



**HAL**  
open science

## Gérer les crues et les inondations

Christine Poulard, Pascal Breil, M. Lafont, B. Chocat

► **To cite this version:**

Christine Poulard, Pascal Breil, M. Lafont, B. Chocat. Gérer les crues et les inondations. Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques pourquoi? comment?, ASTEE, pp.68-83, 2013. hal-02599219

**HAL Id: hal-02599219**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02599219>**

Submitted on 16 May 2020

**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.

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

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 XXI<sup>ème</sup> 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

<b>1</b> 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
<b>2</b> EVOLUTION DANS LA GESTION DES MILIEUX AQUATIQUES	21
<b>3</b> L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE : UN CONCEPT « À LA MODE » ?	24
<b>4</b> QUELLE DÉFINITION RETENIR ?	25
1 Des définitions multiples	p. 25
2 Définition retenue	p. 27
<b>5</b> CONCLUSION DU CHAPITRE 1	29

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION AU CHAPITRE 2 : LES DIMENSIONS DE LA GESTION DES HYDROSYSTÈMES</b>	<b>32</b>
<b>1</b>	La reconnaissance d'usages et de fonctions utiles à la société	p. 32
<b>2</b>	Les différentes dimensions des hydrosystèmes : le cas des rivières	p. 34
<b>3</b>	Les motivations des maîtres d'ouvrage et la mise en œuvre des principes d'ingénierie écologique	p. 37
<b>2</b>	<b>PROTÉGER LA QUALITÉ PHYSICO-CHIMIQUE DE LA RESSOURCE EN EAU</b>	<b>38</b>
<b>1</b>	Cas des rejets diffus	p. 38
<b>2</b>	Cas des rejets localisés	p. 39
<b>3</b>	<b>CONTRÔLE À LA SOURCE DES REJETS DIFFUS D'ORIGINE AGRICOLE</b>	<b>40</b>
<b>1</b>	Contexte et enjeux	p. 40
<b>2</b>	Grands principes à appliquer	p. 40
<b>3</b>	Outils et réalisation	p. 44
<b>4</b>	Perspectives et freins	p. 56
<b>4</b>	<b>AMÉLIORER LE TRAITEMENT DES REJETS LOCALISÉS ET DIMINUER LEURS IMPACTS SUR LES MILIEUX AQUATIQUES RÉCEPTEURS : LE CAS DES ZONES DE REJET VÉGÉTALISÉES</b>	<b>58</b>
<b>1</b>	Contexte et enjeux	p. 58
<b>2</b>	Grands principes à appliquer	p. 58
<b>3</b>	Outils et réalisation	p. 60
<b>4</b>	Perspectives et freins	p. 67
<b>5</b>	<b>GÉRER LES CRUES ET LES INONDATIONS</b>	<b>68</b>
<b>1</b>	Contexte et enjeux	p. 68
<b>2</b>	Grands principes à appliquer	p. 69
<b>3</b>	Outils et réalisation	p. 74
<b>4</b>	Perspectives et freins	p. 83
<b>6</b>	<b>MAÎTRISER LES ÉVOLUTIONS DU LIT DES COURS D'EAU (INCISION, ATTERRISSMENT, ...) ET MIEUX GÉRER LES FORMES FLUVIALES</b>	<b>84</b>
<b>1</b>	Contexte et enjeux	p. 84
<b>2</b>	Grands principes à appliquer	p. 87
<b>3</b>	Outils et réalisation	p. 89
<b>4</b>	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
- 2** Grands principes à appliquer
- 3** Outils et réalisation
- 4** Perspectives et freins

p. 94  
p. 95  
p. 100  
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
- 2** Grands principes à appliquer
- 3** Outils et réalisation
- 4** Perspectives et freins

p. 107  
p. 108  
p. 110  
p. 112

**9****RESTAURER LES MILIEUX AQUATIQUES ET DÉVELOPPER LA BIODIVERSITÉ****114**

- 1** Contexte et enjeux
- 2** Grands principes à appliquer
- 3** Outils et réalisation
- 4** Perspectives et freins

p. 114  
p. 116  
p. 120  
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
- 2** Un problème de gouvernance dans le domaine de l'eau
- 3** Un manque d'information et de sensibilisation aux enjeux
- 4** Un manque de formation des maîtres d'ouvrage et de leurs conseillers conduisant à une mauvaise formulation des cahiers des charges
- 5** Un fonctionnement de la commande publique qui freine l'innovation
- 6** La difficulté à maîtriser le foncier
- 7** La difficulté à bien définir les objectifs du projet
- 8** Une ingénierie en cours d'émergence avec des incertitudes sur l'efficacité réelle des actions
- 9** Un manque de valorisation auprès des professionnels de l'aménagement urbain
- 10** Des solutions perçues comme plus difficiles à mettre en œuvre et plus coûteuses en étude et en entretien

p. 131  
p. 132  
p. 133  
p. 133  
p. 134  
p. 134  
p. 135  
p. 136  
p. 136  
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
- 2** L'engagement et le volontarisme de certains acteurs
- 3** La légitimation de l'action des acteurs
- 4** La volonté d'améliorer le cadre de vie

p. 138  
p. 139  
p. 140  
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/TRAIEMENT 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 Découverte 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.*

# 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

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

*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.*

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

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.



*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

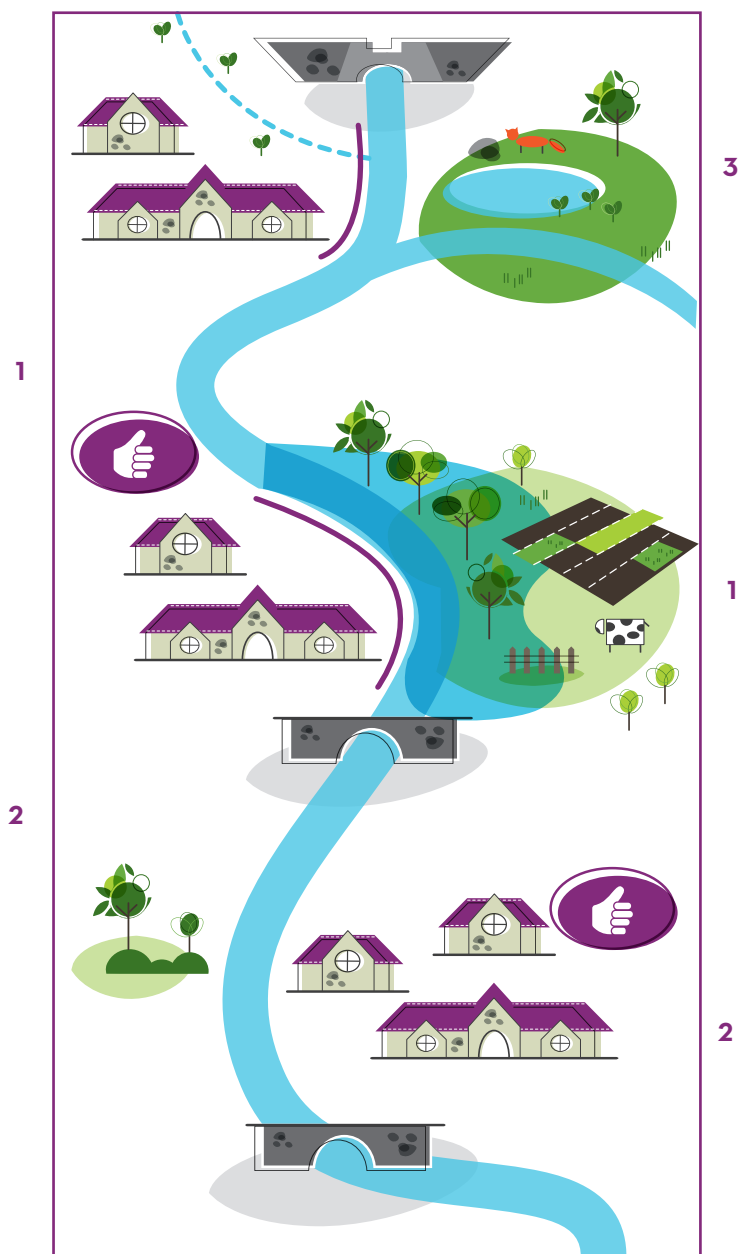
Actions au droit des enjeux (digues) et à l'aval immédiatement  
(faciliter l'évacuation des volumes)  
provoquant une augmentation du risque à l'aval



FIGURE 25



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



## ■ 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 débitométriques 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 XX<sup>ème</sup> 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 Nivelles (Lurberria) ou encore sur la Meuse (Mouzon<sup>12</sup>). Leur précurseur est la Digue de Pinay, construite en 1711-1712 sur la Loire. Claude Cretin décrit ainsi l'ouvrage<sup>13</sup> : « 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

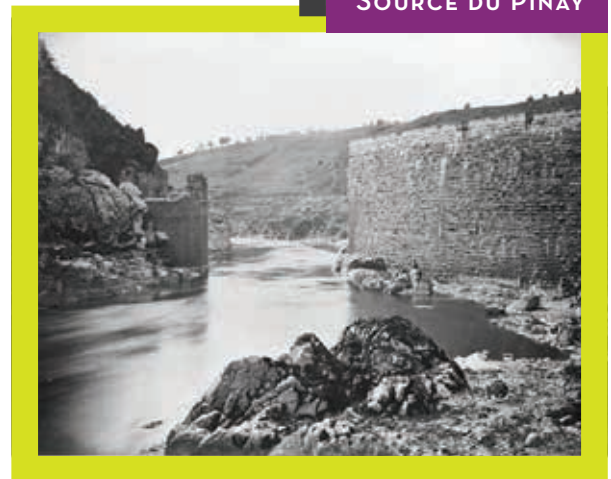


FIGURE 27

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

<sup>12</sup> [http://www.epama.fr/files\\_fr/epama\\_projets/mouzon/epama6\\_mouzon\\_intro.php4](http://www.epama.fr/files_fr/epama_projets/mouzon/epama6_mouzon_intro.php4)

<sup>13</sup> [http://www.fleuve-loire.net/article.php?id\\_article=37](http://www.fleuve-loire.net/article.php?id_article=37), La digue de Pinay, Protection contre les crues par une digue insubmersible (Article consulté en 2008)

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

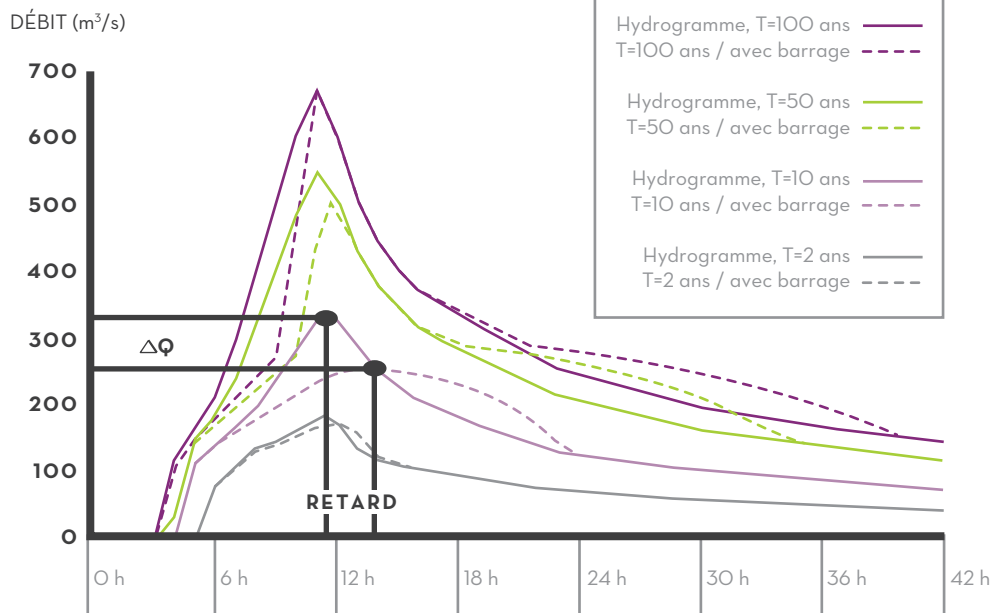
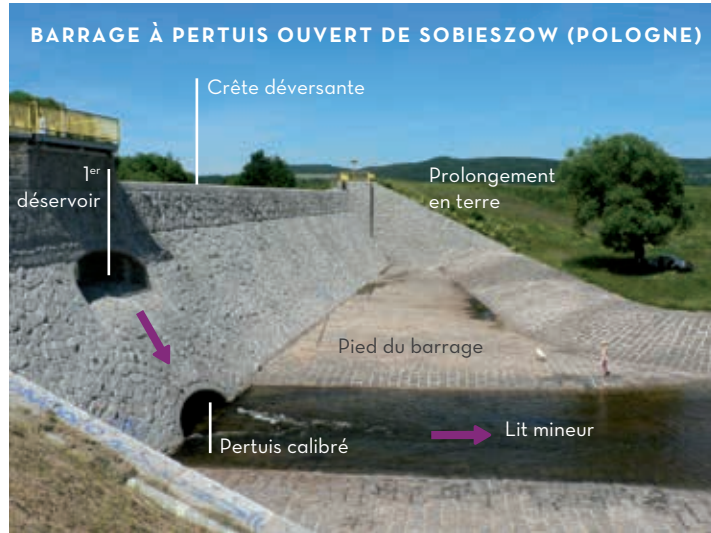


FIGURE 26

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.

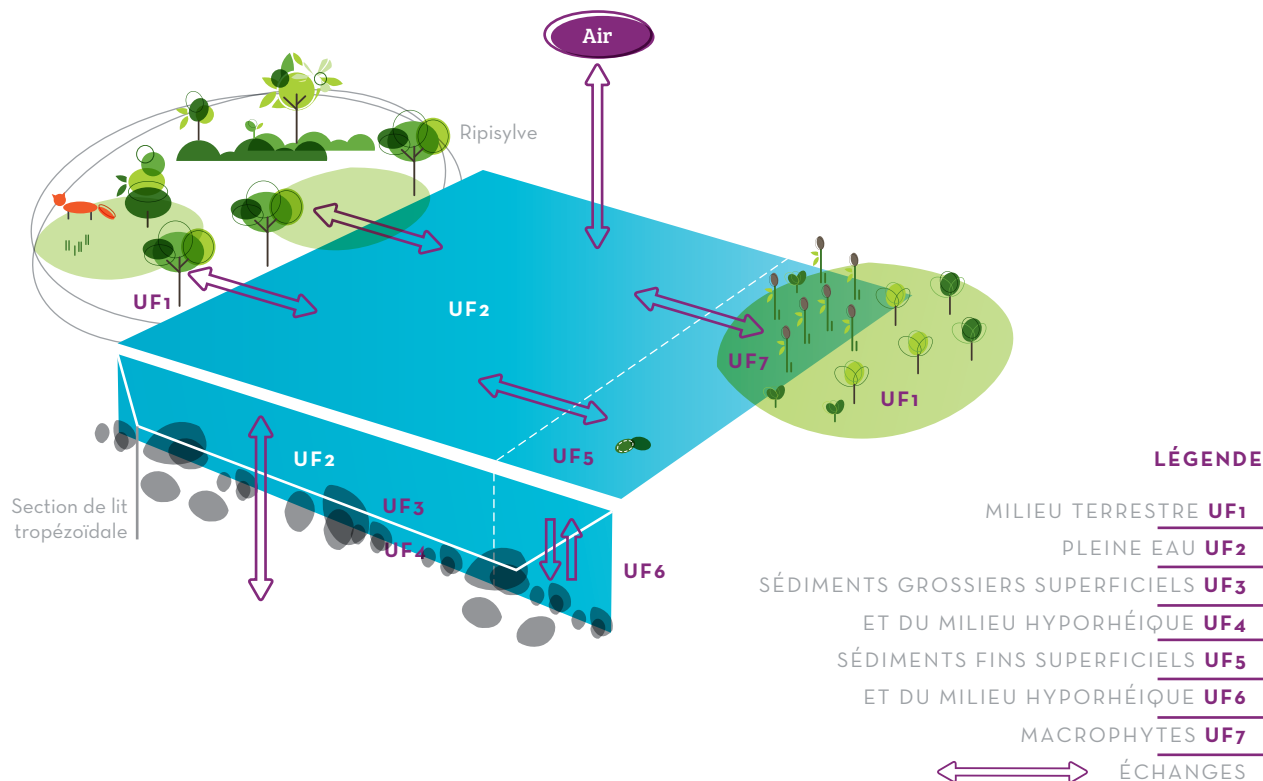


FIGURE 28

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 rivières. 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.

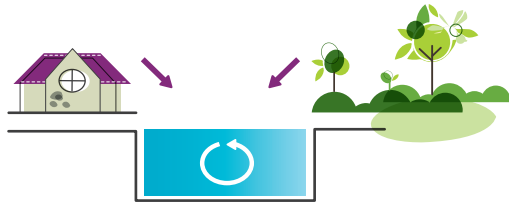
Nous avons ensuite décrit les états possibles, après artificialisation. Dans ce contexte relativement homogène, notre typologie est linéaire, structurée par un gradient d'artificialisation lié à l'imperméabilisation du lit. Les paysages vont du canal imperméable (Rs I) au cours d'eau naturel (Rs IV). 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<sup>3</sup> 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 :

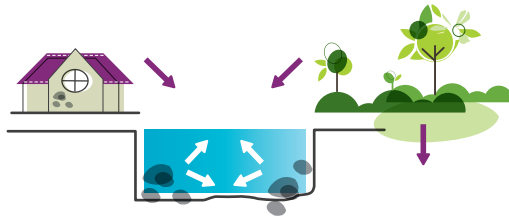
Caractéristiques biologiques

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.



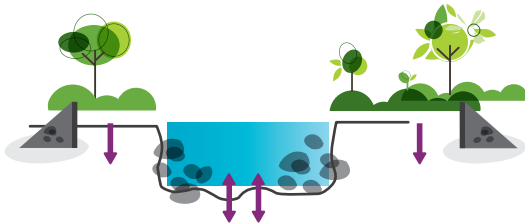
### RS II: LIT MINEUR ARTIFICIEL AMÉLIORÉ

#### 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 :

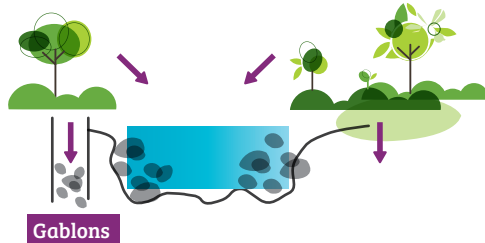
la diversité et l'efficacité des processus, en particulier ceux liés aux habitats poreux, en est accrue d'autant.



### 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...



## COMPARAISON DES CONTRAINTES

ZONES	CONTRAINTES ( FONCTION D'ÉCRÊTEMENT)	DISCUSSION POUR LE RIVERSCAPE -OBJECTIF
<b>A - Cuvette</b>	<p>Pas de contraintes liées à l'ouvrage, sauf des restrictions d'occupation du sol liées aux conditions en submersion.</p> <p>Les mises en eau seront rares mais avec localement de fortes hauteurs d'eau.</p>	<p><i>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.</i></p>
<b>B – Entonnement</b>	<p>Le lit mineur doit être dirigé vers le pertuis et résister aux mises en vitesse locales pendant les crues.</p>	<p><i>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.</i></p>
<b>C - Corps du barrage</b>	<p>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.</p> <p>Fondations indispensables.</p>	<p><i>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.</i></p> <p><i>Les fondations modifient les flux souterrains et donc le fonctionnement de la zone hyporhéique.</i></p>
<b>D - Pied du barrage</b>	<p>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.</p>	<p><i>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.</i></p>
<b>A' - Aval</b>	<p>Par définition, la zone aval n'a plus besoin de protection particulière.</p>	<p><i>Le type Rs IV doit être l'objectif dès que possible. L'aval connaît toutefois un régime hydrologique (eau + sédiments) modifié par le barrage.</i></p>

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 collégalement 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 dispo-

nible, 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 :**

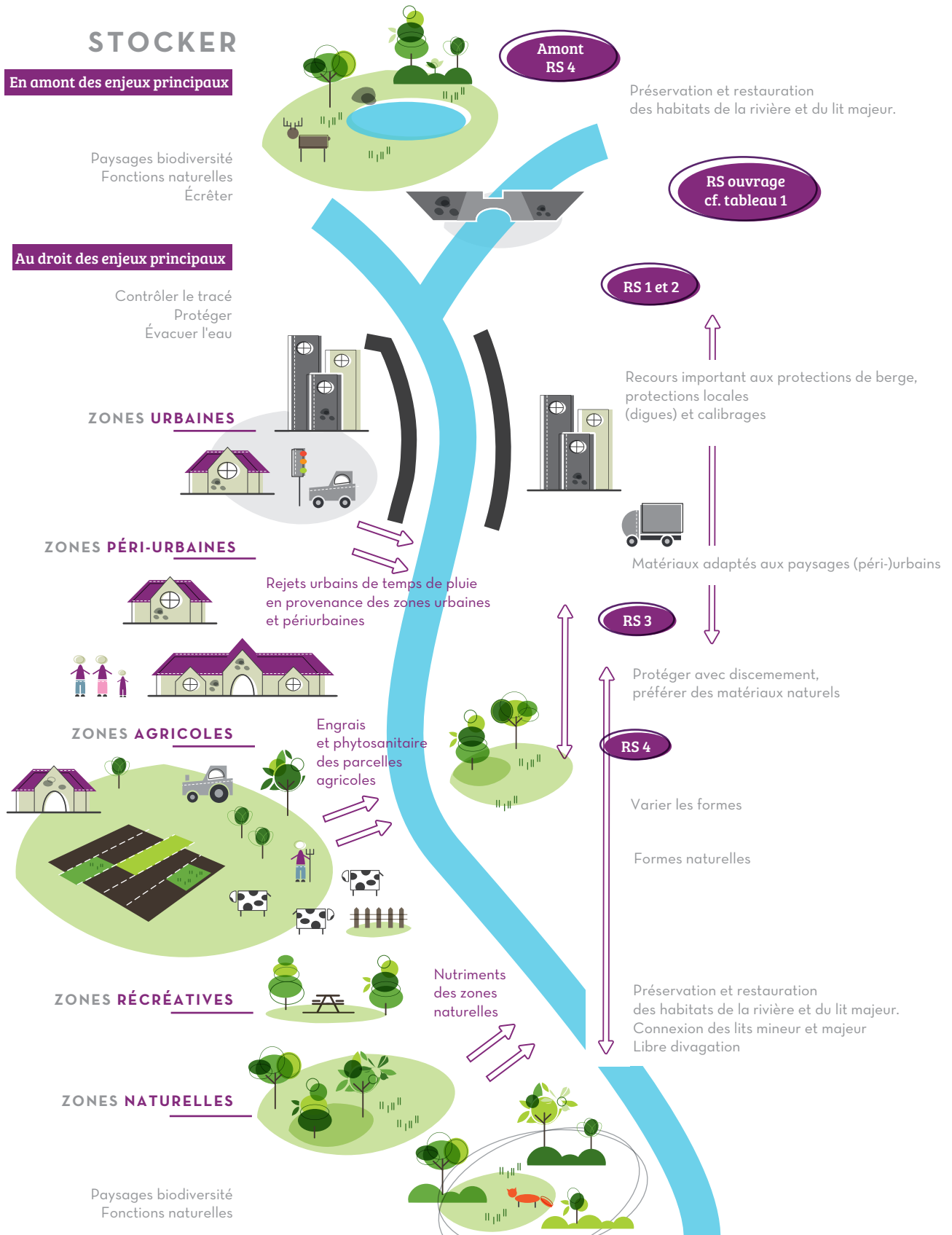
La représentation par profils masque les composantes longitudinales comme la pente et l'hétérogénéité. À l'avenir, nous proposons de décrire des caractéristiques par tronçon, chacun étant éventuellement illustré par plusieurs types de profils-types, en précisant éventuellement leur fréquence (profil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


**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<sup>14</sup>, 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.

<sup>14</sup> programme Polonium puis EcoNet