

Restaurer l'hydromorphologie des cours d'eau et mieux maîtriser les nutriments: une voie commune ?

Véronique Nicolas,
Frédérique Oraison,
Yves Souchon et Kris Van Looy

Sommaire

N°5

- Devenir des nutriments dans les cours d'eau
- Un devenir qui dépend des conditions morphologiques
- Quelques exemples de restauration et de leur effet sur les nutriments
- La zone riparienne, un élément important du système
- Les principes d'une restauration favorisant la résilience
- Conclusion
- Pour en savoir plus

© Y. Souchon



L'augmentation des nutriments dans les cours d'eau conduit dans de nombreux cas à une eutrophisation accentuée des milieux. Ce processus complexe affecte tous les compartiments de l'écosystème : perturbations physiques, chimiques et biologiques des eaux, et au-delà, la valeur d'usage des milieux aquatiques. Différents travaux de recherche, notamment en agronomie, portent depuis longtemps sur la diminution des intrants, la réduction des fuites en nitrates et phosphore ou l'atténuation des transferts au sein du bassin versant.

L'eutrophisation est due en premier lieu à un excès d'éléments fertilisants azotés et phosphorés dans les eaux. D'autres facteurs entrent cependant en ligne de compte comme l'ensoleillement, la température de l'eau ou encore la vitesse du courant. Ces paramètres dépendent notamment de l'hydromorphologie du cours d'eau.

Par ailleurs, par leur fonctionnement, les hydrosystèmes contribuent à la régulation de divers processus écologiques, qu'ils soient physiques (stockage d'eau dans les plaines d'inondation, recharge des aquifères et soutien d'étiage des cours d'eau par les zones humides), chimiques, ou encore biologiques.

Depuis quelques années, les recherches scientifiques concernant les relations entre hydromorphologie et processus de transformation des nutriments se développent. Une synthèse bibliographique publiée en 2011 par le pôle hydroécologie Onema/Irstea fait un point, illustré par quelques exemples, sur les éléments à retenir de l'état des connaissances actuelles.

Devenir des nutriments dans les cours d'eau

En conditions naturelles, les écosystèmes d'eau courante reçoivent des apports de nutriments¹ et de matière organique en provenance de leur bassin versant de façon plus ou moins importante selon leurs caractéristiques (taille, type de sol, occupation du sol...). Ces apports induisent un enrichissement trophique de l'amont vers l'aval des cours d'eau récepteurs, variable en fonction des milieux.

Les cours d'eau sont capables de stocker et transformer une partie de ces apports², ce qui limite leur transport vers l'exutoire. Ce fonctionnement caractérise ce qu'on appelle les capacités d'autoépuration des cours d'eau. Il est régi par les caractéristiques morphologiques du cours d'eau, des berges, et de la zone riveraine qui vont influencer les capacités de stockage, de transformation et d'élimination des apports naturels et anthropiques venant du bassin versant.

L'azote

Sous forme de nitrates, l'azote est un élément nutritif utilisé en agriculture comme engrais chimique ou organique. D'autres sources existent (atmosphérique, rejets urbains) mais l'essentiel est dû aux excès de fertilisation azotée, ainsi qu'à la production naturelle de nitrate par minéralisation des matières organiques du sol. Il se retrouve dans les eaux sous forme de nitrates (NO_3^-).

La principale voie d'élimination de l'azote est biologique, par dénitrification : la transformation de l'azote en forme gazeuse N_2 représente ainsi une diminution nette pour le milieu aquatique puisque le nutriment rejoint l'atmosphère. La dénitrification nécessite des conditions anoxiques contrairement à la **nitrification** - production de nitrates à partir d'autres formes d'azote - qui se produit en présence d'oxygène.

L'azote peut également être assimilé par la végétation, il est alors stocké de façon temporaire. Le recyclage de l'azote organique est rapide et le stockage dans les sols peu important.

Le phosphore

Le phosphore est un élément nutritif essentiel aux plantes, utilisé en agriculture comme engrais, mais aussi provenant des usages urbains (rejets notamment).

Il se retrouve dans les eaux de surface sous forme particulière (fixé sur les matières en suspension) ou dissoute dans une moindre mesure.

Il n'est pas éliminé du système car il ne présente pas de forme gazeuse. Il ne peut donc être que stocké de manière plus ou moins pérenne dans les sédiments, ou exporté par transport vers l'aval. Les conditions du milieu et la nature des sols conditionnent les capacités de stockage. Un milieu qui se retrouve en conditions anoxiques aura tendance à libérer le phosphore stocké.

La **nitrification** - production de nitrates à partir d'autres formes d'azote - a lieu en présence d'oxygène. La **dénitrification** - transformation de l'azote vers sa forme gazeuse - nécessite des conditions anoxiques. L'alternance et la proximité de zones présentant des disponibilités en oxygène différentes est donc primordiale pour que les différents processus concernant l'azote se mettent en place.

Le **phosphore** stocké dans les sédiments est libéré dans le milieu en conditions anoxiques.

Un devenir qui dépend des conditions morphologiques

Un cours d'eau est relié à une nappe d'accompagnement avec laquelle les échanges sont plus ou moins importants en fonction des caractéristiques du lit (porosité, nature du substrat, colmatage...). Les interactions et échanges sont également importants entre le cours d'eau, les berges et la zone riparienne, en particulier en période de hautes eaux. Ainsi, les aménagements et modifications induits par les activités humaines sur l'ensemble de ces compartiments influencent les échanges, le stockage et l'élimination des nutriments et autres éléments apportés par le bassin versant.

Aussi, des mesures de restauration ou de préservation des caractéristiques morphologiques naturelles des cours d'eau peuvent permettre de limiter les impacts mais surtout de favoriser la résilience des milieux aquatiques, c'est-à-dire

leur capacité à conserver un certain équilibre, ou à y revenir lorsque survient une perturbation.

Les problèmes récurrents de déséquilibre en nutriments et de pollutions diverses des milieux aquatiques nécessitent une mobilisation de tous les éléments à notre portée capables de limiter les nuisances. La première mesure incontournable à mettre en œuvre est la réduction des intrants autant que possible. Ces aspects font l'objet de travaux spécifiques qui ne sont pas détaillés ici. Nous présentons les résultats des études portant sur des opérations de restauration hydromorphologiques qui se sont intéressées à l'effet de ces actions sur les processus.

Quelques exemples de restauration et de leur effet sur les nutriments

Actuellement, la majorité des études est réalisée aux États-Unis. Les résultats de ces études - en nombre croissant - sont encourageants, en particulier pour les nitrates. Cela même si le recul est encore peu important et les études souvent

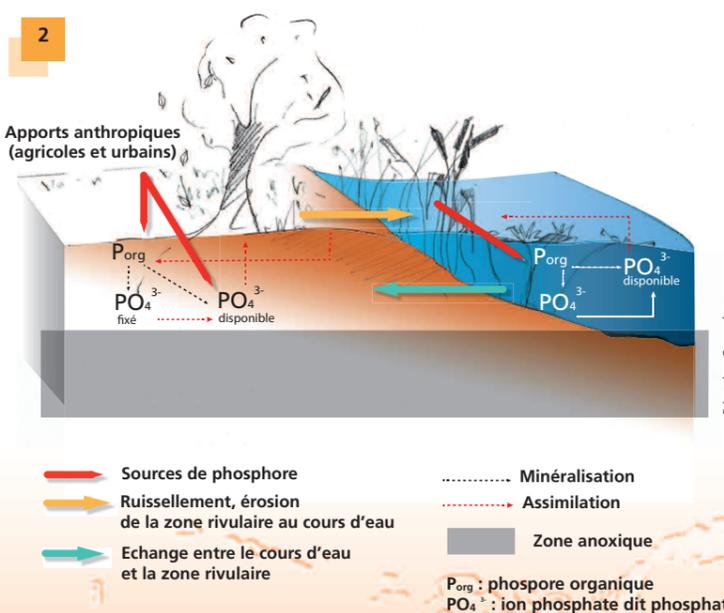
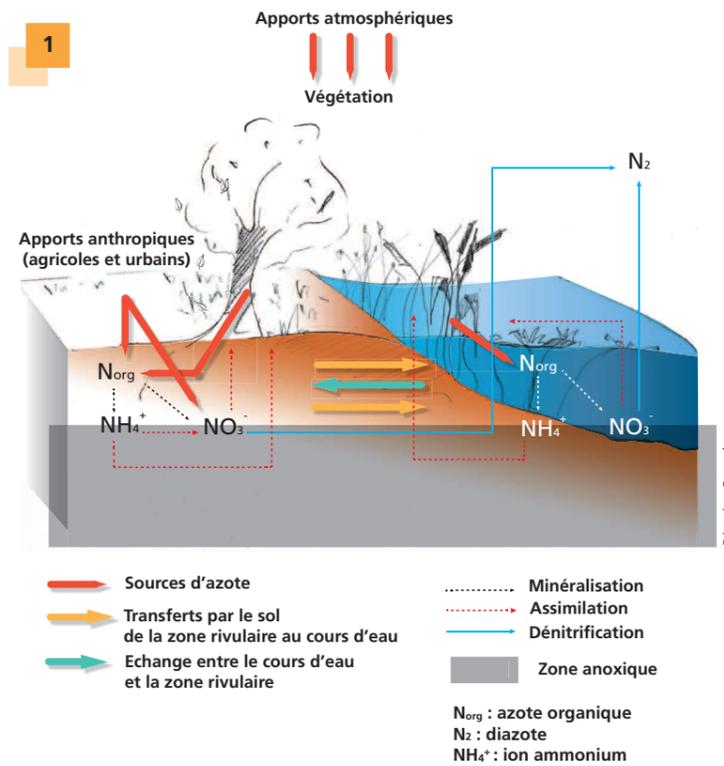
difficilement comparables du fait de la grande variabilité des méthodes de restauration, de la nature des milieux, des pressions...

On peut retenir quelques exemples de résultats d'études.

Suivi de la dénitrification après restauration hydromorphologique dans une zone de piémont à proximité d'une zone urbanisée - Maryland, États-Unis (Kaushal et al. 2008)

Il s'agit ici d'un reméandrage avec reconstitution d'une alternance de faciès, de mesures pour limiter l'incision, de reconnexion avec les annexes et de plantation de végétation

en zone riparienne sur un linéaire d'environ 150 mètres. La zone amont (tête de bassin) de ce tronçon avait également été restaurée quelques années auparavant (fig. 3 et 4).



1- Les nutriments sont des composés organiques ou minéraux assimilables par un organisme vivant pour son développement. Certains d'entre eux sont spécifiquement utilisés comme intrants en agriculture : l'azote et le phosphore.
2- Voir Malavoi et al. (2011) pour les principaux processus d'échanges dans un cours d'eau.

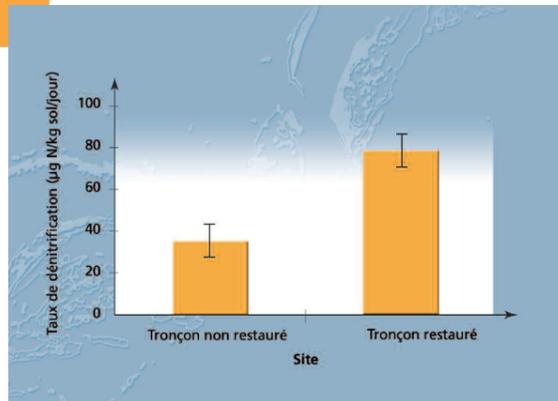


Figure 3. Moyennes des taux de dénitrification in situ tous sites confondus dans les tronçons restaurés vs non restaurés (3 prélèvements par site entre mai et juin 2004).

→ Les sites restaurés indiquent une moyenne de dénitrification supérieure (analyse de la variance ANOVA, $p=0.01$) à celle des sites non restaurés

Cet exemple de restauration sur un petit cours d'eau montre une relation entre le temps de résidence de l'eau et la quantité de nitrates éliminés - un temps de

● Suivi de différents paramètres après opérations de re-méandrage dans une zone agricole à cheval sur le Kentucky et l'Indiana - Etats-Unis

L'étude se concentre sur des cours d'eau de zones vallonnées qui ont été rectifiés pour favoriser l'agriculture. La restauration porte sur des tronçons qui comportent moins de 10% d'alternance de type « radier – mouille ». Dans le cadre des opérations de restauration, des méandres ont été reconstitués dans le but de recréer des alternances de faciès et une diversité des milieux. L'auteur de cette étude (Bukaveckas 2007) montre une capacité d'élimination plus importante de l'azote et du phosphore sur le tronçon de cours d'eau sur lequel ont été reconstitués des méandres.

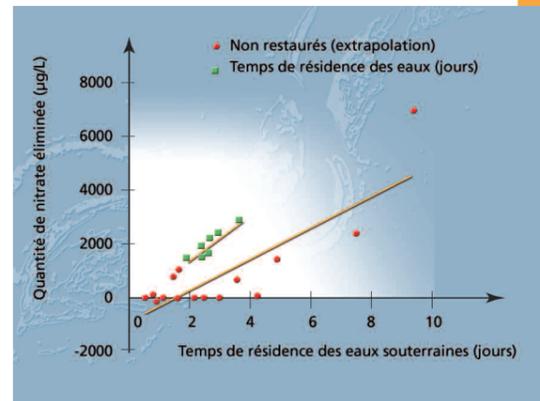


Figure 4. Relation entre le temps de résidence de l'eau et la quantité de nitrates éliminés pour les tronçons non restaurés (extrapolation d'après les données de taux de dénitrification et les apports d'eau souterraine) et les tronçons restaurés (scénario utilisant les données de taux de dénitrification des zones restaurées en 2003-2004 et les flux souterrains mesurés en 2004).

résidence long favorisant le développement de conditions hypoxiques favorables à la dénitrification - ainsi qu'une amélioration de la dénitrification sur site restauré.

Le coefficient de prélèvement est multiplié par 30 pour l'azote et par 4 pour le phosphore quand on compare les sites restaurés aux sites canalisés. Le tableau présente les valeurs moyennes des métriques utilisées pour caractériser la qualité de l'eau, l'hydrologie et le prélèvement en nutriments sur trois sites de morphologie distincte :

- site canalisé (Wilson Creek – pré-restauration) ;
- site restauré (Wilson Creek – post-restauration) ;
- site témoin (Harts Run).

	Canalisé	Restauré	Témoin
Phosphore-SRP (µg/l)	10,8 (a)	7,2 (b)	6,7 (b)
Azote-NO ₃ (µg/l)	375 (a)	456 (a)	63 (b)
Débit (l/s)	125 (a)	109 (a)	62 (b)
Vitesse (m/s)	11,9 (a)	8,7 (b)	6,1 (c)
Temps de transit médian %	14 (a)	17 (a)	30 (b)
Coefficient de prélèvement azote (m ⁻¹)	0,00005 (a)	0,00162 (b)	0,00012 (a)
Coefficient de prélèvement du phosphore (m ⁻¹)	0,00073 (a)	0,00263 (b)	0,00193 (b)

Comparaison de différents paramètres entre cours d'eau canalisé, restauré et témoin.

Les lettres (a), (b), (c) signalent une différence statistiquement significative entre les valeurs (deux valeurs accompagnées de lettres différentes sont statistiquement différentes) (Anova à mesures répétées et comparaisons planifiées (a priori) des données référence versus canalisé et restauré versus canalisé).

La demande, biotique et abiotique, en azote et phosphore (caractérisée par le coefficient de prélèvement) est même plus importante sur le tronçon restauré que sur le tronçon de référence. L'auteur émet des réserves du fait du manque de recul par rapport aux travaux de restauration. En effet, les travaux entraînent une plus grande disponibilité en lumière favorisant la croissance végétale et augmentent de fait la demande biologique. La mise à nu du substrat argileux peut également faciliter la fixation du phosphore. Dans le cas présenté ici le suivi ne s'étend que

sur 2 ans. Des suivis à plus long terme sont nécessaires pour déterminer un effet après une récupération plus complète d'un équilibre suite aux travaux.

Toutefois, la différence significative du temps de transit médian des nutriments suggère un rôle prépondérant de la restructuration morphologique du cours d'eau, qui dans le cas du tronçon de référence constitué d'une alternance de faciès favorise des écoulements diversifiés propices à la fixation du phosphore ou l'élimination de l'azote.

● Comparaison des capacités de dénitrification entre deux cours d'eau de tête de bassin, l'un canalisé, l'autre méandriforme dans une zone d'agriculture intensive présentant de forts taux d'export de nitrates - Illinois, Etats-Unis (Opdyke et al. 2006)



Cours d'eau artificialisé, tête de bassin en zone agricole

améliore l'élimination de nitrates de 91%. A noter qu'un indice de sinuosité supérieur à 1,5 correspond à un cours d'eau méandriforme.

Les auteurs ont également évalué la longueur de cours d'eau nécessaire pour éliminer les nitrates mesurés au printemps : sur des cours d'eau canalisés, 40 000 km sont nécessaires, alors que 2 900 km suffisent si le cours d'eau présente des méandres. A la fin de l'été, ces distances sont réduites à 35 km pour un cours d'eau canalisé et 6,9 km pour un cours d'eau à méandres.

Néanmoins, les apports en nitrates sont tels que la dénitrification n'a qu'un impact modéré, et n'élimine pas plus de 15% de la charge du cours d'eau.

Les auteurs montrent une dénitrification plus importante dans le cours d'eau qui a conservé une structure à méandres que dans le cours d'eau canalisé. L'alternance de faciès, la sinuosité et la diversité des substrats (présence de fines contenant de la matière organique indispensable à la dénitrification) sont les éléments mis en avant pour expliquer une dénitrification importante : jusqu'à 50 mg N/m²/h (quantité d'azote par mètre carré et par heure) en été et entre 10 et 20 mg N/m²/h en hiver, en particulier dans les concavités des méandres, où les sédiments fins et la matière organique se déposent. La sinuosité est un indice important en faveur de la dénitrification. Dans l'exemple présent, un indice de sinuosité de 1,9



Cours d'eau artificialisé

Les conditions morphologiques, l'alternance de faciès, les méandres, ont une importance non négligeable sur les capacités du cours d'eau à limiter l'export de nutriments vers l'aval.

La zone riparienne, un élément important du système

La ripisylve fait partie intégrante de la morphologie du lit du cours d'eau et constitue à la fois une zone de transition et un facteur clé du fonctionnement de l'hydrosystème. Pour le phosphore, mais aussi pour bon nombre d'autres polluants véhiculés sur les particules de sédiments, la présence le long des cours d'eau de ripisylves suffisamment larges, denses, continues et non court-circuitées est un élément efficace favorisant les processus de transformation des nutriments.

Les figures n° 5 et 6 illustrent les capacités de filtre des ripisylves.

Même si les taux d'abattement sont variables selon les contextes environnementaux et les éléments constituant la ripisylve, le rôle filtre des corridors rivulaires vis-à-vis des apports latéraux de polluants diffus (nitrate, phosphore) est reconnu. Ces corridors arborés permettent le ralentissement et l'infiltration des écoulements provenant des versants. Le conseil scientifique du patrimoine naturel et de la biodiversité (CSPNB, 2008) considère qu'une bande rivulaire continue de 10 à 20 mètres de large permet d'abattre parfois jusqu'à 80 % des flux de l'un ou l'autre de ces polluants. Toutefois, au-delà d'une certaine quantité d'apports en nutriments, un cours d'eau ne pourra plus les éliminer : il faut alors en réduire la source et limiter leur arrivée aux cours d'eau.

● Quelques éléments à garder à l'esprit pour concevoir un projet de restauration :

- connaître les **différences de comportement entre azote et phosphore** ;
- prendre en compte les **différentes formes d'azote**. Seule la dénitrification est éliminatrice mais l'azote doit être sous forme de nitrate. Il faut donc soit favoriser le processus de nitrification pour ensuite dénitrifier, soit promouvoir d'autres formes d'interception de l'azote (végétation, piégeage,...) plus proches des systèmes envisagés pour retenir le phosphore. La restauration qui ne prendrait en compte que les phénomènes de dénitrification, risquerait de « passer à côté » de la réduction d'azote ;
- évaluer la **capacité maximale d'élimination du cours d'eau** - s'inspirer de l'exemple des USA qui ont mis en place une définition du « *Total Maximum Daily Load* » - et être conscient que l'élimination de l'azote est un processus qui augmente avec la diversité de la structure physique (méandre, faciès, ripisylve) jusqu'à un **pallier de saturation**. Au-delà de cette limite, un cours d'eau ne pourra plus éliminer. C'est pourquoi il faut toujours garder à l'esprit que la restauration est une action complémentaire à la réduction des apports à la source et la limitation de leur transfert aux cours d'eau. Pour ce dernier point, on s'appuiera à l'échelle du bassin versant, avec deux principes d'actions :
 - favoriser les dispositifs d'**interception** des nutriments tout au long du parcours dans le bassin versant afin de limiter la charge du cours d'eau. Une grande diversité de zones tampons peut être mobilisée : bande enherbée, prairies permanentes, bois, haies, zones humides artificielles... Leur efficacité varie en fonction du type de molécule et des modalités de drainage des terres ;

- favoriser les aménagements capables de **réduire ou de limiter les flux directs** lors d'épisodes d'orage (périodes susceptibles de provoquer de forts transports de nutriments), notamment par l'implantation de couverts intermédiaires ;
- éviter les sols nus en hiver, par implantation de cultures intermédiaires ;
- mettre l'accent sur la sinuosité, la diversité des substrats et la **diversité de faciès**, les échanges et processus se déroulant prioritairement en tête de chaque radier ;
- planter, restaurer et faciliter le retour de la ripisylve en tenant compte de la continuité, la largeur, des court-circuits éventuels (drainage). Des guides spécifiques sont disponibles dans certaines régions, notamment auprès des agences de l'eau ;
- restaurer à une échelle différente. S'il est difficile de dire précisément à partir de quand on sera efficace, il est possible d'affirmer que des interventions trop ponctuelles n'ont probablement que peu d'impact même localement ;
- prendre en compte le lien qui existe entre **charge en azote, débit et capacité d'élimination** ... (Wolheim *et al.*, 2008) : les temps d'échanges longs dans les zones d'interface (fonds des radiers et berges) sont propices à l'élimination. Les petits cours d'eau intacts des têtes de bassin, de par leur grande emprise linéaire et la richesse de leurs interfaces, sont primordiaux dans ce processus. Ainsi, on privilégiera la restauration des têtes de bassin car les processus de dénitrification et de fixation du phosphore y sont les plus actifs, et on peut s'attendre à une efficacité réelle qui contribuera à la qualité de l'ensemble du réseau hydrographique.

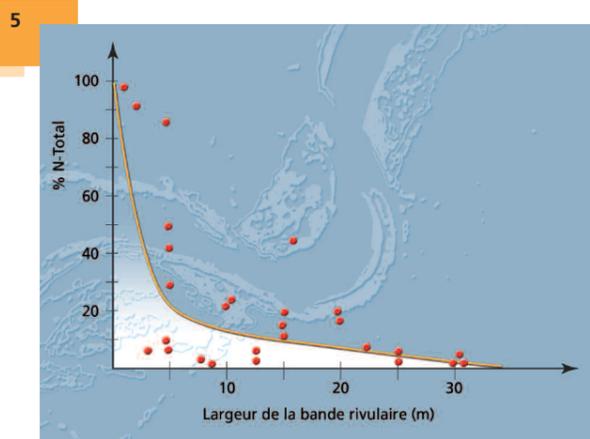


Figure 5. Évolution moyenne de la teneur en azote total dans les eaux en fonction de la largeur de la bande rivulaire (compilation de données des synthèses de Peterson *et al.* (1992), Vought *et al.* (1994) dans Maridet (1995)).

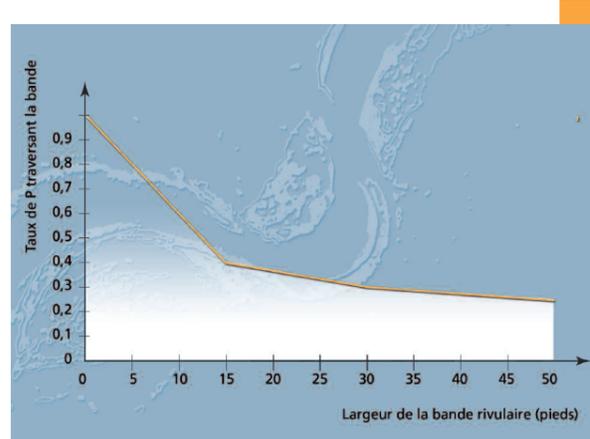


Figure 6. Evolution moyenne de la teneur en phosphore total des eaux en sortie de bande rivulaire, en fonction de sa largeur (Osmond *et al.*, 2002)

Les principes d'une restauration favorisant la résilience

Les mesures de restauration de la morphologie des cours d'eau et de leurs processus d'entretien, lorsqu'elles sont envisagées à une échelle suffisante, participent à l'amélioration de leur capacité d'épuration des éléments nutritifs excédentaires, et correspondent à la logique des mesures « sans regret ».

En revanche, des mesures trop isolées, à une échelle trop locale, focalisées sur un seul élément biotique ou abiotique, non prévues dans un plan de restauration d'ensemble, risquent d'être très insuffisantes en termes d'amélioration du fonctionnement général des hydrosystèmes.

Conclusion

Ces différents exemples nous indiquent qu'un travail autour de la diversification des faciès, de la "déchenalisation" ou du reméandrage, et la protection du cours d'eau grâce à des ripisylves semble être le moyen le plus pertinent pour favoriser la capacité d'autoépuration du système et ainsi permettre de limiter l'importance des dégradations de qualité du milieu lui-même, mais également des milieux plus aval, plans d'eau et estuaires, qui en sont les exutoires finaux.

Les différences de comportements entre l'azote, le phosphore mais aussi les autres polluants susceptibles d'avoir été piégés dans le sol, ainsi que la diversité des milieux font qu'il est difficile de définir des critères pour une restauration « optimale ». Des travaux de recherche débutent sur les modélisations du transfert de contaminants au sein du cours d'eau, en intégrant les facteurs de contrôle tels que l'hydromorphologie.

● Pour en savoir plus

Oraison F., Souchon Y. et Van Looy K., 2011.

Restaurer l'hydromorphologie des cours d'eau et mieux maîtriser les nutriments : une voie commune ? Pôle Hydroécologie des cours d'eau Onema-Irstea Lyon MAEP-LHQ, Lyon. 42 p.

Téléchargeable sur :

■ http://www.irstea.fr/sites/default/files/ckfinder/userfiles/files/2011PoleLyon_2010_Hydromorpho_nutriments_VF.pdf

■ http://www.onema.fr/IMG/pdf/2011_002.pdf

Bukaveckas P.A., (2007). *Effects of Channel Restoration on Water Velocity, Transient Storage, and Nutrient Uptake in a Channelized Stream. Environmental Science & Technology.* 41(5): 1570-1576.

CSPNB, 2008. *L'arbre, la rivière et l'homme.* MEDAD/D4E. 64 p.

Kaushal S.S., Groffman P.M., Mayer P.M., Striz, E. and Gold A.J., (2008). *Effects of stream restoration on denitrification in an urbanizing watershed. Ecological Applications.* 18(3): 789-804.

Malavoi J.R., Garnier C.C, Landon N., Recking A., Baran P., 2011. *Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière.* Onema. 216 p.

Maridet, L., 1995. *Rôle des formations végétales riveraines. Recommandations pour une gestion régionalisée. Rapport final, Cemagref BEA/LHQ, Ministère de l'Environnement, Direction de l'Eau, SDMAP PARIS,* 69 p.

Opdyke M.R., David M.B. and Rhoads B.L., 2006. *Influence of geomorphological variability in channel characteristics on sediment denitrification in agricultural streams. Journal of Environmental Quality.* 35(6): 2103-2112.

Osmond, D.L., Gilliam, J.W. and Evans, R.O., 2002. *Riparian Buffers and Controlled Drainage to Reduce Agricultural Nonpoint Source Pollution, North Carolina Agricultural Research Service Technical Bulletin 318. North Carolina State University, Raleigh, NC.*

Wollheim, W.M., Peterson, B.J., Thomas, S.M., Hopkinson, C.H. and Vörösmarty, C.J., 2008. *Dynamics of N removal over annual time periods in a suburban river network. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences.* 113(G3): G03038.

● Rédaction

Véronique Nicolas (Onema),
Frédérique Oraison,
Yves Souchon et Kris Van Looy (pôle Onema Irstea)

● Edition

Véronique Barre (direction de l'action scientifique et technique de l'Onema) et Claire Roussel (délégation à l'information et à la communication)

● Création et mise en forme graphiques

Béatrice Saurel (saurelb@free.fr)

● Citation

Nicolas V., Oraison F., Souchon Y. et Van Looy K., 2012. *Restaurer l'hydromorphologie des cours d'eau et mieux maîtriser les nutriments : une voie commune ?* Onema. 8 pages.

● Contact

yves.souchon@irstea.fr

● Remerciements

Nicolas Domange et David Monnier (Onema) pour leur relecture attentive.
Réalisé avec le concours de l'Oieau.

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

1- **Éléments d'hydromorphologie fluviale**
(octobre 2010)

2- **Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière**
(mai 2011)

3- **Evaluer les services écologiques des milieux aquatiques : enjeux scientifiques, politiques et opérationnels**
(décembre 2011)

4- **Evolutions observées dans les débits des rivières en France**
(décembre 2012)

5- **Restaurer l'hydromorphologie des cours d'eau et mieux maîtriser les nutriments : une voie commune ?**
(décembre 2012)

ISBN 979-10-91047-08-1