQUE DES COURS D'EAU 238

5 VALORISATION DES EAUX PLUVIALES URBAINES 262

6 AMÉLIORATION DU CADRE DE VIE ET DÉVELOPPEMENT DES USAGES LIÉS À L'EAU 292

7 PROTECTION/RESTAURATION DES MILIEUX (HABITATS) ET DÉVELOPPEMENT DE LA BIODIVERSITÉ 316

1

PROTECTION DE LA QUALITÉ PHYSICO-CHIMIQUE DE L'EAU ET PROTECTION DE LA RESSOURCE

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

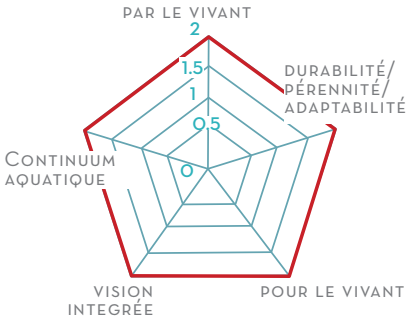


FIGURE 46

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN : LOIRE-BRETAGNE
RÉGION : AUVERGNE
DÉPARTEMENT : PUY-DE-DÔME
COMMUNE : AYDAT

FICHE 1

Réhabilitation d'une zone humide pour lutter contre l'eutrophisation d'un lac : cas du lac d'Aydat (63)

SYNTHÈSE DU PROJET :

L'objectif du projet est de lutter contre l'eutrophisation du lac d'Aydat en réhabilitant une zone humide anciennement comblée par l'Homme. Cette zone humide constitue un filtre naturel biologique (résorption des éléments nutritifs et décantation des matières en suspension) épurant le phosphore avant l'arrivée des eaux de la Veyre dans le lac. Un entretien régulier et la mise en place d'un suivi permettent d'assurer la pérennité du milieu. Cet aménagement a été réalisé dans le cadre du contrat de rivière « Vallée de la Veyre – Lac d'Aydat », arrivé à terme en 2010, il est aujourd'hui remplacé par le contrat territorial « Vallée de la Veyre ».
Le projet intègre par ailleurs une fonction écologique (zone de reproduction pour les poissons, les batraciens, les oiseau, etc.) et une fonction pédagogique (réalisation d'aménagements permettant la découverte du site par le public, sensibilisation du grand public aux différents rôles d'une zone humide).

Le lac d'Aydat, d'une superficie de 60 ha, est le plus grand lac naturel d'Auvergne. Il est situé à 837 m d'altitude dans la partie amont du bassin de la Veyre et a été formé par le barrage de la Veyre par une coulée volcanique. Le contrat de rivière « Vallée de la Veyre – Lac d'Aydat » recoupe 15 communes pour une population estimée à 18 000 habitants. Le lac appartient à la Fondation Jean Moulin ayant son siège au Ministère de l'Intérieur. De nombreux usages récréatifs et touristiques ont lieu sur le lac : pêche, baignade, randonnée, nautisme.

Le projet a été primé aux trophées de l'eau de l'agence Loire-Bretagne en 2013.

1. LE FONCIER À L'ORIGINE DU COMBLEMENT DE LA ZONE HUMIDE

Une zone humide était autrefois présente à l'entrée du lac d'Aydat. Elle filtrait naturellement les eaux de la rivière (la Veyre) qui alimentent le lac. Suite à l'arrêt du pâturage sur la zone, le milieu a repris son évolution naturelle et une saulaie s'était progressivement formée sur le site. Dans les années 1970, la commune d'Aydat avait décidé de combler la zone humide sur une épaisseur d'1 m pour y réaliser des aménagements urbains (un terrain de football, un parking, une aire de jeux et un point de collecte de déchets).

Le lac d'Aydat (années 1910, à partir de 2012)

ANNEES 1910

CARTE POSTALE ANCIENNE © EDITION LL

À PARTIR DE 2012

© SMVVA – AURÉLIEN MATHEVON

FIGURE 47

2. UN CONTRAT DE RIVIÈRE PORTÉ PAR UN SYNDICAT COMME LEVIER D'ACTIONS

Suite à l'observation d'une augmentation du phénomène d'eutrophisation du lac en période estivale (problématique notamment durant la période de forte affluence : juin à septembre) mettant en péril les activités récréatives et touristiques, le Syndicat Mixte en charge des Vallées de la Veyre et de l'Auzon (SMVVA) a décidé de procéder à la restauration de la zone humide à partir de 2005, action inscrite dans le document du contrat de rivière.

Ce contrat comprend trois volets :

- Volet A : mise en place d'actions (assainissement et agricoles) visant à diminuer les apports en éléments nutritifs sur le bassin versant amont du lac (30 km^2) et de façon générale, sur l'intégralité du bassin versant de la Veyre ;
- Volet B : réalisation d'actions de restauration et d'entretien des milieux aquatiques, de prévention contre les inondations ainsi que de lutte contre l'eutrophisation accélérée du lac d'Aydat ;
- Volet C : sensibilisation et communication auprès du public et des écoles ainsi que la coordination, l'animation et le suivi des actions.

Un comité de pilotage a été créé afin de suivre le bon déroulement du projet concernant la zone humide intégré au volet B. Pour faire avancer la démarche, des réunions de pilotage se sont tenues en présence des différents partenaires, financiers, administratifs et associatifs.

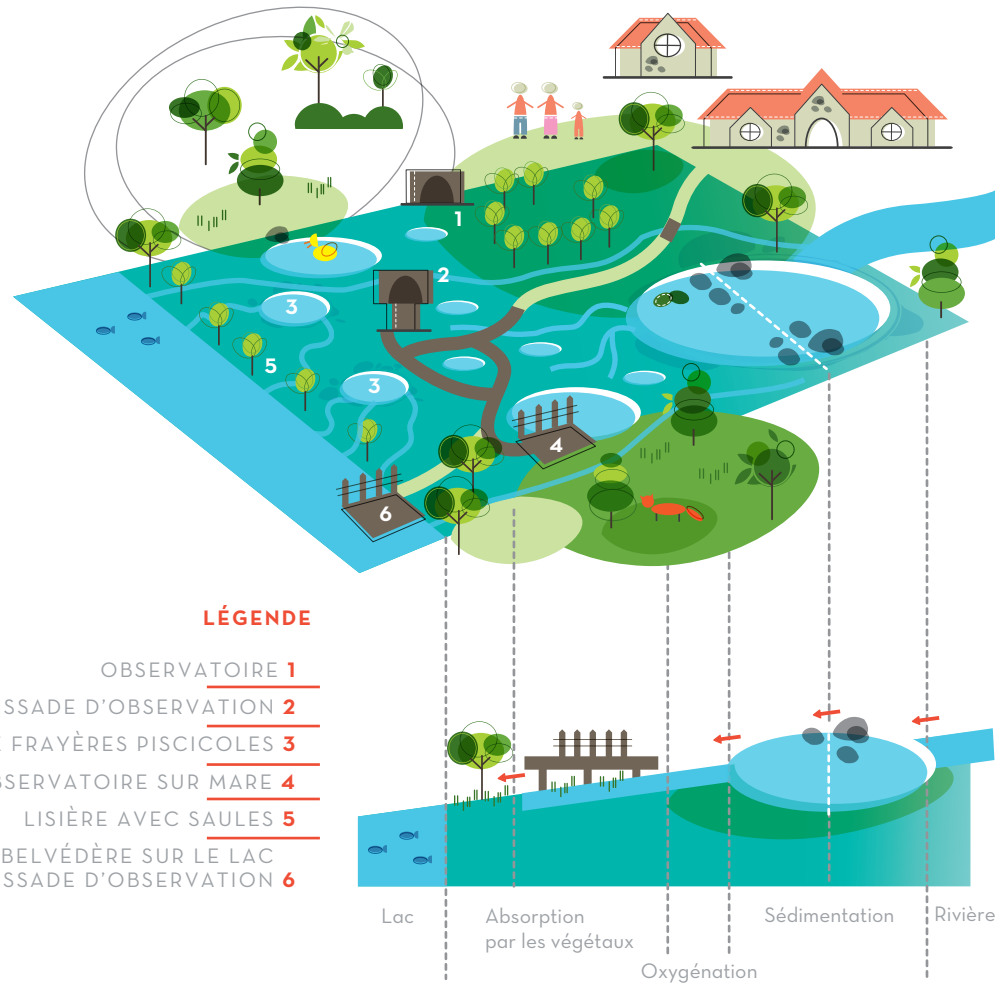
Les terrains de la zone humide du lac d'Aydat ont été mis à la disposition du Syndicat Mixte en charge des Vallées de la Veyre et de l'Auzon dans le cadre de leur compétence "gestion des milieux aquatiques".
La zone humide à réaménager se situe en grande partie sur des terrains aménagés en espace de loisirs (terrain de football, parking, jeux pour enfants) appartenant à la communauté de communes et à la commune.
Pour acquérir des parcelles privées constituées d'anciens bassins de pisciculture étant destinés, dans le projet, à l'aménagement de bassins de sédimentation, le SMVVA a dû engager une procédure de Déclaration d'Utilité Publique.

3. UNE ZONE HUMIDE DIVERSIFIÉE PLUTÔT QU'UNE ROSELIÈRE MONOSPÉCIFIQUE

Le projet prévoyait initialement la mise en place d'une roselière avec pour seul objectif l'amélioration de la qualité de l'eau du lac. Afin d'intégrer un volet biodiversité au projet, l'idée de la roselière a finalement été abandonnée au profit d'une zone humide implantée de milieux diversifiés. Celle-ci s'étend sur une superficie d'environ 2,5ha et est structurée de la façon suivante :

- deux lagunes de sédimentation (4 900 m^2) ;
- une zone humide semi-naturelle (16 000 m^2) ;
- une zone humide libre en berge du lac.

Représentation de la zone humide



LÉGENDE

OBSERVATOIRE **1**
PALISSADE D'OBSERVATION **2**
ZONES DE FRAYÈRES PISCICOLES **3**
OBSERVATOIRE SUR MARE **4**
LISIÈRE AVEC SAULES **5**
BELVÉDÈRE SUR LE LAC AVEC PALISSADE D'OBSERVATION **6**

FIGURE 48

Les lagunes de sédimentation servent à piéger les matières solides chargées en nutriments. L'eau de Veyre alimente ensuite la zone humide semi-naturelle. Cette zone est composée de 9 mares qui constituent des lieux de reproduction et d'attraction pour la faune. Des zones de frayères piscicoles, visant principalement l'espèce "brochet", ont également été connectées au Lac.

Une vanne a été positionnée à l'entrée de la première lagune. Cette vanne d'1,80 m de large, ouverte sur 40 cm de haut laisse passer un débit maximal de 1 m^3/s. Lors d'une crue décennale (5 m^3/s), un bras de décharge situé le long des bassins se met automatiquement en eau et achemine les eaux de la Veyre sur la zone humide sans passer par les bassins de sédimentation.

Schéma de principe de la zone humide du lac d'Aydat

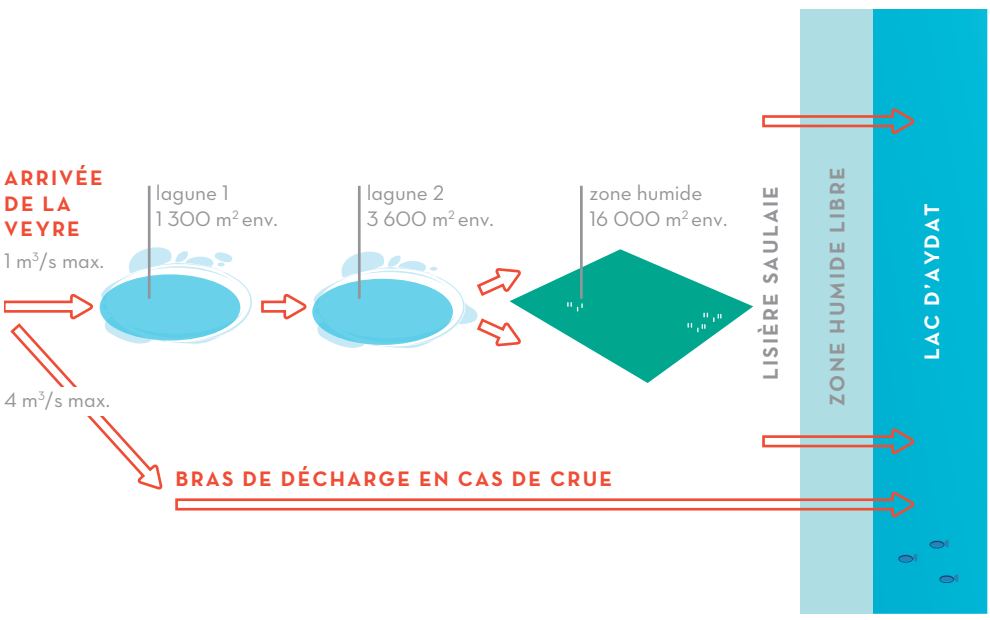


FIGURE 49 — SINBIO

Les travaux ont commencé en septembre 2011 et se sont terminés en juin 2012. Ils ont majoritairement consisté en du terrassement (déblais principalement) à l'entrée du lac d'Aydat pour retrouver et remettre en fonctionnement la zone humide présente auparavant.
Un curage régulier est prévu sur les bassins de sédimentation afin d'évacuer la charge en phosphore piégé dans les sédiments. Les sédiments seront valorisés en épandage agricole ou seront mis en centre de traitement selon leur qualité. Les mesures de suivi en différents points (qualité de l'eau, sédiments, débits, suivi Faune/Flore) seront mis en place à partir de 2013/2014.
Les déblais de la zone humide (16 000m³) ont été valorisés en réhabilitant une ancienne carrière sauvage illégale. La surface remblayée (5 500 m²) a ensuite été végétalisée par ensemencement hydraulique (technique consistant à projeter sur le terrain un mélange d'eau, de semence, d'engrais et d'un liant).

Travaux de terrassement sur la future zone humide

FIGURE 50 — © SMVVA – AURÉLIEN MATHEVON

La zone humide après travaux et avant végétalisation, mai 2012

FIGURE 51 © SMVVA – AURÉLIEN MATHEVON

Un ensemble d'aménagements a été mis en place afin de rendre la zone accessible aux touristes et aux naturalistes. Pour cela, un cheminement de 230 m de pontons en bois parcourt la zone humide et des observatoires de faune sauvage sur mares ou ornithologiques permettent d'observer la faune et la flore installées sur la zone humide.

La zone humide restaurée

FIGURE 52 © SMVVA – AURÉLIEN MATHEVON

L'essence de bois retenue pour ces aménagements est le Mélèze des Alpes non traité chimiquement (pour respecter la qualité des eaux) et naturellement imputrescible.
Par ailleurs, bien que non labellisée «Tourisme et Handicap», cette zone et ses aménagements restent accessibles aux personnes à mobilité réduite.

4. DES ACTIONS COMPLÉMENTAIRES MENÉES À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT

Comme le prévoyait le contrat de rivière, la Veyre a été reméandrée à 3 km en amont du lac redonnant ainsi vie, en recréant un lit adapté, à 500 m de rivière (1 000 m de berges renaturées). D'autres actions ont également été menées à l'échelle du bassin versant afin de diminuer les apports de polluants principalement d'origines agricoles et domestiques. Des travaux d'optimisation de l'assainissement collectif ont donc été entrepris et différents dispositifs permettant d'optimiser les pratiques agricoles (dont des Mesures Agro-Environnementales Territoriales) ont été mises en place afin de réduire les pollutions diffuses dues aux effluents d'élevages bovins. Un technicien agricole avait été embauché à mi-temps en tant qu'opérateur MAEt afin d'engager les contractualisations.
A savoir que 85 exploitations se sont engagées sur les 164 du bassin versant de la Veyre.

GOUVERNANCE

Maître d'ouvrage: Syndicat Mixte des Vallées de la Veyre et de l'Auzon (SMVVA)
Maître d'œuvre: · Bureau d'études mandataire : SINBIO
· Bureau d'études co-traitant : +2Paysage
Réalisation des travaux: Travaux Publics Lyaudet, Société de Travaux de l'Environnement, Dynamique Environnement, SEDE Environnement + sous-traitants multiples
Gestion du chantier : SMVVA + Maîtres d'oeuvre
Gestion du site : SMVVA, Les Cheires Communauté et la commune d'Aydat

COUT

Etude : 131 500 € TTC
Achat des bassins : 83 500 € TTC
Curage des bassins : 90 000 € TTC
Terrassement + plantations : 807 000 € TTC
Aménagements bois (pontons + ouvrages) : 184 000 € TTC
Divers (débroussaillage, administratif, SPS, communication, ...) : 20 000 € TTC
Montant total des études et travaux : 1 316 000 € TTC

FINANCEMENT

Agence de l'eau Loire-Bretagne (49,8 %)
Conseil général du Puy de Dôme (10,4 %)
Conseil régional d'Auvergne (6,3 %)
FEDER en Auvergne (13,5 %)

Projet suivi techniquement par :
Mairie d'Aydat ; Établissement public à caractère industriel et commercial-Office de Tourisme LAVE ; Les Cheires Communauté ; Gergovie Val d'Allier Communauté ; agence de l'eau Loire-Bretagne ; Conseil régional d'Auvergne ; Conseil général du Puy-de-Dôme ; Agence régionale de la Santé du Puy-de-Dôme ; Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement Auvergne ; Direction Départementale des Territoires du Puy-de-Dôme ; Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne ; Schéma d'Aménagement de Gestion des Eaux Allier Aval ; Chambre d'Agriculture du Puy-de-Dôme ; Fédération Départementale de la Pêche et de la Protection des Milieux Aquatiques du Puy-de-Dôme ; Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques - Brigade Départementale et Délégation Interrégionale ; Laboratoire de Biologie des Protistes des Cézeaux ; Les herbiers universitaires de Clermont-Ferrand ; Conservatoire des Espaces Naturels d'Auvergne ; Ligue pour la Protection des Oiseaux d'Auvergne ; Association de pêche du Lac d'Aydat ; Association de pêche du murmure de la Veyre ; Association Aquaveyre.

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

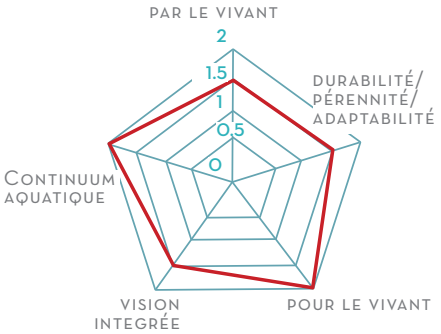


FIGURE 53

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

MONDE

FICHE 2

Prévention de la contamination des ressources en eau en milieu rural et semi-rural : le projet Aquisafe

PRÉSENTATION GLOBALE DU PROJET

Aquisafe est un projet de recherche international initié en 2007 suite à la fermeture d'usines de production d'eau potable en Bretagne en raison des concentrations élevées en nitrates dans le cours d'eau de l'Ic (> 50 mg NO_3^-/L) et à des problèmes de même nature rencontrés aux Etats-Unis. Le groupe Veolia a alors cherché à évaluer la contribution que pourraient apporter les zones tampons artificielles à l'échelle d'un bassin versant, en complément d'actions sur les pratiques agricoles, afin de répondre à la problématique des nitrates et pesticides provenant des champs agricoles.

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DU PRINCIPE DES ZONES TAMPONS

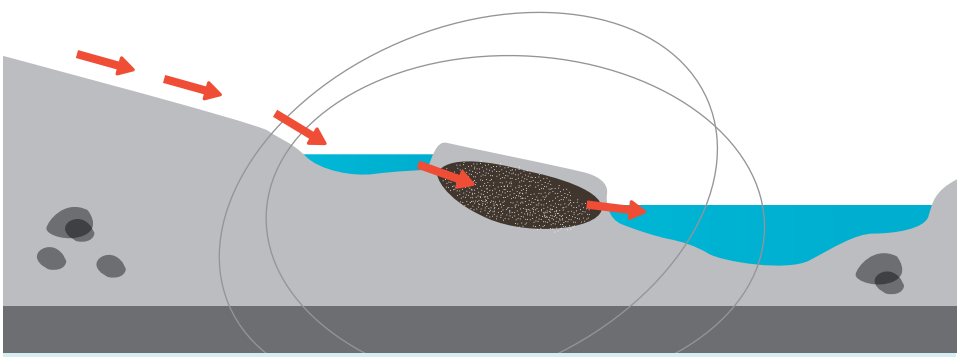


FIGURE 54

Au-delà des enjeux pour la protection des ressources en eau (Directive Eau potable), ces zones peuvent également contribuer à l'amélioration de la qualité des milieux aquatiques (Directives DCE et Nitrates).
Le projet Aquisafe s'est déroulé en 2 phases :

1. Etat de l'art et premiers diagnostics (2007-2009) ;
2. Phase de développement et démonstration en grandeur réelle (2009-2013).

Les résultats attendus sont à la fois qualitatifs (recommandations génériques pour la conception de différents systèmes d'atténuation ; le développement d'une méthode SIG (Système d'information géographique) pour l'identification des zones sources critiques ; amélioration nécessaire des modèles numériques, etc.) et quantitatifs (critères de dimensionnement des zones tampons, outils opérationnels pour choisir localement les positionnements à retenir, évaluation des résultats à attendre par la modélisation, etc.).
Ce projet a en outre l'intérêt de travailler à différentes échelles et de permettre un passage de l'échelle unitaire (un système tampon) à l'échelle globale (bassin versant en entier) en utilisant les outils de modélisation (numérique/SIG) pour définir combien et où les systèmes doivent être implantés pour permettre d'obtenir, *in fine*, la qualité requise à la prise d'eau.

DÉTAIL DE LA PHASE « ÉTAT DE L'ART ET PREMIERS DIAGNOSTICS (2007-2009) »

L'état de l'art mené dans le cadre du projet Aquisafe a permis de répondre à 4 principales questions :

- quels sont les contaminants d'origine agricole affectant la qualité de la ressource en eau ?
- quels sont les mécanismes de transfert vers les eaux de surface ?
- quelles solutions peuvent contribuer à la réduction du transport des contaminants vers les eaux de surface ?
- comment diagnostiquer l'origine de la pollution et évaluer les mesures appropriées à apporter, à l'échelle d'un bassin versant ?

Pour répondre à ces questions, le groupe Veolia s'est appuyé sur les retours d'expériences de ses propres sites et sur la littérature scientifique.

Modélisation du bassin versant

Pour diagnostiquer l'origine de la pollution et évaluer les mesures appropriées à apporter, 31 modèles hydrologiques et biogéochimiques simulant le devenir des substances sur un bassin versant (permettant notamment de tester l'évaluation de mesures préventives) ont été comparés. Au final, c'est le modèle SWAT (Soil & Water Assessment Tool) qui a été sélectionné. Ce modèle a ensuite été adapté dans la phase suivante du projet pour pouvoir prévoir l'impact, à l'échelle du bassin versant, de la mise en place de zones tampons sur les concentrations de nitrates dans les rivières réceptrices. Il permet d'obtenir par exemple la surface nécessaire à convertir en zones tampons artificielles en fonction du résultat souhaité et de définir les lieux les plus adaptés pour implanter les zones.

Méthode SIG

L'outil SIG est envisagé comme une alternative à la modélisation numérique qui est une approche assez lourde, nécessitant de nombreuses données de terrain pour caler le modèle. A l'inverse, la méthode SIG est une méthode simple, applicable à tout bassin versant permettant d'identifier les « hotspots » de nitrates afin de planifier les aménagements à réaliser à l'échelle du bassin versant.
Cette méthode permet en effet d'obtenir un classement des zones, au sein d'un bassin versant, en fonction de leur contribution aux concentrations en NO_3^-, à l'exutoire. Cette approche s'applique aux bassins versants de taille petite à moyenne présentant des conditions climatiques relativement homogènes. Les cinq paramètres suivants sont pris en compte : l'utilisation des terres, le sol, la pente, les bandes rivulaires et la distance aux eaux de surface. Tous les paramètres et enfin les zones contributrices sont classés en trois catégories de risque : faible (1), moyen (2) ou haut (3).

Cet outil permet de faire un premier diagnostic qui doit être suivi d'une validation sur le terrain. Certaines informations locales (coopération avec le propriétaire foncier, etc.) doivent être collectées. L'approche ne peut ainsi pas s'appuyer uniquement sur le SIG.

Carte des charges en nitrate du sous-bassins (kg/ha.an)

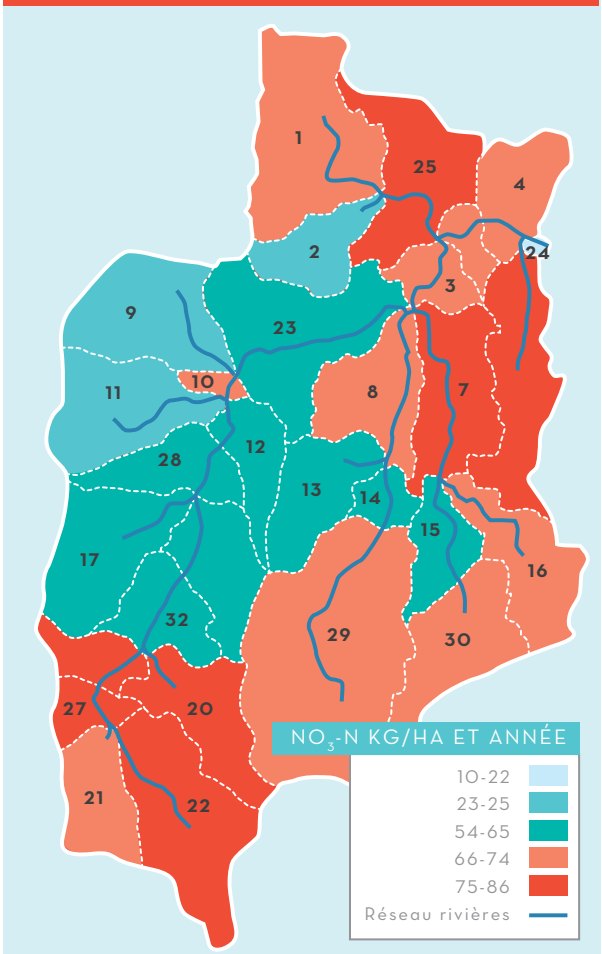


FIGURE 55 SWAT FIGURE

Résultat de la modélisation SIG

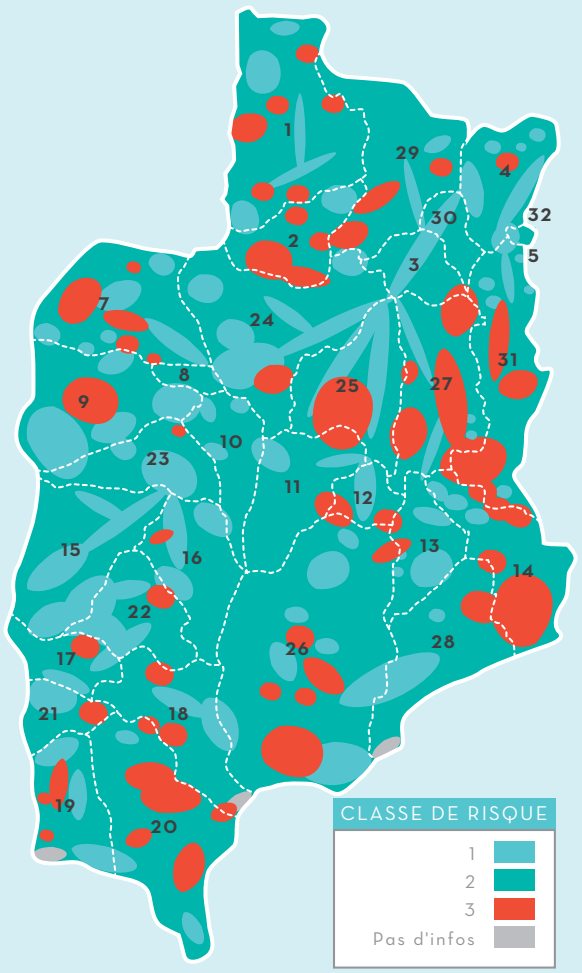


FIGURE 56 FIGURE GIS METHOD

L'état de l'art a abouti aux conclusions suivantes :

· les éléments nutritifs restent la problématique la plus importante concernant la qualité de l'eau à la fois pour l'industrie et les gestionnaires des bassins versants. Les pesticides sont le principal groupe de composés traces organiques de la pollution diffuse ;

· la mise en place de zones tampons artificielles peut être une mesure de protection efficace pour atténuer la pollution diffuse d'origine agricole, complétant les mesures de gestion agricole prises par ailleurs (usages raisonnés, couverture des sols, etc.) ;

· les scénarios de gestion peuvent être testés en utilisant des modèles numériques à l'échelle du bassin versant ;

· l'identification des « hotspots » de nitrates par le biais de SIG peut constituer une option adaptée et simple.

DÉTAIL DE LA PHASE « DÉVELOPPEMENT ET ÉTUDE DE ZONES TAMPONS EN GRANDEUR RÉELLE (2009-2013) »

Cette deuxième phase du projet se concentre sur l'efficacité des initiatives existantes et sur de nouvelles conceptions de zones tampons pour la réduction des éléments nutritifs et des pesticides.
Les questions suivantes ont été abordées :

- détermination des conditions optimales et de conception pour l'élimination des nitrates et de certains pesticides en laboratoire et en mésocosme ;
- efficacité des zones tampons artificielles (zones humides artificielles, fossé réactif) via des études de cas dans l'Indiana (États-Unis) et en Bretagne. Les systèmes mis en œuvre ont été choisis en fonction de leur potentiel de rétention des nitrates. Seules les actions engagées sur le bassin versant de l'Ic (6 900 ha, et concentrations maximales en nitrates à la prise d'eau de l'ordre de 100 mg/L) sont présentées plus en détail dans la suite de la fiche ;
- implémentation des résultats de surveillance *in situ* dans le modèle SWAT pour évaluer les résultats à attendre à l'échelle du bassin versant suite à la mise en œuvre de diverses zones tampons.

Ainsi, afin de concevoir des systèmes efficaces, les essais ont été effectués à différentes échelles :

1) échelle de laboratoire (2 ans et demi) :

Dans le laboratoire, des expériences ont été menées sur des colonnes composées de différents substrats organiques à différents temps de séjour hydraulique (HRT). L'efficacité de réduction des nitrates et de deux herbicides communs en Europe (bentazone et isoproturon) a été explorée.

2) échelle du mésocosme (2 ans) :

A l'échelle du mésocosme, des rigoles parallèles ont été remplies avec le substrat identifié comme étant le plus approprié lors des expérimentations en laboratoire, pour un essai de deux ans. Ce substrat est composé d'un mélange de paille et de copeaux de bois.

3) échelle de la parcelle (3 ans) :

Un fossé d'infiltration (fossé réactif) et deux zones humides simples (lagune de surface et lagune d'infiltration) ont été construits en Bretagne, en tenant compte des expériences des autres échelles. Ces systèmes sont désormais suivis pour étudier les effets sur les concentrations en nitrates et en pesticides.

Leur implantation a été choisie sur la base des résultats de l'outil SIG et en concertation avec le SMEGA (Syndicat Mixte Environnemental du Goëlo et de l'Argoat) dont le rôle est de mettre en place des politiques de gestion et d'entretien des espaces ruraux et publics de façon durable. Le SMEGA est notamment intervenu pour mettre en place les aménagements en concertation avec les agriculteurs (pas d'acquisition pour l'instant). Puis, sur les sites présélectionnés, des informations complémentaires ont été recueillies (test d'infiltration, relevés topographiques, etc.) afin de choisir le type de zone tampon artificielle adéquat, susceptible d'éliminer les nutriments y compris en période de forts débits ainsi que les instruments nécessaires pour le suivi des 2 sites « pilotes » (SETUDE/SEEGT, KWB).
Les aménagements, financés par l'agence de l'eau Loire-Bretagne, ont été implantés en 2009 afin d'étudier leurs performances en différentes situations de débit. Le suivi hydraulique a été planifié, installé et conduit par SETUDE/SEEGT. En parallèle, le SMEGA a contribué à l'échantillonnage sur les sites pour le suivi analytique et à l'entretien des sites.

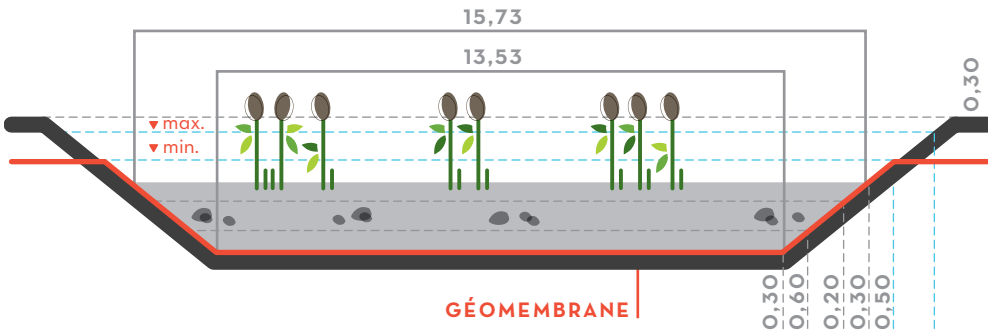
PHOTOGRAPHIE DE LA LAGUNE À FLUX HORIZONTAL

FIGURE 57

SCHÉMAS DES DEUX TYPES DE LAGUNES ÉTUDIÉES

BASSIN D'INFILTRATION 10X20 m

Temps de rétention entre 4 h et 30 h (selon débit d'alimentation)



BASSIN À FLUX HORIZONTAL 10X20 m

Temps de rétention entre 10 h et 2/3 j (selon débit d'alimentation)

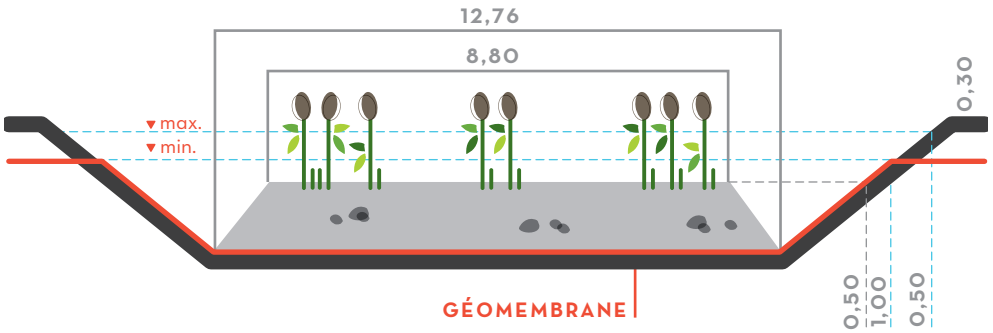


FIGURE 58

De nombreux paramètres ont été pris en compte pour le suivi détaillé des sites pilotes (2009-2013) par le CAE, responsable des analyses :

- pH, T°, conductivité et O_2 dissous ;
- NO_3^-, NH_4, PO_4^{3-}, P_T, N_T, COD (Carbone Organique Dissous) ;
- débits et hauteurs en continu (SETUDE).

L'analyse des données est réalisée par KWB sur la période 2010-2013. Les résultats de ces expériences permettront d'enrichir et de caler le modèle de simulation SWAT. Elles permettront ensuite de simuler les résultats qui peuvent être obtenus sur la qualité de l'eau à la prise d'eau pour la production d'eau potable sur le long terme en utilisant ces zones tampons réparties sur le bassin versant, en complément de l'amélioration des pratiques agricoles.

Enfin, la publication d'un guide permettra d'aider les décideurs à élaborer des stratégies pour lutter contre la pollution à l'échelle du bassin versant.

PARTENAIRES

VERI / KWB : **Coordination et financement du projet de R et D** (Montant total : 1.4 M€)
Université de Giessen : **modélisation avec SWAT**
KWB : **développement de la méthode SIG**
Agence Fédérale pour l'Environnement (UBA) : **expérimentations au laboratoire et en mésocosmes**
Université d'Indianapolis : **étude de site à Indianapolis**
SMEGA, Veolia Eau Région Ouest, SETUDE/SEEGT, CAE de Rennes : **étude de site en Bretagne**
Agence de l'eau Loire-Bretagne, Conseil général des Côtes d'Armor, Région Bretagne, SMEGA : **financement du suivi du site en Bretagne**

Concordance des objectifs du projet en fonction de la définition de l'ingénierie écologique donnée au chapitre 1

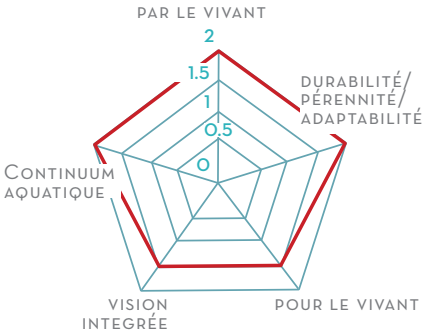


FIGURE 59

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN: LOIRE BRETAGNE
RÉGION: CENTRE
DÉPARTEMENT: LOIRET
COMMUNE: ORLÉANS

FICHE 3

Restauration écologique et concertation sur une zone humide en captage Grenelle : restauration du Bras de Bou

1. ELÉMENTS DE CONTEXTE

Le Bras de Bou est situé dans le Val d'Orléans, dans le lit majeur de la Loire (zone inondable de la Loire). Il possède une fonction importante d'épuration des eaux et de rétention en cas de crue majeure de la Loire. C'est d'ailleurs en raison de ces fonctions qu'il a été identifié par le SAGE Val Dhuy-Loiret comme « zone humide à enjeu et à restaurer ». C'est une zone humide non remarquable mais « unique » sur cette partie du bassin versant.

De plus, le Bras de Bou se situe dans le périmètre de protection rapproché et éloigné (PPR et PPE) des trois captages d'eau potable de la Mairie d'Orléans (le Boucher, le Theuriet et le Gouffre) voués à l'alimentation en eau potable de la majorité de l'agglomération orléanaise. Ils font partie de la liste des captages définis comme prioritaires par le Grenelle de l'environnement pour lesquels sont déterminées des aires d'alimentation. Dans cette zone, la CLE a organisé une concertation pour définir un programme d'actions en 2012. Celui-ci fixe les objectifs et les moyens de les atteindre pour lutter contre les pollutions diffuses des eaux souterraines des captages du Val et des eaux superficielles du Dhuy et de ses affluents. De ce fait, les activités agricoles font l'objet d'un diagnostic détaillé et la Mairie travaille avec les agriculteurs pour mettre en place une agriculture durable par l'instauration de bonnes pratiques dans le périmètre de protection rapproché des captages. Elle achète des terres quand elle le peut et incite les nouveaux agriculteurs à cultiver du bio et à diminuer l'usage de produits phytosanitaires.

2. UN PARTENARIAT CLÉ POUR L'ÉLABORATION DU PLAN D'ACTIONS

En 2010, un travail a été initié sur 3 ans dans le cadre d'un partenariat France Nature Environnement/ Lyonnaise des Eaux. Le but de ce partenariat était de mettre en place des actions pilotes d'amélioration de la qualité de l'eau et de la qualité du milieu naturel en faveur de la biodiversité. Dans ce cadre, l'Association pour la Protection de la rivière Loiret et de son bassin versant (APSL) a réalisé une première étude afin d'établir un état des lieux (hydro-morphologie, inventaire faunistique et floristique) du Bras de Bou et de faire des propositions d'aménagements.

L'étude a permis de différencier 2 secteurs distincts :

- le secteur aval ;
- le secteur amont.

La partie avale est caractérisée par un cours d'eau de 2,5 km de long, présentant des secteurs différenciés allant de zones d'élargissement et de très faibles écoulements à des zones aux pentes plus abruptes avec des ripisylves plus ou moins dégradées. La partie amont du cours d'eau est alimentée par un chevelu de petits canaux appelés « fossés jurés » dont le rôle à l'origine était d'évacuer les eaux après les fortes crues de la Loire. Au cours du temps, ces fossés ont été délaissés, tant au niveau de l'entretien que de l'intérêt que leurs portent les riverains et agriculteurs. Ils sont petit à petit devenus de simples collecteurs de drainage agricole et d'eaux de ruissellement ou pluviales, vecteurs de pollutions pour le Bras de Bou.

Carte du tracé du bassin versant du Bras de Bou

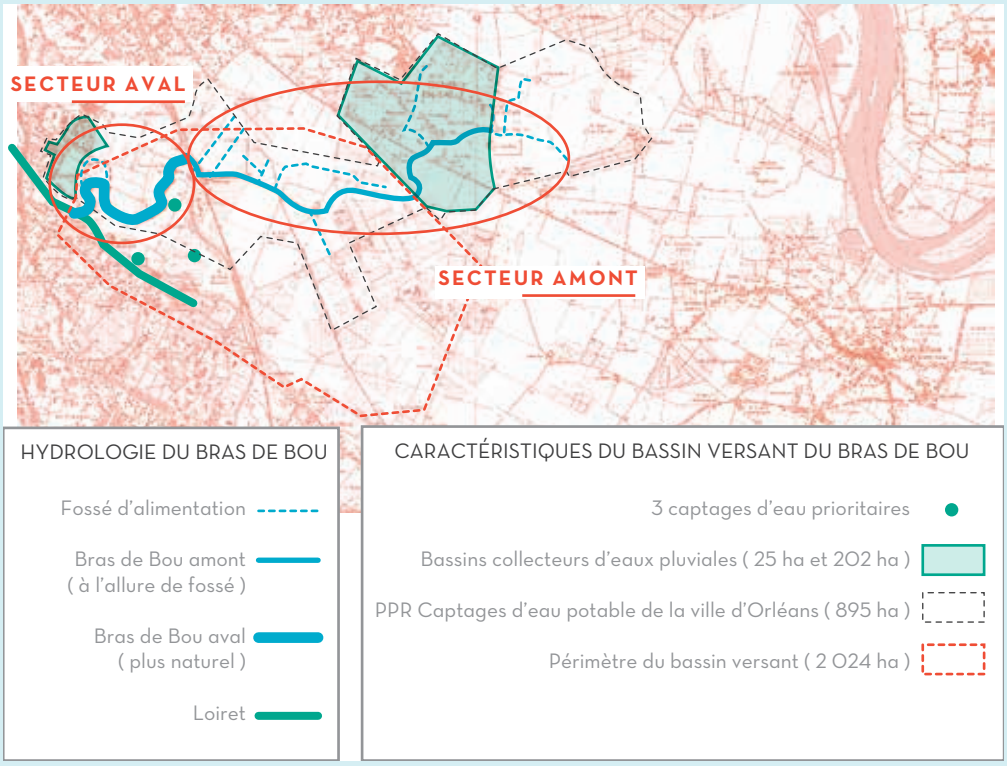


FIGURE 60

Suite à cette étude, l'APSL a défini divers objectifs sur ces 2 secteurs pour protéger la ressource en eau souterraine et améliorer la qualité du Loiret. Elle a ensuite proposé un plan de travaux de restauration du cours d'eau contenant des travaux légers d'entretien de ripisylve ainsi que des travaux plus lourds d'ingénierie écologique pour restaurer la morphologie et l'écoulement du Bras de Bou.

3. UNE CONCERTATION DES PARTIES PRENANTES EN PARALLÈLE DES ÉTUDES

Le Bras de Bou étant bordé par des champs appartenant à 33 propriétaires riverains, le délégataire souhaitait avoir une véritable concertation pour juger de l'acceptabilité des travaux envisagés par les parties prenantes. Ils ont ainsi été consultés et ils ont pu exprimer leurs attentes et leurs préoccupations.

Ce travail d'information et de consultation permet de sensibiliser les propriétaires sur les bienfaits de ces améliorations, à la fois pour la rivière et pour leur parcelle. Pour cela, plusieurs réunions de concertation avec tous les riverains ont été organisées depuis 3 ans. Des rencontres individuelles avec les propriétaires ont également été réalisées sur des points plus précis du projet de restauration.

4. DES TRAVAUX DE RESTAURATION D'UNE ZONE HUMIDE POUR AMÉLIORER LA QUALITÉ DE L'EAU ET FAVORISER LA BIODIVERSITÉ

Le but de la restauration du Bras de Bou est d'entretenir le ruisseau et de faire en sorte que sa capacité d'accueil pour la faune et la flore soit maintenue. Ces opérations de restauration sont également l'occasion de présenter les nouveaux modes d'entretien aux riverains et de les sensibiliser sur ce thème. L'objectif est de changer leur regard sur le cours d'eau afin qu'ils modifient leurs pratiques.

Les travaux de restauration et d'entretien pourraient intégrer le prochain contrat territorial qui débutera en 2015.

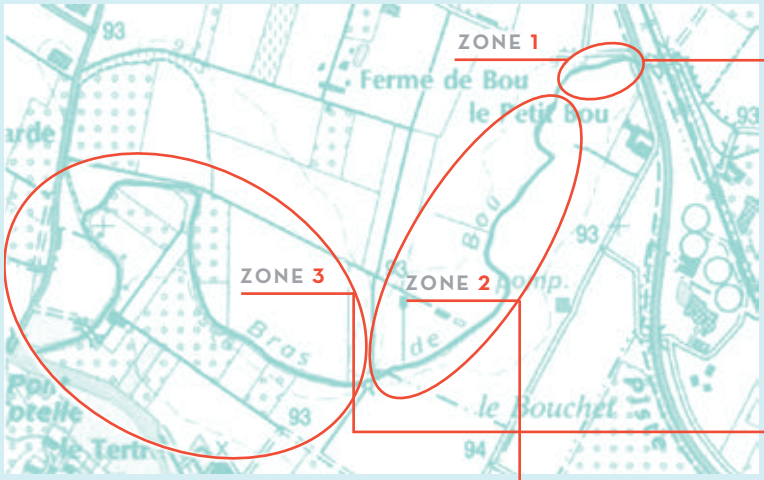
Vue aérienne du Bras de Bou sur la zone à restaurer

FIGURE 61

	SECTEUR AMONT (LES FOSSÉS JURÉS)	SECTEUR AVAL
Objectifs	• améliorer et adapter le fonctionnement des fosses jurés ; • maintenir, voire améliorer leurs capacités d'accueil pour la flore et la faune.	• améliorer le fonctionnement du Bras de Bou : augmentation de ses capacités d'autoépuration en vue d'améliorer la qualité de l'eau ; • maintenir, voire améliorer ses capacités d'accueil pour la flore et la faune ; • sensibiliser les riverains aux bonnes pratiques.
Travaux	• recenser et caractériser les fossés jurés ; • modéliser les transferts ; • définir les perspectives d'aménagements possibles et estimer les résultats.	• coupe des conifères ; • élagage ; • enlèvement d'embâcles ; • exportation du bois coupé ; • reprofilage des berges ; • plantation de végétation en ripisylve.

Carte de répartition des 3 secteurs sur le linéaire du Bras de Bou

Sur le secteur aval, 3 secteurs différents ont été identifiés avec des enjeux et des objectifs de gestion spécifiques à chacun.

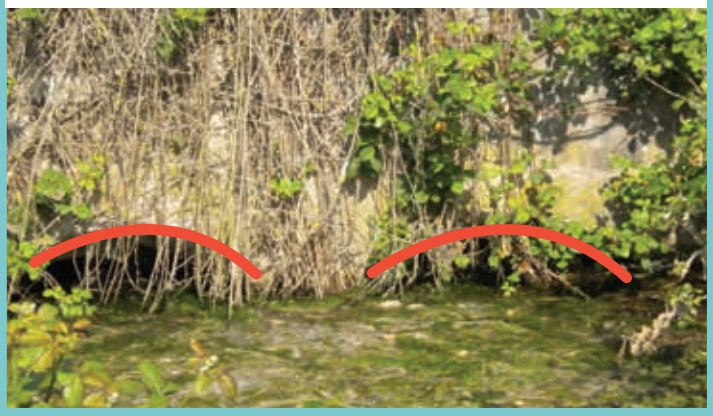


ZONE 1 : LA «MARE » ET SES ENVIRONS

OBJECTIFS ET ACTIONS :

- valorisation en tant que mare pour favoriser la biodiversité ;
- contrôles réguliers de l'état de la mare : pour éviter le comblement par les sédiments ou la végétation ligneuse et la prolifération de lentilles d'eau.

ZONE 2 : LE PONT



LE PONT AVEC UNE VUE SUR 2 DES 5 BUSES SOUS-DIMENSIONNÉES MATÉRIALISÉES PAR UN TRAIT ROUGE.

OBSERVATIONS:

- ripisylve discontinue ;
- présence de conifères en ripisylve ;
- écoulement lent accentué par la présence du pont entrainant le développement et la prolifération de lentilles d'eau.

ZONE 3 : EMBÂCLES ET BERGES ABRUPTES

OBJECTIFS ET ACTIONS :

- entretien et diversification de la ripisylve : sélection de végétation/ replantation ;
- gestion des nombreux embâcles ;

Les travaux seront réalisés en 2 phases par l'association RESPIRE, à l'automne 2013 et 2014.

FIGURE 62

5. UN ENTRETIEN NÉCESSAIRE

L'APSL inclut dans ce programme un entretien de la végétation en ripisylve afin d'éviter que le milieu ne se referme du fait de l'abondance des végétaux. Le bon développement des arbustes plantés sera surveillé, le recepage sera assuré afin que les branches soient plus denses et puissent accueillir des nids d'oiseaux, par exemple. Cet entretien sera a priori intégré dans les travaux du SIBL (Syndicat Intercommunal du Bassin Loiret) dans le cadre du contrat territorial.

GOUVERNANCE *(inspirée de la « gouvernance à 5 » du Grenelle de l'environnement)*

Maître d'ouvrage: Lyonnaise des Eaux par la DSP de la Ville d'Orléans
Implication des communes d'Olivet, St Cyr en Val et St Denis en Val, la Chambre d'Agriculture du Loiret (représentant les agriculteurs), l'agglo d'Orléans (compétence en assainissement et en pluvial).
Maître d'œuvre: Le SIBL délègue la maîtrise d'œuvre des travaux à l'APSL qui coordonne l'association d'insertion RESPIRE.
Inventaire des acteurs de la partie aval réalisé par l'association :
Les communes d'Orléans, Olivet, Saint Cyr-en-Val et Saint Denis-en-Val
Le SIBL : gestion et entretien des rivières du bassin du Loiret
L'ASRL : gestion et entretien du Loiret privé (exutoire du Bras de Bou)
Lyonnaise des eaux : exploitation des captages d'eau potable de la ville d'Orléans
L'APSL : Association pour la protection de la rivière Loiret et de son bassin versant
Les riverains : 33 propriétaires (sur la partie aval)
La Chambre d'Agriculture du Loiret (représentant des agriculteurs).
L'agglo d'Orléans : compétence en assainissement et eaux pluviales
Coûts estimés secteur aval :
Travaux d'entretien de la ripisylve : 35 000 € TTC
Travaux de reprofilage : 20 000 € TTC
Maitrise d'œuvre : 40 000 € TTC
Financement escompté :
Agence de l'eau : 31 %
Lyonnaise des eaux dans le cadre de la DSP de la mairie : 69 %

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

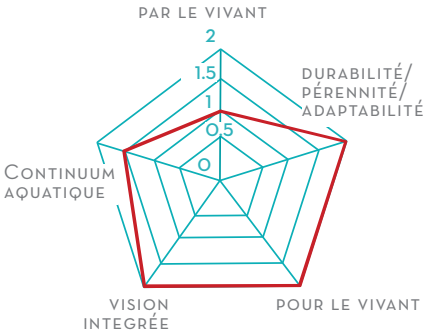


FIGURE 63

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

EUROPE

FICHE 4

Evaluation du potentiel des zones humides du Rhin supérieur pour la réduction des pesticides

Les zones humides artificielles, comme certains bassins d'orage ou fossés végétalisés, offrent des conditions biogéochimiques favorables pour la dégradation et la rétention des contaminants organiques comme les résidus de pesticides ou inorganiques comme le cuivre.

La diversité des conditions biogéochimiques au sein de ces zones en font des laboratoires à ciel ouvert pour l'étude du devenir des contaminants dans l'environnement qu'ils soient organiques comme les pesticides ou inorganiques comme le cuivre.

PROCESSUS DE DÉGRADATION/RÉTENTION INTERVENANT SUR LE DEVENIR DES CONTAMINANTS AU SEIN DES ZONES HUMIDES ARTIFICIELLES.

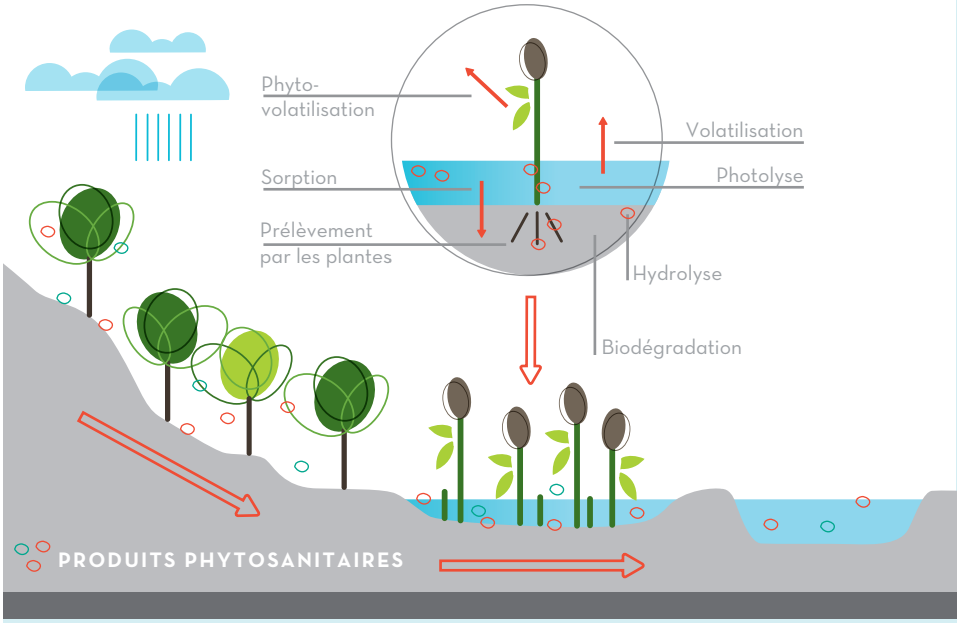


FIGURE 64

Ces zones peuvent ainsi contribuer à préserver les eaux de surface en réduisant les flux de pesticides qui proviennent des bassins versants agricoles dans l'optique d'atteindre les objectifs de bon état écologique des masses d'eau fixés par la Directive Cadre sur l'Eau. Deux projets à dimension européenne se sont intéressés à l'efficacité de dégradation/rétention de ces zones humides artificielles : le projet ArtWET (2006-2010) et le projet PhytoRET (2010-2014). En effet, avant d'envisager leur utilisation en complémentarité des approches préventives, il est indispensable de quantifier leur potentiel et d'identifier leurs limites selon les contaminants considérés et les conditions climatiques, physico-chimiques et hydrologiques observées dans ces milieux.

Le potentiel de dégradation/rétention des pesticides de ces zones a été étudié lors du projet Life ArtWET qui a regroupé des partenaires en Allemagne, en Italie et en France (Grégoire *et al.*, 2009).

1. LE PROJET ARTWET

Les expérimentations menées entre 2006 et 2010 dans le cadre du projet ArtWET ont démontré le potentiel des milieux humides artificiels à dégrader et retenir les pesticides (Stehle et al., 2011). Trois types de dispositifs ont été testés :

- les fossés végétalisés, principalement en Allemagne ;
- les biobacs, en Italie ;
- les bassins de rétention, principalement en France.

Principaux résultats du projet ArtWET

Sur les bassins de rétention, une dégradation/rétention de 40 à 88% des pesticides a été observée au sein des zones humides artificielles, même au sein de systèmes très jeunes (pas entièrement végétalisés). Avec des systèmes plus matures, pendant la saison agricole, une efficacité d'atténuation moyenne de 76 +/- 19% (en concentration totale) et 73% (en masse totale) a pu être obtenue (calcul basé sur 18 pesticides appliqués en viticulture) (Maillard *et al.*, 2011). Le glyphosate est

DISPOSITIFS TESTÉS DANS LE PROJET ARTWET

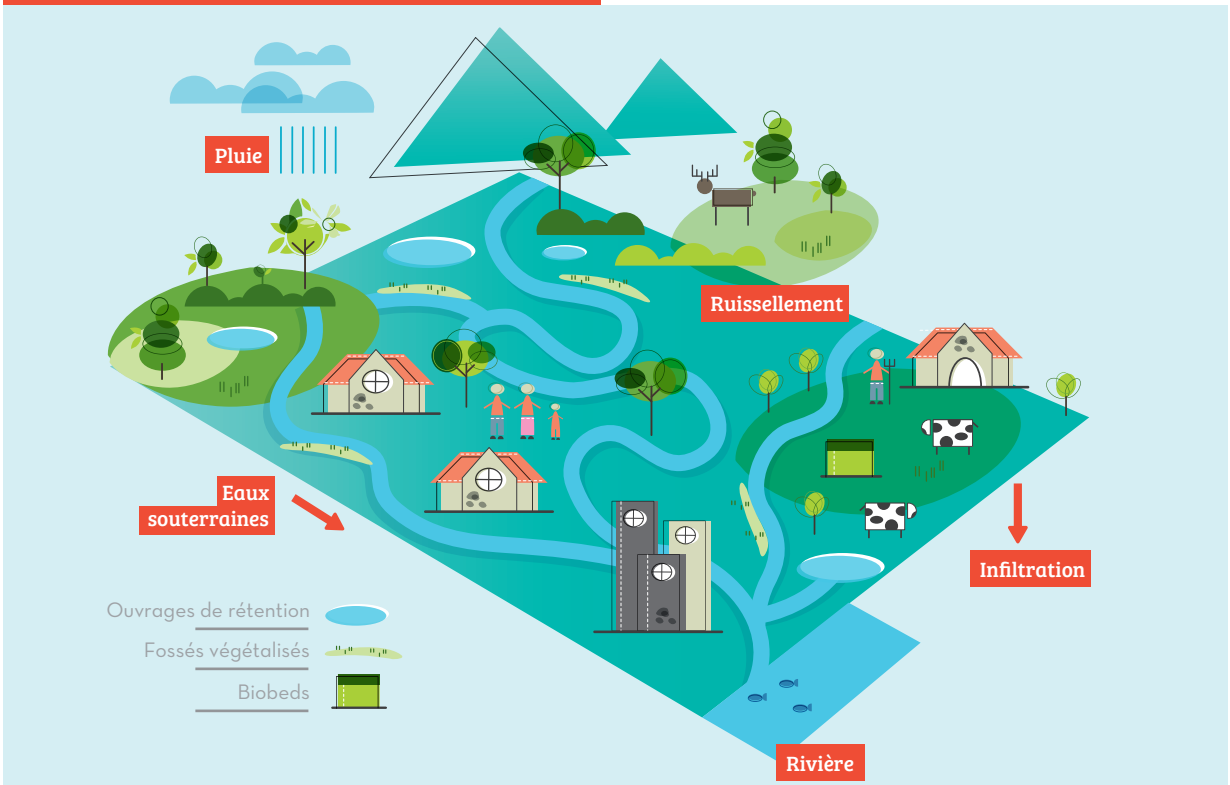


FIGURE 65

un pesticide particulièrement bien dégradé à l'échelle d'une saison culturale avec 94% de rétention/dégradation dans ces zones artificielles en incluant aussi dans ce calcul l'AMPA, son principal produit de dégradation (Imfeld *et al.*, 2013). Dans les systèmes de traitement des effluents à l'exploitation agricole, les biobacs, une recirculation de l'eau a permis d'atteindre une efficacité de 99,8% pour l'atténuation des pesticides, même à forte concentration d'ingrédients actifs largement utilisés dans les vignobles tels que le métalaxyl, le penconazole et le chlorpyrifos. Le fort potentiel de ces biobacs a également été testé pour plusieurs herbicides utilisés dans les cultures de maïs / blé / tomate.

Le projet Life ArtWET a identifié et quantifié le potentiel de dégradation/rétention au sein des zones humides artificielles étudiées et fournis des premiers éléments de conception de ce type de zones tampons humides (ArtWET, 2010a et 2010b). Cependant, le potentiel de dégradation/rétention s'est avéré extrêmement variable selon les sites et les pesticides étudiés ainsi que les saisons. Cette forte variabilité a motivé la conception d'un second projet européen PhytoRET, pour caractériser les processus en jeu et pour proposer des règles de dimensionnement des zones humides artificielles.

2. LE PROJET PHYTORET

Le projet Interreg IV PhytoRET a débuté en septembre 2010 pour 4 ans et associe le laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg (Université de Strasbourg/ENGEES, CNRS), l'Institut d'Hydrologie de Freiburg et l'Université de Lüneburg en Allemagne ainsi que différents acteurs de l'eau de part et d'autre du Rhin. Le projet s'inscrit dans un contexte régional de préservation à long terme de l'aquifère rhénan et du Rhin vis-à-vis de la pollution par les résidus de pesticides dans les eaux de surface.

Comme le montre la **FIGURE 66**, une diversité de substances actives a été observée dans les eaux superficielles en Alsace en 2009. Sur 299 substances recherchées, 97 ont été retrouvées au moins une fois, dont 59 à des teneurs supérieurs à la limite de potabilité de 0,1 µg/L. Les herbicides sont les substances majoritairement retrouvées.

SUBSTANCES QUANTIFIÉES PAR TYPE DE PESTICIDES DANS LES EAUX SUPERFICIELLES, ALSACE 2009

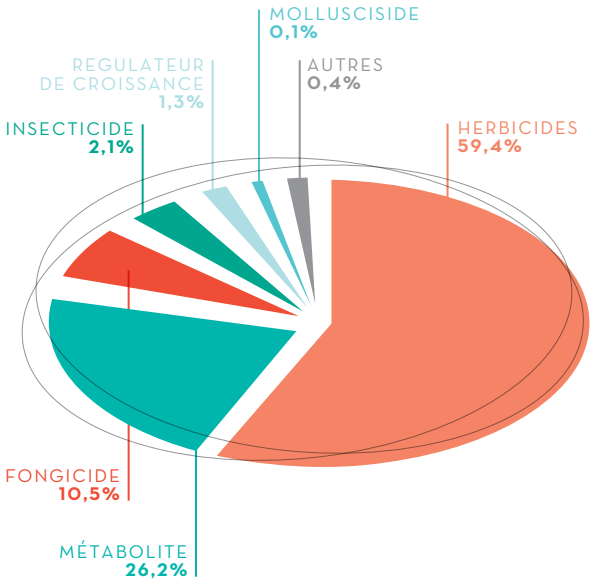


FIGURE 66 AGENCE DE L'EAU RHIN-MEUSE

Ces teneurs en pesticides sont parfois élevées comme le montre la **FIGURE 67** :

SUBSTANCES QUANTIFIÉES PAR TYPE DE PESTICIDES DANS LES EAUX SUPERFICIELLES, ALSACE 2009

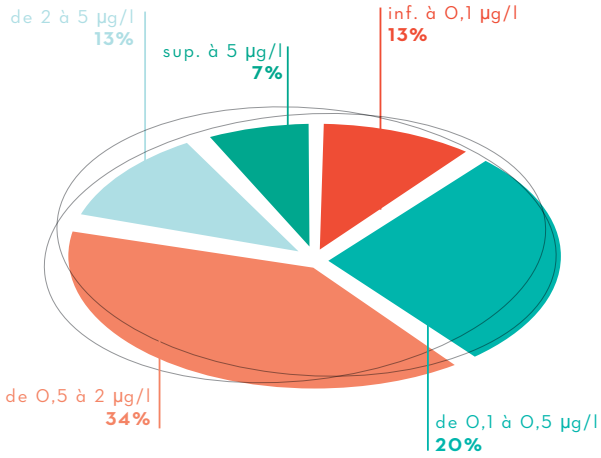


FIGURE 67 AGENCE DE L'EAU RHIN-MEUSE

Parmi les zones humides étudiées dans ArtWET, le projet PhytoRET s'intéresse plus particulièrement aux ouvrages de rétention et de remédiation de part et d'autre du Rhin. En effet, les piémonts viticoles de la région du Rhin Supérieur sont caractérisés par l'existence de nombreux ouvrages de rétention. On en compte plus de 263 en 2013 dont 116 en Alsace et 147 dans le Baden-Württemberg. Ceux-ci sont d'abord voués à la protection contre les inondations mais peuvent contribuer à la dégradation et à la rétention des pesticides présents dans les eaux stockées.

2.1. Les trois objectifs du projet PhytoRET

1 - Évaluer le potentiel des ouvrages de rétention et de remédiation du Rhin supérieur vis-à-vis de la diminution des pesticides.

Le premier objectif du projet est de comprendre les processus physico-chimiques qui ont lieu à l'intérieur de ces ouvrages de rétention afin de pouvoir quantifier le rôle de chaque élément de ce type d'écosystème. Afin de caractériser les processus hydrologiques et biogéochimiques contrôlant le devenir des résidus de pesticides, les travaux ont été menés à trois échelles :

- à l'échelle du Rhin supérieur, l'information sur les caractéristiques des ouvrages de rétention situés à l'interface rural/urbain est rassemblée et systématisée dans une base de données SIG ;
- deux ouvrages de rétention situés à l'exutoire de bassins versants agricoles (Rouffach, France et Eichstetten, Allemagne) sont instrumentés et échantillonnés ;
- des milieux humides reconstitués en laboratoire qui permettent d'investiguer la dégradation biologique par les micro-organismes et abiotiques (photolyse par le soleil, hydrolyse dans l'eau).

2 - Disséminer et mettre en œuvre au niveau régional les résultats pour une utilisation pérenne des ouvrages de rétention et de remédiation.

Le second objectif est de guider les acteurs de la gestion de l'eau dans l'implantation, la gestion et le dimensionnement de ces ouvrages de rétention et de remédiation.

Une des pistes pour promouvoir ce type d'ouvrages est d'aménager des bassins de protection contre les inondations préexistants en optimisant leur potentiel de rétention/dégradation des contaminants organiques et inorganiques. Leur aménagement permet de concevoir des ouvrages plurifonctionnels en minimisant les coûts sachant qu'il n'existe pas encore d'outils réglementaires et financiers incitatifs pour développer des ouvrages de rétention et de remédiation. Un outil SIG (basé sur les Systèmes d'Information Géographique) a été conçu pour localiser, à l'échelle régionale ou départementale les points de positionnement les mieux appropriés à ce type d'aménagement.

3- Evaluer et définir les moyens de mise en œuvre, de valorisation et de gestion des ouvrages de rétention et de remédiation au niveau des communes.

En s'appuyant sur les résultats obtenus, les partenaires de PhytoRET mettent régulièrement en relation les acteurs pour l'implantation et la dissémination régionale des ouvrages de rétention et de remédiation :

1. les communes du Rhin supérieur et les maîtres d'œuvre concernés par les ouvrages de rétention et de remédiation : via une plateforme technico-administrative incluant l'édition d'un guide technique ;
2. les professionnels locaux (agents des agences publiques de l'environnement, consultants, ingénieurs d'études) et les scientifiques (laboratoires, associations et bureaux spécialisés) : via une plateforme scientifique ;
3. les communes, le public et les futurs professionnels (étudiants): via une plateforme de dissémination ;
4. les collectivités territoriales et les maîtres d'œuvre (impliqués dans la construction et la maintenance des ouvrages de rétention et de remédiation) : via une plateforme de pérennisation.

SITE EXPÉRIMENTAL : BASSIN D'ORAGE DE WALDWEG, ROUFFACH, HAUT-RHIN, ALSACE

Le bassin versant de Rouffach (Haut-Rhin, Alsace) est un bassin viticole de 42,3 ha. A l'aval de ce bassin versant, un bassin d'orage préexistant a été agrandi en 2002 pour protéger la ville des crues centennales. Ce bassin d'orage ou de rétention avait déjà fait l'objet d'études sur la rétention et la dégradation des contaminants organiques lors du projet ArtWET. Une nouvelle étude a été menée dans le cadre du projet PhytoRET en 2010 et 2011. Les observations se sont déroulées entre les mois d'avril et de septembre, ce qui correspond à la saison culturale de la vigne. Sept fongicides, six herbicides et 4 produits de dégradation ont été sélectionnés pour ce suivi (Maillard *et al.*, 2012). Les fréquences d'utilisation et de détection ont été des critères prépondérants pour le choix des molécules à suivre.

Le bassin d'orage peut contenir un volume de 1 500 m^3 sur une surface de 319 m^2. Durant l'étude, la couverture végétale du bassin a variée de 1% au début de 2009 à 100% en 2011, composée à 90% de roseaux (Phragmites australis). La zone humide est composée d'une zone amont pour le dépôt de sédiments (215 m^2) qui recueille les matières en suspension dans les eaux de ruissellement et d'un filtre à gravier (13 m de long, 8 m de large et 0,6 m d'épaisseur). La hauteur d'eau dans la zone amont varie de 0,05 à 0,4 m d'avril à septembre, en fonction du volume d'eau de ruissellement entrant. Le temps de séjour moyen des eaux dans la zone humide est de l'ordre de 10 et 12 heures durant les périodes culturales.

COUPE TRANSVERSALE DU BASSIN DE RÉTENTION DE ROUFFACH INDIQUANT LA ZONE DE DÉPÔT DE SÉDIMENTS, LA BARRIÈRE DE GABION ET LE FILTRE À GRAVIER.

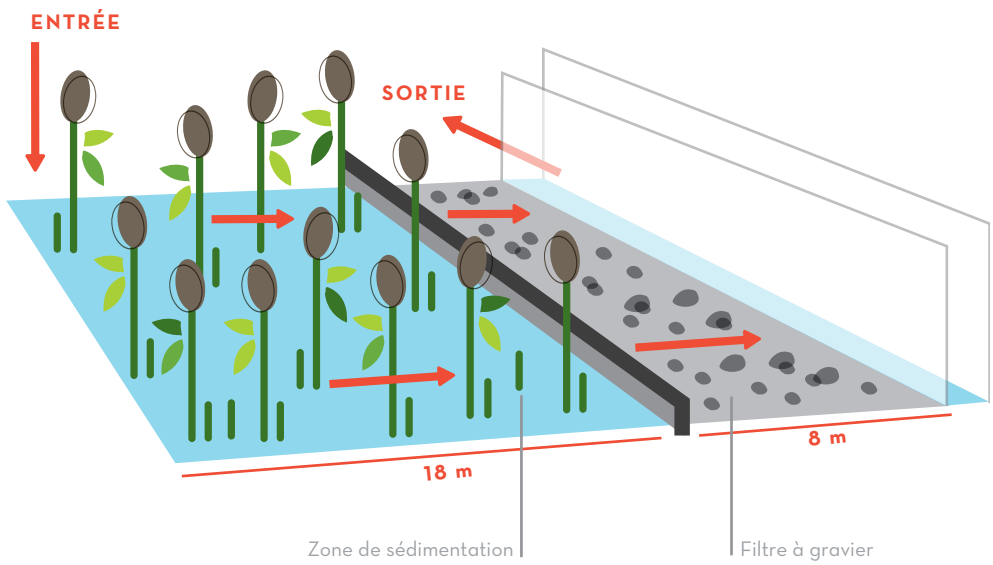


FIGURE 68

SUIVI

Les débits en entrée et sortie ont été mesurés en continu durant les saisons culturales de mars à fin septembre depuis 2008. Les concentrations d'un cocktail de pesticides en entrée et sortie ont été quantifiées en asservissant le prélèvement au débit pour obtenir des concentrations moyennes hebdomadaires représentatives. Depuis 2009, la répartition des contaminants et de leurs sous-produits de dégradation dans plusieurs compartiments (sédiments, algues, plantes) sont suivis mensuellement durant la période culturale (Maillard et al., 2012). Le protocole d'échantillonnage est un élément clé pour pouvoir réellement évaluer le potentiel de dégradation/rétention d'une zone humide artificielle.

RÉSULTATS

Sur la base de la campagne 2009, la réduction des concentrations en pesticides par la zone humide varie de 50% (simazine) à 100% (azoxystrobine, le cymoxanil, le cyprodinil, le glufosinate, la terbuthylazine et tétraconazole). Les taux d'élimination de la charge dissoute varie de 26% pour aminométhylphosphonique acide (AMPA) à 100% (azoxystrobine, le cymoxanil, le cyprodinil, le diuron, 1-(3,4-dichlorophényl)-3-méthylurée (DCPMU), gluphosinate, krésoxym méthyl, terbuthylazine et tétraconazole) (Maillard *et al.*, 2011). Plus de 77% des matières en suspension entrées dans la zone humide ont été retenues, ce qui souligne la capacité de la zone humide à piéger les pesticides adsorbés par sédimentation. Les résultats des campagnes 2010 et 2011 ont confirmé cette forte variabilité de dégradation/rétention selon les pesticides (Maillard *et al.*, 2012).

ENTRETIEN DU BASSIN

Le bassin doit être curé lorsque la charge sédimentaire est trop importante et que le volume utile de stockage d'eau devient insuffisant pour assurer la protection de la population à l'aval. La fréquence de stockage dépend donc de l'érosivité des zones amont et est estimée entre 3 à 5 ans. La végétation recolonise ensuite progressivement la totalité du bassin d'orage permettant de retrouver le potentiel initial de rétention/dégradation. Pour éviter la perte d'efficacité du système après le curage, une solution serait de réaliser 2 bassins en série : un à l'amont avec un rôle de sédimentation pouvant être curé et un à l'aval toujours recouvert de végétation assurant une continuité dans la dégradation/rétention des pesticides.

3. LIMITES DE CE TYPE DE DISPOSITIFS

Les projets ArtWET et PhytoRET ont démontré que les conditions biogéochimiques rencontrées au sein de ces zones humides artificielles étaient propices à la dégradation et à la rétention des contaminants organiques et inorganiques. Toutefois, l'utilisation de ces ouvrages comme outils de gestion de la pollution diffuse présente plusieurs limites :

- la multiplication des bassins de rétention avec de faibles lames d'eau pourrait entraîner une augmentation de la température des cours d'eau à l'aval ;
- les contaminants inorganiques comme le cuivre vont principalement s'accumuler dans ces zones et la gestion des boues de curage devra intégrer les fortes concentrations de ces contaminants ;
- ces milieux n'interceptent efficacement que les eaux de surface sans pouvoir jouer un rôle sur les pesticides entraînés sous les parcelles agricoles par infiltration.

Sur la base des résultats des projets ARTWET et PhytoRET, les ouvrages de rétention et de remédiation peuvent donc constituer des outils de gestion de la qualité de l'eau de surface complémentaires des approches préventives. Les approches préventives restent les plus efficaces pour préserver la qualité de l'eau. L'efficacité de ces ouvrages est fortement dépendante des propriétés physico-chimiques des pesticides, du mode de transfert en phase dissoute ou adsorbés sur les particules et des caractéristiques hydrologiques du bassin versant amont.

POUR EN SAVOIR PLUS

www.artwet.fr; www.phytoret.eu

PORTEUR DU PROJET PHYTORET:

Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement, Laboratoire d'HYdrologie et de GEochimie de Strasbourg.

PARTENAIRES CO-FINANCEURS:

Universität Freiburg, Allemagne
Universität Lüneburg, Allemagne
Agence de l'Eau Rhin-Meuse, France
Lycée Viticole de Rouffach, France
Région Alsace, France
Centre National de la Recherche Scientifique, France

AUTRES PARTENAIRES NON FINANCEURS :

Commune de Rouffach (France) ; Commune d'Alteckendorf (France) ; Stadt Eichstetten (Allemagne) ; Stadt Herbolzheim (Allemagne) ; Stadt Kenzingen (Allemagne) ; Stadt Schallstadt (Allemagne) ; Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA), (France) ; Conseil général du Haut-Rhin (CG68), Direction de l'Environnement et du Cadre de Vie (France) ; Conseil général du Bas-Rhin (CG67), Direction de l'Agriculture, de l'Espace Rural et de l'Environnement (France) ; Association pour la Relance Agronomique en Alsace (ARAA) (France) ; SEMIA (Incubateur d'Entreprise Innovante - Alsace) (France) ; Staatliches Weinbauinstitut Freiburg (Allemagne) ; Baden-Wurtenberg, Regierungspräsidium Freiburg, der Regierungsvizepräzidium und Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (Allemagne) ; Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwassereinigung und Gewässerschutz (EAWAG), Abteilung Umweltchemie (Allemagne).

COUT

Montant total : 1 382 710 € TTC
Montant de l'aide INTERREG : 691 355 € TTC

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

• Artwet, 2010a. Réduction de la pollution diffuse due au produits phytosanitaires et bioremédiation dans les zones humides artificielles – Guide d'accompagnement à la mise en œuvre – Aspect techniques, 111 p. *Disponible sur www.artwet.fr*

• Artwet, 2010b. Réduction de la pollution diffuse due au produits phytosanitaires et bioremédiation dans les zones humides artificielles – Guide d'accompagnement à la mise en œuvre – Aspect juridiques, économiques et sociaux, 62 p. *Disponible sur www.artwet.fr*

• Gregoire C., Elsaesser D, Jezequel K., Lange J., Lebeau T., Merli A., Mose R., Passeport E., Payraudeau S., Schuetz T., Schulz R., Tapia-Padilla G., Tournebize J., Trevisan M., Wanko A., 2009. Mitigation of agricultural nonpoint-source pesticide pollution in artificial wetland ecosystems: An interdisciplinary approach in the EU ArtWET project. Environmental Chemistry Letters, 7 (3), 205-231.

• Imfeld G., Lefrancq M., Maillard E., Payraudeau S., 2013. Transport and attenuation of dissolved glyphosate and AMPA in a stormwater wetland. Chemosphere. 90 (4), 1333-1339.

• Maillard E., Payraudeau S., Ortiz F., Imfeld G., 2012. Removal of pesticide mixtures in a stormwater wetland receiving runoff from a vineyard catchment (Alsace, France): an inter-annual comparison. International Journal of Environmental Analytical Chemistry. 92(8), 979-994.

• Maillard E., Payraudeau S., Faivre E., Gregoire C., Gangloff S., Imfeld G., 2011. Removal of pesticide mixtures in a stormwater wetland collecting runoff from a vineyard catchment. Science of the Total Environment. 409, 2317-2324.

• Stehle S, Elsaesser D., Gregoire C., Imfeld G., Niehaus E., Passeport E., Payraudeau S., Schäfer R.B., Tournebize J., Schulz R., 2011. Pesticide Risk Mitigation by Vegetated Treatment Systems: A Meta-analysis. J. Environ. Quality. 40, 1068–1080.

Concordance des objectifs du projet en fonction de la définition de l'ingénierie écologique donnée au chapitre 1

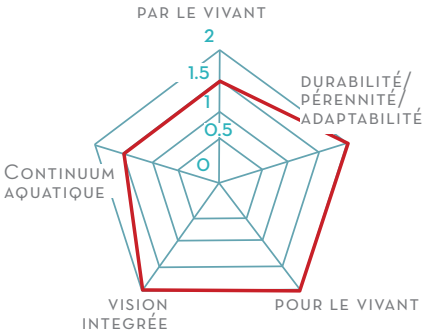


FIGURE 69

Situation géographique :

BASSIN: LOIRE-BRETAGNE
RÉGION: BRETAGNE
DÉPARTEMENT: FINISTÈRE
COMMUNE: PLEYBER-CHRIST

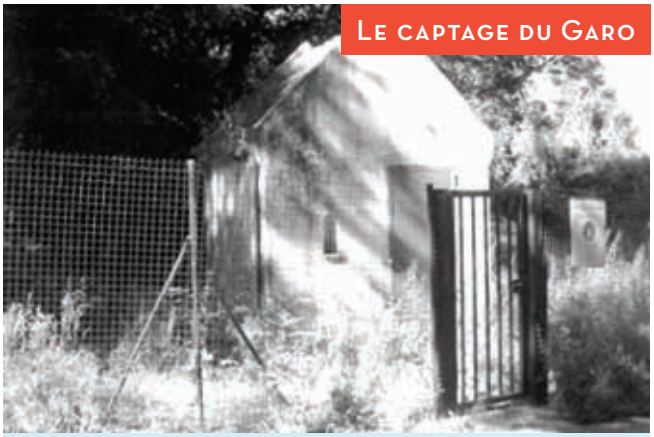
FICHE **5**

Reconquête de la qualité des eaux souterraines au captage du Garo

1. ELÉMENTS DE CONTEXTE

La commune de Pleyber-Christ est une commune de 3 183 habitants située sur les contreforts des monts d'Arrée. Le captage du Garo était en activité jusqu'au début des années 1990 puis il a été fermé pour diverses raisons notamment du fait d'un taux de nitrates trop élevé, compris entre 45 et 50 mg/L en 2001. Cependant, une étude menée par un hydrogéologue en 2002 a montré qu'il y avait peu ou pas de pesticides et que la teneur en nitrates restait relativement stable pour un débit moyen estimé de 80 m³/jour. Il a jugé qu'en instaurant des périmètres de protection, la qualité de l'eau pourrait rapidement s'améliorer.

Le projet a été primé aux trophées de l'eau de l'agence Loire-Bretagne en 2011.



Le captage du Garo

FIGURE 70 PLEYBER-CHRIST

2. LES ACTIONS MISES EN PLACE POUR PROTÉGER LE CAPTAGE DU GARO

La mairie a alors décidé de remettre le captage en fonctionnement et l'hydrogéologue a délimité les périmètres réglementaires :

- périmètre immédiat : c'est le captage proprement dit ;
- périmètre rapproché A : zone exclue de tout apport minéral, organique ou de pesticide ;
- périmètre B : pas de contrainte particulière, il reste en culture.

Pour s'assurer de la maîtrise des opérations, la mairie a lancé en 2008 une opération d'acquisition ou d'échange des terrains. Le périmètre immédiat étant déjà propriété communale, seuls les terrains situés dans le périmètre rapproché du captage, soit 8 ha au total ont été acquis. Les propriétaires et les exploitants ont été indemnisés ou ont reçu des terres en échange.

Les travaux ont été réalisés entre 2007 et 2009. Le périmètre immédiat a été fermé au public par une clôture. Sur le périmètre rapproché A, un talus de protection a été édifié sur la périphérie pour empêcher le ruissellement des eaux de surface. De même, les eaux provenant des parcelles, chemins et exploitations situés au-dessus, ont été canalisées pour éviter de pénétrer dans ce périmètre.

Pour améliorer la qualité des eaux souterraines, une couverture végétale composée à moitié de bois feuillus et à moitié de taillis de saules a également été installée sur les 8 ha du périmètre rapproché A. Une bâche plastique a été posée pour éviter l'installation des mauvaises herbes. Les plantations ont été réalisées par les élèves de deux écoles primaires associées au projet. Ils ont planté 40 000 boutures de saules au cours d'une journée. Ils ont été sensibilisés à l'intérêt de la protection de l'eau par une association locale (association au fil de Queffleuth et de la Penzé) sur un trimestre. L'action de l'association a été soutenue par la commune de Pleyber-Christ en recevant une subvention spécifique pour l'opération de sensibilisation des scolaires sur le thème « le circuit de l'eau à Pleyber-Christ et la filière de l'assainissement ». 4 ha de feuillus composés de 3 000 essences locales (frênes, charmes, hêtres, châtaigniers) ont également été plantés par une entreprise spécialisée.

Périmètre réglementaire du captage du Garo

FIGURE 71 PLEYBER-CHRIST

Enfants des écoles plantant les boutures d'arbres.

FIGURE 72 PLEYBER-CHRIST

3. LES RÉSULTATS OBTENUS SUITE AUX PLANTATIONS

Le périmètre immédiat et l'autorisation à produire de l'eau potable ont été rétrocédés au syndicat des eaux de la Penzé, compétent en matière de production d'eau. Ce syndicat dessert en eau potable les communes de Pleyber-Christ, Saint Thégonnec, Sainte Sève et Guiclan, soit 8 759 habitants. Cette eau provient d'un pompage sur la Penzé et du captage de Bodinery en St Thégonnec protégé depuis huit ans et dont la qualité s'améliore chaque année.

Entre 2011 et 2013, les teneurs en nitrates (NO_3) étaient en moyenne de 34 mg/L. Ces teneurs sont donc conformes à la limite de qualité fixée pour les eaux brutes souterraines utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine. Des analyses approfondies menées en 2011 ont conclu à une contamination bactériologique par entérocoques et *Escherichia-coli*. Les installations devront donc être nettoyées et désinfectées avant leur mise en service. Un traitement de neutralisation sera également à mettre en place (conductivité inférieur à 200 µS/cm et un pH inférieur à 6.5). Le captage n'a pas encore été remis en production. Les installations de pompage et de traitement doivent être mises en place à la fin de l'année 2013 ou au début de l'année 2014.

Le captage devrait fournir 87 600 m^3 d'eau potable par an, ce qui représente la moitié de la consommation communale. Cette ressource constitue une sécurité en cas de problème sanitaire sur la Penzé ou en cas d'année de grande sècheresse. Il est à noter également que le Pays de Morlaix est en équilibre précaire de fourniture d'eau. Dans ce contexte, cette ressource, même limitée, n'est pas négligeable.

4. LA VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DU BOIS DE SAULE

Les plantations sont entretenues par les services techniques communaux pour un coût de 1 200 €/ an. Une fauche est effectuée tous les 3 ans. Le bois des saules est valorisé dans les chaudières à bois de la commune qui chauffent des bâtiments publics grâce à un réseau de chaleur.

GOUVERNANCE *(inspirée de la « gouvernance à 5 » du Grenelle de l'environnement*

Maître d'ouvrage: Commune de Pleyber-Christ. Aujourd'hui, le captage a été cédé au syndicat des eaux de la Penzé.
Maître d'œuvre: DDAF du Finistère (Service Territorial Nord)
Terrassement : SAS Lagadec Yvon
Préparation terrain : SARL BLAISE, CUMA
Bureau d'études : AquaTerra
Coûts : 112 472.18 € HT
Acquisitions, indemnisations, terrains : 31 880.97 € HT
Travaux, y compris maitrise d'œuvre : 56 599.52 € HT
Plantations : 23 991.69 € HT
Financement :
Syndicat des eaux de la Penzé : 27 %
Agence de l'eau : 47 %
Conseil régional : 9 %
Conseil général : 17%

Chapitre 4

2

GESTION/TRAITEMENT DES POLLUTIONS PONCTUELLES

Concordance des objectifs du projet en fonction de la définition de l'ingénierie écologique donnée au chapitre 1

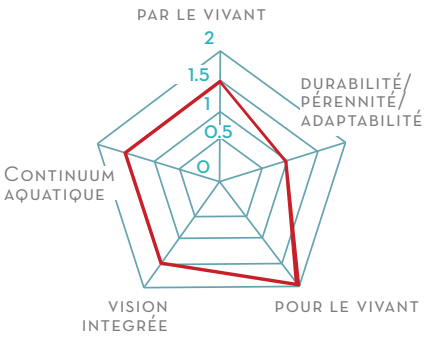


FIGURE 73

Situation géographique :

BASSIN: LOIRE-BRETAGNE
RÉGION: POITOU-CHARENTES
DÉPARTEMENT: DEUX-SÈVRES
COMMUNE: COUTIÈRES

FICHE 1

Fonctionnement de la Zone de Rejet Végétalisée de Coutières (79)

1. ELÉMENTS DE CONTEXTE

Coutières est une petite commune de 170 habitants. La station d'épuration « Horizon » comprend, outre des installations d'épuration sur lit planté de roseaux, une zone de démonstration de différents systèmes d'assainissement non collectifs et une zone humide végétalisée, destinée à compléter le traitement des eaux tout en favorisant la biodiversité. Un programme de deux ans a été lancé sur ce site pour y étudier le fonctionnement des zones de rejets végétalisées (ZRV) telles les saulaies et les champs de roseaux. L'implantation et la dimension de la station de la commune correspond bien aux objectifs de l'étude.

Vue aérienne de la STEP de Coutières

FIGURE 74 SAUR

Schéma de la STEP de Coutières

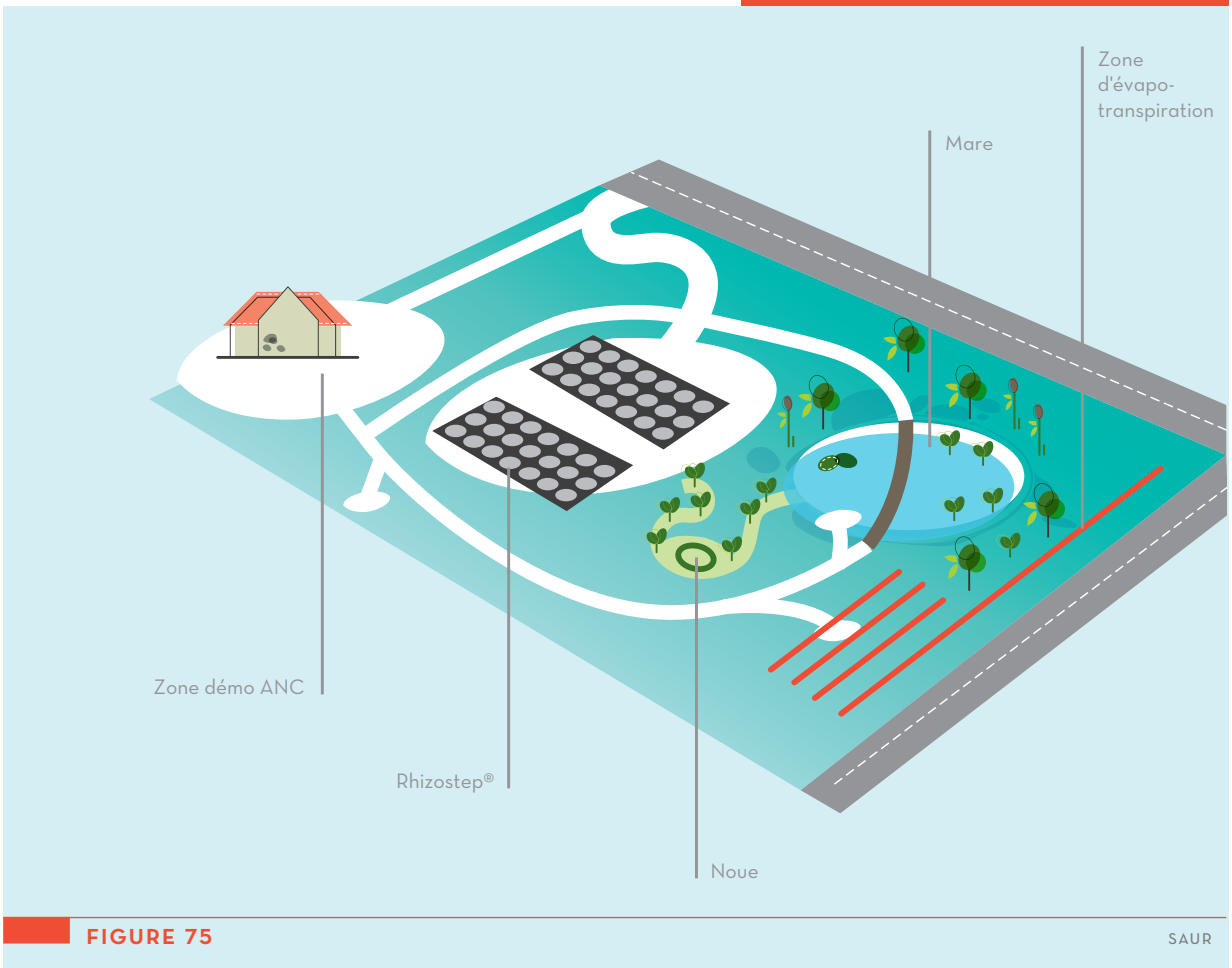


FIGURE 75 SAUR

2. PROCÉDÉ MIS EN JEU

Saur développe les lits plantés de roseaux Rhizostep® adaptés aux rejets de 50 à 2 000 équivalents habitants. Ce procédé utilise les propriétés épuratoires du sol comme moyen de traitement des effluents bruts. Des massifs plantés de roseaux (lits Rhizostep®) assurent une filtration naturelle. Le traitement des effluents s'effectue naturellement, sans ajout de réactifs chimiques et gravitairement. Grâce au plancher d'aération (blocs Rhizostep®), la surface de traitement est de 1 m^2 par équivalent-habitant. La partie visible de l'installation, composée de roseaux, s'intègre parfaitement au paysage.

Schéma des lits plantés de roseaux Rhizostep®

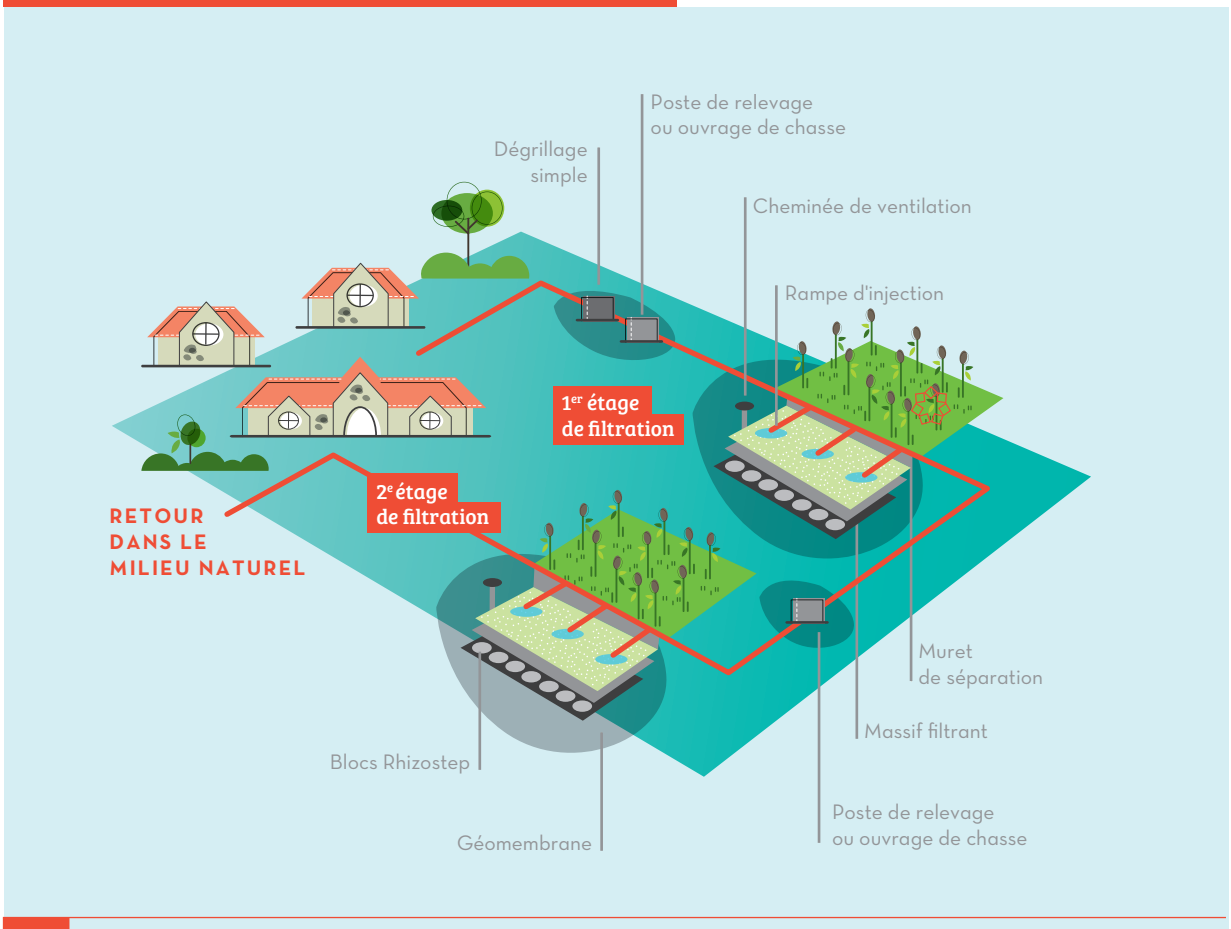


FIGURE 76

SAUR

Etapes d'installation des lits plantés de roseaux Rhizostep®

1. TERRASSEMENT DES BASSINS
2. POSE DES BLOCS RHIZOSTEP
3. MISE EN PLACE DES EQUIPEMENTS
4. DEVELOPPEMENT DES ROSEAUX ET SUIVI DE LA MINERALISATION

FIGURE 77

SAUR

3. UN « LABORATOIRE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE »

La STEP de Coutières permet à Saur d'analyser le fonctionnement dans le milieu naturel de la 4ième étape ajoutée à la Rhizostep. Cette nouvelle étape a pour but d'améliorer la qualité des eaux et leur infiltration par cette zone jusqu'à atteindre un « O rejet ».

Après épuration sur roseaux, les eaux usées de la commune et les eaux pluviales de l'éco-lotissement sont recueillies dans une noue puis s'écoulent vers une zone humide entourée d'une jachère fleurie et d'un verger. L'eau circule ensuite dans un fossé en forme de serpentin de 120 m, zone d'évapotranspiration végétalisée par deux rangées de saules plantés de part et d'autre du fossé. Le but de ce fossé est d'avoir « O rejet » en été.

Un projet de la direction Recherche et Développement de Saur va permettre de suivre sur deux ans la qualité des eaux dans le sol et l'efficacité épuratoire de la zone humide. La mission à mener consiste à porter un regard technique bien renseigné sur ce type d'équipement pour lequel la nature du sol et le choix des essences de plantes est déterminant pour un fonctionnement optimal. Ces recherches visent aussi à dresser un bilan hydraulique de la part d'évapotranspiration effectuée par les végétaux et à analyser la qualité de l'eau filtrée et recyclée dans le milieu naturel.

Les objectifs sont :

- décomposer le zéro rejet en parts évaporée, évapotranspirée et infiltrée ;
- connaître les parts respectives du sol et du sous-sol d'un côté et des végétaux de l'autre dans l'épuration des eaux usées (analyses d'eaux, de sols et de végétaux) ;
- établir un dimensionnement des ZRV correspondant au mieux à la nature du sol, à la qualité des eaux usées, au climat et aux végétaux utilisés.

4. SUIVI RÉALISÉ

La qualité de la nappe souterraine représente le principal enjeu. Pour suivre l'impact de l'infiltration des eaux traitées de la station, l'évolution de la qualité de l'eau suivant différents niveaux de profondeurs est suivie. Ce suivi est réalisé en mesurant la conductivité de l'eau souterraine en fonction des profondeurs. Les mesures sont réalisées une fois par jour pour une durée de 1 an et demi.

Les résultats de ce suivi vont permettre d'améliorer le dimensionnement du fossé ainsi que sa forme.

Suivi en continu ImaGeau

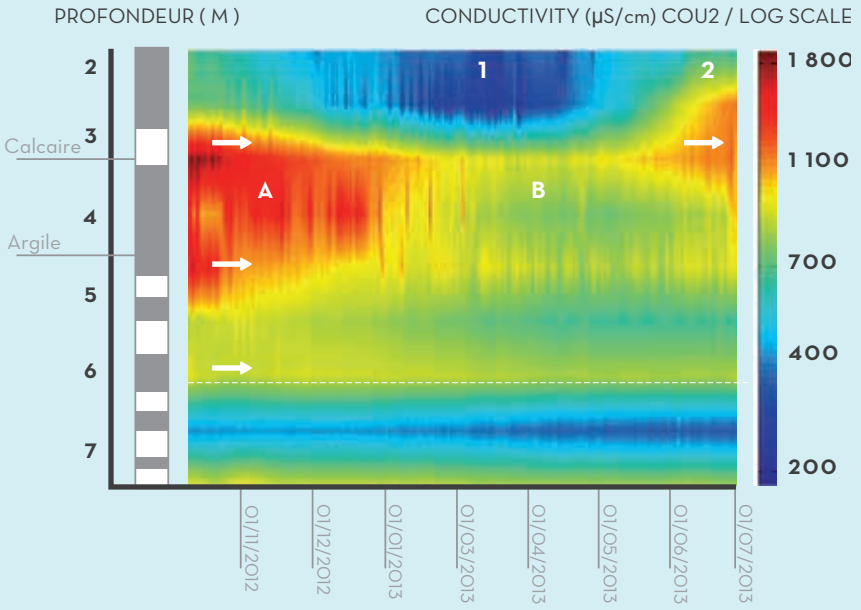


FIGURE 78 IMAGEAU

Le protocole de suivi :

Les outils imaGeau fournissent un suivi continu et en temps réel de la conductivité des eaux souterraines qui traduit l'efficacité d'épuration naturelle du sous-sol dans la zone d'évapotranspiration. Le réseau de surveillance se compose de 2 outils verticaux, chacun de 9 m de profondeur, équipés de 12 capteurs espacés de 70 cm et mesurant des données à la fréquence journalière. Ce suivi sera mis en parallèle avec des analyses en laboratoire faites sur des eaux souterraines prélevées sur des piézomètres en flute de pan qui permettent d'échantillonner les eaux de nappe à différentes profondeurs.

Les neuf mois de données déjà acquises permettent déjà d'observer l'infiltration d'eaux plus conductives dans les différents horizons du sol. L'eau à conductivité élevée circule au niveau de trois zones calcaires situées à 3,0/4,5/6,0 m de profondeur et qui sont logiquement drainantes par rapport aux argiles environnantes (flèches horizontales grises sur la **FIGURE 78**). Les eaux à conductivité élevée imprègnent progressivement les argiles situées entre ces venues d'eaux, en période automnale (A). La baisse de conductivité de la nappe se fait par les mêmes venues d'eau, douces cette fois-ci, au printemps (B). Aucune augmentation de la conductivité

des eaux n'est mesurée sur les deux dispositifs à partir de 6 m de profondeur (ligne noire en tiret sur les graphes). L'influence de l'infiltration est mise en évidence par l'entrée consécutive d'eau douce et d'eau à conductivité élevée au toit de la formation superficielle, respectivement visibles au niveau des zones 1 et 2 sur la **FIGURE 78**.

5. LA BIODIVERSITÉ MISE EN VALEUR

Un circuit pédagogique réalisé en partenariat avec le Syndicat, le CPIE et les équipes Saur, suit le parcours de l'eau. Il explique les étapes de traitement, les liens entre l'eau et la biodiversité, l'intérêt écologique des aménagements et intègre un espace d'exposition dédié aux filières de traitement d'assainissement non collectif.
Le CPIE disposant d'un atelier bois, tout le mobilier extérieur, et en particulier les gites à insectes, ont été réalisés sur place avec des essences locales. La biodiversité est au cœur de ce complexe, et s'il est trop tôt pour voir des abeilles solitaires ou autres insectes auxiliaires de culture venir butiner la jachère fleurie, les batraciens ont déjà investi la zone humide. Un verger fournira des pommes pour le jus de fruit du goûter des visiteurs, les saules fourniront quant à eux l'atelier Vannerie du CPIE. Ainsi, en collaboration avec le CPIE (Centre permanent d'initiatives pour l'environnement) de Gâtine Poitevine installé à Coutières, ce sont environ 10 000 visiteurs qui sont sensibilisés chaque année à l'importance de la préservation des écosystèmes.
Quelle que soit sa taille, une station peut devenir un moyen de développer la trame verte et bleue d'un territoire et devenir un outil pédagogique concret pour la collectivité.

ENTRETIEN

L'entretien se limite à la permutation hebdomadaire des lits Rhizostep®, à la gestion des espaces verts et au faucardage annuel.

QUE DEVIENNENT LES BOUES ?

Au bout de 5 à 7 ans, les bassins sont curés et les boues sont valorisées en agriculture.

GOUVERNANCE

Maître d'ouvrage: Société d'aménagement urbain et rural (Saur)
Maître d'œuvre:
Partenaires du projet :
· l'agence de l'eau Loire-Bretagne,
· Collectivité-Syndicat d'eau : Syndicat des Eaux de Gâtine
· IMAGEAU, bureau d'étude spécialisé, entre autre, dans le suivi de l'évolution de la qualité des eaux dans le sol et le sous-sol
· GINGER, pour réalisation des piézomètres et des sondages nécessaires à la mise en place des observatoires d'IMAGEAU
· Saur Recherche & Développement, intégration de l'ensemble des données, analyses d'eaux, de sol, de plantes, suivi du bilan hydrique
· Saur Exploitation, collaboration pour la mise en place et le suivi
· le Conseil général des Deux-Sèvres,
· le CPIE de Gâtine poitevine
Coût total : 79,5K€ TTC :
Financement : Saur

Prestation IMAGEAU sur six mois	43,0 K€ TTC
Sondages mise en place matériel	10,5 K€ TTC
Débitmètres, Chessel	9,8 K€ TTC
Analyses d'eau	12,0 K€ TTC
Déplacements stagiaire	1,8 K€ TTC
Salaire stagiaire	2,4 K€ TTC
Coût total de l'étude	79,5 K€ TTC

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

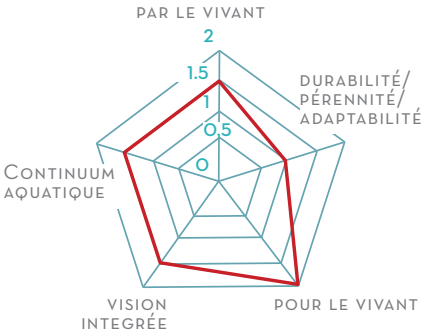


FIGURE 79

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN: RHIN-MEUSE
RÉGION: ALSACE
DÉPARTEMENT: HAUT-RHIN
COMMUNE: LIEBSDORF

FICHE 2

Des noues plantées comme zones de rejet végétalisées à Liebsdorf

1. QUELQUES ÉLÉMENTS DE CONTEXTE

Sur le bassin Rhin-Meuse, l'Agence de l'eau soutient fortement une politique de préservation des zones humides notamment pour les fonctions qu'elles rendent gratuitement, et de recréation/restauration de zones humides face au constat de disparition ou de dégradation de ces milieux particuliers. En ce sens, une politique émerge, celle de créer des zones humides dites «tampons» entre le milieu naturel et divers points de rejets (stations d'épuration, déversoirs d'orage, drains agricoles, etc.). Ces zones de rejet végétalisées visent donc à apporter un complément de filtration mais aussi à limiter les pressions sur le milieu et les berges de ces points de rejets (enrochements, éléments bétons, etc.).
L'objectif est de pouvoir adapter des systèmes rustiques, non dimensionnés, mais les plus vastes possibles, pouvant être généralisés à tous les dossiers.
Les zones de rejet végétalisées doivent avant tout constituer des objets rustiques avec une diversité maximale de formes, fonds et berges, peu coûteux et adaptables à tout rejet.

Sur le bassin, une cinquantaine de ZRV sont en fonction et une centaine sont en cours de réalisation ou sont en projet.

2. PRÉSENTATION D'UN EXEMPLE : LIEBSDORF (68)

La station d'épuration de Liebsdorf est constituée de deux étages verticaux de filtres plantés de roseaux, de capacité 350EH.

Les caractéristiques de la ZRV sont les suivantes :

- 2 noues de 35ml plantées et boisées ;
- Plantations d'arbustes sur les berges ;
- Plantations d'hélophytes dans le fond de la noue ;
- Pas d'étanchéification ;
- Dispositif de mesure en entrée et sortie de noue.

1ER ÉTAGE DU FLTRE PLANTÉ DE ROSEAUX EN NOVEMBRE 2009

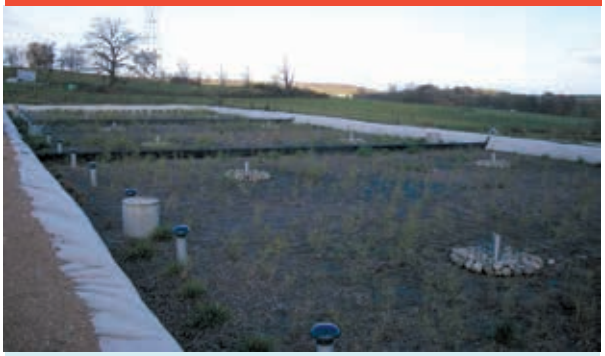


FIGURE 80 AGENCE DE L'EAU RHIN-MEUSE

3. SUIVI ET RÉSULTATS

Le suivi a mis en évidence un abattement en flux notable sur les paramètres suivants principalement : DBO_5 (>25%), DCO (>35%), MES (>20%) et NH_4 (environ 20%). Il est toutefois aussi noté un abattement de NK, NGL et Pt.

STEP DE LIEBSDORF EN MAI 2011

FIGURE 81 AGENCE DE L'EAU RHIN-MEUSE

REJET DE LA STEP DE LIEBSDORF EN MAI 2011

FIGURE 82 AGENCE DE L'EAU RHIN-MEUSE

4. ENTRETIEN

Le site ne nécessite pas d'interventions fréquentes, mais un suivi dans la durée pour éviter le comblement de la zone de rejet végétalisée.

GOUVERNANCE

Maître d'ouvrage: Liebsdorf
Maître d'œuvre: Emch+Berger
Coûts : Installation : 6 000€ pour l'aménagement de la noue (terrassements + plantation) et 2 700€ pour le système de mesure de débit en sortie de noue
STEP : 268 000 €
Partenaires : CG68 pour le suivi de fonctionnement
Financeurs : Agence de l'eau Rhin-Meuse

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

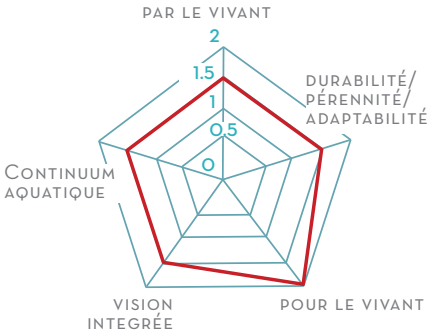


FIGURE 83

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

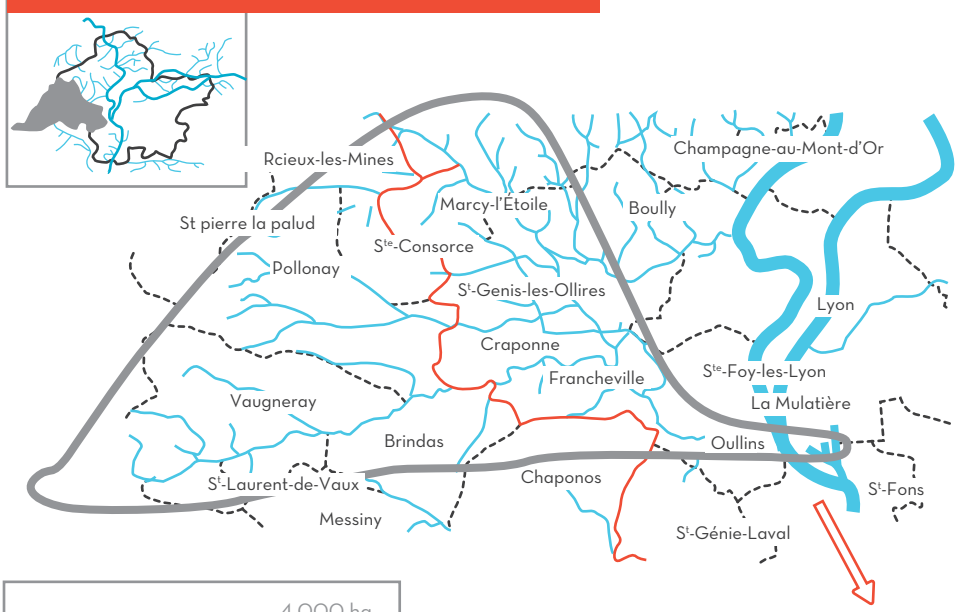
BASSIN: RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE
RÉGION: RHÔNE-ALPES
DÉPARTEMENT: RHÔNE
COMMUNE: CRAPONNE, MARCY L'ETOILE

FICHE 3

Systèmes extensifs pour la gestion et le traitement des eaux urbaines de temps de pluie

Une première étude de diagnostic réalisée par le Grand Lyon sur le bassin de l'Yzeron a mis en lumière la vétusté et le mauvais état du collecteur d'assainissement, la dégradation de la qualité de la rivière sur certains tronçons et les mises en charge des réseaux lors des fortes pluies.

SITUATION DU BASSIN VERSANT DE L'YZERON



4 000 ha
14 communes raccordées (6 hors GL)
Env. 150 000 Équivalent habitants

RÉSEAU UTILITAIRE ALLANT VERS LA STATION D'ÉPURATION À PIERRE BÉNITE

FIGURE 84

Afin de régler ces dysfonctionnements et atteindre les objectifs fixés par la DCE, la Direction de l'eau a d'abord envisagé le doublement du collecteur sur 7 km de Oullins jusqu'à Francheville. En 2002, le diagnostic a été complété par une modélisation du fonctionnement du système d'assainissement sur l'ensemble du bassin versant. Cette étude complémentaire a révélé que les problèmes de capacité étaient beaucoup plus importants que ce qui était prévu et qu'ils touchaient tout le bassin versant. Le projet de doublement a, par conséquent, été revu et l'enveloppe budgétaire est alors passée de 18 millions d'euros à 41 millions d'euros. Compte tenu du montant des travaux envisagés et de leur ampleur, il a été décidé de compléter les études pour rechercher des solutions sur l'ensemble du bassin versant de l'Yzeron et optimiser ainsi les financements.

Une nouvelle stratégie a ainsi été étudiée :

- retenir les eaux sur les zones "amont", là où il reste des possibilités foncières :
  - soit par le biais de bassins enterrés ;
  - soit par le biais de traitements sur les déversoirs d'orage.
- évacuer au plus vite les eaux sur les zones les plus à l'aval et les plus urbanisées : par le biais d'optimisation et restructuration de l'existant couplé potentiellement à un nouveau collecteur.

Vingt-sept scenarii ont été étudiés et ils ont tous fait l'objet d'une modélisation et d'une analyse multicritères. Le choix technique suivant a été retenu.

Choix technique issus de l'étude de faisabilité et d'avant-projet

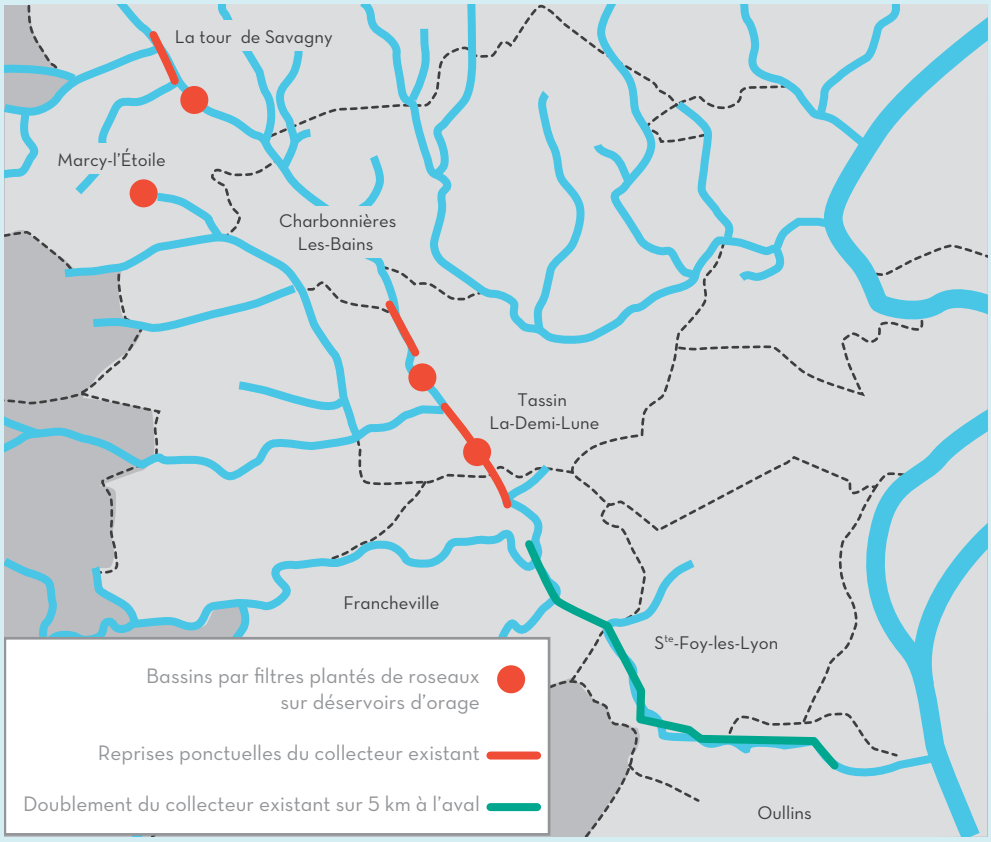


FIGURE 85

Quatre bassins par filtres plantés de roseaux sur déversoirs d'orage devront être installés sur le bassin versant de l'Yzeron (20 potentiels sur l'enemble des bassins versants du Grand Lyon). Pour concevoir et dimensionner les aménagements, le Grand Lyon a participé à un programme de recherche sur les Systèmes Extensifs de Gestion et de Traitement des Eaux Urbaines de temps de pluie (SEGTEUP) réunissant 7 partenaires entre 2009 et 2013. Ce projet doit répondre à la problématique de la gestion des eaux pluviales et des surverses de déversoir d'orage, responsables d'une part importante des flux de polluants déversés dans le milieu récepteur. Il vise à développer, optimiser et valider un procédé original et insuffisamment maîtrisé de traitement extensif des eaux urbaines de temps de pluie : les filtres plantés de roseaux. Cela passe par le suivi des performances de ce procédé en termes de tampon hydraulique et d'épuration des composés dits classiques (DCO, DBO, MES, azote, phosphore), et de certains composés spécifiques (métaux, hydrocarbures, pesticides, etc.) en fonction de paramètres de gestion et de dimensionnement.

1. LES FILTRES PLANTÉS À ÉCOULEMENT VERTICAL : UN SYSTÈME ADAPTÉ À LA GESTION DE DÉBITS IRRÉGULIERS

Le procédé des filtres plantés à écoulement vertical a été choisi pour la réalisation du programme de recherche car il comporte l'avantage de pouvoir accepter une part importante des variations de charges hydrauliques induites par les eaux pluviales tout en garantissant l'étape de filtration en limitant le by-pass d'eaux non traitées. Il combine, dans un même bassin, une partie traitement qui s'appuie sur le passage maîtrisé de l'eau au travers des différentes couches de granulats du massif filtrant et une capacité de stockage semblable à celle d'une lagune.

COMBINAISON DE 2 FONCTIONS : RÉTENTION + TRAITEMENT EN UN SEUL OUVRAGE

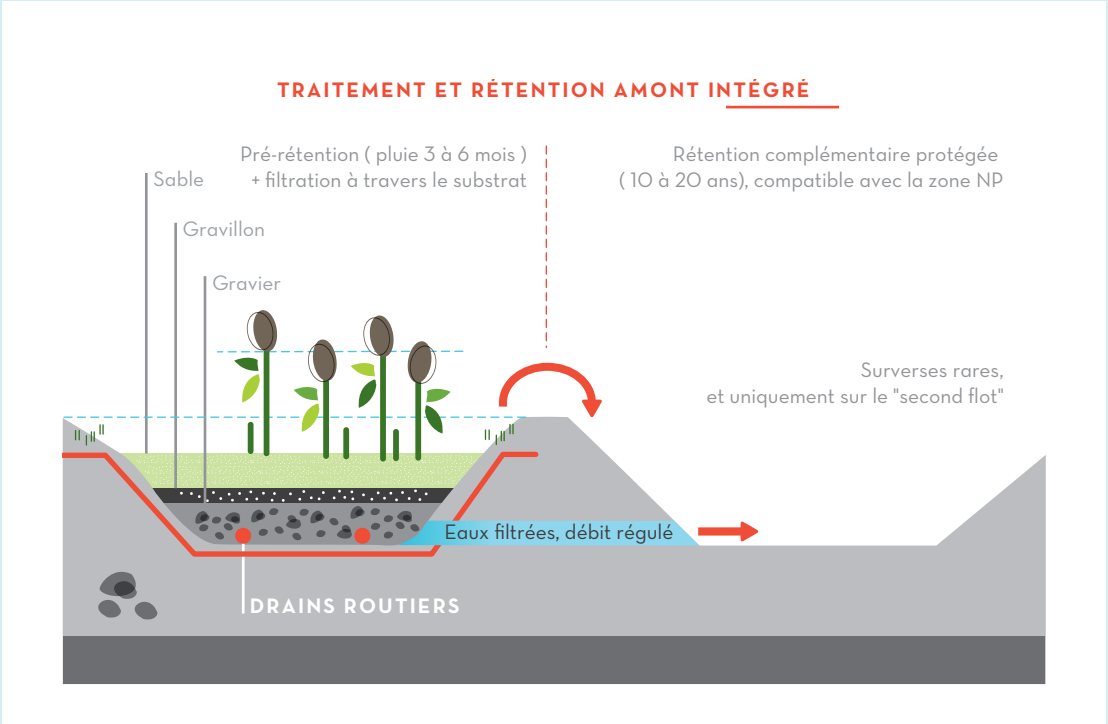


FIGURE 86

Le principe repose sur la filtration, l'adsorption et la dégradation biologique au travers d'un granulat spécifique. Le débit de drainage est calibré de manière à maîtriser les temps de séjour et assurer un rôle de tampon hydraulique. Les roseaux présentent plusieurs avantages, ils :

- empêchent le colmatage, et autorisent donc une alimentation en eaux usées brutes sous réserve d'adaptation du matériau filtrant (stockage des dépôts sur plus de 10 ans) ;
- favorisent le développement des bactéries impliquées dans les processus épuratoires ;
- favorisent la décantation des particules, pas de risque de remise en suspension des polluants.

Le système des filtres plantés à écoulement vertical pour le traitement des eaux urbaines de temps de pluie a été étudié notamment en Allemagne (Uhl *et al.*, 2005). Le programme propose des voies d'amélioration du système allemand en ce qui concerne :

- l'optimisation du matériau de filtration ;
- la définition des limites hydrauliques du système (charge et fréquence) ;
- l'optimisation de la gestion pour garantir les niveaux de performances.

Le système testé dans le programme SEGTEUP présente les différences de conception et de fonctionnement suivantes :

- absence de prétraitement (sédimentation) pour s'affranchir d'une gestion de boues liquides et de la présence d'eaux stagnantes dans le système. L'objectif, en adaptant le granulat de filtration, est d'utiliser le rôle décolmatant des roseaux de manière identique à ce qui est réalisé avec succès en traitement des eaux usées domestiques (Molle *et al.*, 2005 ; Molle *et al.*, 2006) voire en traitement des boues (Troesch *et al.*, 2009).
- mise en place d'une réserve hydrique en fond de filtre pour assurer une fourniture en eau aux roseaux, par capillarité, lors des périodes d'assecs.
- mise en place d'une aération intermédiaire au-dessus de la réserve hydrique.

Outre les aspects techniques liés à l'ouvrage lui-même, le projet vise également à définir les règles d'adaptation du dimensionnement des ouvrages aux différents hydrogrammes rencontrés sur le territoire français ainsi qu'à définir les facteurs d'acceptation sociale de ces types d'ouvrages, ouverts au publique, aussi bien pour les riverains que les gestionnaires.

2. UNE EXPÉRIMENTATION EN 2 PHASES

L'étude est menée en pilotes de taille importante, sous conditions contrôlées, et en taille réelle de manière à pouvoir comparer différents dimensionnements tout en incluant un facteur d'échelle et la réalité de fonctionnement des systèmes. Il a abordé les questions de dimensionnement, comme la modélisation du couple réseau/système de traitement aux différents contextes climatiques français.

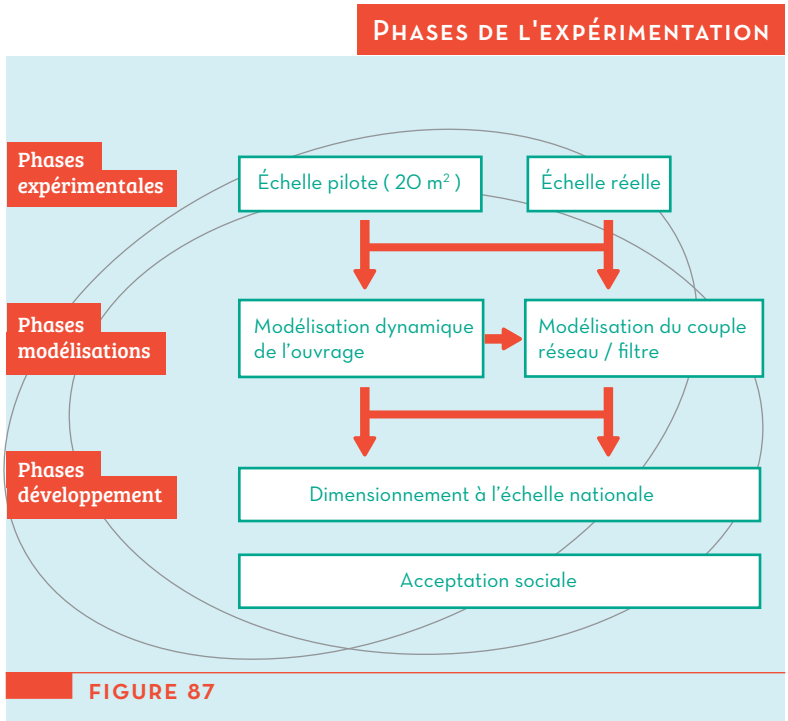


FIGURE 87

L'étude est prévue en deux phases :

• une phase d'**expérimentations sur pilotes** pour étudier différents paramètres de conception en conditions contrôlées afin d'appréhender les limites des systèmes en relation avec des facteurs clés de leur conception. Compte tenu de la difficulté d'extrapoler des études réalisées à petite échelle aux conditions en taille réelle, le choix a été de travailler sur des pilotes de surface unitaire de 20 m^2. Ces sites pilotes sont alimentés par un bassin de stockage des eaux pluviales de 200 m^3 de façon à reproduire de manière identique différents épisodes pluvieux sur l'ensemble des pilotes.

• une phase d'**expérimentation en taille réelle**, de manière à intégrer un facteur d'échelle ainsi qu'un fonctionnement en conditions réelles (charges non maîtrisées, maintenance du système, etc.). Cette expérimentation en taille réelle est effectuée sur un bassin versant périurbain de l'ouest Lyonnais à Marcy l'Etoile (Grand Lyon). Il s'étend sur une surface de 530 m^2 et présente une capacité de stockage 1 200 m^3.

LES PILOTES

FIGURE 88

Fonctionnement de l'installation

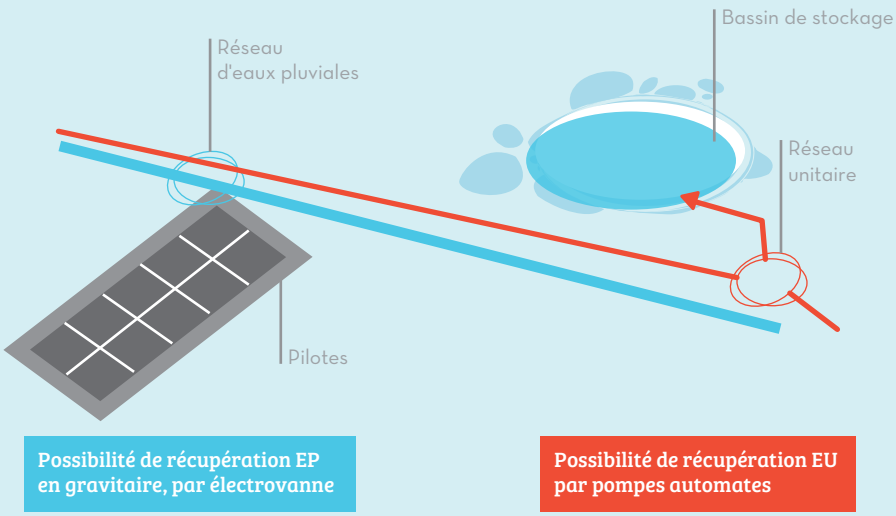


FIGURE 89

3. LES PREMIERS RÉSULTATS OBTENUS

Les résultats montrent un bon abattement de la DCO pour tous les pilotes, liés essentiellement à la rétention des MES (90 % des particules > 15 µm, quel que soit le matériau filtrant) dans le substrat. À partir des charges > 10 g N-NH4 m^2 h-1, il y a une forte différenciation des performances sur l'ammonium. Les rendements dépassent 95 % pour le meilleur matériau.

Les mesures d'entretien nécessaires seront à évaluer sur le site à taille réelle. Pour le moment, il n'y a pas assez de recul pour les définir même si un retrait des espèces non désirées et un entretien des canalisations est déjà à prévoir.

Rôles des différents partenaires scientifiques

- IRSTEA :
  - o Coordination du projet
  - o Suivi expérimental et modélisation des systèmes
- INSA Valor, LGCIE (Laboratoire de Génie Civil et Ingénierie Environnementale) :
  - o Modélisation couple réseau/filtres
  - o Acceptation sociale
- Grand Lyon :
  - o Maître d'œuvre/maître d'ouvrage
- Epur Nature, SINT (société d'ingénierie nature et technique)
  - o Construction pilotes
  - o Faisabilité du transfert industriel
- GRAIE :
  - o Animation – Valorisation scientifique

4. QUELLES PERSPECTIVES APRÈS 21013 ?

Un guide a été publié en octobre 2013 et la construction d'un nouveau site est prévue pour 2014. Les expérimentations du programme SEGTEUP sont poursuivies sur le site de Marcy l'Etoile dans le cadre du programme ADEPTE (Aide au dimensionnement pour la gestion des Eaux Pluviales par Traitement Extensif). Ce projet fait partie des projets innovants retenus dans le domaine de l'ingénierie écologique dans le cadre de la Stratégie National pour la Biodiversité 2011-2020. Ce projet prévoit le développement d'un logiciel, complété par un guide d'aide à la conception-exploitation, à destination des acteurs économiques et des collectivités confrontés au choix d'ouvrage de gestion quantitative et qualitative de l'assainissement pluvial en milieu urbain.

GOUVERNANCE

Maître d'ouvrage: Grand Lyon
Assistance à maitrise d'ouvrage : IRSTEA
Maître d'œuvre: Site pilote : Epur Natur / Site taille réelle : SINT
Coût total: 2 700 000 € HT
Financement:
ANR (Programme PRECODD) : 873 000 € HT
Grand Lyon : 640 000 € HT
IRSTEA : 150 000 € HT
INSA : 465 000 € HT
SINT : 67 000 € HT
Epur Natur : 426 000 € HT

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

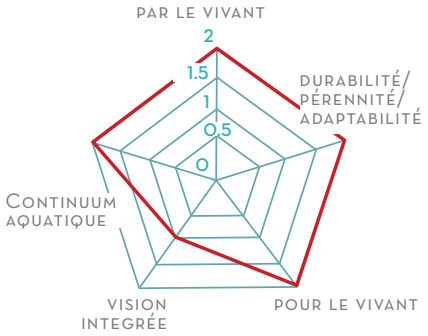


FIGURE 90

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

LIEU: MAYOTTE
COMMUNE : CHIRONGUI,
VILLAGE DE MALAMANI

FICHE 4

Mangroves et bioremédiation à Mayotte

1. BREF RAPPEL DU CONTEXTE DE L'ASSAINISSEMENT À MAYOTTE

A Mayotte, la compétence sur l'assainissement est exercée depuis 1998 par le Syndicat Intercommunal d'Eau et d'Assainissement de Mayotte (SIEAM) en lieu et place des communes de l'Archipel. Cependant, Mayotte connaît des difficultés pour le traitement de ses eaux usées, en particulier les eaux usées domestiques en raison de l'explosion démographique (plus forte densité de France avec 570 hab/km²) et des problèmes économiques, techniques, fonciers et environnementaux qui en découlent. De nombreux villages restent à assainir car les systèmes de traitement sont aujourd'hui déficients : manque de stations d'épuration, dysfonctionnement des stations existantes, problèmes de raccordement des habitations au réseau, etc. De plus, les méthodes conventionnelles de traitement des eaux usées sont particulièrement coûteuses et difficiles à mettre en oeuvre dans un contexte tropicale insulaire, éloigné de la métropole. La sensibilité particulière des milieux récepteurs à Mayotte (lagons, sous-sols, rivières, mangroves) est également une des difficultés majeures rencontrée pour la réalisation des systèmes d'assainissement. La réalisation d'un schéma directeur d'assainissement sur l'île est donc problématique.

Aujourd'hui, une grande partie des eaux usées de Mayotte s'écoule librement dans l'immense lagon qui l'entoure, environnement riche en biodiversité et fragile, sans réel traitement préalable. La première démarche de protection de l'île et de son lagon consiste donc à traiter les eaux usées de manière efficace, afin de préserver durablement la qualité de l'écosystème dans sa globalité. Parallèlement à l'amélioration des stations d'épuration classiques (STEP), le SIEAM étudie depuis plusieurs années la mise en place de techniques de traitement des eaux usées domestiques alternatives, considérées comme plus adaptées au contexte mahorais : lagunage, filtre planté, biodisque. C'est dans ce cadre qu'en collaboration avec le laboratoire ECOLAB (CNRS et Université de Toulouse), un projet pilote d'assainissement basé sur les capacités épuratrices de la mangrove a été mis en place fin 2006.

Objectifs du projet

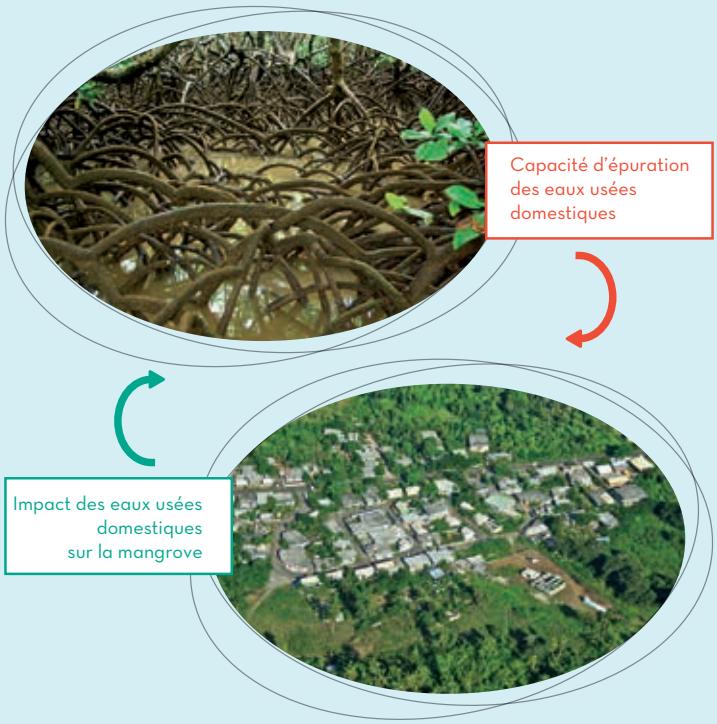


FIGURE 91 © ECOLAB - CNRS

Ce projet avait un double but :

- évaluer les capacités épuratrices de la mangrove de Mayotte vis-à-vis d'eaux usées domestiques prétraitées ;
- étudier l'impact de ces eaux usées sur l'écosystème mangrove dans son ensemble.

2. PRÉSENTATION DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le site de Malamani a été choisi conjointement par le SIEAM et le CNRS pour le déroulement de l'expérimentation, pour les raisons suivantes :

- un lotissement était en cours de mise en place au début du projet dans le cadre d'un plan RHI (Résorption de l'Habitat Insalubre) ;
- aucun dispositif d'assainissement classique n'était prévu dans ce cadre ;
- une mangrove, l'une des plus grandes et plus structurées de Mayotte, se développe directement en aval du village ;
- la taille prévue du lotissement permettait d'envisager une unité de traitement de taille raisonnable, compatible avec une expérimentation-pilote (400 équivalents-habitants) ;
- par ailleurs, seules des eaux usées domestiques issues du lotissement sont considérées, aucune pollution d'ordre industrielle ou agricole n'étant présente dans le secteur.

Dans un premier temps, un état initial du milieu a été réalisé (2006 - 2008) sous la forme d'une étude structurale et fonctionnelle de la mangrove prenant en compte les quatre compartiments indissociables de cet écosystème : végétation, sédiment, eau, faune (crabes). Sur le site, 4 parcelles de 675 m^2 chacune ont été délimitées pour l'expérimentation : 2 parcelles recevant les eaux usées dans 2 faciès distincts de la mangrove, respectivement dominées par les palétuviers *Ceriops tagal* (partie amont de la mangrove) et *Rhizophora mucronata* (partie centrale), et 2 parcelles témoins équivalentes. Une cinquième parcelle a été mise en place dans un deuxième temps, destinée à recevoir les excédents d'eaux importants en saisons des pluies, du fait de l'imparfaite étanchéité des réseaux.

Représentation du dispositif expérimental de Malamani

FIGURE 92

Le traitement des eaux usées se réalise en 2 étapes :

- le traitement primaire, en décanteur-digesteur ;
- le traitement secondaire, en mangrove.

1. L'unité de traitement primaire

En aval du lotissement de Malamani, un poste de relevage assure le pompage des eaux brutes provenant du réseau de collecte vers l'unité de traitement.

La cuve de réception régule le flux des eaux entrant dans le décanteur, par écoulement laminaire (cuve bleue sur la photo). Les sédiments en suspension se déposent sur un système de lames et s'écoulent vers le décanteur-digesteur sous forme de boues liquides, puis sont traités par digestion anaérobie. Les boues primaires produites sont vidangées par camion hydrocureur et réinjectées en tête de la station d'épuration de la ville de Mamoudzou.

Les effluents décantés sont stockés dans un bassin tampon (cuve blanche), avant le transfert vers la mangrove par un système de canalisation.

Unité de traitement primaire

BASSIN TAMPON

Régule le débit d'émission des effluents vers la mangrove. Les conditions de stockage sont anaérobies et le temps de séjour maximal est de 24h.

CUVE DE RÉCEPTION

Cuve fermée servant à réduire la vitesse du flux entrant et favorisant un écoulement laminaire de l'eau au sein du décanteur.

DÉCANTEUR

Permet de réduire de 50% les matières en suspension (MES). Temps de séjour < à 3h afin de limiter le développement bactérien.

FIGURE 93

2. Traitement secondaire

Les eaux usées prétraitées sont conduites en mangrove une fois par 24 heures, soit toutes les 2 marées basses afin d'éviter une saturation trop rapide du milieu. Elles sont rejetées dans les parcelles au moyen de tuyaux perforés, par aspersion lente, afin de favoriser l'infiltration dans le sédiment. La dynamique des rejets est programmée sur une année en fonction du régime des marées (systèmes de débitmètres, pompes, vannes, tableaux de contrôle). Chaque parcelle reçoit 10 m^3 d'eaux usées par 24 heures, l'excédent étant rejeté dans la 5ème parcelle.

PARCELLE IMPACTÉE À *RHIZOPHORA*, MARÉE HAUTE

FIGURE 94

Les eaux usées sont conduites en mangrove par un réseau aérien de tuyaux (au-dessus du niveau des marées les plus hautes), percés de trous tous les 2 mètres dans les parcelles d'étude. Les eaux usées y sont rejetées à marée basse, à raison de 10 m^3 par 24 heures. Surface d'une parcelle : 675 m^2.

SUIVIS ET RÉSULTATS

Les différents compartiments de l'écosystème mangrove ont été suivis dans cette expérimentation, dans le cadre d'une thèse intitulée : évaluation des capacités bioremédiatrices d'une mangrove impactée par des eaux usées domestiques. Application au site de Malamani, Mayotte. (M. Herteman 2010, ECOLAB Toulouse). La dimension sociologique des changements d'usage par la population a également été étudiée dans le cadre d'un projet spécifique associé (GET Toulouse).

Rôle des crabes et bioturbation :

Les sols vaseux des mangroves ont une perméabilité très faible, voir nulle. C'est essentiellement grâce aux terriers de crabes que les eaux de surface peuvent s'infiltrer. Les suivis réalisés ont consisté à :

- caractériser la macro-porosité du sédiment par le biais de moulages en résine des terriers de crabes, dans les différents faciès de végétation afin d'obtenir la profondeur, le volume et la longueur des galeries ;
- réaliser des inventaires des crabes présents en mangrove pour caractériser leur diversité, leur densité, ainsi que la densité des terriers.

Dans les faciès impactés, on observe une modification progressive de la structure de la communauté de crabes par rapport aux faciès témoins équivalents : les effectifs de certaines espèces diminuent, alors que d'autres augmentent, la densité des terriers semble aussi diminuer, ces différentes modifications étant variables selon les faciès de mangrove. En parallèle, la litière accumulée au sol est plus importante dans le faciès impacté à *Rhizophora*. Une fermeture de la canopée par augmentation de la biomasse foliaire (voir ci-dessous), une diminution de la salinité des eaux de surface due aux apports d'eaux usées ou éventuellement l'apport de nutriments excédentaires peuvent être à l'origine de cette modification dans les communautés de crabes.

Impacts sur la végétation (quantification du gain de croissance des palétuviers) :

Dans les parcelles impactées par les eaux usées, il a été observé :

- une augmentation significative de l'efficacité photosynthétique des palétuviers (mesures *in situ* d'échanges gazeux) ;
- une augmentation significative de la concentration en pigments chlorophylliens ;
- une augmentation des surfaces foliaires et de la croissance des rameaux ;
- une augmentation de la productivité (mesures en continu des chutes de litières depuis le début de l'expérimentation) ;
- une fermeture progressive de la canopée.

Moulages en résine de terriers de crabe, extraction en cours (A) et après extraction (B). Faciès de mangrove à Ceriops dominant.

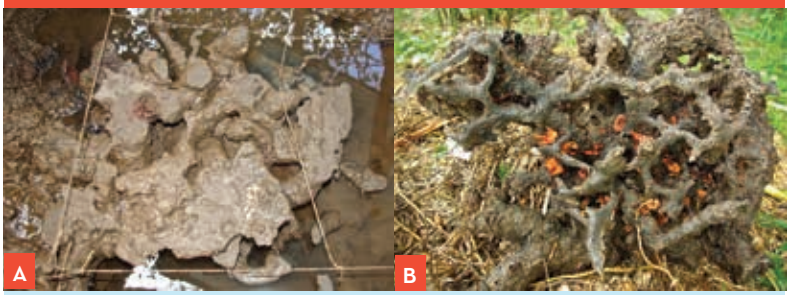


FIGURE 95

© ECOLAB-CNRS

L'ensemble de ces résultats révèle clairement une augmentation de croissance de la mangrove. Les parcelles impactées sont ainsi parfaitement visibles en vue aérienne, marquées par une coloration vert foncé qui se distingue de la couleur vert plus clair de la végétation témoin.

Par ailleurs, des expérimentations utilisant de l'azote marqué 15N ont permis de démontrer que les eaux usées, après infiltration dans le sédiment, étaient au moins en partie absorbées par la végétation et l'azote utilisé par les palétuviers. Dans la configuration actuelle du système, on évalue à 50% le taux de rétention par la végétation de l'azote excédentaire apportée par les eaux usées.

D'autre part, des analyses *in situ* et en laboratoire, ont démontré que le phosphore excédentaire est fixé dans les horizons moyens des sédiments, et ne circule pas dans la nappe.

Photo aérienne du site d'étude. En vert foncé, l'emplacement des parcelles impactées.

FIGURE 96

Les principaux résultats de cette expérience pilote, aujourd'hui toujours en cours, montrent que :

- les processus de nitrification/dénitrification sont actifs en mangrove mais variables selon les faciès de végétation ;
- le rôle des crabes, par le biais de la bioturbation qu'ils provoquent, est essentiel dans le développement de ces processus, ainsi que dans l'efficacité de l'infiltration des eaux dans le sédiment ;
- les eaux usées sont au moins en partie absorbées par la végétation de la mangrove (palétuviers) qui réagit par une croissance accrue et une augmentation de sa productivité ;
- l'apport des eaux usées engendre cependant des modifications dans l'assemblage des communautés de crabes, et induit par ailleurs un stockage du phosphore dans le sédiment.

Le suivi de la dynamique des communautés de crabes, de la productivité de la végétation, et des caractéristiques hydriques des parcelles témoins et impactées se poursuit aujourd'hui, de même que des analyses régulières des populations bactériennes pathogènes (*E. coli* notamment) dans l'ensemble du système. Se développe également l'étude du compartiment microbien et des biofilms algaux (biodiversité, biomasse, perturbations apportées par les eaux usées, implications dans le cycle de l'azote). Dans un deuxième temps sont envisagées l'étude écophysiologique et écotoxicologique des populations de crabes, et une analyse plus large des communautés macrobenthiques. Enfin, une optimisation des processus de prétraitement dans et en sortie du décanteur est en cours d'étude, notamment pour agir sur la forme et la quantité des composés azotés avant leur rejet en mangrove.

DIMENSION SOCIOLOGIQUE DES CHANGEMENTS D'USAGE PAR LA POPULATION

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une thèse intitulée : « Vulnérabilité sociale face au risque de pollution de l'eau et politique d'assainissement en contexte insulaire : la problématique mahoraise » (A. Sturma, GET Toulouse).

Un travail d'enquêtes sociologiques a ainsi été mené auprès de 33 familles de Malamani, interviewées au début du projet puis à T + 6 mois et T + 18 mois, afin de mesurer les impacts de l'accès au dispositif d'assainissement dans leur vie quotidienne et sur leurs usages et leurs représentations des mangroves.

En première analyse, l'enquête montre la diversité des modes d'habitat dans le village et la disparité des situations sociales et des niveaux de vie des habitants. Une forte mobilité sociale dans l'occupation des logements raccordés a aussi été observée. Ce contexte peut expliquer la variabilité du volume d'effluents qui arrive sur les parcelles expérimentales, et implique une capacité contributive très hétérogène des ménages pour s'acquitter du prix de l'assainissement.

L'acceptation sociale du dispositif d'assainissement semble davantage liée à l'amélioration du confort de vie, qu'à des considérations sanitaires ou environnementales. Les représentations sociales de la mangrove sont plutôt négatives : c'est un milieu rarement fréquenté par les habitants du lotissement, jugé inintéressant et dangereux, loin d'être un espace devant être valorisé et protégé.

APPLICABILITÉ

Cette étude, débutée en 2007 et aujourd'hui toujours en cours a donc consisté d'une part à déterminer l'efficacité du traitement d'eaux usées domestiques par la mangrove, d'autre part à analyser l'impact de ces eaux usées sur l'ensemble de l'écosystème. Pour le premier point, on note un abattement important de la pollution des eaux (MES, DBO, etc.) dès la sortie du décanteur et une absorption de 50% de l'azote excédentaire par la mangrove, le phosphore restant lui fixé au substrat. Concernant la mangrove, une modification de la structure de l'écosystème est constatée (fermeture de la canopée, croissance accrue, modifications des communautés de crabes), sans perturbation fonctionnelle majeure de ses différents compartiments. Il faut s'assurer cependant de son évolution sur un plus long terme.

Un passage à un mode opérationnel pourrait alors être envisagé sachant que, comme pour tout processus de traitement des eaux, un suivi rigoureux du système est à assurer. Une mise en place de ce mode de traitement pourrait être étendue à d'autres mangroves à Mayotte, voire dans d'autres régions tropicales côtières ou insulaires, sous réserve d'une optimisation des systèmes et processus de traitement et de rejet selon les premières conclusions du suivi de Malamani. Il n'est pas envisageable cependant d'appliquer ce type de traitement pour des volumes d'eaux usées beaucoup plus importants, ainsi qu'à des eaux usées non domestiques.

De même, les changements d'usage sociétal de l'accès à l'eau courante et de son épuration doivent être réétudiés et adaptés dans chaque nouvelle localité. Même à quelques km de Malamani, les us et coutumes peuvent changer rapidement en fonction de l'origine et de la proportion des habitants (Mahorais, Malgaches, Comoriens, Métropolitains, etc.).

POUR EN SAVOIR PLUS

F. Fromard, ECOLAB CNRS Toulouse,
francois.fromard@univ-tlse3.fr
C. Riegel ; SIEAM Mayotte christophe.riegel@sieam.fr

GOUVERNANCE

Partenariat: CNRS-SIEAM
Comité de Pilotage constitué de représentants de la DEAL, du Conservatoire du Littoral et des Rivages Lacustres, de la Préfecture de Mayotte, du Conseil général, de l'ARS, le bureau d'études ESPACE, du Parc Marin Naturel de Mayotte, des communes concernées et d'associations mahoraises de protection de l'environnement.
Propriétaire du site : Conservatoire du Littoral
Coût global du projet: 470 k€, dont part recherche 158 k€ (hors bourse ANRT)
Financeurs :
SIEAM, ONEMA, MEDDT
CNRS : programme Ingénierie écologique INEE-CNRS (60k€), laboratoire ECOLAB,
ANRT : co-financement d'une allocation de recherche CIFRE en partenariat avec le SIEAM.

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

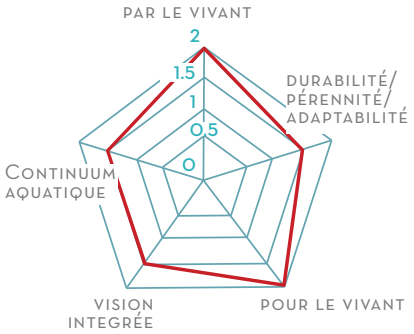


FIGURE 97

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN: RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE
RÉGION: LANGUEDOC ROUSSILLON
DÉPARTEMENT: HÉRAULT
COMMUNE: SAINT-JUST

FICHE 5

Création d'habitats humides en sortie de STEP pour le traitement des polluants émergents

Pour répondre à la problématique des polluants émergents (produits pharmaceutiques, cosmétiques, solvants, pesticides, etc.) et de leur dérivés de dégradation dans l'eau, la Lyonnaise des Eaux a conçu une zone de « liberté biologique et de lutte contre les polluants émergents » appelée aussi « zone Libellule ». L'objectif était d'associer différents milieux humides pour affiner le traitement des eaux usées rejetées dans le milieu. A l'heure actuelle, la réglementation n'impose rien en matière de traitement des polluants émergents. Cependant, la Lyonnaise des Eaux a souhaité tester l'efficacité de la biodiversité de ces différents habitats pour le traitement des micropolluants anticipant ainsi une modification de la réglementation en vigueur.

Lors du renouvellement de la station d'épuration de Saint-Just en 2009, la collectivité avait prévu d'installer une bambouseraie sur une superficie de 3 000 m², à l'aval de la station, mais elle a finalement accepté l'installation par Lyonnaise des Eaux de son nouveau concept de zone de rejet végétalisée sur 1.5 ha.

1. LA ZONE DE REJET VÉGÉTALISÉE

1.1. Fonctionnement de la zone de rejet végétalisée

La STEP d'une capacité de 5 000 EH reçoit les effluents des communes de Saint-Just (34) et de Saint-Nazaire de Pézan (34). Après traitement, les eaux sont rejetées dans la zone Libellule. L'eau circule ensuite à travers différents types de milieux humides (7 au total) plus ou moins profonds, plus ou moins méandreux, qui se succèdent. La variabilité des vitesses d'écoulement, des profondeurs d'eau et des espèces présentes doivent permettre d'améliorer le traitement de l'eau, de renforcer la biodiversité locale et de créer une zone tampon entre la station d'épuration et le milieu naturel. Les rejets en sortie de STEP étant conformes aux normes de rejet, le sol n'a pas été imperméabilisé.

1.2. Réalisation de la zone de rejet végétalisée

Pour créer les différents habitats, il a fallu inverser les pentes pour faire couler l'eau dans le sens souhaité. Le site a été pré-planté avec un total de 7 000 plants représentant 35 espèces différentes. Ces différentes espèces locales ont été choisies pour leurs capacités naturelles à absorber certains polluants.

Schéma de la zone Libellule

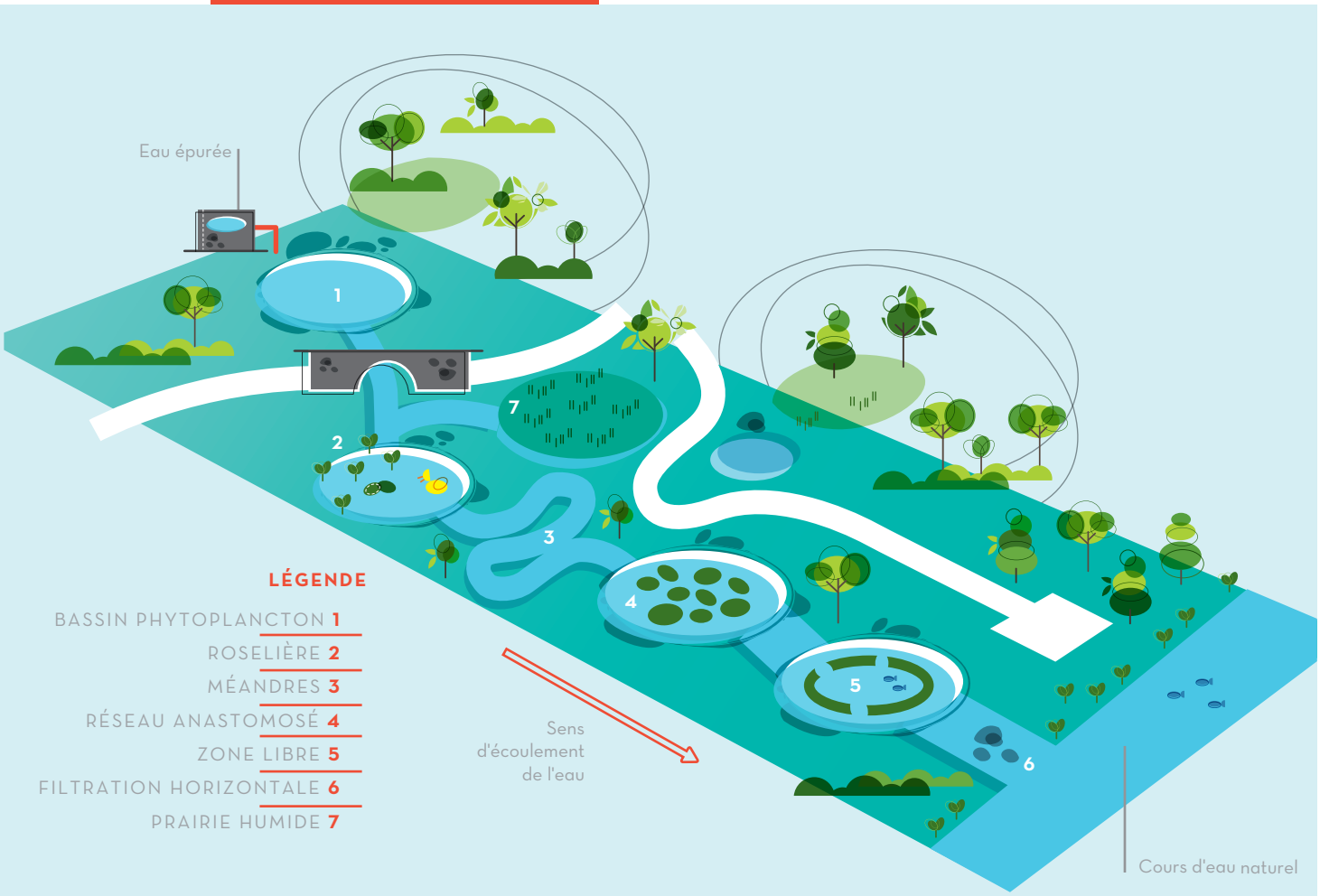


FIGURE 98

LYONNAISE DES EAUX

VUE DES MÉANDRES ET DE LA ZONE DELTA DE LA ZONE LIBELLULE

FIGURE 99 LYONNAISE DES EAUX

VUE D'ENSEMBLE DE LA ZONE LIBELLULE

FIGURE 100 LYONNAISE DES EAUX

2. LE SUIVI SCIENTIFIQUE

L'objectif de l'étude scientifique, qui a duré 3 ans, était d'évaluer la capacité de traitement complémentaire de la zone de rejet végétalisée et d'apprécier l'intérêt environnemental sur le patrimoine naturel local. Plus de 30 protocoles expérimentaux ont été développés pour le suivi de cette zone de rejet végétalisée, allant du suivi photographique au traçage par terre rare, en passant par le suivi du développement de la biomasse, des pertes de charges végétales, ou encore des orthoptères et des odonates...

Plus de 800 paramètres ont été mesurés pendant 3 années et plus de 6,5 millions de données collectées, dans des domaines très différents comme :

- la météorologie : vent, température, ensoleillement, etc. ;
- l'écologie : flore, faune et microfaune, etc. ;
- la qualité de l'eau : physico-chimie, micropolluants, bactériologie, etc.

3. MESURES D'ENTRETIEN DIFFÉRENCIÉ

Le site a été entretenu régulièrement pour conserver son fonctionnement hydraulique. En effet, le développement excessif de certaines plantes a entrainé la formation de bouchons hydrauliques. De même, des actions ont été menées contre les plantes invasives qui se sont installées sur le site. Enfin, une fauche tardive a été réalisée tous les ans en préservant le cycle de floraison et de pollinisation.

Trois types de mesures d'entretien ont été mises en place :

- ponctuelles : ex. lutte contre les invasifs ;
- routinières : ex. désherbage localisé, fauchage tardif ;
- sur intervention : ex. le retrait de bouchons hydrauliques.

4. RÉSULTATS

4.1. Micropolluants

Quinze campagnes de mesures ont été réalisées sur la période 2009-2012. Les mesures ont été faites en entrée et en sortie de la zone Libellule et elles ont permis d'établir les constats suivants :

- les concentrations en micropolluants rejetés par la station d'épuration, qui ne reçoit que des effluents domestiques, sont relativement faibles ;
- en moyenne, 195 molécules ont été décelées en entrée sur 317 recherchées soit 61.5% ;
- des effets majeurs ont été constatés sur des perturbateurs endocriniens comme les alkyl phénols issus des résidus de détergents, sur des médicaments comme les antibiotiques, le Diclofénac, le Naproxène, ou encore certains pesticides, avec des réductions de plus de 80% en concentration dans l'eau ;
- 81 % des molécules quantifiées ont été éliminées significativement (> 30%), dont plus de la moitié à plus de 70 % d'abattement.

Globalement, en tenant compte de l'ensemble des flux hydrauliques (alimentation, évaporation, infiltration, rejet), la Zone Libellule permet de réduire de plus de 80% le flux de molécules rejetées à la rivière, notamment sur les micropolluants.

Bilan des abbattements en micropolluants organiques entre l'entrée et la sortie de la zone Libellule

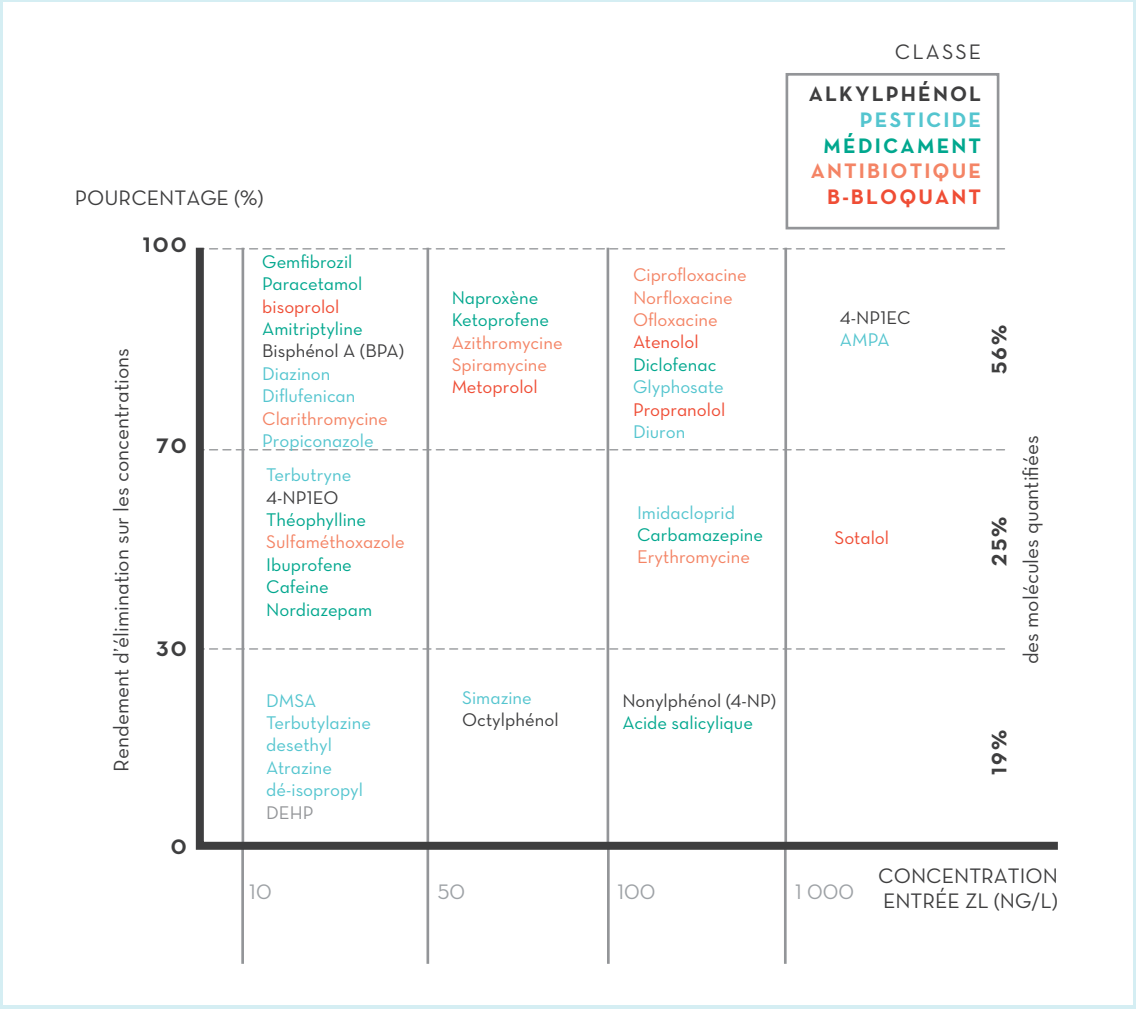


FIGURE 101 — LYONNAISE DES EAUX

4.2. Végétation

Au bout de 3 ans, environ 143 espèces aquatiques et terrestres ont été inventoriées, parmi lesquelles toutes les espèces plantées initialement ont été retrouvées, sauf 2.

4.3. Qualité physico-chimique

Une amélioration globale a été observée tant sur la qualité de l'eau au niveau physico-chimique (oxygène, température, potentiel d'oxydo-réduction), que sur la diminution des taux de nutriments comme l'azote. L'abattement bactériologique permet d'approcher le niveau « eaux de baignade ».

Qualité de l'eau en entrée de la zone Libellule (moyenne):
Pt (Phosphore total) = 0.7 mg/l
DCO (Demande Chimique en Oxygène) = 23 mg/l
NGL (azote global) = 4.4 mg/l
Somme de la moyenne des concentrations des 58 micropolluants quantifiés > 10 ng/l = 18,7 mg/l

Qualité de l'eau en sortie de la zone Libellule (moyenne):
Pt (Phosphore total) = 0.3 mg/l
DCO (Demande Chimique en Oxygène) = 17 mg/l

5. VALORISATION

Le site est fermé au public. Cependant, 2 200 personnes sont venues le visiter en 3 ans, notamment des collectivités et associations environnementales locales. Le site a été un support pédagogique pour environ 1 200 élèves.

Ce type d'aménagement peut également contribuer aux trames vertes et bleues du Grenelle de l'environnement. Il peut aussi s'inscrire en cohérence avec les agendas 21 et les Schémas Directeurs d'Aménagement et de la Gestion des Eaux (SDAGE).

6. ET APRÈS L'EXPÉRIMENTATION ?

6.1. La commune

Après les 3 ans d'expérimentation, le Sivom de la Palus a souhaité maintenir la zone Libellule en pleine activité et a mis en place le financement de son exploitation durable.

6.2. La Lyonnaise des eaux

Suite à ce projet, la Lyonnaise des eaux souhaite travailler sur une politique plus large de zone de rejet végétalisée pour répondre à des objectifs variés comme celui du traitement des rejets en sortie de STEP, des eaux pluviales, des zones tampons sur bassin versant, ou encore des problématiques de zéro rejet.

Le projet ZHART (Zones Humides Artificielles) a démarré à l'automne 2012. Il fait suite au projet zone Libellule et il réunit des acteurs avec des compétences multiples (hydraulique, toxicologie, écologie, etc.). Son objectif est de mieux comprendre le fonctionnement et la conception des zones de rejet végétalisées pour en assurer un développement industriel. En effet, le projet ZHART a pour but de développer et d'industrialiser l'aménagement de zones de rejet végétalisées (ZRV) en sortie de stations d'épuration (STEP). Pour cela, des études seront menées sur 6 sites expérimentaux pendant une durée de 28 mois.

Un guide de dimensionnement et d'exploitation devra paraitre à la fin du projet, prévue pour mars 2015.

Schéma d'une zone de rejet végétalisée

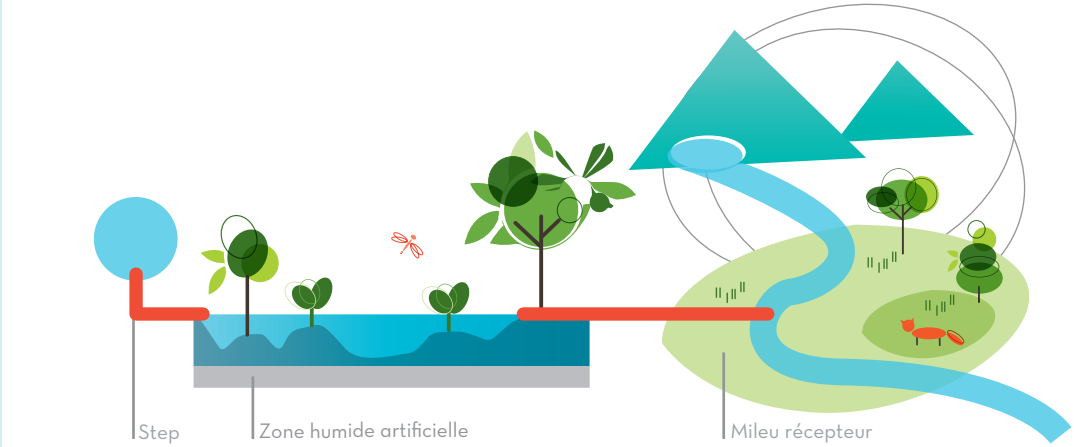


FIGURE 102 LYONNAISE DES EAUX

PROJET LIBELLULE

GOUVERNANCE

Maitre d'ouvrage : Sivom de la Palus
Maitre d'œuvre : Lyonnaise des eaux
Membres du conseil scientifique/ partenaires scientifiques
Syndicat Intercommunal à Vocation Unique (SIVU) de la Palus, Agence de l'Eau RM&C, Conseil général de l'Hérault, Biotope, CNRS, IRSTEA, Cirsee, HydroSciences de Montpellier (UMR CNRS 5569), le laboratoire LPTC (UMR CNRS 5255) de l'Université de Bordeaux.
Coût installation : 360 k€. Cout de l'étude : 300 k€
Financement :
Agence de l'eau RM&C : 50%
Conseil général de l'Hérault : 20%
Lyonnaise des Eaux : 30% (+ étude complémentaire de 200 k€ de Suez Env.)

PROJET ZHART

GOUVERNANCE

Maitre d'ouvrage: Suez environnement
Assistant à maitrise d'ouvrage et exploitant : Lyonnaise des Eaux
Maitre d'œuvre:
Bureaux d'études (SAFEGE, RIVE), société de travaux (DGT), fournisseurs pour la mise en œuvre du génie végétal (Nymphéa), fournisseurs d'outils de métrologie environnementale (IPL), Ecole des hautes études en santé publique (EHESP), laboratoire CITERES (Centre Interdisciplinaire CItés, TERritoires, Environnement, Sociétés) de l'Université de Tours, l'unité Biodiagnostic du LERES (Laboratoire d'Etude et de Recherche en Environnement et Santé), EUROFINS, Lyonnaise des eaux.
Coût : 2,2 millions d'euros
Financement
Suez environnement : 15%
Lyonnaise des Eaux : 27%
LERES : 18%
EUROFINS IPL : 13%
Nymphea : 14 %
Université de Tours : 8%
RIVE : 5%

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

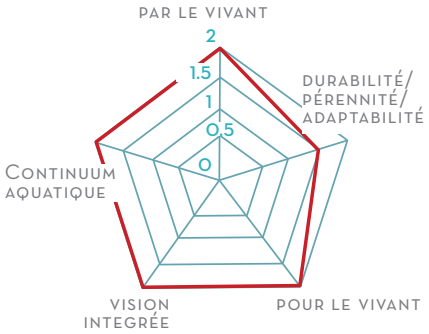


FIGURE 103

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN: ADOUR-GARONNE
RÉGION: MIDI-PYRÉNÉES
DÉPARTEMENT: TARN-ET-GARONNE
COMMUNE: NÈGREPELISSE

FICHE 6

L'épuration extensive des eaux usées et des matières de vidange : cas de Nègrepelisse

PRÉSENTATION DE LA STATION D'ÉPURATION DE NÈGREPELISSE

Nègrepelisse est une commune de 5 168 habitants. La STEP de Nègrepelisse comportait par le passé un lagunage naturel d'une capacité de 1 400 EH géré et entretenu par la mairie. Suite à un fort développement de la commune, le système d'assainissement des eaux usées a dû être revu afin d'augmenter sa capacité. Les élus souhaitaient mettre en place une filière efficace et peu coûteuse pouvant intégrer les lagunes existantes. Ils souhaitaient également qu'elle s'intègre dans le paysage.

LE RÉSEAU D'ASSAINISSEMENT COLLECTIF DE LA COMMUNE DE NÈGREPELISSE

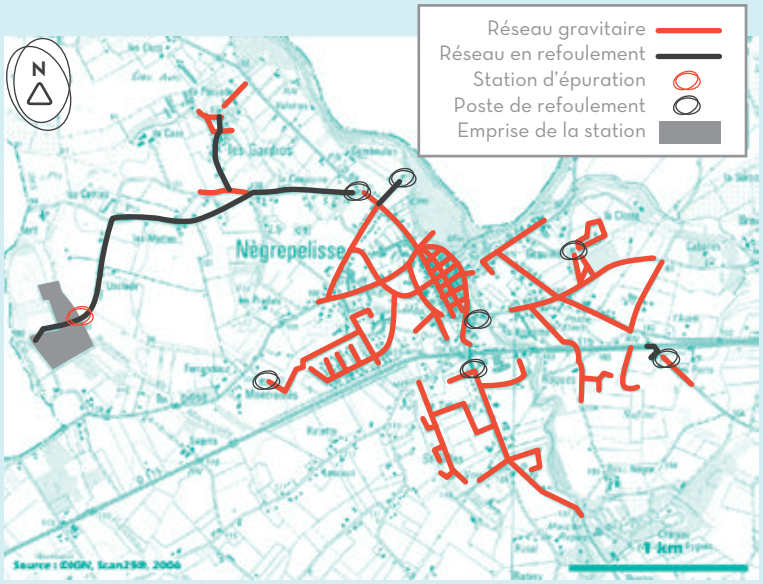


FIGURE 104

VUE AÉRIENNE DE LA STATION : EN HAUT, LES 2 LAGUNES, EN BAS À GAUCHE, LES 2 ÉTAGES DE FILTRES

FIGURE 105

Les 2 lagunes initiales ont ainsi été conservées et la nouvelle STEP a été mise en service en 2009. Elle est dimensionnée pour 4 000 EH extensible à 6 000 EH, correspondant aux prévisions de raccordement au réseau respectivement en 2020 puis 2050. Elle est la seconde plus grande station extensive de France avec ses 8 000 m^2 de surface couverte de roseaux et un volume annuel d'eaux usées de 219 000m^3, à raison de 150l/jr.EH.

La station est alimentée par un refoulement de 2 km à partir du poste de relevage de La Coujoune, rénové dans le cadre des travaux de 2008. L'eau usée traitée de la station est rejetée dans le ruisseau de Montrosies, affluent du Courounets, lui-même affluent de l'Aveyron.

La station d'épuration des eaux usées présente les particularités suivantes :

- station autonome ;
- procédés employés extensifs ;
- utilisation du lagunage existant en traitement complémentaire d'hiver, et en été pour améliorer les rendements sur l'azote et le phosphore dans une moindre mesure.

La station comprend, de l'amont vers l'aval :

- **un débitmètre électromagnétique,** qui mesure la quantité d'eaux usées admise sur la station. Il permet, en association avec un préleveur, de caractériser le débit entrant.
- **un poste de relevage vers les filtres primaires – PR1,** qui distribue les eaux brutes par bâchées sur le filtre primaire. Les pompes sont puissantes parce qu'il faut envoyer les eaux par paquets et les répartir uniformément sur toute la surface de filtre en service au moment de la bâchée.
- **un premier étage de filtres plantés à circulation verticale – FPRV1,** qui assure un premier traitement par les bactéries épuratrices fixées sur le gravier et les rhizomes. Ce premier étage reçoit les eaux brutes sans dégrillage même grossier, posant ainsi parfois un problème de colmatage des pompes du PR1.
- **un poste de relevage vers les filtres secondaires – PR2,** qui reçoit les eaux sortant des filtres primaires (sortant des lagunes en régime été) et les distribue par bâchées sur les filtres secondaires.
- **un second étage de filtres plantés à circulation verticale – FPRV2,** qui affine le traitement, toujours par l'action de bactéries épuratrices fixées sur le granulat et les rhizomes.
- **un poste de relevage vers les lagunes – PR3,** qui ne fonctionne qu'en régime d'été. Il reçoit les eaux en sortie des filtres primaires et les envoie vers la lagune primaire. Ces eaux transitent dans les deux lagunes et sont envoyées ensuite sur les filtres secondaires via PR2.
- **un débitmètre Venturi en sortie,** qui mesure la quantité d'eaux usées en sortie de station. Il permet, en association avec un préleveur, de caractériser le débit sortant et de vérifier sa conformité avec la norme de rejet. La comparaison des charges polluantes journalières en entrée et en sortie permet de calculer les rendements d'élimination de chaque polluant et d'adapter en conséquence la gestion de la station.

Fonctionnement de la station d'épuration

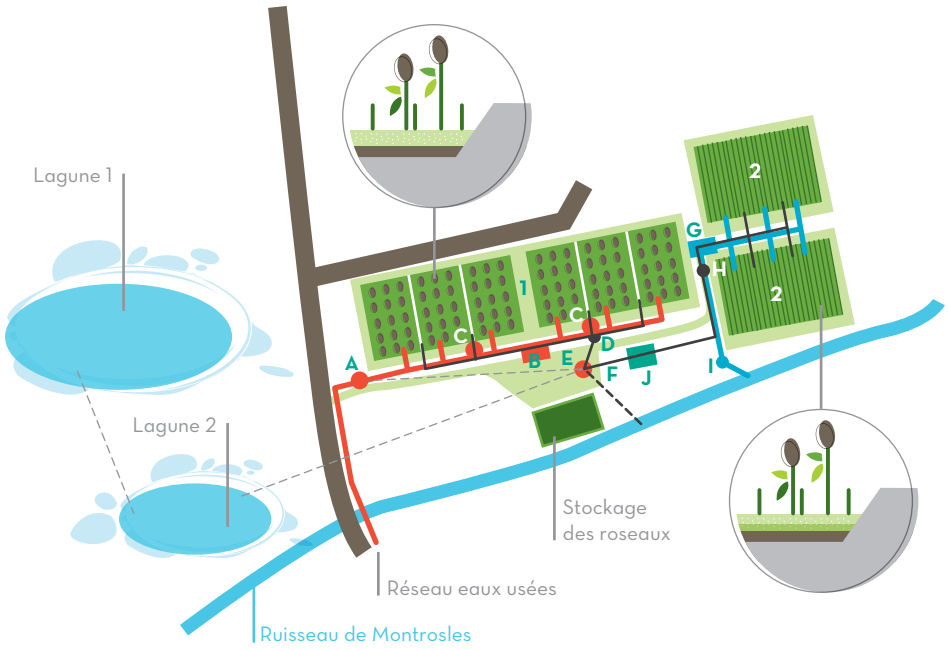


FIGURE 106

En cas de temps de pluie très important, un by-pass des eaux pluviales achemine les eaux vers les lagunes. En cas de dysfonctionnement du poste de relevage à l'entrée de la station, les eaux peuvent être acheminées vers les lagunes pour garantir un traitement minimum de la pollution particulaire et dissoute.

Filière été de la station d'épuration

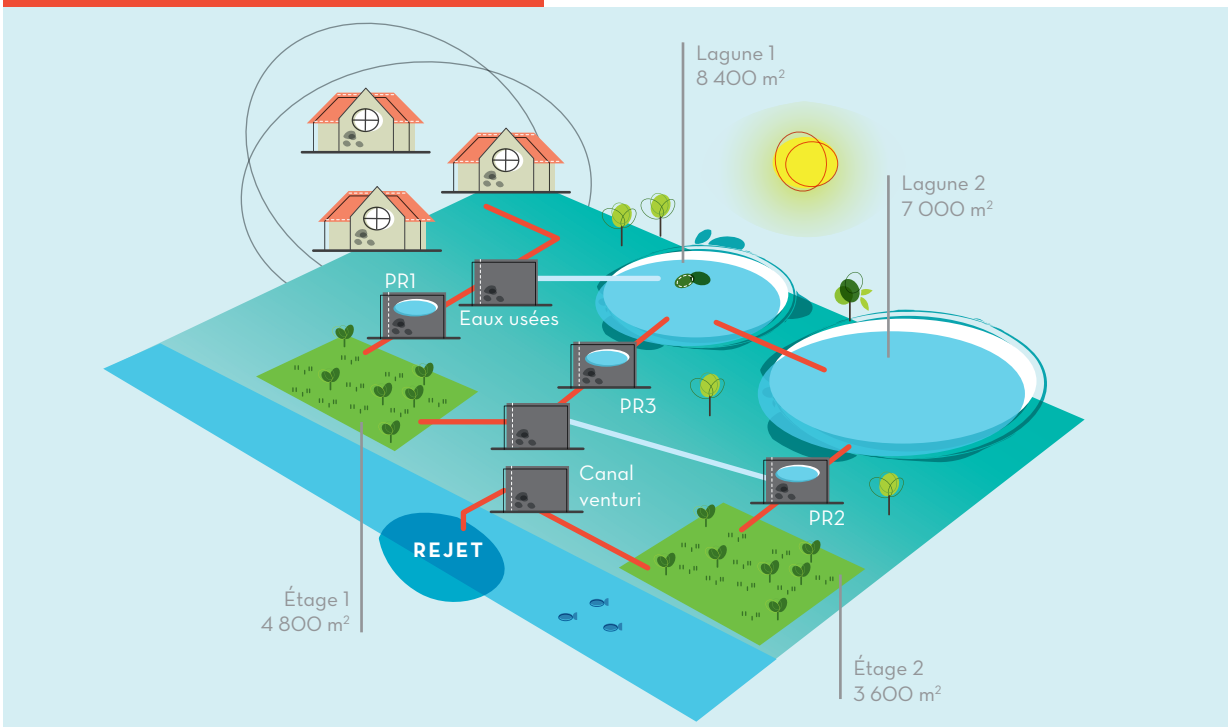


FIGURE 107

La station a ainsi deux types de fonctionnement bien distincts selon la période de l'année :

Filière été (FIGURE 107)

En été, c'est-à-dire d'avril à octobre, les eaux sortant du premier étage de filtres transitent par les lagunes avant de rejoindre le deuxième étage de filtration. Le passage des eaux usées dans les lagunes entraine un processus de dénitrification et de déphosphatation, améliorant les rendements sur l'azote global d'environ 40 % et sur le phosphore d'environ 30 %. Ces améliorations sont très intéressantes en période estivale, au moment où le Montrosiès, cours d'eau recevant les eaux après traitement, est le plus sensible.

L'abattement du phosphore et de l'azote au passage dans les lagunes est une innovation, pratiquée depuis 2007 sur la station de Saint-Etienne-de-Tulmont, construite et gérée également par la Communauté de Communes des Terrasses et Vallée de l'Aveyron (CCTVA). Le SATESE 82, suit les performances épuratoires sur les deux stations afin notamment d'évaluer l'impact des lagunes.

Filière hiver (FIGURE 108)

En hiver, les eaux usées passent successivement par les deux étages de filtration. Ce traitement permet de garantir la conformité au niveau du rejet imposé avec des charges en entrée jusqu'à 4 000 EH. Les lagunes ne sont pas intégrées dans la filière à ce moment car leur effet épuratoire, fonction de l'ensoleillement et de la température, est faible à cette époque. Elles reçoivent néanmoins le potentiel by-pass d'entrée de station pour assurer un traitement minimum. En revanche, elles sont utilisées pour recevoir les percolats traités de la plateforme de traitement des matières de vidange (voir plus loin).

QUELQUES ÉLÉMENTS SUR LE DIMENSIONNEMENT DE LA STATION D'ÉPURATION

Le premier étage de filtres plantés à circulation verticale (FPRV1) est dimensionné à 1.2 m²/EH, comme souvent pour la filière française. La surface de filtration en première tranche est calculée comme suit : 4 000 EH x 1.2 m²/EH = 4 800 m², répartis en deux grands filtres de 2 400 m² chacun, les plus grands de France au moment de leur création.

Filière hiver de la station d'épuration

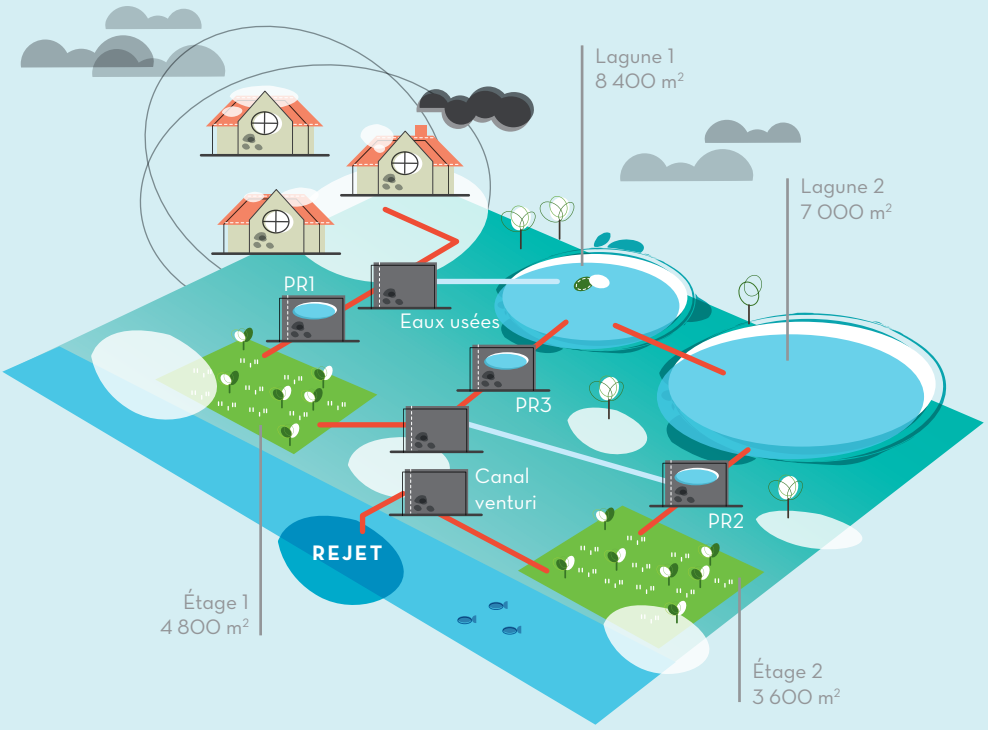


FIGURE 108

Le second étage de filtres plantés à circulation verticale (FPRV2) est dimensionné à 0.8 m²/EH soit un peu plus que d'habitude sur cette filière. La surface de filtration en première tranche est donc de : 4 000 EH x 0.8 m²/EH = 3 200 m², répartis en deux grands filtres de 1 800 m² chacun, les plus grands de France en second étage au moment de leur création.

UN SYSTÈME ÉCONOMIQUEMENT ET ÉNERGÉTIQUEMENT INTÉRESSANT

Les coûts de réalisation sont similaires à ceux d'une station intensive, les coûts d'exploitation sont quant à eux divisés par deux (10 €/EH.an au lieu de 20 €/EH.an, y compris évacuation des boues). L'économie en exploitation relève principalement du traitement des boues : un filtre planté produit sur le premier étage (pas de boues sur l'étage 2) des boues sèches (siccité > 25 % couramment), légères, stabilisées, qui sont extraites et épandues tous les 10 à 15 ans (tous les jours sur une station boues activées, tous les 5 à 10 ans en lagunage).

Le fonctionnement de la station entraîne une consommation d'énergie et une émission de GES. Cependant, à Nègrepelisse, la consommation de la station est inférieure à 50 000 kWh/an. Une station intensive de même capacité consomme au moins dix fois plus d'énergie et impose des remplacements fréquents d'appareils dont la fabrication est très consommatrice également.

UN SYSTÈME DE TRAITEMENT PERFORMANT

Les teneurs en sortie sont très inférieures à la norme de rejet (et aux plafonds indicatifs de l'arrêté de 2007) et vont jusqu'à une nitrification complète. Les teneurs en NGL et Pt sont inférieures aux valeurs habituelles des stations FPR de la filière « française » grâce à l'insertion des lagunes.

Par ailleurs, les rendements sont tous supérieurs aux plafonds indicatifs de l'arrêté de 2007 et aux recommandations de la MISEN.

PRÉSENTATION DE LA FILIÈRE DE TRAITEMENT DES MATIÈRES DE VIDANGE

Les matières de vidange (MV) sont généralement traitées au niveau des stations d'épuration des eaux usées et le sont de façon intensive. Ici, la CCTVA a construit pour le compte du SDD 82 (Syndicat Départemental des Déchets de Tarn et Garonne), sur un terrain voisin de la station d'épuration de Nègrepelisse, une station de traitement des matières de vidange desservant le nord-est du département en vue de combler le déficit d'installations et de réduire les pratiques illégales telles que le dépotage sauvage.

Construite en 2012, cette station a une capacité de 11 000 m²/an soit 200 m²/semaine environ, correspondant aux besoins estimés dans 20 ans. Elle permet également d'assurer un rejet nul en période estivale par le biais de l'irrigation d'un taillis courte rotation.
Pour ce projet débuté en 2010, la CCTVA reste fidèle aux techniques extensives choisies en 2007 pour la station d'épuration communale. Les MV seront traitées sur une filière comprenant une unité de dépotage, un stockage aéré, des lits de séchage plantés, un traitement des percolats par filtres plantés à écoulement vertical et une irrigation sur plantation.
Conformément à la volonté du maître d'ouvrage, les eaux traitées seront orientées selon la période de l'année, soit vers le système d'irrigation d'un taillis courte rotation, destiné à alimenter la chaufferie bois de la commune de Nègrepelisse (fonctionnement été), soit vers les lagunes existantes avant leur rejet dans le milieu récepteur (fonctionnement hiver).
Ce projet de traitement des matières de vidange par des filtres plantés de roseaux est une première en France. Il est issu des recherches réalisées par Irstea et fait l'objet d'un suivi par Irstea et le SATESE grâce à un financement de l'agence de l'eau Adour-Garonne. De même, l'irrigation des plantations par les techniques de micro-aspersion et d'ajutage sont suivi par l'Irstea et la Fédération Cellulose Bois Ameublement (FCBA). Ce suivi a pour but de mesurer l'évolution de la croissance des arbres recevant les eaux usées traitées.

Le système de traitement des matières de vidange

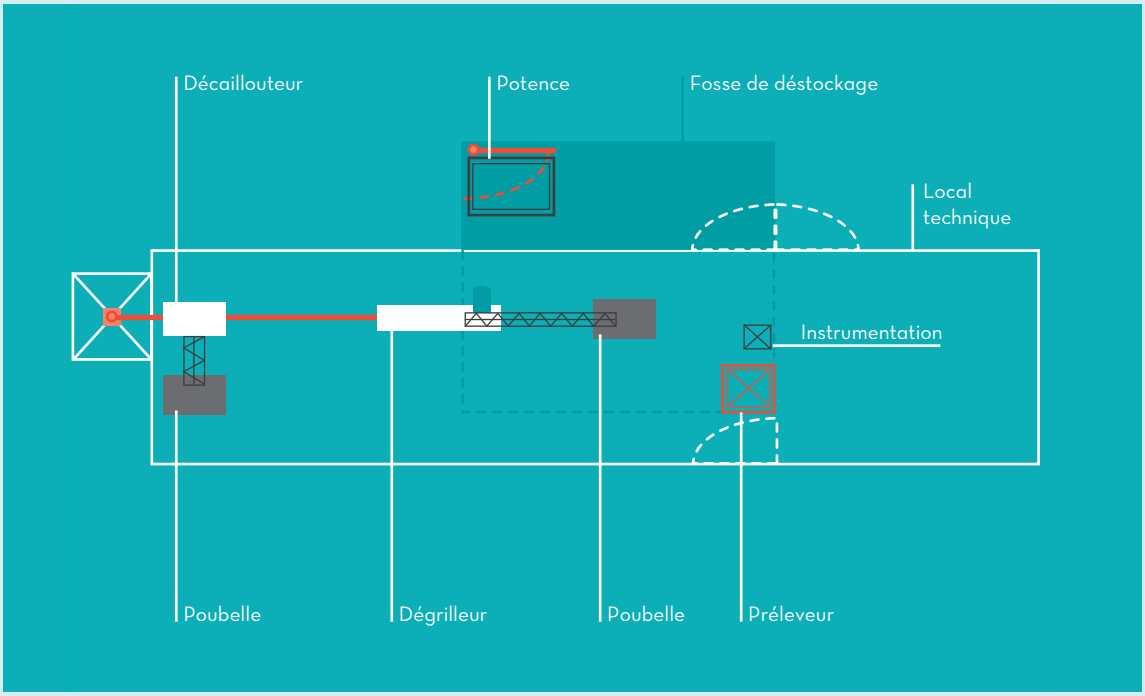


FIGURE 109

La plantation d'eucalyptus, dans sa première année, irriguée avec les percolats

FIGURE 110

· Le régime d'été (mars à octobre) :

Les eaux en sortie de filière de traitement sont épandues sur une plantation de peupliers et d'eucalyptus qui les absorbent entièrement. C'est ce qu'on appelle le rejet zéro : pas de rejet d'eaux traitées dans les ruisseaux. Ce régime supprime les apports polluants en période de débit minimum donc de sensibilité maximale des ruisseaux, moyennant une consommation énergétique faible car les filtrats sont pompés vers la plantation à mesure de leur production, à petit débit, et non par bâchées comme sur les filtres. L'épandage est exclu pendant les quatre ou cinq mois du repos végétatif vu la faible consommation d'eau à ce moment.

Le bassin tampon de 140 m^3 représente une réserve d'eau pour irriguer les plantations.

Régime d'été de traitement des matières de vidange

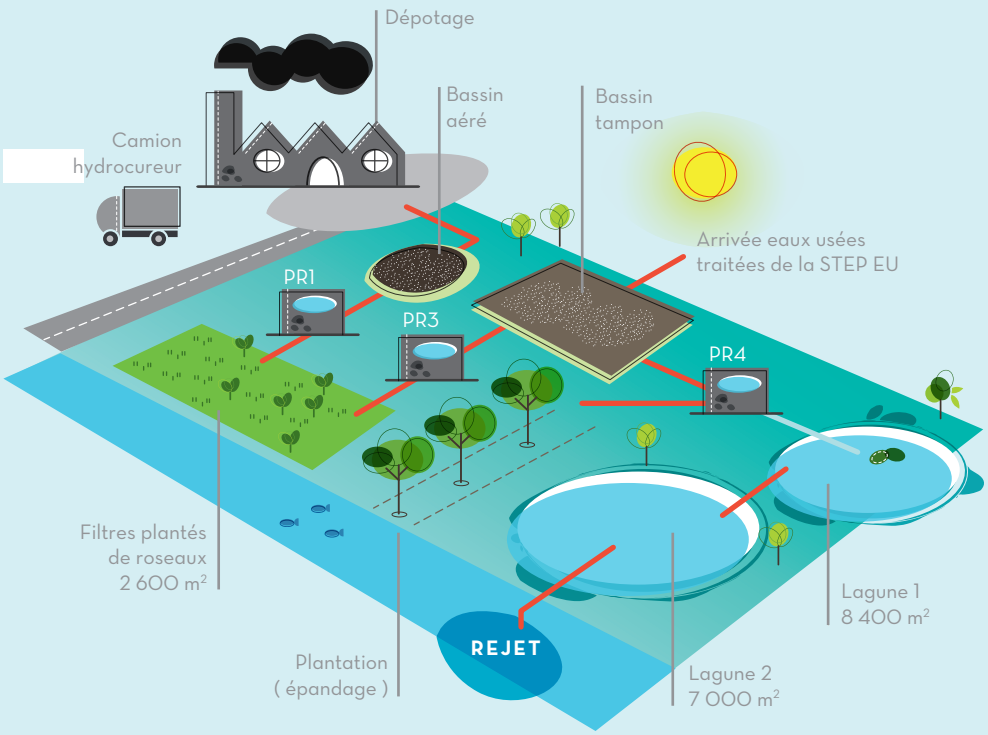


FIGURE 111

Régime d'hiver de traitement des matières de vidange

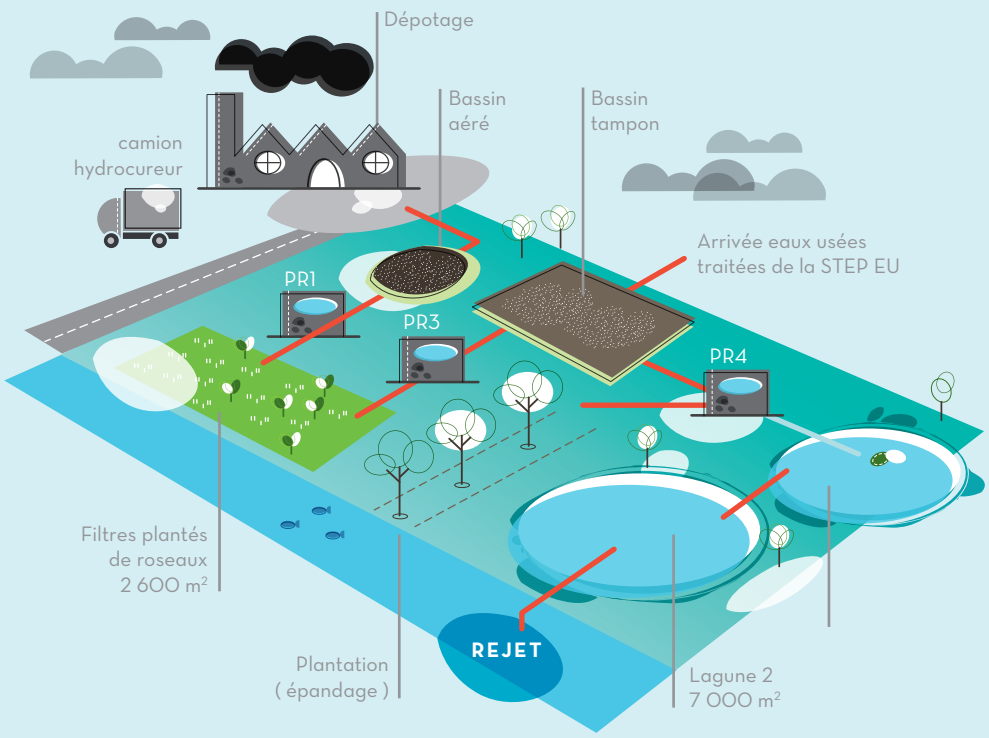


FIGURE 112

· Le régime d'hiver (novembre à février) :

Les eaux en sortie de filière de traitement sont envoyées sur les lagunes existantes de la station de Nègrepelisse et rejetées au ruisseau de Montrosies, au point de rejet initial du lagunage. La norme de rejet de la filière eau s'applique dans ce cas. Les teneurs en polluants peuvent être supérieures à la norme de rejet en sortie de filière de traitement des MV donc en entrée de lagunes et très faibles en sortie de lagunes vu le temps de séjour dans les lagunes (de l'ordre de 400 jours, contre 60 jours pour un lagunage classique).

Le transfert des matières de vidange des camions vidangeurs vers la station se fait dans un équipement ad hoc comprenant une borne de signalement et de gestion, un point de transfert, une bâche de réception et de stockage.

Le prétraitement :

Les matières de vidange brutes subissent un prétraitement qui consiste à séparer les cailloux et macro-déchets (lingettes par exemple) de la phase aqueuse. Elles rejoignent ensuite la fosse de réception de 20 m³ où elles sont brassées. Un échantillon est ensuite prélevé avant envoi vers le bassin de stockage aéré d'une capacité de 180 m³. L'objectif de cette aération forcée est de :

- lisser les différences de caractéristiques entre les apports ;
- lisser les volumes entrants et réguler le volume journalier en entrée de filtre ;
- réduire le risque d'odeurs au moment des apports en MV sur les filtres.

Le traitement :

Les matières de vidange sont dépolluées par l'action de bactéries fixées sur les granulats et les rhizomes d'un lit de séchage planté de roseaux fonctionnant sur le même principe que les filtres de la station de Nègrepelisse mais avec une configuration nettement différente, similaire aux lits de séchage plantés de déshydratation de boues (l'autre grande application du filtre planté). Une recirculation des percolats est mise en place pour améliorer sa qualité et réduire le stress hydrique des roseaux.
Ce traitement a pour objectifs de :

- réduire les teneurs en polluants aux niveaux acceptables par l'épandage et le lagunage ;
- réduire les volumes en sortie (par effets d'évapotranspiration et de rétention).

Les percolats pouvant encore être relativement chargés (300 mg MES/l) un traitement complémentaire des percolats est réalisé par filtres plantés à écoulement vertical afin de produire un effluent ne nuisant pas au système d'irrigation.

L'épandage sur plantation :

La solution retenue par la CCTVA pour répondre au principe de rejet O retenu par la MISEN consiste à épandre les eaux traitées sur une plantation forestière gérée en Taillis à Courte Rotation (TCR).

Les eaux sont ainsi distribuées sur la plantation par un système de canalisations sous faible pression équipées d'un point de sortie placé à intervalle régulier.

Les arbres sont « récoltés » tous les six à sept ans par une machine conçue à cet effet. Le bois sera ensuite utilisé dans la chaufferie collective de la commune de Nègrepelisse dans le cadre d'une filière bois-énergie.

La station de traitement des matières de vidange

FIGURE 113

Le lagunage :

Les lagunes peuvent être utilisées dans la filière « matières de vidange » dans la mesure où leur insertion dans la filière de la station d'épuration de Nègrepelisse est limitée à la période estivale (l'abattement N et P est très faible dans les lagunes à faible température) et est facultative (pas d'obligation dans l'arrêté d'autorisation de rejet de 2007).

La station a été réalisée sur 2012/2013. La période de mise au point de l'installation vient de débuter. Les premières livraisons de boues devraient avoir lieu à partir du mois de décembre 2013.

L'encadrement technique et scientifique du projet est assuré notamment par :

- La Fédération Cellulose Bois Ameublement-FCBA
- Irstea

L'investissement est couvert par une subvention de l'agence de l'eau Adour-Garonne, une subvention du Conseil général du Tarn-et-Garonne, une participation de l'union européenne et les fonds propres de SDD 82.

LE DEVENIR DES BOUES

Les boues, sous-produits inévitables de l'épuration des eaux usées, forment un compost en surface des filtres plantés. Ce compost est enlevé tous les dix à quinze ans en traitement d'eaux usées ainsi qu'en traitement de matières de vidange, et est utilisé comme fertilisant agricole, par épandage sur les champs avant labour. Par comparaison, les boues d'une station intensive sont déshydratées par des machines industrielles grandes consommatrices d'énergie, et stockées avant épandage dans des silos ou des halls de grande capacité.

GOUVERNANCE ET COUT

Maître d'ouvrage : CCTVA
Maître d'œuvre : Ginger
Constructeur : Epur Nature
Coûts : 1,6 M€ HT
Financement
Union européenne : 10%
Agence de l'eau : 45%
Conseil général : 8%
Communauté de Terrasses et Vallées de l'Aveyron (CCTVA) : 37%
Traitement des matières de vidange
Maître d'ouvrage : Syndicat Départemental des Déchets de Tarn et Garonne-SDD 82
Maître d'ouvrage délégué : Communauté de Communes des Terrasses et Vallée de l'Aveyron - CCTVA
Maître d'œuvre : Ginger Environnement Infrastructures - GEI
Constructeur : Epur Nature
Coûts (travaux + étude) : 2 155 000 €
Financement
Union européenne : 9%
Agence de l'eau : 45%
Conseil général : 8%
Communauté de Terrasses et Vallées de l'Aveyron (CCTVA) : 37%

Chapitre 4

3

PRÉVENTION DES RISQUES D'INONDATIONS

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

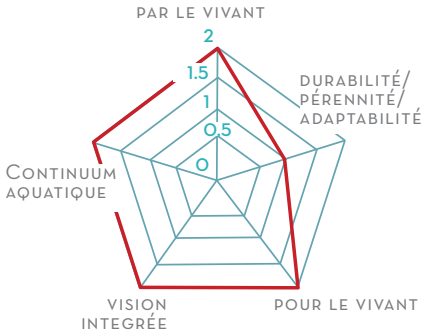


FIGURE 114

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN: SEINE NORMANDIE
RÉGION: HAUTE NORMANDIE
DÉPARTEMENT: SEINE MARITIME
COMMUNE: SAINT-WANDRILLE-RANÇON

FICHE 1

La renaturation de la Fontenelle

1. HISTORIQUE DE LA FONTENELLE

Détournée de son lit en 1792, la Fontenelle a alimenté un moulin à blé construit directement sur son cours d'eau pendant une dizaine d'années. Il n'y a pas eu de problèmes jusqu'en 1995 où les débordements d'eau ont commencé à devenir plus réguliers et de plus en plus intenses. Suite à des événements de crues répétitifs entre 1995 et 2001, avec des pics plus importants en 1999 et 2000, un syndicat mixte d'études d'aménagement et d'entretien a été créé.

CRUE DU 26 DÉCEMBRE 1999

FIGURE 115

© A. ROSAN – SMBVCS

Bief fortement dégradé

FIGURE 116 © A. ROSAN – SMBVCS

Effondrement des berges

FIGURE 117 © A. ROSAN – SMBVCS

Le lit mineur de la Fontenelle s'était alors encaissé, entrainant des glissements de terrains sur certaines propriétés. Au niveau du bief perché, des brèches s'étaient créés, rejoignant naturellement le bras fossile de la Fontenelle situé en contrebas.

En 2001, le syndicat avait pour mission de mener une étude sur les territoires inondés en adoptant une démarche globale et intégrée. Fin 2003, l'adhésion de nouvelles communes au syndicat a conduit à son remplacement par un Syndicat Mixte des Bassins Versants Caux-Seine.

Réunion de concertation

FIGURE 118 © A. ROSAN – SMBVCS

Les différents problèmes (hydrologique et hydro-écologique) de la Fontenelle ont été identifiés au cours d'une étude de diagnostic général réalisée en 2003. Au vue des résultats de l'étude, le syndicat a engagé un projet de renaturation sur 1 200m. Les principaux enjeux sur le tronçon à restaurer étaient hydrauliques (restauration du lit originel et du champ d'expansion de crue, limitation des contraintes exercées sur les berges du secteur urbanisé) et paysagers (utilisation de techniques appropriées pour renforcer les berges, requalification d'un paysage de fond de vallée). D'autres objectifs que la lutte contre les inondations se sont finalement ajoutés comme le rétablissement de la continuité écologique (piscicole et sédimentaire) et le rétablissement des habitats naturels.

2. UN PROCESSUS DE CONCERTATION COMPLEXE MAIS INDISPENSABLE POUR LA RÉUSSITE DU PROJET DE RENATURATION

Les échanges avec les 25 propriétaires concernés ont été initiés très tôt et un représentant a été désigné pour participer au comité de pilotage. Des réunions publiques, animées par le parc et le syndicat ont été organisées régulièrement afin d'informer les élus et les riverains de l'avancement du projet. Leurs remarques ont été prises en compte par le syndicat et les scénarii qu'ils souhaitaient voir étudier l'ont été. Par exemple, à leur demande, une étude de l'aménagement du bief a été menée.

Au final, l'acceptabilité du projet a été longue et de nombreuses réticences à la renaturation de la Fontenelle sont apparues. Par exemple, la suppression partielle du bras perché et surtout sa déconnexion hydraulique devait entrainer un assèchement du fossé bordant les 25 propriétés situées en extrémité aval du bras. Les riverains se sont opposés à ce scénario et ils se sont constitués en association de défense des riverains. Suite à ce constat, la position de la municipalité a évoluée montrant également des réticences face au projet. Le syndicat a alors organisé de nombreuses réunions individuelles et publiques avec les élus et les riverains pour expliquer le projet et les convaincre de son bien-fondé.
Tous les riverains ont été invités à participer par courrier à l'enquête publique qui s'est déroulée en mars/avril 2009. L'association qui avait été créée pour lutter contre le projet n'a pas pris parti et en définitive, aucune personne n'a désapprouvé le projet de renaturation de la Fontenelle.

TRACE DE L'ANCIEN LIT DE LA FONTENELLE

FIGURE 119 © A. ROSAN – SMBVCS

LES TRAVAUX DE TERRASSEMENT ONT PERMIS DE RETROUVER LE FOND DE RIVIÈRE DE L'ÉPOQUE.

FIGURE 120 © A. ROSAN – SMBVCS

3. LA MISE EN PLACE DE MESURES D'ACCOMPAGNEMENT POUR LES RIVERAINS ET AGRICULTEURS CONCERNÉS

Les riverains ont soulevé la question des indemnités financières. Comment chiffrer la perte du cours d'eau ? Le droit d'usage n'est pas quantifiable et c'est aujourd'hui une limite à ce genre de projet. Les terrains ont donc été remis en état, les bornages et la mise en place des clôtures séparatives ont été pris en charge par l'agence de l'eau.

Les exploitants agricoles (éleveurs ovins et bovins) étaient également inquiets concernant la perte de surface agricole. Celles-ci ont été compensées, notamment par une diminution du prix de location des terres. Par ailleurs, les exploitants agricoles ont été invités à donner leur avis sur les caractéristiques techniques des aménagements (clôtures, abreuvoirs, passerelles) prévus sur le site. Ils ont par exemple souligné la nécessité d'installer des tapis antidérapants sur les passerelles afin d'éviter des problèmes de glissement des animaux en temps de pluie. Les exploitants agricoles ont également validé le choix des clôtures électriques protégeant les berges du piétinement des animaux et ils ont défini les hauteurs des fils.

4. LES TRAVAUX DE RENATURATION ENGAGÉS ET UNE APPROPRIATION PROGRESSIVE DES LOCAUX AU FUR ET À MESURE DE L'ÉVOLUTION DU CHANTIER

Les travaux de renaturation ont été initiés en août 2010. Ils ont consisté à revaloriser l'hydrobiologie du cours d'eau en reccréant le bras fossile et en comblant le bief perché. Le lit fossile a été terrassé sur 450 mètre linéaires (ml) selon un gabarit correspondant aux caractéristiques hydrobiologiques de la rivière, avec une sinuosité propice aux écoulements et aux habitats. Les travaux de reprofilage ont été réalisés en conservant au maximum le tracé fossile afin de retrouver la granulométrie historique de la rivière. Les berges ont été terrassées en pente douce et végétalisées par ensemencement et plantations (hélophytes, arbustes et arbres).
Les autres 1 150ml, encore bien marqués, ont été réinvestis librement par le cours d'eau après un simple débroussaillage et un terrassement partiel.

Ce projet étant novice dans le domaine du déplacement de cours d'eau, le syndicat a manqué d'exemples à présenter aux riverains. Pour pallier à cela, une visite de terrain a été organisée à mi-parcours du terrassement afin de leur faire constater la présence de l'ancien lit et de réexpliquer les intérêts du projet. La perception des riverains sur le projet a changé lors de cette visite. De même, au fur et à mesure de la réalisation des travaux et des visites de chantier, un avis positif s'est renforcé au sein de la majorité du public (élus, riverains, locaux,...) jusqu'à l'achèvement du projet.
Le bief perché a été comblé sur 1 000ml après une pêche de sauvetage réalisée en 2010 par la FDAAPPMA 76.

Bief à sec avant son comblement

FIGURE 121 © A. ROSAN – SMBVCS

Comblement total du bief sur la partie amont

FIGURE 122 © A. ROSAN – SMBVCS

A sa place, un fossé enherbé de récupération des eaux pluviales pour l'ensemble des rejets existant dans le bief actuel a été installé. Cela a permis d'améliorer la gestion des eaux pluviales. En effet, avant les travaux, elles arrivaient directement dans le bief.

Création d'un fossé enherbé d'évacuation des eaux pluviales

FIGURE 123 © A. ROSAN – SMBVCS

En septembre 2010, les riverains, les élus, les financeurs et les techniciens de rivière ont été invités à assister à la remise en eau de l'ancien lit de la Fontenelle. Une centaine de personnes ont fait le déplacement.

La remise en eau de l'ancien lit de la Fontenelle

FIGURE 124 © A. ROSAN – SMBVCS

Ces mêmes personnes ont été invitées pour l'inauguration officielle du projet en aval de l'abbaye en juin 2011

SITUATION DU BIEF AVANT LE COMMENCEMENT DES TRAVAUX

FIGURE 125 © A. ROSAN – SMBVCS

Concernant le foncier, il est à noter qu'aucune acquisition de terrain n'a été nécessaire. Des conventions ont été passées auprès des 2 exploitants agricoles et des 3 propriétaires des prairies.

Suite aux travaux, il a fallu définir de nouvelles limites de propriété. Le fossé a été décalé en rive droite afin de laisser la rive gauche aux propriétaires. Un géomètre a mis en place une concertation avec les propriétaires pour poser les bornes de délimitation. Une fois le bornage réalisé, les clôtures ont été installées.

Aujourd'hui tous les acteurs sont satisfaits par le projet. Les riverains n'ont plus à gérer les problèmes d'effondrement des berges et ils ne paient plus la taxe due à la présence du cours d'eau sur leur propriété. La population locale perçoit globalement une meilleure intégration paysagère même si pour le moment, l'accès à la rivière n'est ouvert qu'aux riverains. Enfin, la commune s'est réattribuée le projet et prévoit de créer un cheminement (notamment à caractère pédagogique) le long de la Fontenelle. Un projet avec l'école et des animations sur la Fontenelle sont également prévu.

8 MOIS APRÈS LES TRAVAUX

FIGURE 126 © A. ROSAN – SMBVCS

5. LE SUIVI PRÉVU

Un suivi est imposé par arrêté préfectoral pour une durée de 5 ans. Il concerne l'évolution des faciès d'écoulement, la migration sédimentaire du cours d'eau, la végétation aquatique et rivulaire, la macrofaune benthique, l'entomofaune, les batraciens, ainsi que la faune piscicole, avicole et les mammifères.
Une première interprétation du jeu de données sera faite au bout de 3 ans, notamment grâce au logiciel CaRHyCE. Au bout de 5 ans, un bureau d'étude sera missionné pour faire un traitement plus poussé des données.

6. LA VALORISATION DU PROJET

Un DVD a été réalisé sur la réalisation des travaux. Il a été diffusé à d'autres structures rencontrant le même problème pour les inciter à agir comme le Syndicat Mixte des Bassins Versants Caux-Seine. Ce DVD est aujourd'hui disponible à l'agence de l'eau Seine-Normandie. Lors de la remise en eau du site, la télévision régionale était présente ainsi que l'AFP et certaines radios. Un court reportage (7min environ) a été réalisé un an après par France 3 Normandie qui est revenu sur le site. Depuis sa renaturation, le site est régulièrement visité par des écoles d'ingénieurs et des techniciens de rivière (60 techniciens de rivières de la Haute Normandie et de la Basse Normandie sont venus visiter le site).

POUR EN SAVOIR PLUS

http://www.sbvcauxseine.fr/

GOUVERNANCE

Maitre d'ouvrage: Syndicat Mixte des Bassins Versants Caux Seine
Bureau d'études réalisant l'étude: Hydratec associé avec hydrosphère.
Maitre d'œuvre :
SARL Nature Environnement Terrassement
Eiffage Travaux Public / Tinel
Propriétaire: Privés
Gestionnaire: Syndicat Mixte des Bassins Versants Caux Seine et
Association Syndicale Autorisée de riverains de la Rançon Fontenelle (ASA Fontenelle)
Gestion des berges: Syndicat Mixte des Bassins Versants Caux Seine

Coûts:
Total : 281 749 € HT
Dont :
Etudes + état initial: 77 522 € HT
Travaux et aménagement: 204 226 € HT
Suivi : 1 500 €
Communication : 1 200 €
Valorisation : 2 000 € HT

Financement:
Agence de l'eau: 50%
FEDER: 40%
Département de la Seine Maritime: 10%

Partenaires techniques
Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine-Normande (PNRBSN)
Office Nationale de l'Eau et des Milieux Aquatiques (Onema)
Fédération départementale des Associations Agrées pour la pêche et la protection du milieu aquatique (76)
Cellule d'Animation Technique pour l'Eau et les Rivières (CATER 76)
Direction Départementale des Territoires et de la Mer (DDTM 76)

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

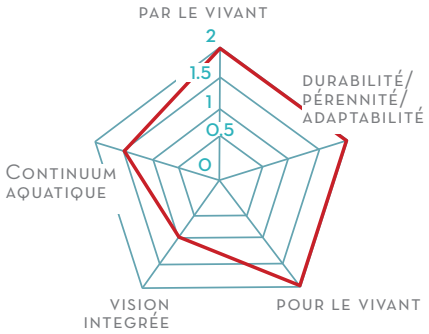


FIGURE 127

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN: RHIN-MEUSE
RÉGION: LORRAINE
DÉPARTEMENT: MEURTHE-ET-MOSELLE
COMMUNE: LUNÉVILLE

FICHE 2

Reconstitution de milieux fonctionnels et diversifiés dans le lit majeur du cours d'eau et création de chenaux de crues

1. ELÉMENTS DE CONTEXTE ET OBJECTIF DU PROJET

La Vezouze est un affluent de la Meurthe qui, du fait de la rapide répercussion des pluies sur son débit, connait des crues régulières et souvent violentes. Les phénomènes de débordement du cours d'eau ont été amplifiés par la réduction des surfaces naturelles d'expansion de crues sur le bassin versant amont et les mauvaises conditions d'évacuation des eaux à l'aval de Lunéville (formation d'un « bouchon »). En effet, dans les années 1980, des opérations hydrauliques de type curage, recalibrage, recoupement de méandre, endiguement, ont été menées sur le bassin versant. Ces opérations ont entrainé une incision du lit de 1 à 1.5 m de profondeur, déconnectant ainsi les échanges entre le lit mineur et le lit majeur. La mise en place de digues de protection et d'enrochements pour stabiliser les berges a également limité les possibilités de débordement et bloqué la dynamique du cours d'eau.

Suite aux crues très fortes de 1983, 1998 et 2004, la communauté de communes du Lunévillois a engagé un programme global d'aménagement en 2005, pour protéger les riverains des inondations. Un programme de gestion amont-aval à l'échelle du bassin versant aurait été plus pertinent, mais, face aux difficultés et au temps nécessaire à sa mise en œuvre, la communauté de communes a choisi, dans un premier temps, d'améliorer les conditions d'écoulement en crue à l'aval de la ville. Les élus ont adopté un projet novateur de reconstitution d'un système fonctionnel avec le lien lit mineur/lit majeur et la reconstitution de berges diversifiées.
La mise en place d'une démarche globale à l'échelle du bassin versant dans un objectif de gestion durable des inondations et de restauration écologique de la Vezouze et de ses affluents est restée une priorité.

Crue de mai 1983 à l'aval de Lunéville

FIGURE 128 AGENCE DE L'EAU RHIN-MEUSE

Le programme d'aménagement sur Lunéville s'est décliné en différentes actions :

- intervention sur le réseau d'eaux usées et pluviales de la ville ;
- mise en place de protection rapprochée ;
- restauration du champ d'expansion de crues en reconnectant le lit mineur et le lit majeur.

L'objectif à Lunéville était d'améliorer les conditions d'écoulement en période de crue en libérant le champ d'expansion des crues par déblais ainsi qu'en supprimant des digues et en recréant des zones inondables et des milieux humides. Il n'y a pas eu de problème de foncier car les terrains appartenaient à la commune de Lunéville. Seule une convention a été passée avec l'exploitant agricole du secteur.

Trois types d'aménagements ont été réalisés au printemps 2007 (hydrauliques, écologiques et paysagers) et les travaux comprennent :

- des interventions sur le réseau d'eaux usées et pluviales de la ville ;
- la mise en place de protection rapprochée des habitations ;
- la restauration du champ d'expansion de crues par reconnexion du lit mineur et du lit majeur.

2. SUPPRESSION DU BOUCHON HYDRAULIQUE

Le « bouchon aval » était lié au « corsetage » du lit mineur crée par le remblai du lit majeur. Pour reconnecter le lit mineur et le lit majeur, un lit moyen a été reconstitué sur 1 km de long. Pour cela, les digues de protection situées en rive gauche ont été arasées et le lit mineur a été creusé et élargit ponctuellement. Ces travaux ont permis de redessiner un lit mineur assez diversifié avec des berges en pentes douces, végétalisées.

Limitation du champ d'expansion de crue en rive gauche. La digue a été arasée.

FIGURE 129 AGENCE DE L'EAU RHIN-MEUSE

Pour réguler les flux en fonction de l'intensité de la montée des eaux, 2 chenaux de crue d'un mètre de large en moyenne ont été creusés sur 6 ha. Cela a permis de dégager 60 000 m^3 de matériaux. Au sein des chenaux de crue, la connectivité latérale a été améliorée par la configuration en lits emboîtés. Elle a augmenté le caractère inondable des milieux et elle a amélioré les conditions d'écoulement.

ENSEMBLE DES ACTIONS RÉALISÉES SUR LE MILIEU

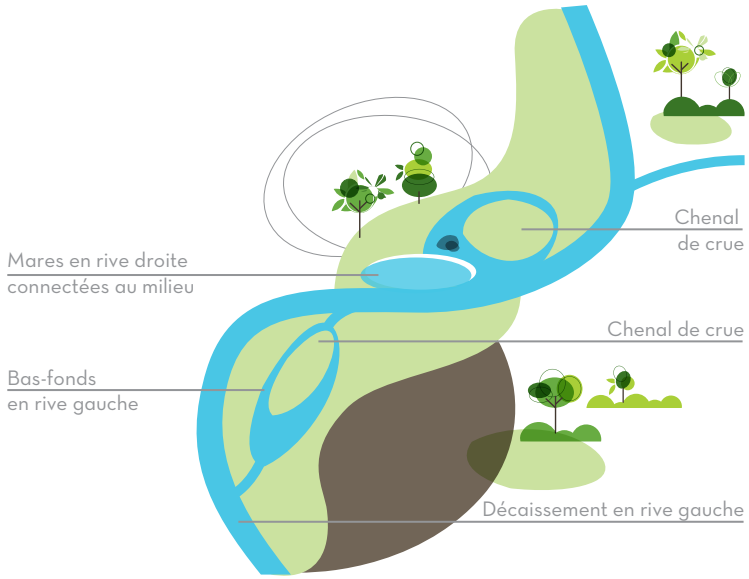


FIGURE 130 AGENCE DE L'EAU RHIN-MEUSE

Le principal enjeu pour la collectivité était la gestion des crues. Cependant, les actions hydrauliques sont combinées à des actions de restauration écologique permettant de répondre aux objectifs de bon état écologique de la DCE.

3. RECRÉATION DE ZONES HUMIDES TEMPORAIRES ET PERMANENTES

Des mares et des annexes hydrauliques ont été créées dans les chenaux de crue. Les mares, creusées dans les bas-fonds, présentent des profondeurs variables (80 cm maximum) et sont alimentées en permanence par la nappe phréatique.

La configuration en « lits emboités » a permis de créer une succession de milieux à humidité croissante :

- des zones régulièrement inondables à végétation de type prairie semi-humide ;
- des zones fréquemment inondées et assurant une rétention de l'eau lors des décrues avec une végétation de type prairie humide ;
- des zones humides permanentes à hélophytes (roseaux) et plantes aquatiques.

Les espèces choisies pour la revégétalisation du lit majeur sont adaptées en fonction du degré d'humidité de la zone (bas-fonds, mares, prairies).

Les berges ont été retalutées en pente douce puis fixées par du géotextile et végétalisées (la revégétalisation naturelle ne paraissait pas envisageable compte tenue de l'environnement urbain).

RECONSTITUTION D'UNE CONFIGURATION EN « LITS EMBOITÉS » : RECRÉATION DE ZONES HUMIDES TEMPORAIRES ET PERMANENTES

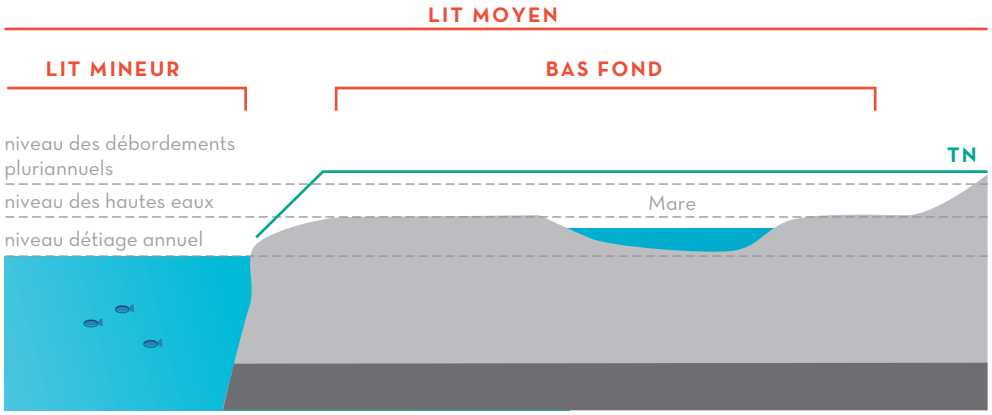


FIGURE 131 AGENCE DE L'EAU RHIN-MEUSE

VÉGÉTALISATION DES CHENAUX DE CRUES

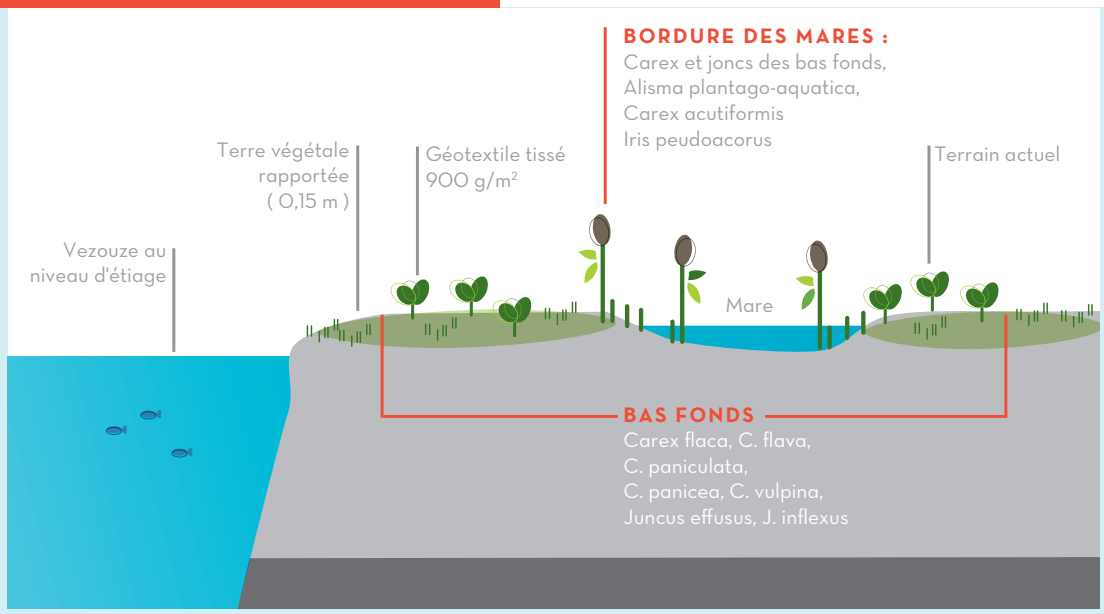


FIGURE 132

AGENCE DE L'EAU RHIN-MEUSE

Les aménagements ont donc favorisé le développement d'une végétation caractéristique selon les zones du cours d'eau :

- berges : hélophytes et saules ;
- bas-fonds et mares : végétation de milieux humides (roselières) ;
- chenaux de crues et lit majeur : espèces prairiales.

4. INTÉGRATION DE ZONES DE FRAYÈRES POUR LE BROCHET

L'amélioration des conditions de débordements a permis de recréer des zones favorables à la reproduction du Brochet. En effet, grâce à l'étude des variations de débits et des niveaux de nappe (principales alimentations), les niveaux des bas-fonds ont été calés dans les chenaux de crues pour favoriser :

- l'accès des géniteurs entre février et avril ;
- le retour des alevins au cours d'eau entre mai et juin.

Les échanges hydrauliques et écologiques entre le cours d'eau et sa plaine d'inondation ont été redynamisés grâce :

- au décaissement du lit majeur ;
- à la création de chenaux de crues ;
- au reprofilage des berges.

D'un point de vue paysager, des plantations de massifs boisés ont été réalisées sur la limite supérieure du chenal, en zone périphérique des parcelles exploitées (fauche).

En complément, d'autres actions ont été menées sur le réseau d'eau pluvial. Des actions d'équipement du réseau d'assainissement ont été réalisées. Deux stations de relevage des eaux pluviales (capacité : 1 m^2/s) ont été installées et des clapets anti-retour ont été mis aux exutoires des réseaux.

5. UN COURS D'EAU AUJOURD'HUI RENATURÉ ET DES RISQUES D'INONDATION DIMINUÉS

Environ 35 000 m^3 ont été libérés pour l'expansion des crues ce qui représente une baisse de 10 à 20 cm du niveau d'eau dans Lunéville pour les crues moyennes à fortes. Combinée aux autres aménagements (suppression de digue, etc.), la diminution observée peut atteindre 60 cm pour une crue centennale.

En augmentant le caractère inondable de ce secteur de Lunéville, les chenaux de crues et le système de « lits emboîtés » ont amélioré les conditions d'écoulement de la Vezouze vers la Meurthe. La mise en eau de la plaine d'inondation ne débutait, avant les travaux, que pour

des crues d'un débit supérieur à 40 m³/s. La reprise des berges en pente douce et la création des chenaux de crues entraînent, après les travaux, une inondation du lit majeur dès 10 m³/s, augmentant ainsi la fréquence et la durée des échanges entre milieux aquatiques et terrestres.

RESTAURATION D'UN CHAMP D'EXPANSION DE CRUE : AMÉNAGEMENT EN RIVE DROITE

FIGURE 133 AGENCE DE L'EAU RHIN-MEUSE

La Vezouze a retrouvé un caractère plus naturel sur ce secteur. La commune en retire de nombreux bénéfices (services écosystémiques) de ce retour à la fonctionnalité du cours d'eau:

- la régulation des inondations ;
- l'autoépuration des eaux ;
- la formation d'habitat pour accueillir biodiversité.

Ce projet a été lauréat du prix des trophées de l'eau 2010 de l'agence de l'eau Rhin-Meuse.

LA PRISE EN COMPTE DE L'ÉVOLUTION DU SITE POUR DÉTERMINER LES ACTIONS FUTURES

Un suivi de l'efficacité des travaux sur la reconstitution des milieux a débuté en 2010. Il est prévu pour un période de 5 ans. Ce suivi permet d'orienter les actions futures en fonction de l'évolution du site. Il consiste à suivre :

- l'état des berges pour adapter l'entretien et éventuellement compléter les plantations ;
- la topographie du fond de la rivière pour anticiper ses mouvements ;
- la composition floristique et faunistique des milieux annexes créés en vue de leur gestion raisonnée (fréquence de fauche, précautions).

ACTIONS MENÉES À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT

Dans le cadre du plan global entrepris par la Communauté de Communes du Lunévillois, d'autres opérations ont été engagées à l'échelle du bassin versant visant à réguler les flux lors des périodes de crues. Un EPTB sur la Meurthe et ses affluents vient d'être créé. Il s'occupera des problématiques de restauration et de réhabilitation des cours d'eau ainsi que des problèmes d'inondation. Un ensemble d'études hydrauliques et écologiques se mettra en place entre 2013 et 2015.

GOUVERNANCE ET COUT

Maitre d'ouvrage:
Communauté de communes de Lunévillois
Coût : 1 368 000 euros HT (Ingénierie et travaux)
Financement : Agence + Etat = 64%

Concordance des objectifs du projet en fonction de la définition de l'ingénierie écologique donnée au chapitre 1

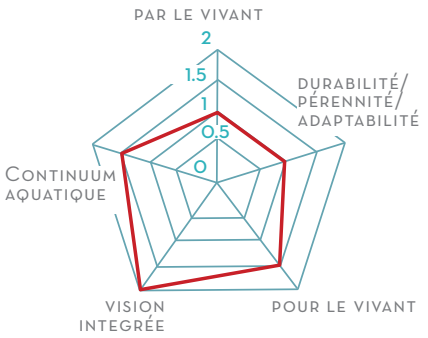


FIGURE 134

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN : LOIRE-BRETAGNE
RÉGION : RHÔNE-ALPES
DÉPARTEMENT : LOIRE
COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION
SAINT-ÉTIENNE MÉTROPOLE
COMMUNE : LE CHAMBON-FEUGEROLLES

FICHE 3

Découverture de l'Ondaine

Dès le XIXème siècle et jusqu'à la fin du XXème, l'Ondaine a subit les impacts d'une industrialisation et d'une urbanisation lui laissant une vocation d'évacuation des eaux polluées par les activités humaines. Proche du centre-ville du Chambon Feugerolles, l'étalement des villes et le développement de l'activité industrielle ont mené progressivement à la canalisation dans une galerie de 500 m puis au recouvrement du cours d'eau à la fin du XIXème. Les déchets de fonderies et de stériles miniers ont été utilisés pour remblayer au-dessus de l'ouvrage. Au total, plusieurs centaines de milliers de mètres cubes de matériaux avaient été accumulés au-dessus et de part et d'autre de la voûte. Sa construction a fait gagner plusieurs hectares et pendant tout le XXème siècle, cette couverture a permis une occupation optimale de l'espace foncier, fortement contraint dans la vallée.

Le projet a été primé aux trophées de l'eau de l'agence Loire-Bretagne en 2011.

Photo aérienne 2001

FIGURE 135 INTERATLAS

Zones de débordement avant les travaux

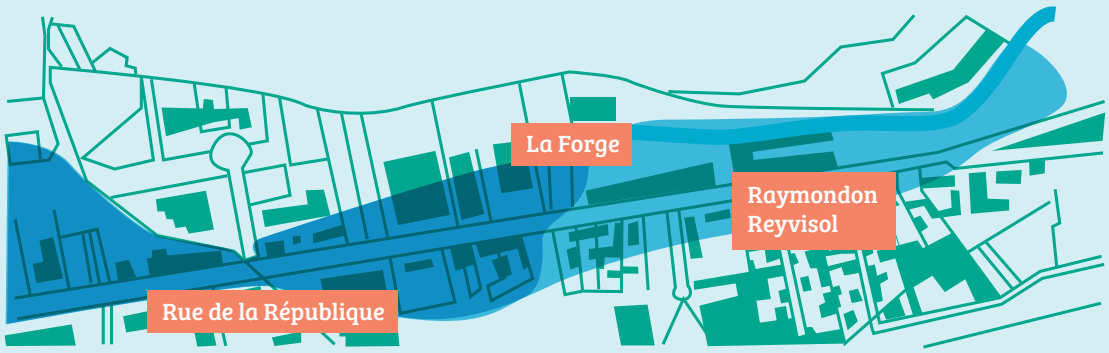


FIGURE 136

PVI

Photographies de la galerie a) Extérieur, b) Intérieur

FIGURE 137

SAINT-ETIENNE MÉTROPOLE

A la fin des années 1990, la reconversion du site était déjà initiée. L'activité industrielle s'étant arrêtée, les bâtiments industriels ont progressivement été démolis et de nouveaux bâtiments ont été construits (supermarché, menuiserie, etc.). En 1998, une première étude a été réalisée sur le confortement de l'ouvrage qui menaçait de s'effondrer. Le bureau d'études a préconisé une restauration de la galerie et une étude de faisabilité a été engagée en 1999. Cette étude a préconisé de conforter une partie de l'ouvrage et de découvrir une autre partie pour limiter les coûts.

La question s'est alors posée de rénover la voûte pour une durée de 50 ans ou de la supprimer. Les élus, appuyés par l'agence de l'eau, ont finalement proposé de découvrir la totalité du cours d'eau, de façon à régler le problème de façon définitive, et faire profiter les habitants de la commune des bénéfices de la reconversion du site. L'agence de l'eau a clairement soutenu cette option et la commune du Chambon-Feugerolles a finalement décidé de découvrir et de renaturer le cours d'eau pour la sécurité des personnes et la valorisation du site. Les élus ont souhaité redonner de la place au cours d'eau dans la commune pour que la population se le réapproprie. En 2000, une étude de faisabilité de découverture de la rivière a été lancée. En même temps, un atlas des zones inondables a été publié, venant conforter la décision de découvrir l'Ondaine.

Les objectifs du projet étaient de :

- supprimer les débordements jusqu'à la crue centennale ;
- stabiliser durablement le lit et les berges ;
- restaurer la fonction écologique du cours d'eau ;
- valoriser la rivière de manière paysagère et récréative.

En parallèle, un contrat de rivière était en cours d'élaboration depuis 1998, fortement incité par l'agence de l'eau. Les réflexions mettaient en évidence la nécessité de restaurer et de valoriser les écosystèmes aquatiques et d'aménager des secteurs pour les loisirs. Le contrat de rivière a été signé en juin 2003, intégrant ainsi le projet de découverture de l'Ondaine dans un tronçon de rivière à réaménager de 1 100m au total.

Suite à la remontée de compétence "contrats de rivières" à la communauté d'agglomération en 2005, Saint-Etienne Métropole est devenu maître d'ouvrage de cette opération.

La procédure d'autorisation au titre de la loi sur l'eau et les études d'avant-projet ont alors pu commencer. Celles-ci ont révélé une pollution importante du sol, ce qui a entraîné la réalisation d'études sur le devenir des déblais pollués. En 2007, une étude hydraulique complémentaire a été menée afin d'optimiser le volume de déblais à évacuer et diminuer ainsi les coûts de traitement des terres polluées.

CONCILIATION DES ENJEUX INDUSTRIELS ET DES ENJEUX ÉCOLOGIQUES

La réalisation du projet a requis une conciliation des enjeux industriels et des enjeux de reconquête du milieu. Les activités commerciales présentes sur le dessus de la voûte ont dû être relocalisées pour pouvoir détruire les bâtiments. Les acquisitions foncières et la relocalisation des entreprises se sont déroulées de 2003 à 2007. De même, une route de contournement a été construite pour permettre aux entreprises de la rive nord, alors coupée du centre-ville, de le rejoindre.

Détail du projet de découverture de l'Ondaine

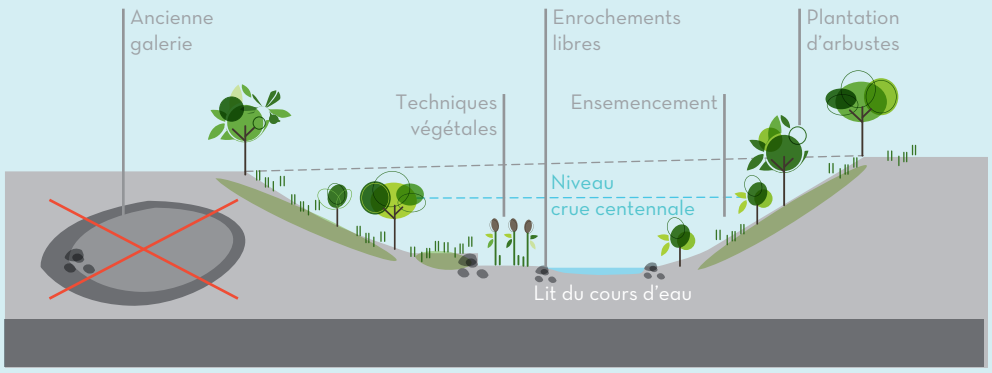


FIGURE 138

PVI

TRAVAUX

Finalement, les marchés de conception-réalisation et d'évacuation/traitement des déblais ont été attribués en août 2009 et les travaux de destruction de la voûte initiés en septembre de la même année. Ils ont duré quatre mois et se sont déroulés de la manière suivante :

- déblais des 90 000 m^3 de remblais déposés sur la galerie ;
- démolition de la galerie ;
- profilage du nouveau lit ;
- stabilisation du lit et des berges en enrochement libres et en techniques végétales ;
- talutage des nouvelles berges.

Les travaux de végétalisation ont commencé en septembre et se sont terminés au printemps 2010. En tout, près de 1,8 hectares ont été rendus à la rivière.

Vue de la friche avant les travaux. 12 juin 2003

FIGURE 139 SAINT-ETIENNE MÉTROPOLE

Début des travaux de déblaiement. Septembre 2009

FIGURE 140 SAINT-ETIENNE MÉTROPOLE

Déblaiement. 20 octobre 2009

FIGURE 141 SAINT-ETIENNE MÉTROPOLE

Destruction de la voute. 10 novembre 2009

FIGURE 142 SAINT-ETIENNE MÉTROPOLE

Réalisation du tracé du cours d'eau

FIGURE 143 SAINT-ETIENNE MÉTROPOLE

Mise en place du géotextile. 28 décembre 2009

FIGURE 144 SAINT-ETIENNE MÉTROPOLE

MESURES DE SUIVI

Le site sert aujourd'hui de référence pour les projets à venir. Il est géré par un technicien de rivière mais un plan de gestion locale du site doit être défini dans le second contrat de rivière en cours d'élaboration. Un suivi des micro-habitats et du peuplement piscicole est réalisé tous les 2 ans.

AMÉLIORATION DU CADRE DE VIE

Cette action environnementale participe à l'effort d'amélioration du cadre de vie pour les Chambonnaires et les habitants de la vallée de l'Ondaine. Elle a permis de créer 1 250 mètres de chemins piétonniers dont 750 également aménagés en piste cyclable (voie verte).

L'Ondaine renaturée. 16 juin 2010

FIGURE 145 SAINT-ETIENNE MÉTROPOLE

GOUVERNANCE

Maître d'ouvrage : Communauté d'Agglomération de Saint-Etienne Métropole
Bureau d'étude pour la conception-réalisation : Paul Vollin Ingénierie en groupement avec HTV (volet hydraulique) et Riparia (volet écologique).
Maître d'œuvre : maîtrise d'œuvre intégrée (conception-réalisation)
Entreprise : Guintoli (Terrassement, génie civil), sous-traitants Génie Végétal (SW environnement)
Evacuation et traitement des déblais : SITA FD

Coût : 10 millions d'euros HT (y compris les 250m de rivière réaménagés en amont)
Etudes préalables aux travaux : 525 872 € HT
Acquisitions foncières et démolitions : 1 750 000 € HT
Travaux d'aménagement : 2 376 925 € HT
Evacuation et traitement des déblais : 5 347 203 € HT

Financeurs :
Saint-Étienne Métropole : 2 740 000 euros ;
État : 3 100 000 euros (plan de relance gouvernemental) ;
Région Rhône-Alpes : 1 678 000 euros ;
Agence de l'eau Loire-Bretagne : 506 000 euros ;
Conseil général de la Loire : 240 000 euros.

Coût des acquisitions foncières de la ville de Chambon-Feugerolles : 1 750 000 euros
Montant des aides:
Agence de l'eau Loire-Bretagne : 400 000 euros ;
Région Rhône-Alpes : 560 000 euros ;
Europe via le FEDER : 107 000 euros.

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

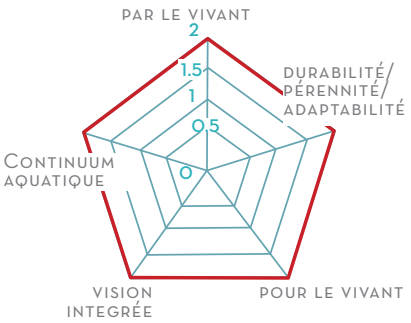
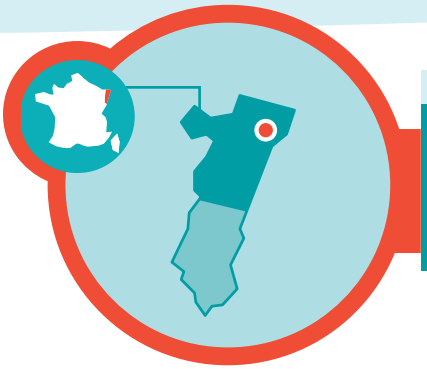


FIGURE 146



SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN: : RHIN-MEUSE
RÉGION: ALSACE
DÉPARTEMENT: BAS-RHIN
COMMUNE: MUNDOLSHEIM ET REICHSTETT

FICHE 4

La renaturation de la Souffel

La Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS) est parcourue par 400 km de linéaire de cours d'eau. La Souffel et ses affluents (93 km) drainent un bassin versant de 130 km² regroupant 30 communes. L'ensemble des communes est associé dans l'élaboration d'un Schéma d'Aménagement et d'Entretien Ecologique des Cours d'Eau (SAGEECE) depuis 2000 sous l'impulsion du Conseil général du Bas-Rhin, chargé de la maîtrise d'ouvrage. Le SAGEECE est un outil spécifique de gestion des cours d'eau crée en 1991 par le Conseil général du Bas-Rhin. C'est un schéma opérationnel non réglementaire contrairement au SAGE, permettant de fédérer les acteurs autour d'un programme d'actions pluriannuel par bassin versant, avec le cofinancement du Département et de l'agence de l'eau Rhin-Meuse.

RESTAURATION DE LA SOUFFEL

En raison de sa situation géographique et de la nature de son bassin versant, la Souffel a fait anciennement l'objet de nombreuses rectifications et aménagements entrainant la perte de la dynamique du cours d'eau et limitant fortement la diversité du milieu. De plus, son bassin versant étant très agricole et urbanisé, elle subit un apport important de matières organiques et minérales en périodes pluvieuses, dégradant fortement sa qualité d'eau et entrainant un envasement des milieux. L'aspect du cours d'eau est très dégradé sur tout son linéaire.

En mettant en œuvre des mesures de restauration, la CUS se fixe comme objectif l'amélioration des qualités biologiques, hydrauliques et paysagères de la Souffel et de ses berges. Cependant la restauration ne peut se faire qu'avec une certaine emprise foncière, adaptée au contexte de la zone à restaurer.

REMÉANDRAGE DE LA SOUFFEL À MUNDOLSHEIM

L'encaissement du lit de la rivière perturbe son fonctionnement biologique entrainant un milieu pauvre en faune et en flore. A Mundolsheim, l'objectif était de diversifier le lit mineur et les berges tout en tenant compte de la contrainte foncière et de la présence d'un collecteur d'assainissement menacé par l'érosion. Les travaux ont été réalisés principalement de février à mars 2012 à l'exception des plantations d'arbres et d'arbustes qui ont été réalisées fin 2012.

PARTIE AMONT DU TRONÇON : SOUFFEL MUNDOLSHEIM

Installation d'un peigne pour :
- Stabiliser la berge érodée afin de protéger un collecteur d'assainissement ;
- Resserrer le lit mineur afin de diversifier les habitats aquatiques et de lutter contre l'envasement dû aux travaux de rectifications.

Retalutage des berges en pente douce

Lit de couches de **branches de saules vivantes avec ramilles** pour reconstituer une saulaie le long de la Souffel et pour stabiliser le pied de berge.

Tressage de saule en pied de berge afin d'éviter toute érosion suite au resserrement des écoulements dû à la mise en œuvre du peigne.

Treillis coco pour fixer les branches de saules le long de la Souffel et pour stabiliser le pied de berge.

L'aménagement des berges en pente douce et la création d'une zone de divagation ont favorisé le bon fonctionnement de la rivière en évitant l'envasement en période de sécheresse et en augmentant les capacités de stockage en période de crues.
PARTIE AVAL DU TRONCON : impossible de retaluter la berge

- épis en pieux jointifs ancrés sur les deux berges pour concentrer les écoulements au centre du lit mineur ;
- peigne stabilisant la berge en rive droite où un début d'érosion a été constaté.

FIGURE 147

REMÉANDRAGE DE LA SOUFFEL À REICHSTETT

La commune de Souffelweyersheim se trouvant en rive droite de la Souffel faisait l'objet d'inondations répétées principalement au niveau de son terrain de foot. Afin de réduire la fréquence de ces inondations et d'améliorer la fonctionnalité du cours d'eau, la CUS a souhaité le renaturer. Une analyse des données altimétriques a mis en évidence l'ancien lit de la Souffel dans une prairie basse inondable par surverse sur le ban communal de Reichstett.

Le cours d'eau a été remis dans son ancien lit sur 550 ml. Cela a permis de reconnecter le lit mineur au lit majeur et de redonner une fonctionnalité au cours d'eau. Le lit actuel de la Souffel n'a pas pu être fermé à cause de la présence de déversoir d'orage. Il a été transformé en bras mort afin créer de nouveaux habitats.

CARTE REPRÉSENTANT L'ANCIEN LIT DE LA SOUFFEL (OBTENU À PARTIR D'UNE CAMPAGNE DE MESURES DE MNT[1] PAR LASER AÉROPORTÉ). LES ZONES BASSES APPARAISSENT EN BLEU ET LES ZONES HAUTES EN ORANGE ET ROUGE.

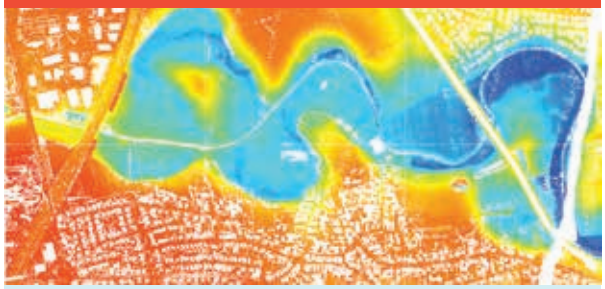


FIGURE 148

PROFIL EN TRAVERS

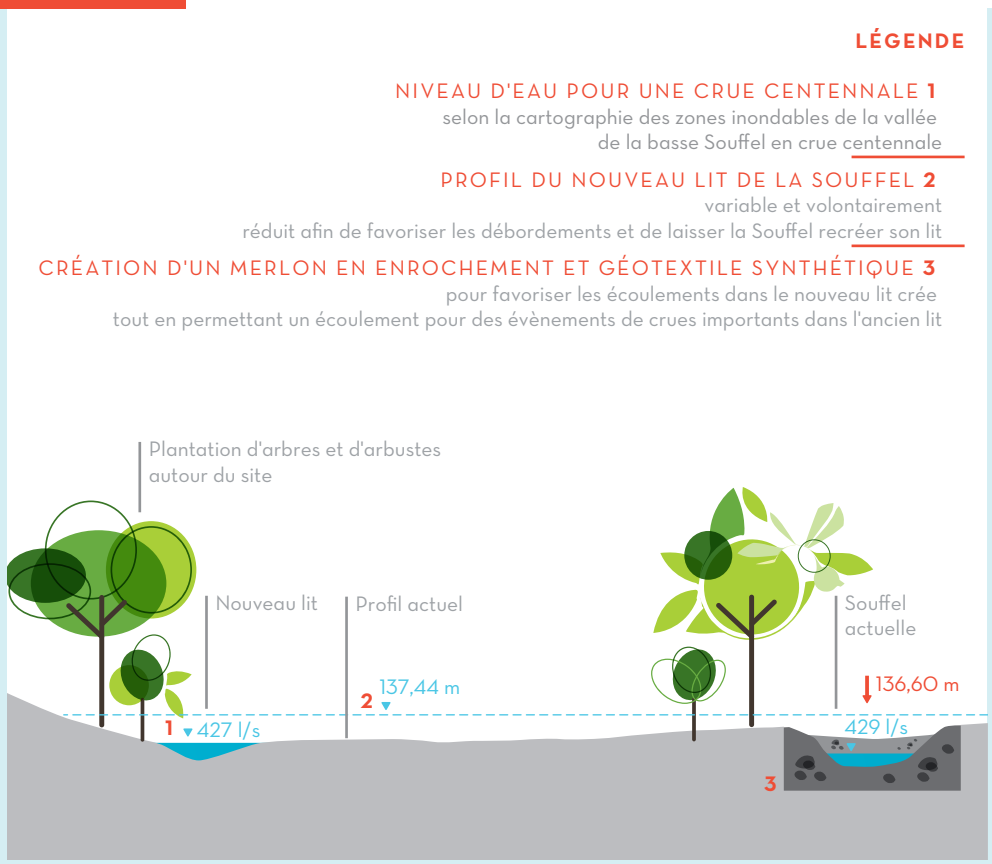


FIGURE 149

[1] *Modèle Numérique de Terrain*

Le nouveau lit a été réduit au maximum (dimensionnement pour le débit d'étiage) pour concentrer les écoulements et limiter son envasement. Sur les 550 m de cours d'eau renaturés, il n'y a pratiquement pas eu de stabilisation de berges pour permettre au cours d'eau de divaguer naturellement dans l'emprise disponible. Seules les zones considérées comme sensibles à l'érosion ont été végétalisées. Afin de forcer les écoulements en basses et moyennes eaux vers le nouveau lit sans avoir d'incidence en crue, un seuil de surverse a été réalisé pour faire transiter une partie des débits de crue dans l'ancien lit.

LES CONTRAINTES DE LA MAITRISE FONCIÈRE

Cette déviation permettant de rétablir une connexion fonctionnelle entre le lit mineur et le lit majeur, le caractère humide du site en a été renforcé du fait d'inondations régulières. La gestion antérieure de cette prairie n'a pas pu être maintenue, car il n'était plus possible de récolter le foin pour une valorisation agricole. C'est pourquoi l'acquisition et l'abandon se sont avérés nécessaire. Les deux exploitants des 2,2 ha touchés par ce projet ont été contactés en amont du projet et ont très rapidement donné leur accord pour abandonner leur exploitation, le premier, certainement à cause

LE NOUVEAU LIT DE LA SOUFFEL

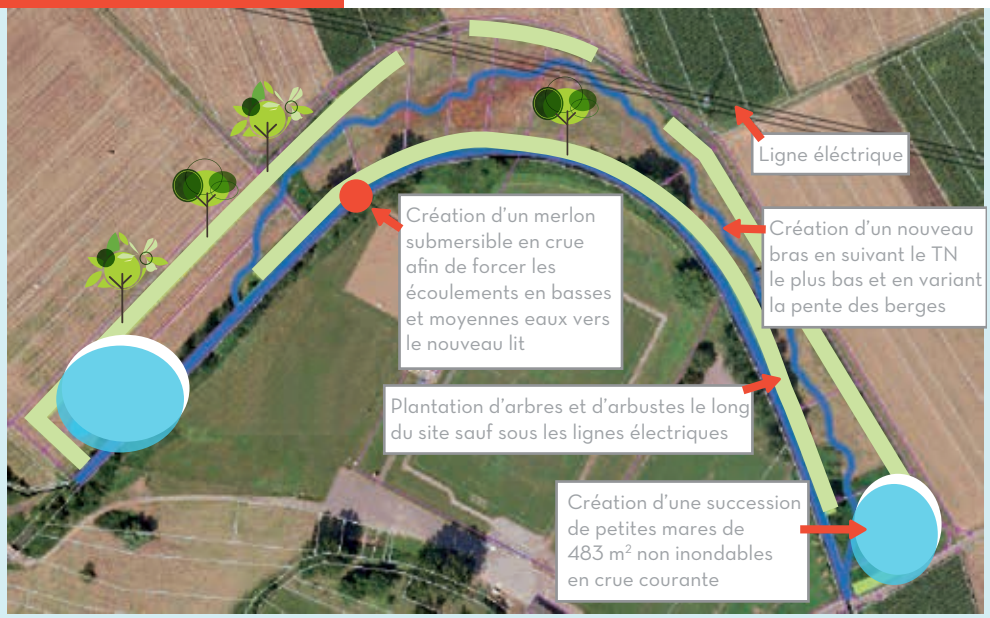


FIGURE 150

Des mares déconnectées du cours d'eau et devant être alimentées par la nappe d'accompagnement ont été aménagées afin de faciliter la réinstallation d'espèces (batraciens, libellules, insectes) et de favoriser la venue d'oiseaux migrateurs. Ces mares ont été placées sur les hauteurs pour éviter que la Souffel déborde dedans et les comble. Elles fournissent également une possibilité de stockage supplémentaire en période de hautes eaux. Des arbres et des arbustes ont été plantés le long du site pour aménager des zones de bosquet et créer des zones de refuges, à l'abri des promeneurs.

de leur faible valeur agronomique, s'agissant d'une prairie inondable, le second, du fait que la surface concernée, cultivée en maïs n'était pas trop importante. Une forte indemnité a néanmoins été versée à ces agriculteurs, dépassant la valeur du foncier.

En vue de garantir la pérennité des actions engagées, la CUS a souhaité acquérir la totalité des terrains restaurés. Après négociations et augmentation substantielle du prix de vente des terrains, les propriétaires ont accepté la vente, à l'exception d'un agriculteur qui a exigé un échange de terrains sur 70 ares. La mise en

œuvre des travaux a de ce fait été retardée d'un an et demi en raison des difficultés pour trouver un terrain qui convienne à ce propriétaire. Le projet a finalement pu être réalisé intégralement et dans de bonnes conditions grâce à la commune de Souffelweyersheim qui a proposé des terrains en échange.

RÉSULTATS

Le lit sur Reichstett a été restauré en décembre 2011, les mares et les plantations en mars 2012. La végétation a repris au printemps et la reconstitution du biotope s'est faite aussitôt, grâce entre autres au fait que les engins pour évacuer la terre avaient une portance au sol très faible. La ripisylve s'est reconstituée naturellement à l'aval, par enracinement de boutures naturelles de saules fragiles, restaurant ainsi un corridor écologique.

Le cours d'eau divague librement en reméandrant dans son lit majeur. Il s'étale au fur et à mesure, créant des zones de faibles profondeurs, pouvant attirer canards et limicoles. Dès la première année, la grenouille rousse a pondu dans ces zones.

Enfin, 2 espèces de criquets présentes sur la liste rouge régionale (criquet ensanglanté et criquet des roseaux) et plusieurs espèces de libellule (libellule écarlate, gomphe à pince, orthétrum brun) présentes sur la liste orange régionale ont été observées sur le site ainsi qu'une bécassine des marais, un chevalier guignette, une grande aigrette et une sarcelle d'hiver lors de la période de migration.

Il n'y a pas de nappe d'accompagnement à l'endroit où les mares ont été creusées. Ces mares servent donc de zone tampon en collectant les eaux de ruissellement.

MESURES DE SUIVI ET D'ENTRETIEN

Un suivi de la reprise de la végétation est prévu sur les 2 premières années. La CUS souhaite maintenir le milieu assez ouvert. Afin d'entretenir le site, une fauche tardive annuelle est prévue chaque automne avec l'évacuation des matériaux.

Lors de la première crue en mai 2012, l'ensemble de la zone renaturée a servi de zone tampon. Un dépôt de sédiment de quelques centimètres a été observé sur les parties basses mais le lit ne s'est pas envasé et les berges n'ont pas bougé. Le lit s'est légèrement creusé à l'endroit où une érosion de berges était prévue. Un débordement a eu lieu dans la première mare malgré sa position haute.

Un corridor écologique a été reconstitué et le cours d'eau a retrouvé un fonctionnement naturel, pouvant de nouveau inonder les prairies avoisinantes.

Le projet a pris en compte l'accueil du public en créant un nouveau cheminement enherbé dans la partie amont du site permettant aux promeneurs de faire une boucle autour du site. Parallèlement, ce nouveau chemin facilite l'entretien du site restauré et permet de créer une zone tampon vis-à-vis des ruissellements des eaux des terrains cultivés avoisinants.

L'ensemble des travaux réalisés à l'échelle du bassin versant ont été retranscrits et mis en valeur dans une exposition itinérante, visible dans les communes concernées. Un panneau didactique a également été posé à l'entrée du site.

PREMIÈRE CRUE (MAI 2012)

FIGURE 151

RÉSULTAT DES TRAVAUX

FIGURE 152

POUR EN SAVOIR PLUS

http://www.simbio.fr

GOUVERNANCE

Maitre d'ouvrage : Communauté Urbaine de Strasbourg
Maitre d'œuvre : SINBIO
Coûts :
Mundolsheim : 52 K€ HT pour un linéaire total de cours d'eau de 300 m.
Reichstett : 80 K€ HT pour un linéaire total de cours d'eau de 550m + création de mares
Financement Mundolsheim:
Agence de l'eau : 60%
CUS : 40%
Financement Reichstett :
Financement public (Agence de l'eau + Région Alsace) : 80 %,
CUS : 20%

Concordance des objectifs du projet en fonction de la définition de l'ingénierie écologique donnée au chapitre 1

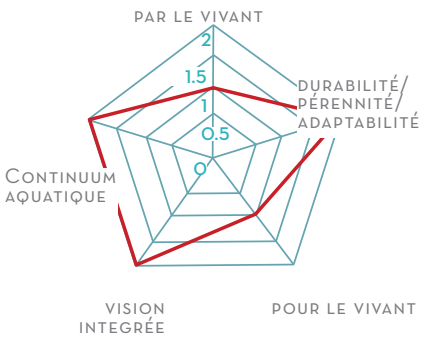


FIGURE 153

Situation géographique :

BASSIN: : RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE
RÉGION: RHÔNE-ALPES
DÉPARTEMENT: RHÔNE
COMMUNE: OULLINS, SAINTE FOY-LÈS-LYON, FRANCHEVILLE, TASSIN LA DEMI-LUNE ET CHARBONNIÈRES-LES-BAINS

FICHE 5

Lutte contre les inondations centennales et restauration des milieux naturels : cas du Bassin de l'Yzeron

1. UN CONTEXTE PROPICE AUX CRUES

Le Bassin de l'Yzeron s'étend sur 150 km², il rassemble 20 communes pour 114 000 habitants et il est composé de 45 km de cours d'eau principaux. Dans les années 1970, de nombreuses constructions ont été réalisées dans le lit majeur des cours d'eau et l'urbanisation intensive a entrainé de fortes contraintes sur le lit mineur. Le bassin de l'Yzeron est un territoire contrasté avec une urbanisation graduelle et une pression démographique forte :

- *zone rurale (amont): pentes fortes et espaces relativement préservés ;*
- *zone péri-urbaine (partie médiane) : rupture de pente, le plateau s'urbanise et les enjeux de développement sont forts ;*
- *zone urbaine (aval) : elle correspond à l'Agglomération Lyonnaise. L'artificialisation des sols est ancienne et les berges sont dégradées ou fixées.*

Crue du 2 décembre 2003 au quartier du Merlo à Oullins

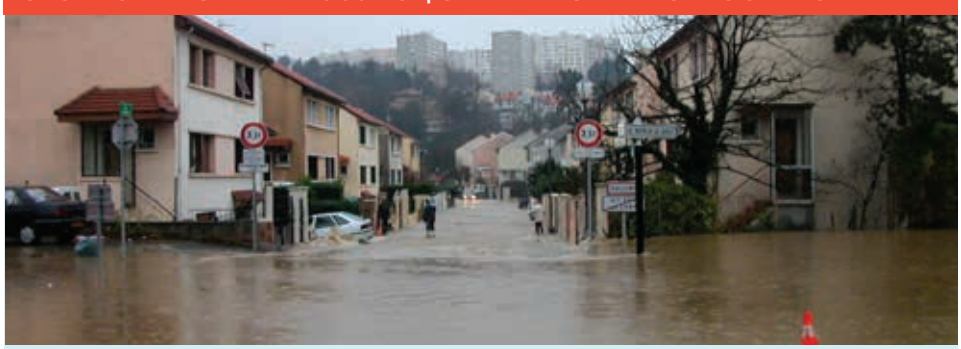


FIGURE 154

Dans un contexte géologique, topographique et climatique naturellement favorable aux crues, cette urbanisation dans le lit de la rivière a exposé les biens et les personnes aux risques d'inondations. A partir des années 1980, les habitations construites dans les zones de débordement des rivières (lit mineur et lit majeur) ont connu des inondations rapides et torrentielles. Leurs fréquences et leurs gravités se sont amplifiées au cours de ces dernières décennies. Les dernières crues majeures ont eu lieu en 2003-2005-2008 et 2009. A ce stade de l'urbanisation, on considère que les crues inondantes proviennent encore majoritairement des apports «naturels» de l'amont du bassin. Les imperméabilisations massives des secteurs agglomérés génèrent cependant des pics d'hydrologie urbaine qui ont d'autres conséquences (érosions, pollutions, saturations de réseaux, débordements locaux), et une nouvelle augmentation des ruissellements aurait des effets significatifs sur les grandes inondations. Un PPRNi est en place depuis 1998 et a été étendu en 2013 à l'échelle du bassin versant, préservant les zones naturelles d'inondations restantes, et prescrivant des mesures compensatoires de gestion des eaux pluviales.

Fort gradient d'évolution de l'occupation des sols

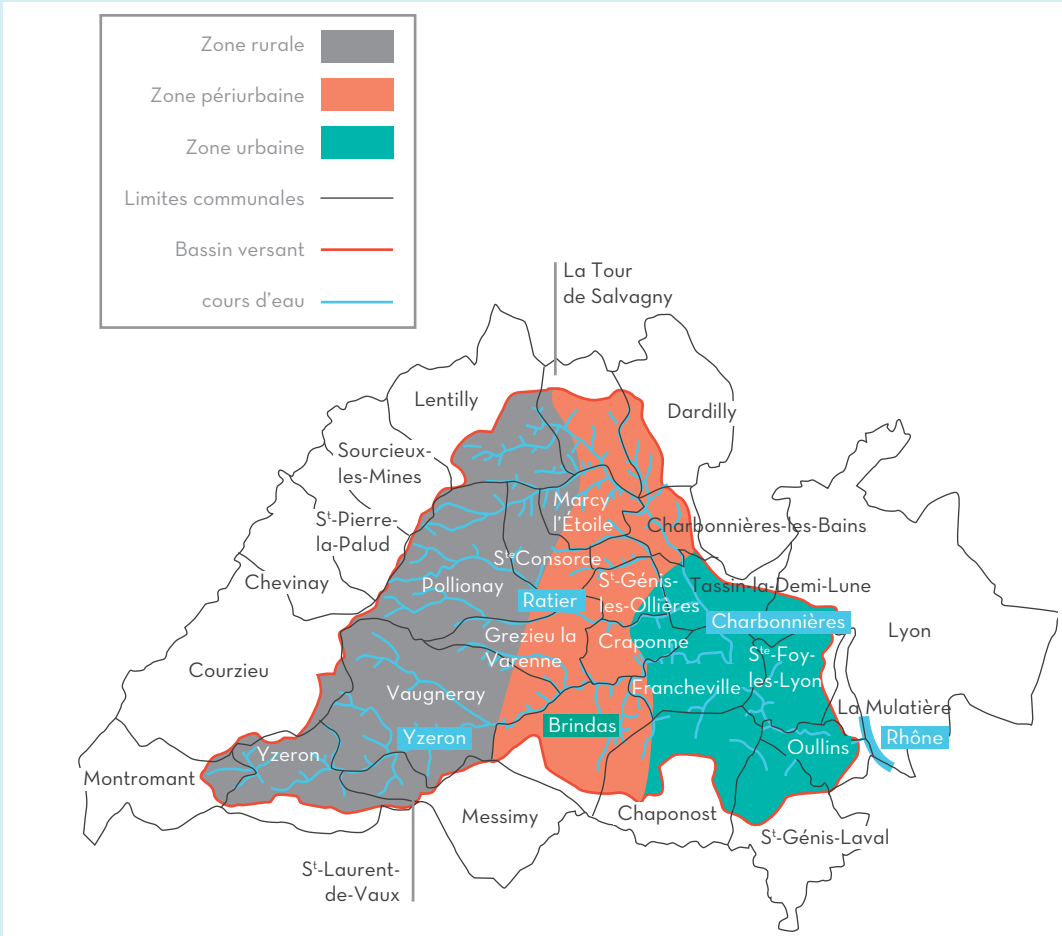


FIGURE 155

Historique de la démarche du Bassin Versant

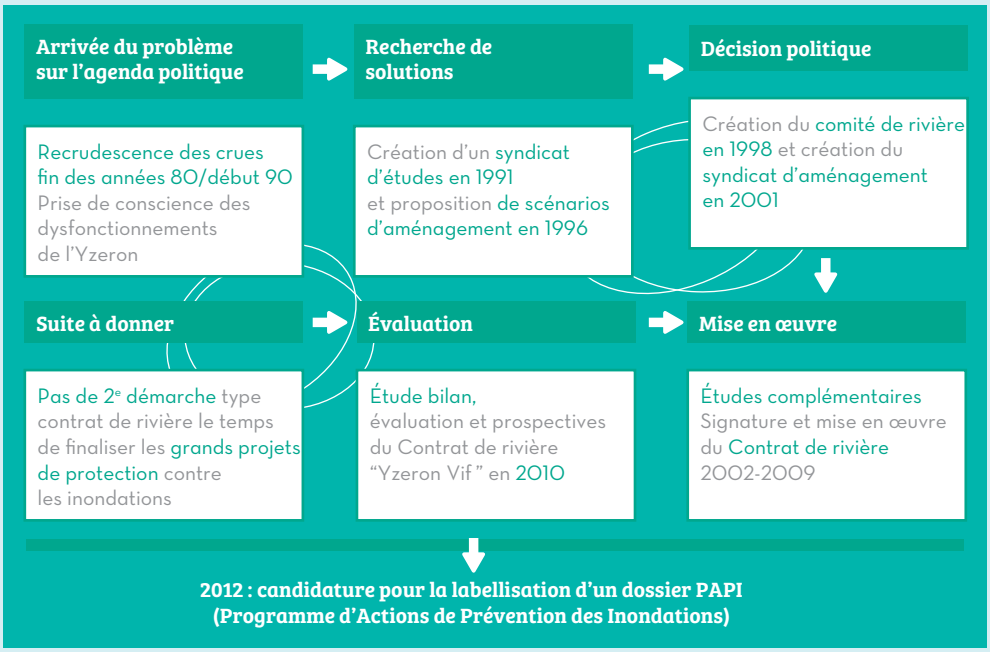


FIGURE 156

2. UN PROJET INITIAL À VOCATION PRINCIPALEMENT HYDRAULIQUE

Suite à une crue importante de l'Yzeron (rivière péri-urbaine) en 1989, les élus ont pris conscience du problème et ont créé successivement un syndicat d'étude en 1991 puis un syndicat d'aménagement en 2001. Entre 1991 et 2001, un bureau d'études a été mandaté pour étudier le fonctionnement du bassin versant et faire des préconisations. Les conclusions de ces premiers travaux ont mis en lumière d'autres problèmes que ceux liés à l'hydraulique (assecs, qualité des milieux etc.). Il a alors recommandé de travailler sur l'ensemble du bassin versant. Cela a conduit à la signature d'un contrat de rivière en décembre 2002.

Le contrat de rivière était le premier programme d'actions concerté d'aménagement et de gestion mis en œuvre sur le bassin versant. Il prévoyait un volet hydraulique important visant à réduire les risques d'inondation des principales communes vulnérables aux crues. Cette démarche a été portée par le Syndicat Intercommunal du Bassin de l'Yzeron (SAGYRC) qui fédère les 20 communes du bassin versant, les associations, les institutions et les riverains des cours d'eau autour d'objectifs partagés.

Solutions techniques (volet inondation du contrat de rivière) : Etude SOGREAH :

La stratégie globale de prévention et de protection contre une crue centennale définie dans le contrat de rivière s'appuie sur 3 types d'action :

- la réalisation de deux barrages d'écrêtement des crues centennales provenant de l'amont du bassin versant pour réduire l'importance des débits en aval ;
- l'élargissement de l'Yzeron sur 3 communes en aval pour permettre l'écoulement des crues sans débordement, correspondant à une protection d'ordre trentennal ;
- l'élargissement des cours d'eau sur 2 autres communes en amont des barrages, permettant directement une protection centennale.

En plus de ces élargissements, dont les emprises sont souvent limitées en zones urbaines, les aménagements s'accompagnent d'endiguements longitudinaux en sommet de berges (merlons, murets), permettant de compléter les protections.

ECHELLE DU PROJET : 8 SITES ÉLARGIS ET RENATURÉS RÉPARTIS SUR 5 COMMUNES (4.5 KM DE COURS D'EAU RESTAURÉS SOIT 10% DU LINÉAIRE DU BV ET 65 % DU LINÉAIRE DE MASSE D'EAU FORTEMENT MODIFIÉE EN AVAL).

FIGURE 157

Les études de maîtrise d'œuvre ont débuté en décembre 2006 et ont duré 2 ans. Pour le volet relatif aux travaux en cours d'eau, le 1er avant-projet avait une vocation plutôt hydraulique. L'agence de l'eau n'intervenait initialement pas dans ce volet du contrat de rivière, finançant uniquement et ponctuellement la destruction d'un lit entièrement bétonné à Oullins (environ 300 000 €).

3. PREMIÈRE MUTATION DU PROJET : INTÉGRATION DES ASPECTS HYDRO-ÉCOLOGIQUES

En 2008, l'agence devait impulser la mise en œuvre de la DCE (Directive Cadre sur l'Eau) et du SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux), et appliquer son IXe programme d'intervention. Une des 2 masses d'eau superficielles de

l'Yzeron était évaluée dans le SDAGE comme une masse d'eau fortement modifiée, où l'objectif d'atteinte du bon potentiel est attendu pour 2021. Les réflexions liées à la DCE ont mis en lumière les opportunités de restauration dans le cadre du projet d'élargissement et la suppression de substrats dégradés, voire totalement artificialisés, prévus pour la protection contre les crues. Lorsque le syndicat a sollicité l'agence de l'eau pour le financement du projet, celle-ci a identifié ces opportunités mais a demandé d'accompagner le dossier d'avant-projet, à dominante génie civil et hydraulique, d'une expertise écologique, afin de préciser des enjeux de restauration hydromorphologique plus ambitieux.

Expertise écologique :

A la demande de l'agence de l'eau, le SAGYRC a donc lancé une étude d'expertise pour évaluer la pertinence des mesures environnementales proposées et les axes d'amélioration à apporter dans le cadre d'un programme de travaux hydrauliques visant à concevoir des ouvrages pour protéger les habitations d'Oullins, de Sainte Foy lès Lyon, de Francheville, de Tassin la Demi-Lune et de Charbonnières-les Bains contre une crue centennale.

Cette étude d'expertise sur les 8 secteurs de travaux avait pour objet de répondre aux questions suivantes :

- les mesures proposées répondent-elles aux objectifs d'atteinte du bon état écologique au regard de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau ?
- quels sont les axes d'amélioration à apporter à l'avant-projet pour mieux atteindre ces objectifs, le cas échéant ?

Les conclusions de l'expertise écologique rendues en septembre 2010 ont permis d'identifier des axes d'amélioration sans toutefois modifier les contraintes hydrauliques liées au niveau de protection requis (crue centennale ou crue centennale écrêtée). Les axes d'amélioration portent sur les points suivants :

- une prise en compte du contexte boisé des abords de ces cours d'eau et notamment de la spécificité de la ripisylve ;
- un effort sur la préservation et la restauration des faciès d'écoulement sur les secteurs où le débit est le plus important ;
- un développement de l'attractivité en berge au détriment de la minéralisation due aux structures de soutènement et de protection ;
- une optimisation de la restauration hydromorphologique dans l'espace dégagé lors des élargissements à but hydraulique ;
- une intégration des principales contraintes physiques (stress hydrique, ensablement, etc.) dans les techniques de génie écologique.

En tenant compte des préconisations de l'expertise écologique, le SAGYRC a réalisé en 2011 l'avant-projet modificatif portant sur les travaux de restauration hydraulique et environnementale sur les 8 tronçons identifiés, il a permis de préciser de nombreuses contraintes de mise en œuvre des projets et de réestimer l'enveloppe prévisionnelle : de 14,39 M €, suite à l'expertise écologique, elle passe à 19,22 M€.

Par ailleurs, une analyse de la compatibilité du projet en lien avec les outils institutionnels a été réalisée :

Outils institutionnels	Volets concernés
SDAGE Rhône- méditerranée-Corse (du 20 novembre 2009)	Préservation et redéveloppement des fonctionnalités naturelles des bassins et des milieux aquatiques
Qualité des eaux (DCE)	Amélioration de la capacité autoépuratrice des cours d'eau sur les sites restaurés
Le Plan Rhône	lutte contre les inondations et lutte contre la prolifération d'espèces invasives.
Le contrat de rivière « Yzeron vif »	Respect de la libre circulation piscicole et renaturation du cours d'eau.
Le Plan Départemental pour la Protection du milieu aquatique et la Gestion des ressources piscicoles (P.D.P.G.) du département du Rhône	Elargissement et restauration du cours d'eau en zones urbaines et amélioration des fonctionnalités écologiques des milieux aquatiques.

Cette analyse a permis la définition de 5 enjeux :

- l'amélioration de la qualité des eaux ;
- la préservation et restauration des milieux aquatiques ;
- la gestion de la ressource et des débits ;
- la biodiversité, gestion et protection du patrimoine naturel ;
- la valorisation des milieux aquatiques.

L'expertise écologique a permis de faire évoluer la positon de l'agence de l'eau sur le financement du projet. Le financement initial était envisagé sur une ligne d'aide « restauration physique des milieux » correspondant à la prise en charge à 50% des travaux strictement liés à cette thématique. Suite à l'expertise écologique, l'agence a demandé de faire le lien entre l'ensemble des actions menées à l'échelle du bassin versant et le projet. Au fur et à mesure des discussions avec l'agence, le projet a gagné en qualité et il est alors apparu qu'il pouvait être financé suivant une ligne d'aide intégrée « inondation-restauration ». En se basant sur cette ligne, le financement est passé à 30% sur la quasi-totalité du projet (hormis les protections - digues nouvelles et les aménagements paysagers : passerelles, cheminements... ; mais comprenant notamment les terrassements et les opérations de génie civil). Le contrat pour la restauration physique et l'amélioration de la continuité écologique des cours d'eau du bassin versant de l'Yzeron est un des premiers de ce type validé par l'agence de l'eau. Sur la base de l'avant-projet modificatif, la participation maximale de l'agence pour la réalisation des travaux sur les 8 sites est alors estimée à 5,665 M€.

La préoccupation initiale de lutte contre les inondations a évolué vers un projet à visées non seulement hydrauliques - avec l'élargissement de l'Yzeron - mais aussi environnementales. Au final, l'avant-projet initial hydraulique n'a pas vraiment évolué, seule l'approche a changé, renforçant le recours au génie écologique visant à restituer une mosaïque d'habitats aquatiques fonctionnels dans un lit d'écoulements courants, au sein d'un espace faisant nécessairement appel à des techniques lourdes de soutènement et de confortement.

Exemple de restauration de milieux à Oullins : travaux prévu au printemps 2014

ETAT ACTUEL

ETAT PROJET

FIGURE 158

4. SECONDE MUTATION DU PROJET : INTÉGRATION DE L'ÉCOLOGIE URBAINE (VOIRIE, CADRE DE VIE) EN CONCERTATION AVEC LES COMMUNES, LE GRAND LYON ET LES ASSOCIATIONS

L'élargissement et la restauration des cours d'eau constituent un réaménagement du cadre urbain. Il a donc fallu préciser les enjeux paysagers. En ce qui concerne l'aspect restauration des milieux dans les zones urbaines, un gain paysager avait été pensé à la sortie du premier avant-projet :

- cheminement mode doux décidé par les élus ;
- réappropriation locale du projet.

Sur certains linéaires significatifs et emblématiques, les élus locaux et les porteurs du projet voulaient reconstituer un espace de promenade.

Des enjeux hydrauliques, écologiques et paysagers

La conception de la zone à réaménager a permis de faire travailler ensemble urbanistes et hydrauliciens. Il s'agissait de faire respecter la vocation première de l'aménagement qui était hydraulique tout en concevant des aménagements écologiques et paysagers.

De même, des discussions ont été engagées avec les associations environnementales telles que la LPO et la FRAPNA notamment sur l'abattage de grands arbres, la destruction de certains habitats et les mesures compensatoires associées, les modalités d'entretien futures des sites, leur éclairage etc. Le projet de réaménagement a également pu être mis en lien avec l'agenda 21 des communes et un projet « nature » mené par le Grand Lyon.

Aménagements de cours d'eau à Oullins

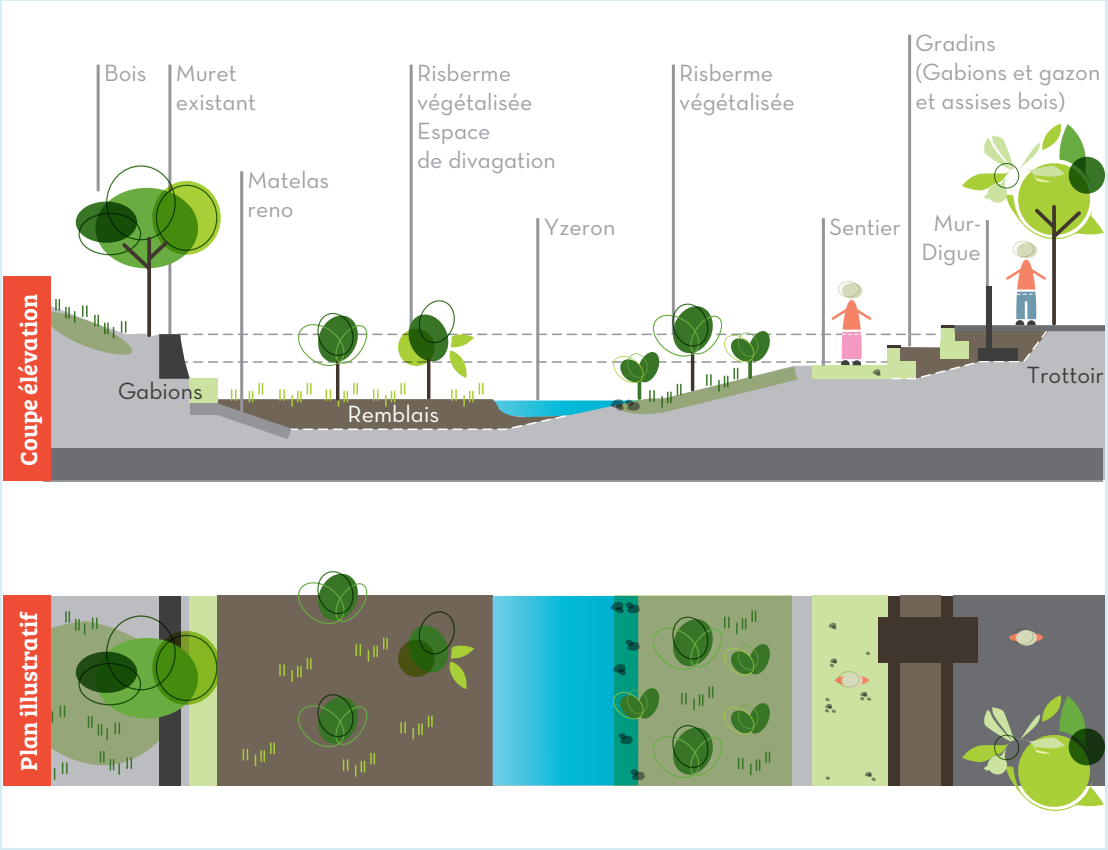


FIGURE 159

Le choix d'une maîtrise foncière totale

L'Yzeron est un cours d'eau non domanial ce qui signifie que chaque riverain est propriétaire du cours d'eau jusqu'à la moitié du lit. Le syndicat a fait le choix d'une maîtrise foncière totale sur les lieux d'élargissement du lit et de construction de digues. Une Déclaration d'Utilité Publique (DUP) a été engagée et obtenue sur les 4.5 km de la rivière à restaurer. Elle concerne une centaine de propriétaires. Le démarrage des travaux sur les cours d'eau est aujourd'hui conditionné par la maîtrise foncière de l'ensemble du linéaire concerné par les aménagements.

Prise en compte de l'adaptabilité du projet

Le projet a intégré en amont les interventions complémentaires d'ajustement qui seront réalisées post travaux. Le projet pourra être adapté selon l'évolution du milieu. Pour suivre cette évolution, un suivi écologique sera réalisé sur 5 ans. De même, le site sera suivi dans le cadre de l'observatoire écologique du bassin versant récemment mis en place.

POUR ALLER PLUS LOIN :

www.riviere-yzeron.fr

GOUVERNANCE

Maitre d'ouvrage: Syndicat Intercommunal du Bassin de l'Yzeron (SAGYRC)
Assistant à maîtrise d'ouvrage technique et organisationnel : Cabinet HYDRATEC
Assistant à maîtrise d'ouvrage communication : Cabinet MEDIACITE
Maitre d'œuvre des travaux de cours d'eau : SOGREAH (AVP initial) et CNR Ingénierie (ensemble du Projet et suivi de travaux)
Maître d'œuvre des travaux de barrages écrêteurs : ISL.

Couts
Total de l'opération : 43,8 M€ HT
Etudes : 4.5 M€ HT
Foncier : 4.5M€ HT
Travaux cours d'eau : 22,1 M€ HT
Travaux barrages écrêteurs : 12,7 M€ HT

Partenaires financiers
Etat (démarche PAPI engagée)
Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse (Contrat mono-thématique / 10e programme)
Région Rhône-Alpes (contrat d'objectifs)
Département du Rhône (contrat pluriannuel)
Grand Lyon (politique de l'eau)
SAGYRC (20%) : communes d'Oullins, Sainte Foy-lès-Lyon, Francheville, Tassin la Demi-Lune et Charbonnières-les-Bains

Chapitre 4

4

DYNAMIQUE DES COURS D'EAU

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

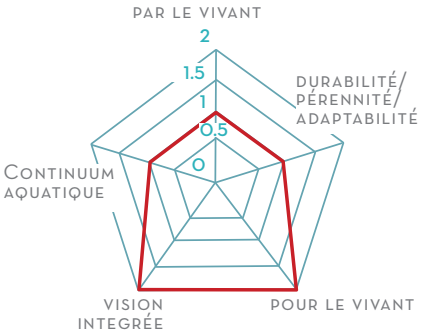


FIGURE 160

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN : ADOUR-GARONNE
RÉGION : MIDI-PYRÉNÉES
DÉPARTEMENT : HAUTES PYRÉNÉES ET GERS
COMMUNES : 17 COMMUNES
LAFITOLE, MAUBOURGUET, ESTIRAC, CAUSSADE-RIVIÈRE, LABATUT-RIVIÈRE, TIESTE-URAGNOUX, JÛ-BELLOC, HÈRES, CASTELNAU-RIVIÈRE-BASSE, PRÉCHAC-SUR-ADOUR, GOUX, GALIAX, CAHUZAC-SUR-ADOUR, IZOTGES, TERMES-D'ARMAGNAC, SARRAGACHIES, RISCLE.

FICHE 1

La concertation pour passer de la stabilisation de berges à un espace de mobilité admis pour l'Adour

1. HISTOIRE DU LIT DE L'ADOUR

A partir des années 1960, le lit majeur et le lit mineur de l'Adour ont subi d'importantes extractions de granulats alluvionnaires. Ces extractions ont entrainé un encaissement du lit mineur et une érosion importante des berges. Pour limiter ces instabilités, des travaux de protection de berges (enrochements, etc.) ont été réalisés par les syndicats de rivière, à la demande des riverains. Dans les Hautes-Pyrénées, sur la période 1999-2004, ces travaux représentaient un coût d'environ 1 200 000 € HT. Cependant, la majeure partie de ces aménagements a été dégradée par les crues successives de l'Adour.

BERGES ÉRODÉES DE L'ADOUR

FIGURE 161 BEAUFRÈRE, GÉODIAG, 2006

2. UNE CONCERTATION POUR ENGAGER COLLÉGIALEMENT DES ACTIONS ADAPTÉES

En 2004, après avoir refait 3 fois les ouvrages de protection de berges d'une route communale, l'Institution Adour (EPTB) et la commune de Labatut-Rivière décident de déplacer l'infrastructure. Au final, l'Adour a coupé son méandre rendant cette opération caduque. Cet événement a été l'élément déclencheur d'une réflexion globale menée à l'échelle territoriale.

En 2005, l'agence de l'eau Adour-Garonne propose à l'Institution Adour de mener une étude sur l'espace de mobilité historique de l'Adour, c'est-à-dire l'aire balayée par le lit du fleuve, au cours des derniers siècles. Le bureau d'étude GéoDiag s'est appuyé sur l'examen de l'extension maximale de la forêt alluviale, des bras morts et des chenaux secondaires ainsi que sur des documents anciens (cartes géologiques, cartes topographiques, photographies aériennes) pour retracer l'historique des positions successives du lit mineur du fleuve. En superposant les emprises successives du cours d'eau à différentes époques, cela a permis de reconstituer le faisceau à l'intérieur duquel les chenaux d'écoulement ont migré ou divagué. Cette zone définit l'espace de mobilité fonctionnel, soit à l'échelle géologique (10 000 ans et plus) soit à l'échelle historique (1 à 2 siècles).

DÉFINITION DE L'ESPACE DE MOBILITÉ

Le SDAGE définit l'espace de mobilité comme l'« Espace du lit majeur à l'intérieur duquel le ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales pour permettre une mobilisation des sédiments ainsi qu'un fonctionnement optimum des écosystèmes aquatiques et terrestres ». Il met en avant la nécessité de restaurer les phénomènes de régulation naturelle qui caractérisent la dynamique fluviale des cours d'eau à lit mobile.

Suite à cette étude, l'Institution Adour s'est engagée dans une action test dite « de reconquête de l'espace de mobilité de l'Adour », entre Lafitole (65) et Riscle (32). Elle a rencontré les syndicats de rivière pour leur présenter et partager avec les élus les constats et définir avec eux la démarche à suivre.

Avec l'accord des syndicats, l'Institution Adour a organisé des réunions entre les élus municipaux et le bureau d'étude. Le rôle de l'ingénieur a été important dans cette phase de concertation. Avec pédagogie, il a illustré la notion de mobilité fluviale, ses causes et ses impacts. Dans le cadre de cette médiation, il a élaboré un constat, aussi objectif que possible, sur l'efficacité des travaux et de la gestion en cours, montrant notamment le coût et les conséquences d'une lutte systématique contre les érosions de berge. L'objectif était de définir un espace et des règles de gestion compatibles avec l'espace de fonctionnement nécessaire pour l'Adour, d'une part, et les implantations ou activités humaines, d'autre part.

A la fin de cette première phase de concertation, les élus ont défini un espace de mobilité admissible, tenant compte des enjeux d'intérêt général ou patrimonial, de sécurité publique ainsi que des enjeux socio-économiques. L'Adour étant localement très mobile, il n'y avait pas beaucoup d'habitations en bordure du cours d'eau, l'occupation des terrains riverains était principalement agricole. Dans sa démarche, l'Institution Adour n'a pas imposé de tracé aux riverains, elle a exposé les enjeux, la réglementation et a demandé aux propriétaires ce qu'ils étaient prêts à accepter. Les personnes concernées ont été rencontrées à plusieurs reprises pour déterminer une solution commune sur la base des propositions faites. Les agriculteurs eux-mêmes étaient gênés par l'inondation ou l'érosion de leurs parcelles. Pour mener à bien cette concertation, environ 55 réunions publiques, permanences en mairie et réunions chez les particuliers ont été organisées par l'Institution Adour, qui avait un rôle d'accompagnement et d'information.

Une concertation verticale et horizontale

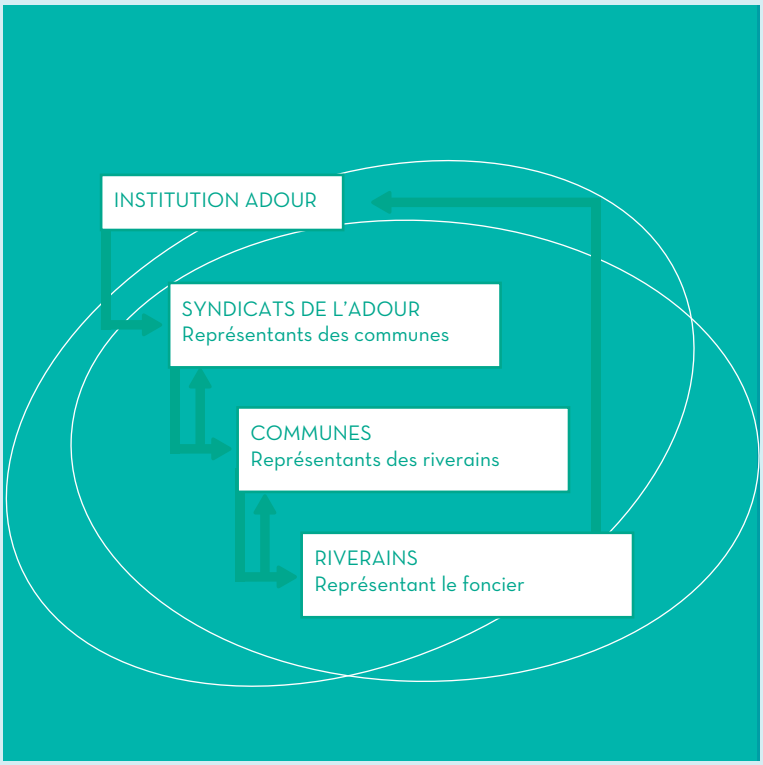


FIGURE 162

Périmètre du projet

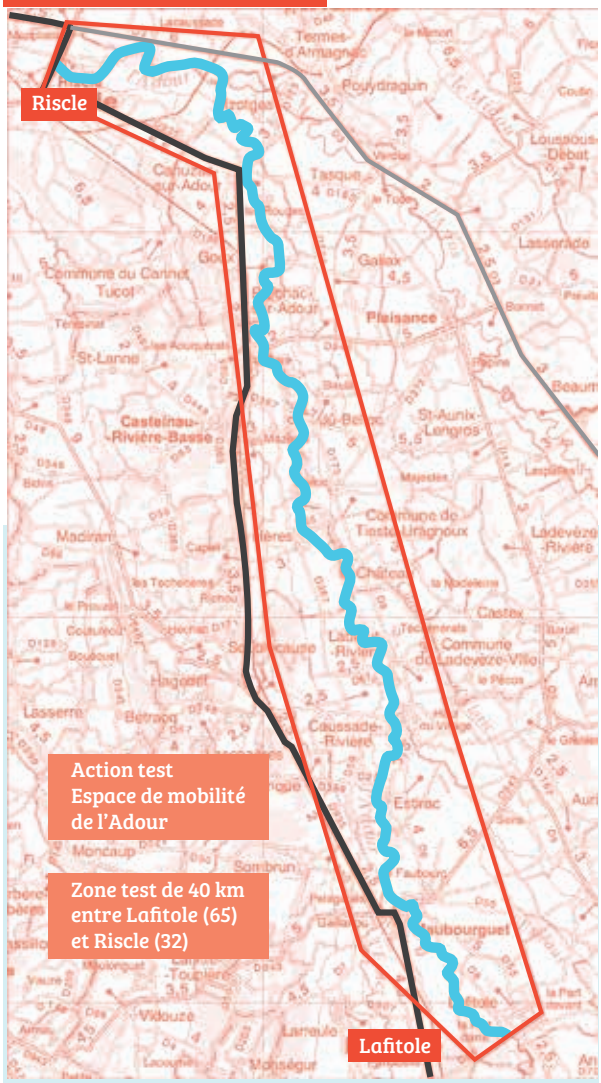


FIGURE 163

Au final, la proposition de la maîtrise foncière est venue des agriculteurs eux-mêmes. Les propriétaires ont proposé de vendre leurs parcelles ou de les échanger contre des parcelles situées en dehors de l'espace de mobilité fonctionnel. L'agence de l'eau avait la mission d'évaluer la cohérence entre les propositions des propriétaires et les possibilités de financement. Toute la procédure s'est faite à l'amiable, sans expropriation. Le succès de cette négociation repose en partie sur l'implication des élus locaux qui ont porté ce discours d'espace de mobilité admis sur leurs communes.

Après 1 an, toutes les communes avaient délibéré sur le tracé de l'espace de mobilité admissible, ainsi que sur leur mode de gestion et un apaisement général a été observé. Cette zone représente 2 480 ha et elle est très proche de l'espace de mobilité historique de l'Adour.

3. LA GESTION DE L'ESPACE DE MOBILITÉ ADMIS

Au sein de l'espace de mobilité admis, le premier principe de gestion est la non-intervention pour lutter contre les érosions de berges.

MISE EN PLACE DE L'ESPACE DE MOBILITÉ ADMIS

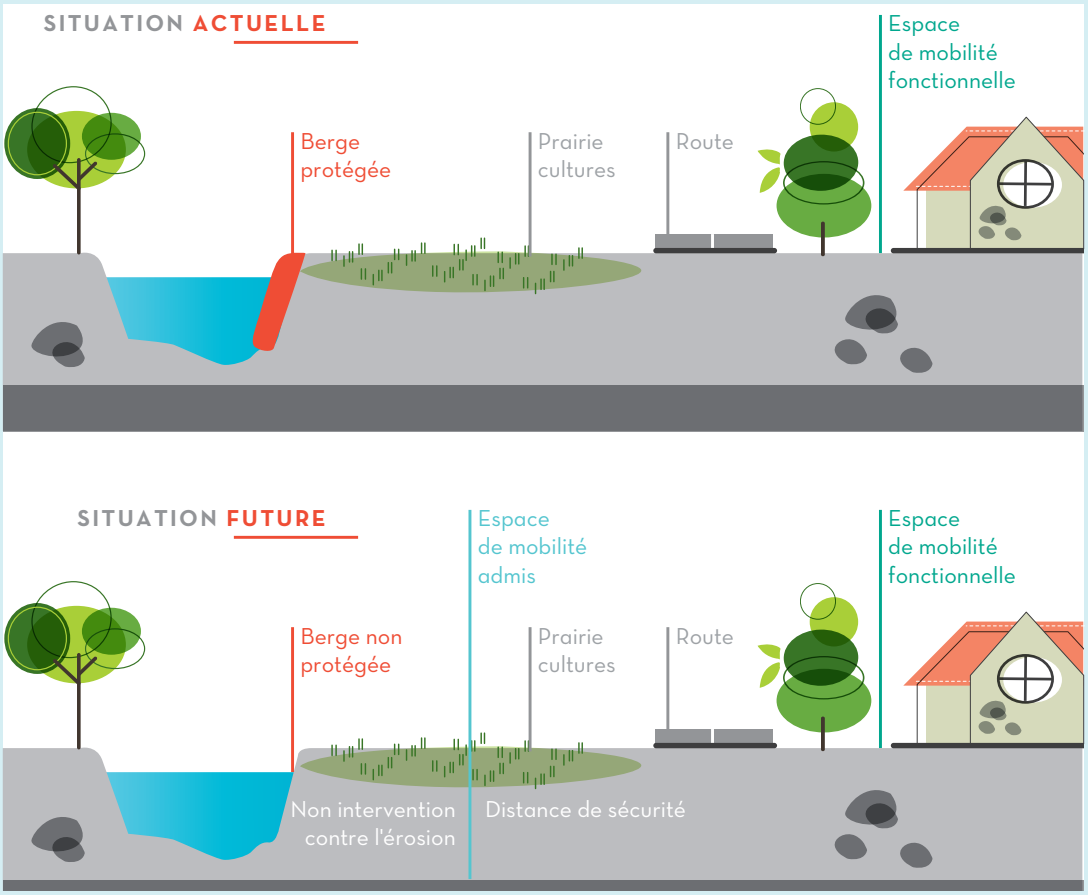


FIGURE 164

© BEAUFRERE, GEODIAC, 2006

Le second principe de gestion est la maîtrise des enjeux implantés au sein de cet espace. Des actions ont été mises en place en 2009 dans l'objectif d'accompagner la dynamique fluviale, elles ont consisté en :

- le déplacement de 2 routes communales, autrefois protégées par des enrochements, en dehors de l'espace de mobilité fonctionnel ;
- le déplacement de 3 canaux ;
- l'arasement de tertres de protection contre les inondations, afin de restaurer des zones d'expansion des crues.

Les ouvrages de protection de berges installés auparavant ont été laissés en place ou alimentent les aménagements réalisés pour protéger les zones à enjeux publics.

4. SUIVI ET ÉVALUATION DES MESURES MISES EN PLACE

PARAMÈTRES BIOLOGIQUES

- évolution géomorphologique du cours d'eau : coefficient de sinuosité ;
- évolution de la végétation alluviale (continuité sur le corridor alluvial) ;
- suivi des zones et des taux d'érosion latérale ;
- suivi de la qualité physico-chimique du cours d'eau ;
- suivi de la qualité hydrobiologique ;
- suivi des bras morts ;
- suivi des processus sédimentaires.

PARAMÈTRES HUMAINS

- ml de berges anthropisées ;
- évolution du nombre de demande de travaux de protection de berges ;
- évolution de l'occupation du sol ;
- appropriation de l'espace de mobilité : intégration de l'espace de mobilité fonctionnelle admis dans les plans d'urbanisme grâce à la déclaration d'utilité publique et une déclaration d'intérêt général lui donnent une existence juridique ;
- suivi financier du programme.

Pour l'agence de l'eau, la mise en œuvre de cette démarche expérimentale de gestion intégrée et durable de l'Adour était une opportunité afin de tester des actions innovantes, en tirer des enseignements et en diffuser les retours d'expériences.

EVOLUTION DES DEMANDES DE PROTECTION DE BERGES HORS ESPACE DE MOBILITÉ

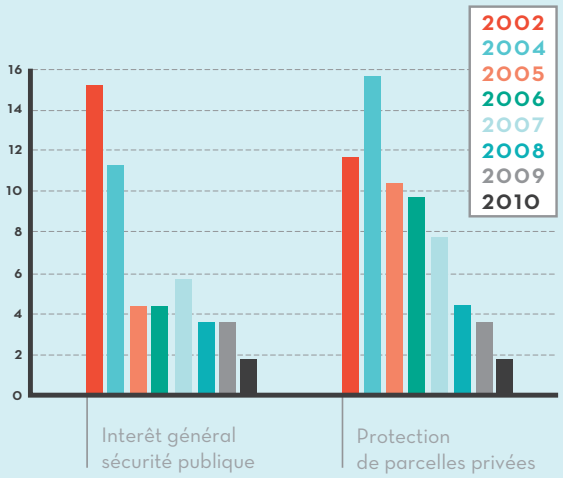


FIGURE 165

5. RÉSULTATS : DES COÛTS MOINS IMPORTANTS

Aujourd'hui, l'Institution Adour a atteint 3 objectifs :

- la restauration du cours naturel de l'Adour ;
- le changement culturel vis-à-vis de l'Adour ;
- la baisse des coûts d'investissement et de fonctionnement.

En effet, il y a beaucoup moins de travaux qui sont réalisés par rapport à la situation avant 2005 car seules les berges dont la bonne stabilité concerne un enjeu public sont protégées. Les dépenses réalisées par les 2 syndicats chaque année sont passées d'une fourchette de 100 000-110 000 euros HT à 15 000-30 000 euros HT.

EVOLUTION DES DEMANDES DE PROTECTION DE BERGES HORS ESPACE DE MOBILITÉ

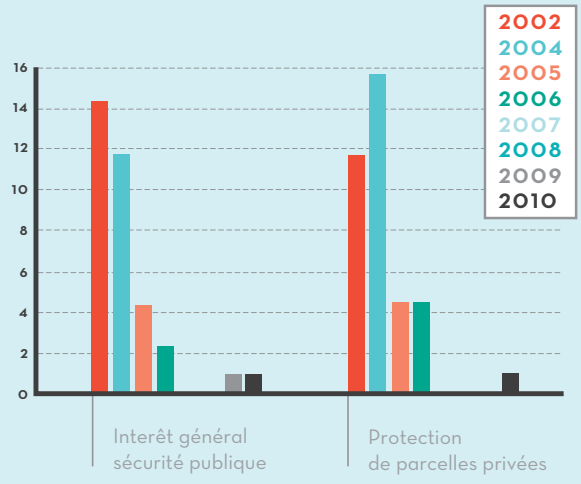


FIGURE 166

Les principales difficultés rencontrées étaient :

- la remise en cause des approches techniques et scientifiques qui semblaient se contredire par rapport aux « discours » de la fin de XXème siècle ;
- la remise en cause des modes de gestion en place ;
- le changement d'échelle : d'une vision locale à une vision globale ;
- la mise en place de mesures de gestion plutôt que de travaux de protection.

EVOLUTION DES DEMANDES DE PROTECTION DE BERGES HORS ESPACE DE MOBILITÉ

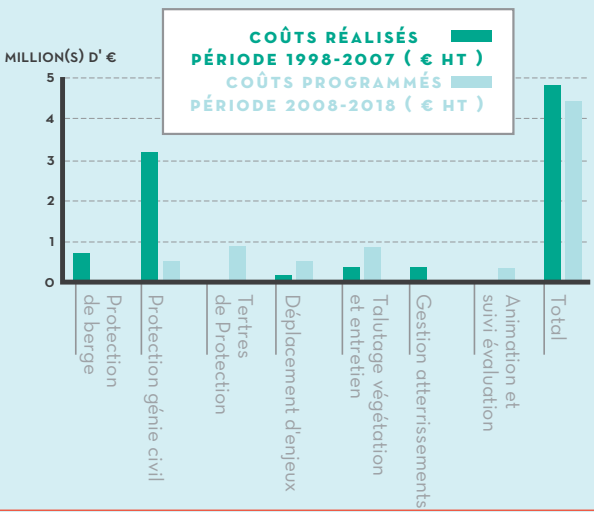


FIGURE 167

6. UNE OPÉRATION QUI S'ÉTEND...

Les travaux ont donc été lancés par l'Institution Adour sur la moitié du Syndicat Gersois soit 25 km et la moitié du syndicat des Hautes-Pyrénées soit 25 km. Cependant, au vu du résultat de l'action test et à la demande des propriétaires situés dans les parties non restaurées, les deux syndicats de rivière ont requis une extension de la démarche à l'ensemble de leur territoire. Ils ont saisi l'Institution Adour et l'enquête publique relative à cette opération a été lancée courant janvier 2012. L'Adour est maintenant devenu un élément structurant du territoire et plusieurs projets émergent suite à la définition de l'espace de mobilité admissible. Ainsi les syndicats de l'Adour des Hautes-Pyrénées et du Gers portent l'aménagement du « sentier de l'Adour » pour la découverte de ces milieux.

7. VALORISATION DE LA DÉMARCHE

Une vingtaine de panneaux sur le fonctionnement du fleuve et sur l'espace de mobilité admis sont présentés dans les communes qui le souhaitent. De plus, un film d'une vingtaine de minutes a été réalisé en partenariat avec l'observatoire de l'eau pour présenter la démarche.

Enfin, la méthodologie suivie lors de cette étude pilote a été structurée et formalisée. Elle a ainsi pu être mise en œuvre sur d'autres bassins versants du district Adour-Garonne avec, comme principaux points clés :

- La place centrale de la concertation mettant à contribution les élus locaux pour hiérarchiser les enjeux riverains concernés par le fonctionnement des cours d'eau ;
- La définition d'un espace de gestion au sein de l'espace rivière et de règles associées, qui permettent d'associer gestion intégrée des bassins versants et aménagement du territoire.

Cette démarche est également présentée dans un film coproduit par l'AEAG et GéoDiag, intitulé « Espace rivière et territoire »
http://www.extranet.eau-adour-garonne.fr/download.asp?download=stockfile/commun/internet/videos/espace_riviere_territoire.mov

POUR EN SAVOIR PLUS

www.institution-adour.fr

GOUVERNANCE

Maitre d'ouvrage: Institution Adour
Coût :
Concertation locale : 55 000 € HT.
Financement :
Agence de l'eau Adour-Garonne: 56%
Région : 14%
Etat : 10%
Institution Adour : 10%

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

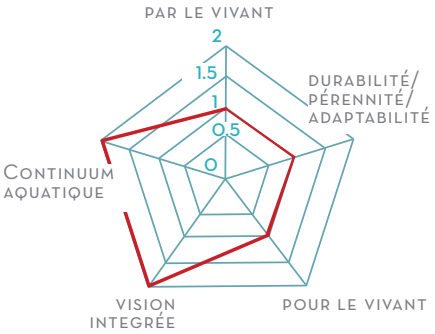


FIGURE 168

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN : RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE
RÉGION : RHÔNE-ALPES
DÉPARTEMENT : HAUTE-SAVOIE
COMMUNE : 26 COMMUNES RIVERAINES DE L'ARVE VIA 6 SYNDICATS INTERCOMMUNAUX

FICHE 2

Mise en place d'une action globale et concertée : le contrat de rivière de l'Arve

1. HISTOIRE DE L'ÉVOLUTION DE L'ARVE

Le bassin versant de l'Arve regroupe 106 communes soit environ 400 000 habitants permanents et représente la moitié de la superficie du département de la Haute-Savoie. La vallée de l'Arve est très fortement urbanisée, touristique et très industrielle (pôle international de l'industrie du décolletage).

L'Arve est le principal cours d'eau au régime glaciaire en France. C'est le principal cours d'eau en Haute-Savoie et le premier affluent du Rhône. L'Arve est un cours d'eau domanial mis à part sur le secteur amont (de l'affluent du Bonnant jusqu'à la source de l'Arve).

Jusqu'au 19ième siècle, le lit de l'Arve était en tresse et les crues balayaient la totalité de la plaine alluviale. Dans les décennies d'après-guerre, l'Arve a fait l'objet d'extractions massives de granulats : 20 millions de m³ de matériaux ont été extraits dans le lit de la rivière. Ces extractions massives ont entraîné une érosion régressive et un déficit de matériaux au cours des dernières décennies à l'origine d'un enfoncement du lit généralisé, pouvant aller jusqu'à plus de 10 m par endroits. Cet enfoncement a perturbé l'équilibre de la rivière en réduisant son lit majeur et en la coupant de ses milieux annexes, d'où une banalisation de la faune et de la flore en bord de rivière. L'enfoncement du lit a également fragilisé les ouvrages implantés dans le lit de la rivière. Des seuils ont alors été installés afin d'endiguer les phénomènes d'instabilité et de bloquer l'incision régressive sur l'Arve et ses affluents. L'endiguement a contribué à réduire la largeur du lit de l'Arve et les populations, auparavant installées sur les versants, se sont rapprochées de la rivière. L'urbanisation s'est ainsi étendue, augmentant les pollutions et réduisant les possibilités de divagation de la rivière. Les infrastructures de transport (autoroute) et les activités économiques (zones industrielles) se sont souvent développées en empiétant sur le lit de l'Arve. Dans la plaine de Sallanches par exemple, la largeur de la bande active sollicitée par les écoulements de l'Arve est passée de plus de 300 m en 1936 à 50 m dans les années 80. Actuellement l'Arve est chenalisée sur pratiquement 75% de son linéaire.

Evolution du lit de l'Arve

FIGURE 169

Carte historiquede l'intercommunalité à la signature du contrat (1995)

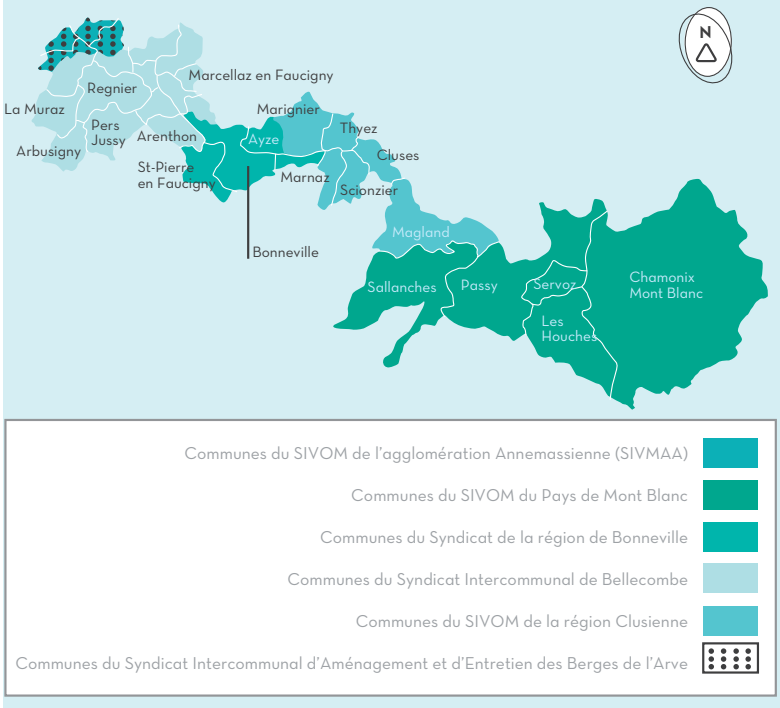


FIGURE 170

Face aux différents constats de dégradation du milieu, les élus de la vallée ont pris peu à peu conscience de la nécessité d'engager une action globale et concertée, à l'échelle de la rivière. Après s'être rassemblés, ils ont formé en 1994 un syndicat (le Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Abords). Le syndicat est composé de 6 structures intercommunales de Chamonix à la frontière suisse, soit 40 communes au total.

2. LE CONTRAT DE RIVIÈRE

Le syndicat a ensuite engagé une procédure de contrat de rivière sur la vallée de l'Arve afin de protéger les biens et les personnes (protection contre les crues, confortement des berges, stabilisation du profil en long du lit de l'Arve, en particulier pour lutter contre la déstabilisation des ouvrages). Le contrat a été signé en juin 1995 pour une durée de 10 ans. Il a été l'un des plus gros de France (programme actualisé de 137 M€).

La démarche du contrat de rivière de l'Arve a été initiée à une période où les problématiques étaient orientées sur le linéaire de la rivière et non sur l'approche «bassin versant». De ce fait, le périmètre du contrat de rivière Arve est basé sur le linéaire de l'Arve, de sa source à Chamonix jusqu'à la frontière suisse à Gaillard, soit un linéaire d'environ 100 km (la partie suisse de l'Arve n'a pas été traitée dans le contrat de rivière).

a. Objectifs du contrat de rivière

Les objectifs du contrat de rivière étaient de retrouver des conditions de fonctionnement plus naturelles pour la rivière, d'améliorer la qualité des eaux et de réhabiliter les abords afin de renouer les liens entre l'Arve et sa population. Il se décline plus précisément en 5 objectifs :

1. redonner un espace de liberté à la rivière et assurer la sécurité des personnes et des biens ;
2. améliorer la qualité des eaux et lutter contre les pollutions industrielles, en particulier pour garantir la qualité de l'eau pompée à Vessy et réinjectée dans la nappe pour l'alimentation en eau potable d'une partie de la ville de Genève ;
3. préserver et valoriser le milieu naturel ;
4. mettre en place une structure pour l'entretien des ouvrages restaurés ;
5. sensibiliser la population à la bonne gestion du patrimoine naturel.

Ces objectifs se regroupent en 3 volets d'actions :

- volet A : ASSAINISSEMENT >Traitement des eaux usées domestiques ;
- volet B : RESTAURATION – PROTECTION – VALORISATION DE LA RIVIERE > Protection des biens et des personnes, aménagement et valorisation de la rivière;
- volet C : DEPOLLUTION INDUSTRIELLE >Lutte contre les pollutions industrielles.

En 2004, un avenant au contrat de rivière a été signé afin d'achever les actions inscrites au premier contrat, de réorienter les objectifs et la programmation du contrat de rivière en concertation avec les partenaires, de permettre la réalisation de nouvelles actions, de prévoir une nouvelle enveloppe financière et de prolonger la durée du contrat (officiellement jusqu'en 2006 pour les subventions de la Région, les travaux s'étant finalement poursuivis jusqu'en 2009).

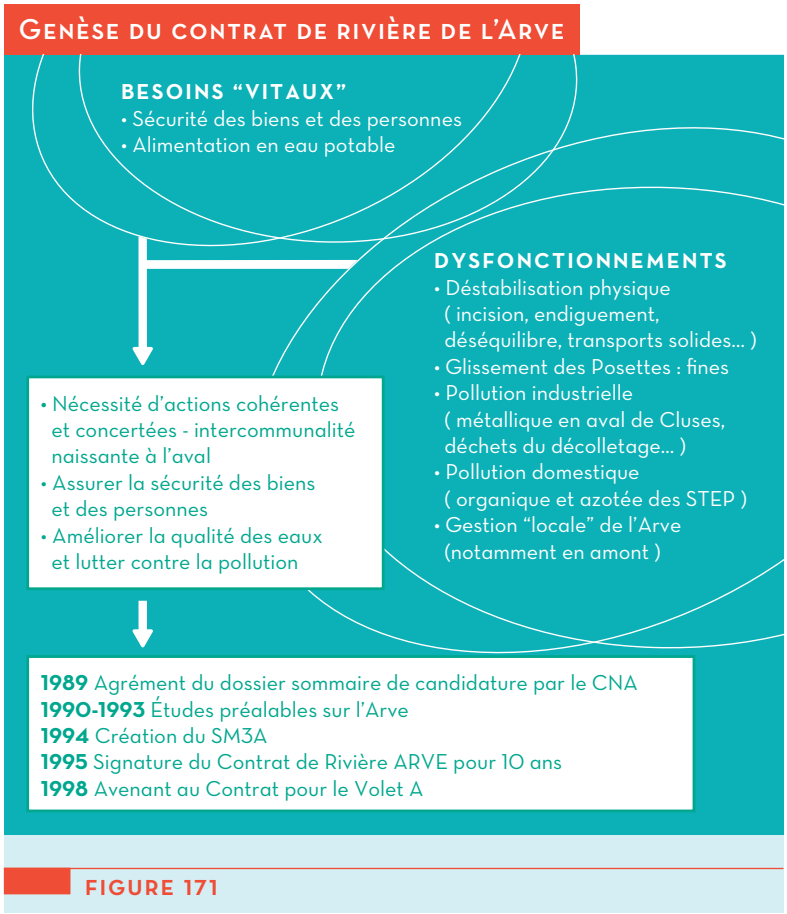


FIGURE 171

b. Travaux réalisés

A. Qualité des eaux : traitement des eaux usées domestiques

Pour améliorer l'assainissement domestique, des travaux de rénovation (redimensionnement et remise aux normes) des stations d'épuration domestiques ont été réalisés. Les communautés de communes ont été maîtres d'ouvrage sur ce volet. Un système de traitement et de prévention des pollutions industrielles accidentelles a été mis en place. Par ailleurs, des ateliers pour économiser l'eau ont été aménagés à l'intérieur des entreprises de traitement de surface.

B. Aménagement et valorisation du cours d'eau

L'objectif de ce volet était de préserver et de valoriser le milieu naturel en harmonisant l'occupation des espaces riverains, en facilitant les accès et la circulation le long de l'Arve pour la population et en traitant la végétation. Différentes actions ont été menées :

- protection de berges par enrochement et techniques mixtes ;
- endiguements ;
- mise en place de seuils pour stabiliser le lit ;
- autres types d'aménagements adaptées à la problématique locale (ex : dérivation de l'Arve aux Posettes, avec un puits et une galerie souterraine).

Le SM3A a initié une procédure d'acquisition foncière des zones présentant un intérêt écologique pour la rivière dès le début du contrat de rivière. Les buts recherchés sur ces espaces étaient multiples. Il s'agissait de :

- ralentir les écoulements de la rivière pour diminuer la violence des crues ;
- stocker un maximum d'eau en cas de crue pour atténuer les effets à l'aval d'une éventuelle crue ;
- favoriser la divagation de la rivière, qui peut alors se recharger en matériaux ou les déposer en fonction des besoins ;
- préserver les milieux alluviaux.

Espace Borne pont de Bellecombe :
Ce poumon vert de l'Arve est le plus vaste espace de divagation encore disponible sur le fond de vallée. Il s'étend sur une superficie de 600 ha. En 1997, cet espace a fait l'objet d'un programme de maîtrise foncière et d'aménagement par le SM3A, en prévision de la problématique inondation. Il représente un élément tampon en cas de crue et permet de protéger les communes en aval. La zone concernée correspond au périmètre de crue décennale et pour accroître les fréquences de submersion pour les crues de forte occurrence (biennales), 2 seuils de relèvement ont été construits.
La procédure de concertation organisée par le SM3A et la SED a été approfondie car l'opposition des riverains à la procédure d'acquisition foncière était vigoureuse. En 2009, 200 ha ont été acquis au bord de l'Arve.

ESPACE BORNE PONT DE BELLECOMBE

FIGURE 172

Programme Life environnement : application de la politique de l'eau dans les milieux forestiers

Ce programme avait comme objectif de sauvegarder et de restaurer la qualité écologique, paysagère et récréative des forêts alluviales de fond de vallée menacées notamment par les « dégâts collatéraux » d'une urbanisation intense. Cette action concourait également à la prévention des risques en zone inondable. Ce programme a été mené sur 3 secteurs : Borne Pont de Bellecombe en aval de Bonneville, Etrembières à proximité de la frontière suisse, et sur la zone d'Anterne en amont de la confluence Arve / Giffre sur la commune de Marignier.
Les actions présentées dans le projet LIFE sont les suivantes :

- analyse du couvert végétal, priorisation des interventions et mise en place d'indicateurs de suivi de l'évolution des milieux ;
- étude et travaux expérimentaux de réhabilitation de zones dégradées (dont implantation d'une pépinière à saules) ;
- réalisation d'un guide technique pour la reproductibilité des travaux réalisés (dont gestion foncière nécessaire à ces travaux) ;
- étude et travaux de restauration d'habitats alluviaux ;
- sentier de découverte des habitats alluviaux et plaquette pour le public ;
- communication et échanges d'expérience.

Nant de Sion

Historiquement zone de reproduction de l'ombre commun, le Nant de Sion (affluent de l'Arve) a cessé progressivement de l'être lorsque son cours entre l'autoroute et l'Arve a été fixé dans un chenal rectiligne de 800 m de long dans les années 1970. Quelques décennies plus tard, la Fédération de pêche de Haute-Savoie a initié une étude pour renaturer cet affluent et l'opération a été ajoutée par avenant au contrat de rivière après l'étude de mi-parcours. Les travaux ont eu lieu en 2008. Deux principes d'aménagement ont été mis en œuvre :

- création d'un nouveau lit en méandres avec remblaiement de l'ancien lit, en partie amont ;
- remodelage du lit pour contraindre les écoulements à serpenter et à former des trous d'eau dans les rétrécissements de section, en partie aval. Un suivi de l'impact piscicole de ces aménagements est effectué périodiquement.

NANT DE SION REMÉANDRÉ APRÈS TRAVAUX

FIGURE 173

Le cheminement Léman Mont - Blanc

Le SM3A a lancé un grand chantier de création d'un cheminement continu de la frontière suisse à Chamonix pour permettre aux gens de découvrir Arve à pied ou en V.T.T. Le tracé initial a été défini par l'O.N.F. (Office National des Forêts) sous la houlette du SM3A qui en est maître d'ouvrage. Le sentier s'est construit année après année, tronçon après tronçon, au fil des opportunités locales. Le cheminement couvre 116 km qui, pour une large part, empruntent des sentiers existants, réaménagés pour l'occasion. Il s'intègre dans le Plan Départemental des Itinéraires de Promenade et de Randonnée (PDIPR), réalisé par le Conseil Général de la Haute Savoie.

CHEMINEMENT LÉMAN-MONT-BLANC

FIGURE 174

C. Lutte contre les pollutions industrielles et domestiques

Ce volet a été intégré au contrat de rivière suite à l'étude réalisée à mi-parcours. L'objectif était d'améliorer la qualité des eaux et de lutter contre la pollution industrielle dont les rejets perturbent l'alimentation en eau de la région gènevoise (la réalimentation de la nappe du genevois se fait par réinfiltration des eaux de l'Arve). Ce volet a consisté en 2 points :

- la dépollution de sol ;
- la recherche des sources de pollution métallique. Les études ont été menées avec des Bryophytes qui concentrent les métaux pour identifier les sources.

Le contrat de rivière avait comme objectif premier la gestion des sites qui présentaient les enjeux les plus importants en termes de sécurité des biens et des personnes. A la fin du contrat de rivière, les réflexions se sont davantage orientées sur les solutions alternatives pouvant être mises en place, notamment en agissant à l'amont sur des opérations de valorisation des milieux naturels et d'aménagements piscicoles.

3. APRÈS LE CONTRAT DE RIVIÈRE

Différents programmes ont fait suite au contrat de rivière.

a. Le SAGE

Un SAGE est actuellement en cours d'élaboration. L'étude bilan du contrat de rivière a permis d'initier l'étude préalable pour l'élaboration du SAGE. Contrairement au contrat de rivière, il concerne l'ensemble du bassin versant de l'Arve et non pas uniquement l'Arve. La signature est prévue pour 2014-2015.

b. Arve Pure

Le programme Arve pure a été lancé en 2007 sur le territoire du SIVOM de la Région de Cluses avec deux volets :

- un volet assainissement, avec la détection des points noirs liés aux rejets de métaux lourds par les entreprises, et un état des lieux de toutes les communes avec visites des entreprises, audits, propositions de travaux ;
- un volet déchets, avec une réflexion sur la valorisation des déchets.

Ce programme a ensuite été poursuivi sur la communauté de communes du Pays Rochois, puis sur l'agglomération d'Annemasse et la communauté de communes Faucigny Glières.

c. Inondations : PAPI – Programme d'Actions pour la Prévention des Inondations

Suite au contrat de rivière, la problématique des inondations est reprise avec la création d'un PAPI 'territoire du Schéma d'Aménagement et de Gestion des eaux de l'Arve'. Il a été labellisé en janvier 2013. Un diagnostic de l'exposition du territoire aux risques inondation a permis de définir les principales orientations des actions à mettre en œuvre sur le bassin versant (travaux d'endiguement, restauration de plages de dépôts, réduction de la vulnérabilité, développement des champs d'expansion de crues, systèmes d'alertes...)

d. Natura 2 000

Par arrêté ministériel du 22 août 2006, 2 sites en bord d'Arve ou à proximité ont été classés Natura 2 000, représentant 72 ha. Le 6 mars 2009 a été créé un Comité de Pilotage pour travailler à l'extension de ce périmètre aux annexes fluviales environnantes. La couverture Natura 2 000 a ainsi été portée à 200 ha.

e. Alp'eau

La Vallée de l'Arve, à travers le SM3A, a été retenue dans le cadre du projet franco-suisse Alp'eau. Ce projet est fondé sur le rôle protecteur qu'exerce la forêt sur les ressources en eau potable, rôle reconnu par la communauté scientifique. Les suisses étudient de quelle manière fonctionne la purification de l'eau à travers le sol forestier. Côté français, des expérimentations sont menées sur des sites pilotes sur les bonnes pratiques sylvicoles favorisant la qualité des eaux souterraines. Le projet Alp'eau s'inscrit à l'échelle du bassin versant, comme le SAGE. Il amorce un travail interactif avec les acteurs forestiers et un cercle de collectivités élargi, familiarisant les uns et les autres à un mode de collaboration qui se retrouve dans le SAGE.

POUR EN SAVOIR PLUS

www.riviere-arve.org

GOUVERNANCE

Maitre d'ouvrage du contrat de rivière Arve : SM3A
Acteurs du contrat de rivière : 40 communes et 6 syndicats intercommunaux. Ils s'accordent entre eux pour faire des choix, et pour payer leur part de ce vaste programme, dans le cadre d'un système de mutualisation.
Les partenaires du contrat de rivière Arve : l'agence de l'eau, le Conseil général de Haute Savoie, l'Etat français, la Région Rhône Alpes, l'Autoroute et Tunnels du Mont Blanc (ATMB), le Canton de Genève, EDF, les industriels du traitement de surface et l'Europe, les pêcheurs, les associations environnementales (LPO, FRAPNA, Conservatoire nature Haute-Savoie)

Coûts:
Contrat de rivière Arve
Coût total : 137 M€
Volet A : Assainissement et dépollution domestique : 82.78 M€
Maîtrise d'ouvrage : syndicats intercommunaux quand ils existent, ou communes ;
Financement : collectivités locales individuellement (avec subventions)
Volet B : Aménagement : 30.55 M€
Maître d'ouvrage : SM3A
Financement :
Partenaire : 17.14 M€
Communes : 13.42 M€
Volet C : dépollution industrielle : 8.66 M€
Maîtres d'ouvrage : les industriels
Financement :
Industriels, agence de l'eau
Coût acquisitions foncières : 1.5 M€

Travaux sur le Nant de Sion
Financement :
Fédération de pêche, du Canton de Genève, du Conseil général et de l'agence de l'eau.

Alp'eau :
Financement :
Fonds européens et suisses, agence de l'eau, Conseil général de Savoie

Programme Life
Partenaires financiers :
ONF, CNRS, agence de l'eau RMC, DIREN Rhône-Alpes, Région Rhône-Alpes, SM3A, Syndicat Ouvèze, CCVD, URACOFRA, Conseil général de Haute-Savoie, ATMB, Commune de Cohennoz

PAPI sur le bassin versant de l'Arve
Cout : 27 M€
Partenaires : L'Etat français, le SM3A, le SIFOR (Syndicat Intercommunal du Foron du Chablais Genevois), la Communauté de Communes du Genevois, la communauté de communes des 4 rivières, les communes de Chamonix, des Contamines Montjoie, des Houches et de Passy.

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

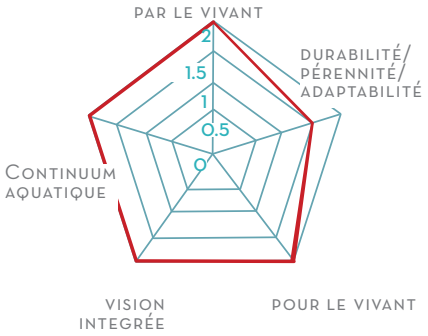


FIGURE 175

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN : RHIN MEUSE
RÉGION : ALSACE
DÉPARTEMENT : HAUT-RHIN

FICHE 3

Programme global de restauration des principaux cours d'eau du département du Haut-Rhin

1. PRÉSENTATION DU PROGRAMME ENVISAGÉ

Dans le cadre de la DCE, le Conseil général du Haut-Rhin a décidé de mettre en œuvre, en partenariat avec l'agence de l'eau et en lien avec les 15 syndicats de rivière, un programme global de restauration des principaux cours d'eau du département. Ce programme vise à atteindre les objectifs de bon état écologique des rivières du Haut-Rhin imposés par la DCE pour 2015. Pour atteindre cet objectif, les moyens mis en œuvre doivent permettre de recréer de manière globale un fonctionnement écologique et une diversité biologique à la fois du lit, des berges et des écoulements dégradés par les travaux hydrauliques.

Au total, 9 principaux cours d'eau seront concernés par le programme de restauration ce qui représente 800 km de rivières. Sur ces cours d'eau, différentes actions seront amenées à être réalisées :

- *dresser un inventaire des ouvrages (ponts, seuils, murs de rive, vannage, etc.) présents le long des cours d'eau et de leurs impacts sur les milieux aquatiques, notamment vis-à-vis de la continuité écologique ;*
- *définir des enveloppes de mobilité des cours d'eau et des zones humides dépendantes des rivières en concertation avec tous les acteurs ;*
- *définir une méthodologie d'étude des ouvrages en vue de réduire leurs impacts ;*
- *définir un plan de gestion des cours d'eau, des ouvrages et des zones humides ;*
- *réaliser des actions associant tous les acteurs intéressés ;*

· rédiger un programme de mesures et une planification pluriannuelle des actions concrètes à entreprendre par bassin versant ;
·animer le programme de mesures auprès des différents acteurs pour promouvoir sa mise en œuvre et notamment les acquisitions foncières nécessaires à la plupart des actions.

RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

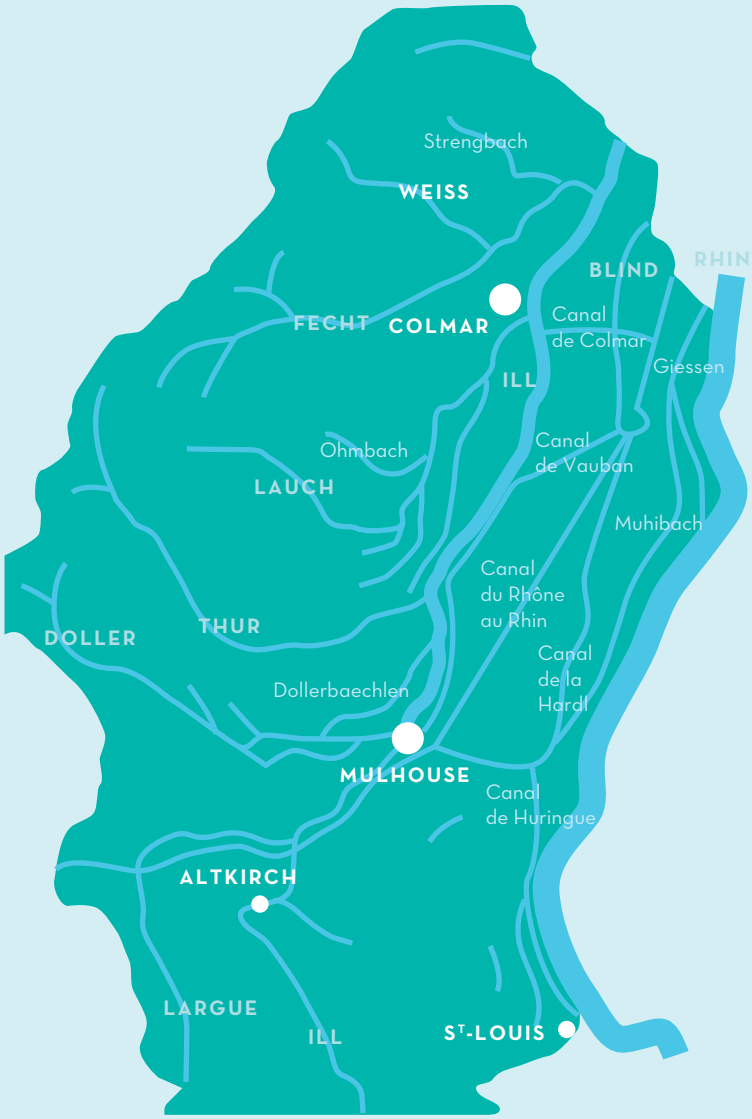


FIGURE 176 CG68

2. MÉTHODOLOGIE

La méthodologie du programme global se base sur la définition du bon état écologique des cours d'eau : « un cours d'eau en bon état est un cours d'eau qui assure différentes fonctions, à savoir un rôle de régulation des crues, un rôle d'autoépuration et un rôle de refuge pour la faune et la flore ».

Les axes de travail du projet

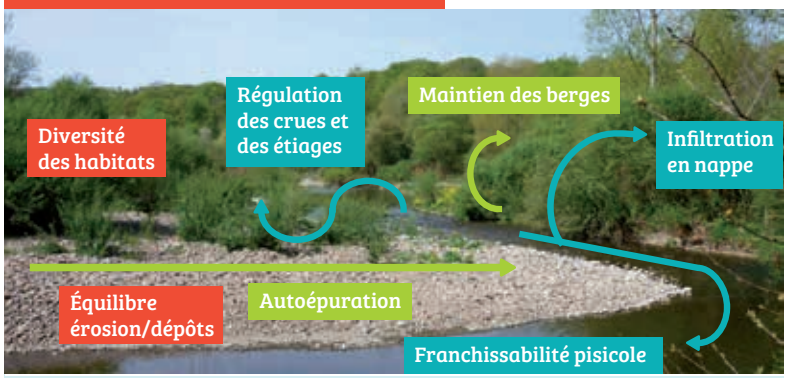


FIGURE 177 CG68

L'efficacité du cours d'eau pour remplir ces différentes fonctions dépend directement de l'état du lit du cours d'eau, de ses berges et de ses abords (végétation de rive et zones humides).

Le programme global de restauration écologique des cours d'eau a été élaboré selon trois grands axes de travail :

L'axe de travail « Hydromorphologie » qui vise à atteindre une diversité optimale du fond du lit et à restaurer les échanges entre le cours d'eau et ses annexes (anciens bras par exemple).

L'axe de travail « Continuité » qui vise à restaurer la franchissabilité piscicole.

L'axe de travail « Ecologie » qui vise à restaurer la végétation de rive et les zones humides.

3. DÉMARCHE PRÉVUE

Le travail est conduit par bassins versants des principaux cours d'eau dont le Service Aménagement des Rivières du Haut-Rhin assure le suivi en lien avec les Syndicats de Rivières (Doller, Lauch, Fecht-Weiss, Thur et Ill).

Pour chaque bassin versant, la méthodologie comprend trois étapes :

- étape 1 : un état des lieux du bassin versant (1 an) ;
- étape 2 : la réalisation de chantiers pilotes démonstratifs (6 mois) ;
- étape 3 : la rédaction d'un programme de mesures et d'une planification pluriannuelle des actions (6 mois).

Les différents acteurs intéressés par la gestion des cours d'eau sont associés par le Conseil général à la réalisation des chantiers pilotes et la rédaction du programme de mesures. Cette collaboration se prolonge par la suite par la mise en œuvre des programmes de mesure dans chaque bassin versant.

De manière à engager le plus tôt possible les travaux de restauration, le travail a été réalisé simultanément sur deux bassins versants. Un ordre de priorité a été fixé comme suit :

1. Doller | 2. Lauch | 3. Fecht-Weiss | 4. Ill | 5. Thur

4. BILAN DE L'ÉTAT DES LIEUX

a. Ecologie

Un inventaire a été réalisé sur les ripisylves et les zones humides remarquables. Les points suivants sont relevés :

- la structure en diamètres ;
- la composition en essences : strate arborescente, arbustive, lianescente, herbacé (partiel) ;
- le capital sur pied en surface terrière ;
- relevé faunistique.

Les données obtenues grâce à l'inventaire permettent de faire une cartographie générale du cours d'eau avec une carte de végétation ainsi qu'un atlas par tronçon homogène plus détaillé comportant une cartographie ainsi qu'une synthèse chiffrée des éléments d'inventaire. Les points faibles et les points forts de la rivière et de ses abords sont présentés dans un résumé.

b. Continuité

L'état des lieux consiste à :

- dresser un inventaire des ouvrages (ponts, seuils, murs et protections de berges) présents le long des cours d'eau et de leurs impacts sur les milieux aquatiques, notamment vis-à-vis de la continuité écologique ;
- définir une méthodologie d'étude des ouvrages en vue de réduire leurs impacts ;

- produire un répertoire des seuils (fiches), comprenant leurs caractéristiques, l'analyse de leurs impacts et les préconisations de gestion ;
- créer une base de données géographiques des ouvrages et la rendre accessible sur Internet.

Pour l'inventaire des ouvrages, la collecte des données est réalisée sur le terrain à l'aide d'un GPS mobile. Les données sont ensuite transférées sur un SIG et un répertoire des ouvrages est réalisé dans une base Microsoft Access. Cette base de données permet de visualiser les fiches descriptives de chaque seuil, avec notamment une vue en plan, la photo de l'ouvrage, ses caractéristiques, sa franchissabilité et éventuellement des commentaires complémentaires. Les fiches sont mises à jour automatiquement sous Access en cas de modification de la base de donnée SIG.

Exemple de l'inventaire des ouvrages sur la Doller

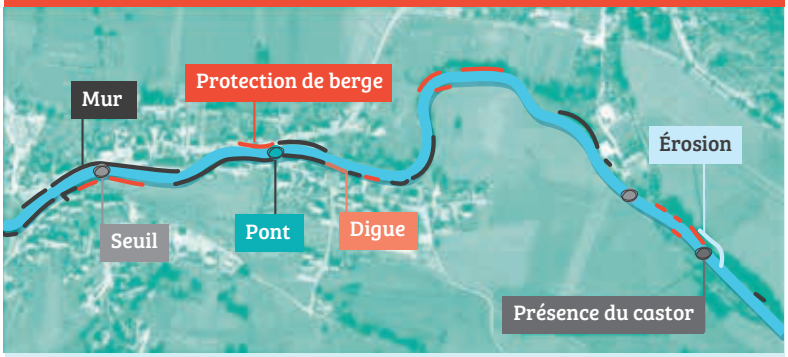


FIGURE 178 CG68

Cartographie des hauteurs d'eau relatives entre le lit majeur et le lit mineur

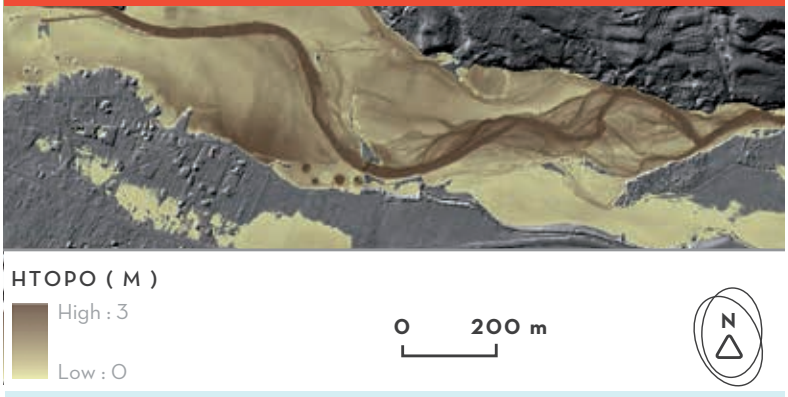


FIGURE 179 CG68

La franchissabilité des seuils est définie d'après les inventaires réalisés par la Fédération de Pêche du Haut-Rhin et l'Association Saumon-Rhin.

L'Association Saumon Rhin a réalisé une évaluation des habitats potentiellement favorables au saumon atlantique. Lors de cette étude, il a été décidé de localiser les obstacles à la migration piscicole et d'estimer la franchissabilité de ces ouvrages. Cette étude a été réalisée de 2002 à 2007 sur la Doller, la Fecht, la Liepvrette, la Weiss, la Thur, la Lauch et l'Ill. Une seconde étude, non ciblée sur le saumon atlantique, a ensuite été menée sur la Fecht et la Doller. Cette étude consistait à estimer la franchissabilité des ouvrages pour les grands salmonidés migrateurs, la truite, l'anguille et le brochet.

D'autre part, la Fédération de Pêche du Haut-Rhin a recensé et diagnostiqué les ouvrages de franchissement pour la faune piscicole dans le département du Haut-Rhin, en partenariat avec l'agence de l'eau Rhin-Meuse. Ce travail a été réalisé en 2009 sur l'Ill, la Doller, la Thur, la Lauch, la Fecht, la Weiss, la Liepvrette, la Largue et le Liesbach.

c. Hydromorphologie

L'état des lieux consiste à :

- définir des enveloppes de mobilité des cours d'eau et des zones humides dépendantes des rivières en concertation avec tous les acteurs ;
- cartographier les enveloppes de mobilité et les rendre accessibles sur Internet ;
- relever les paramètres hydromorphologiques du cours d'eau par tronçons et les dysfonctionnements observés.

Le cours d'eau est d'abord sectorisé en tronçons homogènes selon différents critères (masses d'eau et tronçons de masse d'eau ; style fluvial ; morphologie du cours d'eau ; hydrographie; pression irréversible exercée sur le cours d'eau) puis les fuseaux de mobilité ont été déterminés.

Enfin la topographie est prise en compte pour intégrer la notion de relief et préciser le contour des enveloppes de mobilité. L'objectif de cette méthode était de cartographier en tout point la hauteur relative du lit majeur par rapport à la cote du fond du lit mineur de la rivière. Cette méthode aboutit à une cartographie faisant apparaître les cotes relatives de chaque point par rapport au fond du lit de la rivière.

Cette cartographie met en évidence des zones incisées et stables et des zones de mobilité caractérisées par des hauteurs relatives faibles. Dans ces zones de mobilité apparaissent nettement des chenaux de crue secondaires, dessinant les contours de l'enveloppe de mobilité passée et actuelle. Cette enveloppe est utilisée afin de définir une limite externe à la divagation du cours d'eau. Elle permet notamment de réduire l'enveloppe de mobilité fonctionnelle dans les zones non mobiles ou à fort relief.

Les enjeux sont définis à partir de l'état des lieux et visent à atteindre le bon état écologique des cours d'eau. Il s'agit par exemple de :

- préserver des milieux remarquables existants ;
- restaurer l'espace de mobilité du cours d'eau là où c'est possible ;
- diversifier le lit du cours d'eau ;
- permettre la libre circulation des poissons migrateurs.

Tous ces enjeux tiennent compte de la présence des personnes et des biens bâtis.

5. DÉFINITION DU PROGRAMME D'ACTIONS SUR LA BASE DE L'ÉTAT DES LIEUX

Suite à ce diagnostic, un programme d'actions concret est proposé :

CONTINUITÉ

- arasement/dérasement de seuil
- amélioration de passe à poissons existantes
- création de passes à poissons
- transformation de seuil

HYDROMORPHOLOGIE

- diversification de cours d'eau
- préservation de zone de mobilité fonctionnelle
- reconnexion d'annexe hydraulique
- reconstitution de zone de mobilité dégradée

ECOLOGIE

- gestion ponctuelle de la ripisylve
- lutte contre la Renouée
- lutte contre l'Acacia
- préservation de zone humide
- renaturation de zone humide
- plan de gestion de la ripisylve

Ces actions ont pour but de préserver les milieux naturels existants, de restaurer l'équilibre du cours d'eau (phénomènes d'érosion et de dépôts), de permettre aux poissons de remonter le cours d'eau pour se reproduire, de mieux gérer la végétation des berges, ou encore de restaurer des milieux naturels qui ont été dégradés.

Le programme de restauration de la Doller a débuté en juin 2009 sur 4 chantiers pilotes :

- renaturation du Baerenbach à RODEREN ;
- dérasement progressif d'un seuil palplanche à REININGUE ;
- amélioration de la passe à poissons d'un seuil à cuvette de LUTTERBACH et mise en place d'une turbine ;
- dérasement progressif d'un seuil palplanche de LUTTERBACH.

Le travail d'étude réalisé sur ce bassin versant a été achevé en juin 2011 et débouchera sur la mise en œuvre d'un programme global de restauration. Il est en cours de transposition sur d'autres cours d'eau du Département.

6. LE SUIVI

Le suivi du travail est assuré par un comité de pilotage technique associant des représentants du Conseil général du Haut-Rhin et de l'agence de l'eau Rhin Meuse, de la DDT du Haut-Rhin, de la DREAL Alsace ainsi que de l'ONEMA et de l'Association Saumon-Rhin. Ce comité de pilotage se réuni semestriellement pour valider le travail effectué, suivre l'avancement des travaux et programmer ceux à venir.

GOUVERNANCE

Maitre d'ouvrage: CG68

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

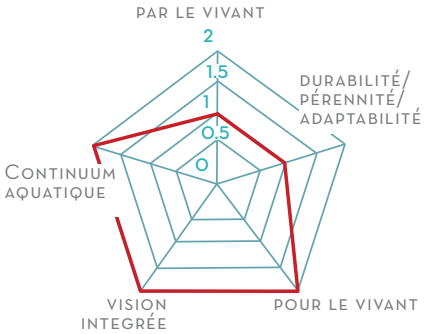
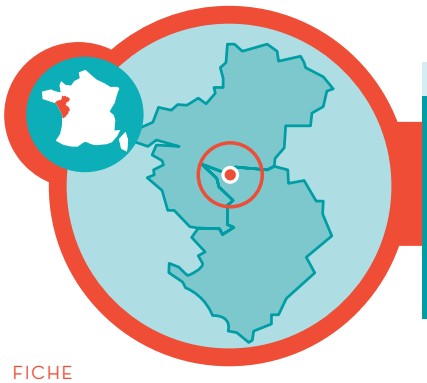


FIGURE 180



SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN : LOIRE-BRETAGNE
RÉGIONS : PAYS DE LA LOIRE ET POITOU-CHARENTES
DÉPARTEMENTS : LES DEUX-SÈVRES, LE MAINE-ET-LOIRE, LA VENDÉE ET LA LOIRE-ATLANTIQUE / 140 COMMUNES

FICHE 4

Mise en place d'un processus de concertation afin de rétablir la continuité écologique du bassin de la Sèvre nantaise

SYNTHÈSE DU PROJET :

Dans le cadre de l'élaboration d'un SAGE, l'Institution Interdépartementale du Bassin de la Sèvre Nantaise (IISBN), devenue depuis EPTB de la Sèvre Nantaise, a mené une réflexion sur la restauration de la continuité écologique sur l'ensemble des cours d'eau du bassin. La création d'un outil d'aide à la décision a permis d'évaluer de façon concertée l'intérêt collectif et les possibilités d'actions sur chaque ouvrage hydraulique.

1. CONTEXTE DU BASSIN VERSANT

Le bassin de la Sèvre nantaise s'étend sur un territoire fortement anthropisé de 2 350 km². Il est structuré par un réseau dense de cours d'eau aménagés et équipés d'ouvrages hydrauliques depuis plusieurs siècles. Ce bassin compte 240 ouvrages hydrauliques parmi lesquels un grand nombre a été construit dans le lit de la rivière afin d'utiliser la force motrice de l'eau (ex: moulins). Ces ouvrages ont ensuite été utilisés pour les activités de loisirs: randonnées, pêche, activités nautiques, agriculture, alimentation en eau potable, agrément paysager. Cependant, ils sont aujourd'hui à l'origine de nombreuses perturbations écologiques comme la modification des écoulements, l'altération du déplacement des organismes vivants et du transport des sédiments.

Le projet a été primé aux trophées de l'eau de l'agence Loire-Bretagne en 2011.

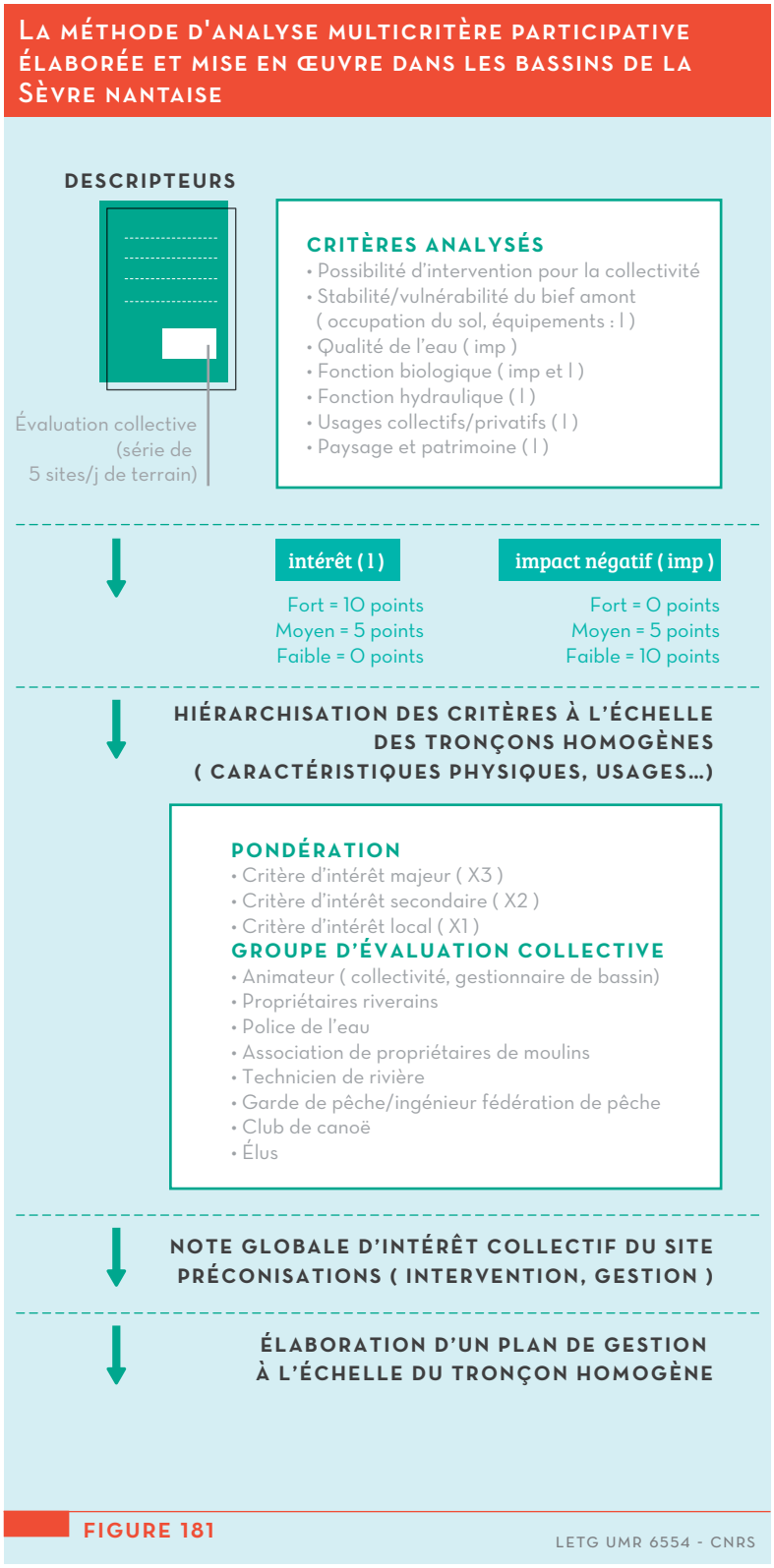


FIGURE 181

LETG UMR 6554 - CNRS

2. UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION POUR RÉTABLIR LA CONTINUITÉ ÉCOLOGIQUE

Pour résoudre ce problème de continuité écologique, l'EPTB de la Sèvre Nantaise a lancé en 2001 une réflexion sur l'ensemble des ouvrages hydrauliques du bassin, s'inscrivant dans le cadre de l'élaboration du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE), avec l'appui de Régis BARRAUD, du laboratoire Géolitomer. L'état des lieux des ouvrages hydrauliques de l'ensemble des cours d'eau du bassin réalisé en 1999 pour l'élaboration du Contrat de Restauration et d'Entretien (CRE) a servi de point de départ pour mener cette réflexion. La Commission Locale de l'Eau, organe de concertation et de régulation de la gestion de l'eau sur le bassin a décidé de travailler à la mise au point d'une méthode d'analyse participative prenant en compte l'intérêt des ouvrages hydrauliques d'une part et leurs impacts sur le milieu d'autre part.
Un groupe de travail réunissant les représentants des usagers ainsi que les partenaires techniques et financiers a été mis en place pour approfondir l'analyse de l'ensemble des ouvrages et pour construire un outil d'aide à la décision.

La construction de cet outil est fondée sur une méthode d'analyse multicritères participative. Il permet de faire un diagnostic sur un site donné mettant en exergue les intérêts collectifs et les impacts écologiques négatifs des ouvrages du bassin. Douze tronçons homogènes sont délimités au sein de cette grille d'analyse en fonction de leur caractéristique physique, des usages et de la typologie des paysages de fond de vallée. L'intérêt collectif de chaque ouvrage et les possibilités d'actions sur chacun d'entre eux sont évalués selon 7 critères d'analyse à la fois écologiques et sociologiques. Ces critères sont ensuite hiérarchisés à l'échelle de chaque tronçon de façon à révéler leur caractéristique spécifique.

Une pré-évaluation des ouvrages du bassin a été réalisée par les syndicats de rivière et a permis de faire un diagnostic précis du site et de proposer différents scenarii avec des niveaux d'ambition différents.
L'ajustement de la grille d'évaluation et le choix du scénario a été fait en concertation avec les acteurs locaux (élus, propriétaires, usagers, agence de l'eau, DDT, ONEMA, associations d'usagers) directement sur le site.

Groupe d'évaluation sur le terrain

FIGURE 182 EPTB SÈVRE NANTAISE

La Moine en amont des vannes ouvertes du Plessis (2009)

FIGURE 183 EPTB SÈVRE NANTAISE

Durant cette phase de concertation, des divergences de point de vue ont émergé entre les personnes ayant une vue d'ensemble du bassin et les acteurs locaux. Les principaux points de blocage ont été la peur d'un manque d'eau dans la rivière et la prise de position par rapport au paysage. Pour résoudre ces points de blocage, l'EPTB de la Sèvre Nantaise a dû faire un travail important de communication et de sensibilisation auprès des riverains. Cette démarche a représenté une opportunité d'échange qui n'était pas présente avant et qui a été plutôt bien perçue par les riverains.

Néanmoins, la mise en place de sites pilotes a parfois été nécessaire entre la phase d'évaluation et la phase travaux pour convaincre les personnes réticentes au projet. Des chantiers pilotes d'ouverture de vannes et d'abaissement d'ouvrages ont été mis en place:

- Renaturation de la Sanguèze à la Motte à Mouzillon ;
- Expérimentation d'abaissement des niveaux d'eau sur la Moine à Cholet.

Plan d'eau de Mouzillon après abaissement du clapet de la Motte.2011.

FIGURE 184 JL AUBERT

Sur la base des résultats des évaluations sur site, et des résultats probant sur les sites vitrines, des programmes d'actions pluriannuelles d'une durée de 5 ans ont été développés dans le cadre des Contrats de Restauration et d'Entretien (CRE) de cours d'eau, sous maîtrise d'ouvrage des syndicats de rivière du bassin. Il s'agissait d'actions d'effacement, de contournements, etc. Ces opérations ont fait l'objet en préalable d'études de faisabilité.

RECONQUÊTE DE LA CONTINUITÉ ÉCOLOGIQUE DANS UNE ZONE URBAINE ET PÉRI-URBAINE : EXPÉRIMENTATION D'ABAISSEMENT DES NIVEAUX D'EAU SUR LA MOINE À CHOLET.

En 2006, dans le cadre de l'évaluation collective des ouvrages hydrauliques, le syndicat de la Moine a décidé d'expérimenter une ouverture des vannes permanente sur deux ouvrages ne présentant pas d'usages ou de fonctions historiques particulières : au Plessis et à la Nombretière.

Après 3 ans d'expérimentation, le retour à des zones d'écoulement libre a permis le retour de nombreuses espèces végétales et la réappropriation de ce secteur du cours d'eau par la population.

Fort de ce constat, au terme d'une étude de faisabilité, le syndicat de la Moine a décidé, avec l'avis du comité de pilotage, de restaurer le cours d'eau de la Moine sur toute la traversée de Cholet (6 km).

La première étape des travaux s'est déroulée de mars à septembre 2012. Elle a consisté à effacer totalement ou partiellement six seuils et à accompagner la baisse du niveau d'eau.

En effet, une centaine d'exutoires du réseau pluvial a été dénoyée suite à la baisse du niveau d'eau du cours d'eau. Un grand nombre de ces exutoires ont été réaménagés afin d'être mieux intégrés dans le lit et les berges du cours d'eau. Ce réaménagement s'est fait dans le cadre d'un partenariat avec la ville de Cholet et la communauté d'Agglomération du Choletais.

Des travaux connexes à ceux réalisés sur les ouvrages ont été mis en place. La restauration du lit majeur en aval de la chaussée de Grangeard a permis de restaurer un champ d'expansion de crue sur un site vulnérable aux inondations.

La seconde étape des travaux a eu lieu en 2013, après le passage de crues morphogènes. Des travaux complémentaires de diversification du lit et des berges ont été effectués. L'évolution de la morphologie du cours d'eau est suivie par des mesures réalisées dans le lit (granulométrie, faciès d'écoulements, profil, etc.). Des indicateurs biologiques permettent par ailleurs d'évaluer l'évolution des populations de macro-invertébrés et piscicoles et d'en déduire des gains sur l'état écologique du cours d'eau.

Carteron avant effacement

FIGURE 185 EPTB SÈVRE NANTAISE

Seuil du carteron effacé

FIGURE 186 SYNDICAT DE LA MOINE

ET APRÈS LES TRAVAUX ?

Les opérations de suivi sont déterminées dans le cahier des charges de l'étude de faisabilité. Ils consistent en des IBGN, des IPR et pour certains projets des relevés faune-flore. Ils sont réalisés par des bureaux d'études, des fédérations de pêches ou des Centres Permanents d'Initiatives pour l'Environnement (CPIE).
Mis à part sur les secteurs présentant de gros enjeux, il n'y a pas d'autres interventions prévues sur le site dans l'année qui suit l'opération d'effacement d'ouvrage. Après un an, des opérations de diversification des écoulements peuvent être envisagées, si celles-ci ont été pensées pendant l'étude de faisabilité.

VALORISER POUR MIEUX SENSIBILISER

Les principaux sites emblématiques ont fait l'objet d'une fiche retour d'expérience ou de publications pédagogiques. Le site de la Moine a également été filmé avant, pendant et après les travaux afin de disposer d'une illustration concrète et parlante de cette opération de restauration.
Suite aux travaux, des "journées des élus" ont été organisées afin de sensibiliser les élus du bassin sur le sujet et de leur faire visiter les sites restaurés.

ET EN 2014 ?

Aujourd'hui des opérations de réduction d'impacts ont été réalisées sur une trentaine de sites. Les travaux vont se poursuivre, et seront notamment déterminés à l'appui des orientations du SAGE. Ce dernier, validé par la CLE en août 2013, met d'ores et déjà en avant des ambitions fortes en matière de réduction du taux d'étagement (atteindre à terme 40 % de taux d'étagement maximum sur les cours d'eau principaux). Le contenu du nouveau Contrat Territorial Milieux Aquatiques, en cours de préparation, devra être en rapport avec ces objectifs.

POUR EN SAVOIR PLUS

www.sevre-nantaise.com

GOUVERNANCE

Projet de la Sèvre nantaise
Maitres d'ouvrage: Syndicat Mixte Etablissement Public Territorial du Bassin de la Sèvre Nantaise
Coût de l'étude multi critères (15 mois): 50 000 euros HT
Financement:
Agence de l'eau Loire-Bretagne
Conseil général Pays de la Loire
Conseils généraux de la Vendée, de la Loire-Atlantique, des Deux-Sèvres et du Maine et Loire.
Fonds structurels européens Leader +

Projet de la Moine
Maitre d'ouvrage: Syndicat Mixte pour l'aménagement de la Moine
Coût: 1 100 000 € TTC (études et travaux)
Financement:
Agence de l'eau Loire-Bretagne
Conseil général Pays de la Loire
Département du Maine-et-Loire
Syndicat de la Moine

5

VALORISATION DES EAUX PLUVIALES URBAINES

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

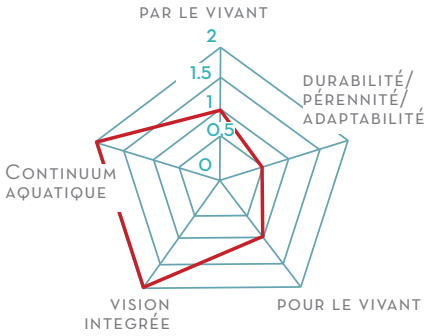


FIGURE 187

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN: SEINE-NORMANDIE
RÉGION: CHAMPAGNE-ARDENNE
DÉPARTEMENT: MARNE
COMMUNE: BÉZANNES

FICHE 1

Gestion des eaux pluviales dans une ZAC (Bézannes) : d'une solution de "génie civil" à un scénario plurifonctionnel

La commune de Bezannes et Reims Métropole ont décidé de construire une ZAC sur plus de 172 ha entrainant une imperméabilisation des sols et la nécessité de gérer l'augmentation des eaux de ruissellement lors d'événements pluvieux. Sur la partie amont de la ZAC, les urbanistes ont favorisé la mise en place de techniques alternatives d'infiltration comme les noues et bassins d'infiltration. Sur la partie aval, la proximité de la nappe a contraint les urbanistes à utiliser des collecteurs enterrés plutôt que des systèmes d'infiltration. Pour gérer les eaux pluviales sur cette partie, le projet nécessite la régulation et donc la rétention d'un volume de 15 000 m³ correspondant à une pluie centennale.

Le débit de rejet a été calculé sur le débit de ruissellement naturel avant urbanisation (85 L/s). L'exutoire est un ruisseau (La Muire) canalisé qui rejoint le réseau d'assainissement séparatif de l'agglomération.

SCÉNARIO DÉFINI DANS L'ÉTUDE D'AVANT-PROJET: BASSIN BÉTON + POMPAGE VERS FILTRE PLANTÉ + REJET GRAVITAIRE

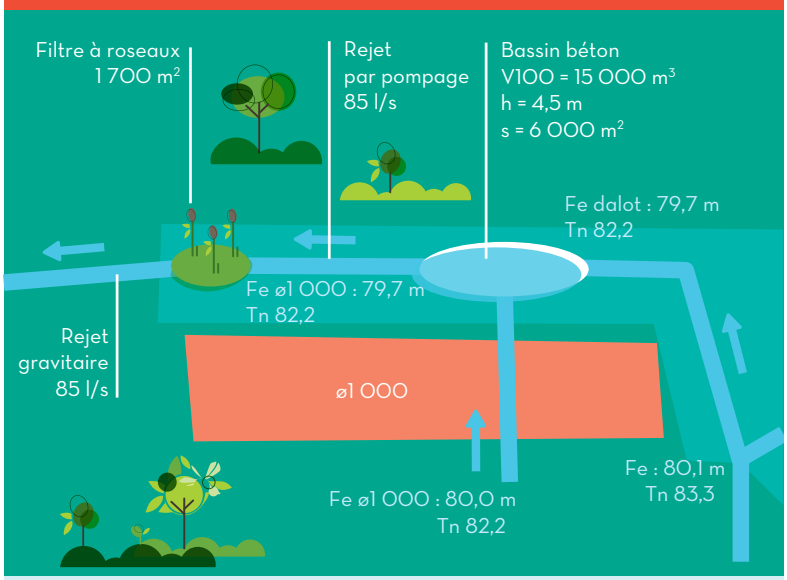


FIGURE 188

1. POINT DE DÉPART : UNE SOLUTION « GÉNIE CIVIL »

Pour le bassin de rétention des eaux pluviales, l'étude d'avant-projet, entérinée par le dossier « loi sur l'eau », prévoyait un bassin en béton enterré assorti d'une station de pompage à l'exutoire et d'un filtre planté de roseaux dédié au traitement des eaux pluviales (**FIGURE 188**). La proximité de la nappe imposait l'étanchéité du bassin.

Suite à cette proposition de bassin, le Directeur de Projet de la ZAC a souhaité mettre en place un écoulement gravitaire et développer le volet paysager. Dès le début, il y avait la volonté de concevoir un bassin qui s'intégrait au mieux dans le projet de la ZAC.

2. D'UN BASSIN BÉTON À UN BASSIN PAYSAGER

En réponse à l'appel d'offre de maîtrise d'œuvre, un bureau d'étude a proposé un bassin paysager moins décaissé et moins coûteux en alternative au bassin béton (**FIGURE 189**). Il a proposé une solution plurifonctionnelle permettant d'éviter le pompage des eaux. En effet, la mono-fonctionnalité du bassin béton neutralisait du foncier pour des événements rares (crues centennales). C'est finalement ce projet que Reims Métropole a choisi pour ces avantages paysagers, écologiques et économiques.

3. DU BASSIN PAYSAGER À LA LAGUNE

A ce stade du projet, un nouvel acteur est intervenu dans sa conception : le paysagiste conseil mandaté par Reims Métropole. La solution proposée par le maître d'œuvre a été acceptée à condition d'intégrer un plan d'eau permanent. Le paysagiste a alors proposé le plan (**FIGURE 190**).

L'architecture des bassins dans ce scénario suit l'aspect très linéaire de la ZAC. La lagune ainsi conçue présentait un faible potentiel écologique et risquait d'induire des problèmes algaux. Le bureau d'étude a alors travaillé sur le potentiel écologique de l'ensemble du système.

SCÉNARIO PROPOSÉ PAR LE BUREAU D'ÉTUDE EN RÉPONSE À L'APPEL D'OFFRE DE MAÎTRISE D'ŒUVRE

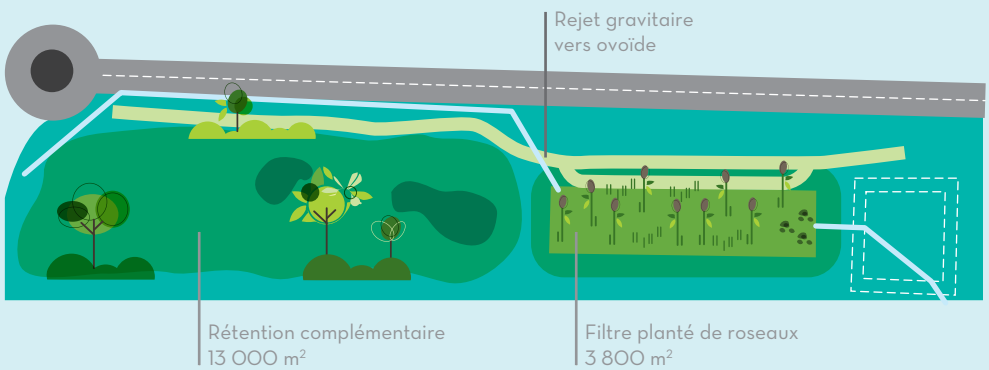


FIGURE 189

SCÉNARIO DESSINÉ PAR L'ARCHITECTE URBANISTE : RIVIÈRE SÈCHE + LAGUNE PAYSAGÈRE EN EAU + FILTRE PLANTÉ + ZONE HUMIDE

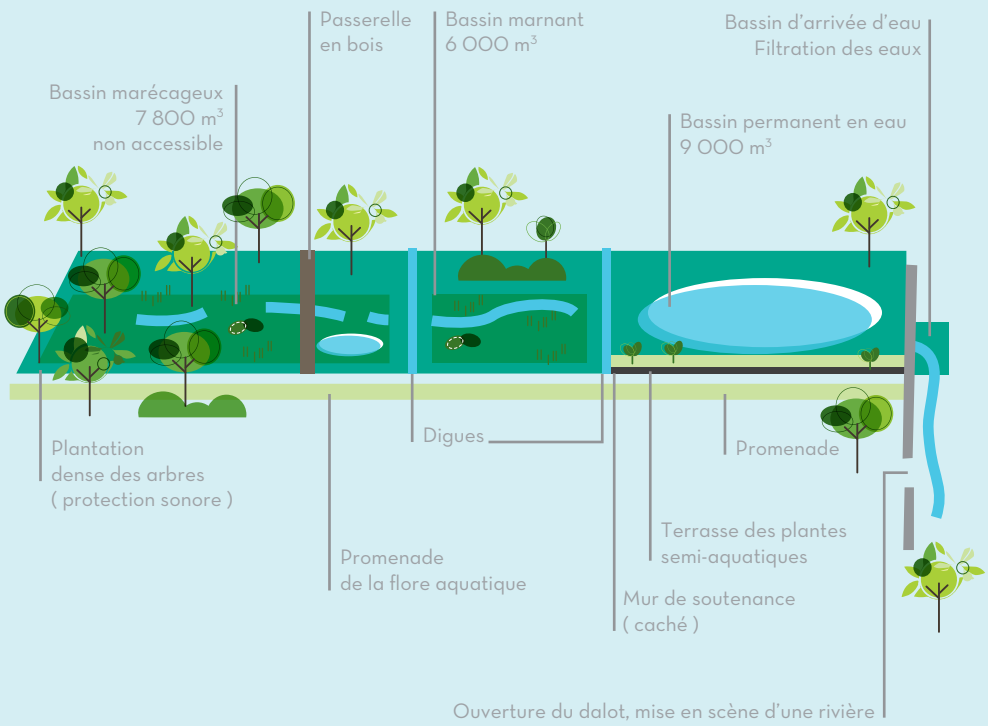


FIGURE 190

4. VERS UN MILIEU PLUS COMPLEXE POUVANT ACCUEILLIR UNE PLUS GRANDE DIVERSITÉ D'ESPÈCES

Le fonctionnement hydraulique du projet est resté identique, seule la morphologie de l'ouvrage a été complexifiée. Les matériaux et substrats ont été choisis à partir de la pédologie du site et la lagune a été imbriquée au filtre planté de roseaux. Les ouvrages ont été réfléchis pour pouvoir accueillir la plus grande diversité d'espèces faunistiques et floristiques possible. Pour cela, une diversité de milieux et d'habitats potentiels a été reconstituée.

Les choix décisifs ont d'abord été géomorphologiques (diversité des profondeurs, berges sinueuses pour varier l'exposition au soleil) puis le choix des substrats a déterminé les espèces à installer. L'étanchéité du bassin a été faite avec un complexe argile/polymères.

L'orientation du bassin vers un aspect plus naturel a conduit l'équipe de projet de la ZAC à le prolonger par un parc public de plus d'un hectare, la technique étant complétée par le paysager.

La forme de l'ouvrage et son attrait paysager sont ainsi le résultat de l'évolution du projet suivant les apports des paysagistes, des hydrologues, des écologistes et des gestionnaires de l'équipement (**FIGURE 191**). Ce travail d'évolution et de maturation, a été rendu possible par la maîtrise d'ouvrage qui a su à la fois imposer une commande précise et donner le temps nécessaire aux intervenants pour mener à terme ce travail de conception.

Scénario retenu

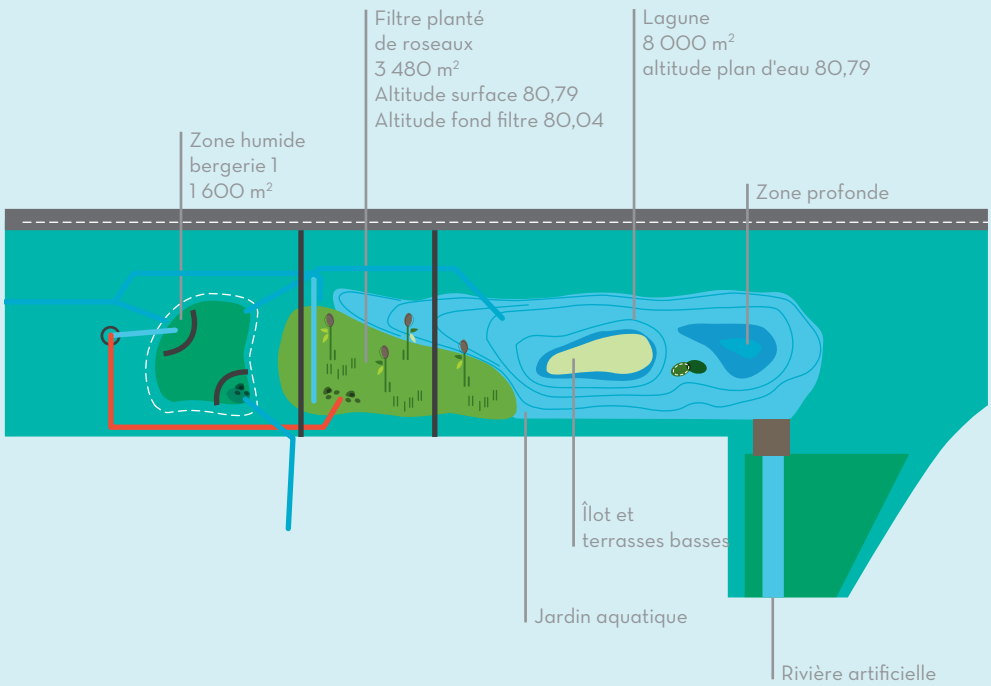


FIGURE 191

Rivière artificielle

FIGURE 192

Lagune

FIGURE 193

Filtre planté de roseaux

FIGURE 194

Le parc ouvert au public

FIGURE 195

5. UNE GESTION DIFFÉRENCIÉE DU SITE

Un plan de gestion différencié du milieu a été défini au début par le bureau d'étude. Cependant, plusieurs mois se sont écoulés entre la fin des travaux (2010), la réception de l'ouvrage (2011) et son exploitation. Un léger entretien a été réalisé les 2 premières années par l'entreprise qui a réalisé les travaux.
En 2013, la collectivité Reims Métropole doit mettre en place cet entretien et maintenance de l'ouvrage. Il s'agit aujourd'hui de regarder les espèces qui se sont développées pour définir un plan de gestion adapté à l'évolution des milieux. Cet aspect de gestion des espèces a été abordé après la réception des travaux, ces problématiques étant initialement moins présentes. Des réflexions sont donc en cours pour mettre en place un inventaire faune/flore et un suivi de la qualité des eaux, après une première analyse réalisée par le maître d'oeuvre.

6. OUVERTURE AU PUBLIC

Face à la demande du public, le parc a été ouvert le 10 août 2013. Trois passerelles en bois et un chemin sur la digue permettent au public de se promener autour du bassin. Un panneau explicatif sera installé ultérieurement pour décrire le rôle du bassin.

POUR EN SAVOIR PLUS

> www.reimsmetropole.fr

> JOST, G., et al. « Ingénierie écologique : évolution de la biodiversité et entretien d'un milieu aquatique artificiel finalisé en 2010, destiné à la gestion d'eaux pluviales urbaines », NOVATECH 2013

Maître d'œuvre: ARRIA-SINBIO
Maître d'ouvrage: Reims Métropole

Coût :
- estimation initiale lors de l'étude d'avant-projet sommaire : 8.000.000 € HT
- estimation en fin de phase projet avant lancement de l'appel d'offre : 4.800.000 €HT
- montant du Marché de Travaux du bassin : 4.450.300 € HT
- montant de la Maitrise d'Œuvre du bassin : 235.200 € HT

Financement
Région Champagne Ardenne : 25%
Reims Métropole : 75% (budget annexe dédié à la ZAC)

Concordance des objectifs du projet en fonction de la définition de l'ingénierie écologique donnée au chapitre 1

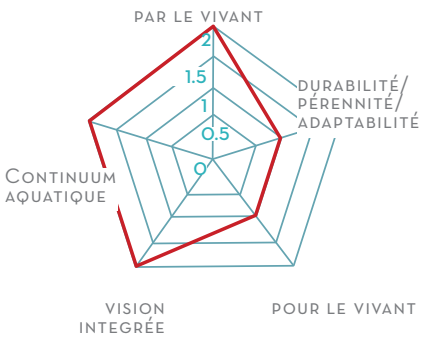


FIGURE 196

Situation géographique :

BASSIN : SEINE-NORMANDIE
RÉGION : BOURGOGNE
DÉPARTEMENT : YONNE
COMMUNE : AUXERRE

FICHE **2**

Comment prendre en compte l'environnement pour concevoir un projet intégré ? Exemple de l'écoquartier des Brichères à Auxerre

En 2002, le maire d'Auxerre s'est engagé auprès des habitants à démolir trois tours d'habitat collectif situées en périphérie d'Auxerre et à édifier en contre-bas des tours, un quartier d'habitats individuels. Cela représente une surface totale de 42,49 hectares.

Les tours ont été détruites dans le cadre d'un programme d'intervention de l'Agence Nationale pour la Rénovation Urbaine, le 30 juin 2007. L'objectif de ce programme est de transformer des quartiers stigmatisés en quartier ordinaires intégrés à la ville.

Tours d'habitat collectif démolies

FIGURE 197

Les chênais du site

FIGURE 198

Cheminement de l'eau au sein de l'Ecoquartier

FIGURE 199

1. EAU ET ÉCOQUARTIER

Initialement, le site constructible était délimité au nord et au sud par 2 chênaies.

Cependant, les premières études de terrain ont très vite révélées la présence de l'eau sur le site. Les habitants des maisons individuelles témoignaient de résurgences et d'inondations lors de gros orages. Ils montrèrent qu'il suffisait de creuser 50 cm pour trouver de l'eau, et ceci en amont comme en aval. En plein été, le fossé qui collectait les eaux en aval de l'ancienne voie ferrée était toujours bien rempli, indiquant ainsi qu'il drainait des eaux qui n'étaient pas que pluviales. La configuration du terrain et la présence de cette eau laissait penser qu'une rivière avait existé.

Le témoignage de certains anciens a permis de retrouver une source en amont : la source Sainte Geneviève. En 1669, la source alimentait Auxerre en eau potable par le biais d'une canalisation. Cette canalisation obsolète a été détruite lors de la construction de 4 bâtiments dans les années 1970 sans que les eaux aient été redirigées.

Le concepteur a donc fait le choix d'intégrer le quartier aux milieux humides existants grâce à un réseau aérien. Finalement, c'est l'eau et son cheminement qui a déterminé les zones constructibles et les zones non constructibles.

2. UN RÉSEAU D'EAU PLUVIAL À CIEL OUVERT

Le réseau d'eau pluviale a été construit à ciel ouvert. Il est entièrement gravitaire et entièrement planté. Ainsi, tout le parcours de l'eau peut être suivi, du toit jusqu'au milieu naturel. Cette valorisation paysagère des eaux pluviales, outre l'économie générée par l'absence d'un réseau enterré, a permis d'intégrer tout au long de ces cheminements, des dispositifs paysagers de stockage (8 748 m^3 pour une pluie cinquantennale) et de dépollution (phytoremédiation et filtres à sable) des eaux pluviales.

Le réseau d'eau pluviale

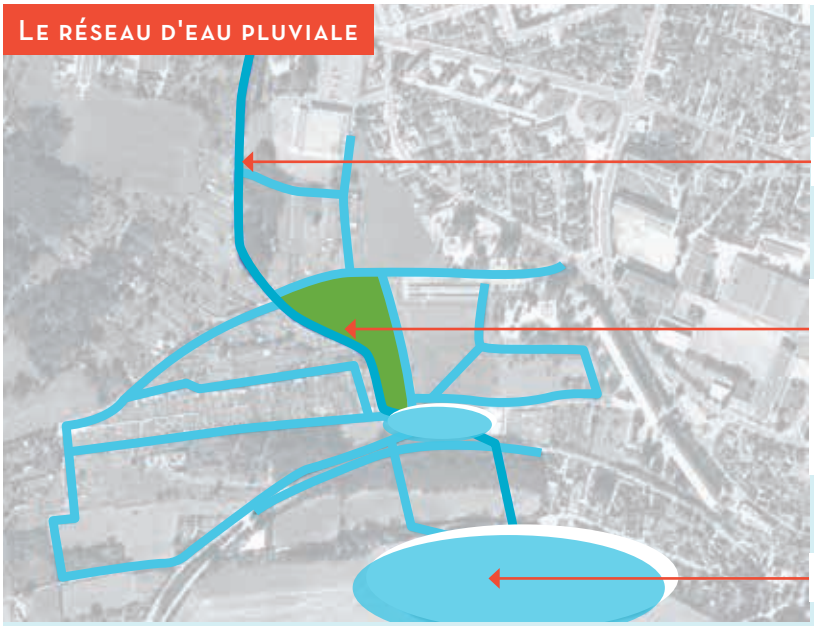


FIGURE 200

Fonctionnement du ruisseau

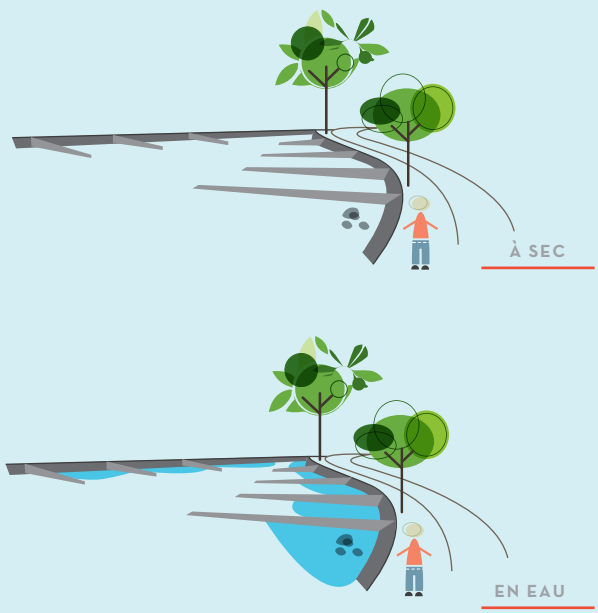


FIGURE 201

Les eaux pluviales, les eaux de ruissellement et les eaux de sources sont collectées dans un réseau de noues et dans le talweg qui alimentent un étang situé au point le plus bas du site. Grâce à l'étang accompagné d'une place publique, l'eau est l'élément central de l'éco-quartier.

Après l'étang, les eaux sont dirigées vers un bassin de rétention. Ce bassin s'étalera ensuite sur trois bassins successifs grâce à un "plissement" du terrain réalisé dans le cadre d'un réaménagement du secteur.
Même si le réseau de récupération des eaux pluviales, l'étang et les zones humides en aval ont été conçu pour gérer l'ensemble des eaux, des dispositifs de rétention à la parcelle (techniques alternatives et biefs) ont été installés pour limiter le débit. En effet, la réglementation impose de limiter le débit de sortie de la parcelle à 25 l/s/ha.

Lors des opérations de chantier, la déviation provisoire des écoulements a provoqué la création d'une nouvelle zone humide accueillant des cols verts et 2 poules d'eau avec leurs poussins. Les architectes ont alors modifié les plans initiaux pour conserver la zone humide.

La construction de l'étang

FIGURE 202

3. GESTION DIFFÉRENCIÉE DES ESPACES NATURELS

L'entretien des végétaux est réalisé sur la base d'une gestion différenciée et évolutive en fonction des espaces, des types d'usages et de la fréquentation. Les produits phytosanitaires et les désherbants ne sont pas utilisés. Les gazons ne sont pas arrosés et ils sont fertilisés avec un produit agréé en Agriculture Biologique.
De plus, un dispositif « zéro CO_2 » a été mis en place sur le site. L'objectif est de tendre à limiter le plus possible la production de gaz à effet de serre sur le site. Pour éviter le transport des déchets verts, les déchets de tonte, les feuilles et les tailles d'arbres et d'arbustes sont broyés et recyclés *in situ*. Le personnel se déplace avec des véhicules équipés de moteurs électriques.

4. ALIMENTATION EN EAU DES JARDINS FAMILIAUX

Un dispositif gravitaire et à ciel ouvert, de recyclage des eaux pluviales permet d'alimenter en eau les jardins familiaux, créés au sud-ouest. Cette réserve peut tenir une sécheresse de 3 semaines.

POUR EN SAVOIR PLUS :

www.auxerre.com
www.serge-renaudie.com
www.composante-urbaine.fr

GOUVERNANCE

Maître d'ouvrage: Ville d'Auxerre
Maître d'œuvre:
- Serge Renaudie, mandataire
- Andrea Mueller, architecte
- S.E.T.U., Bureau d'études V.R.D.
- Composante Urbaine, hydrologue
- ECMO, bureau d'étude chantier

Coûts :
Montant des travaux
des espaces publics: 11,60 M€ T.T.C.
Montant total de l'opération : 50 M€
Investissements soutenus par l'ANRU : 45,6 M€
Financement :
Commune / Conseil général/Conseil régional
Bailleur/ ANRU
Maîtrise d'Ouvrage aménagements espaces publics :
Ville d'Auxerre, Direction de l'Urbanisme
Equipe de Maîtrise d'Œuvre :
Urbaniste, paysagiste, mandataire :
Serge Renaudie – Atelier ville paysage
Hydrologue : Composante Urbaine
Bureau d'Etude Technique : S.E.T.U.
Chantier : ECMO

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

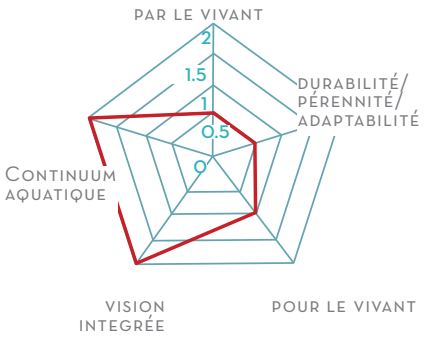


FIGURE 203

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN: RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE
RÉGION: RHÔNE-ALPES
DÉPARTEMENT: RHÔNE
COMMUNE: SAINT-PRIEST

FICHE 3

Le système de gestion des eaux pluviales du Parc technologique de la Porte des Alpes

1. QUELQUES ÉLÉMENTS DE CONTEXTE

Le site de la porte des Alpes se situe sur un secteur proche de l'autoroute Lyon/Grenoble/Chambéry et proche du campus de l'université Lyon II. En 1991, il a été décidé de réaliser un technopole de 140 ha sur les 1450 ha du site. Le projet devait être économiquement attractif, fortement desservie en transports en commun et proposer un cadre de vie agréable pour attirer des entreprises de pointe dans un cadre à haute qualité paysagère.

La mise en place du réseau d'assainissement présentait différentes contraintes techniques. Tout d'abord, il n'y avait pas d'exutoire naturel et les réseaux unitaires étaient saturés à l'aval. L'infiltration des eaux n'était pas possible car le site de la Porte des Alpes se trouve sur une colline morainique imperméable constituée de limons et de sable grésifié. D'autre part, il est situé dans une zone soustraite à l'urbanisation (le V vert) en qualité de patrimoine d'intérêt écologique et paysager. Les règles d'urbanisme dans cette zone ont imposé que le technopole soit composé d'au moins 50 % d'espaces verts. Le respect de cette contrainte impliquait un effort d'intégration et d'esthétique des aménagements. Cela a conduit le Grand Lyon à faire appel à d'autres solutions techniques et à préconiser un assainissement pluvial plus proche du cycle de l'eau.

Le V vert lyonnais est une vaste trame végétale en forme de V inscrite dans le Schéma Directeur de l'Agglomération Lyonnaise (SDAL) en 1992. La zone est composée d'un ensemble disparate d'espaces naturels et agricoles périurbains, de parcs, boisements, terrains cultivés soustraits à l'urbanisation, en qualité de patrimoine d'intérêt écologique et paysager. Elle est destinée à structurer l'urbanisation actuelle et future et prend le nom de « V-vert » à cause d'un tracé en forme de v.

Les aménagements devaient alors répondre à 4 objectifs :

- l'intégration paysagère ;
- l'ouverture au public ;
- la plurifonctionnalité ;
- la qualité.

La solution technique retenue consistait à ré-infiltrer les eaux dans la nappe de l'est lyonnais, qui est la destination actuelle et naturelle des eaux pluviales de cette zone. Parmi les différentes solutions envisagées, et malgré la distance à parcourir (1 km), ce dispositif répondait aux contraintes physiques et environnementales et était économiquement plus avantageux.
Une grande consultation internationale a été lancée en 1992 auprès d'architectes urbanistes et de paysagistes pour élaborer un schéma d'aménagement d'ensemble sur le site.

2. ELABORATION DU PROJET ET CONCERTATION : 1994-1995

La gestion intégrée du projet a été prévue dès la phase de conception. Une équipe pluridisciplinaire a été constituée, rassemblant des acteurs de l'aménagement (services de voiries, paysagistes...) et de la gestion future pour mobiliser différentes compétences. Le travail de conception a été réalisé en équipe et les décisions ont été prises en concertation entre tous les acteurs.

3. AU FIL DE L'EAU...

Les urbanistes ont souhaité « mettre l'eau en scène ». C'est ainsi qu'ils ont eu l'idée de retenir l'eau dans des bassins en eau permanente (traités comme des lacs d'agrément) dont le niveau peut varier quand il pleut. L'eau est ensuite conduite vers les secteurs où la perméabilité permet son infiltration. Ce système privilégie un cycle court des eaux pluviales et la réalimentation de la nappe.
L'ensemble comprend trois types d'ouvrages :

- des bassins de rétention ;
- des ouvrages de prétraitement ;
- des bassins d'infiltration.

Ces ouvrages n'ont pas vocation à accueillir les eaux de l'ensemble de la Porte des Alpes, mais seulement de la partie centrale située sur une colline morainique peut propice à l'infiltration. Les secteurs sud et nord sont développés sur la plaine alluviale et permettent de l'infiltration à la parcelle.
C'était la première fois que le Grand Lyon réalisait des ouvrages techniques sous forme de lacs d'agrément : 4 hectares de plans d'eau au total.

Par ailleurs, compte tenu de l'intégration du site dans le V Vert lyonnais, il n'a pas été concevable de reproduire des bassins de rétention inaccessibles au public, fermés derrière un grillage métallique. Une étude sur les usages possibles des espaces mis à disposition pour les ouvrages d'assainissement pluvial a été réalisée en 1996 et a fait apparaître plusieurs pistes de pluri-fonctionnalités :

- promenade, détente autour des lacs et des bassins d'infiltration ;
- réalisation de terrains de sport au-dessus des surfaces d'infiltration.

Au final, à partir d'une nécessité technique, les paysagistes ont réalisé un quartier à très haute qualité paysagère qui répond à l'ambition économique du projet.

Assainissement pluvial du parc technologique

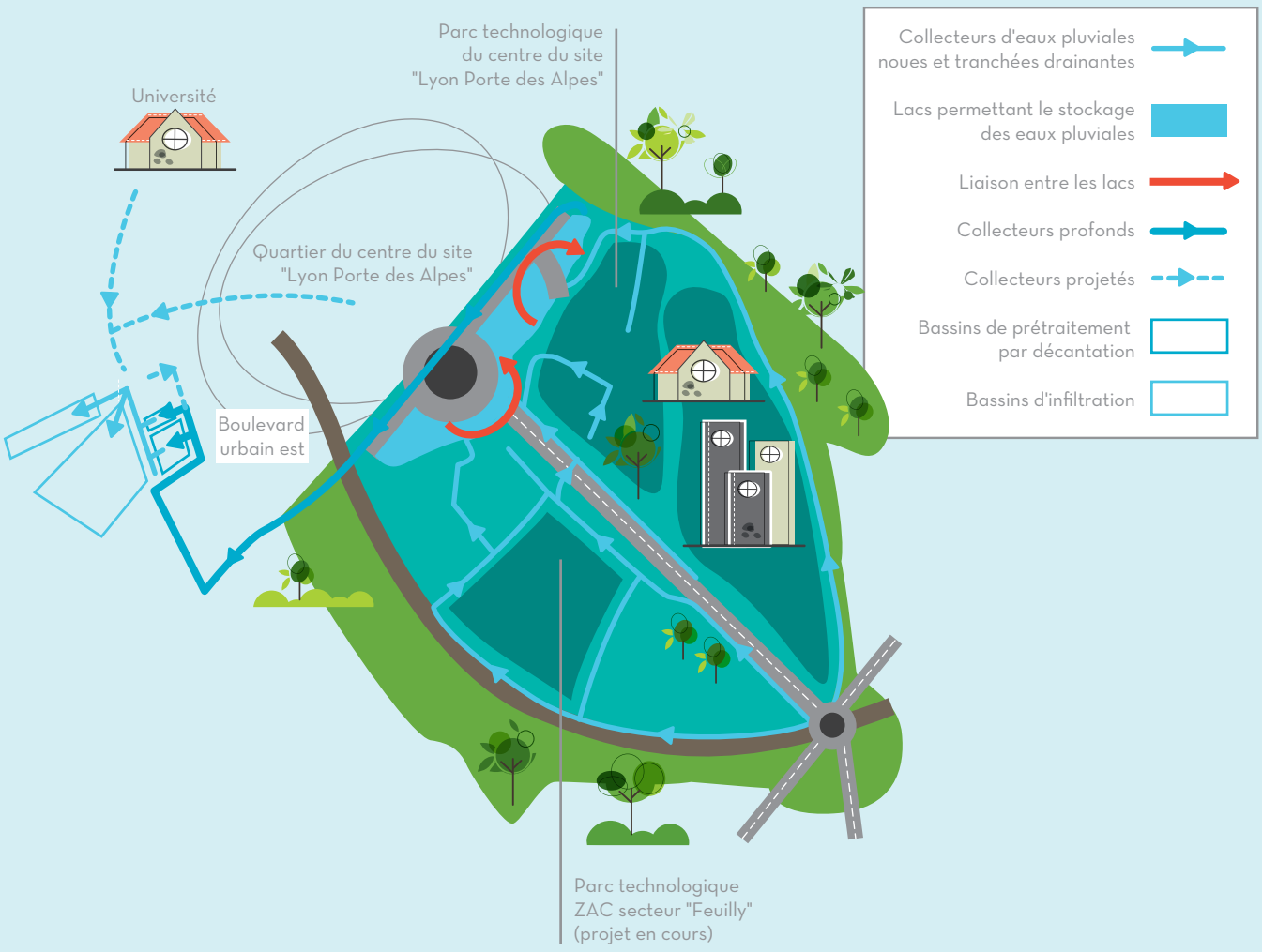


FIGURE 204 GRAND LYON

Tranchée drainante

FIGURE 205 GRAND LYON

4.LA COLLECTE DES EAUX PLUVIALES

Les ouvrages de collecte des eaux de ruissellement de voirie à l'intérieur du parc technologique sont réalisés sous forme de noues et de tranchées situées de part et d'autre des voies. Ces noues et tranchées drainantes ont un rôle de rétention des eaux pluviales et de prétraitement (décantation des matières en suspension). Elles se vident ensuite dans les collecteurs enterrés qui dirigent les eaux vers les lacs.

PLAN D'EAU 1, 2 ET ROSELIÈRE

LAC 1 : LAC DE FEUILLY — LAC 2 : LAC DES PERCHES — ROSELIÈRE : LAC DES MOUILLES

FIGURE 206

GRAND LYON

5. LA RÉTENTION DES EAUX PLUVIALES

a. Les ouvrages de rétention

Sur les parcelles privées, 30% de la superficie doit être réservée au verdissement pour limiter l'imperméabilisation. Les ouvrages collectifs sont composés de deux plans d'eau recevant les eaux de ruissellement des secteurs urbanisés et se déversant dans un troisième lac conçu comme une roselière. Cette roselière filtre les eaux pluviales et permet la diminution des matières en suspension dans l'eau avant leur rejet au milieu naturel.

Les lacs sont dimensionnés pour pouvoir stocker les eaux de ruissellement jusqu'à une période de retour de 100 ans afin de protéger le centre commercial construit à la fin des années 1970 au point le plus bas du site.
L'été, l'eau de la nappe phréatique est pompée pour maintenir le niveau d'étiage du lac. Ce principe représente une des limites de ce projet.

RÉTENTION ET TRAITEMENT DES EAUX PLUVIALES DANS LES LACS

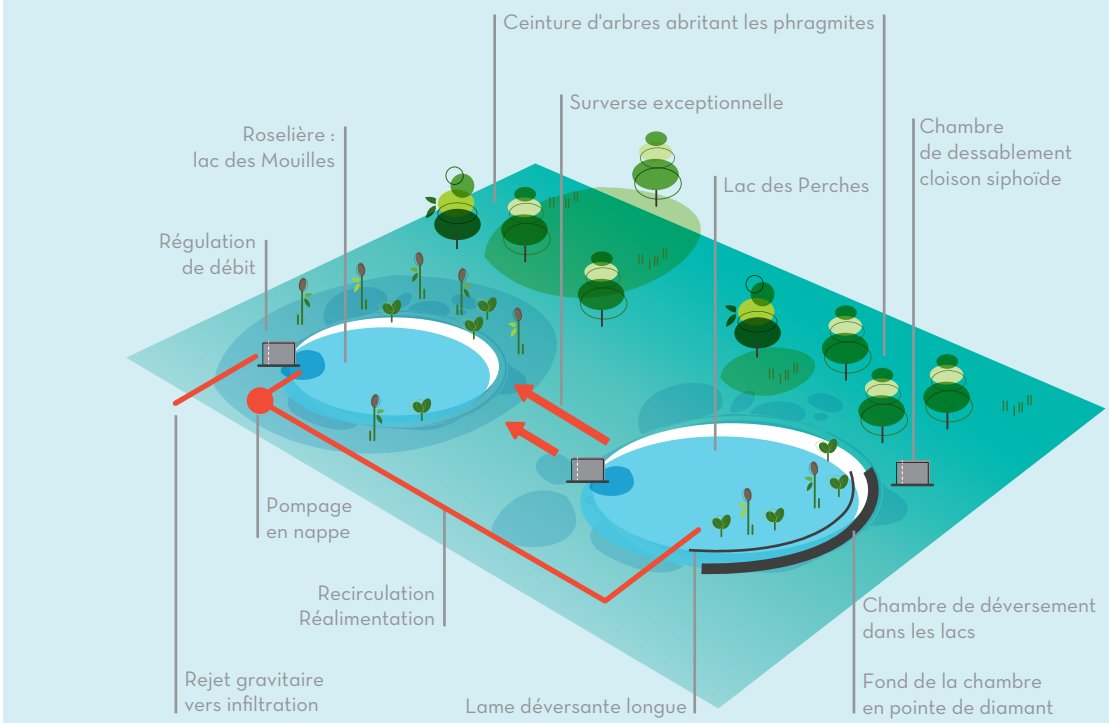


FIGURE 207

GRAND LYON

b. La gestion des pollutions chroniques

Afin de se prémunir contre les risques de pollution des lacs, des dispositifs de prétraitement ont été prévus à tous les niveaux de collecte des eaux pluviales :

• Les eaux de ruissellement des voiries publiques sont recueillies par des noues et des tranchées drainantes qui assurent un prétraitement très efficace ;

• Un débourbeur – déshuileur est mis en place sur chaque parcelle privative pour prétraiter les eaux provenant des parkings privés et retenir une pollution accidentelle ;

• Avant chaque lac, un dessableur avec une paroi siphoïde intercepte les flottants et les hydrocarbures en surface tout en opérant un dessablage grossier des effluents. Les eaux se déversent ensuite tout au long d'un déversoir. La forme très allongée de cet ouvrage et son fond en pointe de diamant permettent de ralentir les eaux avant leur déversement et de procéder à un dernier dessablage plus fin.

COLLECTE ET TRAITEMENT DES EAUX PLUVIALES DE LA VOIRIE

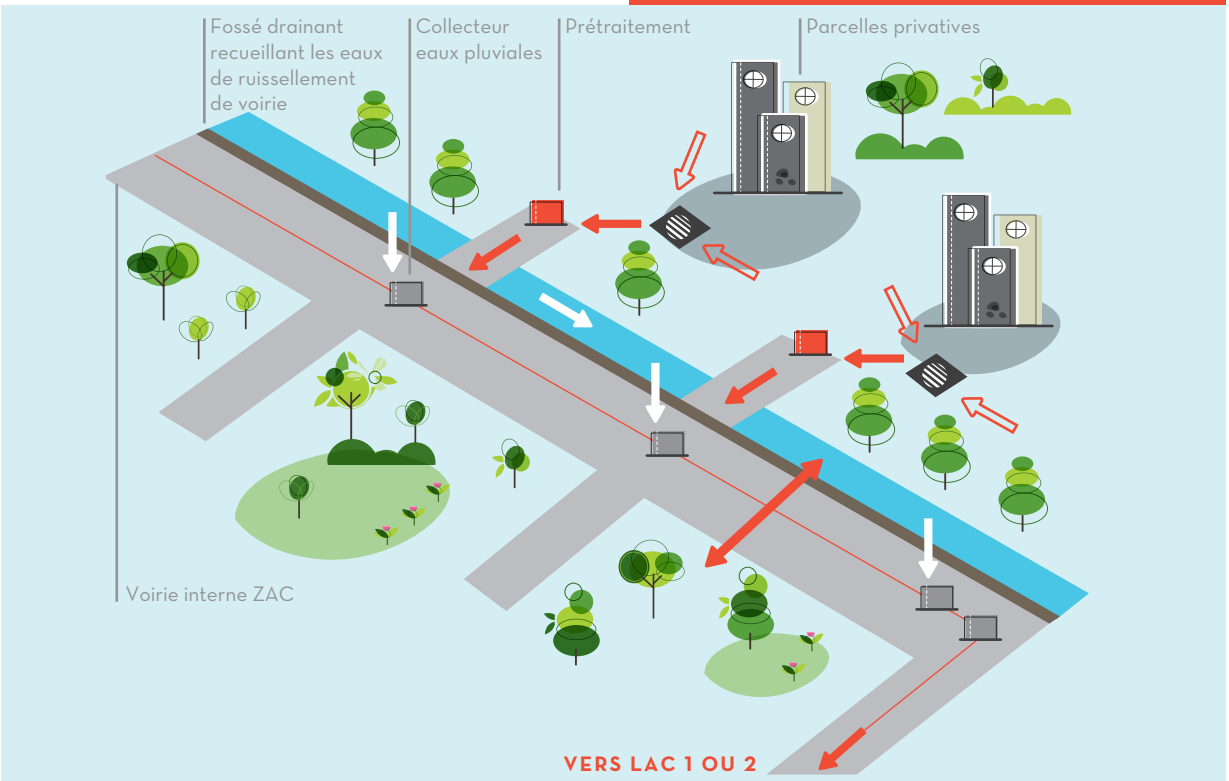


FIGURE 208

GRAND LYON

c. La gestion des pollutions accidentelles

Les pollutions accidentelles qui pourraient survenir sur la voirie publique seront arrêtées dans les noues et les tranchées drainantes. S'agissant de systèmes superficiels, les pollutions sont détectées très rapidement par les agents ou par les promeneurs et signalés aux services d'intervention qui évacueront les terres polluées très rapidement. Ce système de surveillance permet une intervention rapide et efficace.

6. L'INFILTRATION

L'infiltration a lieu dans des bassins (Minerve) d'une capacité d'infiltration de 800l/s. Ils reçoivent les eaux des lacs et les eaux de ruissellement d'un boulevard, d'un centre commercial et du secteur central. Etant donné que seules les eaux du lac sont prétraitées, 2 bassins de rétention et de prétraitement ont été installés en amont des bassins d'infiltration.

Schéma représentant le principe d'infiltration sous les terrains de sport

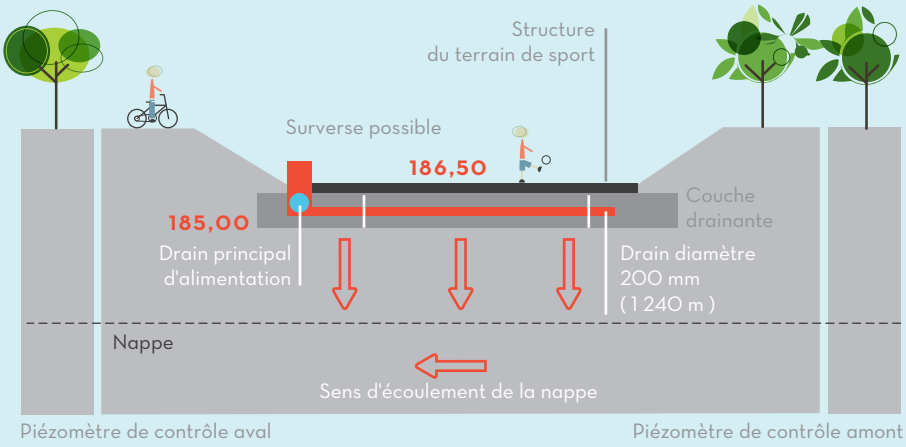
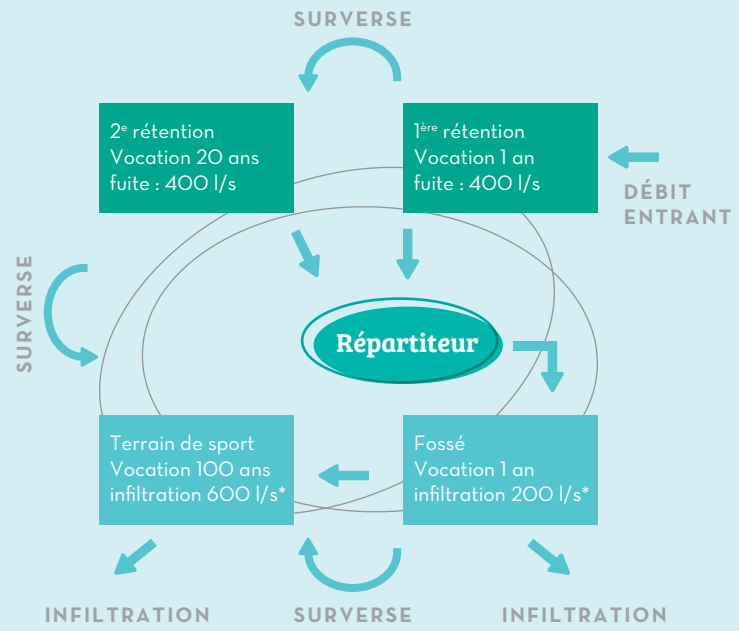


FIGURE 209

GRAND LYON

Logique de fonctionnement des bassins d'infiltration/rétention



* Valeurs minima d'infiltration

FIGURE 210

Le premier bassin est conçu pour être mis en eau systématiquement et servir de premier décanteur. Il est dimensionné pour accueillir les eaux d'une période de retour d'un an. Pour des pluies plus importantes, ce bassin se déverse par surverse dans le second bassin de rétention, ce dernier étant dimensionné pour une période de retour de 20 ans. Au-delà, les eaux s'écoulent directement vers les surfaces d'infiltration.

Les eaux épurées en sortie de rétention sont dirigées vers un fossé d'infiltration. Ce dernier est constitué d'une longue bande de graviers filtrant une dernière fois les eaux avant de les absorber vers la nappe.

En cas de forte pluie, le fossé d'infiltration est complété par des drains sous des terrains de foot. Les eaux sont dirigées vers les drains enterrés dans une structure filtrante (tranchée) située sous l'assise des terrains de football. Ces terrains sont eux aussi dimensionnés pour pouvoir stocker les eaux de ruissellement jusqu'à une période de retour de 100 ans.

Un système de vannage est situé à l'amont des bassins de rétention pour bloquer une éventuelle pollution dans le premier bassin en cas de pollution accidentelle survenant sur les bassins versants. Les eaux de ruissellement sont détournées vers le second bassin pour bloquer la pollution et éviter qu'elle ne rejoigne le milieu naturel. Elle sera ainsi traitée sur place ou évacuée en usine de traitement spécialisée.

7. GESTION DE L'ESPACE

Le Grand Lyon a choisit de confier l'ensemble des espaces publics de la porte des Alpes à un exploitant unique (l'entretien des espaces verts et bleus) : la Direction logistique et bâtiment du Grand Lyon. L'entretien est entièrement réalisé sans pesticides ni engrais. La flore a été en totalité plantée.

8. ENTRETIEN

a. Qualité de l'eau

Un ensemble de mesures a été mis en place pour s'assurer de la qualité de l'eau. A l'amont, les espaces privés et publics sont entretenus sans utiliser de produits phytosanitaires. La charte paysagère définie est bien acceptée par les riverains tout comme le cahier des charges très stricte pour la construction des bâtiments. Par exemple, les bâtiments construits dans la 2nde tranche sont des bâtiments passifs, à Haute qualité environnementale, entourés de parking végétalisés.

b. Bassins de décantation/rétention

Les bassins de décantation sont curés régulièrement et les bacs de déshuileur sont vidangés.

c. Terrains de foot

En ce qui concerne l'entretien des terrains de football, une convention a été passée avec l'université Lyon II afin d'avoir une exploitation raisonnée des terrains (l'utilisation d'engrais et de pesticides est interdite afin de ne pas polluer la nappe).

9. SUIVI

a. Nappe

En ce qui concerne le suivi de la nappe, son renouvellement mais aussi sa qualité sont contrôlés. Des contrôles de l'effluent avant infiltration sont également réalisés :

- sur l'effluent (4 fois par an) : analyse des paramètres DBO_5, DCO, NK et hydrocarbures ;
- sur l'eau de nappe (4 fois par an) : analyse des paramètres conductivité, COT, NK, nitrates, hydrocarbures, pesticides azotés (ancienne zone agricole) et métaux lourds.

Le sol de la zone d'infiltration est également sujet à être chargé en polluants du fait de son rôle de filtre durant l'infiltration des eaux. Lors des interventions d'entretien, des prélèvements de sol sur 50 cm de profondeur sont effectués puis des analyses permettent de mesurer la quantité de métaux lourds, solvants chlorés, d'hydrocarbures ainsi que le pH et le COT (détection de pollution carbonée).

b. Faune, flore

Des conventions ont été passées avec les associations environnementales qui assurent le suivi du site. Elles font ensuite un retour au Grand Lyon qui réalise l'entretien et s'occupe de la valorisation auprès du public au travers notamment de panneaux pédagogiques.

Des suivis ont été réalisés en 1999, 2006 et 2010. Des bilans globaux sur les lacs et la biodiversité qu'ils accueillent ont été établis. Ces suivis portent sur les espèces végétales, piscicoles et sur la qualité physico-chimique de l'eau et des sédiments. La réalisation de ces suivis est de la responsabilité du Grand Lyon et il est partagé entre les équipes de conception et d'exploitation mais également avec les associations. Ces suivis permettent de faire évoluer en permanence les pratiques de gestion du site pour préserver la diversité biologique du site et maintenir l'équilibre de ce nouvel écosystème. Le développement écologique des lacs est qualifié de remarquable par l'ensemble des associations de sauvegarde de la faune et de la flore.

POUR EN SAVOIR PLUS :

www.grandlyon.com

GOUVERNANCE

Maître d'ouvrage: Grand Lyon en partenariat avec la ville de Saint-Priest, le SYTRAL, le Centre commercial, l'Université Lyon 2 et l'ONF.
Maître d'ouvrage délégué : SERL
Maître d'œuvre: GINGER et SOGREAH
Bureau d'étude : OVE ARUP
Architecte paysagistes : ASA et ILLEX
Aménagement : SERL
Coûts
Lacs :
Travaux : 5 M€ HT
Bassins Minerve :
Travaux technique : 1 M€ HT
Travaux paysagers : 400 k€ HT

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

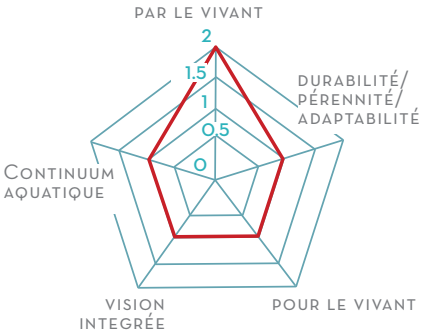


FIGURE 211

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN : RHIN-MEUSE
RÉGION : LORRAINE
DÉPARTEMENT : MOSELLE
COMMUNE : METZ (PARC DE LA SEILLE)

FICHE 4

Création d'un parc urbain pour retenir et traiter les eaux pluviales

1. ELÉMENTS DE CONTEXTE

L'objectif du projet est de créer un parc urbain pouvant accueillir les eaux de ruissellement et les eaux pluviales issues de la construction d'un nouveau quartier. Ces eaux sont traitées grâce aux zones humides présentes dans le parc puis sont acheminées au cours d'eau (la Seille).

A la fin des années 90, la Ville de Metz a décidé de construire un parc urbain de 20 ha qui englobe la rivière de la Seille en préalable à la construction d'une future ZAC de 45 ha.

PHOTO AÉRIENNE DU SITE

FIGURE 212

Les objectifs initiaux étaient de renaturer le cours d'eau et d'offrir un nouveau lieu de promenade aux messins. De plus, la création de ce parc permettait d'équilibrer la ville en réalisant un grand parc urbain relié à ceux du centre-ville par des promenades. L'intégration de la gestion des eaux pluviales du nouveau quartier de l'Amphithéâtre aux fonctions du parc s'est faite dès la conception de ce dernier.

2. DES OUVRAGES QUI S'INTÈGRENT DANS LE PARC

Un ensemble d'ouvrages de gestion des eaux de ruissellement et des eaux pluviales pour le futur quartier ont été conçus et réalisés d'octobre 2000 à mai 2002. Le traitement des eaux se fait progressivement au cours de leur passage au sein d'une roselière (2 000 m²), d'un bassin de lagunage (2 500 m²) puis d'une zone humide de finition (800 m²).

LES OUVRAGES DU PARC

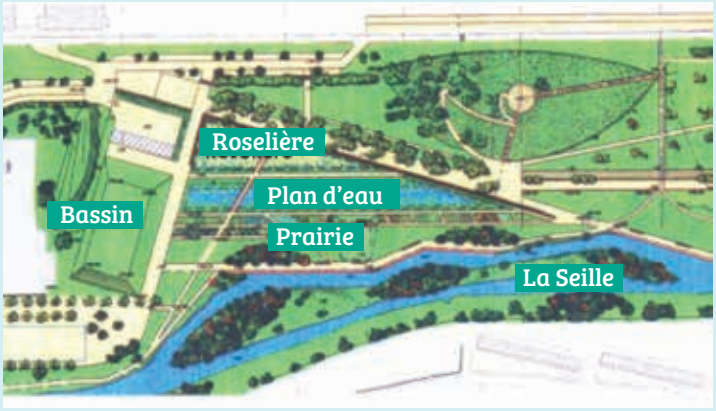


FIGURE 213

Ces ouvrages sont dimensionnés pour le stockage d'une pluie décennale avec une capacité de 8 000 m³. La rétention des eaux est assurée par les bassins de la lagune et de la roselière et un bassin sec de 2 000 m² pour le stockage d'événements pluvieux intenses. La création d'un lit majeur « emboité » et d'un bras secondaire permet une meilleure rétention des crues même si une partie du parc se trouve régulièrement sous l'eau au cours de l'hiver.

FIGURE 214

Le cours d'eau, autrefois canalisé et encaissé, a été renaturé. Le lit a retrouvé une grande ampleur, après terrassement et un bras secondaire (400 ml) a été créé. Les berges ont été grandement adoucies et revégétalisées et les espaces rivulaires ont été redynamisés.

Cette gestion des eaux de ruissellement et des eaux pluviales ainsi que la diversification du cours d'eau ont contribué à l'amélioration de la qualité de l'eau. La diversification des écoulements et des milieux a été améliorée par la création du bras secondaire et d'une l'île préservée des interventions humaines. La biodiversité a été également favorisée par la variété des faciès du cours d'eau et la réalisation de nombreuses plantations.

Crue de la Seille

Bras secondaire créé

FIGURE 215

3. UN PARC LABELLISÉ ECOJARDIN

La conception et le mode de gestion du parc ont été récompensés par le label EcoJardin. Durant les travaux, les matériaux de déblais (130 000 m^3) ont été réutilisés, après dépollution, pour le terrassement du parc et l'édification des collines. De même, les pavés de l'ancienne gare de marchandise ont été décapés et réutilisés pour le pavage des allées.

Aujourd'hui, le parc fait l'objet d'un entretien différencié favorisant la flore spontanée (fauchages tardifs et raisonnés) et respectant l'environnement (zéro pesticide et désherbage mécanique). La Seille n'est entretenue que sur les abords immédiats des zones fréquentées et les interventions sont sélectives : pas de coupes ou élagages systématiques, respect des bandes d'hélophytes en berges et retrait d'embâcles majeurs.

4. UN PARC TRÈS APPRÉCIÉ PAR LE PUBLIC

Une piste cyclable, une piste de roller, un terrain multisports, des jeux pour enfants et des allées pour les joggers ont été aménagés au sein du parc. Le parc comprend également une houblonnière et des vignes et un parcours d'orientation et de découverte de l'environnement.

D'autres aménagements ont été ajoutés les années suivantes :

- 2 sculptures ;
- 1 passerelle ;
- des ruches.

Le parc est aussi très apprécié pour accueillir des événements.

POUR EN SAVOIR PLUS :

www.mairie-metz.fr

GOUVERNANCE

Maitre d'ouvrage: Ville de Metz

Maitre d'œuvre:

Bureau d'étude: SINBIO, SINT (gestion des eaux pluviales, génie écologique), INGEROP (géotechnique)

Paysagiste: Jacques Coulon et Laure Planchais

Concepteur lumière: Yves Adrien

Les entreprises

Terrassements, VRD : Muller TP

Génie végétal : DHR

Ouvrages bois : VPA - Francial

Plantations : DHR - VPA

Eclairage : Forclum

Autres intervenants

Bureau de contrôle : Afitest

Pilotage OPC : Cabinet Thill

Coordonnateur SPS : ASCET

Coût:

Travaux sur le cours d'eau: 610 000 euros HT

Travaux totaux du parc: 6 500 000 euros HT

Financement:

Agence de l'eau : 40%

Région Lorraine : 60%

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

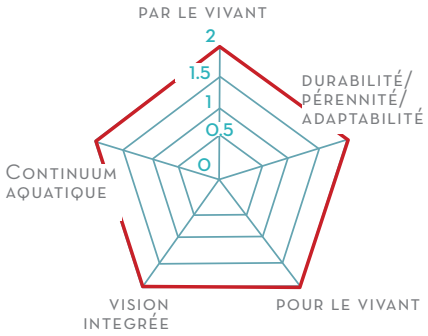


FIGURE 216

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN : RHÔNE-MÉDITERRANÉE ET CORSE
RÉGION : FRANCHE-COMTÉ
DÉPARTEMENT : DOUBS
COMMUNE : MONTBÉLIARD

FICHE 5

Restauration d'une zone humide dans l'optique de la gestion des eaux pluviales : la zone humide des Jonchets-CA Montbéliard (21)

1. UNE URBANISATION PROGRESSIVE DE L'AGGLOMÉRATION DE MONTBÉLIARD

Le milieu naturel s'est retrouvé confronté, dans les années 60, à un fort développement industriel, entraînant une urbanisation massive. Ceci a eu pour conséquence la création d'un paysage urbain fragmenté avec une disposition des zones urbaines le long de rivières.

2. LE DÉVELOPPEMENT D'UN ASSAINISSEMENT TOUT TUYAUX

Avant les années 60, les zones humides constituaient des zones tampons naturelles pour réguler les eaux pluviales. Lors de la période d'urbanisation, la politique de gestion des eaux pluviales s'est orientée vers la mise en place de réseaux de collecte. Le choix de cet assainissement a été conduit au détriment des zones humides, en les asséchant volontairement.

Le développement de cette politique d'assainissement a conduit à deux principaux dysfonctionnements. Tout d'abord, une dégradation progressive de la qualité physico-chimique et morphologique des cours d'eau du bassin versant de la Lizaine a été détectée. Ainsi, en 1995, des signes de pollution ont pu être identifiés, en soulignant plus particulièrement une eutrophisation régulière. En parallèle, une mortalité piscicole anormale a été identifiée au niveau des rejets d'eaux pluviales.

Ensuite, l'imperméabilisation des surfaces a entrainé progressivement une saturation des réseaux, entrainant un risque d'inondation. Dans les années 90, de fortes inondations ont joué un rôle décisif pour faire accepter une nouvelle politique de gestion des eaux pluviales au niveau de la communauté d'agglomération.

3. UNE PRISE DE CONSCIENCE LOCALE D'UNE ÉVOLUTION NÉCESSAIRE DE LA GESTION DES EAUX PLUVIALES

Le risque lié à l'eau et aux crues, devient ainsi une thématique prioritaire, par la suite enrichie par d'autres approches : mobilité, nature, paysage, développement urbain, économie, écotourisme, etc.

A partir de 1995, une politique d'incitation à la gestion alternative des eaux pluviales est mise en place. Les trois grands piliers de la gestion des eaux pluviales du Pays de Montbéliard sont ainsi : limiter l'imperméabilisation, privilégier l'infiltration, stocker avant de rejeter à débit régulé. A l'avenir, la gestion des eaux pluviales dans le cadre de projets urbains doit se faire en optimisant l'utilisation des techniques alternatives.

4. LA ZONE HUMIDE DES JONCHETS, UN TÉMOIN DE LA POLITIQUE D'ASSAINISSEMENT

Avant 1970, la zone humide des Jonchets était un marais que l'homme utilisait pour l'élevage ou en tant que prairie de fauche. Lors de l'urbanisation des années 60 et de la mise en place des réseaux de collecte, la zone humide des Jonchets a ainsi été privée des 4/5 de son alimentation en eau. Le site a ainsi été asséché progressivement et soumis à la pression urbaine. La zone humide est ainsi bordée au Sud par des entrepôts automobiles, à l'est par des lotissements, au Nord par un lot réservé à une future zone commerciale, et à l'ouest par une route départementale.

5. LE DÉVELOPPEMENT D'UNE ZAC À L'ORIGINE DE LA RESTAURATION DE LA ZONE HUMIDE

Un programme d'urbanisation a été lancé dans les années 2000 au niveau de la plaine des Jonchets sous la forme d'une ZAC. Dans la même période, la gestion des eaux pluviales s'est orientée vers une gestion alternative. Ainsi, dans le prolongement des orientations prises de politique des eaux pluviales et dans le but d'augmenter l'attractivité de la commune, il a été décidé d'urbaniser ce site sous réserve de restaurer la zone humide et la rendre accessible aux lotissements voisins. En effet, la plaine des Jonchets est passée, sous l'effet de l'urbanisation, d'un fonctionnement de zone humide à un fonctionnement de plaine drainée. L'ambition du projet consiste à lui rendre sa fonction de zone humide.

Présentation globale de l'opération

Superficie : 2 ha de zone humide intégrés dans un parc de 7 ha.

Objectif : Réalimenter une zone humide située au centre d'une ZAC pour gérer les eaux pluviales et en faire un lieu d'agrément et un réservoir de biodiversité.

Les composantes :

- gestion alternative des eaux pluviales dans les opérations d'aménagement ;
- création de zones de stockage des eaux pluviales ;
- création d'une mosaïque de milieux ;
- sensibilisation des riverains à la découverte de la nature.

Un effort pédagogique lors du montage du projet

Afin de convaincre l'ensemble des acteurs du projet, les personnes motrices au sein de la commune du Grand Charmont ont organisé des visites de projets similaires mis en œuvre dans d'autres villes.

L'agglomération de Montbéliard a ensuite fait l'acquisition des parcelles nécessaires au projet. La phase d'études et de concertation s'étend de 2002 à 2005 avec enquête publique et concertation auprès des habitants par le biais de réunions publiques.

6. DÉVELOPPEMENT DE TECHNIQUES ALTERNATIVES EN AMONT DE LA ZONE HUMIDE

Le rétablissement de la zone humide a reposé sur la réalimentation en eau de ce milieu. La réhabilitation des fonctions hydrauliques en amont de la zone résultent ainsi d'une part de l'interception de sources et des réseaux pluviaux et d'autre part de la rétention de l'eau par le biais des techniques alternatives. Le projet intègre ainsi la problématique de gestion des eaux pluviales pour l'ensemble des projets d'urbanisation du secteur : lotissements, zone artisanale.

Ces projets urbains bénéficient par exemple de chaussées poreuses qui permettent l'infiltration des eaux dans le sol. Ces systèmes retiennent la pollution chronique sur place et évitent sa concentration à l'exutoire. Des noues drainent les eaux des différentes zones urbaines ou à urbaniser jusqu'à la zone humide du parc des Jonchets. La quantité d'eaux de ruissellement issue de chaque quartier a été calculée pour dimensionner la zone humide afin qu'elle puisse recevoir l'ensemble des eaux pluviales de la ZAC.

FIGURE 217 COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION DU PAYS DE MONTBÉLIARD

FIGURE 218 COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION DU PAYS DE MONTBÉLIARD

Une première vocation de lieu de stockage des eaux pluviales

La zone humide comprend un espace de stockage des eaux pluviales de 17 000 m^3, ce qui correspond à une pluie d'occurrence décennale. De plus, en cas de pluie plus importante, l'intégralité du parc peut être inondé et faire tampon. La route sert alors de digue jusqu'à une surverse, sous la route, qui permet à l'eau d'être évacuée. En raison de la présence d'un lot dédié à une zone artisanale, un bassin de rétention des pollutions accidentelles a également été réalisé. Ce bassin est en réalité une mare équipée d'une vanne. Ce système rend possible le confinement d'une pollution éventuelle afin d'éviter qu'elle ne dégrade toute la zone humide.

Une gestion du parc dédiée au maintien de la biodiversité

Dans ce but, la gestion du site est réalisée par l'agglomération du Pays de Montbéliard sous forme de gestion différenciée sans recours aux pesticides. D'autre part, une gradation de la tonte est opérée en fonction des différents usages du site. Le cœur de la zone humide ne reçoit aucune gestion pour laisser la biodiversité s'installer naturellement.

Par ailleurs, la prolifération de la renouée du Japon, espèce invasive, nécessite un entretien par arrachages mécaniques. Des actions de régulation seront également entreprise afin de limiter la prolifération de typhas et éviter une perte de diversité parmi les hélophytes.

7. LES ENSEIGNEMENTS POSITIFS ET POINTS D'AMÉLIORATION

Un projet intégré dans une politique de gestion des eaux pluviales globale, avec une réflexion sur la gestion alternative des quartiers en développement.

Un aménagement où l'objectif n'est pas exclusivement technique mais où la préservation de la biodiversité et l'amélioration du cadre de vie ont été pris en compte au même niveau en amont du projet.

Un projet piloté de manière multi-partenariale (mixité inter-services, concertation, etc.).

8. DES PERSPECTIVES

- Développer un suivi écologique de la zone humide
- Développer un projet d'infrastructure verte et bleue intégrant la zone humide des Jonchets. Une étude a été menée par l'agglomération pour connecter cet espace à la vallée de la Lizaine par un corridor écologique.

POUR EN SAVOIR PLUS :

Cette fiche est un extrait de l'étude de cas du recueil d'expériences Zones Humides en milieu urbanisé en cours de réalisation, sous maîtrise d'ouvrage de la Direction de l'Eau et de la Biodiversité, piloté par le Certu avec l'appui des Centres d'études techniques de l'équipement (CETEs).

Concepteurs de l'étude de cas : C.Mucig (Cete de l'Est) / M.Saulais (Certu)

Opération nominée dans le cadre du Grand Prix "Zones humides en milieu urbanisé", 2011.

COUTS

Travaux sur la totalité du parc : 1.740.000 €
Coûts de gestion : Environ 20 000 €/an

LES ACTEURS

Maître d'ouvrage : Communauté d'agglomération de Montbéliard
Autres acteurs : Commune de Grand Charmont, Bureaux d'études Infraservice et ADU
Financeurs : Agence de l'eau, Conseil général

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

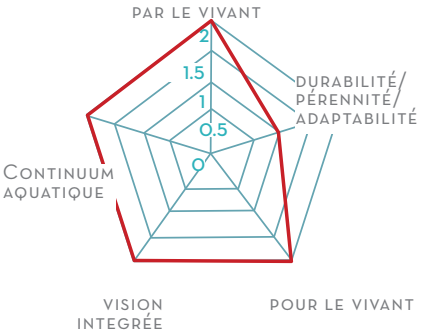


FIGURE 219

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN : SEINE NORMANDIE
RÉGION : ILE DE FRANCE
DÉPARTEMENT : SEINE ET MARNE
COMMUNES : COMBS-LA-VILLE, LIEUSAINT ET MOISSY-CRAMAYEL

FICHE 6

EPA Sénart - Gestion des eaux pluviales de l'Ecopôle (ZAC des portes de Sénart et ZAC du Charme)

ÉLÉMENTS DE CONTEXTE

Dans le cadre de la Ville Nouvelle de Sénart, l'Etablissement Public de Sénart (EPA Sénart) prévoit la création de l'Ecopole : un projet d'urbanisation pour l'accueil d'entreprises intervenant dans les domaines de l'industrie et du service liés à l'Environnement.
L'Ecopole sera développé sous la forme de deux ZAC sur les communes de Combs-la-Ville, Lieusaint, Moissy-Cramayel en Seine et Marne. Les deux Zones d'Aménagement Concerté (ZAC des Portes de Sénart et ZAC du Charme) forment un ensemble de 180 ha, occupés aujourd'hui par des terres agricoles drainées. Cette occupation des sols a réduit fortement la valeur écologique des terrains.
En effet, malgré la présence de zones humides « hydrologiques », l'activité agricole et le drainage des terrains ne permettent pas l'installation et l'expression des fonctionnalités des zones humides.

Seule la partie sud du périmètre de la ZAC du Charme présente une aire à grands enjeux écologiques. Cette zone de 57 ha représente 52% de la surface de la ZAC du Charme.

Conformément au Code de l'Environnement, EPA Sénart a mis en place des mesures d'évitement et de compensation pour tenir compte de la destruction des zones humides hydrologiques occasionnée par la création des deux ZAC. Le projet a ainsi prévu :

- d'éviter toute construction dans une partie de la zone humide hydrologique identifiée ;
- de créer de nouvelles zones humides par une conception adaptée du système de collecte et de régulation des eaux de pluie ;
- de restaurer l'ancienne zone humide (ancienne ZNIEFF de la Motte), aujourd'hui en net recul et fortement dégradée et ses abords en cours de dessèchement, soit 35 ha.

Situation de l'Ecopole et repérage des secteurs à enjeux écologiques

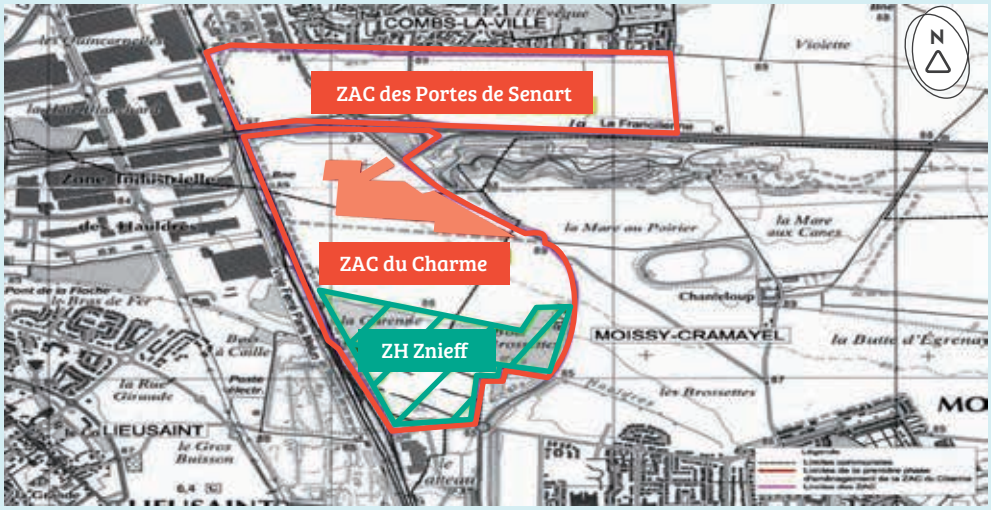


FIGURE 220

2. LES MESURES D'ACCOMPAGNEMENT À L'INSTALLATION DES ZAC

a. Gestion des eaux pluviales

Réseau d'eaux pluviales

Pour la gestion des eaux pluviales, différentes solutions ont été étudiées, l'objectif étant de proposer un système en cohérence avec la topographie du site, avec les enjeux naturalistes et avec les besoins de l'urbanisation. Il s'agissait de limiter l'impact de l'urbanisation sur les zones humides en orientant le projet vers des choix écologiques et paysagers qui s'appuient sur l'élément aquatique.

La solution retenue prévoit une régulation à deux niveaux afin d'éviter les concentrations des flux :

- un premier niveau de stockage « à la parcelle » de toutes les eaux (toitures et parkings) pour les lots supérieurs à 3 ha (dimensionnement pour une pluie d'occurrence décennale) et des eaux des toitures

uniquement pour les lots inférieurs à 3 ha (pour une pluie d'occurrence annuelle) ;
• un second niveau de stockage « de complément » le long de l'Autoroute A104 (la Francilienne), de la RD 57 et entre deux bois (la Garenne et les Brossettes). Il est dimensionné pour intégrer un événement pluvieux d'occurrence centennale et toutes les eaux provenant des parties privées et publiques.

Le parcours de l'eau, défini en premier lieu, a conditionné l'organisation et la distribution des lots. L'eau est mise en scène dans des bassins éco-paysagers et des aires publiques de rétention assurant la régulation des eaux pluviales. Les espaces libres (verts), généralement à vocation d'agrément sont ici dédiés à des usages multiples, créant un maillage de milieux connectés les uns entre les autres. Ils se situent principalement aux points bas du site afin de récupérer les eaux pluviales et de contribuer à l'alimentation des zones humides, à l'enrichissement écologique et à la recharge des aquifères. La priorité a donc été donnée à la limitation de l'imperméabilisation des sols et à l'infiltration des eaux de pluie malgré la nature peu favorable des sols.

Principe de gestion des eaux pluviales

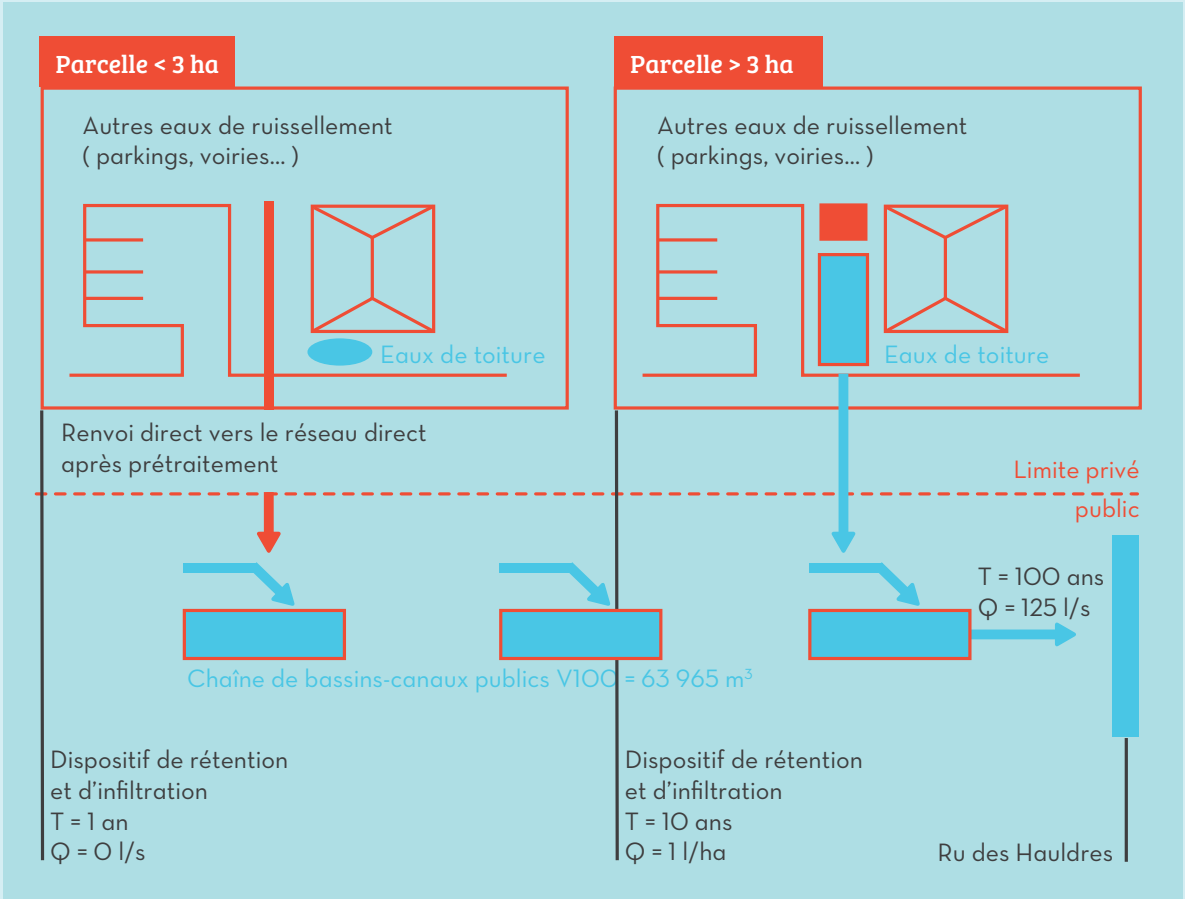


FIGURE 221

Conception d'une aire d'inondation-exondation

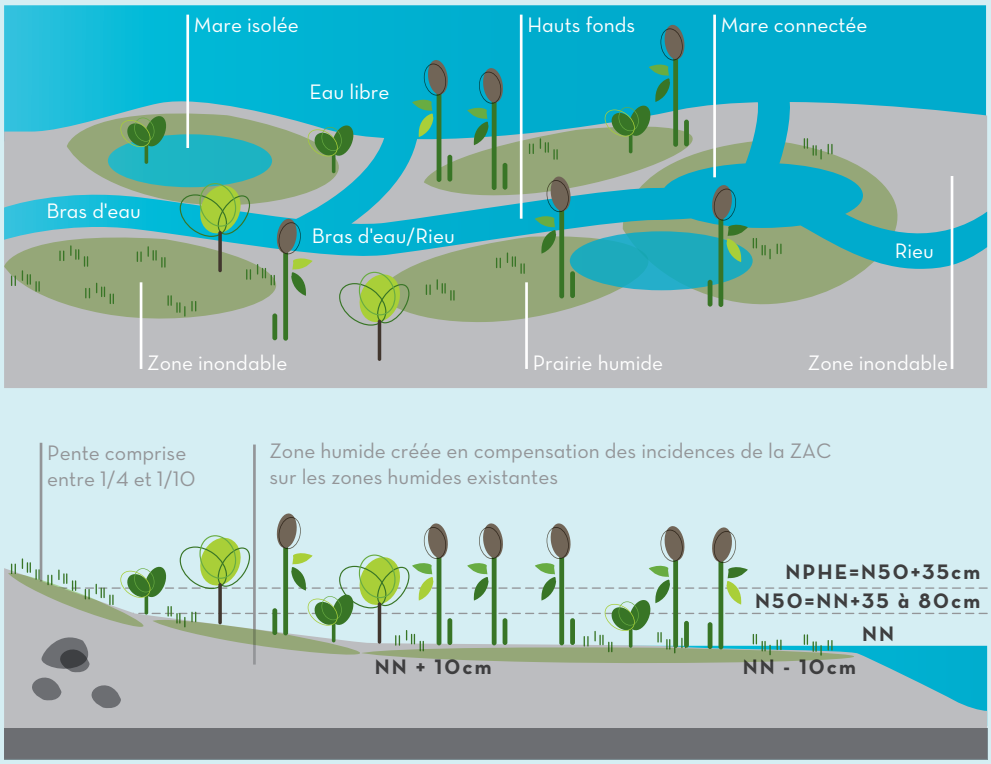


FIGURE 222

EPA SÉNART – CONFLUENCES ING. CONSEIL

Mares et dépressions humides

En cas de montée de l'eau, les aires de rétention alimentent des mares et des petites dépressions humides annexées. L'eau s'infiltre progressivement depuis les fonds de ces espaces pour alimenter les zones humides et recharger les nappes : 75% des volumes recueillis dans ces micro-milieux s'infiltrent. Ces aménagements permettent également l'installation de milieux écologiques favorables à plusieurs espèces de végétaux et d'animaux.

Pour faciliter la compréhension du projet, des visites de sites équivalents ont été organisées. Elles ont permis au maître d'ouvrage d'appréhender les enjeux liés à la gestion et l'exploitation de tels dispositifs. Ces visites ont permis au maître d'ouvrage de se rendre compte sur le terrain du rendu de son projet et de recueillir l'avis de l'exploitant sur les éventuelles nuisances ou problèmes de gestion. Les élus et les représentants techniques des communes ont ainsi été très impliqués dans le choix de la solution technique car ils devaient s'approprier suffisamment le projet pour mieux le gérer ultérieurement. En effet, une fois les terrains cédés aux acquéreurs par EPA Sénart, les communes doivent pouvoir établir le dialogue avec les acquéreurs et être en capacité d'entretenir les espaces naturels selon les principes de la gestion établis lors de la conception et dans le respect de la charte de développement durable des parcs d'activités de Sénart. Les enjeux de gestion ont donc été intégrés au projet et un plan de gestion différenciée a été défini.

b. Restauration de l'ancienne ZNIEFF de la Motte

L'extrémité sud de la ZAC du Charme est occupée par l'emprise de l'ancienne ZNIEFF dite de la Motte. Il s'agit de l'aire d'un bassin de décantation de la sucrerie de Lieusaint qui a cessé son activité en 1986.

En 1993, l'apparition d'une végétation pionnière des vases exondés (Chénopode rouge, Scirpe maritime, etc.), d'oiseaux limicoles (Canard souchet, Petit gravelot) a entraîné le classement du site en ZNIEFF. Le site s'est ensuite asséché progressivement dans les années 2000 et les espèces déterminantes de la ZNIEFF ont fortement régressé.

Pour la compensation de l'impact de l'Ecopole par la destruction des zones humides, EPA Sénart a proposé la restauration de l'ancienne ZNIEFF en l'inscrivant dans un continuum écologique nord-sud et est-ouest.

Le principe retenu consiste à conserver la végétation pionnière existante et à procéder à des travaux de terrassement pour recréer des milieux humides et saturés en eau. Pour permettre la découverte et les observations des milieux, les collectivités ont souhaité que soit réalisé un cheminement sécurisé pour les piétons. Dans un contexte de milieu urbain et péri-urbain, les communes ont également souhaité pouvoir contrôler les accès et éviter la multiplication des milieux boisés et fermés. Les collectivités ont par ailleurs insisté sur la nécessité de maîtriser les coûts d'exploitation.

Projet de restauration de la ZNIEFF de la Motte – Extrait du plan masse

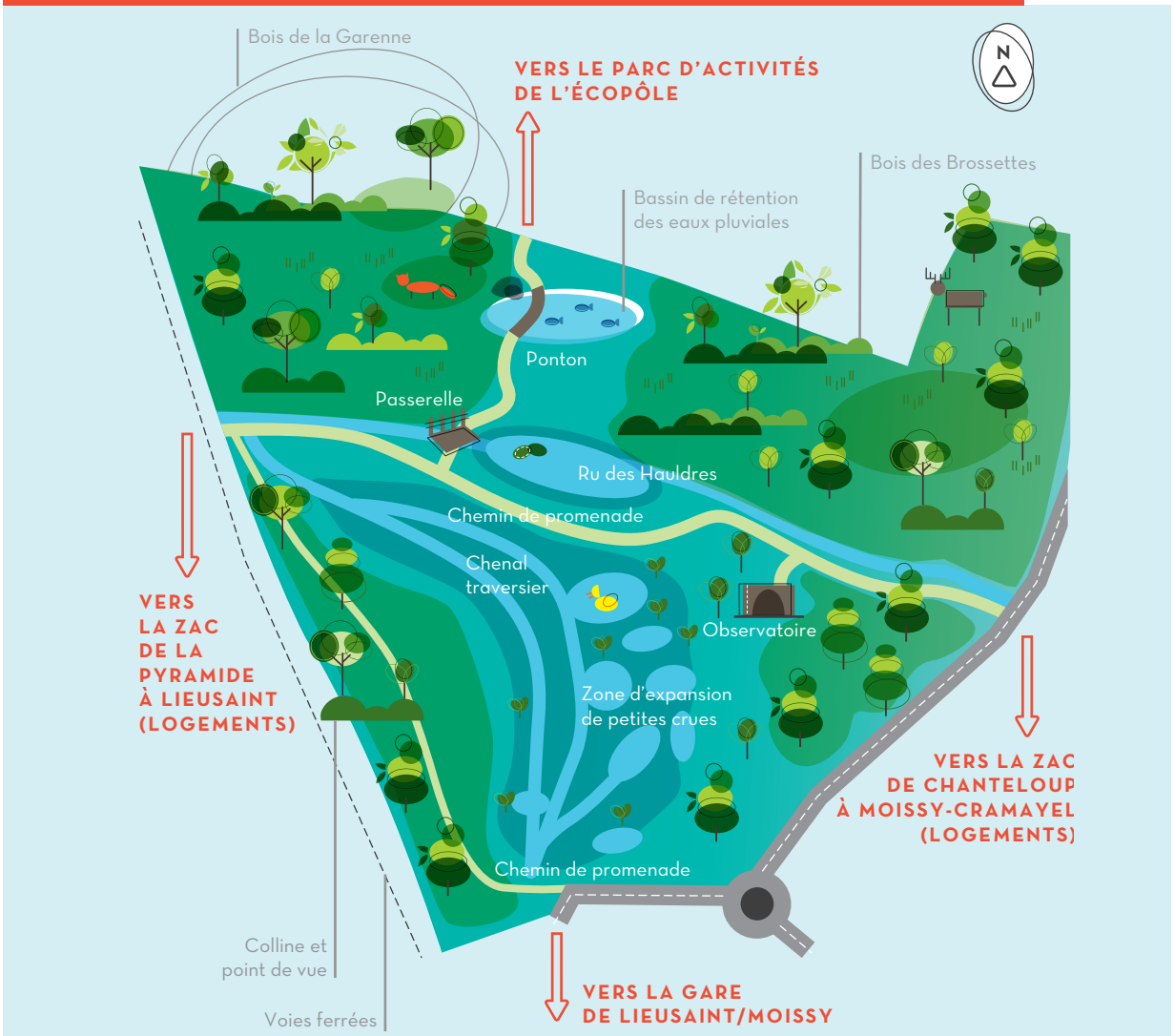


FIGURE 223

EPA SÉNART – CONFLUENCES ING. CONSEIL

PROJET DE RESTAURATION DE LA ZNIEFF DE LA MOTTE – PROFIL EN LONG SIMPLIFIÉ

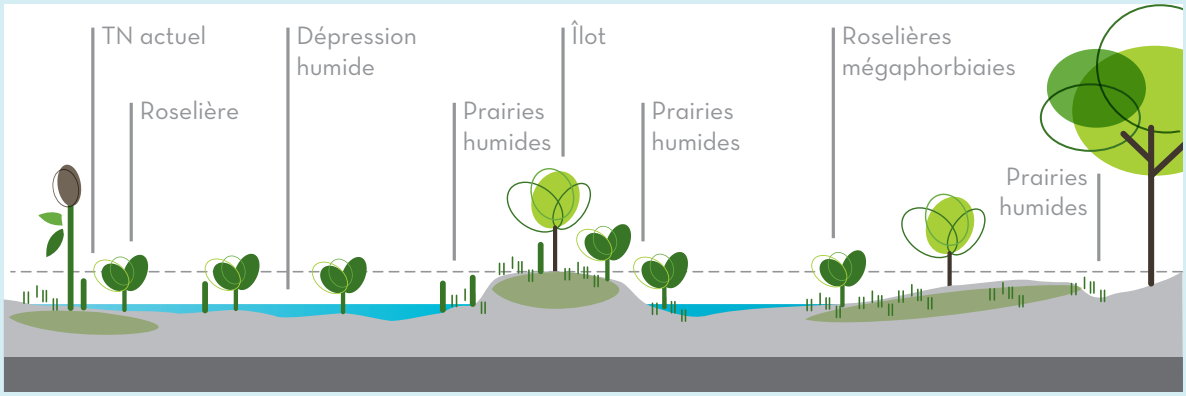


FIGURE 224

EPA SÉNART – CONFLUENCES ING. CONSEIL

3. RÉALISATION DES TRAVAUX

Les travaux du système de gestion des eaux pluviales et de restauration de la ZNIEFF ont débuté à l'automne 2012.

Des points d'accès des engins au chantier ont été définis pour éviter tout risque de dégradation des végétaux et des sols. L'objectif était de conserver la banque de graines.

4. GESTION DU SITE

Les noues de collecte des eaux de ruissellement seront gérées par les communes ; les bassins-canaux et bassins publics seront gérés par le Syndicat d'Agglomération Nouvelle (SAN de Sénart) qui assure l'exploitation d'autres ouvrages de régulation des eaux pluviales de la Ville Nouvelle. L'entretien des parties du système d'assainissement des eaux pluviales situées au niveau des parcelles sera assuré par les propriétaires privés. La gestion du site de l'ancienne ZNIEFF de la Motte sera assurée par la commune de Lieusaint.

GOUVERNANCE

Maître d'ouvrage: EPA Sénart
Maîtres d'œuvres : Confluences Ing. Conseil (dossier de demande d'autorisation) + SAFEGE + Atelier Cépage (restauration de la ZNIEFF)

Couts
Travaux estimés à :
•3,3 M€ HT pour les infrastructures structurantes de gestion de l'eau de pluie
•2,2 M€ HT pour la restauration de la ZNIEFF de la Motte et de ses abords (qui comprennent des travaux pour la fréquentation maîtrisée du public
- 82 000 €/an pour les suivis.

6

AMÉLIORATION DU CADRE DE VIE ET DÉVELOPPEMENT DES USAGES LIÉS À L'EAU

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

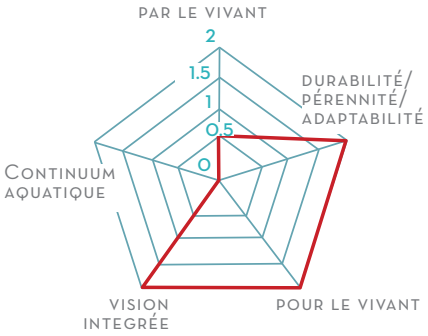


FIGURE 225

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN: SEINE-NORMANDIE
RÉGION: HAUTE NORMANDIE
DÉPARTEMENT: SEINE MARITIME
COMMUNE: YVILLE/SEINE

FICHE 1

Les tas dans les trous : recréation de zones humides

L'estuaire de la Seine s'étend de Poses jusqu'au Havre. Il est caractérisé par une mosaïque de milieux humides et forme un ensemble écologique d'importance à l'échelle européenne. Cependant, son fonctionnement écologique est impacté par la présence de vastes complexes industriels.

La plaine alluviale des boucles de la Seine est le lieu d'une importante activité d'extraction de granulats qui impacte, entre autre, les marais alluvionnaires, sur le plan écologique et paysager. A la fin de l'activité d'extraction, le site est habituellement réaménagé en plan d'eau. En 1998, le remblaiement des ballastières a été inscrit comme un objectif prioritaire dans le Schéma Départemental des carrières. Les carriers avaient donc l'obligation de trouver des solutions alternatives aux plans d'eau pour pouvoir continuer leur exploitation.

Parallèlement, le chenal de navigation de l'estuaire de la Seine nécessite des dragages d'entretien réguliers pour garantir la sécurité de la navigation et permettre aux navires d'accéder aux terminaux portuaires jusqu'à Rouen. Les matériaux dragués sont traditionnellement déposés à terre dans des chambres de dépôt (casiers) en bordure du fleuve.

Principe de fonctionnement d'une chambre de dépôt de sédiments de dragage

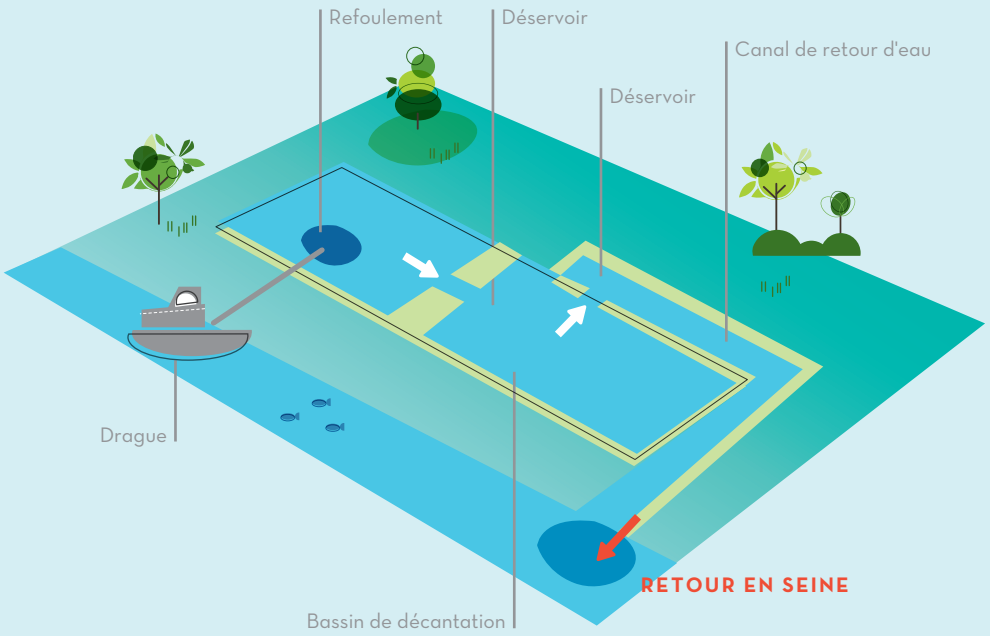


FIGURE 226

GPMR

Localisation des sites de dépôt (état des lieux 2006)

FIGURE 227

GPMR

Les sites de dépôt sont répartis le long de la Seine : 16 sites de dépôt ont été recensés entre Rouen et Tancarville couvrant de 2 à 50 hectares chacun et offrant une capacité de stockage qui varie de 80 000 m^3 à 1,6 millions m^3. Cependant, ces chambres de dépôt ont une capacité d'accueil aujourd'hui limitée.

Au début des années 90, la pression foncière devenait de plus en plus importante et le port rencontrait des problèmes d'acceptabilité vis-à-vis des riverains. De plus, l'ensemble des terrains étant classés en zones humides, la création de nouvelles chambres de dépôt aurait entrainé la destruction d'une partie de ces zones humides. Dans ce contexte, le Grand Port Maritime de Rouen a travaillé en concertation avec le Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande et les services de l'Etat pour trouver des solutions alternatives au stockage traditionnel des sédiments en chambre de dépôt à terre. Une étude a été menée sur les possibilités technico-économiques de valorisation des matériaux en partenariat avec le laboratoire régional des Ponts-et-Chaussées (LRPC) de Rouen ainsi que sur l'évaluation des modalités de valorisation, en partenariat avec l'union nationale des industries de carrières et matériaux de construction (UNICEM). L'étude a notamment évalué la faisabilité de l'utilisation des sédiments de dragage limoneux (argiles et sables fins), non valorisables dans le BTP, comme matériaux de remblaiement des ballastières issues de l'extraction alluvionnaire. Suite à cette étude, le port a obtenu l'autorisation préfectorale prise au titre de la Loi sur l'eau en 1999 pour remblayer l'étang d'Yville aménagé après l'exploitation des carriers. Ce projet expérimental a été mené en collaboration avec les Carrières et Ballastières de Normandie et la commune d'Yville-sur-Seine.

Ballastière d'Yville/seine

FIGURE 228 P. BOULEN

L'ensemble des acteurs (carriers, Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande, Port et Etat) portait donc ce projet de remblaiement de ballastières par les sédiments de dragage. L'objectif sur le site d'Yville était de restituer des milieux humides (prairie, roselières), en synergie avec l'étude de reconquête paysagère de la boucle d'Anneville conduite par le Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande. Cette opération pilote a été inscrite dans la Charte du Parc sur la période 2001-2011 et dans le schéma départemental des carrières.

1 PRINCIPE DE L'OPÉRATION DE REMBLAIEMENT

Les sédiments de la zone portuaire amont de Rouen ont été dragués à l'aide d'une drague aspiratrice. Une fois extraits du lit de la rivière, les sédiments stockés dans le puit de la drague ont été transportés jusqu'au site d'Yville, localisé à 42 km de Rouen. Les sédiments contenus dans la drague aspiratrice ont été refoulés hydrauliquement dans une conduite rigide, après apport d'eau complémentaire pour que la dilution de la mixture permette de franchir la distance, d'environ 1 200 m, entre l'appontement le long de la berge et la ballastière. Les sédiments transportés dans la conduite, sous la forme d'une mixture "eau-sédiment" constituée d'environ 90 % d'eau, se sont déversés ensuite dans le plan d'eau où ils se sont déposés par gravité. Une canalisation de retour d'eau ainsi qu'un système de pompage ont permis d'assurer le renvoi dans la Seine du surplus d'eau. Ce système de pompage a également été utilisé avant les opérations de refoulement pour mettre en dépression la ballastière par rapport à la nappe environnante. Cette mesure de précaution a servi à prévenir un éventuel transfert de contaminants de la ballastière vers la nappe.

PRINCIPE DE L'OPÉRATION DE REMBLAIEMENT

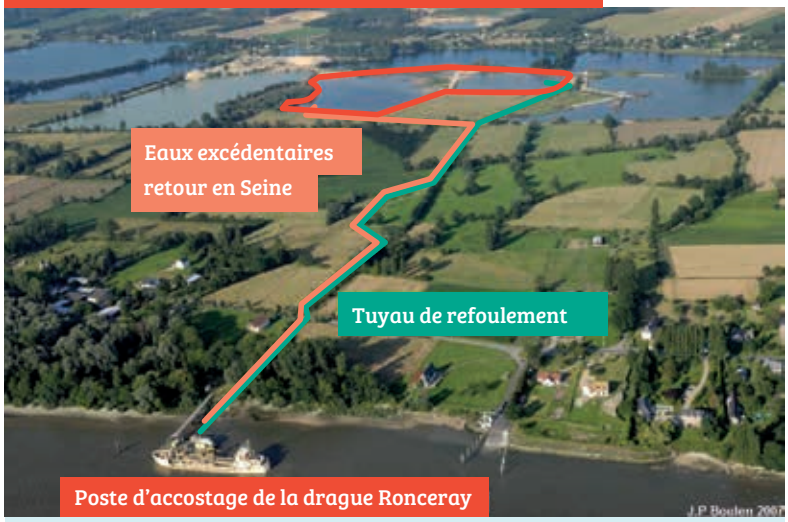


FIGURE 229 GPMR

De même, les sédiments de dragage utilisés pour le remblaiement de la ballastière ont fait l'objet de suivis qualitatifs et quantitatifs réguliers avant leur dépôt en ballastière. Les paramètres suivis ont été :

- les métaux lourds ;
- les PCB (Polychlorobiphényles) ;
- les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques).

Des suivis sur les niveaux d'eau (piézomètrie) et sur la qualité chimique des eaux superficielles et souterraines ont été menés afin d'évaluer l'impact du remblaiement sur la nappe (prélèvements d'eau réguliers et mise en place de sondes de niveau d'eau et de sondes physico-chimiques assurant un suivi en continu).

2. RÉAMÉNAGEMENT DU SITE EN HABITATS TOURBEUX

Le Grand Port Maritime de Rouen a constitué un groupe de travail en 2007 afin de réfléchir au réaménagement du site et à son suivi. Ce groupe était composé de la mairie d'Yville-sur-Seine, du Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande, de la Carrière et Ballastière de Normandie (CBN), du service de la Police de l'Eau, de la DREAL, d'un hydrogéologue agréé et de l'Association de Protection de la presqu'île d'Anneville. Les réflexions du groupe ont abouti à la proposition d'un réaménagement écologique composé de trois types d'habitats tourbeux :

- une prairie humide ;
- une mégaphorbiaie ;
- un plan d'eau permanent de faible profondeur.

Schéma du principe de réaménagement de la ballastière

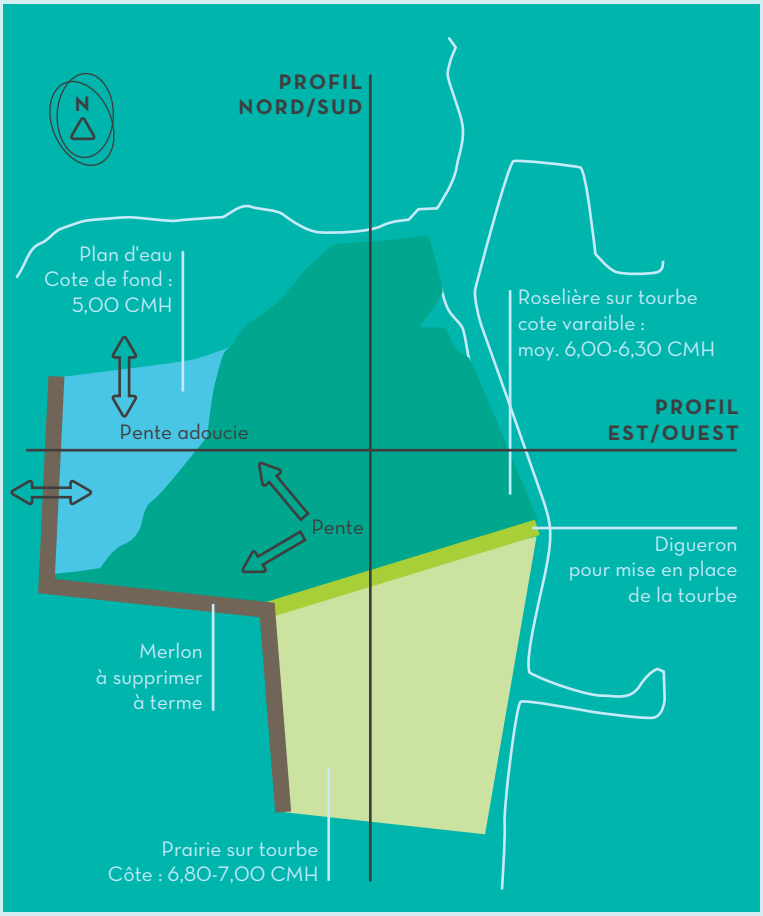


FIGURE 230 GPMR

3. UN REMBLAIEMENT QUI A DURÉ 5 ANS...

Les travaux de remblaiement ont commencé au printemps 2000, ils se sont interrompus en 2003 et 2004 et se sont terminés en janvier 2008. Des analyses ont été menées à mi-parcours afin de valider l'expérimentation sur le plan hydrogéologique et permettre au carrier de poursuivre son exploitation sur les casiers voisins. Au final, 1 million de m^3 de sédiments ont été nécessaires pour combler les 8 m de profondeur du plan d'eau s'étendant sur 11 ha. A la fin du comblement, le site a été recouvert de tourbe et géré de la façon suivante :

Mégaphorbaie sur tourbe

Le site a été recouvert de tourbe apportée par voie hydraulique en février 2008.

Plan d'eau permanent de faible profondeur

Le site a été recouvert de tourbe apportée par voie hydraulique puis un contrôle bathymétrique a été réalisé pour vérifier le niveau de fond du plan d'eau en novembre 2008. Afin d'atteindre les côtes définies dans le cadre du réaménagement, de nouveaux apports de tourbe ont été effectués fin 2008, suivi d'un autre contrôle du niveau de fond du plan d'eau par un relevé bathymétrique.

Prairie sur tourbe

Un digueron de sable a d'abord été réalisé entre la prairie et la mégaphorbaie pour maintenir la tourbe apportée. Entre l'été et l'hiver 2007, la tourbe a été déposée sur une épaisseur comprise entre 40 et 80 cm. La prairie étant destinée à accueillir du pâturage, une clôture a ensuite été installée. Enfin, la cote finale de la prairie a été contrôlée par un levé topographique.

4. DES SUIVIS APPROFONDIS

Des suivis écologiques sont réalisés par le Grand Port Maritime de Rouen en partenariat avec l'Université de Rouen (Laboratoire ECODIV) et le Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande durant une période de 5 ans. Les suivis ont démarré courant 2008.

L'objectif de ces suivis est d'évaluer les fonctions restaurées et les services écosystémiques associés (biodiversité, stockage de carbone, rôle épurateur). Le laboratoire ECODIV de l'Université de Rouen a suivi la recolonisation de la prairie humide tourbeuse par les végétaux et la faune en comparaison avec les prairies de référence. Ils ont mené des travaux de recherche et de compréhension sur les compartiments suivants :

- le sol : caractérisation morphologique et physico-chimique, fonctionnement ;
- la végétation : suivi de la diversité et de la productivité, étude de la dynamique de recolonisation naturelle et expérimentations de colonisation « forcée » ;
- la faune : macrofaune et mésofaune du sol.

Le potentiel de recolonisation du site par les insectes (Carabidae, Orthoptéroïdes et Odonates), et la comparaison avec les prairies de référence notamment en termes de richesse spécifique ont été effectués par le Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande. Il a également assuré le suivi des oiseaux et des macro-hydrophytes sur le plan d'eau de faible profondeur.

CHEVAUX CAMARGAIS DANS LA PRAIRIE RECRÉÉE

FIGURE 231 P. BOULEN

Les suivis effectués par le Grand Port Maritime de Rouen concernent :

- la topographie du site et la bathymétrie du plan d'eau ;
- la hauteur d'eau et la qualité chimique de la nappe souterraine ;
- la hauteur d'eau et la qualité chimique du plan d'eau :
- la faune piscicole.

De nombreuses espèces pionnières sont venues coloniser la prairie la première année (132 espèces). Ce nombre a diminué les années suivantes et 70 espèces ont été observées en 2010. Pour comparaison, les prairies voisines prises comme référence comptent 5-6 espèces.

Concernant le plan d'eau, les résultats sont mitigés pour les hydrophytes liés à la qualité de l'eau eutrophe, mais sont très positifs pour les oiseaux avec la présence de nombreux limicoles du fait de la faible profondeur du plan d'eau, comparé aux autres plans d'eau très profonds de la boucle d'Anneville. La jussie s'est également implantée sur le site.

Pour le moment, le Grand Port Maritime de Rouen souhaite continuer les suivis scientifiques et laisser du temps au milieu pour se stabiliser.

5. MESURES DE GESTION

Afin de favoriser la biodiversité en maintenant un milieu ouvert, des chevaux camarguais ont été installés sur la praire en 2010. Les chevaux ont été acquis par le Grand Port Maritime de Rouen et leur surveillance est assurée par les riverains et la mairie d'Yville-sur-Seine dans le cadre d'une convention.

POUR EN SAVOIR PLUS

www.rouen.port.fr

GOUVERNANCE

Maître d'ouvrage: Grand Port Maritime de Rouen

Maître d'œuvre: Grand Port Maritime de Rouen

Partenariat avec : le Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande. En collaboration avec : les Carrières et Ballastières de Normandie et la commune d'Yville-sur-Seine.

Coûts :

2000-2009 : 7 millions d'euros HT (sur 10 ans) dont 15% dédié au suivi environnemental.

Financement

Fonds Européen de Développement Régional
Agence de l'eau Seine-Normandie

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

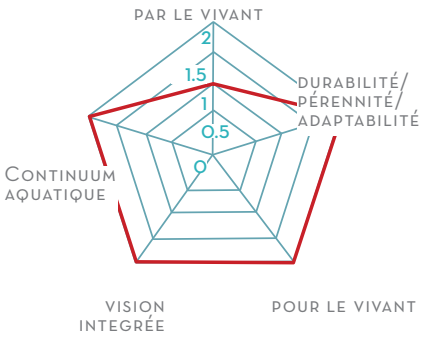


FIGURE 232

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN: RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE
RÉGION: RHÔNE-ALPES
DÉPARTEMENT: RHÔNE/AIN
COMMUNE: AGGLOMÉRATION LYONNAISE

FICHE **2**

Grand Parc Miribel Jonage

L'ÎLE

L'île de Miribel-Jonage se situe sur un tronçon du Rhône séparé en deux canaux. Au nord de l'île, le canal de Miribel a été creusé entre 1848 et 1857 pour améliorer les conditions de navigation. Au sud, le canal de Jonage a été aménagé entre 1892 à 1899, support de l'aménagement hydroélectrique de la chute de Cusset exploité aujourd'hui par EDF. L'île, qui était jusqu'alors une zone de tressage du fleuve, va progressivement s'assécher et devenir un territoire de projets. C'est à partir des années 1960 que la maîtrise du fleuve va permettre d'exploiter les atouts du site (3 000 ha non urbanisés aux portes de l'agglomération, une eau souterraine abondante et pure, un paysage agréable).

AMÉNAGEMENTS ET COURS D'EAU ACTUELS

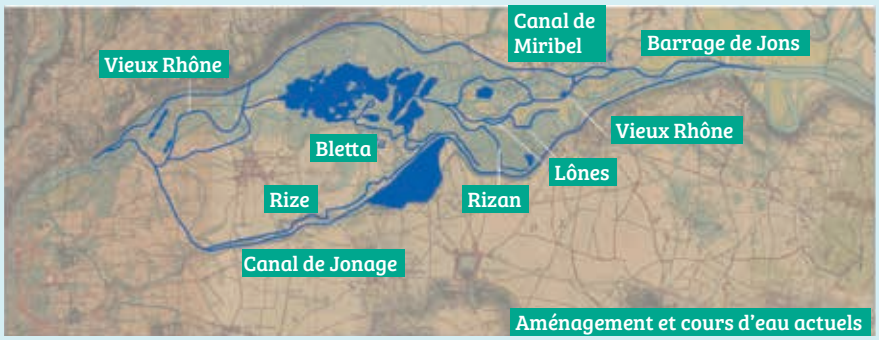


FIGURE 233

LE PARC

Le Grand Parc Miribel Jonage est un des plus importants parcs périurbains en Europe. Il occupe un espace de 2 200 ha situé au nord de l'agglomération lyonnaise en limite de 2 départements : l'Ain et le Rhône. C'est un espace naturel riche, classé ZNIEFF et Natura 2 000, qui accueille quatre millions de visiteurs par an. Cet espace public non urbanisé est classé inaltérable depuis 1992 et assure 4 fonctions essentielles :

- un réservoir d'eau potable pour l'agglomération lyonnaise ;
- un champ d'expansion des crues du Rhône ;
- un espace naturel à préserver et valoriser ;
- un lieu de détente et de loisirs de plein air.

D'autres activités (agriculture, sylviculture et extraction de granulats), secondaires, sont également présentes sur le site.

Le Grand Parc et l'île de Miribel Jonage

FIGURE 234

LES FONCTIONS DU PARC

Un réservoir d'eau potable

Le site concentre à lui seul les 2/3 des prélèvements destinés à l'eau potable dans la nappe alluviale du Rhône soit près de 100 millions de m^3 d'eau qui alimente chaque année près de 1.5 millions de personnes.

Un champ d'expansion de crues du Rhône

Par la loi de 1958, l'île est définie comme une Zone d'Expansion des Crues du Rhône. L'objectif est de limiter les dégâts dus aux inondations des lieux habités en aval et sur l'agglomération lyonnaise en particulier.

Un espace naturel à préserver et valoriser

L'aménagement du fleuve par les 2 canaux, puis la création de plans d'eau par extraction de granulats sur l'île, ont profondément modifié le fonctionnement naturel du fleuve et l'expression de ses potentialités écologiques : abaissement de la nappe, assèchement de la ripisylve et des lônes, disparition de milieux et d'espèces caractéristiques de la géographie fluviale du territoire.

Dès les années 1990, élus, naturalistes, scientifiques et gestionnaires se mobilisent pour la préservation de la qualité patrimoniale du fleuve. Un programme européen de restauration des milieux naturels (LIFE Environnement) est lancé en 1996. Ce programme permet alors d'expérimenter de nouvelles techniques de renaturation hydraulique et écologique du site tout en favorisant sa découverte par le public. La presqu'île des Grands Vernes en est l'exemple le plus marquant : la renaturation entreprise a porté ses fruits. Le site est devenu un milieu naturel d'exception, mais aussi un lieu d'observations naturalistes qui a permis de développer de nouvelles approches de sensibilisation du public aux enjeux patrimoniaux.

Un lieu de détente et de loisirs de plein air

Le Grand Parc Miribel Jonage accueille aujourd'hui environ **4 millions de personnes par an** qui y viennent pour la baignade, le sport, la nature, la promenade à pied ou à vélo, la pêche, la chasse, etc. La fréquentation y est importante en particulier en saison estivale, où les pointes journalières peuvent dépasser **40 000 personnes / jour.**

D'accès libre et gratuit (en dehors de l'espace multisports), le Grand Parc a ainsi une **vocation sociale tout à fait essentielle** pour les populations de l'agglomération lyonnaise, notamment les habitants des quartiers populaires des communes riveraines. Il est un espace de respiration et de régulation pour ces populations urbaines et représente un acteur à part entière de la politique de la ville. A ce titre, il fait l'objet d'un contrat urbain de cohésion sociale lui permettant de mener des actions dans le domaine de l'éducation à l'environnement, de la culture, des loisirs, du sport, de la santé, de l'emploi ou de la prévention de la délinquance. Il dispose également d'un contrat local de sécurité interdépartemental (Ain et Rhône) qui assure une meilleure coordination et concertation des acteurs en charge de la sécurité présents sur le parc (police, gendarmerie, pompiers, etc.).

Le site des Grand Vernes

FIGURE 235 THOMAS MANILLIER - ABI/ABO

UN MODE DE GOUVERNANCE ORIGINAL

SYMALIM / SEGAPAL : la complémentarité des missions

Le parc est la propriété depuis 1968 du syndicat mixte pour l'aménagement et la gestion du Grand Parc Miribel Jonage, le SYMALIM, composé de16 collectivités. Le SYMALIM a confié l'exploitation du Grand Parc à un régisseur, la SEGAPAL, dans le cadre d'une délégation de service public.

La SEGAPAL, aujourd'hui Société Publique Locale pour la gestion des espaces publics du Rhône amont, est donc délégataire du SYMALIM. Composée de 70 salariés permanents et d'une cinquantaine de saisonniers, elle assure la gestion, l'aménagement et l'animation du Grand Parc : études, travaux, entretien-propreté, animation nature, sportive, artistique et culturelle, surveillance, médiation, communication, etc.

Une gestion unique

La gestion du parc doit intégrer les aspects environnementaux, économiques et sociaux, en réponse à ses 4 fonctions principales. Il n'y a pas de superposition de gestionnaires, tous ces aspects sont gérés en interne et au quotidien par la SEGAPAL qui dispose d'une équipe pluridisciplinaire intégrant notamment des chargés de mission de la politique de la ville, de la politique de l'eau et de la politique de l'environnement. Ce mode de gestion unique est particulièrement adapté à la dynamique de ce territoire en constante évolution et en voie de métropolisation.

Une gestion concertée

En 2003, une démarche de concertation est mise en place avec le grand public pour élaborer un plan directeur pour les années 2005-2015. La réflexion a porté sur les objectifs à satisfaire dans les 3, 6 ou 10 ans, les actions à conduire, mais aussi le dispositif de suivi et d'évaluation. Une dizaine de réunions publiques et de rencontres avec les communes périphériques, accessibles à tous ont été organisées pour réfléchir à la construction et à l'avenir du parc. Une restitution des questions, remarques et propositions émises lors de la concertation a été faite à tous les partenaires en 2005. Le plan directeur a finalement été signé en 2006. Le plan directeur vise une gestion durable et concertée du parc, qui intègre les contraintes hydrauliques, écologiques, économiques et sociales. Il définit les grandes lignes de la politique du parc mais il ne fige rien. Le syndicat se trouvant aux confins de plusieurs politiques, sa gouvernance est sans cesse en mouvement.

Une gestion différenciée

Le parc est divisé en 3 parties, gérées de façon différenciée.

La partie ouest est un espace de loisirs à forte fréquentation. Elle est aménagée et entretenue pour le pique nique, la baignade, la pratique de sports nautiques. Quatre plages sont surveillées, les pelouses sont tondues et un chemin de randonné permet la promenade autour du lac. Des œuvres d'art et des manifestations culturelles se développent sur cette partie du site.

La plage du Morlet

FIGURE 236 NOËLLIE POUDREL - ABI/ABO

La partie centrale est un espace nature dédié à la sensibilisation du public. Cette partie du parc joue un rôle important pour la pédagogie et l'éveil aux enjeux de la préservation et de la valorisation des espaces naturels. Un centre d'interprétation « eau et nature » « l'îloz' », situé au cœur des jardins pédagogiques du parc, ouvrira ses portes en 2014.

Animation « pêche nature »

FIGURE 237 NOËLLIE POUDREL - ABI/ABO

La partie est est un espace à dominante naturelle et agricole, accessible à un public de randonneurs. 400 hectares de terrain sont loués à des agriculteurs qui ont adhéré à la charte agricole du Grand Parc et mettent progressivement en œuvre les pratiques de l'agriculture biologique (40 % des terres agricoles sont actuellement cultivées en « bio ») : miel, huile de chanvre, etc. sont aujourd'hui valorisés : ce sont les « saveurs du Grand Parc ». Sur ce secteur, les pelouses sèches sont entretenues par pâturage.

Entretien des pelouses sèches par pâturage

FIGURE 238 PIERRE JOUBERT - SEGAPAL

Enfin, une équipe de gardes – médiateurs est en contact permanent avec les publics et veille au respect et au maintien de l'équilibre des 4 fonctions du Parc.
Le zonage n'est pas marqué à l'intérieur du site : les transitions sont douces passant progressivement d'espaces de loisirs, à des espaces de nature. L'accès aux véhicules motorisés est limité aux abords du parc ; le site est notamment accessible à vélo depuis Lyon par la « Via Rhôna » ou les pistes modes doux de l'Anneau Bleu qui longent le canal de Jonage.

ENJEUX ACTUELS ET FUTURS

Le maintien d'un bon fonctionnement hydraulique, la préservation des milieux naturels et l'amélioration des conditions d'accueil et de sensibilisation du public sont toujours d'actualité.
Il s'agit aujourd'hui :

- de concilier les besoins et les attentes de chacun des acteurs dans l'intérêt général ;
- de créer le dialogue et la concertation avec les acteurs et les usagers ;
- de faire de cet espace un territoire de vie harmonieux et sécurisé.

Au niveau hydroécologique, un projet est en cours de définition dans le cadre du Plan Rhône. Il s'agit de répondre aux 4 fonctions du site en revitalisant le lit principal du Rhône que représente aujourd'hui le canal de Miribel et ses lônes : élargissements du lit, reprofilage des berges, recharge en sédiments, retrait d'enrochements, remise en eau et reconnexion d'annexes fluviales sont en projet.

En avant-première à ce projet, la continuité écologique piscicole a été restaurée sur le fleuve.

La rivière artificielle de Jons

FIGURE 239 CATHERINE PETIT - SEGAPAL

RESTAURATION DE LA CONTINUITÉ ÉCOLOGIQUE PISCICOLE ENTRE LE CANAL DE MIRIBEL ET LE RHÔNE AMONT

Le barrage de Jons a été construit entre 1934 et 1937 au niveau de la division entre le canal de Jonage et le canal de Miribel. L'objectif de sa construction était de détourner une partie des eaux du Rhône sur le canal de Jonage afin d'en augmenter le débit pour alimenter la centrale hydroélectrique de Cusset. Cette centrale produit chaque année 415 millions de kWh soit la consommation électrique domestique de 125 000 habitants.

Lors du renouvellement de la concession de la chute de Cusset en 2002, EDF s'est engagée à réaliser une passe à poissons permettant de contourner le barrage de Jons. Cette opération rétablit la libre circulation des poissons entre le canal Miribel et le Rhône en amont, en réponse aux objectifs du SDAGE de 2009 et aux objectifs de Natura 2000. La passe à poissons a pris la forme d'une rivière composée d'une succession de 32 bassins sur un dénivelé total de 6m entre les canaux de Miribel et de Jonage. Elle mesure 300 m de longueur et 10 m de largeur et ses berges sont confortées par des techniques de génie végétal. L'ouvrage est « universel » : il répond aux exigences de toutes les espèces piscicoles. Il a été inauguré en avril 2013. Un dispositif de video-comptage a été mis en place et est suivi par la FDAAPPMA du Rhône et l'université Lyon2. Pour répondre à la demande des kayakistes, un débarcadère et un sentier ont été aménagés à proximité. Une passe à castor a également été mise en place par EDF en collaboration avec la FRAPNA-Rhône.

L'ouvrage est labellisé

Coût : 3.9 M€
Financement :
Agence de l'eau RM&C : 50%
FEDER : 20%
EDF : 30 %

Enfin, cette requalification du canal de Miribel sera le support d'une vaste opération de réappropriation sociale du fleuve et d'amélioration du cadre de vie des habitants sur ce territoire, matérialisée notamment par « l'Anneau Bleu ».

PROJET DE L'ANNEAU BLEU

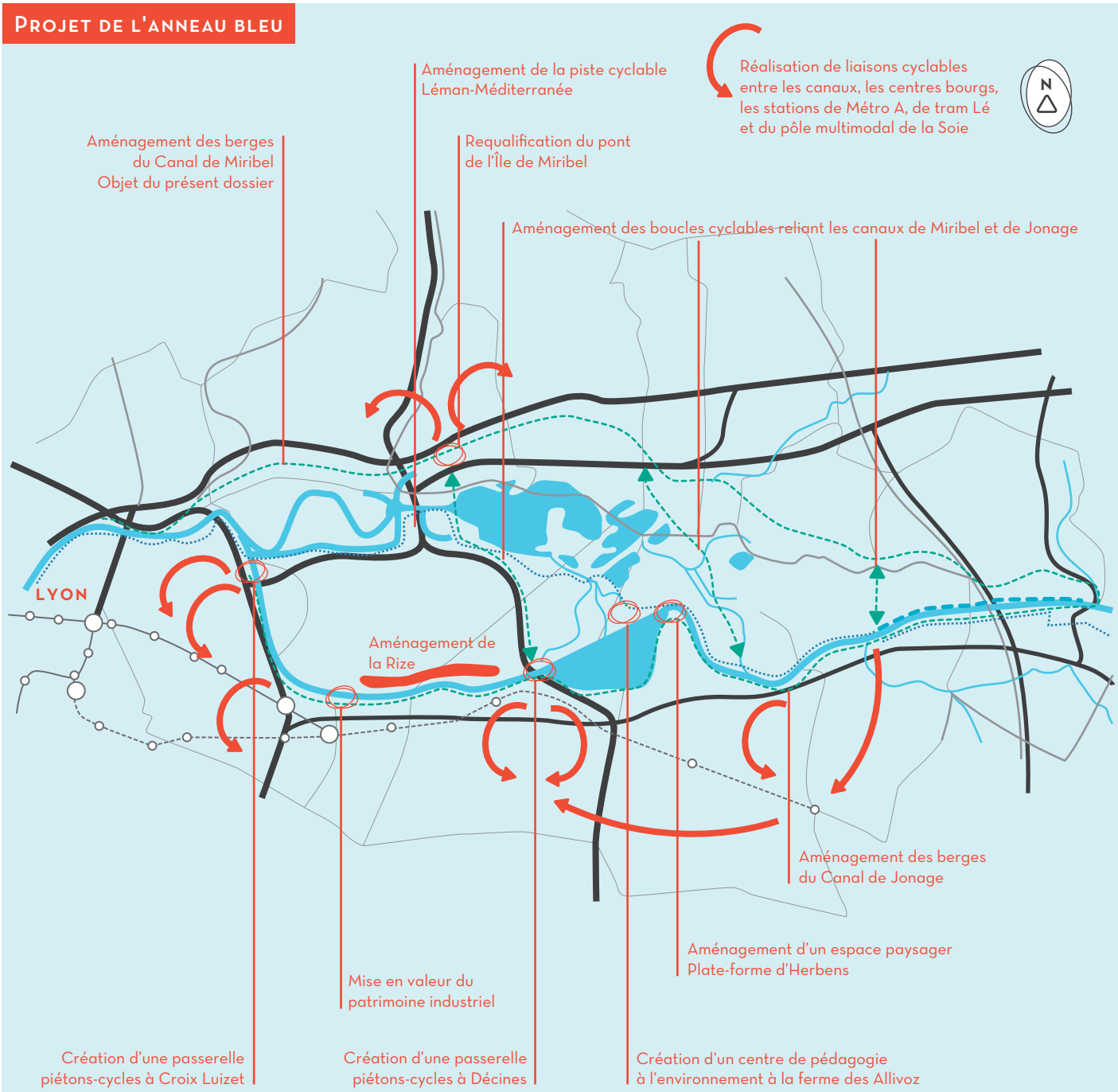


FIGURE 240

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

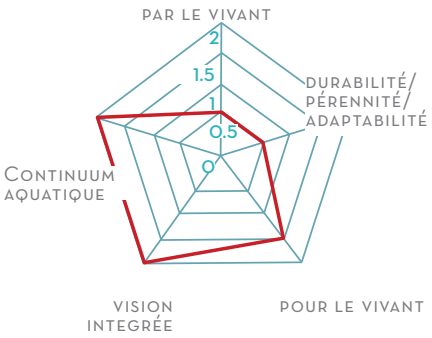
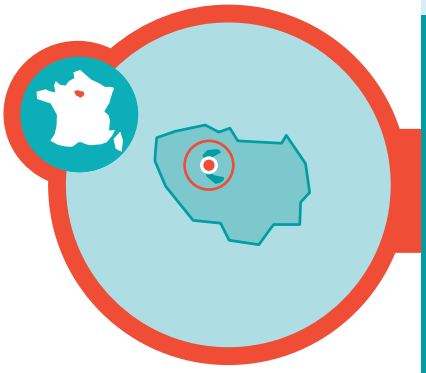


FIGURE 241



SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN : SEINE-NORMANDIE
RÉGION : ILE-DE-FRANCE
DÉPARTEMENT : HAUTS-DE-SEINE
COMMUNES : RUEIL-MALMAISON, NANTERRE, COLOMBES, GENNEVILLIERS, VILLENEUVE-LA-GARENNE, ASNIÈRES-SUR-SEINE, CLICHY-SUR-SEINE, LEVALLOIS-PERRET, COURBEVOIE, NEUILLY-SUR-SEINE, PUTEAUX, SURESNES, SAINT-CLOUD, SÈVRES, BOULOGNE-BILLANCOURT, MEUDON ET ISSY-LES-MOULINEAUX.

FICHE 3

Aménagement des berges de la promenade bleue des Hauts-de-Seine

Dans le département des Hauts-de-Seine, la Seine est un élément structurant. Elle parcourt le département sur 39 km et près de la moitié des communes du département sont riveraines du fleuve (17 sur 36 communes).

La Seine constitue un espace à fort enjeu social, par les débouchés locaux qu'elle induit et parce qu'elle peut répondre à la préoccupation croissante des citadins de voir maintenus des espaces naturels dans leur environnement proche. Elle est également un axe de développement économique où le transport fluvial et les activités portuaires ont toute leur place et où se développe un type d'habitat particulier : les bateaux logements. La Seine, enfin, est un corridor écologique d'intérêt tant national que local, qui doit être préservé mais qui présente en même temps, par ses crues, un facteur de risque majeur pour les populations.

1. L'AMÉNAGEMENT DES BERGES : UN PROJET D'AMÉNAGEMENT PROGRESSIF (2006-2018)

En juin 2004, des Etats généraux ont été lancés par le Président du Conseil général des Hauts-de-Seine. Ils ont abouti, après concertation à l'adoption en 2006 d'un « Schéma d'aménagement et de gestion durable de la Seine et de ses berges ». Ce schéma prévoit la réalisation d'aménagements de berges afin de créer une promenade continue de 66 km : « la promenade bleue ».

Des objectifs précis ont été fixés. Ceux-ci peuvent être présentés sous forme de continuité :

- continuité écologique : ce but à atteindre qui a été consolidé par les dispositifs législatifs et réglementaires relatifs aux trames vertes et bleues.
- continuité de parcours piétons et cyclistes : l'objectif a été repris par le schéma des parcours buissonniers, adopté par l'assemblée départementale le 10 novembre 2006. Il s'agit d'une continuité longitudinale et également latérale, afin de relier la ville au fleuve et les autres promenades « vertes » à la promenade « bleue ». Le développement de l'accessibilité aux personnes à mobilité réduite est aussi un objectif affiché dès la programmation des aménagements.
- continuité paysagère : mise en valeur du paysage, végétalisation des berges, sous l'eau et au-dessus de l'eau.

Le schéma distingue 4 axes d'action :

LE FLEUVE URBAIN	ouvrir la ville sur le fleuve et offrir une promenade continue et attractive aux habitants
LE FLEUVE NATURE	développer le patrimoine naturel de la Seine, des berges, des parcs départementaux situés en bordure de fleuve et préserver la biodiversité
LE FLEUVE PROPRE	reconquérir la qualité de l'eau de la Seine, lutter contre les pollutions
LA SEINE ACTIVE	conforter les activités économiques et de loisirs avec une exigence de qualité

2. LA PRISE EN COMPTE DES CONTRAINTES LOCALES

Pédologiques et géotechniques : les sols pollués sont assez fréquents, étant donné l'usage industriel généralisé des berges. Les cavités et les risques de grand glissement sont également des situations courantes.

Foncières : comme tous les projets d'espace public en zone urbaine dense, des missions particulières de négociation avec les propriétaires de domaine sont à prévoir (RFF, VNF, etc.). Deux zones se distinguent nettement dans le département : la Seine amont, de la sortie de Paris à Villeneuve-la-Garenne, constamment bordée de routes, présente une emprise foncière entre la route et le fleuve généralement très faible, et la Seine aval qui présente des opportunités d'aménagement plus en « profondeur ». Ces opportunités ont été exploitées par les parcs départementaux, entre lesquels la promenade bleue doit jouer un rôle de liaison.

Entretien : le schéma pose le principe de la prise en charge par les communes de l'entretien des aménagements effectués sous la maîtrise d'ouvrage du Conseil général.

Hydrauliques : les principes de la loi sur l'eau et de la non-perturbation des écoulements du fleuve en cas de crue restreignent très fortement les possibilités d' « avancée » en Seine. Les ouvrages éventuellement créés doivent être transparents en cas de crue.

Issues de la multitude d'usages : des arbitrages et des équilibres peuvent être difficiles à trouver entre la fréquentation du public et l'objectif de tranquillité que demandent certains écosystèmes. Les aménagements peuvent être conçus pour éloigner ponctuellement le public de certains lieux naturels, afin d'assurer un fonctionnement biologique minimal. Les usages ne sont pas forcément antinomiques et leur cohabitation peut être organisée.

3. UN SUIVI ANNUEL DE LA QUALITÉ DES BERGES POUR ÉVALUER LES RÉSULTATS CONCRETS DES RÉALISATIONS

Le suivi de la qualité des berges a été lancé par le Conseil général dès 2009 pour mesurer l'efficacité environnementale de ses aménagements, au droit de 7 stations de 200 m réparties sur les 39 km de linéaire de Seine que compte le département. Sur certains tronçons, l'objectif est de réaliser un diagnostic d'état initial

avant la mise en œuvre d'aménagements ; sur d'autres, il s'agit de suivre l'état du milieu après la réalisation de travaux d'aménagement. Quel que soit l'objectif poursuivi, chaque station fait l'objet :

- d'une analyse de la qualité hydrobiologique (IBGA, IBD) ;
- d'une analyse de la végétation aquatique (IBMR) ;
- d'une analyse de la productivité piscicole par une pêche aux alevins.

A ce jour, il n'est pas encore possible de conclure à des effets positifs directement attribuables aux travaux. Une réflexion est par ailleurs engagée sur l'ajustement des paramètres suivis.

4. EXEMPLES DE PROJETS D'AMÉNAGEMENTS

Chaque projet d'aménagement est unique et constitue un tronçon de la promenade bleue. Trois exemples sont ici présentés : l'aménagement du parc du chemin de l'île à Nanterre, l'aménagement de l'île de Monsieur à Sèvres et l'aménagement de la Vallée Rive Gauche sur les communes d'Issy-les-Moulineaux, Meudon et Sèvres.

Le parc du chemin de l'ile, Nanterre

Le parc du Chemin de l'Ile de Nanterre (14.5 ha) est ouvert au public depuis 2006. Il a été aménagé sur un terrain occupé dans les années 1970 par des bidonvilles. L'objectif était de former un espace de promenade agréable et vivant, malgré les contraintes importantes du site. En effet, une ligne haute tension, deux viaducs (l'un pour l'autoroute A14 et l'autre emprunté par le RER A) et le site industriel des usines des Papeteries de la Seine étaient présents sur le site.

Pour augmenter l'espace disponible pour la création du parc le long de la Seine, des terrains ont été échangés avec les papeteries de la Seine. De plus, un contre-fossé a été creusé, multipliant par trois le linéaire de berges. L'eau participe à la morphologie du site et à sa valeur écologique. Une succession de bassins filtrants permet d'épurer l'eau pompée dans la Seine. Elle est en partie réutilisée pour l'alimentation en eau du parc et des jardins ouvriers. La qualité de l'eau analysée à la sortie du cycle d'épuration est bonne, proche de la qualité « eau de baignade ». Quelques réglages ont été nécessaires : il a fallu caler le débit pompé par les vis d'Archimède, et donc le temps de séjour de l'eau dans les bassins filtrants, afin d'optimiser le processus d'épuration. On compte environ 6 jours de séjour pour une goutte d'eau qui arriverait en amont du site jusqu'à son rejet dans la Seine.

De grands secteurs ont été aménagés en prairies naturelles et les espèces végétales plantées sont issues d'essences locales et adaptées au milieu. L'entretien du site est naturel. Il se fait de manière raisonnée, sans recours à des traitements phytosanitaires. Quant aux bassins filtrants, la biomasse est faucardée une fois par an, par moitié, et réutilisée sous forme de compost ou de paillis.

LES BASSINS FILTRANTS DU PARC

FIGURE 242

CONSEIL GÉNÉRAL DES HAUTS-DE-SEINE
CONCEPTEUR : SITE ET CONCEPT SELON UN PROCÉDÉ BREVETÉ DE L'ENTREPRISE PHYTORESTORE

L'île de Monsieur, Sèvres

L'île de Monsieur est située dans un corridor écologique entre le parc de Saint-Cloud et la Seine et le site est classé en espace naturel sensible. Les berges de l'île Monsieur à Sèvres ont été aménagées sur 800 m en 2008 et 2009. Une zone de frayère a été realisée par la suppression d'une ancienne cale de mise à l'eau en béton à l'amont du site. Il s'agit d'un site de haut-fond à l'abri du batillage, avec une partie en graviers et une partie plantée d'hélophytes.

Vue de la frayère aménagée en pied de berge de Seine à l'Ile Monsieur (Sèvres)

FIGURE 243 CONSEIL GÉNÉRAL DES HAUTS-DE-SEINE

Le suivi de la qualité des berges a permis de constater l'efficacité de cette frayère, l'abondance des alevins ayant été multipliée par 10 à sa proximité et le nombre d'espèces étant passé de 9 à 14 entre 2009 et 2011. Plus globalement, le nombre d'alevins a augmenté sur toutes les stations de suivi installées au droit des aménagements de berge réalisés par le Département.

L'aménagement de la promenade a permis la réorganisation de 16 places de stationnement de bâteaux-logements. Cette réorganisation a visé à désencombrer le chemin sur lequel câbles et réseaux étaient posés, et à renforcer les conditions d'amarrage de ces bâteaux, afin de diminuer le risque de dérive en cas de crue de la Seine.

La Vallée Rive Gauche, Issy-les-Moulineaux, Meudon et Sèvres

Le projet de la Vallée Rive Gauche prévoit l'aménagement de 4,2 km de berges d'ici 2018, par la création de nombreux lieux de promenade et d'espaces naturels le long du fleuve. Cinq grands espaces plantés selon une typologie précise d'essences herbacées et arborées reproduiront des transitions équilibrées allant de la ripisylve à des espaces ouverts accessibles au public. La renaturation des berges au moyen de techniques de génie végétal va permettre l'installation et le développement de milieux et d'habitats hydro-écologiques. Des rideaux de tunage bois sous eau et des nattes de coco pré-ensemencées, des fascines et saules vivants ainsi que des jardinières flottantes seront installés. L'ensemencement privilégiera les espèces endémiques les mieux adaptées, selon une sélection rigoureuse conciliant l'agrément visuel, la biodiversité et la pérennité des peuplements.

Le projet est caractérisé par une cinquantaine de places de bâteaux-logements rénovées et intégrées paysagèrement à l'aménagement. Les objectifs de ces rénovations sont les mêmes qu'à l'île de Monsieur (Sèvres): sécuriser le promeneur de la promenade basse en réorganisant réseaux et amarrage, et diminuer le risque de déatchement des bâteaux en cas de crue.

Enfin, trois bassins paysagers en cascade seront également créés en face de l'Ile Seguin pour traiter les eaux de ruissellement de 11 600 m^2 de voirie. D'une superficie de 1 100 m^2, ils combineront les fonctions écologiques (traitement des eaux, accroissement des capacités d'accueil floristiques et faunistiques), paysagères et pédagogiques.

Le premier bassin accueillera des espèces épuratrices permettant une dégradation des hydrocarbures, le second des espèces fixatrices d'azote et de phosphate. Le troisième mettra en scène une eau «claire», animée par des plantes oxygénantes (nénuphars).

POUR EN SAVOIR PLUS

www.promenades.hauts-de-seine.net

VUE EN COUPE D'UN PRINCIPE D'AMÉNAGEMENT DE BERGE LE LONG DE LA RD7

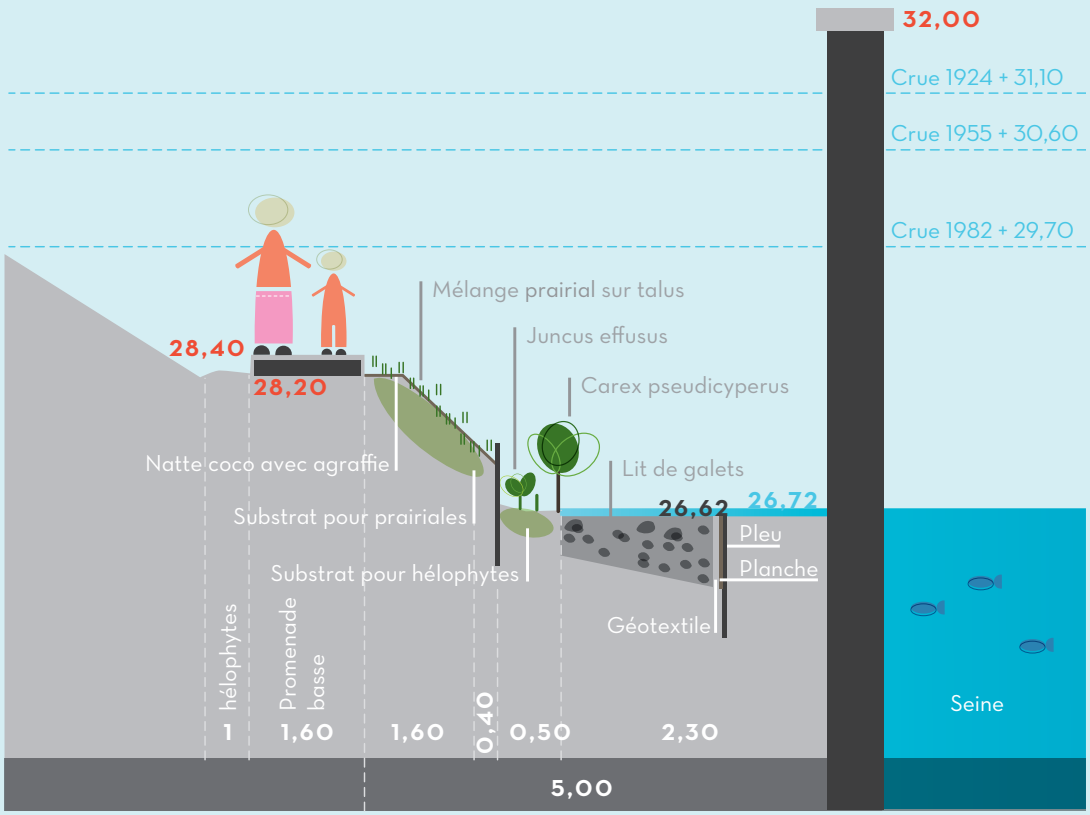


FIGURE 244

CONSEIL GÉNÉRAL DES HAUTS-DE-SEINE

VUE EN PERSPECTIVE DES BASSINS DE TRAITEMENT DES EAUX PLUVIALES

FIGURE 245

CONSEIL GÉNÉRAL DES HAUTS-DE-SEINE
CONCEPTEUR : AGENCE ILEX , BUREAUX D'ÉTUDES OCM ET CONFLUENCES

GOUVERNANCE

Programme:
Maitre d'ouvrage: Conseil général des Hauts-de-Seine
Financement : Conseil général des Hauts-de-Seine, les communes concernées et les partenaires institutionnels

Parc du chemin de l'île
Maitre d'ouvrage : Etablissement Public d'Aménagement Seine Arche
Assistance à la conduite d'opération : Conseil général des Hauts-de-Seine
Gestionnaire pour les travaux d'entretien : Conseil général des Hauts-de-Seine
Coût des travaux : 16 M€ TTC
Financement :
L'Agence des espaces verts de la Région Ile de France
Conseil général des Hauts-de-Seine
Commune de Nanterre
Partenariat :
-la commune de Nanterre ;
-le Conseil général des Hauts-de-Seine ;
-l'Etablissement Public d'Aménagement Seine Arche ;
-l'Agence des espaces verts de la Région Ile de France.
Propriétaire et gestionnaire : Conseil Général des Hauts-de-Seine via la Direction des Parcs, Jardins et Paysages.

Berges de l'île de Monsieur, Sèvres
Maitre d'ouvrage :
Gestionnaire pour les travaux d'entretien : Syndicat Mixte de l'Ile de Monsieur
Coût : 3 M€ TTC
Financement :
-le Conseil général des Hauts-de-Seine ;
-la commune de Sèvres

Berges et espace public de la Vallée Rive Gauche
Maitre d'ouvrage :
Coût :
Total : 70 M€ (TTC)
Financement :
-le Conseil général des Hauts-de-Seine ;
-l'agence de l'eau Seine-Normandie
-les communes d'Issy-les-Moulineaux, Meudon et Sèvres

PROJET DE PROMENADE BLEUE DES HAUTS-DE-SEINE

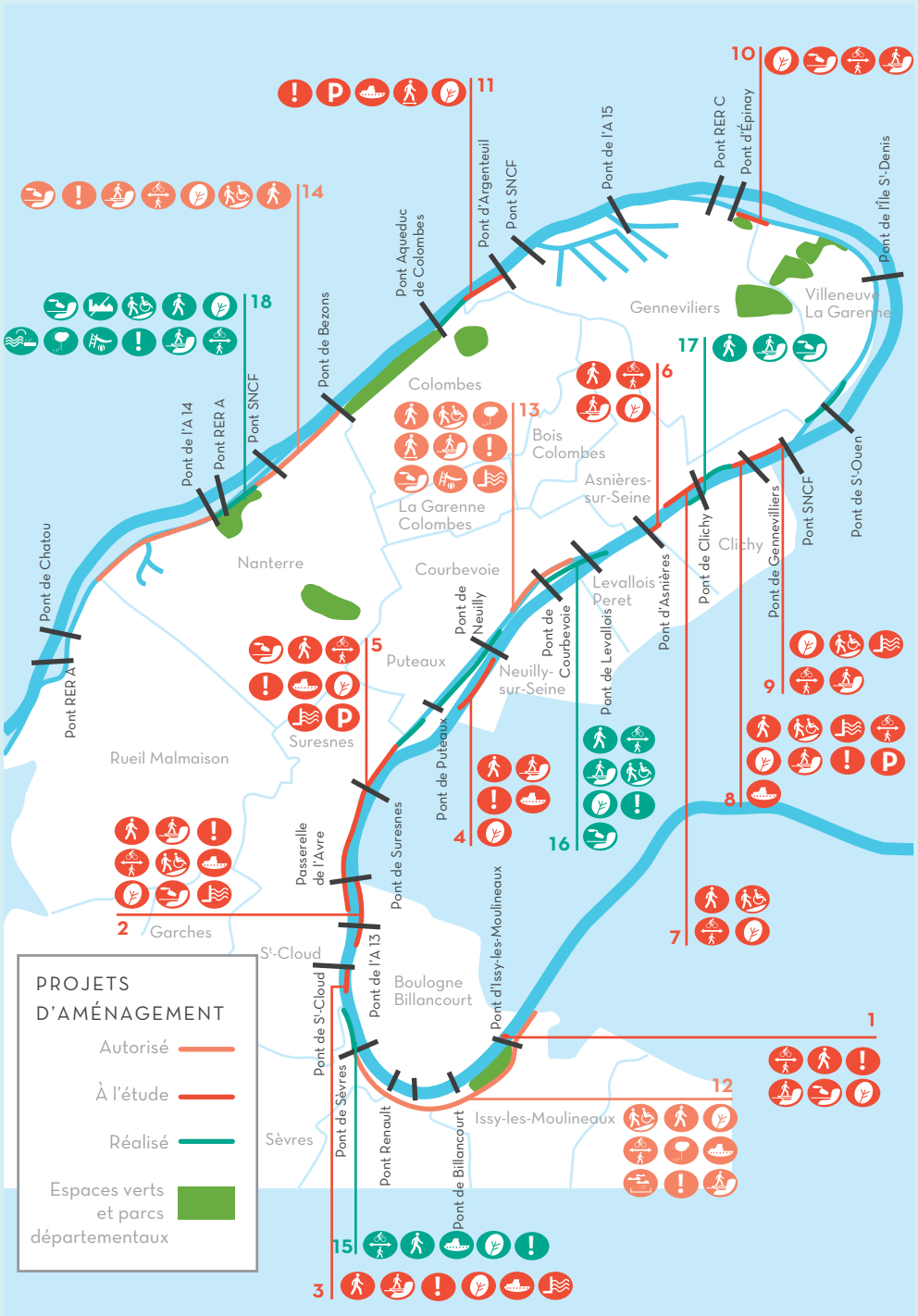


FIGURE 246

CONSEIL GÉNÉRAL DES HAUTS-DE-SEINE

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

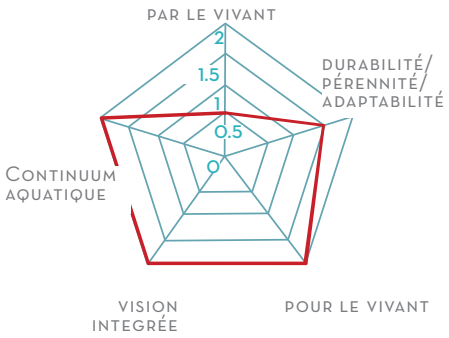


FIGURE 247

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN: LOIRE-BRETAGNE
RÉGION: PAYS DE LA LOIRE
DÉPARTEMENT: SARTHE
COMMUNE: SABLÉ-SUR-SARTHE

FICHE 4

Travaux d'aménagement d'un espace naturel sur la Vaige à Sablé-sur-Sarthe

Le plan d'eau de Sablé-sur-Sarthe pourrait être le vestige de l'ancien plan d'eau d'agrément du château Sablé-sur-Sarthe datant du 18ème siècle. Il est formé par un élargissement ponctuel induit par 2 ouvrages hydrauliques construits au niveau de la confluence de la Vaige et de la Sarthe. Les anciens vannages assurant la régulation des niveaux d'eau et le fonctionnement d'un moulin, aujourd'hui disparu, ont été remplacés par des clapets mobiles de régulation établis sur le cours de la Vaige, au pied du château entre 1985 et 1986.

En aval du plan d'eau, le cours de la Vaige est composé :

- *d'un bras principal de 470 m sur 10 m de large connecté à la Sarthe ;*
- *d'un bras secondaire de 310 m sur 6 m de large connecté à la Sarthe;*
- *d'un bras mort de 120 m sur 9 m de large permettant l'alimentation en eau du plan d'eau par une prise d'eau sur la Sarthe en amont du barrage de celle-ci. Ce bras d'eau a été comblé à une certaine époque. Seul un léger filet d'eau passe aujourd'hui dans un fossé.*

REPRÉSENTATION DU PLAN D'EAU ET DE LA VAIGE.

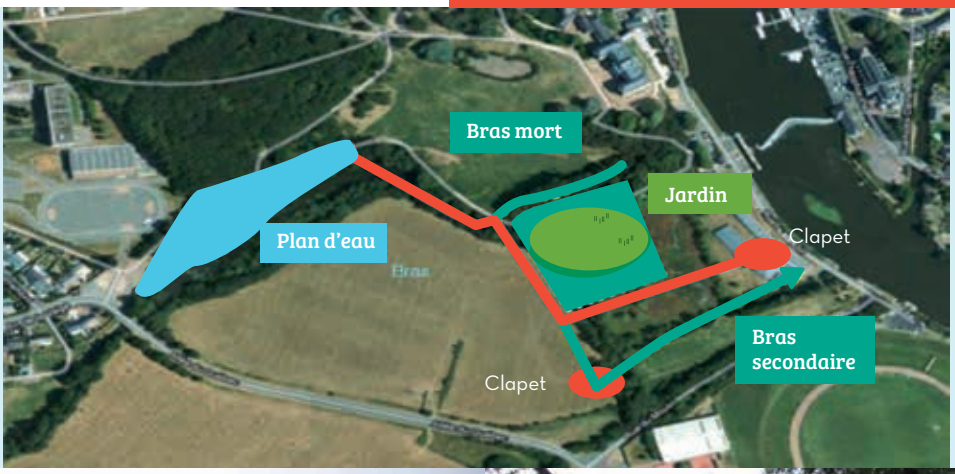


FIGURE 248

SCE

Le plan d'eau est un lieu fréquenté et apprécié par les pêcheurs et les promeneurs. Cependant, l'arrêt des opérations de curage dans les années 90 a entrainé son envasement. En 2010, des pêcheurs ont déposé une pétition au bureau du Syndicat demandant un curage du plan d'eau. En parallèle, une étude était menée par le syndicat afin de restaurer la continuité écologique sur les 32 autres ouvrages de la Vaige. Face à l'impossibilité réglementaire de curer le plan d'eau, le syndicat a organisé une rencontre sur le terrain avec la commune de Sablé-sur-Sarthe, les pêcheurs et la Police de l'eau pour écouter les demandes des pêcheurs.

Différentes réunions ont ensuite été organisées pour décider des aménagements à réaliser. Les premières réunions ont mis en évidence l'incohérence des attentes des différents partenaires : certains voulaient garder un plan d'eau profond (usagers pêcheurs), d'autres voulaient voir la rivière courante (Onema), d'autres encore une roselière (LPO). La Ville de Sablé sur Sarthe tenait à garder les ouvrages en place tandis que la DDT et l'Onema souhaitait leur démantèlement. Le syndicat a donc décidé de mener une opération expérimentale d'ouverture des clapets pour voir l'état du site et montrer comment seraient les terrains après leur suppression.

Des réunions de concertation avec l'ensemble des acteurs concernés (Syndicat, Mairie de Sablé-sur-Sarthe, Onema, DDT, Fédération et Association de pêche et Ligue de Protection des Oiseaux, AELB, CG, Région) ont eu lieu pour dresser une liste d'objectifs pour les prochains aménagements. Ces objectifs sont les suivants :

- restaurer la libre circulation piscicole et respecter les objectifs fixés par la Directive Cadre sur l'Eau en termes de bon état écologique (DDT) ;
- préserver les capacités de stockage du site en cas de crue ;
- rester en cohérence avec les actions du syndicat et mettre en place une gestion écologique sur le site : amélioration de la morphologie du cours d'eau par développement de successions de radiers et de mouilles (Onema) ;
- améliorer l'accessibilité à la rivière : pontons, points de pêche accessibles aux handicapés ;
- conserver une hauteur d'eau suffisante pour la vie piscicole et le maintien de l'activité de pêche (usagers pêcheurs) ;
- aménager le site pour créer un site refuge pour l'avifaune (LPO).

Suite à un diagnostic technique en présence des propriétaires et Association de pêche, le Service technique du Syndicat de Bassin de la Vaige a conclu que les ouvrages étaient en mauvais état. En parallèle, l'étude réglementaire menée par la DDT72 a montré que la commune n'avait plus les droits d'eau. L'ensemble du comité de pilotage a donc décidé de supprimer les ouvrages et de favoriser les actions permettant le rétablissement de la libre circulation sédimentaire et piscicole.

AMÉNAGEMENTS ET MESURES D'ACCOMPAGNEMENT

Les principaux aménagements réalisés sont les suivants :

- Au niveau des bras :
  - o reprofilage du lit d'étiage ;
  - o construction d'une frayère à brochets et installation d'un vannage à l'entrée de la frayère à brochets ;
  - o gestion du risque d'inondation par construction d'un déversoir de crue sur le bras secondaire.
  - o suppression des clapets et réalisation d'une échancrure en V dans le seuil béton du clapet du bras principal ;
  - o stabilisation de l'atterrissement de la retenue et construction d'une zone refuge pour la faune ;
- Au niveau du plan d'eau :
  - o la préservation de l'ilot central bordé par une roselière en rive droite (à l'opposé de la zone accessible au public) à l'aide d'enrochements et de plantations ponctuels et limités ;
  - o la préservation du lit présent en rive gauche (zone accessible au public et aux pêcheurs) avec recharge du lit en substrats granulométriques adaptés (graviers et pierres).

Les objectifs définis par le SDAGE et concernés directement par le projet ont été pris en compte. De même, le projet s'inscrit pleinement dans la dynamique de rétablissement de la libre circulation sédimentaire et piscicole portée par la DCE. Il constitue une avancée importante pour la masse d'eau de la Vaige dont l'objectif de bon état chimique a été fixé à 2015 et celui de bon état écologique à 2021. Les aménagements réalisés doivent permettre de restaurer le transport sédimentaire, la circulation des poissons migrateurs et les capacités d'accueil du site pour la faune et la végétation.

La renaturation du site doit donc permettre à terme une amélioration globale de l'état écologique du site. Ces améliorations du milieu vont de pair avec la prise en compte du risque inondation et des potentialités de pêche du secteur.

LA PRISE EN COMPTE DU RISQUE D'INONDATION :

Zone d'expansion des crues à Sablé-sur-Sarthe

FIGURE 249 PPRI DE LA SARTHE À SABLÉ-SUR-SARTHE

Le secteur d'étude se situe dans le lit majeur de la Sarthe comme en témoigne le fond alluvionnaire. Cette position est visible également par rapport au positionnement dans la zone d'expansion de crue de la Sarthe elle-même. Afin de prendre en compte le risque d'inondation, les scénarios proposés ont été modélisés et comparés à l'état actuel.

POUR EN SAVOIR PLUS

Syndicat du Bassin de la Vaige, 53 270
SAINTE-SUZANNE
02. 43. 68. 11. 49

SUIVI ÉCOLOGIQUE PRÉVU

- le suivi hydrobiologique (IBGN, IBDN et IPR) sera assuré tous les ans ;
- l'entretien de la ripisylve au droit de la zone refuge LPO sera assuré par le Syndicat de la Vaige à la période indiquée par la LPO ;
- l'entretien des autres zones rivulaires sera assuré par le propriétaire (la commune de Sablé-sur-Sarthe) au rythme imposé par l'évolution de la végétation ;
- le suivi de la population d'oiseaux continuera d'être assuré par la LPO ;
- si nécessaire, un suivi floristique pourra être mis en place par le Syndicat après contact de Sarthe Nature Environnement ;
- l'entretien du déversoir de crue sera la compétence du Syndicat du Bassin de la Vaige. Une visite mensuelle sera assurée par son Service technique. En outre, un technicien vérifiera le déversoir après chaque événement hydrologique important.

Les aménagements ne nécessitent pas de mesures d'entretien ou de maintenance spécifique autre que l'entretien courant en rivière (gestion de la ripisylve par exemple). Ces prestations seront réalisées par le syndicat.

CALENDRIER PRÉVISIONNEL DES TRAVAUX :

Suite à l'enquête publique réalisée en Juillet 2013 conclue par un avis favorable du Commissaire enquêteur et l'avis favorable du CODERST, les travaux sont déclarés d'Intérêt Général par arrêté préfectoral en octobre 2013. L'installation du chantier se déroulera courant novembre 2013 et les travaux seront réalisés entre novembre 2013 et juin 2014.

GOUVERNANCE

Maitre d'ouvrage : Syndicat de bassin de la Vaige
Maitre d'œuvre : Bureau d'étude SCE
Comité de pilotage : Ville de Sablé-sur-Sarthe, Onema 72, FDPPMA 72, DDT, AAPPMA la Sabolienne, LPO72, AELB, Conseil général 72, Région Pays de la Loire.
Coûts :
Etudes : 39 165 € TTC
Travaux : 200 K€ HT
Financement :
Agence de l'eau : 50%
Conseil Général de la Sarthe : 20%
Région Pays de la Loire : 10%
Syndicat de bassin de la Vaige: 20%

7

PROTECTION/RESTAURATION DES MILIEUX (HABITATS) ET DÉVELOPPEMENT DE LA BIODIVERSITÉ

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

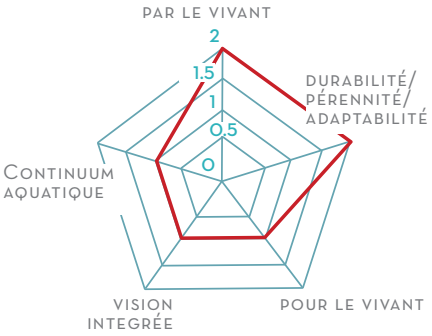


FIGURE 250

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN : RHIN-MEUSE
RÉGION : LORRAINE
DÉPARTEMENT : MOSELLE
COMMUNE : LUCY

FICHE 1

Restauration de la zone humide de Lucy

Lucy est une petite commune rurale de 205 habitants. En 2006, elle décide de valoriser une ancienne peupleraie (1,2 ha) dont elle est propriétaire, décimée par la tempête de 1999 en créant un étang. L'objectif de la commune était de réaliser un aménagement paysager et récréatif avec une gestion simple et peu coûteuse. Les financeurs sollicités (Conseil général de la Moselle et agence de l'eau Rhin-Meuse) ont proposé d'étudier une solution alternative à l'aménagement de l'étang sur la base d'une étude pour définir les scénarios possibles.

L'étude a consisté à réaliser un diagnostic écologique basé sur des relevés floristiques et faunistiques (oiseaux, amphibiens, reptiles, insectes), ce qui a permis de conclure sur des enjeux floristiques et faunistiques « moyens », dus à une fermeture déjà avancée du milieu. Le stade herbacé constitué d'espèces hygrophiles traduisait un potentiel élevé pour la restauration d'une zone humide.

1. CHOIX DU PROJET DE RÉAMÉNAGEMENT

Le bureau d'étude a identifié et présenté 4 scénarios d'aménagement lors d'une réunion publique :

- ne rien faire et laisser le site évoluer ;
- faire un aménagement à dominante prairial ;
- mettre en place des roselières ;
- réaliser un projet mixte comportant des prairies et des roselières.

Pour éclairer le choix, le bureau d'étude a analysé les coûts d'entretien et de gestion de chacun, et les a comparé aux coûts d'entretien et de gestion de l'étang initialement prévu.

Les propositions de réaménagement ont donc été basées sur les résultats du diagnostic écologique et sur ses potentialités écologiques. De plus, une attention particulière a été portée à l'intégration du projet dans le contexte local (Vallée de la Nied).

Le scénario retenu par l'équipe municipale a été présenté aux riverains lors d'une réunion publique. Devant l'accueil favorable, la commune a validé le projet de restauration d'une zone humide consistant à recréer une mosaïque d'habitats humides : habitats prairiaux, roselières et mares. La simplicité de gestion du site (pâturage, fauche) a été un des critères qui a prévalu pour le choix. Le projet présentait aussi l'avantage de créer des zones refuges (mares et roselières) dans un contexte agricole intensif.

La concertation au début du projet

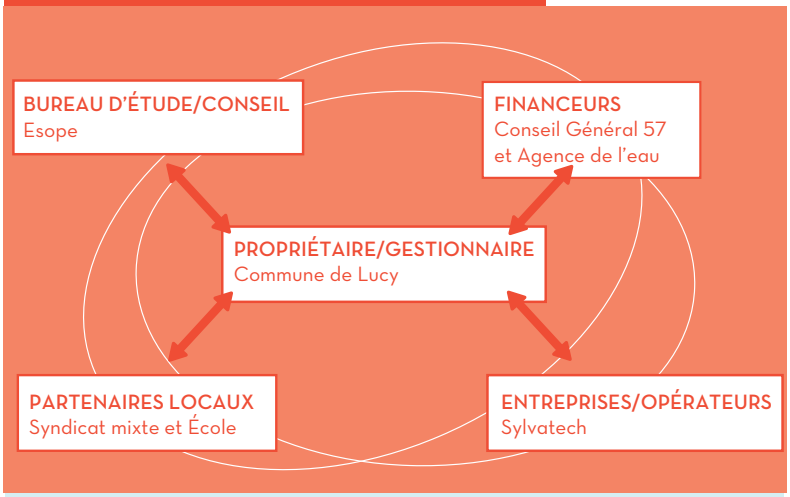


FIGURE 251

2. RENATURATION DU SITE PAR DES TECHNIQUES DE GÉNIE VÉGÉTAL

Afin de diminuer les coûts des travaux de défrichement, les riverains utilisant du bois de chauffage ont été invités à participer au débroussaillage de la zone. La mare pré-existante a été restaurée et 3 mares supplémentaires ont été créées. Leur emplacement a été déterminé en fonction des thalwegs qui constituent des arrivées d'eau naturelles sur le site. Le tracé du ruisseau, autrefois rectifié, a été rendu plus naturel. Les écoulements ont été diversifiés ainsi que le profil des berges. Celles-ci ont été confortées par des techniques dites « douces » (installation de banquettes d'hélophytes en pied de berges).

Plantation d'espèces locales après reméandrage du ruisseau et pose de géotextiles sur les berges. Travaux entreprise Sylvatech.

FIGURE 252 © ESOPE

Quelques bosquets ont été maintenus et la création d'une mosaïque de formations végétales herbacées a été privilégiée. La zone a également été ensemencée avec un mélange de graines de faible densité afin de favoriser le développement d'une flore spontanée.

Représentation de l'aménagement de la zone humide (état projet)

FIGURE 253 © ESOPE

Sonneur à ventre jaune

FIGURE 254 © JULIAN PICHENOT

Lors de la réalisation des travaux, le site a été colonisé par le Sonneur à ventre jaune, espèce protégée sur l'ensemble du territoire français et inscrite aux annexes II de la directive " habitats " et de la convention de Berne. Le projet a donc été adapté afin de ne pas impacter les individus présents sur le chantier et de maintenir les habitats qui lui sont favorables.

Afin de présenter aux habitants la zone humide et les travaux effectués, une plaquette explicative a été distribuée dans les boîtes aux lettres et une journée porte ouverte a été organisée sur le site. Un partenariat a également été mis en place entre le Conseil général et l'école pour mettre un animateur nature à la disposition de l'école pour quelques jours.

Le ruisseau Outremont en mai 2012.

FIGURE 255 © ESOPE

La zone humide quelques mois après travaux.

FIGURE 256 © ESOPE

3. GESTION DE LA ZONE HUMIDE

Un broyage de la végétation a été réalisé en automne 2012 pour entretenir la végétation herbacée et limiter la fermeture du milieu par les saules ; car un des objectifs d'aménagement de la zone humide portait sur le développement d'une mosaïque d'habitats ouverts (habitats prairiaux et habitats palustres, type roselière).
Cette intervention, réalisée par une entreprise, consistait en une action ponctuelle en attendant la mise en place d'une gestion pérenne, via un pâturage extensif (avec des chevaux ou des ânes), dès 2013.

4. ORGANISATION DE LA COMMUNICATION AUTOUR DE LA ZONE HUMIDE

En 2012, l'école a travaillé à la création d'un panneau pédagogique destiné à être installé sur la zone humide. La pose de ce panneau a permis de réunir une seconde fois les élus locaux, les maires des communes alentours, les représentants du Conseil général et les habitants sur le site.
Ces animations représentent des clefs d'entrées pour communiquer sur les zones humides et leurs intérêts avec les riverains, qui méconnaissent souvent ce type de milieu et n'en imaginent donc ni la richesse, ni l'importance.

5. EVALUATION DU SUCCÈS DE L'OPÉRATION

Afin d'accompagner la commune dans la gestion du site, l'agence de l'eau et le Conseil général financent un suivi sur 3 ans après travaux (2012-2014). Il vise à évaluer le succès de l'opération de restauration et de proposer à la commune, une gestion adaptée. Il porte sur la description des habitats ainsi que des inventaires floristiques (focus sur les espèces remarquables, mais aussi invasives) et faunistiques (focus sur les espèces patrimoniales).
Au bout d'un an, les inventaires montrent que le résultat est conforme aux attentes : aucune espèce invasive n'a colonisé le site et certaines espèces remarquables, dont le jonc des chaisiers glauque, protégé en Lorraine, ont été observées. Cette espèce avait été mentionnée sur le site en 2000 mais non revue ensuite. L'ouverture du milieu par la tempête en 1999 semble avoir été favorable à l'espèce puis celle-ci a disparue avec le développement des rejets de peupliers. Les travaux de réaménagement lui ont donc été bénéfiques car aujourd'hui, ce sont plusieurs centaines d'individus qui sont dénombrés sur la zone.
Suite à ce premier bilan, des opérations d'ajustement pourront être réalisées.

La dynamique des acteurs autour du site aujourd'hui

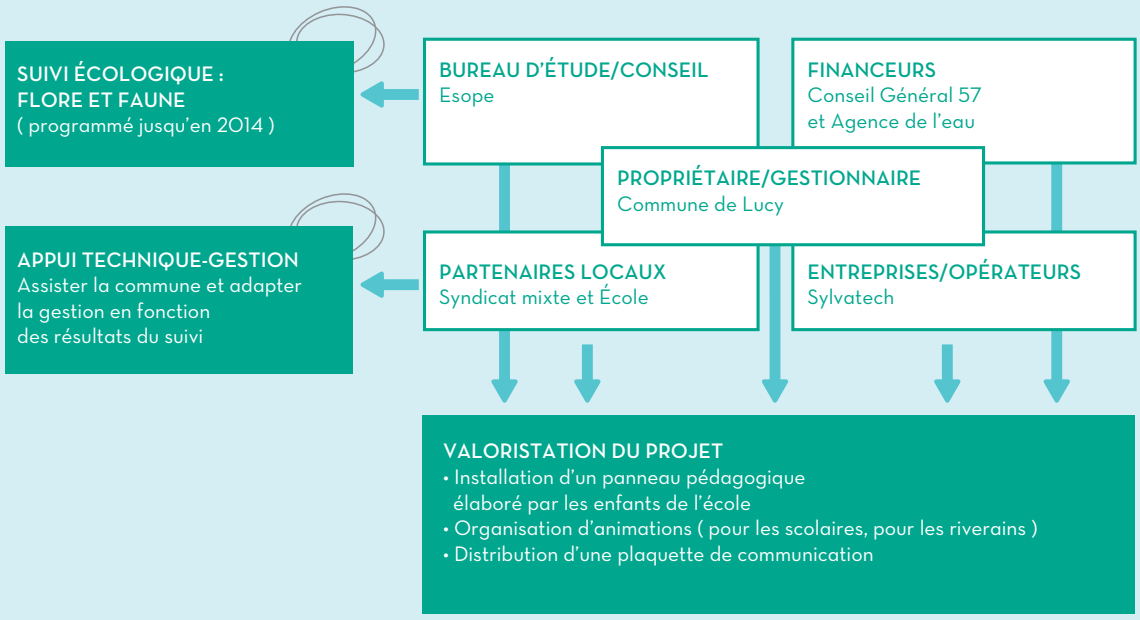


FIGURE 257

L'un des principaux enjeux aujourd'hui est la pérennisation de la gestion du site.

GOUVERNANCE

Maitre d'ouvrage : la commune de Lucy, assistée du Syndicat Mixte des Sources de la Nied Françaises
Maitre d'œuvre : bureau d'étude ESOPE
Les partenaires du projet :
• Entreprise : Sylvatech
• Financeurs et partenaires techniques et administratifs : Agence de l'eau Rhin-Meuse, Conseil Général de la Moselle
• Conseils techniques et administratifs sur la réalisation des dossiers et du projet: DDT et Onema

Coûts :
Etude : 10 000 €
Financement : Conseil général de la Moselle, agence de l'eau Rhin-Meuse

Travaux : 95 000 euros HT
Financement : Commune, Conseil général de la Moselle, agence de l'eau Rhin-Meuse
Suivi (≃ 3ans): ≃ 15 000 € HT
Financement ; Commune, Conseil général de la Moselle, agence de l'eau Rhin-Meuse

Concordance des objectifs du projet en fonction de la définition de l'ingénierie écologique donnée au chapitre 1

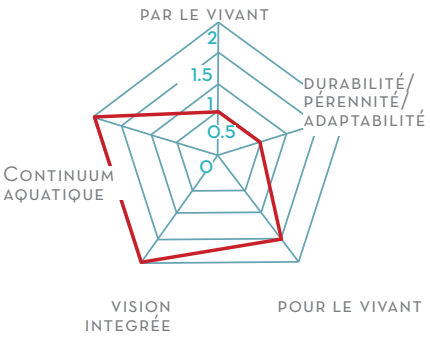


FIGURE 258

Situation géographique :

BASSIN: SEINE-NORMANDIE
RÉGION: HAUTE NORMANDIE
DÉPARTEMENT: SEINE MARITIME
COMMUNE: LE HAVRE

FICHE **2**

Création d'écosystèmes sur l'estuaire de la Seine comme mesures compensatoires

Lorsque le Grand Port Maritime du Havre (GPMH) a décidé d'étendre son accueil de portes conteneurs en 1996 (projet Port 2000), des mesures compensatoires et d'accompagnement environnemental ont été prévues en réponse aux impacts du projet.

Localisation des aménagements réalisés par le Grand Port Maritime du Havre pour compenser les impacts du projet Port 2000.

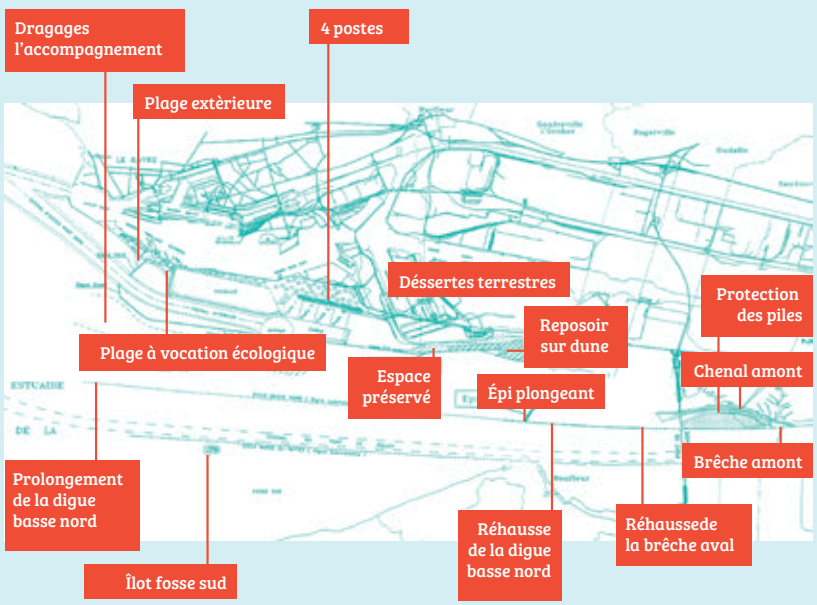


FIGURE 259

1. LA MISE EN PLACE D'UNE CONCERTATION À PLUSIEURS NIVEAUX POUR FACILITER LA COMPRÉHENSION ET L'APPROPRIATION DU PROJET

La concertation a été entamée assez tôt en 1996 par le GPMH. Indépendamment des multiples rencontres bilatérales entre le port et les différents acteurs, trois niveaux d'échanges ont été mis en place :

- **Inter-portuaire :** coordonné par le Centre d'études techniques maritimes et fluviales (CETMEF) pour analyser en détail les résultats des études de modélisation et faciliter les discussions entre le GPMH (maître d'ouvrage) et le GPMR (gestionnaire des digues et directement concerné par les impacts éventuels du projet sur le chenal de navigation et les terrains dont il a la gestion).
- **Comité d'experts** : coordonné par la Direction Régionale de l'Environnement Haute Normandie (DIREN devenue DREAL)). Son objectif était d'apporter un regard scientifique pluridisciplinaire sur les aménagements envisagés et leurs incidences potentielles. Il a orienté et contribué à l'analyse des différentes études menées. Ce comité d'experts est devenu par la suite le Comité Scientifique de l'estuaire de la Seine dont l'existence a été entérinée par la loi portant sur la réforme portuaire (2008).
- **Rencontres avec les différentes parties prenantes :** des réunions avec les différents acteurs concernés (associations professionnelles, associations environnementales, scientifiques, élus, etc.) par le projet se sont tenues tout au long de la vie du projet et se poursuivent encore.

2. LES MESURES COMPENSATOIRES RETENUES

Les mesures compensatoires et environnementales à mettre en place ont été mises au point par :

- la DIREN ;
- le comité d'experts (mis en place en 1998) ;
- le Port.

Elles consistent en diverses actions : déplacement et sauvegarde d'espèces protégées, création d'une plage à vocation écologique, mesures en faveur des pêcheurs (suivis des pêches locales notamment pour voir l'impact du projet), de l'intérêt écologique de la réserve naturelle limitrophe au projet.

Les trois principales mesures en matière de travaux de génie écologique sont ici décrites :

- des travaux de réhabilitation de vasières (mesure d'accompagnement) ;
- la création d'un reposoir sur dune en remplacement du reposoir de pleine mer détruit (mesure compensatoire) ;
- la création d'un îlot (l'îlot du ratier) (mesure d'accompagnement).

3. DÉTAIL DU PROJET DE RÉHABILITATION DE VASIÈRES

Au cours de la deuxième moitié du XXème siècle, conséquence du colmatage naturel des estuaires et des nombreuses opérations d'aménagement visant au développement de la navigation commerciale, la surface de vasières intertidales en estuaire de Seine a connu une forte régression passant d'une superficie de 1 600 hectares en 1970 à 370 hectares en 1998. Or, les vasières intertidales sont primordiales en estuaire de Seine sur un plan biologique et épurateur.

En effet, elles assurent une productivité biologique (en zoobenthos) importante (environ dix fois supérieure à celle du milieu océanique) qui leur confère un rôle écologique de premier ordre du point de vue ornithologique et ichtyologique :

- du point de vue ornithologique, l'estuaire de la Seine constitue une étape importante de migration et une zone d'hivernage stratégique pour de nombreuses espèces comme les avocettes, les courlis, les tadornes, les pilets, les spatules, etc. A ce titre, l'estuaire de la Seine est inscrit à la liste des Zones de Protection Spéciales de la Directive Européenne sur la Protection des Oiseaux ;
- du point de vue ichtyologique, plusieurs espèces de poissons et de crustacés, dont certaines commercialisées (pêche professionnelle en baie de Seine orientale), y ont des nurseries, notamment la crevette grise, la sole, le bar, la gode, le sprat, etc.

Le chenal environnemental

FIGURE 260

Par ailleurs, l'estuaire constitue le débouché d'un bassin versant qui rassemble plus de quinze millions d'habitants et le tiers de l'activité industrielle et agricole du pays : les pollutions qui en résultent comme certains métaux lourds ou hydrocarbures par exemple vont être complexés et partiellement dégradés dans le bouchon vaseux puis vont sédimenter sur les vasières.

Ces différentes fonctions écologiques (production biologique, nourricerie, stockage de contaminants) dépendent de la qualité (granulométrie, salinité, etc.) et des surfaces de vasières à l'échelle de l'estuaire. Or, les travaux d'aménagement portuaires du Havre et de Rouen ont contribué fortement à modifier les caractéristiques hydrosédimentaires qui conditionnent ces fonctions écologiques.

Face à ce constat, des mesures d'accompagnement ont été définies pour permettre la reconstitution d'une partie de ces vasières intertidales. Elles ont consisté, entre autres, en la création d'un « Méandre artificiel » en amont du Pont de Normandie, accompagné en aval de la réalisation d'un épi et de l'aménagement de brèches dans la digue basse Nord pour favoriser le maintien voire le développement des vasières.

Ainsi, l'objectif précis de l'opération était de restaurer, sur une centaine d'hectares environ, des vasières intertidales, oligo et mésohalines, favorables en particulier au zoobenthos, maillon essentiel de la chaîne trophique estuarienne ainsi que de bloquer la progression des herbus. L'ensemble de cet aménagement a été ainsi créé pour entretenir un fonctionnement hydrosédimentaire dynamique et restaurer ainsi des vasières utiles au nourrissage de nombreuses espèces.

Les travaux ont consisté à :

- creuser un chenal de 100 m de large et 2 800 m de long pour redynamiser et pérenniser le fonctionnement hydromorphosédimentaire de la fosse nord. Les 2 000 000 m^3 de matériaux dragués *in situ* ont été refoulés en chambre de dépôt dans des espaces non aménagés le long de la Route de l'estuaire. Une surveillance attentive de la zone de dépôt a été menée afin de prévenir l'implantation d'espèces avicoles qui auraient pu être perturbées par le refoulement des sédiments. La phase opérationnelle de dragage a fait l'objet d'un protocole de suivi des matières en suspension dans l'estuaire en huit points de mesures. Une expérimentation de dynamisation des filandres a été conduite avec succès en refoulant à l'amont de celle-ci les eaux d'exhaure issues de la chambre de dépôt. En effet cela a rajeuni son fonctionnement hydrosédimentaire et écologique ;
- aménager des brèches (rehaussement de la brèche actuelle, en aval du pont et création d'une brèche, au droit de la vasière artificielle existante, en amont du pont) ;
- pour faciliter la circulation des eaux marines pénétrant dans l'estuaire lors du flot, ainsi guidées au travers de la fosse nord jusqu'à l'amont du Pont de Normandie ;
- créer un épi transversal à la digue à l'aval du pont de Normandie, perpendiculaire aux courants, de 550 m de long, destiné à retenir les sédiments fins et favoriser le dépôt de vases sur un banc existant (banc de la Passe).

Au final, des vasières biologiquement productives se sont effectivement constituées -ailleurs que prévu par les modèles-, la progression des herbus a bien été bloquée. Les objectifs principaux ont donc été atteints mais l'auto-entretien du chenal environnemental attendu n'est

pas assuré au vu du colmatage observé. De nombreuses questions se posent quant à ce dernier point : cela est-il dû au régime hydrologique de la Seine particulièrement bas ces dix dernières années, aux limites des connaissances scientifiques mobilisées dans la conception des ouvrages, à d'autres facteurs extérieurs non considérés dans les études préalables voire non connus à l'époque de l'élaboration du projet ?
Des études complémentaires (analyse de données terrain et modélisation hydrosédimentaire 3D) sont en cours pour tenter de comprendre et si possible agir sur le site en vue d'améliorer son efficacité environnementale importante pour l'estuaire de la Seine.
Par ailleurs, cette opération est un relativement bon exemple d'une concertation aux différentes étapes du projet, large et suffisamment longue pour que de nombreux partis soient écoutés et leur avis pris en compte.

4. PRÉSENTATION DU PROJET DE CONSTRUCTION D'UN REPOSOIR SUR DUNE

L'extension du GPMH a détruit le principal reposoir de pleine mer, le reposoir artificiel de la CIM (Compagnie Industrielle Maritime), pour les limicoles et d'autres espèces d'oiseaux d'eau (anatidés, sternidés, laridés, etc.) et a contribué aux perturbations hydro-sédimentaires que connait l'estuaire depuis plus d'un siècle.

L'objectif premier de cette mesure compensatoire était d'assurer *a minima* les mêmes fonctionnalités que l'ancien reposoir. Il devait donc présenter une fonction de refuge et de zone de reproduction pour certaines espèces, ayant besoin, à marée haute, de zones de repos, les vasières notamment étant soustraites à leur usage par le recouvrement de la marée. Ce projet initial, conçu en lien avec les ornithologues de la Maison de l'estuaire, consistait en la création d'un espace de 40 hectares, de 2 bassins dont l'un à niveau d'eau permanent et l'autre soumis à marnage, avec de grandes zones à sec, parsemées d'une végétation arbustive, de roselières et d'herbacées. Le bassin soumis à marée permet l'apport de vers marins et de petits crustacés fournissant ainsi une nourriture abondante aux oiseaux. La végétation offre, quant à elle, les conditions nécessaires à la nidification de certaines espèces. Afin de préserver cet espace, le projet a également prévu une ceinture constituée par une digue d'environ 2 300 ml.

Le suivi écologique de la faune avicole a été réalisé par l'observatoire de l'avifaune de l'estuaire de la Seine. Ces suivis ont rapidement révélé de fortes potentialités d'amélioration, les espèces et fonctions écologiques observées ne correspondant pas forcément à celles attendues. Des mesures complémentaires ont alors été mises en place 2 ans après la réalisation de l'ouvrage. La partie nord du site a été remodelée pour permettre aux avocettes (espèces protégée en Europe) de nicher et le tronçon de digue initialement retiré a été reconstitué avec une vanne afin de pouvoir gérer les niveaux d'eau dans l'ensemble du reposoir pour augmenter les capacités d'accueil pour les oiseaux lors des plus fortes marées. Au final, le résultat souhaité pour cet aménagement a été observé 7 ans après sa réalisation. La question de la durée pertinente de suivis avant d'envisager de rétroagir s'est posée. Elle mériterait que des experts s'y penchent de nouveau pour en tirer des enseignements utiles à d'autres projets.

Pour permettre au public de visiter le site, deux postes d'observation ont été installés à la périphérie du site en 2005. Les espèces les plus fréquemment rencontrées sur le site sont des limicoles tels que l'avocette élégante, le courlis cendré, le pluvier argenté, le bécasseau variable et des canards (colvert, tadorne de Belon, sarcelle d'hiver) parfois accompagnés d'échassiers (héron cendré, spatule blanche, aigrette, garzette, etc.). L'accessibilité de ces postes d'observation se pose également dans les conditions propres à cet espace (accès réservé, interdit au public non accompagné, etc.).

5. LE PROJET DE L'ÎLOT DU RATIER

Les suivis ornithologiques sur l'embouchure de l'estuaire de la Seine mettaient en évidence le manque de lieux de repos de haute mer pour les oiseaux marins (sternes, guifettes, mouettes, cormorans, etc.) dans la partie ouest de la baie de la Seine. Du fait de son emprise sur des zones d'anciens remblais de dragage colonisées par différentes espèces d'oiseaux, Port 2000 venait diminuer la capacité d'accueil de l'estuaire pour l'avifaune. Face à ce constat, il a été envisagé de créer un îlot pouvant accueillir prioritairement des oiseaux marins et diversifier les sites d'accueil et de tranquillité pour les différentes espèces, dans la cadre des mesures environnementales.

Photo de l'îlot

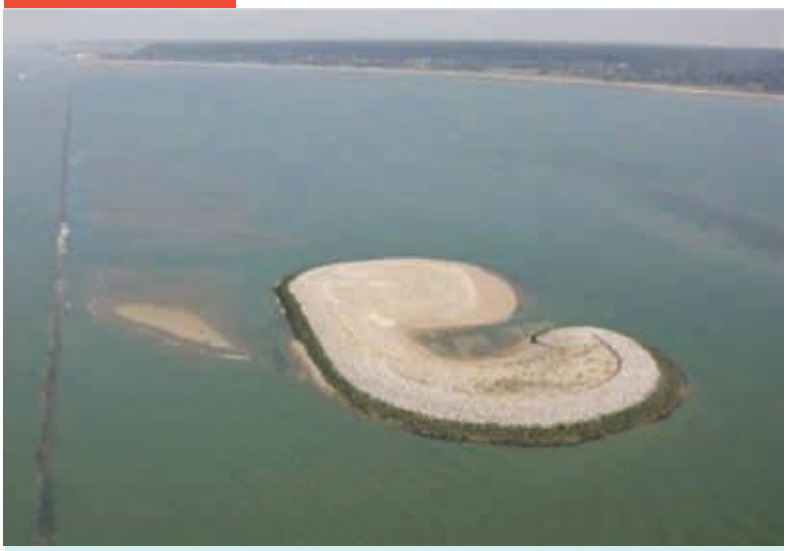


FIGURE 261

L'îlot artificiel du Ratier a été conçu par des ingénieurs du port et des spécialistes de l'avifaune. Il est situé sur des hauts fonds déjà existants (« banc du Ratier ») à l'embouchure de l'estuaire entre Honfleur et Trouville, au sud de la digue sud du chenal de navigation de la Seine (digue du Ratier). Il présente une forme en « haricot ». Les parties ouest et est, de formes circulaires, sont reliées entre elles par une digue de jonction. Sa forme en « haricot » a été décidée pour sa meilleure résistance aux conditions de houle et pour une spécialisation des deux zones en fonctions des espèces avifaunistiques ciblées.

L'îlot présente une surface d'environ 5 ha à marée basse. A marée haute, à cause des niveaux différents par zones, l'île présente 3 secteurs émergents pouvant accueillir différentes espèces d'oiseaux marins sur une superficie totale de 1,5 ha. L'îlot dispose également de 2 étendues d'eau : une baie ouverte sur le sud et un lagon centré dans la partie est qui se remplit pendant les

Ilot (dimensions : 320m x 200m)

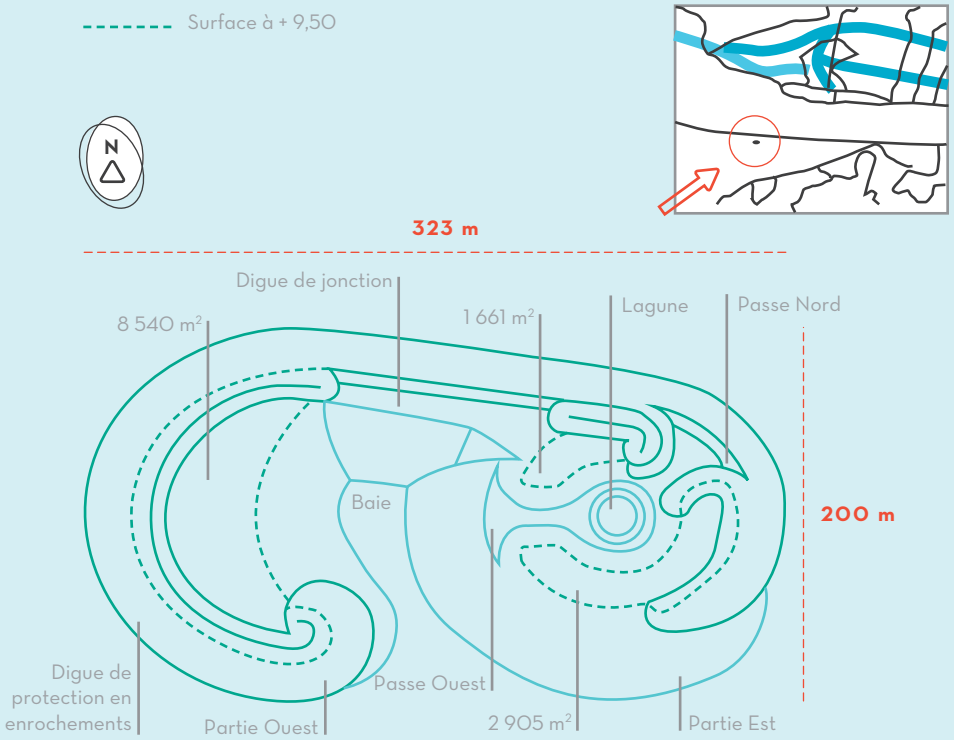


FIGURE 262

marées de vives eaux, puis se vide graduellement grâce à l'effet drainant du sable sous-jacent. Les pentes de l'ouvrage ont été adoucies pour permettre l'éventuel accueil de mammifères marins.
Des suivis sont menés par les équipes de la Maison de l'Estuaire. Ils procèdent à des comptages d'oiseaux depuis la côte et depuis la mer ainsi qu'avec une caméra implantée sur le site pour limiter les allers sur le site et déranger le moins possible les oiseaux. Des suivis botaniques sont également réalisés par la Maison de l'Estuaire. L'accès à l'îlot est réservé aux scientifiques et strictement interdit aux plaisanciers afin de préserver la tranquillité des oiseaux.
Dès les premiers mois, plus de mille oiseaux ont été dénombrés sur l'ilôt et, plus de 60 espèces différentes ont été observées depuis 2005 selon les observations de la Maison de l'estuaire. Le goéland argenté, le grand cormoran et le goéland marin représentent à eux trois 78 % des effectifs totaux de l'année. Le tadorne de Belon, le canard colvert et l'huîtrier-pie arrivent ensuite. Enfin, des phoques veau-marin ont également été observés occasionnellement. Cet aménagement se révèle donc très pertinent.

Avec le recul offert par plusieurs années d'expériences de restaurations écologiques, certains s'accordent aujourd'hui, à tirer comme principaux enseignements de ces types de projet que d'une part, une forte pluridisciplinarité à la conception et dans le suivi des impacts de ce projet (sédimentologues, écologues, etc.) est de nature à augmenter l'efficacité environnementale de ces travaux de génie écologique et que d'autre part ceux-ci doivent être conçus de manière à être le plus facilement modifiables en fonction des observations faites à l'occasion des suivis scientifiques qui doivent être prévus sur au minimum une dizaine d'années.

POUR EN SAVOIR PLUS
Grand Port Maritime du Havre
maisondelestuaire.net

GOUVERNANCE

Maître d'ouvrage : Grand Port Maritime du Havre
Coût :
Budget total des mesures d'accompagnement du projet Port 2000 (y compris les suivis): 46 millions d'euros.

Reposoir sur dune
Maîtrise d'œuvre : GPMH
Entreprise : GTM Terrassement
Gestionnaire : GPMH en lien avec La Maison de l'Estuaire
Propriétaire : GPMH et GPMR

Ilot du ratier
Maîtrise d'œuvre : GPMH
Entreprise : Groupement Atlantique Dragage (mandataire) – Boskalis International BV
Gestionnaire : Maison de l'Estuaire pour une durée de 20 ans
Propriétaire : GPMH pour une durée de 20 ans puis GPMR.

Réhabilitation de vasières
Maîtrise d'œuvre : GPMH
Entreprise : groupement Sodranord, Van Oord, In Vivo
Gestionnaire : GPMH en lien avec La Maison de l'Estuaire et le GPMR
Propriétaire : GPMR

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

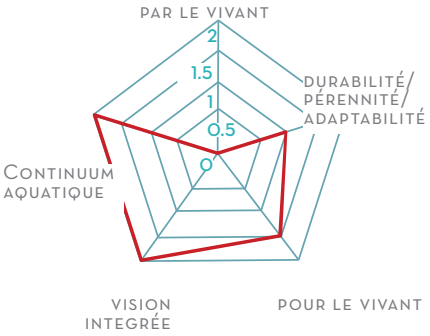


FIGURE 263

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN: LOIRE-BRETAGNE
RÉGION: LIMOUSIN
DÉPARTEMENT: HAUTE VIENNE
COMMUNE: 17 COMMUNES, PUIS 18 AU 01/01/2011

FICHE 3

Une méthode originale pour déterminer la Trame Verte & Bleue de Limoges Métropole

La communauté d'agglomération Limoges Métropole réunit 18 communes. Différents espaces naturels (agricoles, bocagers, boisés, humides) sont présents sur son territoire, dont certains revêtent une importance patrimoniale. Ces espaces accueillent une biodiversité riche et variée mais ils subissent la pression de l'urbanisation et certains aménagements peuvent entraîner une dégradation de ces milieux ou les isoler en interrompant les connexions biologiques

Afin d'inverser cette tendance, la communauté d'agglomération Limoges Métropole a lancé une étude, en 2009, pour créer un « schéma directeur des espaces naturels ». Cette étude vise à définir puis hiérarchiser les éléments majeurs du patrimoine naturel de Limoges Métropole afin de pouvoir les intégrer dans un document-cadre servant d'outil à l'aménagement du territoire communautaire et de concilier ainsi développement économique et préservation de la nature. L'étude comporte 2 étapes :

- *étape 1 : un état des lieux des connaissances sur la biodiversité locale ;*
- *étape 2 : le diagnostic et les propositions d'actions concrètes à mettre en œuvre à court, moyen et long terme (5, 10, 20 ans) notamment la mise en place d'une trame verte et bleue à l'échelle de l'agglomération.*

1. CONSTRUCTION D'UN OUTIL POUR L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE : LA TRAME VERTE ET BLEUE DE LIMOGES MÉTROPOLE

La trame verte et bleue de Limoges Métropole représente un outil de partage des connaissances en identifiant et cartographiant les continuités écologiques. Il doit permettre de réfléchir à l'aménagement du territoire et attirer l'attention des élus sur les zones à protéger. L'objectif de l'étude trame verte et bleue est d'établir :

- une identification du réseau écologique, constitué des « cœurs de nature » (c'est-à-dire des réservoirs de biodiversité) et des corridors écologiques, ainsi que des enjeux liés ;
- un schéma prospectif permettant d'engager rapidement des actions en faveur de la restauration et de la conservation de la biodiversité.

1.1. Détermination des cœurs de nature et des corridors écologiques

Le réseau écologique local a été analysé à partir de couches d'occupation du sol, au moyen d'un Système d'Information Géographique (SIG). Ce travail de cartographie a débuté par le recueil des données existantes (dont un maximum de données cartographiées et géoréférencées). Pour cela, Limoges Métropole a pu compter sur une aide importante du réseau associatif local. Les acteurs et experts locaux ont également été consultés sur les points suivants :

- les éléments fragmentant le territoire ;
- la bibliographie permettant de caractériser les cœurs de nature ;
- la connaissance des enjeux liés à la faune et à la flore.

Une fois les données numérisées, le bureau d'étude a pu travailler à la détermination des cœurs de nature puis des corridors écologiques qui les relient.

1.1.1. Détermination des cœurs de nature

La cartographie de l'occupation des sols a permis de répartir les milieux naturels dans 3 sous trames : les milieux boisés, les milieux prairiaux/bocagers, les milieux humides/aquatiques.

Identification des cœurs de nature (CDN) :

L'identification des cœurs de nature a consisté à évaluer les potentialités écologiques des espaces naturels de chaque sous-trame. Au sein de l'aire d'étude, la désignation des CDN est établie selon la valeur d'un indice qui traduit les potentialités écologiques de chaque ensemble continu d'espaces naturels. Cet indice reflète le potentiel, pour un ensemble continu d'espaces naturels ou semi-naturels, de constituer une zone importante pour la biodiversité à l'échelle du territoire. Il prend à la fois en compte :

- la naturalité de l'occupation du sol de l'ensemble continu d'espaces naturels ;
- sa surface ;
- sa compacité ;
- son hétérogénéité ;
- sa connectivité.

Sélection des cœurs de nature :

Les périmètres de protection et d'inventaires de 8 ZNIEFF (boisées et/ou humides) existantes ont été superposés aux cœurs de nature présélectionnés.

Deux cœurs de nature à dire d'experts ont également été ajoutés, ce qui donne au final :

- 13 cœurs de nature pour la sous-trame des milieux humides ;
- 8 cœurs de nature pour la sous-trame des milieux bocagers ;
- 22 cœurs de nature pour la sous-trame des milieux boisés.

1.1.2. Détermination des corridors écologiques

La méthode utilisée pour mettre en évidence les corridors écologiques s'appuie sur la théorie mathématique du « chemin de moindre coût ». Cette méthode permet de déterminer, à partir d'une carte des coûts de déplacement, le chemin le moins coûteux pour une espèce reliant deux cœurs de nature. Dans ce cadre, la carte des coûts de déplacement est représentée par la couche d'occupation du sol dans laquelle chaque type d'habitat est affecté d'un coefficient de résistance au déplacement. Ce coefficient de résistance est proportionnel à la difficulté qu'ont les espèces animales à traverser une distance unitaire du milieu en question.

La dispersion des espèces à travers le paysage a donc été simulée pour identifier les axes des corridors écologiques existants, ceux à restaurer ou à créer. Afin de confronter les données théorique issues de l'outil SIG à la réalité, 3 espèces cibles (1 par sous trame) ont été choisies : chaque espèces cible doit être suffisamment connue et commune pour être retrouvée sur tout le territoire. Le choix final est le résultat de discussions et de compromis. Les espèces cibles retenues sont :

- sous trame des milieux boisés : l'écureuil ;
- sous trame des milieux prairiaux / bocagers : le lézard vert ;
- sous trame des milieux humides / aquatiques : la loutre.

La perméabilité des milieux vis-à-vis des espèces caractéristiques de chaque sous-trame a été évaluée à partir des différents réservoirs de biodiversité de cette sous trame. Puis, divers critères de pondération de l'occupation du sol ont été définis selon la difficulté de franchissement de chaque milieu :

- nature de l'occupation du sol ;
- intensité des perturbations humaines (proximité des espaces anthropisés) ;
- densité du maillage bocager ;
- densité du réseau hydrographique.

Mode de représentation du réseau écologique

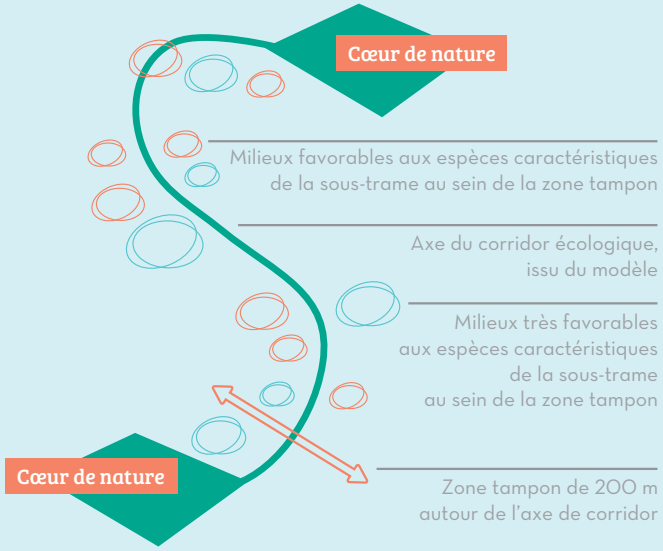


FIGURE 264

1.2. Évaluation et présentation du réseau écologique

Un atlas cartographique du réseau écologique a été réalisé pour chaque sous trame. Chaque carte est accompagnée d'une fiche qui synthétise les informations suivantes :

Cœurs de Nature

- identification des enjeux et menaces existantes et potentielles en termes de fonctionnalité écologique ;
- analyse de la fragmentation du CDN et des enjeux inhérents : diminution des surfaces du CDN, isolement de populations, risques de collision routière.

Corridors écologiques

- analyse de la fonctionnalité des corridors par tronçons homogènes : nature des milieux constitutifs du corridor, traversée de secteurs artificialisés... ;
- existence de couloirs alternatifs possibles ;
- analyse des principales ruptures de corridors par des infrastructures linéaires de transport ;
- analyse des risques de collision routière.

Analyse transversale

- orientations et perspectives en terme de gestion, de programme d'action ;
- enjeux particuliers relatifs à une espèce ou un cortège d'espèces.

La trame sera évaluée et révisée dans 5 ans.
En 2013, une étude est lancée pour connaître les déplacements de la loutre et évaluer la mobilité des individus. L'objectif final est de savoir s'ils utilisent les corridors écologiques. Cette étude est menée en partenariat avec l'université de Montpellier et le Groupe Mammalogique et Herpétologique du Limousin.

1.3. Mise en œuvre de la Trame Verte et Bleue : perspectives

Petit rappel : contrairement aux trames vertes et bleues régionales et nationales qui seront prises en compte par tous les PLU, la trame verte et bleue de Limoges Métropole (locale) ne s'impose pas directement dans les décisions d'aménagement du territoire. Sauf, si celle-ci est intégrée à un PLU qui organise le développement des communes en fixant les règles d'urbanisme et donc en définissant les zones de nature à préserver.

La trame verte et bleue permet de définir les zones où les continuités écologiques doivent être rétablies notamment au niveau des franchissements de cours d'eau par les axes routiers majeurs et aux intersections des voiries avec les axes de déplacements de la faune (Hérissons, Batraciens, etc).

Suite à la définition de la trame verte et bleue, la direction de la voirie s'est engagée à mettre en place des systèmes de passage privilégiés pour la faune lors des travaux de réfaction de la voirie. Par ailleurs, lorsque la collectivité doit acheter des terrains au titre de mesures compensatoires, l'existence d'une trame verte et bleue lui permet de mieux appréhender les enjeux de maitrise foncière et de gestion de son territoire en identifiant immédiatement les secteurs favorables à la mise en œuvre des mesures compensatoires.

L'outil trame verte et bleue permet d'adapter la gestion des espaces publics et d'intégrer la problématique des continuités écologiques à toutes les échelles de projet et dans toutes les démarches collectives ou privées.

La trame a été validée en mai 2011 par le Comité technique, puis en mai 2012 par le Comité de pilotage composé des élus représentant les 18 communes de l'agglomération. Il est donc encore trop tôt pour donner lieu à des projets de restauration. Cependant, l'opération suivante réalisée en 2012 illustre un exemple d'application.

2. RENATURATION DE LA PARTIE BUSÉE DU CHAMBEAU

Le ruisseau du Chambeau était busé sur 100 m, peu après sa source. Il se situe dans un secteur en cours d'extension urbaine sous la forme de quartiers résidentiels. L'objectif de l'opération est de restaurer la continuité écologique et les fonctionnalités hydrauliques du cours d'eau. Pour cela, la buse en béton est supprimée et le lit est reconstitué en recréant des habitats aquatiques.

Schéma du projet

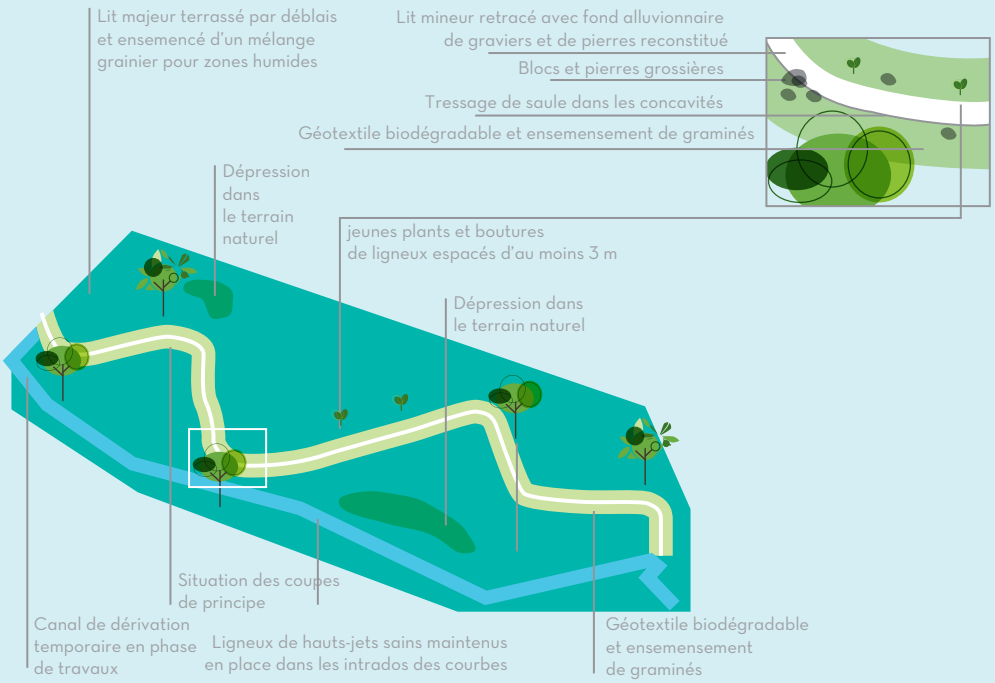


FIGURE 265 EGIS

Pour déterminer la sinuosité et le dynamisme érosif du cours d'eau, la portion de cours d'eau en sortie du busage (celle qui n'est pas recouverte) a été prise comme référence. Le cours d'eau étant peu érosif, sa capacité naturelle d'érosion n'a pas été utilisée pour son reméandrage.
Suite aux travaux réalisés en 2012, un espace semi-naturel pourra être aménagé par la Direction des Espaces verts de la ville de Limoges.
Cette opération de renaturation apparait dans un film réalisé à l'automne 2012 par le ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie :
http://www.dailymotion.com/user/developpement-durable/3#video=xve5r5
Avec cet exemple on voit que les programmes TVB et DCE convergent vers un même objectif : la restauration de la continuité écologique des cours d'eau. L'un consiste à mettre en place un outil de gestion pour préserver des zones d'intérêt et les corridors qui les relient et l'autre à agir sur les milieux pour restaurer leur fonctionnement.

POUR EN SAVOIR PLUS
www.agglo-limoges.fr

GOUVERNANCE

Trame Verte & Bleue de Limoges Métropole
Composition du comité techniques : les associations environnementales locales, les établissements publics (Onema, ONCFS...), les services techniques de la ville de Limoges, la DREAL et le Conservatoire Botanique National
Composition du comité de pilotage : les maires des 18 communes, la DREAL, le conseil régional et le Syndicat Intercommunal d'Etudes et de Programmation de l'Agglomération de Limoges (SIEPAL).
Etude TVB
Maitre d'ouvrage: Communauté d'agglomération Limoge Métropole
Réalisation de l'étude : Bureau d'étude Biotope
Coût : 30 400 € HT
Financement :
Conseil Général : 5%
Etat : 20%
Agglomération de Limoges Métropole : 75%

Renaturation du Chambeau
Maître d'ouvrage: Communauté d'agglomération Limoges Métropole
Réalisation de l'étude technique : EGIS Eau
Travaux : Arbofor
Coût : 140 000 € HT
Financement :
Agence de l'eau : 50%
Conseil régional : 20%
Agglomération de Limoges Métropole : 20%
Conseil général : 10%

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

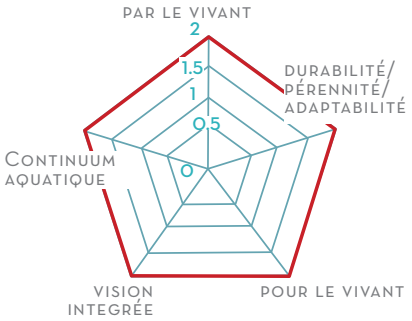


FIGURE 266

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN: RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE
RÉGION: RHÔNE-ALPES
DÉPARTEMENT: SAVOIE
COMMUNES: SAINT MARTIN DE BELLEVILLE

FICHE 4

Restauration d'une zone humide d'altitude : restauration des milieux humides de Val Thorens

1. HISTOIRE DE L'ÉVOLUTION DE L'ARVE

Saint Martin de Belleville est une commune qui compte 401 zones humides représentant une surface de 601 hectares soit 3,7% de son territoire. Suite à l'aménagement d'une retenue d'altitude sur le domaine skiable de Val Thorens, le parc national de la Vanoise (PNV) a suggéré à la Société des Téléphériques de Tarentaise Maurienne (SETAM) de financer une étude approfondie des zones humides du domaine skiable comme mesure d'accompagnement. Cette mesure consiste à financer un projet sur 2 ans pour améliorer la gestion des zones humides du domaine skiable, ainsi que leur cohabitation avec les activités touristiques (ski en hiver et VTT en été).

1. ETUDE DES ZONES HUMIDES DE VAL THORENS

L'objectif premier était de caractériser les zones humides du domaine skiable. Pour cela, l'unité Ecosystèmes Montagnard d'Irstea, mandatée pour l'étude, s'est appuyée sur un inventaire réalisé entre 2006 et 2007 sur la Tarentaise par le conservatoire du patrimoine naturel de la Savoie (CPNS) et le parc national de la Vanoise (PNV), avant de réaliser une évaluation in situ des zones humides et déterminer leur fonctionnement.

La seconde étape a consisté à identifier les impacts liés aux activités de la station de Val Thorens ainsi que leurs causes. L'analyse de photographies aériennes a permis de retracer l'historique du site et de déterminer le fonctionnement initial des milieux (avant le développement de la station dans les années 1970). Au final, 2 types de problématiques ont été mises en évidence par l'étude : la perturbation de l'hydrologie (fossés de drainage, infrastructures linéaires (pistes et routes notamment), détournement ou surcreusement de cours d'eau) et la fréquentation des sites (engins motorisés et piétinement animal).

Ces causes se traduisent par des impacts directs et indirects observables sur les milieux humides, comme présenté dans la **FIGURE 267**.

Toutes les données récoltées ont servie à alimenter un outil cartographique SIG (Système d'Information Géographique) utilisable par les gestionnaires du domaine skiable (direction des pistes et remontées mécaniques). Il permet de localiser les zones humides, de les situer par rapport aux principales infrastructures, d'indiquer leur mode d'alimentation en eau ainsi que les contraintes socio-économiques (ex pâturage). Il donne une vision globale du domaine skiable pour établir des mesures de gestion et de restauration adaptées.

3. RÉHABILITATION

Les mesures de réhabilitation concernent principalement la restauration du régime hydraulique ou la revégétalisation des zones tourbeuses mises à nue par l'érosion.

Ces mesures restent simples de mise en œuvre : installation de seuils en bois pour relever le niveau d'eau, diminution du débit et dispersion de l'eau avec des blocs placés en sortie de buse ou revégétalisation des zones érodées. Elles sont réalisées par la SETAM ce qui permet aux employés ainsi formés de mieux comprendre le fonctionnement d'une zone humide.

IMPACTS SUR LES MILIEUX HUMIDES

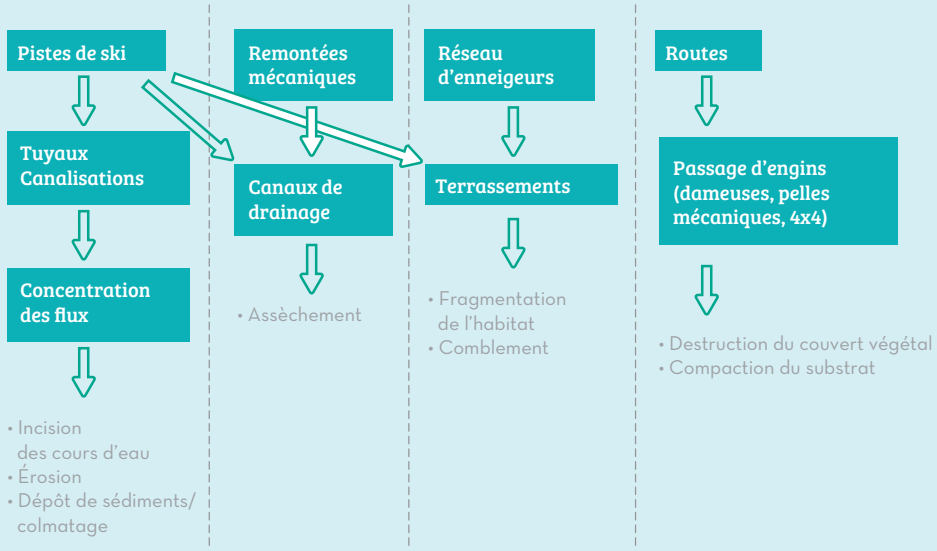


FIGURE 267

2. DÉFINITION ET MISE EN ŒUVRE DU PLAN D'ACTIONS (2010-2015)

Suite à l'étude, un plan d'actions comportant 3 volets a été défini :

- la **réhabilitation** des zones humides dégradées ;
- la **conservation** des zones humides par la modification des pratiques des aménageurs du domaine skiable ;
- la **valorisation** et la sensibilisation du public.

<u>La restauration de la zone humide de la Moutière</u>

La zone humide de la Moutière est protégée par un arrêté de protection de biotope. Une première série de travaux de restauration a été initiée en 2010 et des corrections ont été apportées en 2011. En 2012, un transformateur localisé en bordure de la zone humide a été supprimé.

2010

Réalisation d'un fossé pour étaler le flux d'eau entrant ;
Mise en place d'un tuyau (reconnexion hydraulique d'un secteur isolé) ;
Revégétalisation d'une zone d'érosion par transplantation sur fascines ;
Réalisation de seuils sur un cours d'eau incisé ;
Blocs sur une portion des cours d'eau entrants pour disperser l'eau.

2011

Suppression de dalles en béton ;
Renforcement des blocs sur les entrants ;
Installation de 2 petits seuils sur des drains de l'altisurface ;
Entretien/renforcement de la zone revégétalisée.

2012

Suppression du transformateur.

Zone humide de la Moutière

FIGURE 268

La restauration de la zone humide du Génépi et de la Christine

La zone humide du Génépi a été restaurée en 2011. Contrairement à la zone humide de la Moutière, il a suffi de creuser une petite arrivée d'eau depuis la rivière pour rétablir une alimentation en eau constante durant l'été. Afin d'éviter la déviation du flux d'eau le long d'une ancienne voie de circulation, un petit barrage a également été mis en place.

La voie de circulation qui traversait auparavant la zone humide et qui était abandonnée a été condamnée.

Sur la zone humide de la Christine, 3 seuils avec exutoires ont été mis en travers d'un drain, pour permettre à l'eau de déborder sur la zone auparavant en cours d'assèchement.

En 2012, deux nouvelles zones humides ont été réhabilitées (ZH 535 et ZH 2) et un ouvrage a été corrigé sur la zone humide de la Christine (ZH 531).

CARTE REPRÉSENTANT LA POSITION DES 5 ZONES HUMIDES RÉHABILITÉES ENTRE 2009 ET 2012 (LA MOUTIÈRE-ZH 523, GÉNÉPI-ZH 526, CHRISTINE-ZH 531, ZH 535 ET ZH 2)

FIGURE 269

Un suivi des zones humides réhabilitées est réalisé chaque année pour une période de 5 ans. Selon l'importance des travaux de réhabilitation accomplis, il peut consister en un suivi de végétation et piézométrique auxquels s'ajoutent, pour la Moutière, des analyses d'eau et de sol et un profil en large des cours d'eau. Un suivi photographique est également réalisé. L'ensemble de ces données permet de comprendre le fonctionnement des zones humides concernées et d'évaluer le succès des opérations de restauration.

En 2013, l'accent sera donc mis sur les mesures de conservation, car les zones humides qui pouvaient être réhabilitées ont déjà fait l'objet de travaux.

4. CONSERVATION

L'objectif des mesures de conservation est de favoriser le maintien d'une surface de zones humides interconnectées sur le domaine skiable en minimisant les interactions avec les activités touristiques et pastorales. Les mesures de réhabilitation ont concerné en priorité des zones humides centrales comme la Moutière avant d'être étendues à d'autres zones plus excentrées.

La mise en place d'un plan de circulation

Dans le cadre du plan d'actions, Irstea a proposé à la SETAM de mettre en place un plan de circulation afin de limiter les impacts des engins lourds et des 4x4 sur le domaine skiable l'été. Ce plan prévoit la condamnation de l'accès aux voies de circulation qui ne sont plus utiles à l'exploitation de la station mais qui sont encore empruntées occasionnellement par d'autres usagers. En outre, les conducteurs d'engins lourds de la SETAM et les conducteurs de dameuses du service des pistes ont été sensibilisés à la préservation des zones humides à l'automne 2010. Une carte avec le plan de circulation leur a ensuite été distribuée au printemps suivant.

Le renforcement du plan de circulation figure parmi les perspectives de 2013. Il est prévu d'utiliser une voie de circulation alternative afin d'éviter la zone humide 535. En effet, la zone humide 535 est actuellement traversée par une voie de circulation qui la coupe en deux. Or, une ancienne voie de circulation longeant l'actuelle, mais étant en-dehors du périmètre de la zone humide, existe. Cela permettrait de redonner à la zone humide un espace cohérent et non fragmenté.

VOIES DE CIRCULATION DANS ET EN BORDURE DE LA ZH 535

FIGURE 270

Le balisage lors des travaux sera également renforcé en 2013 sur les chantiers proches ou dans des zones humides. Le rôle de ces balises est de rappeler aux conducteurs que le passage est interdit. Des balises visibles toute l'année feront l'objet d'un essai en 2013 sur les zones humides du Génépi et de la Christine afin d'informer les dameurs et les conducteurs de chenillette de la nécessité d'éviter ces zones au printemps.

5. UNE RÉELLE PRISE DE CONSCIENCE PAR L'ENSEMBLE DES ACTEURS

L'attention portée aux zones humides par la station de Val Thorens s'inscrit dans un contexte plus global de considération de ces milieux à l'échelle de la commune de Saint-Martin-de-Belleville à partir des années 2000. La démarche de prise en compte des milieux humides par la SETAM est indépendante de la démarche communale, mais la commune, à travers le conseil municipal, est le point de rencontre des différents acteurs. Ensemble, elles ont impulsé une dynamique s'étendant à l'ensemble du territoire de la commune et donc de la zone des Menuires et à d'autres stations de la Tarentaise. La station des Menuires s'est inspirée de la démarche de Val Thorens pour construire un plan d'actions similaire.

Ainsi toute la commune de Saint-Martin-de-Belleville se trouve aujourd'hui engagée dans un processus de gestion et de restauration écologique des zones humides. La mise en œuvre des mesures compensatoires a laissé place à une prise de conscience et à une dynamique qui engage tous les acteurs.

Ainsi, il apparaît qu'au cours des différents inventaires zones humides et avec l'aide des mesures de compensation et d'accompagnement faisant suite aux grands projets d'aménagement de la commune de Saint-Martin-de-Belleville et de la station de Val Thorens, les zones humides sont devenues de plus en plus visibles socialement et ont acquis une existence publique. Préserver les zones humides et les prendre en compte lors de l'aménagement de la station impliquent un changement des pratiques existantes.
Au vu des intérêts divergents entre les stations de sports d'hiver et les zones humides, les différents acteurs doivent faire des compromis et hiérarchiser leurs intérêts.

POUR EN SAVOIR PLUS :
www.mairie-smb.com
www.irstea.fr/gaucherand

GOUVERNANCE

Maitre d'ouvrage : Société des téléphériques de Tarentaise Maurienne (SETAM).
Etude réalisée par : IRSTEA

Coûts :
Etude (sur 2ans) : 30 000 €.
Suivis et accompagnement des mesures de réhabilitation (en 2010, 2011 et 2012) : entre 5 000 et 10 000 €/an.

Concordance des objectifs du projet en fonction de la définition de l'ingénierie écologique donnée au chapitre 1

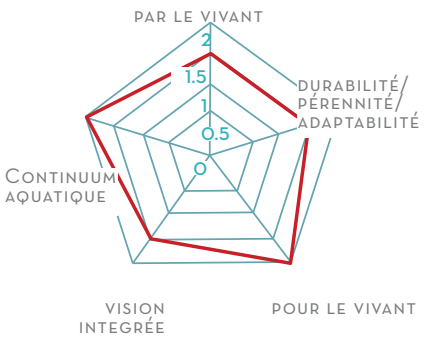


FIGURE 271

Situation géographique :

BASSIN : LOIRE-BRETAGNE
SOUS-BASSIN: VILAINE
RÉGION: PAYS-DE-LA-LOIRE
DÉPARTEMENT:
LOIRE-ATLANTIQUE
COMMUNE: AVESSAC

FICHE **5**

Le génie végétal en rivière face aux dégâts de ragondins

CONTEXTE

Le site d'étude correspond à un tronçon du cours d'eau du Don, localisé à proximité de sa confluence avec la Vilaine. Des dégâts importants liés à la présence du Ragondin (Myocastor coypus) ont été observés sur les berges. Les galeries creusées par le rongeur ont provoqué une fragilisation et une érosion du sol, qui ont contribué en certains endroits à un élargissement significatif du lit de la rivière.
Les parcelles agricoles voisines sont des prairies de fauche. Le Syndicat intercommunal du bassin versant du Don, gestionnaire du cours d'eau, cherchait à conserver en accord avec les agriculteurs, un espace non fauché à proximité de la berge pour faciliter le développement d'une ripisylve arborée. La régénération naturelle de la végétation était cependant remise en cause par une forte présence du Ragondin qui, par son appétit pour les jeunes pousses de ligneux, impactait directement la végétation rivulaire.

Une expérimentation a été mise en place au printemps 2009 pour évaluer les modalités techniques d'un reboisement avec des boutures de salicacées (saule et peuplier) sur ce type de milieux très contraint.
Les questions posées étaient : 1) est-il possible d'envisager l'installation d'un cordon boisé à base de boutures de salicacées en berges de cours d'eau soumises à une forte pression invasive du ragondin ? ; 2) quelles sont dans cette situation, les méthodes de boisement techniquement et économiquement les plus adaptées ?

SITUATION INITIALE EN 2009 : AFFAISSEMENT LOCALISÉ DE LA BERGE ET ÉLARGISSEMENT DU LIT

FIGURE 272 A.EVETTE

INSTALLATION (À GAUCHE) ET SITUATION EN FIN DE PREMIÈRE SAISON DE VÉGÉTATION (À DROITE)

FIGURE 273 A.EVETTE

SCHÉMA EXPÉRIMENTAL

L'expérience a consisté premièrement à tester plusieurs espèces ligneuses. Ces espèces appartiennent à la famille des salicacées. Trois d'entre elles se développent spontanément à proximité du site d'étude, elles ont fait l'objet de prélèvement de boutures sur place. Il s'agit de *Salix alba, S. atrocinerea et S. fragilis*. Les autres sont en général présentes dans la région ou dans les départements limitrophes, mais sont absentes à proximité du site. Les boutures de ces espèces sont issues d'une production en parc à-pieds-mères installés en pépinière (Guémené-Penfao). Il s'agit de *Salix purpurea, S. Triandra, S. viminalis et Populus nigra*.

Deuxièmement, l'expérience visait à évaluer les techniques d'installation, et en particulier la taille des boutures et l'effet d'une mise en défens. La taille des boutures est un critère qui influence la vitesse d'installation des salicacées ; nous avons retenu deux longueurs différentes (40 et 80 cm). La mise en défens était constituée d'un grillage plastique maintenu au sol et soutenu par des piquets métalliques ; elle permettait une protection contre les rongeurs sur une hauteur de 80 cm. Elle a été mise en place sur la moitié du dispositif.

Quelle que soit leur longueur, les boutures ont été enfoncées de façon à laisser dépasser la partie sommitale de 10 cm au-dessus du sol. Chaque espèce était installée sur des parcelles unitaires de 6 boutures (2 x 3) espacées les unes des autres de 40 cm. La distance entre les parcelles est de 80 cm. La surface du dispositif a été recouverte par un géotextile souple biodégradable en feutre de paillage composé de fibres végétales compactes (1 000 g/m^2), ceci afin de contenir la concurrence herbacée.

L'ensemble a constitué un linéaire de 100 m et a été installé selon un plan d'expérience comportant quatre répétitions et permettant une comparaison des espèces testées et des techniques utilisées.

CROISSANCE EN HAUTEUR DES BOUTURES APRÈS TROIS SAISONS DE VÉGÉTATION, À GAUCHE PROTÉGÉES PAR LES MISES EN DÉFENS, À DROITE SOUMISES À LA PRESSION DES RAGONDINS

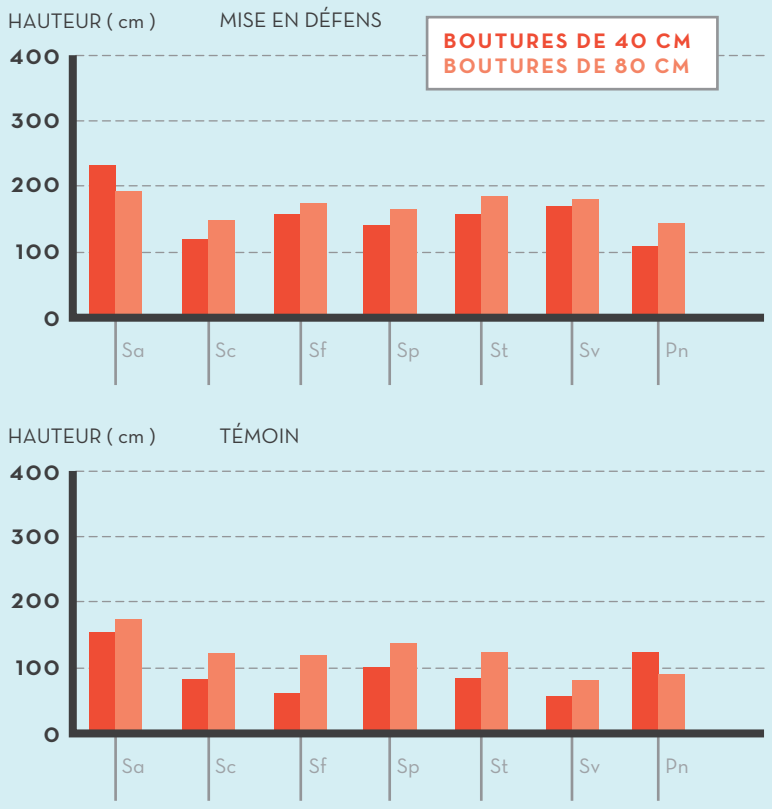


FIGURE 274

SUIVI ET RÉSULTATS

Les observations et mesures ont été réalisées annuellement à la fin des trois premières saisons de végétations. Elles ont portées sur les taux de survie, la croissance (hauteur totale et longueur cumulées de l'ensemble des tiges issues de la bouture) et les dégâts occasionnés par les ragondins (abroutissements). On a constaté en premier lieu des performances globalement intéressantes de l'ensemble des espèces testées (survie toujours supérieure à 70 %, longueurs cumulées supérieures à 2 mètres). Même si des différences de croissance ont pu être observées, les résultats des espèces les moins performantes restent tout-à-fait satisfaisants et ne remettent pas en cause leur utilisation. Il convient de souligner une relative diversité parmi les espèces testées en termes de vitesse d'installation mais aussi de type de développement (arbustif ou arborescent), l'ensemble créant une certaine hétérogénéité verticale.

Les traces d'abroutissement observées exclusivement dans les zones non protégées et les croissances comparées permettent de mettre en évidence l'effet des mises en défens. L'avantage apporté est net (plus forte croissance des arbres) mais n'a finalement pas été déterminant. Les zones boisées hors protection ont également atteint un développement suffisant pour, à partir de la troisième année, ne plus être menacés par le Ragondin. Le comportement de ce dernier semble indiquer des différences d'appétence (peu ou pas d'abroutissements pour *S. purpurea et P. nigra*).

L'effet de la taille des boutures est significatif et montre une vitesse d'installation plus élevée pour les boutures longues (80 cm) comparée aux boutures courtes (40 cm). Même si les différences s'atténuent avec le temps, elles restent largement mesurables au bout de 3 ans.

Il est intéressant de comparer les coûts des différentes techniques utilisées et leur efficacité sur le développement des espèces de salicacées (taux de survie et croissance en hauteur). Le surcoût lié à l'utilisation de boutures longues est compris entre 10 et 20 %, alors que l'installation de mises en défens fait doubler le coût total du projet. Si on se base sur les performances des arbres installés, les différences restent à l'avantage de la mise en défens mais l'écart est proportionnellement moins important. Ainsi, lorsque l'on se place sur un rapport coût / efficacité, l'utilisation des boutures longues est beaucoup plus avantageuse que l'installation d'une mise en défens.

APPLICABILITÉ, PERSPECTIVES

Ces travaux ont été conduits sur un seul site et les résultats observés ne peuvent donc pas être directement transposables dans des contextes différents. Cependant les conditions stationnelles et le niveau d'infestation du Ragondin sont relativement classiques et représentatives de situations largement répandues en rivière de plaine.

L'expérience a montré qu'il est possible de mettre en place un cordon boisé à partir de boutures de salicacées en bord de rivière soumis à une forte pression

Bilan coût / efficacité des techniques utilisées

TRAITEMENTS	EFFETS		COUTS[1]
	LONGUEURS CUMULÉES DES TIGES	TAUX DE SURVIE (%)	
NON PROTÉGÉ – BOUT. DE 40 CM	230.6	77.7	2.250 €
NON PROTÉGÉ – BOUT. DE 80 CM	364.0	88.9	2.810 €
MISE EN DÉFENS – BOUT. DE 40 CM	412.1	88.9	5.160 €
MISE EN DÉFENS – BOUT. DE 80 CM	589.5	96.8	5.720 €

1 Les coûts sont calculés pour un linéaire de 100m de longueur et incluent la fourniture, la mise en, place des boutures et de l'éventuelle clôture, auxquels il faut rajouter le coût fixe correspondant à la fourniture et à l'installation du géotextile pour 1.950 €.

TABLEAU 6

invasive du Ragondin. Après trois années, le développement des arbres est suffisant pour estimer que l'impact du rongeur restera limité. Sur les zones boisées, les racines ont permis le maintien de la berge et les problèmes d'érosion observés initialement ont disparu.
L'importance des dégâts des ragondins sur les arbres sont très variables suivant les années et les saisons, et dépendent de facteurs climatiques qui peuvent faire varier leur régime alimentaire. Leur impact ne peut pas facilement être évalué à l'avance, et par précaution il convient d'envisager les moyens de faciliter une installation des ligneux la plus rapide possible en prévoyant une bonne densité de boutures et des vitesses de croissance élevées.

GOUVERNANCE

Partenariat: Syndicat intercommunal du bassin versant du Don
Irtsea-Grenoble
Office national des forêts (Pôle National des Ressources Génétiques Forestières, Guémené-Penfao)
Coût 4.000 euros
(Installation, hors suivi expérimental)
Financeurs :
Syndicat intercommunal du bassin versant du Don

Etat du boisement en quatrième année

FIGURE 275 V. BRETON

CONCORDANCE DES OBJECTIFS DU PROJET EN FONCTION DE LA DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE DONNÉE AU CHAPITRE 1

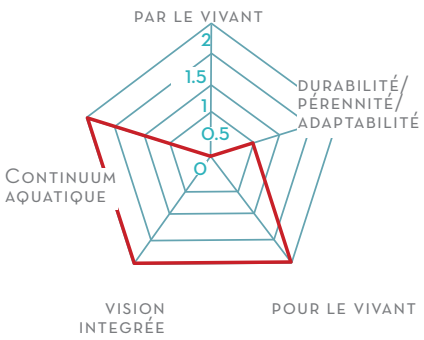


FIGURE 276

SITUATION GÉOGRAPHIQUE :

BASSIN : RHÔNE-MÉDITERRANÉE CORSE
RÉGION: FRANCHE COMTÉ
DÉPARTEMENT: DOUBS
COMMUNE: FRASNE,
TOURBIÈRE DES LEVRESSES ET SARRE À CORDIER

FICHE 6

Restauration hydraulique des tourbières

1. ETAT DES LIEUX DES TOURBIÈRES

Les tourbières des Leuresses (12 ha) et Sarre à Cordier (14 ha) ont été exploitées à la fin du 19ième siècle. Cette exploitation a entrainé un rajeunissement du massif tourbeux, le faisant « régresser » du stade de tourbière « haute active » au stade de tourbière « de transition aux espèces faunistiques et floristiques d'intérêts majeurs ». En 1985, la commune, alors propriétaire des terrains, a fait classer la zone en réserve naturelle puis le site a été classé en 1999 en zone Natura 2000. En 2003, la communauté de commune, alors gestionnaire des zones humides, a classé le site en réserve naturelle régionale. Cette reprise en main de la gestion a permis de réaliser en 2004 une carte de végétation détaillée et un diagnostic de l'état de conservation fonctionnel des deux massifs tourbeux.

L'état des lieux a mis en évidence un réseau de drainage mis en place pour faciliter l'exploitation de la tourbe. Du fait des battements de nappe importants engendrés, ce réseau portait atteinte au maintien des espèces présentes sur le site. Le repérage des zones majeures de battement de nappe et les suivis piézométriques ont permis d'identifier les zones d'intervention prioritaires. Suite à ce diagnostic, la communauté de commune a fait appel à un expert suisse (Philippe Grosvernier) pour concevoir un projet de restauration.

La restauration avait comme objectif de réenoyer la zone pour éviter que le milieu ne se ferme et de restaurer la fonctionnalité hydraulique et hydrobiologique du site, c'est-à-dire la production de tourbe. Pour cela, le niveau global de la nappe d'eau a été remonté selon les conditions topographiques et la nature du sous-sol (profondeur de tourbe, substrat sous-jacent). La surface de remouillage de la tourbière a ainsi été augmenté et les battements de nappe limités, notamment en période estivale où le risque de minéralisation de la tourbe est le plus important.

2. ACTIONS RÉALISÉES SUR LA TOURBIÈRE DES LEVRESSES

Plan descriptif des travaux commencés en 2011 sur la tourbière des Levresses

FIGURE 277

a. Partie Amont

Dans les zones tourbeuses de marais de transition ou dans les zones de bas-marais à faible pente, le fossé de drainage a été totalement colmaté. Cela a permis de bloquer totalement l'eau qui est stockée et répartie en surface, sur la zone de croissance des sphaignes.

Curage du fossé : le fond et les bords propres garantissent ensuite une bonne cohésion de la sciure sur la tourbe. La tourbe issue du curage est stockée sur les bords

FIGURE 278

Installation des panneaux de bois pour assurer des « points durs » de blocage de l'eau

FIGURE 279

Comblement par la sciure et compactage

FIGURE 280

Recouvrement par la tourbe et paillage pour éviter le dessèchement

FIGURE 281

Situation après les travaux : le niveau d'eau est affleurant ou submergeant en permanence, la végétation repousse sur les zones rebouchées

FIGURE 282

Installation de la palissade en madriers (épicéa) jusqu'au sous-sol minéral

FIGURE 283

Couverture du bois émergé par de la tourbe pour éviter qu'il ne pourrisse à l'air libre

FIGURE 284

Dans les zones tourbeuses où la pente est nulle et le fossé peu marqué, voire relativement bouché par la végétation, le colmatage n'a été que partiel. Seuls des panneaux de bois couverts ensuite de tourbe ont été installés. Ils forment des bouchons qui ralentissement le faible courant et répartissent le flux hydrique en surface. Dans les zones où la pente du fossé était importante, des palissades en bois ont été ancrées dans le substrat minéral pour s'assurer d'une remontée d'eau importante et réinonder une vaste zone de marais sur les espaces en cuvette.

Paillage de l'ouvrage pour éviter le dessèchement de la tourbe

FIGURE 285

Situation après les travaux : remplissage des palissades et reconnexion des marais tourbeux en maintenant un niveau d'eau très haut. Colonisation rapide par le trèfle d'eau, les odonates, les batraciens.

FIGURE 286

b. Partie Avale

L'enjeu sur la partie avale était de reconnecter la zone drainée avec les marais tourbeux périphériques.
La réalisation des travaux a requis un ensemble de machines spécialisées pour ce type de milieu. Un protocole très strict a été élaboré pour ne pas détériorer les espèces protégées comme Liparis de loesel et préserver les enjeux botaniques et fonctionnels du site.

3. DES RÉSULTATS ENCOURAGEANTS APRÈS UN AN DE SUIVI

Un suivi des indicateurs physiques et biologiques est prévu pour 5 ans.

3.1 Indicateurs physiques :

Pour surveiller le niveau de la nappe, des piézomètres sont installés depuis 2004 sur les deux sites tourbeux. L'évolution de la piézométrie des Levresses montre que la nappe fluctue beaucoup moins, et ne descend plus en dessous du niveau du sol, supprimant tout risque de minéralisation de la tourbe. Le milieu semble beaucoup plus tamponné d'un point de vue hydrologique.

Il faut cependant nuancer ces résultats car il n'y a qu'une année de recul pour les Levresses et 8 mois pour la Sarre à Cordier. De plus, l'année 2012 a été particulièrement arrosée par rapport à 2011.

Le graphique du piézomètre de la Sarre à cordier montre la comparaison entre 2 mois de pluviométrie relativement comparables (juillet 2011 avant travaux et juin 2012 après travaux). Après travaux, le niveau de la nappe est toujours environ 30 cm plus haut qu'avant les travaux, et ne descend plus en dessous du niveau du sol.

Courbe de fréquence de la hauteur de nappe

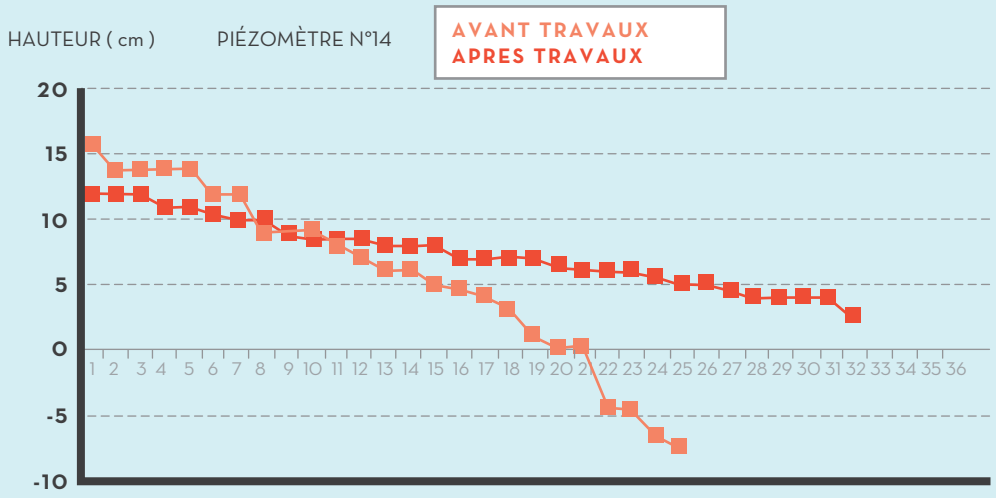


FIGURE 287

COMPARAISON ENTRE 2 MOIS DE PLUVIOMÉTRIE

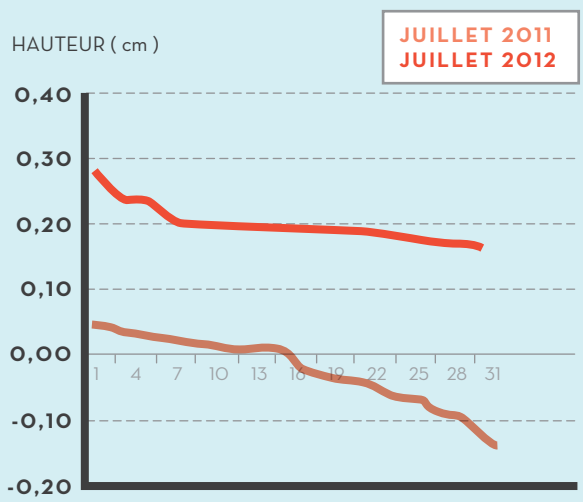


FIGURE 288

3.2 Indicateurs biologiques

Le suivi botanique pluriannuel sur la tourbière engagé avant travaux (stations de Liparis de loesel et laîche étoilée des marais) par le conservatoire botanique a été maintenu.

Il est à noter que ce projet de restauration hydraulique des tourbières a reçu le grand prix Natura 2000 par le Ministère de l'écologie en 2012

POUR ALLER PLUS LOIN

www.val-drugeon.org

GOUVERNANCE

Maître d'ouvrage : communauté de communes de Frasne-Drugeon.
Maître d'œuvre :
Bureau d'études Lin'Eco : Grosvernier Philippe
Entreprise : Jura Natura Services (Labergement Sainte Marie)
Acteurs : élus locaux, techniciens de la communauté de communes Frasne-Drugeon, appui par les services de l'Etat (DREAL et DDT), et par l'Union Européenne.
Coûts
1. Etude diagnostic : 1500 € HT
Financement de l'étude de diagnostic
Région
Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse
Communauté de communes de Frasne-Drugeon
2. Etudes et travaux : 80 000 € HT
Dont Chantier : 70 800 € HT
Financement travaux : pris en charge à 100% par le programme Natura 2000.
Europe : 50%
Etat : 50%

LEXIQUE

• **ANASTOMOSE :** lorsque l'on parle d'anastomose pour décrire les éléments d'un fleuve, on désigne les connexions entre deux branches du cours d'eau.

• **BIOFILTRE :** procédé d'épuration biologique qui consiste à mettre en contact les eaux à épurer avec une communauté de micro-organismes (bactéries, champignons, algues, ...) fixée sur un support.

• **BOUE ACTIVÉE :** procédé d'épuration biologique qui consiste à mettre en contact les eaux à épurer avec un mélange riche en bactéries non fixées, en améliorant les échanges par brassage et par aération.

• **CHARACÉE :** algue verte proche des plantes aquatiques.

• **DÉSHALOGENATION :** opération de suppression d'un halogène dans un composé.

• **DYNAMIQUE RELICTUELLE :** dynamique d'évolution d'un milieu résultant strictement d'une perturbation antérieure (non modifiée ultérieurement par l'homme).

• **ECOTONE :** zone de transition écologique entre deux écosystèmes (comme par exemple un écosystème aquatique et un écosystème terrestre).

• **ÉLODÉE :** plante aquatique flottante immergée.

• **ENTOMOFAUNE :** partie de la faune constituée par les insectes.

• **FASCINAGE ET CLAYONNAGE :** techniques végétales de renforcement des remblais ou des berges de rivière, constituées de pieux enfoncés dans le sol entre lesquels sont disposées des boutures ; si les boutures sont entrelacées on parle de clayonnage, si elles sont simplement empilées on parle de fascines.

• **GÉOMORPHOSITE :** site dont la géomorphologie présente un intérêt spécifique.

• **HÉLOPHYTE :** une plante est hélophyte si ses racines sont sous l'eau mais qu'elle se développe (tige, feuilles, fleurs), en partie aérienne ; il s'agit de plantes typiques des zones humides.

• **HYDROGRAMME :** courbe d'évolution du débit au cours du temps pendant une crue.

• **HYDROMORPHE :** un sol hydromorphe est un sol dont la consistance, la structure et l'aspect sont dus à des saturations fréquentes en eau.

• **LYSIMÈTRE :** dispositif permettant de mesurer l'évolution de la quantité et de la qualité de l'eau dans les sols.

• **MACROPHYTE :** terme générique pour désigner tous les végétaux de grande taille (visible à l'œil nu).

• **MÉTABOLITE :** composé organique secondaire produit par le métabolisme d'un organisme, c'est-à-dire par l'ensemble des transformations biochimiques qui lui permettent de vivre et de se développer.

• **MYCOFLORE :** ensemble des espèces de champignons d'un écosystème.

• **ORGANISME AUTOTROPHE :** un organisme autotrophe est un organisme capable de produire de la matière organique directement à partir de matière inorganique (principalement carbone, azote, sels minéraux) ; il peut donc se développer sans avoir besoin de prélever de molécules organiques dans le milieu (opposé d'hétérotrophe).

• **PALÉO-CHENAL** : ancien tracé d'un cours d'eau dont subsistent des traces fossiles ou sédimentaires.

• **PHYTOÉPURATION :** terme générique regroupant des procédés d'épuration impliquant l'utilisation de plantes dans les processus biologiques d'élimination des polluants.

• **POTAMOT :** plante aquatique hydrophytes.

• **RÉSEAU TROPHIQUE :** ensemble des relations et des échanges de nourriture et d'énergie au sein d'un écosystème.

• **RHIZOSPHÈRE :** région du sol qui est directement formée et influencée par les racines et les micro-organismes associés.

• **STÉNOTHERME :** un organisme sténotherme est un organisme qui résiste mal à des variations importantes de température autour d'une valeur moyenne (opposé d'eurytherme) ; un sténotherme « froid » a besoin d'une température inférieure à 14°C.

• **ZONE ANOXIQUE ET ZONE ANAÉROBIE :** Dans un écosystème aquatique, zones où la teneur en oxygène dissous est réduite ; on parle de zone anoxique si la saturation en oxygène dissous est inférieure à 10% et de zone anaérobie s'il n'y a plus du tout d'oxygène dissous.

• **ZONE HYPORHÉIQUE (HYPORHÉOS) :** la zone hyporhéique est la région située immédiatement en dessous ou à côté du lit d'un ruisseau ; il s'agit de la zone d'échange entre les eaux courantes de surface et les eaux souterraines profondes.

• **ZONE RIPARIENNE :** zone plus ou moins large située en bordure d'un cours d'eau ; la végétation spécifique qui se développe dans cette zone est la ripisylve.

BIBLIOGRAPHIE

Adam P., Debiais N., Gerber F., Lachat B. (2008). Le génie végétal : un manuel technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques. La documentation française, 290p.

AGEBIO, (2012). www.agebio.org

Aigoui, F., Dufour, M. (2008). Guide passes à poissons. CETMEF, VNF, 74 p.

Amoros C., Petts G.E. (1993). Hydrosystèmes fluviaux. Masson, Paris, 300 p.

Atelier ZRV du Groupe de Travail EPNAC (2012) Contenu des études préalables à la réalisation d'une zone de rejet végétalisée, 16 p.

Azzout Y., Barraud S., Crès F.N., Alfakih E. (1994). Techniques alternatives en assainissement pluvial. Choix, conception, réalisation et entretien. Tec & Doc Lavoisier, Paris, 378 p.

Balland P., Huet P., Lafont E., Leteurtrois J.P., Pierron P. (2002). Rapport sur la Durance – Propositions de simplification et de modernisation du dispositif d'intervention de l'Etat sur la gestion des eaux et du lit de la Durance – Contribution à un plan Durance. MEDD, MAAPAR, METLTM, 93 p.

Baptista M., Nascimento N., Barraud S. (2005). Technicas compensatorias em drenagem urbana, ed. ABRH, Porto Allegre (Bresil), 266p.

Bharat A, Sharma D, Gupta S. (2007). Facilitating Rain Water Harvesting and Storm Water Management for Recharging Groundwater in Urban Areas- A Case of Bhopal Region. (Novatech'2007) ; GRAIE, Lyon (France). Pp 221-228.

Blake G. (2003). La régression et la restauration des roselières dans les lacs alpins français : état de la question. Pages 49-58 in Actes du Séminaire européen Gestion et conservation des ceintures de végétation lacustre. Life - Nature Programme Lac du Bourget (octobre 2002, Le Bourget-du-Lac - Savoie).

Boutin, C., Prost-Boucle, S., (2012) Les Zones de rejet végétalisées, Sciences, Eaux et Territoires N° 9, 36-43

Bravard J.P. (1998). Le temps et l'espace dans les systèmes fluviaux, deux dimensions spécifiques de l'approche géomorphologique. Annales de Géographie, 599, 3-15.

Bravard J.P. (2002a). Les réponses des systèmes fluviaux à une réduction des flux d'eau et de sédiments sous l'effet du reboisement en montagne. La Houille Blanche, 3, 68-71.

Bravard J.P. (2002b). Quel rôle attribuer aux héritages géomorphologiques dans la détermination du « bon état écologique » ? Séminaire « Les enjeux de la directive cadre européenne sur l'eau ». Synthèse des exposés et débats. Paris, 29-30 avril 2002. CNRS, Cemagref Editions, 39-41.

Bravard J.P. (2003). Dynamiques à long terme des systèmes écologiques ou de l'Eden impossible à la gestion de la variabilité. In. LEVEQUE C., VAN DER LEEUW S. (eds), Quelles natures voulons-nous ? Pour une approche socio-écologique du champ de l'environnement. Elsevier, 133-145.

Bravard J.P. (2011). Genealogy of the river "mobility space" concept, France. Theory and implementation aspects. In A. OLLEJO et al. (Coord.): Restauracios, I Congresso de Restauracion Fluvial, Leon, 18-21 octobre 2011, p. 46-58.

Bravard J.P., Amoros C., Pautou G. (1986). Impact of civil engineering works on the successions of communities in a fluvial system. A methodological and predictive approach applied to a section of the Upper Rhône River, France. OIKOS, 47, 92-111.

Bravard J.P., Gilvear D.J., (1993). Structure hydro-géomorphologique des hydrosystèmes. In. Amoros C., Petts G.E. (eds), Hydrosystèmes fluviaux. Masson, Collection d'écologie, 24, 83-103.
Bravard J.P., Landon N., Peiry J.L., et Piégay H. (1999). Principles of engineering geomorphology for managing river erosion and bedload transport, examples from French rivers. Geomorphology, 31, 291-311.
Bravard J.P., Landon N., Peiry J.L., Piégay H. (1999). Principles of engineering geomorphology for managing river erosion and bedload transport, examples from French rivers. Geomorphology, 31, 291-311.
Bravard J.P., Petit F. (1997). Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial. Armand Colin, 222 p.
Bravard J.P., Salvador P.G. (2009). Géomorphologie et sédimentologie des plaines alluviales. In. Bravard J.P., Nehlig P., Poupet P., Salvador P.G., Wattez J. (eds). La géologie. Les sciences de la terre appliquées à l'archéologie. Editions Errance, 91-126.
Breil P., Grimm N.B., Vervier A. (2007). Surface water-ground water exchange processes and fluvial ecosystem function : an analysis of temporal and spatial scale dependency. *In.* Wood P.J., Hannah D.M., Sadler J.P. (eds), Hydroecology and Ecohydrology : past, present and future. John Wily & sons, 93-111.
Brierley G., Fryirs K. (eds) (2008). River Futures. An integrative scientific approach to river repair. Island Press, Society for Ecological Restoration International, 304 p.
Brierley G.J., Fryirs K. (2005). Geomorphology and River Management. Applications of the river styles framework. Blackwell Publishing, 398 p.
Brix, H. (1999). The European Research Project on Reed Die-Back and Progression (EUREED). Limnologica, 29 : 5-10.Calvet, R., E. Barriuso, C. Bedos, P. Benoit, M.-P. Charnay and Y. Coquet (2005). Les pesticides dans le sol : Conséquences agronomiques et environnementales. France Agricole Edition.
Carbiener R. (1990). Les ecosystèmes rivières. Assises de l'eau dans le bassin Rhin-Meuse, 10 et 11 octobre 1990, Vittel, 130-139.
Carpenter, R.C. (2002). Ecological futures: building an ecology of the long now. Ecology, 83 : 2069-2083.
Castillo, J. M. & Figueroa, E. (2009). Restoring salt marshes using small cordgrass, Spartina maritima. Restoration Ecology, 17 : 324–326.
CERTU (1999). Techniques alternatives aux réseaux d'assainissement pluvial : éléments clés pour leur mise en oeuvre, CERTU, Lyon (France), 155 p.
CERTU (2000). Organiser les espaces publics pour maîtriser le ruissellement urbain,
Dossier Eau et Aménagement n°102, CERTU, Lyon (France), 123 p.
CERTU (2003). La ville et son assainissement : Principes, méthodes et outils pour une meilleure intégration dans le cycle de l'eau. [CD ROM] CERTU, Lyon ou Ministère de l'écologie et du développement durable.
CERTU (2006). L'assainissement pluvial intégré dans l'aménagement - Éléments-clés pour le recours aux techniques alternatives, CERTU, Lyon (France), 156 p.
CETE Méditerrannée (2013). Stratégies foncières locales et mobilisation des outils fonciers en faveur de la biodiversité guide méthodologique mars 2013. http://pas.regionpaca.fr/fileadmin/PAS/Actualites_politiques_locales/guide_methodologique_CETE_mars_2013.pdf
Champion M.(1864) Les inondations en France depuis le VIe siècle jusqu'à nos jours, Paris, V. Dalmont et Dunod, 6 tomes, 1858-1864. http://www.hydrologie.org/BIB/champion/tomes/frametom.htm
Chéron J., Puzenat A. (2004). Les eaux pluviales : Récupération, gestion, réutilisation, ed. Johannet, Paris (France), 126p.
Chocat B., Eurydice (1997). Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Tec & Doc, Lavoisier, Paris (France), 1136 p.
Choubert J.M., Pomies M.; Martin-Ruel S., Budzinski H., Miège C., Wisnieski C., Coquery M. (2012). Élimination des micropolluants par les stations d'épuration domestiques. Sciences Eaux et Territoires N°9, 6-15.
Clar M.L., Barfield B.J., and O'Connor T.P. (2004). Stormwater Best Management Practice Design Guide Volume 2 Vegetative Biofilters. US EPA, National Risk Management Research Laboratory.
CORPEN, G.Z.T. (2007). Les fonctions environnementales des zones tampons, Les bases scientifiques et techniques des fonctions de protection des eaux. In: d.l.é. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'aménagement du territoire et Ministère de l'agriculture et de la pêche (Ed), Paris, p. 176.

Diel, O. et al. (2013). L'économie de l'environnement en 2011 - édition 2013. Rapport de la Commission des comptes et de l'économie de l'environnement. Commissariat général au développement durable • Service de l'observation et des statistiques. Références, 163 p.
Dister E., Gomer D., Obrdlik P., Petermann P., Schneider E. (1990). Water management and ecological perspectives of the Upper Rhine's floodplain. Regulated Rivers. Research and Management, S, I-15.
Downs P., Gregory K. (2004). River Channel Management: Towards Sustainable Catchment Hydrosystems, Arnold Publication, 394 p.
Dufour S., Piégay H. (2009). From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits. River Research and Applications, 25, 568–581.
EAUE (European Academy of the Urban Environment) (1997). Water-saving Strategies in Urban Renewal – European approaches, EAUE, Berlin (Allemagne), 162p.
Ellis B., Marsalek J. & Chocat B. (2005). Urban water quality. Encyclopedia of hydrological science. Edited by M G Anderson, John Wiley & sons, 1479-1491.
Erdlenbruch et al. (2008). Une analyse coût-bénéfice spatialisée de la protection contre des inondations. Application de la méthode des dommages évités à la basse vallée de l'Orb. Ingénierie EAT 53: 3-20.
European Parliament and Council of Europe (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal L 327 , 22/12/2000, 73 p.
Fesneau C., Tournebize J., Chaumont C. Guenne A., Peschard J., Thieu V., Passy P., Garnier J., Billen G. (2010). Retenir l'eau dans l'espace rural. Rapport PIREN-Seine. 19p.
Field R., Tafuri A.N., Mutukrishnan S., Annmadge A.B., Selvakumar A. (2006). The use of Best management Practices in urban watersheds, ed. Destech Publications, Lancaster (USA), 268p.
Fisher, J., Acreman, M.C. (2004). Wetland nutrient removal: a review of the evidence. Hydrol. Earth Syst. Sc. 8 (4): 673-685.
Friedkin J.F. (1945). A laboratory study of the meandering of alluvial rivers. U.S. Waterways Experimentation Station, Vicksburg.
Garmouma, M., M. Blanchard, A. Chesterikoff, P. Ansart and M. Chevreuil (1997). Seasonal transport of herbicides (triazines and phenylureas) in a small stream draining an agricultural basin: Melarchez (France). Water Research, 31: 1489-1503.
Gentelle P. (2003). Traces d'eaux : un géographe chez les archéologues. Belin, 224 p.
Ghavasieh, A.R., Poulard, C., Paquier, A. (2006). Effect of roughened strips on flood propagation: assessment on representative virtual cases and validation. J. Hydrol. 318(1-4), 121-137.
Gilard, O. (1998). Guide pratique de la méthode Inondabilité. Etude Inter-Agences de l'Eau, 60, 158p.
Gilbert, G., Tyler, G.A., Dunn, C.J. & Smith, K.W. (2005). Nesting habitat selection by bitterns Botaurus stellaris in Britain and the implications for wetland management. Biological Conservation, 124 : 547-553.
Grand Lyon, Communauté urbaine (2008). "Guide pratique aménagement et eaux pluviales", 57p.
Gregoire, C., D. Elsaesser, D. Huguenot, J. Lange, T. Lebeau, A. Merli, et al. (2009). Mitigation of agricultural nonpoint-source pesticide pollution in artificial wetland ecosystems. Environmental Chemistry Letters 7: 205-231.
Gunnell Y. (2009). Ecologie et société. Armand Colin, 415 p.
Han M. & Murase M. (ed.) (2006). Rainwater harvesting and management, Actes du 2nd International Workshop, IWA 5th World Water Congress, 11 septembre 2006, Pékin (Chine), 292p.
Hopkins, L. (2001). Best Practice Guidelines: Artificial Bank Creation for Sand Martins and Kingfishers, The Environment Agency, 29 p.
Hossler, K., Bouchard, V. (2010). Soil development and establishment of carbon-based properties in created freshwater marshes. Ecological Applications, 20 : 539–553.
Hoyos-Hernandez, C. (2010). Degradation du S-metolachlor dans une zone tampon humide artificielle en fonction de l'activité microbienne, des conditions d'oxydoréduction et de différentes sources de carbone. Master tesis, in French. Master II Ingénierie biologique de l'environnement, Université Paris Est Créteil, France., p. 62.
Imfeld, G., M. Braeckevelt, P. Kuschk and H.H. Richnow (2009). Monitoring and assessing processes of organic chemicals removal in constructed wetlands. Chemosphere, 74: 349-362.

INSEE (2008) Population exposée à un risque d'inondation en 2008 : comparaisons départementales.http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=99&ref_id=DTD703D
Janny P. (2006). Utilisation des eaux pluviales et réutilisation des eaux grises en habitat résidentiel. Synthèse technique ENGREF / OIEAU ; 24p.
Jollivet M., (2001). Introduction. In. Jollivet M. (Ed.), Le développement durable, de l'utopie au concept. Elsevier, 9-18.
Kadlec (2012). Constructed marshes for nitrate removal. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 42: 931-1005.Kleeberg et al. (2010)
Lafont M., Marsalek J., Breil P. (2008). Urban Aquatic Habitat characteristics and functioning. In: Aquatic Habitats, in Integrated Urban Water Management (ed. Wagner, I., Marsalek, J. et Breil, P.), Taylor & Francis group, London, 9-24
Lafont M., Marsalek J., Breil P. (2008). Urban Aquatic Habitat characteristics and functioning. In: Aquatic Habitats in Integrated Urban Water Management (ed. Wagner, I., Marsalek, J. et Breil, P.), Taylor & Francis group, London, 9-24
Lane E.W. (1955). The importance of fluvial morphology in hydrologic engineering. Proceedings American Society of Civil Engineers, 81, pp. 1-17.
Lanyon R. (2007). Developments towards urban water sustainability in the Chicago metropolitan area. In Novotny V. & Brown P. (ed.) (2007). Cities of the future : Towards integrated sustainable water and landscape management, ed. IWA, London (UK), 8-17.
Lasalle F. (2006). Végétation extensive des terrasses et toitures, guide technique, ed. Le moniteur, Paris (France), 225p.
Lévêque C., Muxart T., Abbadie L., Weill A., Van der Leuw S. (2003). L'anthroposystème : entité structurelle et fonctionnelle des interactions sociéts-milieux. In. LEVEQUE C., Van der LEEUW S. (eds), Quelles natures voulons-nous ? Pour une approche socio-écologique du champ de l'environnement. Elsevier, 110-129.
Liébault F., Gomez B., Page M., Marden M., Peacock D., Richard D., Trotter C.M. (2005). Land-use change, sediment production and channel response in upland regions. River research and applications, vol. 21, pp. 739-756.
Maire G. (1990). Les aménagements de rivières. Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse 817, 2, 117-125.
Malard, F., et al. (2006). "Flood-pulse and riverscape dynamics in a braided glacial river." Ecology 87(3): 704-716.
Malavoi J.R. et Bravard J.P. (2010). Eléments d'hydromorphologie fluviale. ONEMA, 224 p.
Malavoi J.R. (1998). Determination de l'espace de liberté des cours d'eau. Bassin Rhône Méditerranée Corse, guide technique N° 2. SDAGE Rhône Méditerranée Corse, 39 p.
Malavoi J.R., Garnier C.C., Landon N., Recking A., Baran Ph. (2011). Eléments de connaissance pour la gestion du transport en rivière. Onema, 216 p.
Malavoi, J.R. (2011). Méthode d'identification des rivières sauvages, les critères de la « valeur sauvage des rivières » Présentation première carte en Rhône Alpes. Quels objectifs ?. Colloque « Créer un réseau de Rivières Sauvages en France », Annecy, Février 2011. http://fr.slideshare.net/Rivieres_Sauvages/colloque
Mander, Ü., Tournebize J., Kasak K., Mitsch W.J. (2013). Climate regulation by free water surface constructed wetlands for wastewater treatment and created riverine wetlands. Ecol. Eng. (2013), http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.05.004
Marsalek J, Jimenez-Cisneros B., Karamouz M., Malmquist P.-A., Goldenfum J. & Chocat B. (2007). Urban water cycle processes and interactions, ed. UNESCO, Paris (France), 131p
Marsalek J., Chocat, B. (2002). International report : Stormwater management ; Water Sciences and Technologies, 46/6-7, 1-17.
Marsalek J., Kok S., Colas H. (guest editors) (2004). Managing Urban Wet-weather flows : on the road to sustainability, N° special de Water Quality Research journal of Canada, Vol 39, N°4.
MEDD (2005). Pesticides : Comment réduire des risques associés, actes du colloque des 14, 15 et 16
Miquet, A., Favre, E. (2007). Les Roselières des fleuves et des lacs. Cahiers techniques de Rhône-Alpes, 18 p.
Mitsch, W.J. and J.G. Gosselink (2000). Wetlands Third Edition. John Wiley & Sons, Inc.Mitsch W.J. and S.E. Jørgensen (2004) Ecological Engineering: Ecological Engineering and Ecosystem Restoration" John Wiley and Sons, Inc., New York. 411p.
Mitsch W.J., Zhang L., Stefanik K.C., Nahlik A.M., Anderson C.J., Bernal B., Hernandez, M., Song K. (2012). Creating Wetlands: Primary Succession, Water Quality Changes, and Self-Design over 15 Years. BioScience, 62: 237-250.

Mitsch, W.J. et al. (2005). Creating riverine wetlands: Ecological succession, nutrient retention, and pulsing effects. Ecological Engineering, 25 : 510–527.
Mitsch, W.J. et al. (2012). Creating Wetlands: Primary Succession, Water Quality Changes, and Self-Design over 15 Years. BioScience, 62 : 237–250.
Moniteur Belge (2006). Règlement Régional d'Urbanisme, 19 décembre 2006.
Moore, M.T., R. Schulz, C.M. Cooper, S. Smith and J.H. Rodgers, (2002). Mitigation of chlorpyrifos runoff using constructed wetlands. Chemosphere, 46: 827-835.
Moreno-Mateos D., Comín F.A., Pedrocchi C; Causapé J. (2009). Effect of Wetlands on Water Quality of an Agricultural Catchment in a Semi-Arid Area Under Land Use Transformation. Wetlands, 29(4):1104-1113.
Napoléon III (1856). Lettre de Plombières au Ministre des Travaux Publics, 21 juillet 1856, pp333-343. In Discours, messages et proclamations de l'Empereur, 1849-1860. Imprimerie Henri Plon. Paris: 415.
Nigel D., Clayden A. (2007). Les jardins et la pluie. Gestion durable de l'eau de pluie dans les jardins et les espaces verts. Editions du Rouergue ; 185 p.
Nordon M. (1991). Histoire de l'hydraulique. Tome 1 : L'eau conquise - les origines et le monde antique ; Tome 2 : L'eau démontrée - du Moyen-Age à nos jours ; Ed. Masson, Paris (France), 181 p et 242 p.
Novotny V. & Brown P. (ed.) (2007). Cities of the future : Towards integrated sustainable water and landscape management, ed. IWA, London (UK), 8-17.
O'Loughlin G. (1987). Safety for urban drainage systems ; 4th International conference on urban storm drainage ; Lausanne ; pp 345-350.
Passeport, E., J. Tournebize, S. Jankowfsky, B. Promse, C. Chaumont, Y. Coquet, et al. (2010). Artificial Wetland and Forest Buffer Zone: Hydraulic and Tracer Characterization. Vadose Zone Journal 9: 73-84.
Passy, P., J. Garnier, G. Billen, C. Fesneau and J. Tournebize (2012). Restoration of ponds in rural landscapes: Modelling the effect on nitrate contamination of surface water (the Seine River Basin, France). Science of The Total Environment 430: 280-290.Peret, A.M., L.F. Oliveira, I. Bianchini, Jr., M.H. Regali Seleghim, A.C.
Peret and A.A. Mozeto (2010). Dynamics of fipronil in Oleo Lagoon in Jatai Ecological Station, Sao Paulo-Brazil. Chemosphere, 78: 1225-1229.
Perez I, Baraglioli A (2001). Le recensement des ouvrages de stockage en Seine Saint-Denis : Etat des lieux et évolutions récentes. In Brelot E., Chocat B., Desbordes M. (editeurs) (2001). Les nouvelles technologies en assainissement pluvial (Novatech'2001), actes de la 4ème conférence Novatech ; GRAIE, Lyon (France). 45-53.
Persson, J. (2000). The hydraulic performance of ponds of various layouts. Urban Water, 2: 243-250.Piégay H., Cuaz M., Javelle E., Mandier P. (1997). Bank erosion management based on geomorphological, ecological and economic criteria on the Galaure river, France. Regulated Rivers: Research and Management, 13, 433-448.
Piégay H., Naylor L.A., Haidvogl G., Kail J., Schmitt L., Bourdin L. (2008). Integrative river science and rehabilitation: European experiences. In. Brierley G., Fryirs K. (eds), River Futures. An integrative scientific approach to river repair. Island Press, Society for Ecological Restoration International, 201-219.
Piégay H., Stroffeck S. (2000). La « gestion physique » des rivières dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse : des extrêmes... au milieu. In. BRAVARD J.P. (Ed.), Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des excès et de la pénurie. Sedes, 245-274.
Piégay H., Walling D.E., Landon N., He Q., Liébault F., Petiot R. (2004). Contemporary changes in sediment yield in an alpine mountain basin due to afforestation (the upper Drôme in France). Catena, vol. 55, pp. 183-212.
Pont D., Piégay H., Farinetti A., Allain S., Landon N., Liébault F., Dumont B., Richard-Mazet A. (2009). Conceptual framework and interdisciplinary approach for the sustainable management of gravel-bed rivers: The case of the Drôme River basin (S.E. France). Aquatic sciences, vol. 71, pp. 356-370.
Poulard C., Lenar-Matyas A., Łapuszek M., Lafont M., Schmitt L., Jézéquel C., Breil .P. (2011). Co-conception of integrated flood management solutions: riverscapes to facilitate dialog , EcoHydrology & HydroBiology, 11(1-2), 107-120.
Poulard C., Lafont M., Lenar-Matyas A., Łapuszek M. (2010). Towards flood mitigation designs respectful of river ecosystem functions; problematic and conceptual approach, Ecological Engineering, 36(1), 69-77.
Poulin, B., Lefebvre, G. & Mathevet, R. 2005. Habitat selection by booming bitterns Botaurus stellaris in French

Mediterranean reed-beds. Oryx, 39 : 1-10.
Preusser F., Schmitt L., Delile D., Grosprêtre L. (2011). Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating of the sedimentation history of the Yzeron basin (Chaudanne sub-catchment), Rhône Valley, France. Quaternaire, 22, 1, 73-83.
Prost-Boucle, S., Boutin,C., (2012) Etat des lieux national des Zones de Rejet Végétalisées. Rapport final. Partenariat Onema 2012, 29p + annexes.MINISTERE DE L'ECOLOGIE, DE L'ENERGIE, DU DEVELOPPEMENT DURABLE ET DE LA MER ET GROUPE NATIONAL POUR LES ZONES HUMIDES (2009) Les zones humides : un enjeu national. Bilan de 15 ans de politiques publiques, 91pp.
Pulou, J. (2011). Les anciennes cressonnières de l'Essonne: Effets de la recolonisation des zones humides artificielles sur la dynamique de l'azote. Ph.D. Thesis. AgroParisTech, 212 p.Rakedjian B. (2012). Editorial Recherche et ingénierie au service des acteurs de l'assainissement : avancées et perspectives. Sciences Eaux et Territoires, n°9, p1, 2012.
Rakedjian B. (2012). Editorial Recherche et ingénierie au service des acteurs de l'assainissement : avancées et perspectives. Sciences Eaux et Territoires, n°9, p1.
Rapport D.J., Costanza R., McMichael A.J. (1998). Assessing ecosystem health. TREE, 13, no. 10 October 1998, 397-402.
Reddy, K.R. and E.M. Dangelo (1997). Biogeochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands. Water Science and Technology, 35: 1-10.Rey F. (2011). Génie biologique contre l'érosion torrentielle. Editions QUAE. 100 p.
Rey F. (2011). Génie biologique contre l'érosion torrentielle. Editions Quae. 100 p.
Reynard E. (2005). Géomorphosites et paysages. Géomorphologie : relief, processus, environnement, 3, 181-188.
Reynard E., Panizza M. (2005). Géomorphosites : définition, évaluation et cartographie. Une introduction. Géomorphologie : relief, processus, environnement, 3, 177-180.
Rollet, A.J., Piégay, H., Dufour, S., Bornette, G., Persat, H. (in press). Assessment of consequences of sediment deficit on a gravel river bed downstream of dams in restoration perspectives: Application of a multicriteria, hierarchical and spatially explicit diagnosis. River Research and Applications.
Roscoe, D.W. & Hinch, S.G. (2010). Effectiveness monitoring of fish passage facilities : historical trends, geographic patterns and future directions. FISH and FISHERIES, 11 : 12–33.
Runes, H.B., J.J. Jenkins, J.A. Moore, P.J. Bottomley and B.D. Wilson (2003). Treatment of atrazine in nursery irrigation runoff by a constructed wetland. Water Research, 37: 539-550.
Saïd R. (1993). The River Nile: geology, hydrology and utilization. Pergamon Press, London, 332 p.
Saito, I., Ishihara, O. & Katayama, T. (1991) Study of the effect of green areas on the thermal environment in an urban area. Energy and Buildings, 15-16 : pp 493-498.
Schmitt L., Lafont M., Tremolières M., Jezequel C., Vivier A., Breil P., Namour P., Valin K., Valette L. (2011) Using hydro-geomorphological typologies in functional ecology: preliminary results in contrasted hydrosystems. Physics and Chemistry of the Earth, 36, 539-548.
Schmitt L., Maire G., Nobelis P., Humbert J. (2007) Quantitative morphodynamic typology of rivers. A methodological study based on the French Upper Rhine basin. Earth Surface Processes and Landforms, 32, 11, 1726-1746.
Schmitt, L. et al. (2009). Le « polder » d'Erstein : objectifs, aménagements et retour d'expérience sur cinq ans de fonctionnement et de suivi scientifique environnemental (Rhin, France). Ingénieries EAT, N° spécial La prévention des inondations. Aspects techniques et économiques des aménagements de ralentissement dynamique des crues, 67-84.
Schneier-Madanes G. (Ed.) (2010). L'eau mondialisée. La gouvernance en question. La Découverte, 492 p.
Schnitzler-Lenoble A. (avec la collaboration de Carbiener R.) (2007). Forêts alluviales d'Europe. Ecologie, Biogéographie, Valeur intrinsèque. Lavoisier, Editions Tec & Doc, 387 p.
Schumm S.A. (1977). The fluvial system. John Wiley & Sons, 338 p.
Srivastava, J., A. Gupta et H. Chandra (2008) : Managing water quality with aquatic macrophytes. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 7, 255-266.Stahre P. (2006): Sustainability in urban storm drainage, ed. Svenskt Vatten, Stockholm (Suède), 80p
Stehle, S., D. Elsaesser, C. Gregoire, G. Imfeld, E. Niehaus, E. Passeport, et al. (2011). Pesticide Risk Mitigation by Vegetated Treatment Systems: A Meta-Analysis. Journal of Environmental Quality 40: 1068-1080.
STU & Agence de l'Eau (1994). Guide technique des bassins de retenue des eaux pluviales, Collection Tec&Doc,

Edition Lavoisier, Paris, 273 p.
Tanner, C.C., M.L. Nguyen and J.P.S. Sukias (2005). Nutrient removal by a constructed wetland treating subsurface drainage from grazed dairy pasture. Agriculture Ecosystems & Environment, 105: 145-162.Thevenot D.R. (editor) (2008). DayWater : an Adaptive Decision Support System for Urban Stormwater Management. Edition IWA publishing, London (UK). ISBN : 9781843391609 (voir le site web daywater)
Tournebize, J., M.-P. Arlot, C. Billy, F. Birgand, J.-P. Gillet and A. Dutertre (2008). Quantification et maîtrise des flux de nitrates : de la parcelle drainée au bassin versant. Ingénieries: 5-25.
Tournebize, J., C. Gramaglia, F. Birmant, S. Bouarfa, C. Chaumont and B. Vincent. (2012). CO-DESIGN OF CONSTRUCTED WETLANDS TO MITIGATE PESTICIDE POLLUTION IN A DRAINED CATCH-BASIN: A SOLUTION TO IMPROVE GROUNDWATER QUALITY. Irrigation and Drainage 61: 75-86. doi:10.1002/ird.1655.
Tournebize, J., E. Passeport, C. Chaumont, C. Fesneau, A. Guenne and B. Vincent (2013). "Pesticide de-contamination of surface waters as a wetland ecosystem service in agricultural landscapes." Ecological Engineering 56: 51-59.
Tricart J., Kilian J. (1979). L'Eco-géographie. Collection Hérodote, Ed. François Maspéro, 326 p.
U.E. (2007) DIRECTIVE 2007/60/CE du Parlement Européen et du Conseil relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation.. Journal officiel de l'Union européenne, 6 nov. 2007, L 288/27, 8 p.http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:288:0027:0034:FR:PDF
United Nations (2007). The 2006 Revision and World Urbanization Prospects. The 2003 Revision. United Nations, New York, 21 p. + ann.
Van Breemen, N. (1995). How Sphagnum bogs down other plants. Trends in Ecology and Evolution, 10 : 270–275.
Viguier C. (2006). Du bon usage des eaux de pluie dans le bâtiment : le cas particulier des établissements scolaires. TFE ENTPE Lyon ; 73p.
Villareal E.L. (2005). Beneficial use of stormwater : opportunities for urban renewal and water conservation, doctoral thesis, Lund Institute of technology, Lund University (Suede).
Vymazal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. Ecological Engineering, 25: 478-490.
Vymazal, Y., Brix, H., Cooper, P.F., Green, M.B., Haberl, R. (1998). Constructed Wetlands for wastewater treatment in Europe, Ed Backhuys Publishers, Leiden, Pays-Bas, 366 p.
Wasson, J.G. ; Malavoi, J.R. ; Maridet, L. ; Souchon, Y. ; Paulin, L. (1995). Impacts écologiques de la chenalisation des rivières. Antony, Cemagref Editions. Etudes, Gestion des milieux aquatiques, 14, 158p.
Wohl E., Angermeier P. L., Bledsoe B., Kondolf G. M., MacDonnell L., Merritt D. M., Palmer M. A., Poff N. L., Tarboton D. (2005). River restoration. Water Resour. Res., 41, 10, W10301, doi:10.1029/2005WR003985.
Wolman M.G., Miller J.P. (1960). Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. Journal of Geology, 68, 54-74.
Wong Tony H. F. (ed.) (2005). Australian Runoff Quality – a guide to water sensitive urban design, Engineers Australia.
Wright, J.P., Jones, C.G. &e Flecker, A.S. (2002). An ecosystem engineer, the beaver, increases species richness at the landscape scale. Oecologia ; 132 : 96-101.

Conception graphique :
Anne-charlotte de Lavergne - www.ancharlotte.com
Infographie (figures):
Elise Marty.
Impression:
id bleue - www.idbleue.com

De tout temps l'homme a aménagé l'environnement naturel pour l'adapter à ses besoins. Au cours des deux derniers siècles cet aménagement s'est souvent fait contre la nature, considérée comme inconstante et parfois dangereuse.

Ce mode d'action, même s'il a été efficace dans un premier temps, se traduit aujourd'hui par une multitude de problèmes environnementaux : dérégulation des écosystèmes, pollution des milieux naturels, difficultés de plus en plus grande à mobiliser les ressources pourtant indispensables associées à l'eau.

L'ingénierie écologique consiste au contraire à considérer la nature comme un partenaire plutôt que comme un adversaire. Appliquée aux écosystèmes aquatiques, elle part du principe simple qu'un milieu en bonne santé peut rendre davantage de services, y compris sociétaux, qu'un milieu dégradé.

L'objectif de cet ouvrage est ainsi de montrer qu'agir par la nature et pour la nature permet de répondre à des demandes sociétales diverses, allant de la préservation de la qualité physico-chimique de l'eau à la valorisation des berges des rivières en passant par la protection contre les inondations.

La présentation d'une trentaine d'exemples extrêmement diversifiés vient illustrer trois chapitres plus généraux dont l'objet est de clarifier les grands principes qui doivent être appliqués pour être efficace et pertinent.