

## **RESTAURER LE BON ETAT DES PLANS D'EAU**



## **RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES METHODES DE RESTAURATION DES PLANS D'EAU ET RECOMMANDATIONS**



---

# SOMMAIRE

<b>Préambule</b>	<b>1</b>
<b>Objectifs et contenu de la note</b>	<b>2</b>
<b>1. Bilan des actions de restauration réalisées</b>	<b>3</b>
1.1. Une synthèse disponible	3
1.2. Les altérations traitées	3
1.3. Les techniques de restauration mises en œuvre	4
<b>2. Retours d'expériences sur l'efficacité des techniques de restauration</b>	<b>5</b>
2.1. Lutter contre l'eutrophisation	6
2.2. Lutter contre les dysfonctionnements liés aux sédiments	16
2.3. Lutter contre les déséquilibres de la biodiversité	20
2.4. Lutter contre les problèmes d'érosion	24
2.5. Protéger les habitats littoraux des usages	25
<b>3. Les actions à engager pour le plan de gestion 2016-2021</b>	<b>27</b>
3.1. Définir les actions et les techniques de restauration à mettre en œuvre	27
3.2. Suivre les effets sur le milieu	29
<b>4. Conclusion</b>	<b>30</b>

---

## Auteurs

Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse : Lionel NAVARRO, Stéphane STROFFEK

Remerciements, pour leurs contributions, à l'ensemble des membres du groupe de travail de bassin qui traite spécifiquement des problématiques liées aux plans d'eau douce. Ce groupe de travail, rattaché au secrétariat technique du SDAGE Rhône-Méditerranée, comprend des représentants de l'office national de l'eau et des milieux aquatiques, des directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement, de l'agence régionale de la santé Rhône-Alpes et de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse.



Lac Noir, plateau d'Emparis (38). Navarro L. (2014)

## Préambule

---

Les plans d'eau constituent des milieux de grande valeur patrimoniale et environnementale. Ils offrent des ressources pour l'alimentation en eau potable et la pêche, des espaces pour la baignade, les sports nautiques mais aussi pour la régulation des crues ; ils constituent des paysages singuliers qui façonnent l'identité des territoires.

La pérennité de ce patrimoine et de ces services suppose de maintenir des écosystèmes en bon état. Les activités humaines peuvent avoir des impacts négatifs sur la qualité de l'eau et des habitats aquatiques utiles à la faune et la flore. Il apparaît alors nécessaire d'identifier les dysfonctionnements et de mettre en place des actions de restauration et de protection de ces milieux.

Le SDAGE Rhône-Méditerranée prévoit ainsi des objectifs environnementaux pour les plans d'eau supérieurs à 50 hectares. L'objectif est d'atteindre le bon état écologique et chimique pour les plans d'eau naturels et le bon potentiel écologique et le bon état chimique pour les masses d'eau artificielles et fortement modifiées. 94 plans d'eau sont aujourd'hui concernés sur le bassin Rhône-Méditerranée. En lien avec les objectifs du SDAGE, le programme de mesures définit ce qu'il faut engager en priorité pour restaurer ces milieux et réduire les risques liés aux activités humaines actuellement en place.

La révision de l'état des lieux réalisée fin 2013 fait apparaître que 53% des plans d'eau considérés par le SDAGE présentent un risque de ne pas atteindre les objectifs

environnementaux de bon état ou de bon potentiel écologique et chimique d'ici 2021. Il faut donc agir pour réduire les pressions humaines qui s'exercent sur ces plans d'eau.

Ce résultat diffère toutefois selon la nature des plans d'eau. Ainsi, 42% des plans d'eau naturels présentent un tel risque, contre 51% pour les masses d'eau fortement modifiées (retenues artificielles) et 85% pour les plans d'eau artificiels (qui comprennent notamment les gravières).

Toutes masses d'eau confondues, les pressions anthropiques à l'origine de ces risques se répartissent de la manière suivante :

- Pollutions diffuses (azote, phosphore et pesticides) pour 48% des plans d'eau ;
- Pollutions ponctuelles (nutriments et substances) pour 17% des plans d'eau ;
- Modification de l'hydrologie (marnage artificiel) pour 26% des plans d'eau, essentiellement des retenues artificielles, en lien avec leurs usages (hydroélectricité, irrigation, eau potable, soutien d'étiage) ;
- Rupture de la continuité piscicole vers leurs affluents ou émissaires pour 19% des plans d'eau ;
- Dégradation de la morphologie (aménagement des berges) pour 13% des plans d'eau.

Les pollutions diffuses constituent le principal facteur de risque pour l'atteinte des objectifs environnementaux, tous types de milieux confondus.



A la lecture de cette note, il convient de distinguer les actions de restauration qui ciblent les causes des dysfonctionnements de celles qui traitent seulement les conséquences. Les opérations de restauration envisagées doivent en premier lieu traiter les causes. Dans le cas de problèmes d'eutrophisation par exemple, les techniques visant à réduire

les flux de nutriments au plan d'eau doivent ainsi être privilégiées. De même, la restauration d'habitats aquatiques et rivulaires permet la restauration du cycle biologique des espèces présentes, de préférence pour le soutien ou la réintroduction d'espèces animales ou végétales.

## Objectifs et contenu de la note

---

Cette note a pour objectif d'apporter des éléments techniques pour aider l'émergence et la mise en œuvre de projets de restauration sur les plans d'eau naturels et artificiels du bassin Rhône-Méditerranée.

Elle fait une synthèse des techniques de restauration observées sur le bassin, et plus largement en France et à l'étranger. Elle présente les retours d'expériences disponibles quant à leur efficacité et leurs conditions de mise en œuvre. Ces informations reposent en grande partie sur les résultats d'une étude réalisée sous la maîtrise d'ouvrage de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse (Cf. chapitre 1). Elles sont par ailleurs complétées par les résultats de l'étude inter-agence n°83 intitulée « Aide à la décision pour le traitement des plans d'eau » (2003).

Cette note identifie ainsi les opérations de restauration recensées sur le bassin Rhône-Méditerranée. Elle émet également des préconisations pour engager des actions de

restauration et suivre leurs effets dans le cadre du plan de gestion 2016-2021.



*Lac du Bourget, roselière des Séselets après restauration (73) - CISALB*

# 1. Bilan des actions de restauration réalisées

## 1.1. Une synthèse disponible

L'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse a fait réaliser en 2012 une étude visant à recenser les techniques de restauration applicables aux plans d'eau et à identifier les actions de restauration (financées ou non par l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse) mises en œuvre sur le bassin Rhône-Méditerranée.

Cette étude intitulée « *Synthèse des retours d'expérience des projets de restauration mis en œuvre sur les plans d'eau des bassins Rhône-Méditerranée et Corse* », sous-traitée au bureau d'études Sciences et Techniques de l'Environnement (S.T.E.), est diffusée sur le portail documentaire à l'adresse suivante : <http://www.documentation.eaufrance.fr/>

Une base de données est par ailleurs disponible auprès de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse<sup>1</sup>.

Cette étude a permis d'identifier 65 techniques de restauration mises en œuvre en France et/ou à l'étranger. Tous les types de masses d'eau, naturels ou non, ont été intégrés à cette étude. Sur le bassin Rhône-Méditerranée, 100 opérations de restauration, réparties sur 41 plans d'eau, et mettant en œuvre 37 techniques, ont ainsi été recensées (Tableau 1).

Tableau 1 : Nombre d'opérations de restauration et de plans d'eau concernés (par type) sur le bassin Rhône-Méditerranée

Type de plan d'eau	Nombre d'opérations	Nombre de plans d'eau concernés
Etang	29	15
Gravière	14	7
Lac naturel	30	8
Mare	5	3
Retenue artificielle	22	8

Cette synthèse n'est pas limitée aux plans d'eau supérieurs à 50 hectares (critère de sélection pour les masses d'eau dont l'état écologique et chimique doit être rapporté à l'Europe au titre de la DCE). Elle concerne également les plans d'eau de taille inférieure.

## 1.2. Les altérations traitées

La figure 1 ci-dessous précise les altérations constatées qui ont motivé des opérations de restauration sur le bassin Rhône-Méditerranée, et ce, tous types de plans d'eau confondus.

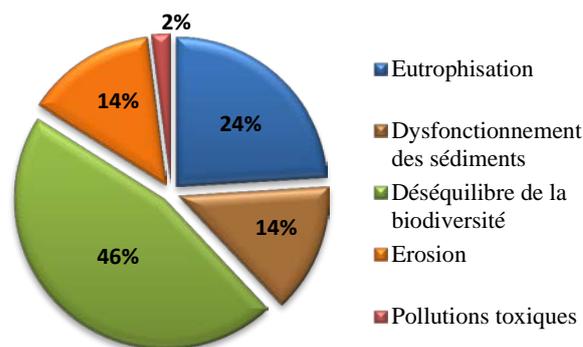


Figure 1 : Répartition par grands types d'altérations des opérations de restauration mises en œuvre sur le bassin Rhône-Méditerranée (synthèse 2012, 100 opérations recensées)

Les grands types d'altérations illustrés sur cette figure concernent les dysfonctionnements suivants :

- **Eutrophisation** : augmentation des concentrations en composés nutritifs, augmentation de la biomasse végétale (macrophytes et phytoplancton) et bactérienne, désoxygénation marquée du plan d'eau ;
- **Dysfonctionnement liés aux sédiments** : accélération du comblement, relargage de composés nutritifs ;
- **Déséquilibre de la biodiversité** : déséquilibre des compartiments floristique et/ou faunistique, dégradation de l'écosystème littoral ;
- **Erosion** : érosion des berges ;
- **Pollutions toxiques** : pollutions par des toxiques (toutes substances confondues).

Les opérations de restauration mises en œuvre sur le bassin Rhône-Méditerranée visent majoritairement à restaurer les habitats de la zone littorale avec 31% des opérations de restauration recensées. Viennent ensuite les opérations de restauration visant à traiter

<sup>1</sup> Contact : [lionel.navarro@eauvmc.fr](mailto:lionel.navarro@eauvmc.fr)

l'érosion des berges (14% des opérations), l'accélération du comblement du plan d'eau (14%), les déséquilibres du compartiment faunistique (11%) et l'augmentation de la biomasse macrophytique liée à l'eutrophisation du milieu (11%).

Cette proportion importante d'actions traitant de la morphologie s'explique notamment par le rôle majeur des habitats de la zone littorale dans le fonctionnement du milieu. Ces habitats constituent des zones de reproduction, de nutrition et de refuge pour divers organismes aquatiques tels que les poissons, les insectes et les végétaux.

Par ailleurs, les modalités de mise en œuvre d'actions de restauration tiennent compte dans certains cas des attentes des usages. Le contrôle des développements macrophytiques est par exemple mis en œuvre pour pérenniser la pratique de la baignade et de loisirs nautiques.

### 1.3. Les techniques de restauration mises en œuvre

D'une manière générale, 5 techniques sont régulièrement appliquées sur les plans d'eau du bassin Rhône-Méditerranée :

- Le reprofilage des berges ;
- Le génie végétal ;
- Le contrôle mécanique des macrophytes ;
- Le détournement de tributaire(s) ;
- Le curage du plan d'eau.

Les altérations traitées et les techniques de restauration mises en œuvre peuvent être de natures différentes selon le type de plans d'eau : lacs naturels, étangs artificiels et gravières, retenues artificielles et mares.

#### 1.3.1. Lacs naturels

Pour les lacs naturels, les opérations de restauration observées visent en premier lieu à restaurer l'écosystème littoral dégradé (63% des opérations de restauration recensées).

D'autres altérations sont traitées : l'augmentation des nutriments dans la masse

d'eau (13% des opérations de restauration), les déséquilibres du compartiment faunistique (13%) et l'anoxie de la masse d'eau (7% des opérations de restauration).

Les techniques de restauration les plus utilisées sont le reprofilage de berges, la diversification des habitats, la protection de la zone littorale et la modification du niveau des eaux.

#### 1.3.2. Etangs artificiels et gravières

Dans le cas des étangs artificiels et des gravières, les opérations de restauration recensées ont consisté à restaurer l'écosystème littoral et réguler les proliférations de macrophytes. Le comblement a également motivé des actions de restauration sur certains étangs.

Les techniques de restauration utilisées sont la diversification des habitats de la zone littorale, le contrôle mécanique des macrophytes et le curage (pour les étangs artificiels).



*Curage de l'étang de Crosagny (74)*

#### 1.3.3. Retenues artificielles (barrage)

La moitié des opérations de restauration recensées sur les retenues artificielles vise à limiter l'érosion des berges, du fait des marnages liés à l'usage des retenues (eau potable, irrigation, soutien d'étiage ...).

Dans une moindre mesure, l'augmentation du phytoplancton est également ciblée (20% des opérations) ainsi que la dégradation de l'écosystème littoral et le déséquilibre du compartiment faunistique (9% des opérations).

#### 1.3.4. Mares

Pour les mares, les opérations de restauration ont visé à limiter leur comblement, lié généralement à leur production interne en matière organique. Cette production peut également être accélérée par les apports

anthropiques en nutriments issus du bassin versant.

Les techniques les plus fréquemment utilisées sont le génie végétal et le contrôle mécanique des macrophytes.

## 2. Retours d'expériences sur l'efficacité des techniques de restauration

Ce chapitre fait une synthèse des techniques de restauration recensées en France et à l'étranger, et ce, par grands types d'altération et problèmes rencontrés. Pour chacune de ces techniques, les retours d'expériences disponibles auprès des maîtres d'ouvrage ont été précisés dans un tableau. Ce dernier comprend les informations suivantes :

**Domaine d'applicabilité :** caractéristiques des plans d'eau concernés

**Efficacité :** évaluation de l'efficacité sur la base des opérations de restauration recensées

**Coûts :** synthèse des coûts observés

**Vigilance :** liste des effets négatifs possibles sur l'écosystème



**Les retours d'expériences relatifs à la mise en œuvre d'une technique de restauration, présentés dans la suite de cette note, sont issus d'un nombre relativement restreint d'opérations de restauration. Or, les réponses du milieu peuvent être très variables d'un plan d'eau à l'autre, du fait des caractéristiques intrinsèques (qualité de l'eau, des sédiments, hydrologie, apports allochtones...). Il convient donc de considérer avec précautions ces retours d'expériences, au regard également de l'ensemble des problèmes à résoudre sur le plan d'eau.**

Avant la mise en œuvre de toute action de restauration sur un plan d'eau, il est nécessaire de préciser et de caractériser les processus altérés et de choisir en conséquence la technique de restauration la mieux adaptée (cf. chapitre 3).

Par ailleurs, il est à noter que pour chacune des techniques de restauration décrites dans la suite

de ce rapport, l'efficacité est évaluée sous l'angle de leur objectif propre. L'efficacité d'une technique de restauration ainsi évaluée ne préjuge pas de son efficacité pour l'atteinte d'un objectif plus global d'atteinte du bon état écologique. Très souvent, un ensemble d'actions sont en effet nécessaires pour atteindre un tel objectif.

### Sommaire du chapitre 2

<b>Restaurer les fonctionnalités du milieu</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Lutter contre l'eutrophisation</b>	<b>6</b>
2.1.1 Réduire les apports de nutriments	6
2.1.2 Limiter la prolifération des macrophytes	8
2.1.3 Limiter le développement du phytoplancton	11
2.1.4 Lutter contre la désoxygénation du plan d'eau	14
2.1.5 Limiter le relargage des nutriments des sédiments vers la masse d'eau	15
<b>2.2 Lutter contre les dysfonctionnements des sédiments</b>	<b>16</b>
2.2.1 Limiter le comblement du plan d'eau	16
2.2.2 Lutter contre la contamination des sédiments par des substances toxiques	19
<b>2.3 Lutter contre les déséquilibres de la biodiversité</b>	<b>20</b>
2.3.1 Lutter contre les déséquilibres du compartiment floristique	20
2.3.2 Lutter contre les déséquilibres du compartiment faunistique	20
2.3.3 Restaurer et protéger l'écosystème littoral	21
<b>2.4 Lutter contre les problèmes d'érosion</b>	<b>24</b>
<b>Limiter l'impact des usages</b>	<b>25</b>
<b>2.5 Protéger les habitats littoraux des usages</b>	<b>25</b>

# Restaurer et préserver les fonctionnalités du milieu

## 2.1. Lutter contre l'eutrophisation

Les problèmes d'eutrophisation traduisent un enrichissement du milieu en éléments nutritifs (composés azotés et phosphorés). Ces excès résultent d'apports issus d'activités humaines : rejets de stations d'épuration des eaux usées, lessivage de terres agricoles fertilisées, rejets domestiques ...

Les conséquences pour le milieu sont multiples, avec, par exemple, des proliférations algales (certaines formes pouvant libérer des substances toxiques), une désoxygénation des eaux profondes du fait de la surproduction de matières organiques, un déséquilibre de la structure des peuplements macrophytiques.

Ces altérations ne sont pas sans incidence sur les usages, pouvant par exemple provoquer :

- Une altération de la qualité des eaux destinées à l'alimentation en eau potable et la baignade, du fait par exemple de la présence de cyanotoxines (toxines libérées par les cyanobactéries) ;
- Des nuisances pour les loisirs nautiques du fait de la prolifération de la végétation aquatique ;
- Des rendements de pêche altérés (baisse de la production piscicole ou peuplements déséquilibrés).

Pour lutter contre ces altérations, les techniques suivantes visent à limiter les concentrations en nutriments dans le plan d'eau.

### 2.1.1. Réduire les apports de nutriments

#### Traitement des eaux des tributaires

**Domaine d'applicabilité :** tous plans d'eau

**Efficacité :** très efficace à moyen/long terme

**Coûts :** variables selon le nombre et le type d'installations

**Vigilance :** augmentation du temps de séjour liée à la baisse des débits dans le cas du détournement d'un ou plusieurs tributaires (augmentation de la sensibilité à l'eutrophisation)

Les techniques de collecte et de traitement des eaux usées avant leur rejet vers le plan d'eau (ou leurs tributaires) montrent d'excellents résultats. Ces résultats sont généralement visibles à long terme et dépendent du niveau d'altération initial et de l'inertie de la masse d'eau (en lien avec son temps de séjour). Des phénomènes de relargages des nutriments accumulés dans les sédiments (en condition d'anoxie des eaux profondes) contribuent au rallongement de ces délais de restauration. Des techniques de restauration existent pour réduire ces phénomènes de relargage. Elles sont décrites dans la suite de cette note (cf. § 2.1.5).

L'un des cas les mieux documentés sur le bassin Rhône-Méditerranée est celui du lac Léman (Figure 2).

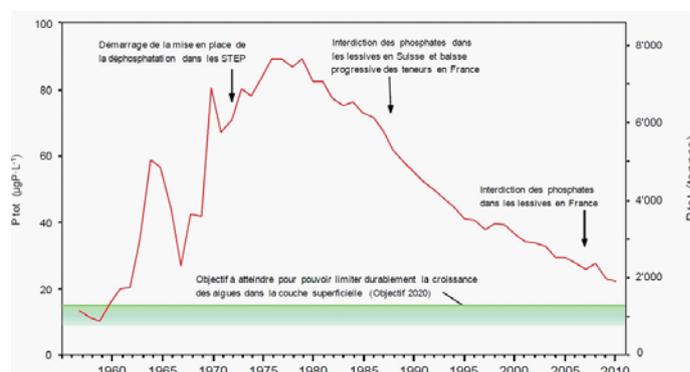


Figure 2 : Evolution des concentrations en phosphore total dans le lac Léman (source : CIPEL, 2010). La ligne verte indique l'objectif à atteindre.

Dans le lac Léman, les concentrations en phosphore total dépassaient les 80 µg/L dans les années 70-80, pour repasser sous les 20 µg/L en 2013. Ces résultats sont le fruit d'une amélioration des systèmes d'épuration (mise en place de dispositifs de déphosphatation sur les stations d'épuration du bassin versant) associée à des politiques de réduction de l'utilisation de composés phosphatés par les ménages (en l'occurrence les lessives).



**Les techniques présentées ci-après visent davantage à limiter les effets visibles de l'eutrophisation.**

**Les actions de restauration mettant en œuvre ces techniques n'ont des effets durables que si elles sont associées à des actions de réduction pérenne des apports de nutriments au plan d'eau.**

*Exportation des eaux du plan d'eau chargées en nutriments*

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau profonds et stratifiés (généralement > 15m de profondeur)

**Efficacité :** technique efficace sur environ 5 ans

**Coûts :** non chiffrés mais importants, notamment si une station de traitement des eaux avant restitution à l'aval est mise en place

**Vigilance :** réchauffement des eaux, perturbation des habitats benthiques profonds, baisse de niveau, destratification, pollution à l'aval

Le soutirage des eaux profondes permet d'extraire des eaux désoxygénées et chargées en nutriments. Plusieurs méthodes ont été observées, avec la mise en place d'une canalisation prélevant les eaux profondes ou l'utilisation d'une vanne de fond au niveau d'un barrage à l'exutoire. En complément, une station de traitement des eaux peut être prévue avant restitution. Dans le cas de l'utilisation d'une canalisation, les eaux peuvent être soutirées soit de manière gravitaire à l'aide d'un siphon (si le point de restitution est plus

bas que le point de prélèvement), soit à l'aide d'une pompe.

Cette technique, associée aux efforts consentis en termes d'épuration des eaux usées, a par exemple été mise en place sur le lac de Paladru (38). Pour ce lac, l'ensemble des actions entreprises ont ainsi rendu possible la réintroduction de l'omble chevalier, mais toujours pas l'accomplissement du cycle biologique complet de cette espèce, par ailleurs très exigeante.

Cette technique a également été expérimentée depuis plus de 50 ans dans d'autres pays (Canada, Inde, USA, Suisse).

Elle apparaît efficace à moyen terme (5 ans), mais doit être considérée avec précaution. Elle peut en effet :

- provoquer une baisse du niveau du plan d'eau ;
- perturber le fonctionnement du plan d'eau par destratification ;
- réchauffer les eaux du plan d'eau par exportation des eaux les plus froides ;
- dégrader la qualité des eaux à l'aval (apport d'eau désoxygénée ou de polluants).

*Mise en place d'un pré-barrage - zone humide*

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau alimentés par un cours d'eau principal

**Efficacité :** variable selon les paramètres ciblés et la conception de la zone humide (temps de séjour)

**Coûts :** 700 000 € pour 30 Ha + coûts liés à l'entretien (faucardage)

**Vigilance :** -

Cette technique consiste à créer une zone de rétention des eaux de faible profondeur et végétalisée à l'entrée du plan d'eau. Les macrophytes consomment alors les éléments nutritifs présents dans l'eau. Un entretien peut s'avérer nécessaire pour éliminer les végétaux (faucardage par exemple).

Sur le bassin Rhône-Méditerranée, cette technique a été utilisée sur le lac de Saint-Martial (07) et le lac des Sapins (69). Sur ce

dernier, des pré-barrages constitués de roselières (3 bassins successifs) ont été mis en place sur l'un des affluents.



Roselière du bassin n°3 du lac des Sapins – SMALS, 2008.

Après une vingtaine d'années de fonctionnement (associé à l'utilisation d'aérateurs et d'épandages de calcium, cf. §2.1.4 et 2.1.5), des effets significatifs ont été observés, mais le lac des Sapins reste eutrophe.

### 2.1.2. Limiter la prolifération des macrophytes (non exotiques)

Les techniques ici recensées n'apparaissent pas totalement satisfaisantes, dans la mesure où les effets ne sont que temporaires et/ou qu'elles présentent des effets secondaires non négligeables et parfois non maîtrisés. Avant toute opération visant à limiter le développement des macrophytes, il convient donc en premier lieu d'identifier l'origine et la nature des proliférations observées afin d'agir à la source du problème.

Par exemple, si les proliférations observées sont une résultante de l'eutrophisation du milieu, les techniques de réduction des surfaces colonisées par les macrophytes doivent être si possible accompagnées d'une réduction de la charge en nutriments. Dans le cas de plans d'eau artificiels, la nature des fonds et la morphologie du plan d'eau peuvent également favoriser ces proliférations.

### Le contrôle mécanique

**Domaine d'applicabilité :** tous plans d'eau

**Efficacité :** à court terme, mais opérations à renouveler

**Coûts :** 70 000 € en achat (bateau équipé), et de 2 000 € à 3 000 € par jour en location avec retrait des végétaux

**Vigilance :** mise en suspension de sédiments, risque de bouturage qui facilite la dissémination, impacts directs et indirects (perte d'habitats) sur les populations de macroinvertébrés et poissons, augmentation du développement phytoplanctonique, espèces à forte capacité de colonisation favorisées

Les techniques de contrôle mécanique (faucardage, scarifiage) mises en œuvre sur les lacs du Môle (74), d'Anthon (74), les étangs de Crosagny (73) et de la Dombes (01) et les plans d'eau de Bouvent (01), d'Embrun (05) et du Grand Large (69) montrent des résultats plus ou moins efficaces selon les plans d'eau. Cette technique est très utilisée à l'étranger, en particulier aux USA.

Cette technique est généralement limitée aux surfaces ayant au maximum une profondeur de 2-3 mètres. L'efficacité semble dépendante du niveau d'eutrophisation du plan d'eau, de l'effort et de la période de récolte. Par ailleurs, certaines espèces à reproduction végétative active telle que des myriophylles, des renoncules ou des élodées peuvent être favorisées par ces interventions.



Photos avant et après faucardage sur l'étang de Crosagny (73). SIGEA 2010.

Les dragages de végétaux et de sédiments superficiels réalisés sur les lacs Kir (21) et de Machilly (74) apparaissent efficaces mais génèrent une remise en suspension des sédiments (problèmes de pollution potentiels).



*Pelle amphibie et barge, lac de Machilly (74). SIFOR 2009.*

Les coûts de mise en œuvre sont par ailleurs relativement élevés et les actions doivent généralement être reconduites après quelques années (2 à 3 ans généralement). Cette technique de dragage n'est à l'heure actuelle pas renouvelée sur le lac Kir compte tenu de ces coûts.

Concernant la végétation terrestre, des retours d'expériences sont également disponibles pour la réalisation d'opérations de débroussaillage : étang de Montjoux (38) et mare de Catchéou (06). Ces opérations ont permis de restaurer les milieux de manière efficace en réduisant significativement l'invasion des roselières par les ligneux, les bourdaines et les jeunes saules.

#### *Le contrôle manuel*

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau dont la surface à traiter est faible

**Efficacité :** peu de retours d'expériences

**Coûts :** jusqu'à 17 000 €/Ha si réalisé par des plongeurs

**Vigilance :** risque de bouturage, impacts directs et indirects (perte d'habitats) sur les populations de macroinvertébrés et poissons, augmentation du développement phytoplanctonique, espèces à forte capacité de colonisation favorisées

Cette technique consiste à extraire manuellement la biomasse végétale envahissante afin de limiter son expansion. Des outils de type râtaux à double tête sont utilisés depuis la berge ou une embarcation. Les opérations peuvent également être réalisées par un plongeur.

Les végétaux arrachés ou coupés sont ensuite évacués pour compostage, incinération ou

épandage. Les interventions doivent limiter la dissémination de débris flottants et ainsi éviter toute propagation.

Cette technique est généralement utilisée pour de faibles surfaces, pour des débuts de colonisation d'espèces invasives ou pour l'entretien suite à l'utilisation de techniques mécanisées. Elle peut être accompagnée de plantations d'espèces locales compétitrices. Dans ces conditions, ce type d'opération peut s'avérer efficace mais peu de retours d'expériences ont été recensés sur le bassin.

Le faucardage manuel avec plantation réalisé par un plongeur a par exemple été mis en œuvre sur le plan d'eau des Buissonnades (04). La technique s'est avérée efficace mais également très coûteuse et à reconduire annuellement : l'utilisation d'un bateau faucardeur a donc été préféré les années suivantes. Le même constat (avec des résultats beaucoup plus mitigés) a été fait pour le plan d'eau d'Embrun (05), où le bateau faucardeur a également été préféré les années suivantes.

#### *Les inhibiteurs physiques de croissance*

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau de petites tailles et/ou présentant de faibles surfaces à traiter

**Efficacité :** bonne, à court terme (sur plusieurs mois à plusieurs années selon les procédés utilisés)

**Coûts :** élevés, environ 20 000 €/Ha pour de la géomembrane (+ sable)

**Vigilance :** impacts directs et indirects (perte d'habitats) sur la faune et la flore

Cette technique consiste à bloquer l'accès à la lumière pour la végétation aquatique envahissante. Plusieurs procédés ont été répertoriés : l'utilisation de membranes flottantes ou déposées sur le fond, la mise en place d'un lit de gravier et la coloration de l'eau à l'aide d'un colorant tel que l'aniline.

Sur le bassin Rhône-Méditerranée, bien qu'employée ponctuellement sur des bras lenticulaires de cours d'eau (géomembrane), aucun retour d'expérience n'a été recensé pour des plans d'eau. Les impacts négatifs sur l'écosystème, mais également les coûts, militent toutefois pour réduire l'utilisation de

ces techniques à de petites surfaces (ce qui exclut donc l'utilisation de colorant), par exemple pour supprimer des foyers de développement d'espèces exotiques envahissantes.

#### Baisse du niveau d'eau

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau artificiels et vidangeables

**Efficacité :** variable

**Coûts :** faibles, utilisation des installations existantes

**Vigilance :** prolifération d'algues après remplissage, turbidité et érosion lors du remplissage

La vidange totale ou partielle du plan d'eau est une technique qui vise à exonder les surfaces fortement végétalisées et à les laisser s'assécher durant 2 semaines au minimum.

Cette technique a été utilisée sur le plan d'eau d'Embrun dans le département des Hautes-Alpes (vidange partielle). Cette opération n'a pas permis d'enrayer la prolifération des herbiers, et au contraire, des proliférations plus précoces ont été observées les années suivantes (en lien avec la disparition d'une algue qui pourrait concurrencer les macrophytes).

D'une manière plus générale, l'efficacité de cette technique semble dépendante des conditions de mise en œuvre, en particulier de la durée d'asec, des conditions météorologiques et des espèces végétales visées (capacité à résister à l'exondation).

#### Elévation du niveau d'eau

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau artificiels de faible superficie avec dispositif de régulation du niveau

**Efficacité :** peu de retours d'expériences disponibles

**Coûts :** aucun

**Vigilance :** inondation des berges

A l'inverse de la technique précédente, cette technique consiste à augmenter le niveau d'eau lors de périodes de développement du phytoplancton. Les hydrophytes ont alors un accès limité à la lumière.

Cette technique est généralement difficile à mettre en œuvre (inondation possible des berges) et très peu de retours d'expériences sont disponibles. Sur le plan d'eau de Lescheraines (73), cette technique a toutefois montré des effets significatifs sur 2 à 3 ans.

#### Technique de biomanipulation

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau isolés (pour éviter toute propagation), **technique soumise à autorisation**<sup>2</sup>

**Efficacité :** bonne

**Coûts :** en moyenne 10 €/le kg de carpes Amour (pour des quantités supérieures à 100 kg), Prix variables selon les quantités.

**Vigilance :** turbidité des eaux, pertes d'habitats, modification du fonctionnement global de l'écosystème

Aujourd'hui soumise à autorisation, l'introduction de carpes Amour a été observée par exemple sur la gravière de Châteauneuf du Rhône (26). Cette espèce exotique se nourrit de surfaces importantes de macrophytes. Ces poissons génèrent par ailleurs une forte turbidité des eaux par leur activité de fouissage, ce qui limite la prolifération de la flore.

<sup>2</sup> Conformément à l'arrêté du 6 août 2013 fixant en application de l'article R. 432-6 du code de l'environnement la forme et le contenu des demandes d'autorisations prévues au 2° de l'article L. 432-10 et à l'article L. 436-9 du code de l'environnement

Bien que cette technique s'avère efficace sur les macrophytes, elle impacte le fonctionnement de l'ensemble de l'écosystème aquatique et doit donc être considérée avec précaution.

### Traitements chimiques

**Domaine d'applicabilité :** technique interdite

**Efficacité :** -

**Coûts :** -

**Vigilance :** -

Historiquement, des traitements chimiques à l'aide de produits phytosanitaires ont été utilisés sur le bassin Rhône-Méditerranée pour limiter les proliférations de macrophytes. Leur utilisation est désormais interdite (aucun produit n'est à ce jour homologué).

#### 2.1.3. Limiter le développement du phytoplancton

Comme mentionné précédemment pour les problèmes de proliférations de macrophytes, les techniques suivantes visent le plus souvent à réduire les effets de phénomènes d'eutrophisation du milieu. Il peut notamment s'agir de proliférations de cyanobactéries, susceptibles de relarguer des toxines et ainsi perturber certains usages (alimentation en eau potable, baignade ...).



*Prolifération de cyanobactéries sur la retenue de Vinça (66). S.T.E. (2009)*

Bien que certaines techniques soient efficaces à court ou moyen terme, les effets ne sont que transitoires et nécessitent une réitération des interventions. Les coûts cumulés peuvent alors être importants.

Il convient d'agir en priorité sur l'origine du problème : le plus souvent des apports excessifs en nutriments au plan d'eau.

Les techniques suivantes sont donc à considérer pour accompagner transitoirement les effets bénéfiques attendus par la réduction des apports en nutriments au plan d'eau.

**Dans le cadre de projets de création de plans d'eau artificiels, il convient de réaliser les études préalables nécessaires pour s'assurer de la compatibilité de la qualité des eaux d'alimentation du plan d'eau avec son fonctionnement écologique et les usages projetés. Cette étape est indispensable pour anticiper les problèmes de gestion qui peuvent en découler.**

### Destratification

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau artificiels peu profonds et de faible superficie

**Efficacité :** variable

**Coûts :** entre 1 000 € et 10 000 €/Ha pour les systèmes d'aération de surface, jusqu'à 25 000 € pour des systèmes d'injection d'air comprimé

**Vigilance :** modification de la structure de l'écosystème, augmentation de la température de l'eau

Le principe de cette technique est de créer une circulation d'eau pour homogénéiser et oxygéner l'ensemble de la colonne d'eau. Cette circulation entraîne le phytoplancton vers le fond et réduit ainsi son développement (accès à la lumière réduit). L'oxygénation des eaux profondes permet également de piéger le phosphore dans les sédiments du plan d'eau, et ainsi limiter les phénomènes de relargage.



*Mélangeur mécanique sur l'étang Turllet (01). S.T.E. (2012)*

Des techniques de destratification ont été utilisées sur quelques plans d'eau du bassin Rhône-Méditerranée de faible profondeur : la retenue de la Riaille (84), l'étang Turlet (01) et le lac de la Mirande (38) ; mais également ailleurs en France (retenues de Grangent (42), du Moulin Neuf (29), de Pierre Brune (85) et de Jaunay (85), des lacs au Duc (56)) et à l'étranger (Royaume-Uni, Pays-Bas, Allemagne, Portugal, Belgique).

Les techniques utilisées sont des jets d'eau, des mélangeurs de surface, des pompes et des systèmes d'aération. Ces techniques ont des effets assez variables sur le phytoplancton, dépendant entre autres des caractéristiques des eaux (pH, alcalinité, température ...).

Des effets significatifs sur les peuplements phytoplanctoniques ont été observés sur 50% des opérations de restauration répertoriées. Les effets sont alors visibles à court terme mais généralement ne favorisent pas un fonctionnement équilibré de l'écosystème sur le long terme (proliférations par exemple de certaines formes algales favorisées par ces nouvelles conditions).

Les coûts initiaux de ce type d'installations sont élevés, coûts auxquels il faut ajouter l'entretien et la maintenance des équipements.

### Fertilisation azotée

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau où l'azote est limitant

**Efficacité :** peu de retours d'expériences disponibles, efficaces sur les étangs du Forez sous certaines conditions (quantité d'azote déversée et période de l'année)

**Coûts :** faibles (coûts non estimés)

**Vigilance :** enrichissement du plan d'eau et des milieux récepteurs à l'aval, risque de déplacement du niveau trophique du plan d'eau avec apparition d'autres dysfonctionnements

Cette technique consiste à réduire les proliférations de cyanobactéries par concurrence avec les autres formes algales, en apportant aux microphytes une source d'azote.

Les cyanobactéries peuvent en effet être avantagées par leur capacité à fixer l'azote

atmosphérique. Une solution de nitrate d'ammonium est ainsi répandue sur le plan d'eau à l'aide d'une embarcation.

Des apports d'azote sur des étangs du Forez ont permis de limiter les développements de cyanobactéries pour des coûts de mise en œuvre limités.

En dehors de ces étangs du Forez, peu de retours d'expériences sont disponibles. La mise en œuvre de ce type de technique doit prendre en compte les effets possibles de cette fertilisation sur les milieux récepteurs à l'aval, en particulier dans le cadre de l'atteinte et la préservation de leur bon état écologique (les nitrates sont pris en compte pour cette évaluation de l'état écologique).

### Techniques de biomanipulation

**Domaine d'applicabilité :** tous plans d'eau

**Efficacité :** bonne

**Coûts :** non communiqués

**Vigilance :** déséquilibre possible de l'ensemble de l'écosystème

Des actions sur des compartiments spécifiques du réseau trophique permettent d'augmenter la prédation sur le phytoplancton. Elles consistent par exemple à augmenter les populations de poissons phytoplanctonophages ou à limiter leurs prédateurs. Ces techniques ont été recensées en France (lac de Pelleautier (05), gravière de Châteauneuf-du-Rhône (26), lac de la Mirande (38), lac Flumet (38)) et à l'étranger (Suède, USA, Pays-Bas, Allemagne, Maroc).

De même, l'augmentation de poissons prédateurs de poissons zooplanctonophages permet d'agir de manière indirecte sur le peuplement phytoplanctonique (le zooplancton étant en majorité phytoplanctonophage). Par ailleurs, l'augmentation de la densité de poissons fousseurs (notamment les carpes) augmente la turbidité des eaux et limite donc l'accès à la lumière pour le développement du phytoplancton.

La réintroduction de macrophytes est une technique également utilisée pour agir sur le

phytoplancton par compétition pour les nutriments. Peu de retours d'expériences sont disponibles mais les actions menées sur le plan d'eau d'Aime (73) et de Grand-Lieu (44) (ainsi qu'au Pays-Bas sur le lac Vulluwemeer) montrent des effets significatifs avec des réductions de la biomasse phytoplanctonique de l'ordre de 10 à 20%.

D'une manière générale, ces techniques apparaissent assez efficaces avec des effets rapides (à l'échelle de l'année). Elles sont cependant difficiles à mettre en œuvre puisqu'elles peuvent générer un dysfonctionnement de l'écosystème autre que celui traité.



**Les actions réalisées sur une ou plusieurs populations peuvent avoir des effets sur la structure des peuplements dans leur ensemble. Ces effets peuvent alors interférer avec l'atteinte du bon état écologique, établi en particulier sur des indices basés sur ces peuplements de macrophyte, phytoplancton et poisson. Ces techniques sont donc à appliquer avec précautions.**

#### *Utilisation d'algicides et de dispositifs émetteurs d'ultrasons*

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau de faible surface, ne présentant pas de pH élevé pour les traitements au cuivre

**Efficacité :** bonne sur le phytoplancton

**Coûts :** non communiqués

**Vigilance :** effets toxiques et létaux sur d'autres compartiments de l'écosystème (en particulier sur le zooplancton), anoxie des eaux profondes, relargage de cyanotoxines

L'utilisation d'algicides (autorisés) est observée pour limiter le développement du phytoplancton. Les produits généralement utilisés sont le cuivre pour lutter contre l'ensemble du phytoplancton et le peroxyde d'hydrogène pour cibler les cyanobactéries.

Cette technique a été recensée sur le bassin Rhône-Méditerranée sur le plan d'eau d'Azole (69), et ailleurs en France (retenues de Kerne-Uhel (22), du Gouët (22) et d'Arguenon (22),

étang de Saint Bonnet (03)), ainsi qu'à l'étranger (USA, Australie et Pays-Bas).

Au-delà des effets significatifs et rapides constatés, l'impact de ces produits sur l'ensemble de l'écosystème n'est pas maîtrisé. Le cuivre est en particulier bioaccumulable et toxique à faible concentration pour les crustacés. L'utilisation de ces produits peut faire apparaître des effets indésirables tels que : une désoxygénation des eaux profondes par dégradation de la matière organique issue du phytoplancton, le relargage de toxines, une réduction du peuplement zooplanctonique (sensible au cuivre). Ce type de traitement n'est donc pas recommandé.

Une technique basée sur l'émission d'ultrasons a également été répertoriée pour lutter contre le phytoplancton (par destruction des membranes cellulaires). Cette technique a été observée au Canada, aux Pays-Bas, au Japon et en Espagne. Aucune application sur le bassin Rhône-Méditerranée n'a été recensée, mais cette technique a été utilisée ailleurs en France sur les plans d'eau de la Cavalière (09), de Douarnenez (29) et de Marne-la-Coquette (92).

Les potentiels effets néfastes induits par ces dispositifs à ultrasons sur l'écosystème sont similaires à ceux évoqués précédemment (sédimentation de matières organiques, développement bactériens, anoxie des eaux profondes). Par ailleurs, le peu de retours d'expériences disponibles ne permet pas d'appréhender l'impact de cette technique sur les autres compartiments de l'écosystème.

#### *Utilisation de paille d'orge*

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau bien oxygénés, température supérieure à 20°C

**Efficacité :** variable selon les conditions de milieu (température, oxygénation, courants) et les groupes algaux visés

**Coûts :** non communiqués

**Vigilance :** désoxygénation liée à la décomposition de la matière organique, augmentation de la turbidité, certains taxons algaux favorisés

La paille d'orge est utilisée comme algicide naturel. Elle permet de lutter contre le phytoplancton, et plus particulièrement les cyanobactéries, en libérant des substances algicides lors de sa décomposition. La paille d'orge est alors épanchée sur le plan d'eau ou disposée dans des filets équipés de bouées pour leur flottaison. Les quantités observées sont de l'ordre de 10 à 50 g/m<sup>2</sup>.

L'utilisation de paille d'orge, n'a pas été recensée sur le bassin Rhône-Méditerranée. Cette technique a en revanche été utilisée ailleurs en France, notamment sur des étangs du Forez, ainsi qu'à l'étranger (Royaume-Uni, Canada, USA). Les effets observés sont très variables et semblent influencés par la température, l'oxygénation et le brassage des eaux.



*Epanchage d'orge sur un plan d'eau depuis la berge. J. Robin.*

Sous certaines conditions (non établies), des effets positifs ont été démontrés sur des diatomées, chlorophycées et cyanobactéries. Certains taxons apparaissent en revanche favorisés par l'introduction de paille d'orge, comme le montre une étude réalisée dans le cadre d'une convention de coopération entre l'Agence de l'Eau Artois-Picardie et l'Université des Sciences et Technologies de Lille I<sup>3</sup>. Avant d'appliquer cette technique, il convient donc d'identifier les taxons responsables des efflorescences.

#### 2.1.4. Lutter contre la désoxygénation du plan d'eau

##### *Aération hypolimnique*

**Domaine d'applicabilité :** Plans d'eau stratifiés (thermie), profondeur supérieure à 15 m

**Efficacité :** faible (agitateurs mécaniques) à significative (injection d'air)

**Coûts :** 300 000 à 450 000 € pour traiter 3 à 6 hectares (+ coûts d'entretien : 25 000 €/an)

**Vigilance :** diffusion de nutriments vers les couches d'eau supérieures, destratification des eaux si mauvais dimensionnement, augmentation de la température (agitateur mécanique)

L'objectif de cette technique est de ré-oxygéner les couches profondes d'un plan d'eau tout en préservant la stratification thermique des eaux. L'oxygénation des couches profondes permet par ailleurs de limiter le relargage de nutriments depuis les sédiments en condition d'anoxie. Plusieurs méthodes existent : l'injection d'air, les aérateurs à oxygène pur et les agitateurs mécaniques.

Cette technique a été recensée sur le bassin Rhône-Méditerranée sur le lac de Nantua (01), ailleurs en France sur la retenue de Courtille (23), le plan d'eau de Roussille (23) et la retenue de Gouët (22), ainsi qu'au Canada.

Les agitateurs mécaniques de surface apparaissent peu efficaces, du fait des échanges limités en oxygène entre la surface du plan d'eau et l'air ambiant. Ils peuvent de plus favoriser le réchauffement des eaux plus profondes.

Les méthodes d'injection d'air montrent en revanche des effets significatifs sur l'oxygénation des couches profondes et les concentrations en phosphore dans la colonne d'eau. Ce type d'installation doit être correctement calibré pour ne pas perturber la stratification du plan d'eau.

<sup>3</sup> Utilisation de la paille d'orge pour le traitement des proliférations algales. Université des Sciences et Technologies de Lille I. Mars 2009.

## 2.1.5. Limiter le relargage des nutriments des sédiments vers la masse d'eau

### *Inactivation des sédiments / Précipitation du phosphore*

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau peu profonds, bien oxygénés, avec fort relargage de phosphore

**Efficacité :** effets immédiats, sur 2 à 3 ans

**Coûts :** 100 à 3 000 €/par hectare traité, selon les produits utilisés

**Vigilance :** altération des peuplements macrophytiques et de la faune benthique, modification du pH des eaux, augmentation de la sédimentation

La précipitation du phosphore consiste à épandre des produits chimiques qui se lient au phosphore (ainsi qu'aux matières en suspension, notamment les algues) pour le faire sédimenter.

L'inactivation des sédiments implique le même procédé et les mêmes produits, mais à des volumes plus élevés. Ces produits peuvent être des sels d'aluminium, de fer ou de calcium. Le choix du produit dépend du pH de l'eau et de son oxygénation.

Deux opérations visant à limiter le relargage de nutriments ont été mises en œuvre sur le bassin Rhône-Méditerranée, sur le lac de Saint Martial (07) et le lac Morillon (74). Ces techniques ont aussi été observées ailleurs en France (retenue de Vézins (50), étang du Pont rouge (59), retenue du Moulin neuf (29)) et à l'étranger (Allemagne, USA, Suède).

La durée de l'efficacité de cette technique est de l'ordre de 2 à 3 ans. Ces effets peuvent atteindre 80 à 90 % de réduction du relargage de phosphore, une réduction de la concentration en phosphore de la colonne d'eau et une diminution de l'ordre de 40 % de la biomasse algale.

Des impacts négatifs potentiels ont toutefois été relevés : altération des peuplements macrophytiques, modification du pH des eaux, augmentation de la sédimentation. Même si ce constat n'a pas été rapporté, on peut par ailleurs également évoquer les impacts potentiels sur la faune benthique, du fait de modifications des habitats et des caractéristiques physico-chimiques des eaux profondes.

## 2.2. Lutter contre les dysfonctionnements liés aux sédiments

Les problèmes observés au niveau des sédiments sont le plus souvent une résultante d'un niveau trophique élevé du plan d'eau et/ou d'apports excessifs, naturels ou non, du bassin versant.

L'eutrophisation du milieu peut ainsi accélérer le comblement du plan d'eau (augmentation de la production végétale et animale) et favorise l'accumulation d'éléments nutritifs dans les sédiments. En condition d'anoxie des eaux profondes, ces éléments nutritifs peuvent par ailleurs être remobilisés vers la colonne d'eau et ainsi entretenir les déséquilibres de l'écosystème.

Le transport solide de fines ou de matériaux plus grossiers issus de l'érosion des sols sur le bassin versant peut également être responsable d'un comblement accéléré au niveau d'un plan d'eau.



**L'évaluation de l'efficacité de chacune des techniques suivantes est basée sur leur capacité à réduire ou limiter le comblement du plan d'eau. Elle ne préjuge pas d'un retour à un fonctionnement équilibré de l'écosystème.**

**Par ailleurs, la mise en œuvre de ces techniques nécessite d'être accompagnée d'études pour :**

- évaluer la toxicité des sédiments remis en suspension dans le plan d'eau suite aux opérations et/ou évacués pour stockage ;
- évaluer l'impact de ces techniques sur l'écosystème plan d'eau dans son ensemble et sur les milieux à l'aval.

### 2.2.1. Limiter le comblement du plan d'eau

#### *Curage du plan d'eau*

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau artificiels, vidangeables, faible profondeur, faible superficie

**Efficacité :** effets immédiats sur la quantité de sédiments (indépendamment de la restauration des fonctionnalités du milieu et/ou des impacts de cette technique sur les milieux à l'aval)

**Coûts :** élevés, entre 8 € et 30 € le m<sup>3</sup> de sédiments transportés

**Vigilance :** perte de fonctionnalités des sédiments et des habitats associés (destruction de la faune et de la flore benthiques), risque de percer la couche imperméable

Cette technique consiste à extraire les sédiments pour limiter la hauteur d'envasement d'un plan d'eau. Elle permet également de limiter la prolifération végétale par extraction des graines, racines et rhizomes. Cette technique nécessite l'assèchement du plan d'eau.

Plusieurs plans d'eau du bassin Rhône-Méditerranée ont été traités avec cette technique : le lac du Môle (74), la mare vasque de la Beaume Rainaude (13), l'étang de Crosagny (74), l'étang des Forges (90), l'étang de Corbenay (70), des étangs de la Dombes (01), la gravière de Saint-Just (07).



*Chantier d'extraction des sédiments de l'étang des Forges (90). CAB (2008)*

A l'exception de la mare de la Beaume Rainaude (soumise au régime torrentiel de la Dracénie), la technique de curage montre de

bons résultats. Cette technique est efficace sur le long terme.

Toutefois, les coûts de mise en œuvre relativement élevés et surtout ses impacts potentiels sur le fonctionnement global de l'écosystème sont un frein à son utilisation (en particulier la destruction de la faune et de la flore benthiques, et la perte d'habitats qui constituent des frayères potentielles).

### Utilisation de bio-additifs

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau de faibles profondeur et superficie, forte alcalinité, température > 12°C, fort taux de matière organique dans les sédiments, bonne oxygénation

**Efficacité :** variable, dépendante du produit et des caractéristiques du plan d'eau

**Coûts :** élevés, de 2 000 à 6 000 €/ha pour un épandage simple, et jusqu'à 44 000 €/ha pour des techniques plus complexes

**Vigilance :** impacts des organismes introduits sur l'écosystème non maîtrisés, modification du pH de l'eau, perturbation temporaire de la flore aquatique

Le principe de cette technique est d'épandre un produit constitué d'un substrat minéral enrichi en bactéries. Ces organismes sont destinés à dégrader la matière organique du plan d'eau.

Plusieurs plans d'eau du bassin Rhône-Méditerranée ont été traités avec des bioadditifs : les plans d'eau de Fréminville (38), de Mathan (69), de la Tour-de-Salvagny (69), la base de loisirs de Condrieu (69), l'étang Bleu (73).

L'utilisation de bioadditifs montre des effets très variables, certainement dépendants des caractéristiques du produit utilisé (notamment la nature du substrat utilisé). Une étude menée par le Cemagref<sup>4</sup> en 1994, n'avait par ailleurs pas permis de mettre en évidence un effet généralisable des bioadditifs alors testés.

Les retours d'expériences demeurent limités pour statuer sur une réelle efficacité et sur les conditions optimales d'utilisation.

<sup>4</sup> Traitements des rivières et des plans d'eau par bioadditifs. Garnier Sillam, E. ; Bourezgui, Y. ; Harry, M. ; Dutartre, A. Cemagref Bordeaux - QEBX ; Laboratoire de biologie des sols et des eaux. 1994.

### Evacuation des sédiments par l'ouverture de vannes de fond

**Domaine d'applicabilité :** retenues artificielles, vidangeables par les vannes de fond

**Efficacité :** effets immédiats sur la quantité de sédiments (indépendamment de la restauration des fonctionnalités du milieu et/ou des impacts de cette technique sur les milieux à l'aval)

**Coûts :** aucune installation supplémentaire nécessaire

**Vigilance :** peuplements phytoplanctoniques impactés, impacts potentiels sur la qualité des eaux restituées à l'aval

Cette technique curative vise à évacuer une partie des sédiments à l'aide de vannes de fond. Sur le bassin Rhône-Méditerranée, elle est par exemple utilisée pour éviter le comblement de la retenue de Génissiat (01) sur le Rhône. Cette technique est également observée ailleurs en France, sur le barrage de Kerne-Uhel (22) et la retenue de Pareloup (12).

Cette technique apparaît efficace mais les impacts potentiels sur les milieux récepteurs à l'aval sont importants (apports de fines, d'eaux désoxygénées, de contaminants...).

### Végétalisation du bassin versant proche

**Domaine d'applicabilité :** tous plans d'eau

**Efficacité :** bonne efficacité, permanente après reprise de la végétation

**Coûts :** variables selon les surfaces végétalisées

**Vigilance :** aucun

Cette technique vise à végétaliser des secteurs des versants directs du plan d'eau afin d'en stabiliser les sols et limiter l'érosion et les apports de matériaux.

Sur le bassin Rhône-Méditerranée, cette technique a été utilisée sur la retenue de Serre-Ponçon et plusieurs retenues hydroélectriques sur la Durance. Des effets significatifs sur les apports de matériaux responsables des comblements ont été observés.



Quelques mois après l'ensemencement, la végétation limite l'érosion sur le lac de Machilly. SIFOR (2010).

### Mise en place d'un pré-barrage de type digue

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau alimentés par un cours d'eau principal

**Efficacité :** bonne et immédiate

**Coûts :** variables selon le dimensionnement mais élevés, entre 90 000 € et 385 000 €. Il faut ajouter le coût d'entretien des pré-barrages

**Vigilance :** rupture de la continuité biologique entre le plan d'eau et son tributaire

L'objectif de cette technique est de créer à l'entrée du plan d'eau une zone de rétention par la mise en place d'une digue.

Cette technique n'a pas été recensée sur le bassin Rhône-Méditerranée, mais ailleurs en France (retenues de la Sorme (71), de la Bultière (85), barrages de la Visance (61), du Jaunay (85), de Villaumur (35)), ainsi qu'à l'étranger (Allemagne, Tchéquie, Hongrie).

Son efficacité est immédiate sous condition d'un bon dimensionnement des bassins de rétention. Les volumes et les temps de séjour (généralement entre 3 et 10 jours) doivent être adaptés au plan d'eau, mais également au débit du vecteur de sédiments et à la granulométrie de ces derniers. Un entretien régulier des bassins de rétention est également recommandé.

Compte tenu des coûts liés à l'entretien, du caractère artificiel de cette technique et de ses impacts potentiels sur l'écosystème, cette technique n'est pas à privilégier.

### Vidange et mise en assec

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau vidangeables, peu profonds, sédiments riches en matières organiques

**Efficacité :** variable selon la durée de l'assèchement et la nature des sédiments

**Coûts :** faibles (si utilisation des équipements existants). Coûts de pêches de sauvetage non communiqués

**Vigilance :** transports de fines vers les milieux à l'aval, peuplements faunistiques et floristiques impactés, turbidité au remplissage, développement d'espèces végétales pionnières indésirables (phytoplancton et macrophytes)

Cette technique consiste à vidanger le plan d'eau et à le laisser asséché durant une période de plusieurs mois. Les particules les plus fines sont entraînées vers l'exutoire lors de la vidange du plan d'eau. L'exposition des sédiments à l'air libre permet ensuite une minéralisation de la matière organique.



Gravière de Merceuil-Tailly vidangée. CABS (2011)

Cette technique a été identifiée sur plusieurs plans d'eau du bassin Rhône-Méditerranée : des étangs de la Dombes (01), le lac Saint-Martial (07), les gravières de Merceuil-Tailly (21), le lac de Pelleautier (05) et l'étang des Forges (90). D'autres plans d'eau ailleurs en France (lac d'Agès, 40) et aux Etats-Unis ont également fait l'objet de l'utilisation de cette technique.

Bien qu'elle permette de maintenir une certaine biodiversité sur les étangs artificiels de la Dombes (01), cette technique doit être considérée avec précaution. Selon l'écosystème considéré, elle peut avoir des impacts négatifs sur le plan d'eau (perturbation

des peuplements floristiques et faunistiques, pêches de sauvetage nécessaires) et sur les milieux récepteurs à l'aval (pollution, colmatage).

Suite à la remise en eau, elle peut par ailleurs favoriser l'émergence et la prolifération d'espèces végétales invasives (algues, macrophytes). Les techniques favorisant un fonctionnement naturel de l'écosystème doivent être privilégiées.

### 2.2.2. Lutter contre la contamination des sédiments par des substances toxiques

#### Curage

<b>Domaine d'applicabilité :</b> plans d'eau vidangeables, peu profonds et de faible superficie
<b>Efficacité :</b> aucun retour d'expérience disponible
<b>Coûts :</b> jusqu'à 30 € par m <sup>3</sup> extrait et transporté, hors coûts de stockage et de traitement
<b>Vigilance :</b> perturbation du fonctionnement du compartiment sédiment, impact sur les organismes aquatiques du fait de la mise en assec

La technique de curage consiste à extraire les sédiments contaminés par des substances toxiques. Cette opération est réalisée après la mise en assec totale ou partielle du plan d'eau. Les sédiments pollués ainsi curés sont ensuite transportés et confinés pour décontamination.

Aucune opération de curage visant à extraire des sédiments contaminés n'a été identifiée sur le bassin Rhône-Méditerranée et ailleurs en France ou à l'étranger. Aucun retour d'expérience n'est donc disponible.

En revanche, des recommandations relatives aux travaux et opérations impliquant des sédiments aquatiques potentiellement contaminés sont disponibles dans le cadre du Plan d'action du bassin Rhône-Méditerranée pour la pollution par les PCB (SDAGE Rhône-Méditerranée 2010-2015)<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Plan d'action du bassin Rhône-Méditerranée pour la pollution par les PCB - SDAGE Rhône-Méditerranée 2010-2015. Recommandations relatives aux travaux et opérations impliquant des sédiments aquatiques potentiellement contaminés. Septembre 2013.

#### Dragage

<b>Domaine d'applicabilité :</b> plans d'eau de profondeur inférieure à 40m
<b>Efficacité :</b> aucun retour d'expérience disponible
<b>Coûts :</b> aucune information disponible
<b>Vigilance :</b> turbidité et remise en suspension de polluants, altération du fonctionnement écologique du compartiment sédiment

Cette technique vise à extraire les sédiments toxiques à l'aide d'une drague (embarcation pourvue d'un dispositif d'extraction des sédiments, mécanique ou pneumatique).

Dans le cadre de la réhabilitation de l'étang des Moutières (à Susville dans l'Isère), un curage des sédiments a été réalisé en 2014. Cette opération a été motivée par une pollution des sédiments aux PCB et aux hydrocarbures (site situé à proximité d'une ancienne centrale thermique).

Aucune autre opération mettant en œuvre cette technique n'a été identifiée sur des plans d'eau douce du bassin Rhône-Méditerranée<sup>6</sup> ou ailleurs en France et à l'étranger.

<sup>6</sup> Le curage des ports du lac du Bourget (73) réalisé dans le cadre du rétablissement d'un étiage automnal n'est pas traité ici compte tenu de l'absence de retours d'expérience.

## 2.3. Lutter contre les déséquilibres de la biodiversité

### 2.3.1. Lutter contre les espèces végétales exotiques

*Contrôle manuel et mécanique des espèces végétales exotiques envahissantes*

**Domaine d'applicabilité :** tous plans d'eau

**Efficacité :** aucun retour d'expérience disponible

**Coûts :** non communiqués

**Vigilance :** propagation de l'espèce ciblée par bouturage

Les techniques recensées sont généralement identiques à celles utilisées pour lutter contre les macrophytes indigènes (cf. § 2.1.2). Des précautions sont toutefois observées afin de limiter les risques de propagation par bouturage de fragments de végétaux.

Il apparaît difficile de statuer sur l'efficacité des techniques de contrôle des espèces invasives (manuelles ou mécaniques) tant les réponses sont variables.



*Contrôle manuel de l'Hydrocotyle fausse-renoncule sur l'étang Riquet (01). Fondation Pierre Vérots (2011).*

Il est généralement nécessaire de réitérer les opérations avec des coûts de mise en œuvre cumulés importants.

### 2.3.2. Lutter contre les déséquilibres du compartiment faunistique

*Création et restauration de frayères*

**Domaine d'applicabilité :** tous plans d'eau à faibles taux de reproduction piscicole

**Efficacité :** bonne (sur la ponte), dès la première année

**Coûts :** Frayère naturelle :

- herbiers : entre 400 € et 1 700 € pour 100 m<sup>2</sup> ;
- gravière : environ 230 € pour 100 m<sup>2</sup>.

Frayère artificielle :

- fibre synthétique : environ 3 500 € pour 60 m<sup>2</sup> ;
- brandes<sup>7</sup> : moins coûteuses mais faible durée de vie

**Vigilance :** aucun

Cette technique consiste à restaurer ou créer des frayères naturelles le plus souvent par remobilisation de substrat minéral (généralement pour les salmonidés) ou restauration de la végétation aquatique (essentiellement pour les plans d'eau naturels, pour les brochets et cyprinidés par exemple).

Des frayères artificielles peuvent également être utilisées. Elles sont constituées de fibres synthétiques, de panneaux de brandes ou de fagots de branches. Elles sont lestées et équipées de flotteurs pour maintenir leur immersion à la bonne profondeur. Ces frayères artificielles sont en particulier utilisées sur des plans d'eau de barrage, dont les habitats littoraux sont très souvent altérés par le marnage.

Ces actions de restauration doivent être intégrées dans une perspective plus large de restauration de la zone littorale et de ses habitats rivulaires, en assurant par ailleurs des conditions de marnage compatibles avec le bon fonctionnement de ces frayères.

Ces techniques ont été identifiées sur plusieurs plans d'eau du bassin Rhône-Méditerranée : retenues de Caramany (66), Serre-Ponçon (05), lacs d'Aiguebelette (73) et d'Annecy (74) ; ainsi qu'ailleurs en France (lacs de Mimizan (40), Piroit (03), étangs fédéraux de Châtel sur

<sup>7</sup> Variété de bruyère disposée en fagots tressés en panneaux.

Moselle (88)) et à l'étranger (Suisse, USA, Canada).

Si les frayères sont correctement dimensionnées et réalisées, cette technique est efficace sur les pontes. Ces dernières sont alors observées dès la première année. En revanche, la survie des alevins dont dépend le succès de ce type d'opérations a très peu été étudiée. La qualité des eaux (oxygénation par exemple) et des habitats sont en particulier des facteurs de survie à prendre en compte lors de l'étude préalable à la mise en place de tels dispositifs.

#### *Réintroduction ou renforcement de populations*

**Domaine d'applicabilité :** tous plans d'eau

**Efficacité :** bonne

**Coûts :** aucune information disponible

**Vigilance :** contamination génétique par des souches non indigènes

Cette technique consiste à introduire ou réintroduire des individus d'une espèce afin de rendre pérenne une population. Il s'agit donc d'opérations ponctuelles, appliquées par exemple sur des espèces piscicoles, notamment l'omble chevalier, la truite lacustre et le corégone dans les lacs alpins (en particulier le lac Léman (74) et le lac du Bourget (73)).

La cistude d'Europe est également concernée par des réintroductions, en particulier sur le lac du Bourget où des suivis scientifiques ont permis d'établir le succès de la réintroduction.

**Le succès de ces réintroductions tient en premier lieu à la présence et la préservation, et si besoin la restauration, de tous les habitats nécessaires à ces espèces.**

Il semble par ailleurs important de préciser que ce type d'opérations doit cibler prioritairement les espèces caractéristiques du peuplement naturellement présent.

#### *Captures à but destructif lors de vidange*

**Domaine d'applicabilité :** tous plans d'eau

**Efficacité :** variable selon les espèces ciblées

**Coûts :** aucune donnée disponible

**Vigilance :** perturbation de l'ensemble de l'écosystème, altération des habitats

Cette technique consiste à vidanger le plan d'eau afin de capturer les espèces animales invasives : poissons, écrevisses, amphibiens (grenouilles taureau), tortues.

Des opérations de lutte contre des espèces invasives ont été recensées sur le bassin Rhône-Méditerranée, sur l'étang de Bellefontaine (88), et ailleurs en France (en Sologne) et à l'étranger (Suisse).

Sous certaines conditions de mises en œuvre et selon l'espèce visée, cette technique peut s'avérer efficace.

Dans le cas de populations d'écrevisses invasives, les opérations mises en œuvre sur l'étang de Bellefontaine (88) n'ont au contraire pas montré d'effet positif significatif. En revanche, cette action a eu des effets négatifs sur la biodiversité du plan d'eau.

#### 2.3.3. Restaurer et protéger l'espace littoral

##### *Diversification des milieux par création d'habitats*

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau peu profonds et vidangeables pour la création d'îlots et de hauts-fond, plans d'eau artificiels ou fortement modifiés pour les récifs artificiels

**Efficacité :** très bonne

**Coûts :**

Création d'îlot, de mare et de haut-fond : coûts du terrassement variables selon la surface

Récifs artificiels : 500 €/par récif

Restauration de la ripisylve : coûts faibles (non chiffrés)

**Vigilance :** impacts temporaires liés aux travaux

Ces techniques consistent à diversifier les habitats pour favoriser les espèces faunistiques et floristiques en place, ou en vue de leur réintroduction.

Les habitats ainsi créés ou restaurés peuvent être de différentes natures : des îlots, des haut-fonds, des mares en bordure de plan d'eau, ou concerner la végétation littorale, en particulier les roselières. Pour les plans d'eau artificiels dont l'objectif est l'amélioration des habitats littoraux, des récifs artificiels immergés peuvent également être envisagés.

La majorité de ces techniques ont été observées sur le bassin Rhône-Méditerranée, par exemple : étang Bouffler (01) (création d'îlots), étang Praillebard (01) et lac de Machilly (74) (création de hauts-fonds), les lacs du Bourget (73) et de Montjoux (38) (création de mares), lac Nord des Ilettes (74) et du Val Coisin (73) (restauration de la ripisylve).



Mare créée sur le lac de Montjoux (38). Conservatoire d'Espaces Naturels Isère (2008).

La création de récifs artificiels en plan d'eau n'a pas été recensée sur le bassin Rhône-Méditerranée mais a en revanche été observée dans le département des Landes (lacs des Mimizan (40) et de Sanguinet (33)). Cette technique, basée sur l'utilisation de blocs de béton et de grilles, s'est révélée très efficace pour un faible coût (5 000 € pour une dizaine de récifs sur le lac de Sanguinet (33)).

La création de récifs artificiels peut être envisagée sur des milieux artificiels ou fortement modifiés. **Dans le cas de plans d'eau naturels, la restauration et la préservation des habitats naturels est à privilégier.**

Dans l'ensemble, ces techniques de diversification des habitats ont toutes montré des résultats positifs pour l'écosystème.



Mise en place de récifs artificiels sur le lac de Mimizan (40). FDPPMA (2011)

### Redynamisation de roselières

<b>Domaine d'applicabilité :</b> tous plans d'eau
<b>Efficacité :</b> bonne
<b>Coûts :</b> Fauche manuelle : 130 €/100 m <sup>2</sup> Création de canaux (pelle mécanique) : 1 200 €/100 ml
<b>Vigilance :</b> fragilisation des rhizomes, développement d'espèces végétales invasives

Cette technique vise à revitaliser une roselière en diminuant les surfaces atterries au profit de zones plus favorables au développement de la roselière. Cette technique met donc en œuvre des méthodes de terrassement telles que l'étrépage, qui consiste à retirer la couche superficielle du sol, ou la création ou réouverture de chenaux afin de créer de nouveaux écotones.

Sur le bassin Rhône-Méditerranée, cette technique a été observée sur les lacs d'Aiguebelette (73), du Bourget (73) et d'Annecy (74), ainsi que sur les étangs Boufflers et Praillebard (01).



Restauration d'une Phragmitaie sur le lac d'Aiguebelette (faucardage). G. Blake

D'une manière générale, cette technique donne de bons résultats avec comme effets observés une augmentation de la densité et une diversification des espèces.

### *Restauration d'un marnage naturel*

**Domaine d'applicabilité :** tous plans d'eau régulés hydrologiquement

**Efficacité :** peu de retours d'expériences

**Coûts :** faibles pour la gestion de l'ouvrage hydraulique, mais auxquels s'ajoutent des coûts élevés pour l'étude de faisabilité et les travaux nécessaires pour maintenir certains usages

**Vigilance :** impacts sur certains usages

De grands lacs naturels sont aujourd'hui équipés de dispositif de régulation du niveau de leurs eaux pour satisfaire certains usages (en particulier la production hydroélectrique et les loisirs nautiques). Cette régulation impacte les écosystèmes littoraux. La restauration d'un marnage peut s'avérer nécessaire, par exemple pour préserver et restaurer les roselières, favoriser la minéralisation des sédiments exondés, accroître les processus d'autoépuration.

Cette technique a été observée sur le lac d'Aiguebelette (73), où un compromis entre l'usage hydroélectrique et les exigences des principales populations de poissons a été mis en place. Par ailleurs, la restauration d'un étiage automnal est en projet sur les lacs d'Annecy (74) et du Bourget (73).



*Vue de la zonation originelle du lac d'Aiguebelette. G. Blake*

La baisse du niveau des eaux peut générer des impacts pour certains usages et nécessiter des travaux. Par exemple, sur le lac du Bourget le projet de baisse du niveau du lac (de 40cm par rapport au niveau plancher, tous les 4 ans)

nécessite le curage de plusieurs ports (26 bassins sont concernés). Les sédiments pouvant être contaminés par des substances toxiques, des mesures particulières d'extraction et de traitement sont envisagées.

Les coûts liés à l'étude de faisabilité puis aux travaux peuvent alors être très importants. Les retours d'expériences sont encore trop peu nombreux pour statuer sur l'efficacité et surtout sur les conditions de mise en œuvre de cette technique.

### *Radeaux végétalisés*

**Domaine d'applicabilité :** plans d'eau artificiels

**Efficacité :** retours d'expérience insuffisants

**Coûts :** 65 à 135 €/m<sup>2</sup>

**Vigilance :** -

Cette technique consiste à installer des structures modulaires flottantes afin de créer des habitats pour la faune et la flore, favoriser l'autoépuration des eaux et limiter l'impact des vagues sur les berges.

Sur le bassin Rhône-Méditerranée, cette technique est utilisée sur le lac Kir (21). D'autres plans d'eau en France (étangs de la Petite Plaine à l'Isle d'Adam (95), le lac du parc Friedel à Illkirch Graffenstaden (67), lac de Sarralbe (57), lac d'Orient à Mesnil Saint Père (10)) et à l'étranger (Allemagne et Espagne) sont concernés par cette technique.



*Radeau végétalisé sur le lac Kir (21). Association Arborescence (2011)*

Les retours d'expériences sont trop peu nombreux pour pouvoir statuer sur l'efficacité de cette technique. Il est en revanche observé une colonisation rapide par les oiseaux aquatiques.

## 2.4. Lutter contre les problèmes d'érosion

La zone littorale constitue un écosystème indispensable au bon fonctionnement écologique du plan d'eau. Les activités anthropiques peuvent altérer ces habitats, en particulier les berges.

Par exemple, l'altération de la ripisylve peut être responsable d'une fragilisation des berges et de l'apparition de phénomène d'érosion. Cette érosion accélère l'altération des habitats en impactant les peuplements floristiques et faunistiques.

### *Reprofilage des berges*

**Domaine d'applicabilité :** tous plans d'eau

**Efficacité :** bonne

**Coûts :** reprofilage 30 €/ml, travaux annexes (destruction de murs, transport de matériaux) jusqu'à 1 000 €/ml

**Vigilance :** destruction locale des habitats

Cette technique vise à reconstituer un profil de berge compatible avec les fluctuations de niveaux d'eau. Il s'agit d'une technique de terrassement.



*Reprofilage des berges d'une gravière de Merceuil-Tailly. CABS (2012)*

Cette technique a été mise en œuvre sur plusieurs plans d'eau du bassin Rhône-Méditerranée, par exemple : le Grand Large (69), le lac d'Annecy (74), le lac du Bourget (73), l'étang Riquet (01), le lac Nord des Ilettes (74) et des gravières de Merceuil-Tailly (21).

Cette technique apparaît efficace si les travaux sont bien dimensionnés et qu'ils prennent en compte le marnage du plan d'eau.

### *Protection de berge par génie végétal*

**Domaine d'applicabilité :** tous plans d'eau

**Efficacité :** variable

**Coûts :** jusqu'à 150 €/ml

**Vigilance :** -

La technique de génie végétal consiste à utiliser des végétaux pour protéger les berges contre l'érosion. Différentes méthodes sont utilisées : ensemencement, plantation, bouturage, peigne, tapis vivant, lit de plançon, tressage.

Cette technique a été observée sur plusieurs plans d'eau du bassin Rhône-Méditerranée : les retenues de Serre-Ponçon (05) et de Monteynard-Avignonet (38), les lacs de Machilly (74), d'Annecy (74) et du Bourget (73).

L'efficacité des techniques de protection des berges contre l'érosion par génie végétal est très variable.



*Ensemencement des berges de la retenue de Serre-Ponçon avec panneau d'information. SMADESEP (2007)*

Certaines opérations se sont ainsi révélées inefficaces pour cet objectif, comme par exemple la stabilisation des berges sur la retenue de Monteynard-Avignonet, à l'aide de caissons végétalisés, lits de plançons et couches de branches à rejets. En revanche, les essais effectués ont montré localement des effets intéressants en termes d'habitats pour la

faune aquatique, en particulier pour les poissons.

Des opérations ont eu une efficacité à l'échelle de l'année et ont dû être renouvelées : c'est le

cas de la végétalisation des berges de Serre-Ponçon.

## Limiter l'impact des usages

Lorsque le niveau des plans d'eau fluctuait naturellement, la végétation littorale était essentiellement exposée aux contraintes liées aux vents (baie d'Excenevex pour le Léman, sud du lac du Bourget...).

Aujourd'hui, dans un contexte de forte régulation du niveau des eaux, la zone littorale est également soumise aux effets de la houle et du batillage.

Les techniques de restauration décrites ci-après n'ont pas d'intérêt écologique direct. En revanche, elles permettent de limiter l'impact sur les habitats de la zone littorale de certains usages qui génèrent ce type de pression. Elles sont complémentaires à la mise en œuvre d'une réglementation des usages (activités nautiques) adaptée aux enjeux écologiques.

### 2.5. Protéger les habitats littoraux des usages

#### *Piquets de protection de roselières*

Cette technique vise à protéger les roselières du batillage par la mise en place de piquets de protection.

Sur le bassin Rhône-Méditerranée, cette technique est observée sur les lacs d'Aigueblette (73), du Bourget (73), d'Annecy (74), ainsi que sur le plan d'eau des Eaux Bleues (69).



*Piquets de protection entourant des roselières du lac d'Aigueblette. Blake (2002)*

Cette technique montre de très bons résultats sur les lacs alpins cités ci-dessus, peuplés de *Phragmites australis*.

#### *Enrochement et digue*

Cette technique consiste à limiter l'impact de la houle sur la zone littorale et les berges, afin de favoriser la sédimentation et la pousse des végétaux. Les ouvrages, immergés ou émergés, en béton ou en enrochement, sont disposés au large, parallèlement à la berge.

Cette technique a été mise en œuvre sur les lacs du Bourget (73), ainsi qu'en Suisse, sur le lac de Neuchâtel. Elle montre de bons résultats lorsque la digue est bien orientée et dimensionnée. Au-delà de ses fonctionnalités, les aspects paysager et écologique orientent désormais les opérations de protection vers les techniques décrites ci-après.

#### *Fascines et palissades à claire-voie*

Cette technique consiste à créer une barrière végétale afin de favoriser la sédimentation et la reprise végétale derrière l'ouvrage. Ce dispositif est positionné parallèlement à la berge, à une profondeur maximale de 1,5m.



*Fascine mise en place sur le lac d'Annecy. SILA (2012)*

Sur le bassin Rhône-Méditerranée, cette technique est utilisée sur les lacs d'Annecy (74), du Bourget (73), de Paladru (38) et la retenue de Vallabrègues (30). On observe également cette technique en Suisse (lac de Neuchâtel) et en Allemagne (lac de Constance).

Cette technique apparaît efficace. Toutefois, selon les conditions de mise en œuvre et les espèces végétales utilisées, l'ouvrage peut être fragile et nécessiter un remplacement des fascines après quelques années.

#### *Protection de berges à l'aide de gabions*

Les gabions sont constitués de cages métalliques remplies de galets. L'immersion de gabions en zone littorale permet de dissiper l'énergie de la houle et ainsi protéger la végétation et les berges.

Cette technique a été recensée sur le bassin Rhône-Méditerranée sur le lac du Bourget (73), ainsi qu'en Suisse, sur le lac de Neuchâtel.



*Gabion immergé sur le lac du Bourget (CPNS)*

Ce type de dispositif apparaît efficace s'il est bien dimensionné et positionné.

#### *Protection de berges à l'aide de pieux jointifs*

Des pieux disposés de manière jointive, ou avec un intervalle de seulement quelques centimètres, permettent de dissiper l'énergie de la houle et de protéger la végétation et les berges.



*Rangées de pieux jointifs sur le lac d'Annecy (SILA, 2012)*

Cette technique a été mise en œuvre sur le lac d'Annecy (74) et de Neuchâtel (Suisse). Elle est toutefois récente et peu de retours d'expérience sont disponibles à propos de son efficacité sur le devenir des formations végétales à moyen terme. Elles s'avèrent néanmoins efficaces pour "abattre" la houle.

### 3. Les actions à engager pour le plan de gestion 2016-2021

#### 3.1. Définir les actions et les techniques de restauration à mettre en œuvre

La révision de l'état des lieux a permis d'identifier les pressions anthropiques à l'origine d'un risque de ne pas atteindre les objectifs environnementaux. Cette analyse constitue un premier niveau de priorisation pour cibler les actions à mettre en œuvre sur les plans d'eau du bassin Rhône-Méditerranée.

Cette approche, basée en partie sur des modélisations, doit être confrontée aux altérations effectivement constatées sur le milieu (blooms algaux, déclin de certaines populations floristiques ou faunistiques ...).

**Une étude diagnostic doit alors être réalisée pour :**

- caractériser les dysfonctionnements ;
- préciser les causes de ces dysfonctionnements ;
- définir les objectifs de restauration à atteindre ;
- orienter le choix des techniques de restauration les plus appropriées ;
- établir un état initial pour le suivi de l'efficacité des opérations de restauration.

Lorsqu'elles sont disponibles (plans d'eau supérieurs à 50 hectares uniquement), les données issues des réseaux de surveillance mis en place pour répondre à la DCE peuvent être exploitées. Toutefois, ces dernières ne peuvent à elles seules satisfaire cet objectif. Des études spécifiques sont nécessaires pour caractériser et évaluer les compartiments altérés de l'écosystème.

Cette étude préalable aux travaux de restauration permet également d'identifier les indicateurs de suivis pertinents. Ces derniers permettent de suivre les effets des opérations de restauration sur le milieu. Quelques exemples d'indicateurs sont proposés dans la suite de cette note (Cf § 3.2).

La figure 3 ci-dessous décrit les grandes étapes structurant un projet de restauration.

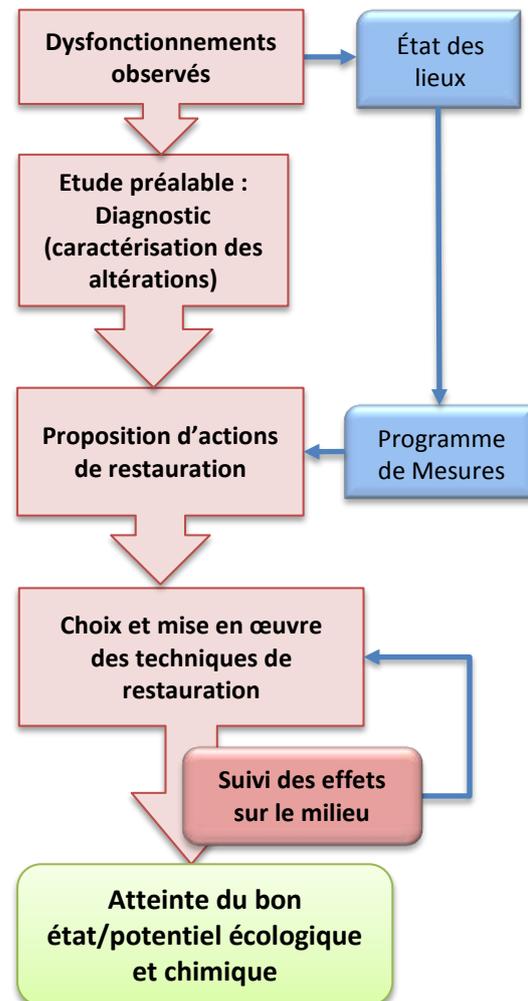


Figure 3 : Les étapes de l'élaboration d'un projet de restauration

Le choix de la technique de restauration à mettre en œuvre doit prendre en considération plusieurs critères décrits ci-après.

### 3.1.1. La pertinence

Le choix de la technique de restauration la mieux adaptée est réalisé au regard des résultats de l'étude diagnostic. Cette dernière a en effet pour objectif d'identifier les dysfonctionnements et donc de cibler les compartiments sur lesquels agir. Elle oriente ainsi le choix de la technique de restauration à mettre en œuvre.

### 3.1.2. L'applicabilité

Il est nécessaire de s'assurer que la technique de restauration choisie est applicable, en lien avec les caractéristiques et les usages du plan d'eau : caractéristiques physico-chimiques, profondeur, surface, accessibilité, contraintes d'usage...

De plus, il convient de s'assurer que la technique de restauration choisie respecte la législation en vigueur (introduction d'espèces animales/végétales exogènes, utilisation de substances chimiques...).

### 3.1.3. L'efficacité et la rémanence des effets sur le milieu

Le choix d'une technique de restauration pour remédier à un problème donné doit prendre en compte l'efficacité de cette technique, mais également la durée des effets sur le milieu.

L'efficacité d'une technique peut cependant être dépendante des caractéristiques du plan d'eau, de ses modalités de mises en œuvre, de conditions hydrologiques ou plus globalement météorologiques... Il est alors intéressant de prendre en compte les retours d'expériences disponibles (cf. § 1.1).

D'une manière générale, les temps de restauration sont relativement longs sur les plans d'eau, du fait de leur inertie liée à leur volume, leur temps de séjour et l'effet mémoire des sédiments.

### 3.1.4. Les effets secondaires indésirables

L'objectif d'une restauration ou d'une mesure de protection est d'agir sur un ou plusieurs

processus qui structurent le fonctionnement du milieu. Ainsi, une action sur un compartiment a nécessairement une incidence sur les autres. Il convient alors de définir ces possibles effets indésirables en tenant compte de leur importance, de leur durée et de leur étendue.

Par exemple, l'abaissement des apports de nutriments au plan d'eau a des conséquences sur les communautés phytoplanctoniques d'un plan d'eau et peut dans certains cas provoquer ou amplifier l'apparition de cyanobactéries, et ce de manière transitoire. Ces effets, même temporaires, peuvent avoir des conséquences sur certains usages à prendre en considération (eau potable, pêche, baignade...).

### 3.1.5. La réversibilité

Compte tenu des possibles effets indésirables, prévisibles ou non, évoqués ci-dessus, il est nécessaire de s'assurer au préalable que ces effets sont réversibles.

### 3.1.6. Les coûts de mise en œuvre et d'entretien

Selon les modalités de mise en œuvre et les caractéristiques du plan d'eau, les coûts pour une même technique peuvent être très variables d'un plan d'eau à l'autre. Il convient par ailleurs de considérer la durée des effets sur le milieu afin d'anticiper les coûts liés au renouvellement de la technique utilisée ou à l'entretien des dispositifs.

Un exemple de technique à renouveler est la technique de faucardage qui, sans suppression des causes de la prolifération des macrophytes, doit être réitérée. Cette technique génère alors des coûts cumulés importants à long terme.



*Appareil faucardeur fonctionnel sur les Eaux Bleues (69). S.T.E. (2011)*

## 3.2. Suivre les effets sur le milieu

La collecte d'informations relatives à l'efficacité des techniques de restauration est délicate. En effet, peu de suivis sont aujourd'hui mis en œuvre pour évaluer les effets sur le milieu.

Lorsqu'ils sont mis en œuvre, les suivis des effets de la restauration sur le milieu sont généralement effectués l'année suivant la restauration. Les suivis à moyen ou long terme sont rares et on observe dans certains cas une perte totale de la « mémoire » des opérations (du fait de changements de personnels par exemple).

Ainsi, parmi les 100 opérations de restauration mises en œuvre sur 41 plans d'eau du bassin Rhône-Méditerranée :

- 1/3 présente un suivi scientifique des effets de la restauration. Il s'agit essentiellement

des grands lacs sub-alpins Annecy, Léman, Bourget ;

- 1/3 ne présente pas de suivi ;
- 1/3 fait état d'un suivi visuel, sans donnée quantitative objective.

Afin d'aider la mise en place de tels suivis, des indicateurs sont proposés dans le tableau ci-après (tableau 2). Ce tableau n'est pas exhaustif et peut être complété en fonction des compartiments de l'écosystème ou des processus altérés.

Pour plus de précisions sur les paramètres suivis dans le cadre des réseaux de surveillance mis en place pour répondre à la DCE, des informations complémentaires sont disponibles sur le site internet <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr>

Tableau 2 : Proposition d'indicateurs de suivis des effets de projets de restauration de plans d'eau

Objectif de l'opération de restauration	Exemples de paramètres à intégrer pour le suivi de l'efficacité des opérations de restauration
Amélioration de la qualité d'eau	Concentrations en nutriments et/ou polluants, dans les eaux et/ou les sédiments
Lutte contre le phytoplancton	Mesure de la transparence (disque Secchi) Taux de chlorophylle a (zone euphotique, <i>a minima</i> au point de plus grande profondeur du plan d'eau) Fréquence des blooms Composition du peuplement (indice IPLAC)
Lutte contre les végétaux	Superficies et/ou linéaires couverts Inventaires des espèces Température superficielle Fluctuation du niveau d'eau
Réoxygénation des eaux profondes	Profil d'O <sub>2</sub> sur la colonne d'eau (au point de plus grande profondeur du plan d'eau). Plusieurs campagnes annuelles.
Lutte contre le comblement	Hauteur d'envasement Vitesse de sédimentation Bathymétrie Suivi du transport solide au niveau des tributaires
Lutte contre la faune invasive	Zones colonisées Inventaires / suivis
Diversification des habitats	Inventaires faune / flore Évaluation de la fonctionnalité
Renforcement de population faunistique	Suivi de population, survie des individus Suivi de la reproduction et du recrutement
Lutte contre l'érosion	Identification des zones d'érosion Vitesse d'érosion Reprise de la végétation/sédimentation Suivi de l'évolution du trait de côte

## 4. Conclusion

---

Près de 50 % des plans d'eau identifiés par le SDAGE présentent aujourd'hui un risque de ne pas atteindre les objectifs de bon état écologique et chimique à l'horizon 2021. Des actions sont donc nécessaires pour restaurer et préserver les fonctionnalités de ces milieux, notamment au travers des priorités affichées dans le programme de mesures 2016-2021.

L'objectif de cette note est de mettre à disposition des acteurs du bassin Rhône-Méditerranée des solutions techniques pour traiter les altérations observées. Ce document s'inspire largement d'une étude réalisée sous la maîtrise d'ouvrage de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse (cf. § 1.1). Elle en reprend les principaux retours d'expériences et identifie les plans d'eau sur lesquels chacune des techniques de restauration recensées a été mise en œuvre.

Ces retours d'expériences, présentés du point de vue de leur efficacité, de leurs coûts et des possibles effets non souhaités pour l'écosystème, contribuent à préciser les actions

à engager au titre du plan de gestion 2016-2021.

**Cette synthèse permet une nouvelle fois de mettre en évidence le manque de suivis écologiques qui accompagnent les travaux de restauration. Ce type de suivis est indispensable pour identifier et quantifier les effets sur le milieu.**

Il apparaît donc nécessaire d'encourager la mise en place de telles études avant et après travaux. Les effets sur le milieu peuvent par ailleurs être observés après un temps de réponse du milieu plus ou moins long : ce phénomène est lié à l'inertie de la masse d'eau (temps de séjour des eaux, volume, morphologie) et dépend du type et de l'ampleur des altérations et des travaux qui ont été réalisés.

La présente note donne quelques pistes d'indicateurs pouvant être utilisés pour cet objectif.

# Les notes du secrétariat technique du SDAGE Rhône-Méditerranée déjà parues<sup>8</sup>

---

- **La restauration écologique du fleuve Rhône** *Novembre 2014*  
Outils pour évaluer le potentiel écologique du fleuve et définir où et comment le restaurer
- **Plan de gestion quantitative de la ressource en eau** *Septembre 2014*  
Principes et gouvernance
- **Suites des études EVPG et SAGE** *Septembre 2014*  
Quelle articulation ?
- **Les cours d'eau intermittents** *Janvier 2014*  
Éléments de connaissance et premières préconisations
- **Préparation du programme de mesures et des objectifs des masses d'eau du SDAGE 2016-2021 (bassin Rhône-Méditerranée)** *Septembre 2013*  
Note de méthode à destination des groupes de travail locaux déclinant le guide national
- **Note du secrétariat technique du SDAGE : éléments de méthode pour la définition d'un plan de gestion stratégique des zones humides** *Septembre 2013*  
Doctrines « zones humides » du bassin Rhône-Méditerranée
- **Mieux gérer les prélèvements d'eau** *Mars 2013*  
L'évaluation préalable des débits biologiques dans les cours d'eau
- **Comment agir pour le bon état des plans d'eau ?** *Décembre 2011*  
Mémento sur les mesures à engager avant 2015
- **Qu'est-ce que le bon état des eaux ?** *Mars 2011*

---

<sup>8</sup> Les notes du secrétariat technique du SDAGE Rhône-Méditerranée sont téléchargeables depuis le site internet <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr>



Les notes du secrétariat technique du SDAGE contiennent des informations techniques essentiellement destinées aux services de l'Etat et ses établissements publics en appui à la mise en œuvre du SDAGE Rhône-Méditerranée.

Cette note intitulée “ **Restaurer le bon état des plans d'eau – Retour d'expérience sur les méthodes de restauration des plans d'eau et recommandations**” fait un bilan des techniques de restauration mises en œuvre sur les plans d'eau du bassin Rhône-Méditerranée, et plus largement, en France et à l'étranger. Elle a pour objectif de valoriser les retours d'expériences disponibles pour aider la mise en œuvre du programme de mesures.

**Responsable de la rédaction et de la publication :  
Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse**

Le secrétariat technique du SDAGE du bassin Rhône-Méditerranée est animé par l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse et la délégation de bassin de la DREAL Rhône-Alpes. Il associe également des représentants des directions régionales de l'environnement de l'aménagement et du logement du bassin, des délégations régionales de l'Agence de l'eau ainsi que les représentants de l'ONEMA, de la direction régionale de l'agriculture et de la forêt Rhône-Alpes et de l'agence régionale de santé Rhône-Alpes.



**Agence de l'eau Rhône  
Méditerranée Corse**  
2-4 allée de Lodz  
69363 Lyon cedex 07

**Direction régionale de  
l'environnement, de  
l'aménagement et du  
logement Rhône-Alpes**  
Délégation de bassin  
Rhône Méditerranée  
69509 Lyon cedex 03

**Office National de l'Eau et  
des Milieux Aquatiques  
Délégation régionale Rhône-  
Alpes Bassin Rhône  
Méditerranée**  
Parc de Parilly  
Chemin des chasseurs  
69500 Bron