Les zones humides et l'eau

Cahier thématique

Les zones humides et l'eau

Introduction
p4

p 7 1- Les Tourbières
Facteurs essentiels du fonctionnement hydrique

p 13 2- Le Carbone dans les tourbières
Un fonctionnement méconnu

p 16 3- Petites zones humides de fond de vallée
Fonctionnement hydrologique

p 20 4- Les micropolluants dans les zones humides
Un rôle de piège et de transformation

p 22 5- L'alimentation en eau des plaines alluviales
Des apports multiples et interdépendants

p 28 6- La dynamique des anciens bras fluviaux
Une clé pour la restauration

p 32 7- Biodiversité des anciens bras fluviaux
L'influence du fonctionnement du milieu

p 36 8- L'azote dans les zones humides
Des transformations importantes mais variables

p 41 9- Entre Scarpe et Escaut
Génèse et fonctionnement de zones humides d'affaissement minier

p 44 10- La Camargue
Un fonctionnement hydrologique entre nature et artifice

p 48 11- La végétation des zones humides littorales
Marquée par l'interaction complexe de l'eau et du sel

p 53 12- Vasières estuariennes
Dynamique des milieux et biodiversité

p 57 13- Le fonctionnement de la riviére de Kaw (Guyane)
Une première étape dans la compréhension de la plus grande zone humide française

Glossaire
p62

Sources d'information
p63

introduction

L'eau - et les flux qui l'animent - sont les moteurs fonctionnels majeurs des zones humides. La caractéristique principale qui différencie ces espaces des milieux terrestres tient en effet à leur capacité à conserver de l'eau en excédent dans le sol et/ou à sa surface. La présence de l'eau et ses caractéristiques sont à l'origine de la formation de sols particuliers et du développement de communautés végétales et animales spécialisées. Les entrées et les sorties d'eau, la direction et la vitesse des écoulements conditionnent leurs états ; ces paramètres sont étroitement dépendants des conditions climatiques générales et locales, du contexte géologique et géomorphologique, de la localisation de la zone au sein des bassins hydrographiques, et des activités humaines exercées localement et aux alentours.

Malgré leur importance fondamentale, les flux d'eau et leurs conséquences sur les zones humides ont longtemps été moins étudiés que d'autres éléments, tels que la végétation, la faune ou le sol.

La préservation, voire la restauration des zones humides doivent être largement fondées sur la gestion de l'eau. La conservation des zones humides et de leur valeur demande manifestement une plus grande prise en compte, et donc une meilleure compréhension du rôle de l'eau et de ses flux. Ce constat est valable à l'échelon mondial ; certaines législations concernant la conservation et la restauration des marais et marécages mettent désormais l'accent sur la nécessité de mieux connaître le fonctionnement hydrologique avant toute intervention. Ainsi, dans le cadre de la Convention de Ramsar, ont été reconnues les fonctions écologiques et hydrologiques que doivent remplir les zones humides d'importance internationale.

Depuis quelques années, des universitaires, organismes institutionnels ou gestionnaires d'espaces naturels ont agi pour compenser ce déficit de connaissance, en focalisant leurs recherches sur ces thèmes. La complexité des phénomènes en jeu rend délicat ce travail scientifique, qui doit souvent associer des experts de domaines très différents appartenant aux sciences de la Terre et du vivant comme aux sciences humaines.
Le PNRZH (Programme National de Recherche sur les Zones Humides) s'inscrit dans cette dynamique ; il constitue l'un des volets du plan d'action interministériel pour les zones humides, lancé en 1995 par le gouvernement. Le PNRZH, cofinancé par les Agences de l'eau, et les ministères chargés de l'Environnement, de l'Equipement, et de l'Agriculture, vise à fournir des clés rationnelles pour une gestion durable de ces milieux.

Ce premier cahier thématique regroupe et synthétise les principaux résultats originaux du PNRZH sur le thème de l'eau et des flux d'eau, à partir de recherches menées sur des zones humides représentatives de la diversité des situations (littorales, alluviales, intérieures, tourbeuses…).

S'il est presque impossible de synthétiser en quelques dizaines de pages trois années de recherche menées par plus de cent équipes de chercheurs, quelques acquis majeurs peuvent toutefois être mis en valeur :

- la " découverte " de zones humides très mal connues jusqu'à une date récente ;
- la mise au point de méthodes d'analyse spécifiques à ces zones ;
- la confirmation du rôle majeur de l'Homme dans leur fonctionnement et leur devenir ;
- la nécessité d'une approche globale écosystémique pour comprendre le poids relatif des différents facteurs en présence ;
- la démonstration de la grande diversité fonctionnelle de ces milieux ;
- pour les gestionnaires, un appel à la prudence en matière d'intervention sur le fonctionnement hydrique de ces zones.

LES PREMIERS PAS DE LA CONNAISSANCE DE CERTAINS MILIEUX

Le PNRZH a permis d'initier la connaissance du fonctionnement hydrologique de certaines zones humides trop peu connues jusqu'à présent.
L'exemple le plus remarquable dans ce domaine est sans doute le marais de Kaw, en Guyane française. Ce site de 137 000 hectares constitue en effet la plus vaste zone humide française ; il n'était absolument pas connu, ni même exploré jusqu'à une date très récente. Le PNRZH a permis de lancer la recherche sur ce système, en commençant par le recueil des données hydrologiques de base. La recherche s'est poursuivie depuis, en particulier grâce à la mise en place d'une plateforme flottante héliportée dans la partie auparavant inaccessible du marais.
Dans une moindre mesure, le PNRZH a permis de mieux connaître le fonctionnement hydrologique d'autres zones humides peu étudiées jusqu'alors ; c'est le cas *des zones humides d'affaissement minier* du nord de la France, *des petites zones humides de fond de vallée,* ou *des tourbières.*

DES INNOVATIONS DANS LES TECHNIQUES D'ÉTUDE

Confrontés à des problématiques parfois peu explorées, les chercheurs ont eu à développer de nouveaux moyens d'analyse des flux d'eau et de matières, en milieux saturés ou non. Ainsi mises au point et testées, ces techniques sont généralement susceptibles d'être utilisées en d'autres lieux.
Ainsi, dans la vallée de la Seine, les chercheurs ont mis en place un dispositif complet et original (piézomètres, tensiomètres, bassin sans fond…) permettant de connaître les flux d'eau à la surface et dans le sol, et grâce auquel ils ont pu démontrer que l'inondation du site d'étude était provoquée par remontée du niveau de la nappe avant débordement de la rivière.
D'autres démarches très élaborées *d'acquisition des données* ont été mises en place : suivi du cycle du carbone dans les tourbières, analyse du devenir des pesticides dans les sols…

Dans les cas les plus favorables, les démarches expérimentales ont été complétées par la mise au point d'un certain nombre de *modèles mathématiques*. A titre d'exemple, un travail ambitieux a permis, en Camargue, d'aboutir à une bonne connaissance, mais aussi à une prévision correcte, des échanges hydriques, particulièrement complexes, entre les différents compartiments du delta du Rhône.

LES IMPACTS DES ACTIONS DE L'HOMME : GÉNÉRALEMENT IMPORTANTS, PARFOIS INATTENDUS

Certaines actions de l'Homme, depuis des temps immémoriaux, ont des impacts très forts sur le fonctionnement hydrologique des zones humides. *Le drainage*, *les endiguements*,…, ont des effets bien connus puisque ces pratiques ont justement été développées pour modifier l'état et le comportement initiaux de ces milieux en leur faisant perdre leur caractère humide, ou du moins en limiter les conséquences alors jugées néfastes.

Des projets de recherche ont mis en évidence des effets indirects et peu connus de certains aménagements. A titre d'exemple citons :

- dans le bassin de la Seine, *les lâchers de barrages–réservoirs* de l'amont qui, ayant pour objectif de relever les débits d'étiage, peuvent conduire à une inversion du système hydrologique, la Seine alimentant alors la nappe phréatique ;
- le long de la Meuse, *un canal* provoque une réalimentation involontaire de la nappe et des zones humides environnantes ;
- entre Scarpe et Escaut, dans le nord de la France, les affaissements des cavités minières ont bouleversé la topographie et le réseau hydrographique, lui-même désormais totalement dépendant *des pompages* sous contrôle anthropique absolu ;
- en Camargue, le développement du réseau de *canaux d'irrigation* a eu pour conséquence d'accroître les connectivités biologiques entre milieux. Il en résulte des modifications de la faune et de la flore, avec, par exemple, une diffusion accélérée de la Jussie, plante exotique invasive ;
- le marais de Kaw, espace sauvage et largement impénétrable, est influencé par des actions de mise en valeur du siècle dernier, en particulier un canal qui met en relation la rivière de Kaw avec le fleuve Approuague et qui facilite l'entrée des marées dans le site.

DES ÉCOSYSTÈMES À ANALYSER GLOBALEMENT

Nombre de résultats obtenus ont illustré *la complexité* des zones humides en tant qu'hydrosystèmes. Ce faisant, ils ont mis en évidence des éléments de leur fonctionnement et de leurs fonctionnalités souvent peu connus, ce qui ne peut que favoriser une gestion raisonnée.

Les difficultés rencontrées pour comprendre l'ensemble des phénomènes en jeu ont, le plus souvent, pour origine *la multiplicité des entrées et des sorties de l'eau* dans les zones humides. C'est pourquoi toute analyse doit toujours être abordée en tentant de ne négliger aucun des compartiments et flux de ces systèmes. L'origine de l'eau entrant dans les zones humides est fréquemment très diverse. Ainsi, si certaines tourbières ne sont alimentées que par les précipitations, certaines zones alluviales peuvent disposer d'apports hydriques d'une dizaine d'origines différentes, en particulier en provenance de plusieurs nappes souterraines possédant des caractéristiques physico-chimiques distinctes. *Les nappes profondes* jouent souvent un rôle important dans l'équilibre de ces systèmes ; ce type d'alimentation peu connu doit faire l'objet d'une attention particulière dans les tourbières ou les plaines alluviales.

Dans tous les cas, élaborer *des modèles conceptuels* du fonctionnement hydrologique se révèle très utile. D'une part, ces représentations théoriques permettent de raisonner de façon globale et systémique ; d'autre part, elles peuvent être transférées à des situations voisines sans avoir à reprendre la totalité de la démarche cognitive.

UNE GRANDE DIVERSITÉ DE SITUATIONS

La complexité des zones humides correspond à la très grande diversité des situations spatiales ou temporelles. Les gestionnaires doivent appréhender au mieux cette diversité pour gérer les écosystèmes en fonction des objectifs qu'ils se fixent.

DIVERSITÉ SPATIALE

Une zone humide donnée peut connaître des fonctionnements hydrologiques radicalement différents d'un point à un autre. Les chercheurs ont par exemple montré qu'une même tourbière comptait six secteurs distincts, selon l'alimentation dominante en eau : sources, rivière, affleurement de la nappe,…*In fine*, les résultats des travaux du programme "tourbières" ont permis de conclure que *les typologies* historiques ne suffisaient plus pour refléter la réalité tant les situations intermédiaires ou composites étaient multiples. Elles devraient être remplacées par une typologie plus orientée vers le fonctionnement hydro-écologique, répondant mieux aux besoins de projets de gestion durable.

VARIATIONS TEMPORELLES

Les flux hydriques connaissent *des rythmes complexes* au cours de l'année ou au-delà. Un schéma hydrologique valable une année donnée peut être remis en cause l'année suivante, ce qui impose, avant tout choix de modification de gestion, de disposer au minimum de chronoséquences descriptives de la zone humide comprenant des années moyennes, déficitaires ou excédentaires en eau.
La part relative de chacune des origines d'eau dans une zone humide peut être très variable selon les périodes de l'année. Ainsi, dans les zones humides alluviales, l'alimentation de la nappe par la rivière peut limiter considérablement les remontées de la nappe profonde.
Cette variabilité temporelle peut également être illustrée par les variations particulièrement marquées de la salinité du Vaccarès, étang central de la Camargue, liées aux fluctuations des niveaux d'eau douce dues aux pratiques rizicoles ou aux ruptures de digues.

DIVERSITÉ DES FONCTIONS

La confirmation de la diversité fonctionnelle des zones humides est à coup sûr l'un des acquis majeurs du PNRZH.

Pour répondre à ses besoins quantitatifs et qualitatifs en eau, l'Homme a imaginé des infrastructures artificielles telles que les barrages pour écrêter les crues ou soutenir les étiages et les stations d'épuration des eaux usées pour contrôler des flux de polluants. Ces dernières années ont été marquées par le développement du concept *" d'infrastructures naturelles ",* les écosystèmes étant considérés comme jouant un rôle dans l'aménagement et le développement du territoire. Les zones humides ont dans ce contexte occupé une place majeure pour affiner, tester, quantifier le concept. Sous conditions et dès lors qu'elles restent fonctionnelles, elles peuvent rendre à la collectivité des services équivalents à ceux rendus par des équipements. Cependant, parce que les zones humides présentent une grande variabilité spatio-temporelle, l'importance de la fonction escomptée peut, elle aussi, être très variable, y compris au sein d'une zone donnée.

En matière *d'écrêtement des crues,* les plaines alluviales peuvent souvent jouer un rôle significatif par étalement et ralentissement des eaux dans la vallée, à la différence de nombreuses tourbières où l'eau des précipitations ne fait que transiter rapidement.

Photo : A. Dervieux

En matière de *contrôle des polluants*, les situations sont également diverses. Plusieurs sites étudiés, en particulier dans les vallées du Rhin ou de la Meuse, se sont révélés être des lieux très efficaces de diminution des flux de nitrates. Toutes les zones humides ne jouent pas le même rôle dans ce domaine et les chercheurs ont montré que les sites qui éliminent le plus de nitrates sont des secteurs à nappe haute et renouvelée, des zones régulièrement inondées et surtout les interfaces ou lisières, entre zone humide et espace terrestre. Des mécanismes de rétention-libération des éléments en trace potentiellement toxiques (notamment des métaux lourds) par les constituants solides des zones humides, ont été précisés. Les périodes de rétention estivales durant lesquelles les conditions de milieu sont souvent oxygénées peuvent être suivies de période de relargage dans le milieu aquatique en période hivernale. Il est également confirmé que les sols peuvent fixer, ou mieux, dégrader des polluants organiques comme les pesticides agricoles. Cependant, là aussi, de fortes variations apparaissent en fonction du niveau d'oxygénation du sol.

Enfin, au moment où le protocole de Kyoto relatif aux gaz à effet de serre est à l'ordre du jour, les résultats du PNRZH ont confirmé la fonction *"puits de carbone"* des tourbières fonctionnelles.

Ces connaissances présentent un intérêt certain en termes opérationnels, puisqu'elles aident à définir, dans une zone donnée, les secteurs devant être préservés ou restaurés de façon prioritaire. Mais elles illustrent aussi la difficulté pour un gestionnaire de faire des choix puisque, par exemple, une nappe haute permet la diminution de la teneur des nitrates dans les eaux, mais favorise aussi le passage dans l'eau des éléments potentiellement toxiques. Optimiser un service rendu par une zone humide nécessite d'évaluer les risques engendrés par les actions entreprises dans la mesure où il peut exister des incompatibilités entre certaines fonctions.

L'EAU ET LA BIODIVERSITÉ : DES INTERACTIONS COMPLEXES

Tous les paramètres qui influencent le fonctionnement des zones humides sont en interaction, et agissent fortement sur les écosystèmes.
Les acquis de la recherche sur la biodiversité ont permis de conclure que les réponses des communautés vivantes aux variations du fonctionnement hydrologique et sédimentaire de l'hydrosystème nous apparaissent : parfois évidentes (a), souvent complexes (b, c, d) et parfois difficiles à interpréter (e), donc impossibles à transposer et généraliser avec certitude. Ainsi :
a • dans *les vasières estuariennes,* certains secteurs bien délimités assurent des fonctions biologiques majeures telles l'alimentation des poissons et des oiseaux ;
b • dans *les anciens bras fluviaux,* le fonctionnement hydrique a une influence majeure sur la composition de la végétation ; certains facteurs, telles les perturbations lors des crues ou l'évolution du niveau trophique, se révèlent être des agents de contrôle de l'écosystème ;
c • dans *les marais littoraux,* les niveaux d'eau, le taux de salinité, les connections hydriques,..., conditionnent la composition et la répartition de la végétation ;
d • dans *le Vaccarès,* les variations des niveaux de salinité ont eu des répercussions inattendues sur les peuplements végétaux. Les réponses ont été différées dans le temps, et les impacts se sont révélés indirects, la diminution de la salinité entraînant l'augmentation de la turbidité de l'eau qui défavorise, par restriction de la photosynthèse, les plantes des milieux non salés ;
e • *en Camargue* encore, la biodiversité actuelle apparaît comme le résultat d'un équilibre très fragile associé à une forte variété des rythmes hydrologiques et des niveaux de salinité. De faibles changements du système socio-économique local pourraient conduire à une uniformisation des milieux.

POUR LES GESTIONNAIRES : UNE LEÇON DE PRUDENCE ET DE MODESTIE

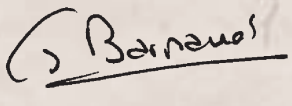
Une zone humide ne doit jamais faire l'objet d'une analyse à partir d'idées préconçues ; elle doit toujours être appréhendée avec prudence, par *un examen détaillé dans l'espace et suivi dans le temps.* La recherche permet de déterminer, plus ou moins rapidement selon la complexité des écosystèmes, les facteurs agissant sur leur fonctionnement à partir desquels le gestionnaire pourra intervenir, en connaissant les conséquences de ses actes. Par contre, la recherche ne fournit pas, sauf exception, de "recettes de gestion, clé en main", les techniques les plus appropriées dépendant des objectifs du gestionnaire et des situations locales.

La détermination des objectifs de gestion mérite d'être abordée avec la même ouverture d'esprit. Il n'existe pas de "zone humide idéale" comme en témoignent les relations niveau de salinité–biodiversité dans les marais littoraux ou le fonctionnement hydrodynamique des bras fluviaux. Les objectifs doivent donc, autant que faire se peut, être choisis dans la concertation et la transparence, en cherchant généralement à *garantir la diversité, la pérennité et la résilience de ces milieux et de leurs fonctions essentielles.*

Le PNRZH a peu abordé, et souvent indirectement, les techniques de restauration des zones humides, sujet pris en compte par un autre programme de recherche (Recréer la Nature) du ministère chargé de l'Environnement et connaissant un fort engouement à l'échelon international. Nombre de résultats incitent à la prudence en matière de restauration. Ainsi, les anciens bras fluviaux sont les lieux privilégiés de sédimentation, et des opérations de remise en eau mal conçues peuvent se traduire par une poursuite, voire une accélération de cette évolution, pouvant conduire à la disparition du milieu. Toute opération de restauration doit donc être conduite en pleine conscience de la sensibilité des écosystèmes, et de l'incertitude quant aux effets écologiques des modifications du fonctionnement hydrique.

La gestion des zones humides doit être menée dans un souci d'évaluation constante, permettant de réajuster en permanence les actions entreprises.

Geneviève Barnaud
Présidente du Conseil scientifique du PNRZH



1-Les tourbières

Facteurs essentiels du fonctionnement hydrique

1. Roc'h Ar Feunteun (29)
2. Logné (44)
3. Mathon (50)
4. Sangsurière (50)
5. Landes de Versigny (02)
6. Cessières-Montbavin (02)
7. Marais de la Souche (02)
8. Pradeaux (63)
9. Grand Lemps (38)
10. Col des Saisies (73)

La tourbière de Logné (44), boulaie à laiches
(Betula pubescens, Salix atrocinera, Carex paniculata, Iris pseudacorus).
(Photo A. Laplace-Dolonde)

Problématique

Les tourbières sont des zones humides particulières par leur fonctionnement hydrique et pédologique. L'eau y est présente de façon permanente ; cette hydromorphie se double souvent d'un très faible niveau d'oxygénation. Dans ces conditions, la majorité des processus pédologiques de transformation des composés organiques d'origine végétale sont perturbés. La conséquence en est une accumulation de la tourbe, matière organique non minéralisée.

Les tourbières constituent des milieux naturels remarquables tant par leur richesse écologique que par leur fragilité. Elles ont, à ce titre, fait l'objet de nombreuses études permettant d'apprécier leur diversité floristique et faunistique.

Malgré son rôle écologique majeur, le fonctionnement hydrique des tourbières est resté quelque peu méconnu. En Europe occidentale, les études développées sur cette thématique, surtout au milieu du XXe siècle, avaient pour objectif principal de mettre au point des techniques efficaces de drainage en vue d'une mise en valeur agricole de l'espace.

La préservation de leur valeur écologique, aujourd'hui reconnue, exige un accroissement significatif des connaissances sur leur hydrologie.

Photo A. Laplace-Dolonde

Les Saisies : Tourbières sur tremblants à *Carex rostrata* près d'un chenal d'écoulement à *Menyanthes Trifoliata.* Au fond bois d'épiceas à sphaignes et pessières à airelles.

Présentation de la recherche

La recherche a porté sur 10 tourbières réparties dans plusieurs régions françaises.

Ces sites ont été étudiés sous plusieurs angles complémentaires :

- fonctionnement hydrologique ;
- végétation et sols (voir cahier inventaire) ;
- typologie (voir cahier inventaire) ;
- flux géochimiques (voir fiches n°2 et 8) ;
- socio-économie.

L'objectif de la recherche était d'offrir aux gestionnaires des outils permettant de mieux caractériser et gérer les sites dont ils ont la charge.
En matière d'eau, la recherche a permis de mieux comprendre les facteurs essentiels qui contrôlent le fonctionnement hydrologique du milieu.

Le cadre géologique

La connaissance de la géologie et de la géomorphologie locale est indispensable à la compréhension du fonctionnement hydrologique des tourbières.

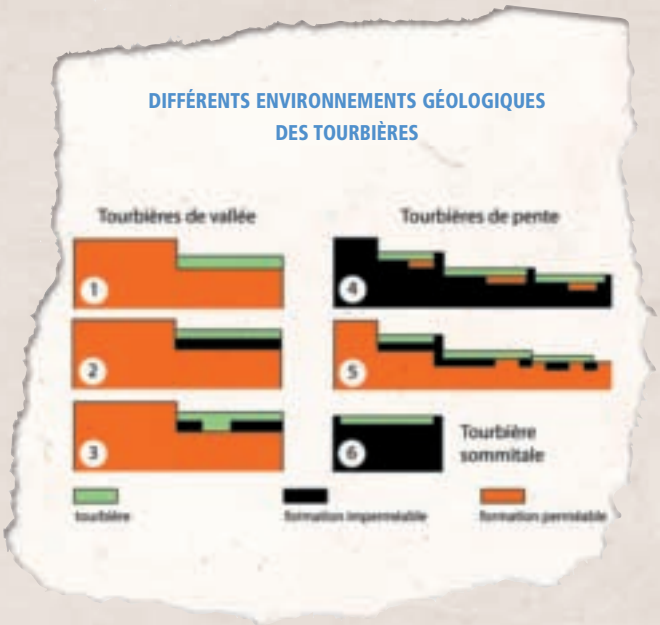
UN ÉLÉMENT NÉCESSAIRE : LA PRÉSENCE D'UN SEUIL

Les tourbières peuvent exister dans des situations très diversifiées, mais l'existence d'un seuil retenant l'eau dans une dépression constitue une condition sine qua non à la naissance et à la présence de ce type de zone humide.
Même dans les tourbières de pente, on constate la présence de dépressions et de verrous dans la pente, formant autant de tourbières distinctes et étagées (voir schéma ci-après).
Les seuils sont constitués de matériaux plus ou moins imperméables, et de natures diverses : roche massive, colluvions, bouchons estuariens, moraine…
La topographie du substratum est donc très importante, en plaine comme en montagne, par la formation de microbassins versants qui ne sont pas forcément visibles, car masqués par la tourbe.
Dans les tourbières situées en bordure de lacs ou de rivière, les niveaux d'eau ne sont pas contrôlés directement par un seuil, mais par le niveau du plan d'eau.

LA PERMÉABILITÉ DE L'ENVIRONNEMENT GÉOLOGIQUE DE LA TOURBIÈRE

Un autre facteur de contrôle fonctionnel est la nature géologique des formations autour et sous la tourbière. Leur plus ou moins grande perméabilité conditionne leur capacité aquifère. Les tourbières peuvent, selon les cas, être situées dans un contexte totalement imperméable, ou connaître des situations permettant des échanges d'eau souterraine avec l'aquifère environnant.

DIFFÉRENTS ENVIRONNEMENTS GÉOLOGIQUES DES TOURBIÈRES



L'alimentation en eau des tourbières

La tourbe est un matériau de porosité variable. Cependant, même dans le cas d'une forte porosité, elle peut être peu perméable, et l'eau qui y est stockée connaît un renouvellement très lent. Cela ne signifie pas que la tourbière constitue un milieu déconnecté de son environnement hydrique. Les apports sont nécessaires à l'alimentation d'une végétation hygrophile. L'eau contenue dans la tourbe est en relation de pression avec l'aquifère et les niveaux d'eau libre proches.

LES PRÉCIPITATIONS : UNE EAU ABONDANTE, SAUF EN PLAINE

La combinaison de la pluviométrie et des températures définit une gamme de conditions propices à l'installation et au maintien des divers types de tourbières. L'étude du déficit hydrique estival permet de distinguer deux situations :

Précipitations annuelles (P) > à 1000 mm, sans période de déficit hydrique. Deux catégories peuvent être distinguées selon les caractéristiques hivernales :

- montagnarde, hiver rude, saison végétative courte et arrosée ;
- océanique, hiver doux, saison végétative longue, pluies régulières ou léger creux estival sans vrai déficit.

(P) < 1000 mm une (ou des) période(s) de déficit hydrique.
Deux catégories de tourbières sont reconnues en fonction de leur aptitude à résister à la sécheresse :

- grandes tourbières, forte capacité de rétention d'eau et de résistance au stress hydrique ;
- petites tourbières, faible capacité de rétention et de résistance.

De façon générale, les tourbières sommitales, bombées ou de pente présentent une situation excédentaire en eau (précipitations>évapotranspiration entre avril et septembre). La plupart des tourbières de vallées connaît un déficit relatif, compensé par les apports souterrains (ou les pluies du début de printemps).

LES APPORTS D'EAU SOUTERRAINE : UN RÔLE IMPORTANT DANS LES VALLÉES

L'un des acquis majeurs du PNRZH a été la mise en évidence de l'importance des apports souterrains dans l'alimentation en eau de nombreuses tourbières, surtout situées dans les vallées.
Sous la tourbe, le substrat est parfois imperméable ; c'est le cas dans les tourbières sommitales et dans la plupart des tourbières de pente.
Cependant, dans de nombreux cas, il existe sous la tourbe un substrat perméable qui accueille une nappe. Cette nappe peut alimenter en eau la tourbière, soit de façon gravitaire (par les versants), soit par drainance ascendante (cas d'une nappe en charge). Dans ce dernier cas, l'eau de la nappe peut remonter par des sources dans la tourbière ("plongs"), avant d'alimenter le réseau superficiel.
Certaines tourbières sont alimentées par des sources à leur contact avec le versant. C'est le cas du Grand Lemps en Isère .
Les *écoulements hypodermiques* constituent des apports des versants en sub-surface ; il s'agit d'apports de courte durée (liés aux pluies), avec des débits limités.

L'EAU SUPERFICIELLE : ALIMENTATION OU DRAINAGE

Les apports en eau superficielle peuvent être de plusieurs natures. Le réseau hydrographique peut alimenter la tourbière, soit de façon permanente (infiltration), soit de façon temporaire (inondations) ; cette alimentation est relativement limitée, ou du moins assez peu répandue. Le réseau hydrographique est important pour son rôle de niveau de base de l'eau du massif de tourbe ; son abaissement entraine le drainage de la tourbière.

DES RELATIONS COMPLEXES

Ces différentes alimentations ont naturellement des relations importantes et complexes.

L'eau qui coule à l'exutoire ne provient pas forcément de la tourbière mais éventuellement d'un aquifère sous-jacent à identifier. Dans ce domaine, la conductivité électrique de l'eau apparaît comme un bon indicateur de l'origine de l'eau.
La mise en place d'un suivi ou d'une gestion suppose que l'on appréhende bien les relations entre ces différents flux.

LA PLACE DE LA TOURBIÈRE DANS LE BASSIN VERSANT

Il est important de replacer la tourbière dans son bassin versant, qui peut être décomposé en deux bassins superposés de superficie parfois différente :

- bassin versant topographique : écoulement des eaux de surface vers la tourbière ;
- bassin versant hydrogéologique : écoulement des eaux souterraines vers la tourbière.

Les bassins versants des tourbières sommitales sont réduits, ceux des tourbières de pente beaucoup moins vastes que ceux des tourbières localisées en fond de vallée.
Les activités humaines sur l'ensemble du bassin versant ont des impacts sur la tourbière, en particulier en matière de qualité des eaux.

La circulation des eaux dans les tourbières

LES ÉCOULEMENTS SUPERFICIELS

Le réseau hydrographique de surface peut se composer de plusieurs éléments :

- la tourbière peut être ponctuée de plans d'eau naturels : lacs, ancien méandre fluvial... et peut également être traversée par une rivière ;
- les écoulements temporaires peuvent être importants et se manifestent sous forme de ruissellement vers les points bas topographiques ;
- les fossés peuvent être nombreux ; leur rôle n'est pas toujours facile à déterminer. En fonction de la pente de la nappe, un même fossé peut être situé plus bas (drain véritable) ou plus haut que la nappe.

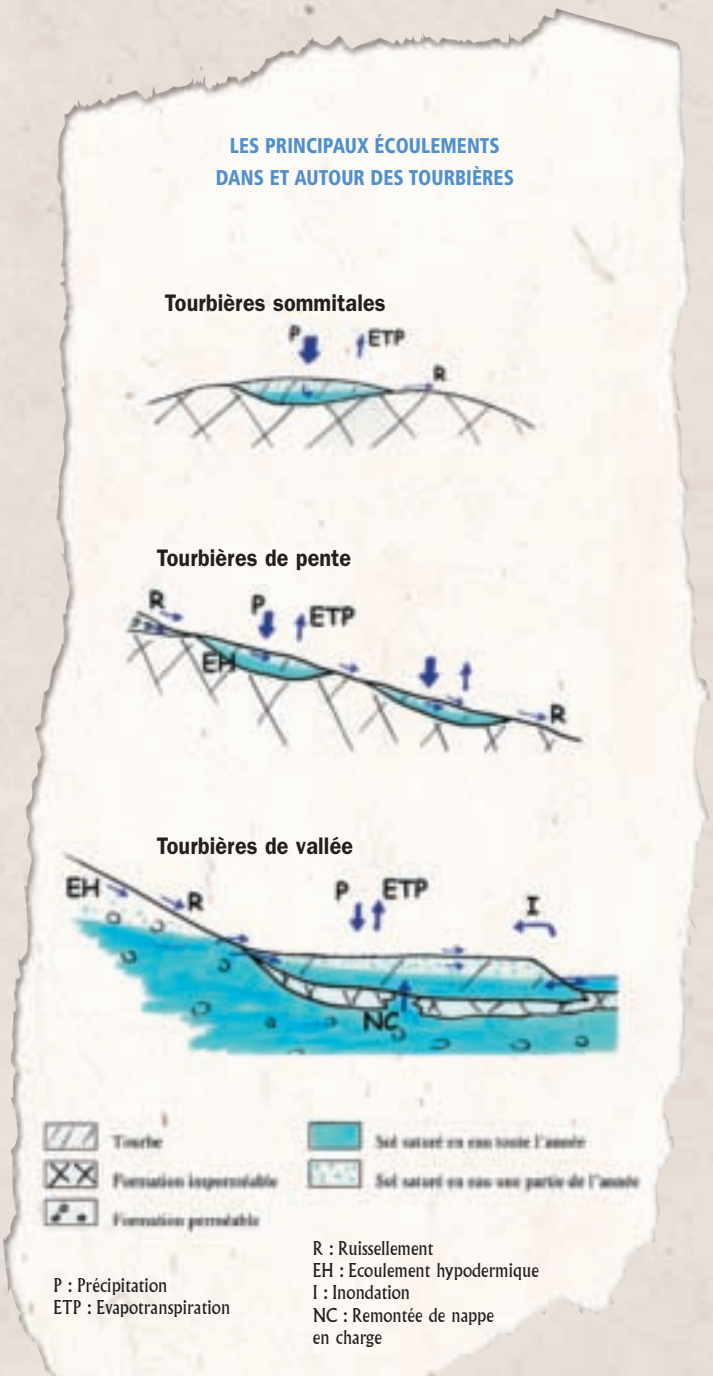
LES ECOULEMENTS SOUTERRAINS : DES DÉBITS LIMITÉS

Les circulations d'eau dans le massif de tourbe sont faibles, mais non nulles.

Des *écoulements hypodermiques* peuvent se mettre en place lors des pluies, dans les tourbières de pente, comme de vallées, mettant en exergue le rôle de la microtopographie de surface.

Des *"chenaux"* plus perméables existent au sein de la tourbière et constituent des axes privilégiés de circulation des eaux. La localisation de ces chenaux est délicate.

LES PRINCIPAUX ÉCOULEMENTS DANS ET AUTOUR DES TOURBIÈRES



LES VARIATIONS DES TENEURS EN EAU DANS LES TOURBIÈRES

Des sols gorgés d'eau

Le stockage de l'eau dans les sols tourbeux est, sous tous les climats, considérable, comme le montrent les données des Saisies (SA), de Logné (LO), et de la Sangsurière (SS).

Volume d'eau stocké dans 3 tourbières

	SA	LO	SS
Type de tourbières	**De pente**	**De dépression**	**De vallée**
Volume de tourbe (Mm3)	304	3 000	48 000
Volume d'eau (Mm3)	263	2 595	41 520
Eau en % du volume de la tourbe	87	86,5	86,5

Des conséquences sur les débits à relativiser

Les tourbières sont gorgées d'eau, mais il s'agit surtout d'eau piégée et peu renouvelée. Ainsi, les eaux des tourbières sont parfois dépourvues de Tritium, ce qui signifie qu'elles datent d'avant 1945 (premières explosions nucléaires atmosphériques).

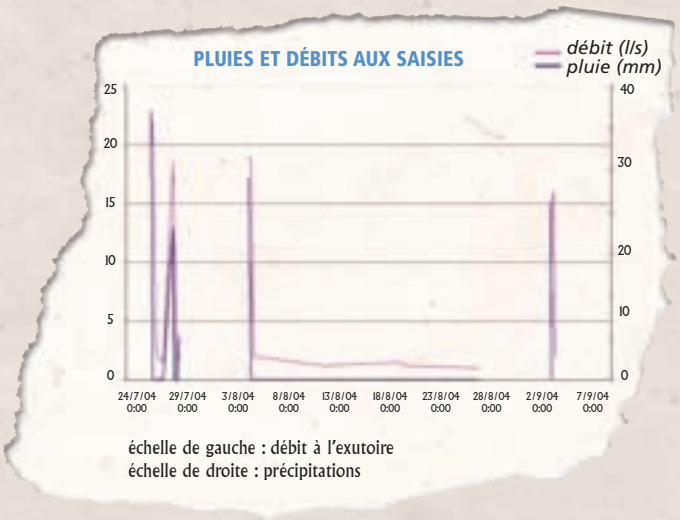
Dans les tourbières, comme dans n'importe quel sol, l'eau est globalement présente sous trois formes : une forme libre ("eau gravitaire") qui circule dans les vides, à la fois verticalement et obliquement, susceptible de participer à des échanges avec le bassin versant et/ou avec la nappe, une forme retenue ("eau utile"), dont une partie est absorbable par les racines et l'autre pas, et une forme piégée, liée aux végétaux et à leurs résidus tourbifiés ("eau de constitution").
Une tourbe considérée comme "reessuyée", c'est à dire non susceptible d'assèchement par voie gravitaire, conserve encore 70 à 80% d'humidité.

Le pourcentage d'eau susceptible d'être restitué au bassin versant, est de l'ordre de 25 à 30% du volume du sol, soit 250 à 300 mm d'eau par mètre de sol.

Les mécanismes de stockage et déstockage sont la conséquence des variations de niveau liées tout particulièrement aux pluies. En cas de pluie, le comportement de la tourbière varie en fonction de sa position dans le paysage et bien évidemment de son état hydrique.

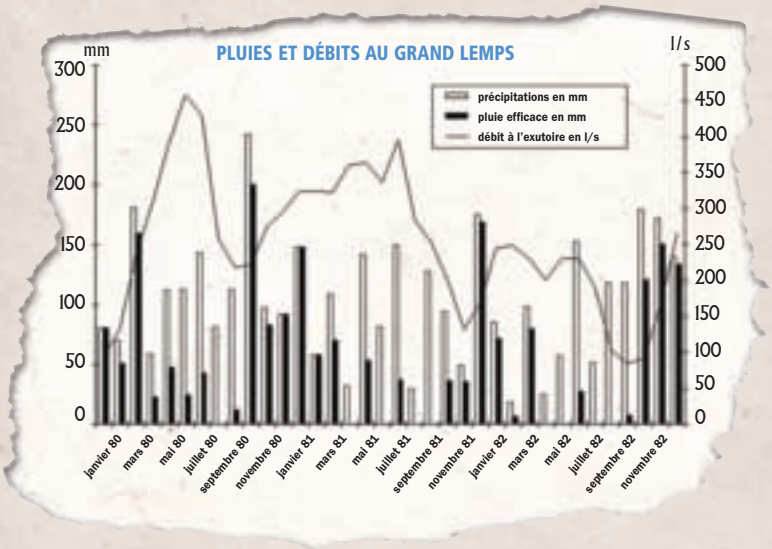
L'influence de la position de la tourbière dans le bassin versant

Dans les ruisseaux des tourbières de pentes, comme celles des Saisies, les variations de niveaux d'eau sont le plus souvent fortes et rapides. Les pluies provoquent des ruissellements à la surface de la tourbière, se traduisant par une augmentation rapide et de courte durée du débit à l'exutoire. Le volume d'eau reçu est souvent restitué rapidement au réseau hydrographique.



échelle de gauche : débit à l'exutoire
échelle de droite : précipitations

Dans les tourbières de vallée, les flux d'eau connaissent généralement des fluctuations plus faibles et plus régulières (périodes de hautes et basses eaux), liées au rôle des apports phréatiques. Les pluies peuvent provoquer un relèvement des niveaux d'eau dans la tourbière, mais l'augmentation du débit à l'exutoire est limitée.



Influence de la structure de la tourbe

Les sols, même lorsqu'ils sont gorgés d'eau ("saturés"), peuvent encore absorber de l'eau si :

- il existe, au sein de la tourbe, des niveaux très fluides tels des poches de vase pouvant accumuler de l'eau ;
- la structure du sol laisse aux fibres et à la matière organique la possibilité de gonfler.

Au total, une faible fonction de stockage "actif"

Les tourbières ont généralement peu d'impact sur le régime des eaux et la régulation des crues en particulier. Cette situation résulte de deux causes complémentaires :

- elles se trouvent fréquemment en tête de bassin versant et représentent des superficies relativement faibles ;
- les volumes d'eau stockables ou destockables, correspondant à l'eau gravitaire, ne dépassent pas 30 % du volume total de la tourbière.

Toutefois, à l'échelle d'un bassin versant, l'effet cumulé de nombreuses tourbières sur les débits est sans doute notable, surtout en comparaison avec d'autres formes d'occupation du sol.
Par ailleurs, les grandes tourbières situées dans le lit majeur de fleuves peuvent jouer un rôle réel d'écrêtement lors des crues.

Les tourbières, des milieux en évolution

Différents mécanismes modifient, au cours du temps, la nature et le fonctionnement hydrique des tourbières.

MODIFICATION DU NIVEAU DU SEUIL

La position des seuils peut avoir évoluée au cours de l'histoire, par relèvement lié à l'accumulation de matériaux (solifluxion, moraines), action tectonique, ou abaissement par érosion… Ces évolutions permettent de comprendre les caractères actuels des tourbières.

DYNAMIQUE DU MILIEU

La végétation connaît une évolution spontanée, en relation directe avec le fonctionnement hydrique du milieu.
Le premier mécanisme est l'accumulation de tourbe.
La vitesse de tourbification est de 2 à 5 centimètres par siècle pour les sphaignes (et les radeaux),
de 0,5 à 2 cm/siècle dans les tourbières à laîches (*Carex*) et autres cypéracées, dont la décomposition est plus rapide que celle des sphaignes.

Les tourbières jeunes sont très liées aux apports d'eau du bassin versant (stade géotrophe). Cette eau est plus ou moins chargée en matières nutritives suivant la nature de la roche. Le chimisme des eaux et le cycle hydrique imposent la vitesse de tourbification via les espèces végétales constructives.

Au cours de leur développement, les niveaux supérieurs du sol de certaines tourbières peuvent se trouver progressivement isolés des eaux inférieures. Alimentées principalement par la pluie, elles deviennent oligotrophes et acides (stade ombrotrophe). L'arrivée des sphaignes accélère le processus d'ombrotrophisation ; ce processus est inachevé dans de nombreuses tourbières et peut être bloqué.

Un second phénomène est le développement d'arbustes puis d'arbres dans les tourbières, qui s'inscrit dans un processus évolutif naturel, celui des successions végétales. Ce type d'évolution est favorisé par les activités humaines (drainage, eutrophisation...).

IMPACT DES ACTIVITÉS HUMAINES

Le fonctionnement hydrique des tourbières est très influencé par certaines activités humaines qui peuvent conduire à des modifications, parfois irréversibles, du fonctionnement de la tourbière.

Les activités agricoles ou sylvicoles ont souvent motivé le drainage des tourbières.
L'impact des drains est très variable. Il est particulièrement fort lorsque le drainage affecte les formations perméables situées sous la tourbière. Dans la tourbe elle-même, l'effet du drainage est généralement limité, du fait de la faible perméabilité des sols.
Pour cette raison, en l'absence d'interventions connexes, tels des retournements des sols pour ensemencement, l'impact du drainage semble réversible à moyen terme. De nombreuses opérations de restauration de tourbières, par simple rebouchage des drains, en témoignent.

Certains impacts des activités humaines sont plus indirects et difficiles à évaluer : augmentation de l'évapotranspiration en cas de plantation d'arbres, modifications physico-chimiques des eaux (eutrophisation...).

Limites et perspectives

Le PNRZH, à partir de sites largement répartis en France et couvrant une grande gamme de situation (à l'exception de quelques types, tels les tourbières de haute montagne et les tuffières), a permis de mieux comprendre le fonctionnement hydrique des tourbières, en particulier de disposer de méthodes permettant de préciser l'origine de l'eau alimentant les tourbières ou de celle s'écoulant à l'exutoire. Il s'agit là d'un point central dans toute entreprise de gestion raisonnée d'une tourbière.

Pour les gestionnaires, il apparait plus que jamais nécessaire de s'intéresser non seulement à la composition végétale des tourbières dont ils ont la charge, mais aussi à leur fonctionnement hydrique. En particulier, il importe de préciser l'alimentation en eau des sites, beaucoup plus complexe et diversifiée que ce que l'on pourrait penser.

En matière de recherche, il s'agit désormais de préciser les connaissances, en particulier en quantifiant les différents flux hydriques entrant et sortant des tourbières. Il sera également important de dépasser l'échelle de la tourbière pour disposer d'une vision à l'échelle du bassin versant.

CONTACTS

CHEF DE PROJET :
Arlette Laplace-Dolonde, Laboratoire Rhodanien de Géographie de l'Environnement, Université Lyon II, UMR 5600, 5, avenue Mendès France –69676 Bron cedex.
Tel 04 78 77 31 06,
arlette.laplace-dolonde@univ-lyon2.fr

HYDROLOGIE-HYDRAULIQUE :
Marc Dzikowski,
marc.dzikowski@univ-savoie.fr

ECOLOGIE :
Olivier Manneville, Université de Grenoble,
olivier.manneville@ujf-grenoble.fr

2-Le Carbone dans les tourbières

Un fonctionnement méconnu

1. Roc'h ar Feunteun (29)
Buttes à shaignes, tapis de scirpes
2. Sangsurière (50)
T. à sphaignes et molinies
3. Landemarais (35)
Tourbière bombée à shaignes et callunes, groupement de bas-marais
4. Cessières-Montbavin (02)
T. à sphaignes, T. alcaline à *Cladium/Phragmites*
5. Vesles et Caumont (02)
T. alcaline à *Cladium/Phragmites*, Stade à *Schoenus nigricans*
6. Pradeaux (63)
Gouilles, bas-marais et buttes à sphaignes
7. Grand Lemps (38)
Tapis de sphaignes, T. alcaline à *Cladium/Phragmites*
8. Les Saisies (73)
Gouilles, bas-marais et buttes à sphaignes

Panorama de la tourbière du Grand Lemps. Au premier plan, la caricaie, l'étang et le radeau à sphaignes, au fond les collines de moraines fluvio-glaciaires
(Photo A. Laplace-Dolonde)

Problématique

Dans les tourbières fonctionnelles, la matière organique produite par les végétaux ne subit pas une minéralisation complète. Il en résulte un piégeage du carbone, estimé à 80 mégatonnes de carbone par an à l'échelle mondiale. Cette fonction ne peut pas être négligée dans une période où l'augmentation des gaz à effet de serre, dont le gaz carbonique, constitue un problème planétaire.
Cette fonction connaît une diminution liée à l'artificialisation des tourbières et en particulier leur drainage et leur extraction.
Le cycle du carbone dans les tourbières mérite d'être mieux connu vis-à-vis de la fonction piège, mais aussi parce qu'il conditionne la pérennité même de ces milieux naturels remarquables.

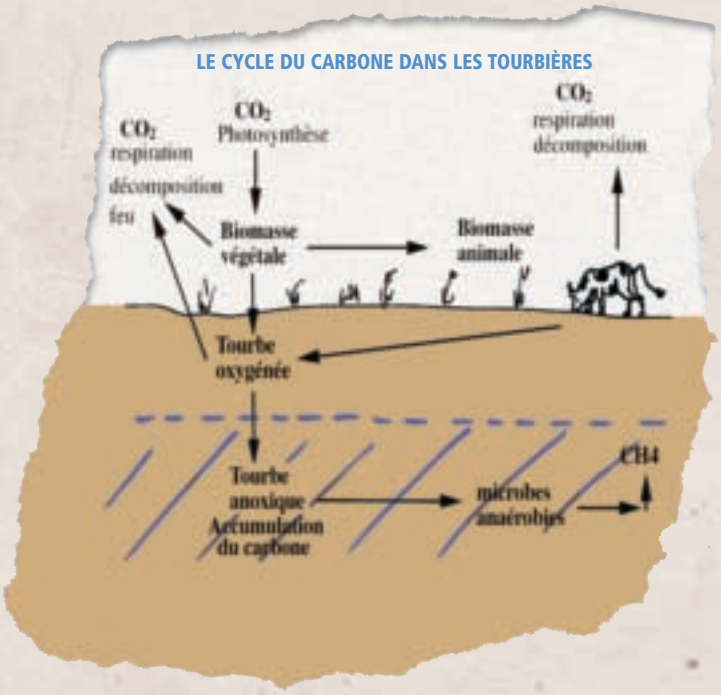
Présentation de la recherche

Dans le cadre du projet tourbières du PNRZH, des études sur les émissions de carbone ont été conduites sur sept sites à régime hydrologique différent.
Le fonctionnement hydrologique de ces tourbières est présenté dans une autre fiche du cahier. (voir fiche n°I)

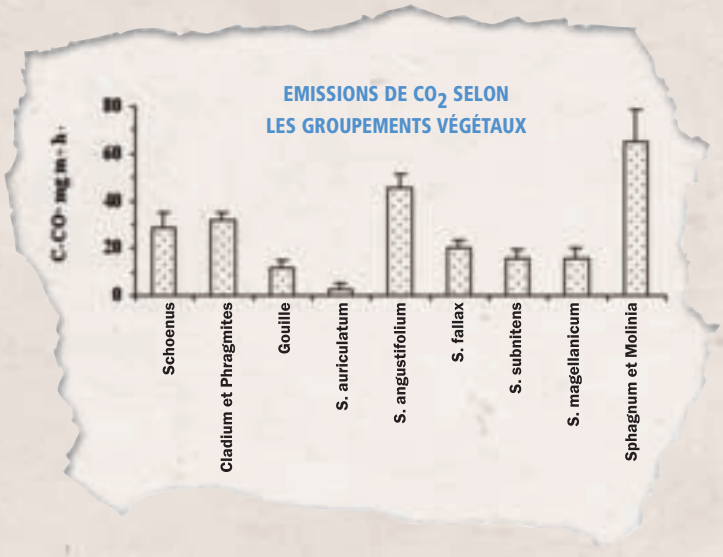
Le cycle du carbone

La végétation capte du carbone dans l'atmosphère (CO_2) par la photosynthèse, et l'intègre dans la matière organique. Dans la plupart des écosystèmes, cette matière organique est décomposée par les micro-organismes des sols à la mort des végétaux, libérant le carbone sous forme de CO_2.
Dans certaines zones humides, et dans les tourbières en particulier, la minéralisation de la matière organique ne peut pas être complète, à cause des conditions défavorables à l'activité microbienne (absence d'oxygène, acidité, oligotrophie, températures souvent peu élevées). Si 90 % environ de la matière organique produite sont décomposés, les 10 % restant sont suffisants pour permettre l'accumulation, en quelques millénaires, de plusieurs mètres de tourbe.

Dans les zones saturées en eau, particulièrement réductrices en raison de la présence de composés carbonés libérés par les végétaux les plus jeunes, on peut parfois observer une production de CH_4 (méthane).



Les résultats montrent que les émissions de carbone varient significativement d'un site à l'autre.
Les émissions de CO_2 sont les plus élevées dans les tourbières alcalines (*Schoenus nigricans*) et les plus faibles dans les tapis de sphaignes.



Les émissions de carbone dans les tourbières

Le méthane (CH_4) est produit en conditions anaérobies ; ses émissions sont les plus fortes lorsque la nappe est proche du sol, dans les gouilles (bas-fonds humides), et les plus faibles dans le biotope à sphaignes et molinies (La Sangsurière).

La recherche a comporté plusieurs volets :

- étude de la variabilité spatio-temporelle des émissions gazeuses de carbone sur tous les sites ;
- variabilité nycthémérale des émissions de CH_4 le long d'un double gradient matière organique/humidité (tourbière des Pradeaux) ;
- bilan de carbone et profils de biomasse/activités microbiennes dans une tourbière restaurée (Landemarais).

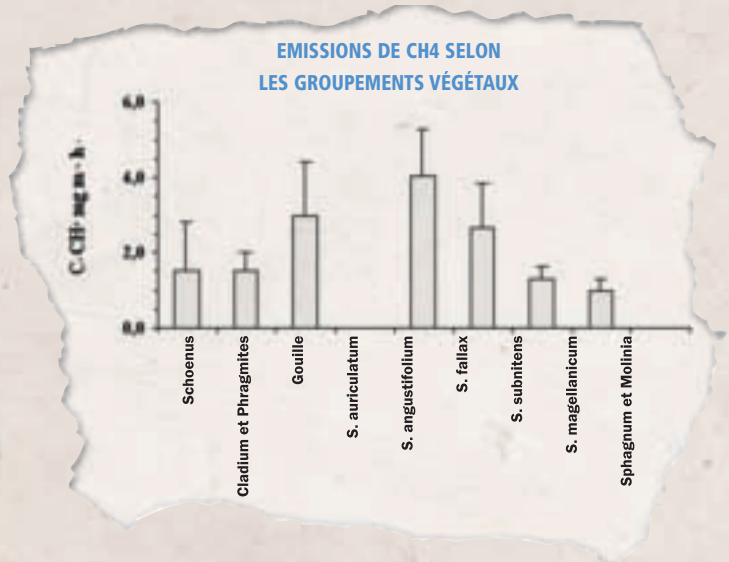


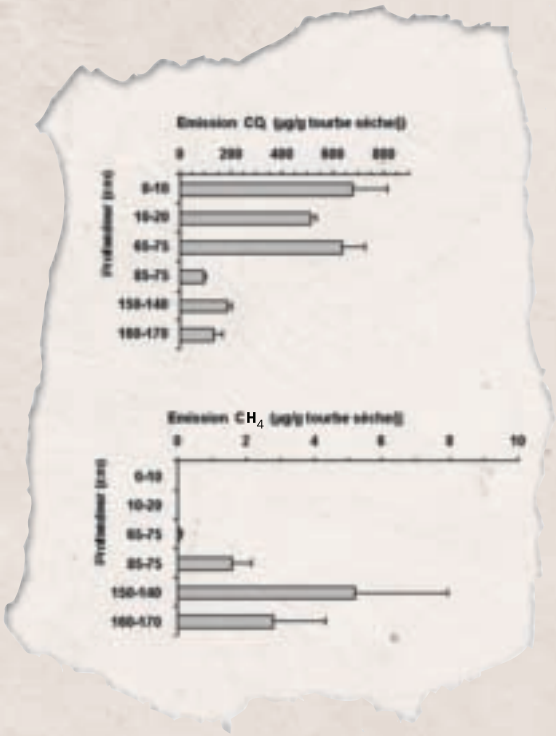
Photo A. Laplace-Dolonde

Mesures des émissions de gaz à la surface de la tourbière des Saisies (73) par A.-J. Francez et N. Josselin, juin 1998.

Les émissions de CO_2 sont les plus faibles en automne ; celles de CH_4 sont maximales au printemps et en été.
Les émissions de CO_2 et CH_4 augmentent avec la température.

Le rapport CH_4 /CO_2 varie entre 0 (émission non significative de méthane à Roc'h ar Feunteun ou la

Sangsurière) à 0,37 (Vesles et Caumont). Il varie fortement dans les sphaignaies selon les espèces et les sites. Ce rapport pourrait constituer un indice intéressant de fonctionnement pouvant être utilisé dans le cadre d'opérations de restauration ; la fonction de "puits", augmente en effet avec cet indice.



Le gaz carbonique est majoritairement émis à la surface du sol, tandis que le méthane est produit dans les horizons inférieurs, hydromorphes (Landemarais).

Des dégradations fréquentes et partiellement réversibles

Le drainage et l'exploitation des tourbières conduisent à une accélération de la minéralisation, et donc à une forte libération de carbone sous forme de CO_2 dans l'atmosphère.
La réhabilitation hydrique des tourbières rend cette dégradation partiellement réversible. Dans les tourbières asséchées, puis remises en eau, on constate, par rapport aux situations témoins, une diminution des émissions de gaz carbonique et une augmentation des émissions de méthane, ce qui indique une reprise des mécanismes fonctionnels propres à l'écosystème tourbière. En quelques années de restauration hydraulique, le processus de tourbification peut être relancé.

Limites et perspectives

Les travaux de recherche ont permis de mieux comprendre le cycle du carbone dans les tourbières, à partir de l'étude de sites très variés sur le plan hydro-écologique. Elles ont en particulier montré la grande variabilité spatio-temporelle des tourbières dans ce domaine.
Ces études complexes ont porté sur les émissions de gaz, et non sur la fonction de piège. Néanmoins, l'étude menée à Landemarais a permis de dresser un bilan entre entrées et sorties de carbone à partir de la mesure de production primaire faite en parallèle (entrée de carbone).
Au total, les résultats présentés soulignent l'importance de la conservation des tourbières dans de bonnes conditions d'hydromorphie pour une accumulation effective du carbone ; l'enjeu en termes quantitatifs se situe naturellement beaucoup plus dans les immenses tourbières boréales que dans nos modestes espaces nationaux.

Enfin, il apparaît que la remise en eau des tourbières peut permettre une restauration du processus de tourbification ; ce processus est toutefois lent.
Ce constat ne peut qu'encourager la généralisation de telles opérations.

CONTACTS

CARBONE :
André-Jean Francez, Université de Rennes 1, UMR-CNRS "Ecobio", Campus de Beaulieu, 35042 Rennes cedex.
andre-Jean.Francez@univ-rennesl.fr

CHEF DE PROJET TOURBIÈRES :
Arlette Laplace-Dolonde, Laboratoire Rhodanien de Géographie de l'Environnement, Université Lyon II, UMR 5600, 5, avenue Mendès France – 69676 Bron cedex. Tel 04 78 77 31 06,
arlette.laplace-dolonde@univ-lyon2.fr

3-Petites zones humides de fond de vallée

Fonctionnement hydrologique

L'un des sites d'étude : le bassin versant du Strang Cau (29). (Photo P. Mérot)

Problématique

Les bassins versants amont de certaines régions vallonnées comptent de nombreuses zones humides peu spectaculaires, généralement localisées dans des points bas topographiques. Ces petits milieux humides, couverts de prairies, représentent individuellement des surfaces généralement modestes, mais dont la mosaïque peut représenter une partie notable de la surface du bassin-versant (de l'ordre de 15 à 20 % en Bretagne).

Ces zones humides assurent des fonctions importantes, en particulier en matière de contrôle des flux de polluants et de nutriments.
Il est apparu nécessaire de mieux connaître le fonctionnement hydrologique qui conditionne les flux d'eau et d'éléments chimiques dans ces zones humides. Cette compréhension s'avère cruciale dans les régions agricoles subissant une eutrophisation généralisée des eaux.

Présentation de la recherche

Six petits bassins versants du Massif Armoricain, comportant chacun plusieurs petites zones humides de fond de vallée, ont fait l'objet d'études approfondies.
L'objectif majeur des recherches initiées par le PNRZH était d'aboutir à la compréhension du rôle de ces zones humides vis-à-vis d'éléments nutritifs et de polluants associés aux productions animales. (fiche n°8)

Pour atteindre cet objectif, il importait d'aborder l'analyse de toutes les composantes du milieu qui contribuent aux flux et variations de flux des éléments chimiques dans les agro-écosystèmes. Il s'agit de l'hydrologie, la pédologie, l'écologie et la connaissance des exploitations agricoles et de leurs pratiques. Cette fiche traite essentiellement du premier de ces sujets.

Le milieu naturel : des prairies humides dans des fonds de vallées

PRÉSENTATION

Ces zones humides, souvent couvertes de prairies hygrophiles, plus rarement de ripisylves, sont caractérisées par la présence saisonnière, généralement de décembre à mars, d'une nappe libre, à faible profondeur et peu fluctuante (0-30 cm). Le reste de l'année, le niveau de cette nappe est variable selon les contextes. Elle reste le plus souvent assez proche de la surface du sol, à une profondeur de l'ordre du mètre.

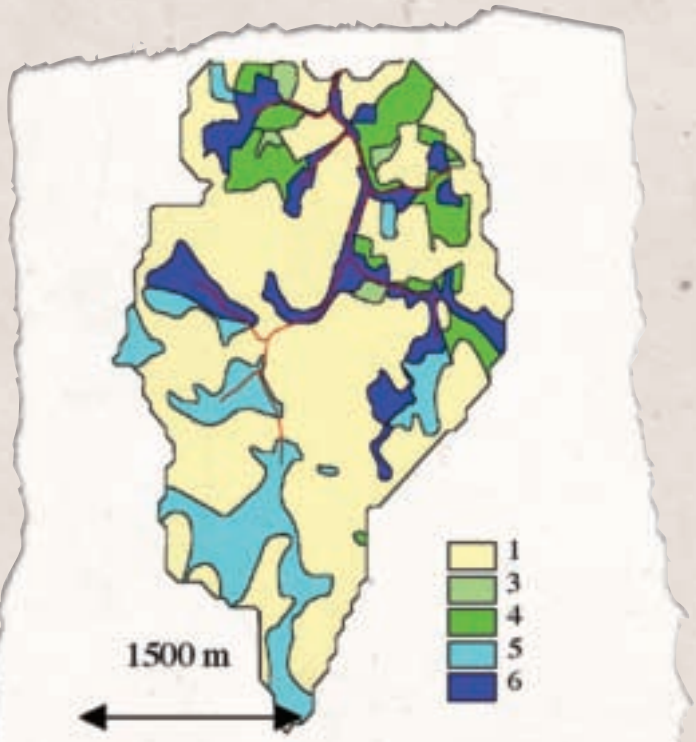
LE CADRE GÉOLOGIQUE

Le Massif Armoricain comporte des substratum granitiques et schisteux surmontés de couches d'altération d'épaisseur variable. Ces altérites présentent une faible porosité et une relativement faible perméabilité, ce qui conduit à leur rapide saturation.
La fraction drainée des précipitations s'infiltre et percole verticalement dans les sols et les altérites, jusqu'à la nappe. Elle s'écoule ensuite latéralement dans la nappe, convergeant

vers les points bas topographiques. La nappe affleure ainsi en bas de versant pour constituer de petites zones humides.

La répartition des zones humides : une mosaïque

Les zones humides ne sont pas réparties uniformément dans l'espace. Plusieurs facteurs favorisent leur présence.



Carte d'hydromorphie d'un bassin versant de Pleine Fougères (35), selon la méthode "tarière". Cette méthode, mise au point par J. M. Rivière (ENSA Rennes) permet la cartographie et la reconnaissance des sols à partir de 4 critères : le substrat (matériau géologique), le degré d'hydromorphie, le développement de profil, la profondeur. Pour chaque critère un nombre limité de types, codifiés, est identifié. La charge en cailloux est un critère additionnel, utilisé si besoin.
Les zones humides correspondent aux intensités d'hydromorphie 5 et 6 (hydromorphie marquée dès la surface du sol, indiquant la présence continue dans le temps d'une nappe affleurant à la surface du sol).

Surface de l'aire drainée et pente locale

Les zones humides sont d'autant plus abondantes que leur surface d'alimentation (aire drainée) est grande et que la pente est faible, limitant les possibilités d'un drainage naturel des eaux.

Nature et caractéristiques du substrat

La perméabilité du sol et du sous-sol, c'est à dire la propriété qu'a le milieu à se laisser traverser plus ou moins facilement par de l'eau est un second paramètre important conditionnant le développement d'une zone humide. Dans le cas des zones humides étudiées dans le Massif Armoricain, il existe un gradient décroissant de perméabilité :

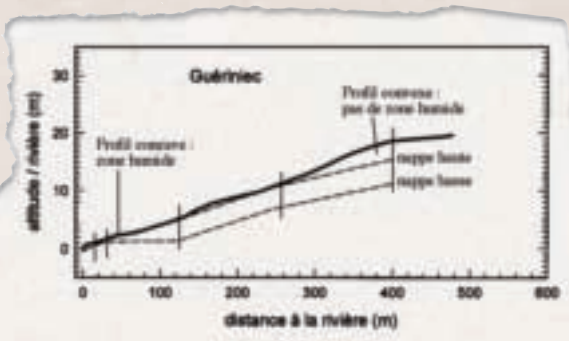
- granite;
- schistes et limons;
- micaschistes.

Profondeur et caractéristiques des altérites

Les altérites, issues de l'altération du substratum, sont en général peu perméables et de faible porosité. Elles se saturent rapidement avec les eaux qui s'infiltrent dans le sol. Lorsque le sol est peu épais (inférieur à un mètre), que les altérites sont peu épaisses (de quelques mètres), les eaux réhumectent facilement le sol, puis saturent rapidement les altérites, et permettent ainsi à la nappe d'affleurer.

Profils topographiques des versants

Les versants ou les fonds de vallons peuvent être plus ou moins propices à l'affleurement de la nappe. Les profils convexes favorisent des évacuations rapides de l'eau alors que les profils concaves favorisent les affleurements de nappe en bas de pentes.



Localisation des zones humides sur le profil en long d'un versant

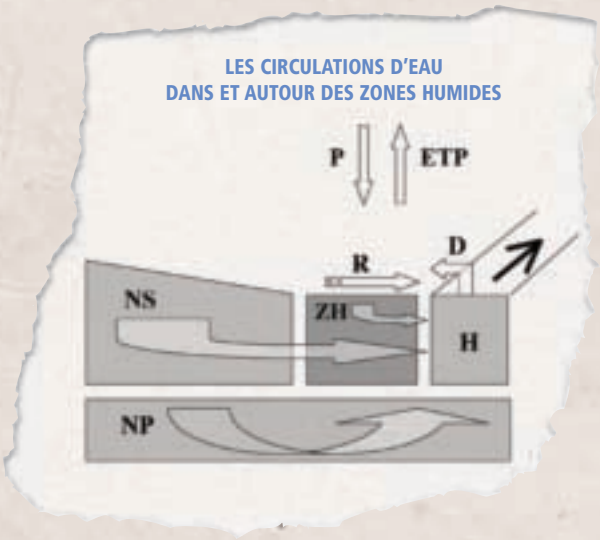
Les profils rectilignes (pas de creux ni de bosses) peuvent donner naissance à des zones humides réparties tout au long du versant.

Alimentation en eau et rythmes hydrologiques

Ces zones humides présentent différentes fonctions hydrologiques qui varient dans l'espace et le temps.

L'ALIMENTATION EN EAU

Ces petites zones humides sont alimentées par des eaux de quatre origines (voir schéma page suivante) : précipitations, ruissellement du versant, nappe (zone humide, versant en distinguant une fraction superficielle et profonde dans la nappe), réseau hydrographique. Cette distinction est nécessaire car ces eaux peuvent présenter des compositions chimiques et des modes d'alimentation très différents.



ZH : Zone humide
P : Précipitations
ETP : Evapotranspiration
R : Ruissellement (eau de pluie et exfiltration)
NS : Ecoulement de nappe : nappe superficielle de versant
NP : Nappe profonde
D : Ecoulement par débordement dans le réseau hydrographique
H : Ecoulement dans le réseau hydrographique

L'eau provenant des versants

Les flux qui en proviennent provoquent la saturation saisonnière des zones humides. Ces flux sont soit superficiels (pluie, ruissellement) soit souterrains (sol, nappe).
La nappe profonde peut assurer 20 à 25 % de l'alimentation de ces zones humides en s'écoulant à travers les fissures dans les schistes par exemple. Dans certains cas, l'écoulement peut, au contraire, avoir lieu en sens inverse, depuis la zone humide vers le substratum fissuré.
La zone humide contribue alors à assurer une alimentation de la nappe.

L'eau provenant du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique a une double influence.
Il impose le niveau de base de la nappe. Il peut, dans certaines situations, alimenter la zone humide par inondation.
Plus le cours d'eau est important (ordre 3 et plus), plus son rôle dans le fonctionnement de la zone humide est important en comparaison de celui des versants.

Le rôle important du battement des nappes

Les niveaux des nappes dans les versants varient fortement entre l'hiver et l'été ; ils contrôlent l'alimentation en eau et en éléments chimiques des zones humides. Ces variations saisonnières peuvent être de l'ordre d'une dizaine de mètres dans le versant, alors qu'elles ne sont que de l'ordre du mètre en aval.

Durant chacune de ces deux périodes, la réaction de la nappe aux précipitations est très différente. En hiver, la nappe réagit très vite aux pluies, parce que les sols sont déjà gorgés d'eau. En été, par contre, le sol doit se saturer en eau avant que la nappe ne remonte à la surface. En hiver, ces variations du niveau des nappes liées aux pluies sont très marquées sur le versant et peu marquées dans la zone humide, la nappe affleurante ou très proche de la surface.

Les fonctions hydrologiques : des lieux de stockage et de transfert de l'eau

Ces zones humides assurent deux fonctions hydrologiques majeures : le stockage-déstockage et le transfert de l'eau (et d'éléments nutritifs et/ou de polluants associés).

Fonction de stockage-déstockage

Transversal

La zone humide est un lieu de stockage de l'eau provenant du versant (nappe, ruissellement). Cette fonction dépend, d'une part, de la continuité hydraulique entre les écoulements provenant du versant et la zone humide, et, d'autre part, du rapport du volume de la zone humide au volume de l'eau susceptible d'être collectée sur le versant. Ce rapport est en général faible. La zone humide a donc un rôle de stockage de l'eau tout à fait temporaire, qui contribue à moduler la reprise des écoulements hivernaux.

Longitudinal

La zone humide est aussi un lieu de stockage de l'eau provenant de la rivière par débordement. Cette fonction dépend de la fréquence des crues inondantes et de la topographie des lits moyens et des lits majeurs. Le volume d'eau stockée est également faible, du fait de la petite taille des zones humides. Cette fonction n'est réellement active que pour les bassins versants de taille importante où les zones inondables peuvent avoir une grande extension.

Fonction de transfert

La zone humide est surtout une zone de transfert où se côtoient différents types d'écoulement :

- le ruissellement, comprenant le ruissellement sensu stricto et l'exfiltration, écoulements rapides intervenant à l'échelle de la crue ;
- l'infiltration et l'écoulement dans la zone humide, intervenant également à l'échelle de la crue ;
- l'écoulement de la nappe de versant dont la composition chimique et la vitesse peut varier suivant

la profondeur. L'écoulement est plus rapide dans les horizons pédologiques que dans les substrats (dans le bassin de Naizin-Kervidy, respectivement 1 et 0,5 m/jour);
• l'écoulement à surface libre dans le réseau hydrographique, écoulement rapide et concentré, très variable selon que l'on se situe en période de crue ou non;
• l'écoulement de surface en période d'inondation.

L'importance relative de ces différents types de transferts varie dans le temps et dans l'espace. Le stockage transversal, dont le rôle fonctionnel est plus important dans les bassins versants d'ordre 1 que dans ceux d'ordre 3, intervient surtout en début de période pluvieuse. Une fois achevé le remplissage de la zone humide, la nappe affleure et fluctue peu. La zone humide assure alors surtout une fonction de transfert.
Pour les bassins versants d'ordre supérieur à 3, la fonction de stockage transversal est souvent remplacée par la fonction de stockage longitudinal, ou plus généralement, par des échanges directs entre la nappe profonde et la rivière.

Limites et perspectives

Ces études ont été conduites dans le Massif Armoricain. La transposition des résultats à l'ensemble des zones humides en tête des bassins versants reste à analyser en détail. En effet si les quantifications des surfaces de versant et des pentes ne posent aucun problème, les substratum et leurs altérites peuvent être très différents de ceux du Massif Armoricain. On peut ainsi être conduit à imaginer que, dans d'autres situations, d'autres facteurs pourraient être pris en compte. C'est notamment le cas des tourbières de fond de vallée, telles que celles étudiées dans le cadre du PNRZH (voir fiche n°1).

Les projets du PNRZH ont permis de dégager des informations généralisables sur le thème des petites zones humides de fond de vallée.
En matière de régime hydrologique les recherches initiées ont permis d'approfondir nos connaissances sur le rôle, limité, de ces zones humides en matière de régulation des débits : les capacités de stockage de ces zones sont généralement faibles, ce qui limite les possibilités de soutien des étiages et d'écrêtement des crues. De plus, le drainage agricole de ces zones humides diminue de façon significative leur rôle de tampon hydrologique. Les chercheurs ont montré que la seule réduction du diamètre des buses qui rejoignent les drains serait insuffisante pour restaurer ce rôle ; un traitement d'ensemble de l'espace, visant à augmenter l'effet de frein de la végétation ou du relief, s'avère nécessaire.

Les connaissances acquises sur le fonctionnement hydrologique ont été particulièrement utiles pour analyser et prévoir le rôle de ces zones humides dans la rétention ou les transformations physico-chimiques des polluants et fertilisants azotés (fiches n°4 et 8). Seuls certains types et régimes d'écoulement peuvent influencer de manière significative les flux de polluants. Ce sont les régimes hydrologiques correspondant à des crues modérées et régulières, permettant l'alternance d'une alimentation de la zone humide par le versant et son renouvellement progressif, qui sont le plus à même de jouer un rôle régulateur des polluants et fertilisants azotés.

Les analyses conceptuelles ont permis de définir, pour chaque fonction inventoriée (régulation de l'azote en particulier), dans chaque zone humide étudiée, les fonctionnalités de ces petites zones humides de fond de vallée.

Ces recherches ont permis de proposer une typologie des zones humides ripariennes, en trois niveaux emboîtés :
• zone humide potentielle, enveloppe considérée comme favorable à la présence de zones humides à partir d'indicateurs simples (ici, aire drainée, pente, pluviométrie et géologie);
• zone humide effective, pour laquelle la présence d'une nappe affleurant est avérée;
• zone humide efficace par rapport à une fonction donnée (stockage, dénitrification), dont le fonctionnement est quantifié.

Cette approche sera présentée en détail dans le cahier "Inventaire" du PNRZH.

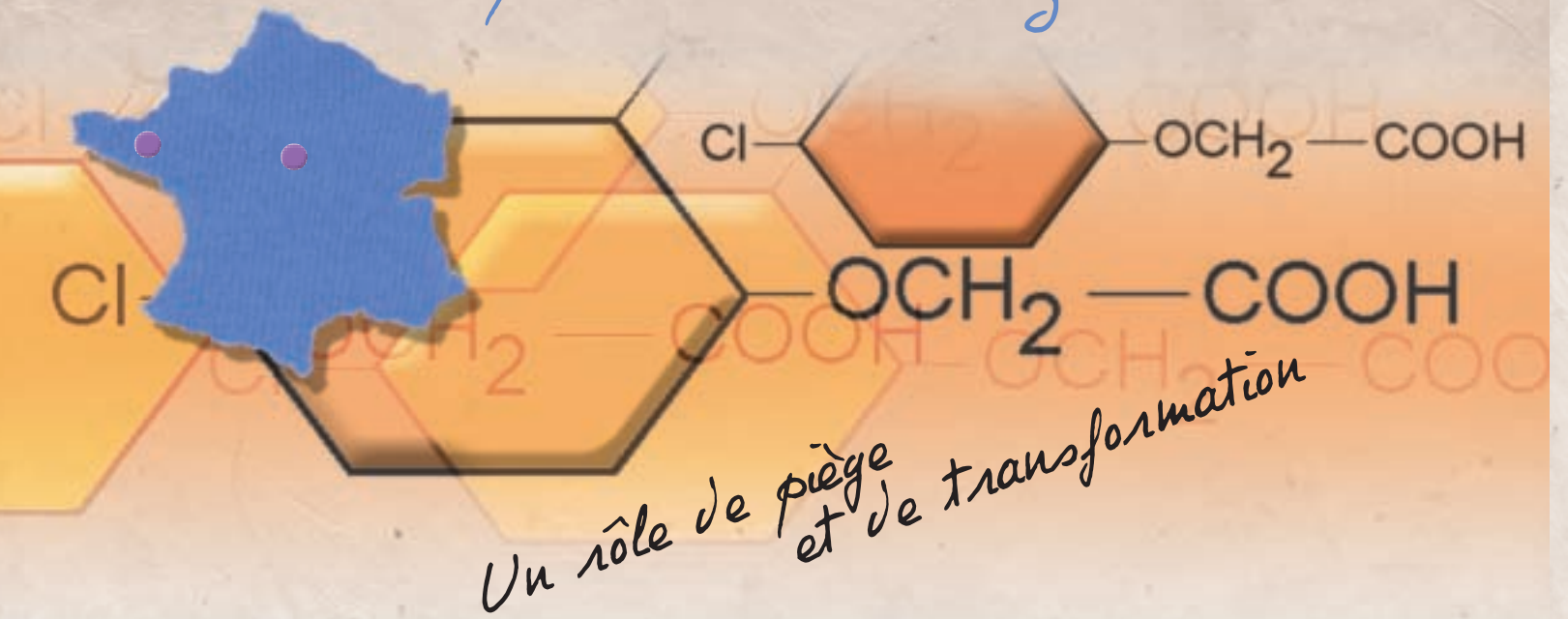
CONTACTS

CHEF DE PROJET :
Philippe Mérot, INRA, UMR INRA-ENSA.
"Sol et Agronomie de Rennes-Quimper"
65, rue de Saint-Brieuc, CS84215
35042 Rennes cedex. Tel 02 23 48 54 36
(secrétariat 54 22),
pmerot@roazhon.inra.fr

HYDROLOGIE :
Chantal Gascuel, INRA.
chantal.gascuel@roazhon.inra.fr

HYDROCHIMIE :
Patrick Durand, INRA
patrick.durand@roazhon.inra.fr

4-Les micropolluants dans les zones humides



Un rôle de piège et de transformation

Problématique

Les zones humides peuvent recevoir deux types de micropolluants : les composés métalliques (métaux lourds) et les composés organiques (hydrocarbures, solvants chlorés, produits phytosanitaires…).
Les zones humides peuvent agir sur ces flux polluants, par piégeage, libération ou transformation. D'un autre coté, l'accumulation de ces éléments ou composés peut modifier, voire porter atteinte à la qualité des écosystèmes.
Afin de pouvoir optimiser la fonction de piège et restaurer le bon état écologique des zones humides, il est nécessaire de comprendre les mécanismes qui régissent le comportement des micropolluants dans ces milieux.

Présentation des recherches

L'étude du devenir des micropolluants dans les écosystèmes, thème complexe nécessitant des études lourdes, n'a été que peu abordée dans le cadre du PNRZH.
Cette fiche présente les résultats du projet TYFON, portant sur les petites zones humides de fond de vallée (Bretagne et ponctuellement Yvelines). Deux études ont été menées en matière de polluants :

- devenir des métaux le long d'un transect culture-zone humide ;
- étude en laboratoire des transformations de polluants organiques dans certains sols de zones humides.

Le fonctionnement hydrologique des zones humides concernées est présenté dans la fiche consacrée aux petites zones humides de fond de vallée. (voir fiche n°3)
D'autres projets de recherche ont abordé ces thèmes, plus par une collecte de données que par une réelle analyse des processus : Scarpe-Escaut, mares…

Les métaux : un piégeage variable dans le temps

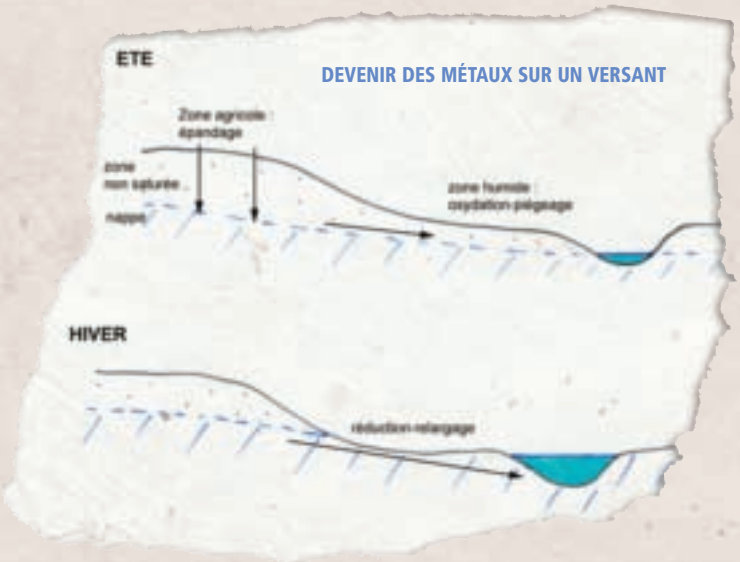
En Bretagne, les déjections animales des élevages intensifs sont à l'origine d'apports importants de métaux dans les milieux. Le bétail reçoit dans son alimentation une complémentation en oligo-éléments métalliques, notamment en cuivre et en zinc. Ces éléments, très peu retenus au niveau de l'animal, se retrouvent pour 80 à 95 % dans les déjections qui sont, le plus souvent, épandues sur les terres agricoles. Cet apport représente 400 tonnes de cuivre et 700 tonnes de zinc par an, pour la région Bretagne.

Les éléments métalliques en traces (ETM), et plus particulièrement le cuivre et le zinc, ont été recherchés sur un site expérimental de Bretagne, le long d'un transect traversant une parcelle cultivée (labours) et une zone humide adjacente (friche humide bordant un ruisseau).

Cette étude montre que la zone agricole constitue une source de métaux, qui migrent dans le bas du versant. Durant la période du passage des hautes eaux aux basses eaux, les sols s'oxygènent, ce qui a pour conséquence une précipitation des oxydes de fer qui font coprécipiter les métaux sous forme d'oxydes. Les teneurs du sol en métaux sont alors deux fois plus fortes dans la zone humide que dans la zone cultivée.

Ce piégeage n'est toutefois que temporaire, puisqu'en période de hautes eaux, le processus de réduction peut conduire à une libération des métaux, qui peuvent alors repasser en solution et migrer vers la rivière.

Enfin, l'étude a confirmé que la mobilité des ETM, c'est à dire leur possibilité de mouvement dans le paysage est contrôlée par les transformations des oxydes de fer pour le zinc et par les constituants organiques du sol pour le cuivre.



Les zones humides peuvent jouer un rôle de piège des métaux, permanent, ou temporaire comme dans le cas étudié ici. Elles jouent le rôle de tampon saisonnier sur les fuites des métaux vers le réseau hydrographique de manière synchrone ou décalée avec la transformation de l'azote et des produits phytosanitaires.

Les produits phytosanitaires
Une transformation complexe

Le devenir de quatre pesticides a été étudié dans une zone humide des Yvelines; ce fond de vallon en bordure d'un ruisseau draine l'ensemble d'un bassin versant agricole. L'étude a été conduite expérimentalement, en injectant au laboratoire les pesticides marqués par des éléments radioactifs pour en assurer le suivi dans des échantillons de sols de la zone humide et en suivant leur évolution.

LES MOLÉCULES ÉTUDIÉES

- Atrazine : herbicide, désherbant du maïs;
- 2-4-D (acide 2,4-dichlorophénoxyacétique) : herbicide agissant sur la majorité des dicotylédones;
- 2-4-DCP (2,4-dichlorophénol) : l'un des principaux métabolites du 2,4-D dans le sol;
- PCP (pentachlorophénol) : fongicide et insecticide utilisé dans la protection du bois.

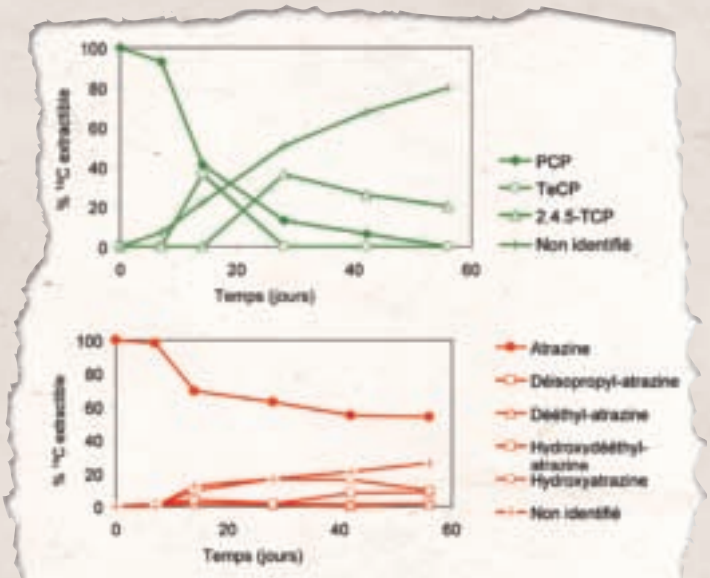
Cette recherche montre que le sol agit sur les pesticides de deux façons :

ADSORPTION-DÉSORPTION

Les pesticides peuvent être adsorbés (fixées) dans le sol, dans des conditions différentes selon les molécules.
Le DCP et l'atrazine sont fortement et rapidement adsorbés, du fait de l'abondance de la matière organique dans ces sols hydromorphes. La désorption paraît plus facile en milieu oxydé qu'en milieu réduit.

DÉGRADATION DES MOLÉCULES

Certains micro-organismes du sol sont capables de dégrader ces quatre pesticides; il s'agit toutefois plus de transformation que d'une minéralisation totale.
La présence de conditions réductrices est favorable à la dégradation des polluants chlorés (PCP; 2,4-D; 2,4-DCP). Par contre, la dégradation d'autres molécules semble plus facile en conditions oxydantes.
L'existence d'un battement des niveaux d'eau (alternance de périodes oxydantes et réductrices) apparaît favorable à la biodégradation de certains produits phytosanitaires.



Evolution du PCP et de l'atrazine et de leurs principaux produits de dégradation. On constate que la vitesse de dégradation est très différente selon les molécules. Elle est d'autant plus rapide que la molécule est chlorée.

Limites et perspectives

Les deux travaux de recherche présentés ici sont ponctuels, et ne peuvent donc pas être généralisés facilement.
Ces études montrent la complexité des phénomènes et des situations. Les zones humides peuvent jouer un rôle de transformation ou de piége de certains polluants. Ce piégeage est limité dans le cas de zones largement ouvertes vers l'aval, comme dans le cas des petites zones humides de fond de vallée. Des zones humides plus fermées constituent des pièges pour ces éléments.
L'impact de ces molécules sur les écosystèmes mérite d'être mieux connu : conséquences de l'accumulation des métaux dans les zones humides fermées, caractéristiques et devenir des produits de dégradation des produits phytosanitaires…

CONTACTS

MÉTAUX :
Fabienne Trolard, INRA CEREGE,
trolard@aix.inra.fr

PRODUITS PHYTOSANITAIRES :
Marie-Paule Charnay UMR INRA – INA-PG
Environnement et Grandes Cultures
charnay@grignon.inra.fr

5 – L'alimentation en eau des plaines alluviales

Des apports multiples et interdépendants

Inondation dans la vallée de l'Aube un peu avant sa confluence avec la Seine (photo H. Bendjoudi)

Problématique

Les zones humides de plaines alluviales, liées à un cours d'eau, se distribuent en mosaïque dans le paysage. Il s'agit de milieux de tailles et de types divers tels des prairies humides, des ripisylves, d'anciens bras, des marais tourbeux, des forêts alluviales, d'anciennes gravières …
Leur gestion écologique fonctionnelle passe par la détermination des facteurs majeurs qui contrôlent les transferts d'eau dans l'ensemble des hydrosystèmes auxquels elles appartiennent.

Présentation de la recherche

La question de l'alimentation en eau des zones humides constitue un thème fondamental qui a été abordé dans tous les projets du PNRZH. En ce qui concerne les plaines alluviales, cinq projets de recherche ont porté sur ce sujet.

Fleuve débit moyen annuel (m^3/s)	Site	Type de vallée
Seine (80), Aube	Marcilly-sur-Seine	Pente faible, prairies humides
Garonne (200)	Méandre de Monbéqui	Pente moyenne, ripisylve
Loire (140, 300)	3 sites : Dornant, Soulangy, Bec d'Allier	Pente moyenne, ripisylve
Rhin et Ill (1050, 45)	2 sites : Ile de Rhinau sur le Rhin et Illwald sur l'Ill	Pente moyenne, ripisylve
Meuse (50)	Stenay	Pente faible, prairies humides

Les flux d'eau dans les zones humides des plaines alluviales

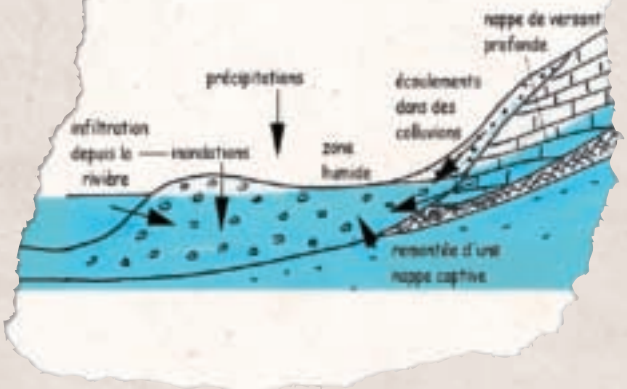
Ces travaux ont permis de comprendre et de quantifier les apports en eau dans les zones humides des plaines jouxtant des rivières ou des fleuves.
Les trois types d'alimentation en eau des plaines (eaux souterraines, cours d'eau et précipitations) ont fait l'objet de résultats intéressants.

APPORTS ET TRANSFERTS SOUTERRAINS : DES FLUX DIVERSIFIÉS ET SOUVENT ABONDANTS

La nappe alluviale de sub-surface joue un rôle écologique et hydraulique fondamental : alimentation en eau de la végétation, écrêtement des crues, soutien des étiages des cours d'eau.
L'origine de cette eau souterraine peut être complexe :

- infiltration locale d'eau de surface (rivière, inondations, précipitations) ;
- écoulement souterrain depuis l'amont de la plaine alluviale ;
- écoulement souterrain depuis les versants, provenant de nappes pouvant être libres ou captives (nappes dont le toit est imperméable), superficielles ou profondes, étendues ou localisées…

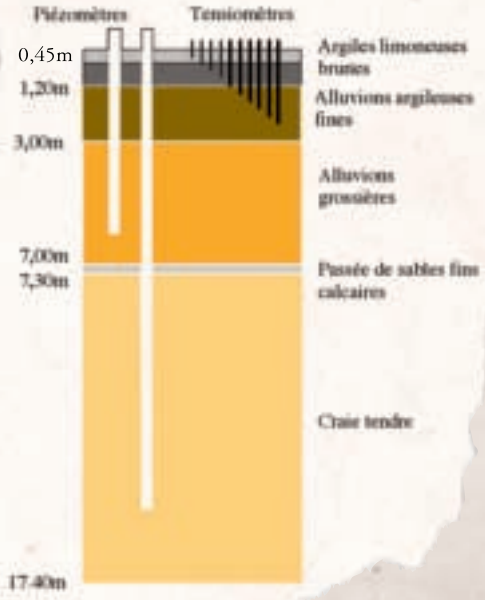
DIFFERENTES ALIMENTATIONS DES NAPPES ALLUVIALES



La contribution de chaque origine est éminemment variable selon le site et la période. Dans une même plaine alluviale, l'origine de l'eau peut varier notablement entre les sites. Ainsi, sur le site de Dornant, en période de basses eaux, deux anciens méandres emboîtés montrent une alimentation dominée pour l'un par la nappe du versant, et pour l'autre par les infiltrations des eaux de la Loire. Ce diagnostic a été obtenu à partir d'une analyse des isotopes du Strontium dans les eaux. Les études ont montré que l'apport de la nappe de versant pouvait être considérable. Ainsi, la nappe de la craie assure de 63 à 81 % de l'alimentation en eau de la zone humide étudiée sur la Seine. Les fluctuations de niveaux de la nappe de la zone humide sont souvent complexes, parce qu'elles sont liées aux fluctuations de chaque apport, qui peuvent être radicalement différents les uns des autres.

L'ÉQUIPEMENT DE SUIVI DES NAPPES DANS LE SITE DE LA SEINE

Le site a été équipé de :
- un piézomètre profond (niveau de la nappe de la craie),
- un piézomètre de sub-surface (nappe des alluvions)
- plusieurs tensiomètres (mise en évidence des écoulements dans la zone non saturée Y du sol).



Les variations du niveau de la nappe conduisent fréquemment à l'inondation "phréatique" d'une partie des plaines alluviales. Ces événements favorisent la mise en place du caractère anoxique et hydromorphe des sols des zones humides.

D'OÙ VIENT L'EAU DES INONDATIONS ? EXEMPLE DE LA SEINE À MARCILLY-SUR-SEINE (CONFLUENCE SEINE AUBE)

Cette zone humide possède une nappe superficielle, située dans les alluvions. Cette nappe est alimentée par les précipitations, les infiltrations de la rivière, et par la nappe de la craie sous-jacente (l'eau peut ainsi remonter par des phénomènes de surpression). Ces remontées se produisent presque en permanence, mais elles diminuent jusqu'à disparaître lors des crues.

Durant les crues, l'inondation de la plaine se fait d'abord par remontée de nappe. Ce diagnostic n'a pas pu être établi grâce aux analyses physico-chimiques classiques, du fait de la composition voisine des eaux superficielles et souterraines. Deux autres méthodes ont été utilisées :

- mise en place d'un bassin sans fond, étanche et enfoncé dans le sol, dont le principe de fonctionnement est simple : en cas d'inondation par la rivière, l'eau monte plus vite à l'extérieur du bassin que dans le bassin ;
- étude de la distribution, dans les sédiments, du Césium 137, radio-isotope relâché dans l'atmosphère à l'occasion de tous les essais nucléaires militaires à ciel ouvert des années 1960 et de l'accident de Tchernobyl. Ces analyses démontrent que depuis 40 ans au moins, très peu de sédiments liés au débordement de la rivière ont été accumulés sur le site expérimental.

Ce schéma est valable dans de nombreuses plaines alluviales avec une texture graveleuse du sédiment qui facilite la connectivité entre le niveau de l'eau de la nappe et celui de la rivière. Dans ces conditions, la montée du niveau d'eau dans la rivière se répercute dans les zones de dépression topographique avant que l'eau de débordement de la rivière n'arrive. Ce processus, observé par exemple dans la bande rhénane à Rhinau, est important du point de vue du cycle des nitrates, car la remontée d'eau de la nappe solubilise les nitrates de la zone non saturée du sol et les chasse vers la surface du sol avant que l'eau de la rivière, moins chargée en nitrates, les entraîne et les dilue.

LE RÔLE DE LA RIVIÈRE

Chacun connaît le schéma classique qui voit se succéder hautes eaux de la rivière, durant lesquelles le cours d'eau alimente la nappe, et basses eaux, phase de drainage de la nappe par la rivière. Ce principe reste souvent valable, mais de fortes variations locales sont possibles.
La géomorphologie et la pente de la nappe par rapport à la rivière peuvent entraîner un drainage continu de la nappe par la rivière ; sur le site de l'Illwald, cet apport représente 24 % des débits de la rivière.
De même, de très nombreuses rivières européennes ont connu un fort enfoncement au cours des dernières décennies ; il en résulte un drainage presque permanent de la nappe.

L'infiltration des eaux de surface dans les nappes peut être considérablement accrue par les actions de l'homme :

- existence de canaux perchés au-dessus de la plaine, et dont les eaux s'infiltrent vers la nappe superficielle et la rivière (Meuse) ;
- soutien des étiages par lâchers de barrages-réservoirs (Seine) ; le niveau du fleuve se retrouve alors plus haut que celui de la nappe, d'où une alimentation de celle-ci. Ce phénomène peut être très important. Sur le secteur étudié (Méry-sur-Seine, Arcy-sur-Aube en amont, Pont-sur-Seine en aval, c'est-à-dire 55 kilomètres de lit mineur), les "pertes d'eau" estivales du fleuve ont été de 30 à 40 Mm^3 de mi-juin à fin août (1989-1990 et 1991-1992).

Les relations entre eaux souterraines et superficielles ne se limitent pas aux écoulements. Ainsi, le long de la Meuse, le relèvement saisonnier du niveau piézométrique concomittant de celui du niveau limnimétrique semble dû plus à un effet de barrage de la rivière, qu'à un apport d'eau de rivière vers la nappe. La rivière constitue un drain dans lequel s'écoule la nappe ; en relevant le niveau de la rivière, on relève aussi le niveau de la nappe, sans inverser les sens d'écoulement.

PLUIES ET ÉVAPOTRANSPIRATION : UN RÔLE LIMITÉ

Les pluies locales représentent généralement une part proportionnellement faible de l'alimentation en eau des zones humides alluviales ; l'effet de l'évapotranspiration sur le bilan est du même ordre.
L'influence des précipitations est proportionnellement faible lorsque l'aquifère est très puissant, comme dans la bande rhénane où la nappe présente une épaisseur moyenne de 100 mètres. Dans d'autres sites, comme sur la Seine, ce paramètre mérite d'être pris en compte.

Le fonctionnement hydrique de la zone non saturée du sol a pu être suivi le long de la Seine grâce à des capteurs tensiométriques situés à différentes profondeurs.
L'interprétation des données tensiométriques a permis de montrer que :

- durant une grande partie de l'année, l'eau des précipitations s'écoule de la surface vers la nappe, mais elle est rapidement drainée par la Seine ;
- durant l'été, l'eau utilisée pour l'évapotranspiration en surface est directement issue de la nappe située à 1,50 mètre de profondeur. La Seine s'infiltre vers la nappe alluviale à travers ses berges et contribue en partie à l'alimentation de la zone humide.

Durant l'été, on constate que la nappe superficielle des alluvions connaît des oscillations entre le jour et la nuit. Le niveau est de 3 à 7 centimètres plus haut en début de matinée qu'en fin de soirée. Cette variation s'explique par l'évapotranspiration de la végétation, particulièrement importante ici du fait de la faible profondeur du toit de la nappe (les végétaux y ont directement accès). Une conséquence de cette observation est qu'il est souhaitable de mener des suivis piézométriques toujours à la même heure, pour limiter ce biais.

Une modélisation mathématique construite à cette occasion a permis de valider les résultats de terrain et de quantifier les échanges entre les différents compartiments de l'écosystème.

Dans la bande rhénane (forêt de Rhinau), les chercheurs ont montré que les arbres font remonter l'eau de la nappe par capillarité dans la zone non saturée du sol et que ce flux ascendant d'eau peut être très important.

UN ÉQUILIBRE PERPÉTUEL ENTRE LES DIFFÉRENTES ALIMENTATIONS

Sur les sites étudiés, il a été mis en évidence des compensations entre les différentes alimentations en eau de la zone humide. Ainsi, entre les hautes eaux et les basses eaux, les apports de la nappe alluviale, d'une éventuelle nappe plus profonde, ou encore de celle des coteaux, peuvent varier significativement.

Ce phénomène est bien mis en évidence sur le site de Monbéqui sur la Garonne (tableau ci-après).

	Débits de la Garonne (m^3/s)		
	100	200	300
Entrées			
1. Apports de la nappe depuis l'amont (m^3/j)	3 689	1 365	1 020
2. Rivière vers nappe (m^3/j)	598	3 240	7 240
Sorties			
3. Sorties de la nappe vers l'aval (m^3/j)	255	2 912	6 869
4. Nappe vers rivière (m^3/j)	4 095	1 719	1 495

Les zones humides alluviales de la Seine au niveau de Marcilly présentent également trois types d'épisodes contrastés :

- lorsque la Seine est basse, les apports de la nappe de la craie sont prépondérants ; la Seine draine la nappe ;
- lorsque la Seine est haute durant l'été, la nappe de la zone humide est alimentée par la nappe de la craie, mais aussi par la rivière ; l'évapotranspiration agit fortement dans le bilan ;
- lorsque la Seine est en crue, la rivière alimente très fortement la nappe ; la nappe de la craie remonte peu ou pas dans la zone humide.

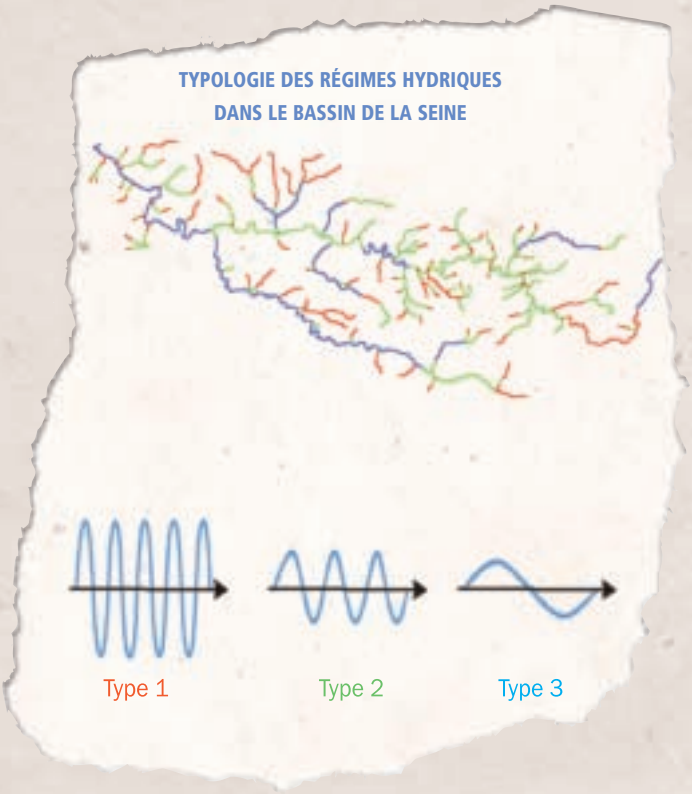
Ces relations sont naturellement très liées au régime hydrologique des cours d'eau. On note par exemple une très grande différence entre la Garonne (crues de printemps de courte durée) et le Rhin (crues estivales qui peuvent durer plusieurs mois).

LES VARIATIONS DU RÉGIME ENTRE L'AMONT ET L'AVAL DU COURS D'EAU

Le fonctionnement hydrologique des zones humides n'est pas uniforme de l'amont à l'aval d'un bassin versant. Il est possible de présenter ici un schéma (voir ci après), répandu en France, mais non exclusif (résurgences karstiques, cours d'eau glaciaires...).

Dans la partie amont (type 1), les pluies jouent un rôle déterminant, donnant à la rivière un régime fluctuant, comme il a également été montré dans les petites zones humides de fond de vallée en Bretagne par exemple (voir fiche n°3).
Plus à l'aval (types 2 et 3), comme à Marcilly, le régime est fortement tamponné par les apports d'eau souterraine et les échanges possibles entre la rivière et la nappe.

Le schéma général ne s'applique pas toujours ; ainsi, certaines têtes de bassin sont peu pentues et présentent un régime tamponné.



L'INTÉRÊT DU BILAN HYDROLOGIQUE POUR LE GESTIONNAIRE

Un gestionnaire doit connaître les grands éléments du bilan hydrologique de la zone humide dont il a la charge.
A titre d'exemple, il est possible de présenter les bilans hydrologiques globaux établis dans deux espaces emboîtés de la vallée de la Seine :

- un sous-bassin versant de 2840 km^2.
- une plaine alluviale de 840 km^2

Sous-bassin

Entrées	Volume (Mm³/an)
Eaux superficielles	1 914
Eaux souterraines	0 (pas de nappe à l'amont)
Pluies efficaces	520
Sorties	
Eaux souterraines	4
Eaux superficielles	2 485

La différence entre les entrées et les sorties est due d'une part aux hypothèses faites pour les calculs et d'autre part à l'imprécision sur les débits mesurés (de l'ordre de 6%). Les pluies efficaces sont celles qui ont "échappé" à l'évapotranspirtation.

Plaine alluviale

Entrées	Volume (Mm³/an)
Pluies efficaces	154
Apport de la nappe de la craie	417
Sorties	
Nappe vers Seine (drainage)	571

L'apport de la nappe de la craie a été calculé par soustraction : drainage par la Seine moins pluies efficaces

La réalisation de tels bilans peut aider à déterminer les enjeux prioritaires de son action. Ainsi, le gestionnaire doit souvent prendre position vis-à-vis de possibles agressions sur le système hydrique ; pour le faire correctement, il doit évaluer l'incidence relative de cet impact sur l'ensemble du système.
Un gestionnaire confronté à un phénomène négatif (par exemple, la baisse de la nappe superficielle) peut avoir tendance à lutter contre des impacts locaux et mineurs (par exemple, un captage agricole), alors que l'origine du problème se situe loin du site (par exemple, surexploitation de la nappe de versant, modification des règles de gestion des débits de la rivière…).

Fonctions des zones humides : revoir les schémas classiques

De manière naturelle, les zones humides alluviales modulent généralement le débit du cours d'eau qui les alimente ; elles stockent un volume d'eau durant les crues, à la fois dans la nappe souterraine et en surface lors des débordements de la rivière, et le restituent ensuite progressivement. Ce mécanisme peut être évalué de façon simple en mesurant le débit à l'amont et à l'aval de la zone humide alluviale (en prenant en compte les apports des affluents, des versants et de la pluie) :

- si débit aval > débit amont : destockage ;
- si débit aval < débit amont : stockage.

Ces mécanismes peuvent avoir des conséquences fortes en matière écologique ou socio-économique, par la diminution des pics de crue ou le soutien des étiages.

Les recherches ont permis de préciser ce schéma, et de montrer la complexité des situations.

LE STOCKAGE : PAS SEULEMENT EN CRUE

Une zone de 294 km² en bordure de Seine a été consacrée de 1989 à 1992 à l'analyse des conditions de stockage dans la zone humide.
On a constaté que le stockage s'y produit même pour des débits modérés (à partir de 50 m³/s, soit un débit inférieur au débit moyen annuel). Le volume stocké lors de chaque épisode de hautes eaux est souvent inférieur à 1 Mm³, mais il peut se situer entre 5 et 10 Mm³. En termes de volume, les phénomènes de stockage représentent 11 à 21% du volume transitant dans les rivières.
Sur ce site, la durée du phénomène de stockage est d'environ une semaine par épisode. La restitution à la rivière peut s'étaler sur une durée significativement plus longue.

LE SOUTIEN DES ÉTIAGES : PAS SYSTÉMATIQUE

En période d'étiage, de nombreuses plaines alluviales soutiennent le débit du cours d'eau.
Ce phénomène s'explique en particulier par la différence de vitesse entre l'eau de la rivière et l'eau des nappes, dont les "crues" sont très retardées, qu'elles soient liées aux

précipitations locales ou au débordement du cours d'eau. Ainsi, dans la vallée de la Meuse, ces vitesses ont été évaluées à :

- Meuse : 26 kilomètres / jour ;
- nappe : 2,7 mètres / jour.

Les recherches ont montré qu'il faut relativiser l'importance du soutien d'étiage et ses conséquences, pour au moins trois raisons.

Le soutien effectif est toujours limité

La zone humide elle-même apporte peu d'eau à la rivière. Ainsi, les nappes de la vallée de la Garonne apportent moins de 3 à 5 % du débit de la rivière en période d'étiage (soit des débits inférieurs à 100 m^3/s). Pour des débits supérieurs, cet effet est négligeable. En conséquence, on peut dire que la Garonne véhicule essentiellement des eaux pyrénéennes jusqu'à la plaine d'Aquitaine.

Le rôle des nappes est prépondérant

Lorsqu'un soutien se produit, il est généralement moins lié à la nappe superficielle de la zone humide contiguë de la rivière, nappe qui représente somme toute un volume faible, qu'aux nappes de versant ou aux nappes profondes.

Nos rivières se déplacent souvent dans des systèmes modifiés

Durant l'été, période naturelle d'étiage, la Seine alimente la nappe, à cause du fort soutien des débits assurés par les lâchers à partir des grands barrages de l'amont. L'évapotranspiration dans la zone humide entraîne alors une diminution du débit du cours d'eau.

Limites et perspectives

Les plaines alluviales possèdent une très forte diversité morphologique, si bien que les exemples présentés ne sont que partiellement représentatifs ; certaines situations contrastées, telle que celles représentées par une absence de nappe de versant ou un cours d'eau nival assurant des hautes eaux en été, ont été peu analysées dans le cadre du PNRZH.

Retenons cependant quelques résultats, dont certains sont un peu en opposition à quelques idées reçues, mais qui n'en sont que plus essentiels pour la gestion des zones humides de nos réseaux hydrographiques de milieux tempérés. Parmi eux on se doit de citer que :

- l'alimentation des zones humides de plaine alluviale par des nappes de versants peut être très importante et supérieure à l'alimentation par la rivière ;
- les lâchers d'eau estivaux à partir de barrages sont susceptibles d'inverser les sens d'écoulement hydrologiques naturels dans les zones humides;
- les zones humides alluviales ne soutiennent pas significativement le débit des cours d'eau, sauf en cas d'apports souterrains très importants (Illwald).

Tous ces résultats contribuent à rendre compte des mécanismes de circulation, transformation physico-chimiques et d'élimination impliquant des nutriments et polluants dans les zones humides en général, et de vallées alluviales en particulier. (voir fiche n°8). A ce titre, ces données collectées sur les plaines alluviales de grands cours d'eau, sont complémentaires de celles obtenues sur des petites zones humides de fond de vallons (voir fiche n°3).

P. Weng

CONTACTS

MEUSE :
Jeannine Corbonnois, centre d'Etude Géographique de l'Université de Metz.
corbonnois@zeus.univ-metz.fr

LOIRE :
Emmanuèle Gautier, laboratoire de Géographie Physique CNRS UMR 8591,
emmanuele.gautier@cnrs-bellevue.fr

GARONNE, RHIN :
José Miguel Sanchez Pérez, Centre d'Ecologie des Systèmes Aquatiques Continentaux actuellement Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes,
sanchez@ecolog.cnrs.fr

SEINE :
Hocine Bendjoudi, Université Paris 6
hocine.bendjoudi@ccr.jussieu.fr
Anne Coudrain-Ribstein,
coudrain@msem.univ-montp2.fr

6-La dynamique des anciens bras fluviaux

Une clé pour la restauration

La lône du Méant, l'un des anciens bras du Rhône étudiés dans le cadre du PNRZH. (photo J.L. Michelot)

Problématique

Les anciens bras des cours d'eau présentent un intérêt écologique considérable, car on trouve au sein de ces milieux, et sur des aires souvent restreintes, la plupart des types fonctionnels existant dans l'ensemble des habitats aquatiques, quelle que soit leur origine. Menacés par les pressions anthropiques de plus en plus fortes qui pèsent sur les vallées alluviales (aménagements, drainages, pompages, rejets de substances polluantes), ils font parfois l'objet de travaux de restauration, en particulier par recreusement lorsqu'ils atteignent un degré de comblement avancé.
Les études du PNRZH ont permis de mieux comprendre la dynamique de ces milieux, en apportant aux gestionnaires les clefs d'un diagnostic fonctionnel, et des lignes directrices en termes de restauration.

JL Michelot

Par contre, sur la Loire ou l'Allier, la dynamique fluviale peut encore créer de nouveaux bras annexes

JL Michelot

Le long du Rhône, les bras apparaissent souvent comme des éléments isolés et statiques en marge d'un fleuve stabilisé

Présentation des recherches

Deux projets du PNRZH ont abordé ce thème.

BASSIN DU RHÔNE

L'étude a été menée sur plus de 60 bras de l'Ain, du Rhône, de la Saône et du Doubs, dans des situations hydrauliques, géomorphologiques et trophiques très contrastées. Les chercheurs ont étudié les caractères de ces zones humides en matière d'hydraulique et de géomorphologie, et en ont mesuré les conséquences sur la structure et la dynamique des communautés vivantes (principalement végétation aquatique).
Enfin, cette étude a permis la mise en place d'un système de diagnostic écologique des anciens bras fluviaux. (voir cahier inventaire).

BASSIN DE LA LOIRE

Trois sites ont fait l'objet de recherche le long de la Loire :

- Dornant : méandres à l'amont du Bec d'Allier ;
- Bec d'Allier et îles de Marzy ;
- Iles de Soulangy, à l'aval du bec d'Allier.

Les études ont porté sur le suivi de la topographie de la plaine (dont les bras), une analyse qualitative des sédiments, et un suivi des vitesses de sédimentation à 2 pas de temps : sur 25 ans et en fonction des événements hydrologiques saisonniers.

Les études menées sur les bassins du Rhône et de la Loire ont également permis de mettre en évidence les facteurs qui conditionnent la biodiversité de ces espaces (fiche n°7).

L'atterrissement, un phénomène inéluctable ?

Comme la plupart des zones humides, les anciens bras fluviaux sont des milieux dynamiques, connaissant une tendance à la sédimentation plus ou moins prononcée. Toutefois, l'observation montre qu'il existe de très grandes variétés de situation.

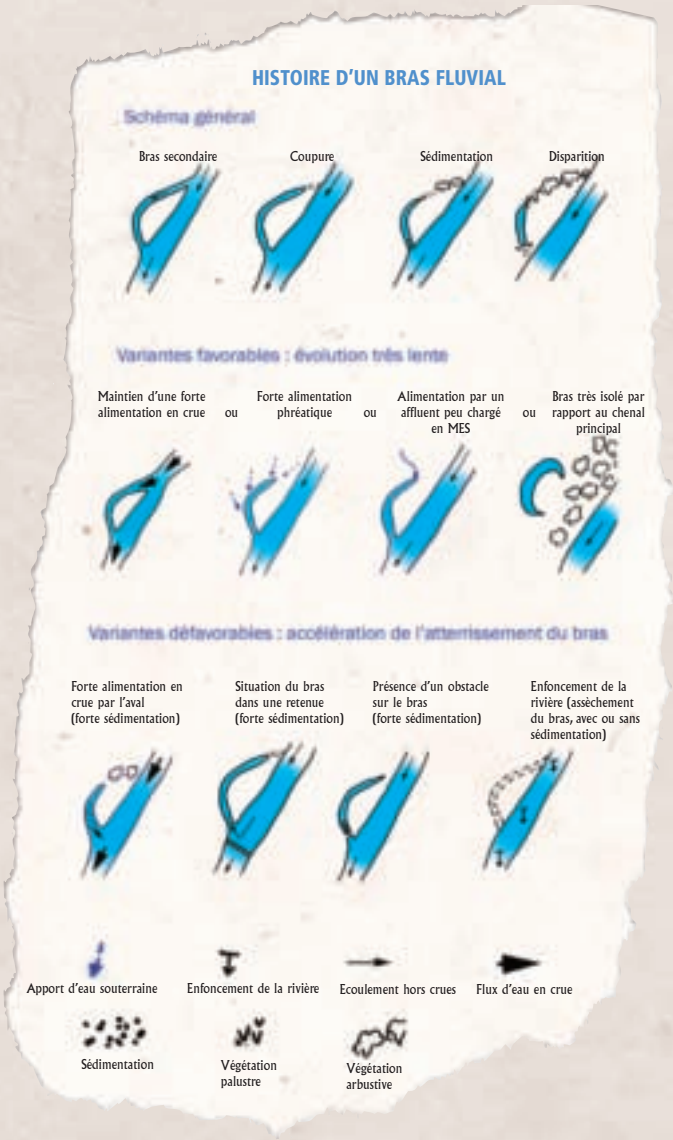
Sur la Loire, le suivi mené au cours de deux années a montré le rôle important de l'hydrologie dans la sédimentation, et l'existence de fortes variations locales (tableau ci-dessous).

	1998-1999	1999-2000
Nombre de jours de débit élevé (≥ plein bord)		
Dornant	17	4
Soulangy	24	6
Sédimentation moyenne et extrême dans les bras (cm)	3 points de mesure	4 points de mesure
Dornant	23	0
Soulangy	49 (7-100)	37 (0-130)

Les chercheurs ont mis en évidence les principaux facteurs qui influent sur la vitesse de sédimentation et donc sur "l'espérance de vie" des anciens bras (tableau ci-dessous, figures page suivante).

Les grands facteurs de la dynamique des anciens bras

FACTEUR	RÔLE SUR LA DYNAMIQUE
Alimentation en crue par l'amont du bras	L'eau de la rivière peut apporter des sédiments lors des débordements, mais elle peut aussi permettre leur évacuation. La sédimentation est contrôlée en partie par la végétation et sa position à l'intérieur du bras.
Alimentation en crue par l'aval du bras : reflux	Les bras fortement alimentés par l'aval sont généralement très sujets à la sédimentation. L'intensité des reflux et de la sédimentation dépend principalement de la pente du bras, c 'est-à-dire du différentiel de connexion amont-aval.
Apports de la nappe	L'alimentation du bras en eau souterraine permet d'assurer le renouvellement des eaux (limitation des processus d'eutrophisation, par évitement des phénomènes d'anoxie à l'interface eau-sédiment). Elle peut limiter la décantation des MES en fournissant un courant parfois suffisant pour maintenir les particules en suspension et favoriser leur évacuation. Si l'alimentation provient surtout d'une nappe de versant de qualité correcte, le bras aura tendance à être oligotrophe ou mésotrophe. Si elle provient surtout du sous-écoulement de la rivière, le bras sera plutôt mésotrophe ou eutrophe.
Charge de la rivière en matières en suspension (MES)	Une rivière très chargée en MES contribue de manière plus significative au comblement des bras à géométrie égale.
Rythmes hydrologiques	L'exondation temporaire permet de limiter la colonisation par les espèces végétales dominantes dans les écosystèmes les plus eutrophes, et dans lesquels il n'existe pas d'autre contrainte susceptible de diminuer la pression de compétition. L'exondation peut également contribuer à diminuer la diversité biologique : colmatage du sédiment, destruction des peuplements intolérants aux exondations.



Restauration : prudence

Ces recherches permettent de formuler quelques conseils en matière de restauration des milieux.

LIER LA STRATÉGIE DE RESTAURATION AU DIAGNOSTIC DU MILIEU

Avant une restauration, il est très important de comprendre quels sont les processus qui régissent le fonctionnement du milieu. La connaissance de ces processus déterminera la durée de vie de l'écosystème aquatique. En cas de durée de vie faible, la légitimité de la restauration et des moyens mis en œuvre (rapport coût/bénéfice) :

- quels sont les processus à mettre en oeuvre pour la restauration de l'habitat aquatique ? Utiliser ou rétablir des processus naturels (en ayant recours éventuellement à des méthodes de type curage) est plus légitime que de laisser en place les facteurs de disfonctionnement ;
- quel est l'intérêt écologique potentiel de la restauration, à l'échelle de l'écosystème, mais également en fonction des situations présentes dans le secteur de plaine alluviale ?
- quelle va être la vitesse de réinstallation des communautés, quelle va être la durée de vie de la situation restaurée ?
- quelle est, connaissant tous ces éléments, la légitimité de l'opération en termes de coût financier de l'opération sensu stricto, et d'entretien éventuel post-restauration ?

Si les risques de sédimentation sont trop forts, il peut être souhaitable d'abandonner un projet qui s'avèrerait trop onéreux.

MENER UNE APPROCHE HYDRAULIQUE DE LA RESTAURATION

Pour qu'elle soit pérenne, une restauration de bras doit être analysée sur le plan hydraulique. Il s'agira de favoriser des écoulements assez rapides en crue, permettant l'évacuation des sédiments vers l'aval.
L'axe du bras doit être suffisamment courant, donc rectiligne ; les berges peuvent être traitées pour une biodiversité optimale (berges en pentes douce, anses…), sachant que cela induira probablement une sédimentation.

REMISE EN EAU DES BRAS OU ÉCRÊTEMENT DES CRUES : IL FAUT CHOISIR ?

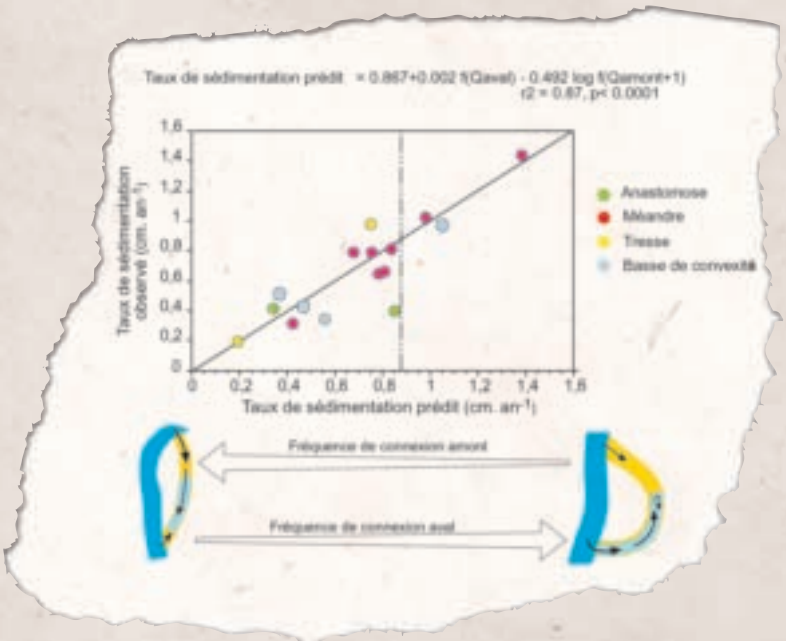
Pour limiter sa sédimentation, un bras fluvial restauré doit connaître une évacuation rapide des eaux vers l'aval. Ce principe limite l'écrêtement des crues par cette zone humide, qui supposerait un ralentissement des eaux.
Sur ce thème comme sur bien d'autres, les choix entre objectifs ne peuvent être fait qu'au cas par cas, suite à un diagnostic approfondi de la situation et à une concertation entre acteurs. En outre, les choix doivent tenir compte des contextes locaux en termes d'hydrologie ou de risques.

ATTENTION À LA RÉALIMENTATION PAR L'AVAL !

Le mode de restauration le plus fréquent des bras fluviaux consiste dans le recreusement et la mise en connexion à la rivière par l'amont ou l'aval. Cette méthode peut être néfaste pour la diversité biologique. Une connexion par l'aval peut favoriser le comblement et l'eutrophisation.
Une ouverture permanente à l'amont transforme le bras en un bras actif, présentant les mêmes communautés vivantes que le cours principal, et réduisant ce qui en faisait sa spécificité fonctionnelle.

Naturellement, il n'est pas souhaitable de rouvrir un bras à l'amont sans assurer la sortie aval ; cette action conduirait à l'accroissement rapide du bouchon aval et à sa progression vers l'amont.
Face à ce constat, il est souhaitable de connaître précisément le fonctionnement hydraulique des bras avant d'envisager les scénarios de restauration.
Les résultats présentés dans cette fiche doivent inciter les gestionnaires à prendre en compte la dynamique sédimentaire des bras recréés ; il ne s'agit pas de refuser cette dynamique. Il est nécessaire de penser la restauration non pas à l'échelle d'un bras mais d'un ensemble de bras au sein d'un secteur afin de savoir quel type fonctionnel manque ou a disparu. Si ce sont les bras qui sont connectés par l'aval, il ne serait pas aberrant d'en restaurer un, même avec une pérennité médiocre.
Par ailleurs, la sédimentation peut être acceptée par le gestionnaire et les financeurs. Ainsi, une restauration qui redonnerait à un bras une profondeur de un mètre offrirait une pérennité tolérable (25-50 ans) en cas de sédimentation de 2 à 4 centimètres par an.

Les chercheurs ont pu mettre en place un modèle reliant vitesses moyennes de sédimentation et fréquence de connexion amont et aval. Ce modèle, calé sur une quinzaine de bras morts de l'Ain et du Doubs, peut permettre de prédire les vitesses de sédimentation d'un bras, par exemple après une remise en eau. La comparaison entre prédictions et observations et l'application du modèle aux bras morts du Rhône (figure ci-dessous) montre que le modèle fonctionne bien. Son application à d'autres sites nécessite cependant de tester sa validité dans le cadre d'un contexte géographique différent (importance des MES par exemple).



Limites et perspectives

Les études ont porté sur une grande variété de cours d'eau et de bras fluviaux ; la généralisation des résultats est possible, mais elle serait facilitée par l'analyse de situations plus diversifiées encore, et leur suivi dans le temps.

Enfin, il faut rappeler ici qu'une opération de restauration d'un bras fluvial est une opération importante et complexe, qui doit prendre en compte différentes problématiques dépassant largement la question de la sédimentation :

- fonctions de la zone humide : écrêtement des crues, biodiversité… ;
- relation du bras avec son environnement terrestre ;
- activités humaines ;
- entretien de la végétation ;
- etc

CONTACTS

BASSIN DU RHÔNE :

Chef de projet :
Claude Amoros, UMR CNRS 5023, Université Lyon I. 43 Boulevard du 11 novembre 1918, 69622 Villeurbanne cedex.
amoros@univ-lyon1.fr

Géomorphologie :
Hervé Piégay, UMR CNRS 5600 Environnement-Ville-Société.
piegay@sunlyon3.univ-lyon3.fr

Modèle de sédimentation :
Anne Citterio, université Lyon 3,
citterio@univ-lyon3.fr

Végétation aquatique :
Gudrun Bornette, UMR CNRS 5023.
bornette@avosnes.univ-lyon1.fr

BASSIN DE LA LOIRE :

Chef de projet :
Emmanuèle Gautier,
laboratoire de géographie physique CNRS UMR 8591, 1 place Aristide Briand, 92195 Meudon Cedex. Tel 01 45 07 55 85.
emmanuele.gautier@cnrs-bellevue.fr

7-Biodiversité des anciens bras fluviaux

L'influence du fonctionnement du milieu

Ancien méandre du Doubs (photo J.L. Michelot)

Problématique

Les anciens bras fluviaux présentent généralement une grande importance pour la biodiversité de l'ensemble de l'hydrosystème auquel ils appartiennent.
Ces zones humides de faible extension connaissent souvent une dégradation générale, liée en particulier à la stabilisation des cours d'eau (sédimentation, boisement…).
Face à ces menaces, elles font fréquemment l'objet de travaux de restauration (remise en eau, reconnection…).
Pour bien concevoir ces projets, il est important de comprendre les mécanismes qui conditionnent le fonctionnement et l'intérêt biologique des annexes fluviales.

Présentation de la recherche

Plusieurs projets du PNRZH ont travaillé sur cette problématique :

- bassin du Rhône (Ain, Doubs, Rhône) : végétation, oiseaux ;
- cours moyen de la Garonne : poissons ;
- Loire : invertébrés aquatiques.

Sur ces cours d'eau, les chercheurs ont mis en évidence les facteurs qui conditionnent l'intérêt des zones humides fluviales.

La végétation aquatique : l'intérêt de la dynamique fluviale

L'analyse de très nombreux relevés sur 60 bras (Haut-Rhône, Rhône, Ain, Doubs, Saône) permet de mettre en valeur les facteurs expliquant la diversité de la végétation des bras fluviaux.

PERTURBATIONS RÉCURRENTES

L'existence de perturbations (décapage lors des crues, exondation en basses eaux) donne à des plantes très variées la possibilité de s'installer (*Luronium natans, Groenlandia densa, Hottonia palustris, Callitriche sp*…), en empêchant les espèces les plus compétitives d'occuper une place dominante dans le milieu (*Nuphar lutea, Potamogeton nodosus*).
Pour cette raison, les annexes présentant une pente forte, une capacité hydraulique faible, et une fréquence élevée d'inondation par les crues ont généralement une richesse spécifique élevée.

FAIBLE DEGRÉ DE TROPHIE (eau oligotrophe ou mésotrophe)

Les écosystèmes alimentés par des aquifères peu chargées en matières nutritives possèdent généralement un peuplement floristique moins diversifié que les bras eutrophes, mais comportant une forte proportion d'espèces peu répandues, voire rares (*Thélyptéris palustris, Hydrocotyle vulgaris, Samolus valerandi*). Cette proportion est d'autant plus élevée que le renouvellement des eaux dans le chenal est

important, ce qui implique une pente forte et une capacité hydraulique faible.

CONNEXION

Les connexions au cours actif, en particulier lors des épisodes de crue, constituent le facteur principal de dispersion des diaspores végétales. Autrement dit, plus un bras est fréquemment relié au cours d'eau en crue, plus il tend à posséder une végétation diversifiée. Il faut toutefois noter qu'une forte connexion peut favoriser la colonisation du milieu par des espèces indésirables (Jussie – *Ludwigia sp.* par exemple).

CARACTÈRES HYDROLOGIQUES ET TYPES DE PLANTES

L'étude a montré que certaines caractéristiques du système fluvial avaient des influences marquées sur le fonctionnement des annexes et par conséquent sur la composition et la dynamique des peuplements végétaux.

Perturbations

- faibles à nulles et prévisibles : plantes à forte aptitude compétitive (*Sparganium emersum, Hippuris vulgaris, Nuphar lutea, Potamogeton nodosus*) ;
- fortes et imprévisibles : plantes rudérales (*Callitriche sp., Zannichellia palustris, Berula erecta…*).

Productivité potentielle

- faible (apport régulier d'eau souterraine peu chargée en nutriments) : plantes tolérantes au stress trophique, généralement peu compétitives, plantes submergées à réserves (*Potamogeton coloratus, Juncus subnodulosus, Potamogeton natans*) ;
- forte : plantes compétitives, polluo-tolérantes ; les plantes flottantes sont favorisées (*Lemnacées, Nuphar lutea, Potamogeton nodosus, Ceratophyllum demersum*).

Cyclicité des conditions environnementales

- faible (apport régulier d'eau souterraine) : plantes sempervirentes (*Berula erecta, Mentha aquatica*) ;
- forte (étiage marqué) : plantes à cycle végétatif marqué (*Nuphar lutea, Sparganium emersum*).

Connectivité superficielle

- faible : banque de graines persistantes dominée par les diaspores sexuées, peu de recrutement ;
- forte : banque de graines transitoires, diaspores végétatives et sexuées, recrutement élevé.

G. Bornette

Luronium natans, plante pionnière, favorisée par les perturbations.

J.L. Michelot

La lône du Méant (Ain) possède une biodiversité végétale maximale, grâce à des crues fréquentes (plusieurs fois par an) qui entraînent une destruction partielle des communautés végétales et une évacuation des sédiments fins. Le substrat reste ainsi perméable aux apports d'eau phréatiques, dont le taux de renouvellement est d'autant plus élevé que la pente de cette zone humide est forte. La conjonction de ces différents facteurs permet la présence de 40 espèces aquatiques végétales, avec une forte proportion d'espèces rares telles que Luronium natans ou Hottonia palustris.

Les oiseaux : la diversité des grands plans d'eau eutrophes

Les anciens bras constituent des milieux diversifiés sur le plan ornithologique au sein de la vallée fluviale ; ils sont beaucoup plus riches que les sablières ou le chenal principal.

	Bras du Doubs inférieur	Sablières de la vallée de la Saône	Chenal de la Saône (80 km depuis la source)	Chenal de la Seine (80 km depuis la source)
Nb relevés	21	49	35	25
Nb moy sp	29	19,7	24,2	26,8
Nb moy sp aquatiques	6,1	1,4	1,6	2,3

Nb moy sp : nombre moyen d'espèces d'oiseaux contactées par relevé

Les anciens bras les plus intéressants pour les oiseaux ne sont pas forcément les mêmes que pour les plantes. L'étude conduite sur l'Ain et le Doubs, permet d'identifier les facteurs les plus favorables aux oiseaux :

- **SURFACE EN ROSELIÈRES :** facteur très important pour les oiseaux d'eau (Canard colvert, Poule d'eau, Foulque macroule…) ;
- **SURFACE EN EAU :** les grandes annexes offrent une diversité maximale d'habitats, et permettent la présence d'espèces ayant besoin d'un espace important ;
- **NIVEAU TROPHIQUE :** les milieux eutrophes sont les plus diversifiés, du fait de leur productivité élevée ;
- **AGE :** à l'échelle du site, les annexes d'âge intermédiaire présentent l'avifaune la plus riche, en raison d'une forte diversité d'habitats. A l'échelle d'un tronçon de vallée, la situation la plus favorable à la biodiversité correspond à la présence d'annexes d'âges variés.

Le remaniement par les crues semble constituer un facteur défavorable pour la diversité des oiseaux d'eau (décapage des sédiments fins et de la végétation…). Toutefois, les espèces rares sont plutôt liées à des stades pionniers (sternes, Petit Gravelot…).

J.L. Michelot

Le long de la rivière d'Ain, les anciens méandres sont généralement plus riches en oiseaux que les anciens bras de tressage, plus oligotrophes et fermés (photo ci-dessus).

Les poissons : les bras annexes, compléments fondamentaux du cours d'eau

Des pêches électriques ont été menées sur un ensemble comprenant un tronçon de chenal principal de la Garonne, un bras secondaire et un bras mort (Saint-Pierre).

Le bras mort apparaît comme étant très favorable à la faune piscicole (voir tableau).

	Chenal	Bras secondaire	Bras mort
Nombre d'espèces	13	17	19
Densité ind/m²	0,77	1,09	1,21

Les espèces se répartissent entre ces milieux pour leur reproduction. Trois espèces ne se reproduisent que dans le chenal (Chevaine, Vandoise, Barbeau), cinq espèces dans le bras mort (Carassin, Tanche, Rotengle, Brème commune, Brème bordelière). Le bras secondaire est important pour le Goujon, les jeunes de presque toutes les espèces, et surtout pour la Bouvière et les espèces exotiques (Perche-soleil, Poisson-chat).
On constate des déplacements importants des poissons au cours de la journée comme au cours de l'année.
Ainsi, le Goujon se reproduit au bord des rives du bras secondaire ; les juvéniles se déplacent ensuite vers leur milieu de grossissement, les herbiers de myriophylles du chenal principal.
De même, le bras mort semble constituer un site de grossissement pour le Chevaine, le Sandre et la Perche, trois espèces qui ne s'y reproduisent pas.

Au total, il est possible de lister quelques-uns des intérêts que présentent les bras morts vis-à-vis du chenal principal pour les poissons, en particulier lors de leur stade juvénile :

- rôle de refuge en cas de crue ;
- zone d'alimentation (densité plus forte en invertébrés) ;
- réchauffement des eaux plus rapide au printemps, et refroidissement plus lent à l'automne ;
- rôle pour la ponte et nurseries de certaines espèces.

Les déplacements de poissons entre le chenal et le bras répondent à plusieurs logiques. Lorsque la connexion est permanente, les poissons peuvent se déplacer très souvent d'un milieu à l'autre. Ainsi, les adultes de différentes espèces du chenal viennent se nourrir dans l'annexe durant la nuit. Par contre, un bras mort relié seulement pendant les crues n'autorise que des échanges ponctuels.
L'isolement pourrait être intéressant pour la survie des espèces, en rendant possible le développement de populations distinctes de celles du chenal, car adaptées à d'autres conditions (biodiversité intraspécifique). L'isolement a naturellement aussi de forts inconvénients : risque de dystrophie, d'anoxie, etc.

Les macroinvertébrés aquatiques : originalité des bras morts

Sur la Loire, les chercheurs ont étudié les macroinvertébrés aquatiques de quatre sites, à partir d'un protocole d'échantillonnage adapté à la complexité de ce système fluvial. Les résultats montrent que la diversité d'un secteur provient de la juxtaposition d'unités écologiques aux peuplements bien individualisés (chenal principal, berges, bras…). Les bras secondaires (en eau permanente) et les bras morts possèdent généralement une faune diversifiée et proche de celle du chenal principal pour les premiers. En revanche, les bras morts abritent de nombreux taxons absents dans les autres unités écologiques et qui représentent dans certains cas près de 20 % de la biodiversité totale du tronçon.

Limites et perspectives

Les recherches réalisées restent encore relativement ponctuelles, et certains types de bras et compartiments biologiques n'ont pas été étudiés de façon approfondie. La comparaison d'études menées sur des cours d'eau très différents doit être traitée avec un certain recul.
Les différents résultats obtenus confirment l'intérêt écologique des annexes fluviales. Ils permettent de formuler quelques conclusions en matière de restauration de ces milieux :

- il n'existe pas de "bras mort idéal". Ainsi les milieux les plus oligotrophes peuvent être remarquables par la présence d'espèces végétales rares, mais ils sont généralement pauvres en oiseaux. La conséquence en termes de restauration est qu'il convient de privilégier la diversité des situations recréées, tout en respectant les potentialités écologiques des habitats au sein du secteur fonctionnel ou de l'hydrosystème considéré ;
- les réouvertures de bras par l'amont entraînent généralement une banalisation du milieu, en gommant les différences entre chenal et bras annexe ; elles doivent donc généralement être proscrites. Les reconnections par l'aval peuvent présenter le même impact, mais de façon moins marquée ;
- les oiseaux ne doivent pas être au cœur de la réflexion lors de la restauration d'un bras ; ils ne constituent pas de bons descripteurs écologiques pour ces petits milieux, à cause de leurs besoins importants en surface ;
- toute restauration de bras doit être conçue dans un cadre dynamique : évolution du milieu restauré, possibilité de création de nouveaux bras par la rivière… (voir fiche n°6) ;
- le bras ne doit pas être analysé de façon isolée ; il doit être confronté aux conditions offertes à proximité par les autres annexes et par le chenal ; de même, il est nécessaire de prendre en compte la continuité générale du fleuve (présence d'obstacles…).

CONTACTS

BASSIN DU RHÔNE :
Végétation aquatique :
Gudrun Bornette, UMR CNRS 5023.
bornette@avosnes.univ-lyon1.fr
Oiseaux :
Bernard Frochot, Université de Dijon.
bernard.frochot@wanadoo.fr

BASSIN DE LA GARONNE :
Magali Gérino, 5576 CNRS-UPS, Toulouse,
gerino@cesac.cemes.fr

BASSIN DE LA LOIRE :
Faune benthique :
Jean-Pierre Berton, Université de Tours.
jpberton@univ-tours.fr
Nina Dieu,
adesvv. nina.dieu@free.fr

8 – L'azote dans les zones humides

Des transformations importantes mais variables

L'inondation renforce le rôle des zones humides dans la régulation de l'azote (photo J.L. Michelot)

Problématique

L'azote constitue un élément nutritif très important dans les écosystèmes. Son excès, en particulier sous la forme de nitrates, peut poser des problèmes graves, en matière d'équilibre écologique (eutrophisation) comme en matière de santé publique (dégradation de l'alimentation en eau potable).
Les zones humides transforment l'azote qui y est présent, en limitant souvent les concentrations en nitrates dans les eaux.
Il est important de quantifier cette fonction, de comprendre les mécanismes en jeu, et d'analyser de quelle manière la gestion des zones humides peut les influencer.

Présentation de la recherche

Plusieurs projets du PNRZH ont abordé cette question, en particulier dans les zones humides alluviales de différentes vallées : Rhin et Ill ; Meuse ; Garonne ; Seine ; Essonne (recherche associée au projet de la Garonne).
Des recherches ont également été menées dans d'autres contextes, en particulier dans des petites zones humides de fond de vallon en Bretagne ainsi que dans des tourbières.

Les zones humides, sièges de transformations de l'azote

L'azote entre dans les zones humides sous différentes formes ; il y connaît également des transformations significatives.

LES APPORTS

La présence d'azote dans les zones humides a différentes origines :

- nappe (azote dissous) ;
- inondations (azote dissous, azote particulaire des matières organiques) ;
- fertilisation des terres agricoles (nitrates, ammonium, matières organiques,...) ;
- précipitations, qui peuvent apporter de l'azote par plusieurs mécanismes : fixation microbienne de l'azote atmosphérique (sol et association avec certains végétaux), pluviolessivage de la canopée dans les secteurs forestiers (provenant pour partie des pluies incidentes et de l'excrétion foliaire).

L'étude menée dans la plaine du Rhin et de l'Ill a montré l'importance du lessivage de la canopée ; ces apports correspondent surtout à un recyclage par voie foliaire de l'azote préalablement absorbé par les racines.
La part respective de ces différentes entrées d'azote dans les zones humides est très variable selon les sites.

LES PROCESSUS DE TRANSFORMATION

L'azote est modifié quantitativement et qualitativement dans les zones humides, par plusieurs processus.

Dilution

A Monbéqui, aux abords de la Garonne, on observe une dilution des nitrates dans les eaux souterraines ; cette situation tient au fait que les eaux de la Garonne,

peu chargées de nitrates (10 mg NO_3^- /l, contre 100 mg NO_3^- /l dans la nappe) s'infiltrent en amont du méandre, ce qui a pour conséquence la diminution de la teneur des nitrates dans les eaux souterraines. Cet effet est toutefois limité, les zones d'infiltration de la rivière étant très localisées.

Stockage dans la biomasse végétale

Les zones humides sont généralement très productives sur le plan biologique. Les végétaux peuvent absorber puis stocker dans leurs tissus des quantités importantes de nutriments, qui retournent à l'eau ou au sol lors de la chute des feuilles, par la voie de l'excrétion racinaire ou à la mort des végétaux. En milieu prairial, une partie de l'azote est exportée par le biais de la fauche (dans la plaine de la Meuse, de 57 à 108 kg/ha/an d'azote sont exportés pour une fauche unique).
L'assimilation par la végétation peut être considérable. Dans la vallée de la Meuse, le devenir de l'azote apporté à une prairie humide a été étudié durant deux années (voir tableau ci-dessous). On constate dans ce cas un stockage important d'azote dans la partie aérienne des plantes, mais plus encore dans les racines. L'augmentation de la fertilisation ne s'est pas traduite par une accumulation importante dans le foin, peut-être à cause de conditions climatiques défavorables.

	1997	1998
Apport d'azote sous forme d'engrais minéral (kgN/ha)	60	120
Gain en azote dans la partie aérienne des plantes (kg/ha)	20	34
Gain en azote dans les racines (kg/ha)	29	88

Cet exemple ne peut pas être généralisé, et dans de nombreux cas, un excès de fertilisation se traduit sans doute par un transfert d'azote vers la nappe ou les milieux aquatiques environnants.

Stockage dans le sol

Les zones humides constituent souvent des sites d'accumulation des matières organiques et minérales, en particulier celles déposées par les eaux de débordement en période d'inondation.

Nitrification

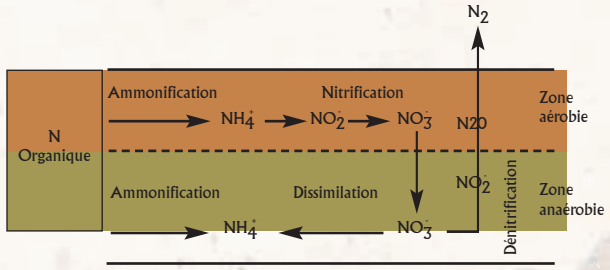
Dans la partie oxygénée du sol, l'azote organique peut être transformé en ammonium, puis en nitrates par le processus de nitrification ; de ce fait, les zones humides peuvent connaître, durant les périodes printanières et estivales, une augmentation, parfois forte, de la teneur en nitrates (cas du champ d'inondation de l'Ill). Ce mécanisme se produit, par exemple, à partir de l'azote organique apporté lors des crues, et transformé en nitrates à la surface du sol.
Les nitrates produits migrent ensuite verticalement, vers les horizons saturés du sol, où ils pourront être dénitrifiés, si les conditions le permettent.

Dénitrification

La dénitrification est la transformation des nitrates en azote gazeux sous l'action de bactéries anaérobies.
Il s'agit de loin du mécanisme le plus important et le plus positif pour l'environnement, en matière de régulation des flux d'azote. On note souvent une alternance dans le temps des fonctions d'absorption (printemps-été) et de dénitrification (automne-hiver). Ce schéma varie en fonction du régime hydrologique des cours d'eau (la dénitrification peut être estivale en cas de hautes eaux d'été).

Les formes de l'azote

L'azote (N) est présent dans l'environnement sous différentes formes : minérales et organiques, solides, dissoutes ou gazeuses.
• Le nitrate (NO_3^-) est la forme dissoute la plus abondante et la plus sujette à transfert.
• L'ammonium (NH_4^+) est issu de la dégradation de la matière organique azotée.
• Les nitrites (NO_2^-) sont issus soit de l'oxydation de l'ammonium, qui se poursuit sous forme de nitrates, soit de la réduction des nitrates en cas de dénitrification.
• Les oxydes nitreux (N_2O) sont produits lors de la dénitrification.



De façon générale, une diminution significative des nitrates

Les zones humides contribuent généralement à une diminution des concentrations de nitrates dans les eaux souterraines qui les traversent, parfois dans des proportions importantes.

Ainsi dans les forêts alluviales du champ d'inondation de l'Ill, cette diminution peut représenter jusqu'à 95 % de la charge des eaux souterraines.
Les travaux du PNRZH ont permis de quantifier cet effet sur certains sites (tableau ci-dessous).

Zone alluviale	Elimination de l'azote Kg/ha de zone humide/an
Garonne	76
Ill	140
Rhin à Rhinau	64
Seine à Romilly	46

A l'échelle de la zone humide, la diminution de la teneur en nitrates s'opère selon deux dimensions :

- verticale. Les concentrations de nitrates dans la solution du sol diminuent du haut vers le bas ;
- latérale. La diminution des concentrations de nitrates s'opère à partir des zones sources (champs cultivés, éventuellement rivière) vers les zones puits (zones humides).

Les facteurs favorables à la diminution des nitrates

L'efficacité des zones humides dans ce domaine est très variable selon les situations. Certains facteurs sont particulièrement influents.

DES APPORTS NUTRITIFS EN QUANTITÉS SUFFISANTES

Pour être fonctionnelles, les bactéries dénitrifiantes ont besoin d'apport de nitrates (il n'y a pas de dénitrification sans nitrates !) et de composés carbonés facilement minéralisables. C'est donc dans la partie supérieure de la nappe que se déroule en général la dénitrification, car on y trouve à la fois nitrate et carbone. Dans les niveaux plus profonds, les nitrates peuvent être présents, sans possibilité de dénitrification par absence de carbone facilement minéralisable, c'est-à-dire susceptible d'être source d'énergie pour les micro-organismes.
La dénitrification a été évaluée le long de la Seine à partir de la mesure de la concentration dans les eaux de l'oxyde nitreux (N_2O), un composé intermédiaire entre les nitrates et l'azote moléculaire N_2. L'analyse dans différents piézomètres met en évidence des situations très variées (tableau ci-après).

Caractère du secteur étudié (Données à 4 mètres de profondeur)	Teneurs en N_2O (ng/l)
Faible apport de nitrates	700
Apports de nitrates, nappe peu profonde, mais teneurs non négligeables d'oxygène dans la nappe	5 770
Apports de nitrates, nappe peu profonde, faibles teneurs d'oxygène dans la nappe	21 300

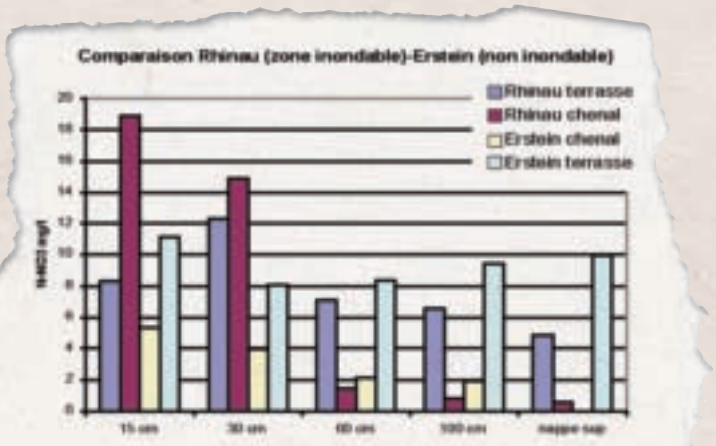
Les émissions de N_2O ont également été évaluées sur plusieurs tourbières, par des analyses sur site et au laboratoire. Malgré la présence d'une grande quantité de carbone, la dénitrification apparaît très faible, voire nulle dans ce milieu. L'origine de cette situation doit être recherchée dans la faiblesse des apports de nitrate.
Des expérimentations en laboratoire ont en effet montré une augmentation de la dénitrification en cas d'apport de nitrate supplémentaire.

UNE NAPPE HAUTE ET RENOUVELÉE

Tout d'abord, il faut rappeler que l'absorption des nitrates par les végétaux est particulièrement importante lorsque la nappe est assez haute, les remontées capillaires bénéficiant aux racines. La dénitrification suppose l'existence de conditions anaérobies (absence d'oxygène dans le sol). Cela demande que la nappe soit haute mais pas obligatoirement à la surface du sol. En effet, les remontées capillaires maintiennent des conditions locales d'oxydo-réduction où nitrification et dénitrification peuvent co-exister, ce qui augmente le processus de dénitrification. Par ailleurs, le temps de séjour de l'eau dans la nappe intervient. Lorsque la nappe connaît un écoulement rapide, la durée de contact entre le nitrate et les populations bactériennes peut être trop brève pour assurer une dénitrification efficace. A l'inverse, lorsque la nappe connaît un écoulement très lent, la dénitrification est forte, mais les volumes concernés sont très faibles. C'est donc dans des situations intermédiaires que la dénitrification est la plus efficace.

DES INONDATIONS RÉGULIÈRES

Dans les secteurs inondables, les eaux d'infiltration entraînent dans le sol les nitrates apportés par les crues et ceux produits localement. Au cours du transfert vertical les concentrations de nitrates dans le sol diminuent alors que ces concentrations semblent stables dans les zones non inondables.



Variation des concentrations de nitrates dans la zone non saturée du sol à différentes profondeurs dans la plaine alluviale rhénane (mesures novembre 1998-juin 1999)

Les rythmes hydrologiques influent sur les mécanismes de transformation de l'azote. Lorsque les inondations sont estivales, la diminution des concentrations des nitrates se fait par assimilation par les plantes et par dénitrification.
En cas d'inondations hivernales, seule la dénitrification intervient. Le rôle des crues sur les quantités dénitrifiées est variable. Dans la vallée de l'Essonne, une augmentation du débit d'un facteur 4 diminue les activités microbiennes de l'ordre de 25 %. Par contre, le long de la Garonne (Monbéqui), la situation semble inverse, comme le montre la production de N_2O, indicateur de dénitrification :

- 2,9 g N_2O/l/min en période de stabilité hydraulique avec un débit de 100 m^3/s ;
- 5,1 g N_2O/l/min en période de crue (débit de 350 m^3/s).

DES TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

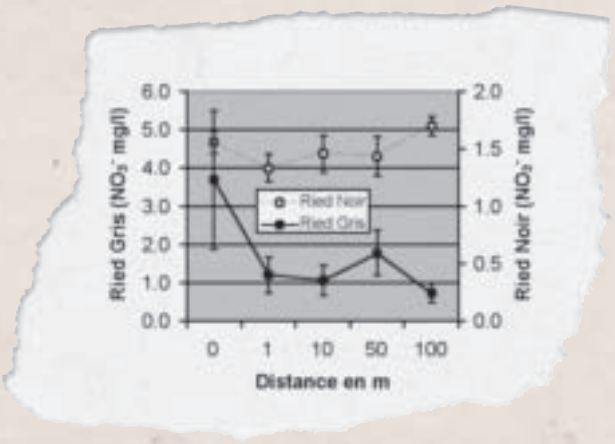
Les recherches menées dans la vallée de l'Essonne ont montré que l'élévation de la température favorisait les processus de dénitrification des nitrates.

Les secteurs les plus efficaces : zones humides fonctionnelles et interfaces

La combinaison des facteurs décrits précédemment explique que certaines zones humides (ou parties de zones humides) sont plus efficaces que d'autres.

LES ZONES HUMIDES FONCTIONNELLES

Les zones humides les plus efficaces sont globalement celles qui bénéficient d'un fonctionnement où alternent périodes de hautes eaux (dénitrification) et de basses eaux (nitrification, absorption des nitrates par la végétation). La comparaison entre l'île de Rhinau, encore submersible et le secteur d'Erstein, protégé des crues depuis 30 ans, a largement confirmé ce schéma.
Dans une autre partie de la plaine rhénane, on note une forte différence (voir figure ci-dessous) de comportement entre le ried gris (champ d'inondation de l'Ill caractérisé par le type de sol argileux de couleur grise) et le ried noir, zone humide caractérisée par l'accumulation de matière organique donnant une couleur noire aux sols.
Le ried gris est plus efficace que le ried noir en matière de diminution des teneurs en nitrates. Cette différence s'explique probablement par certains caractères du ried noir (présence plus forte de matière organique produisant des nitrates par nitrification) et du ried gris (inondations plus fréquentes, battements de la nappe plus importants).

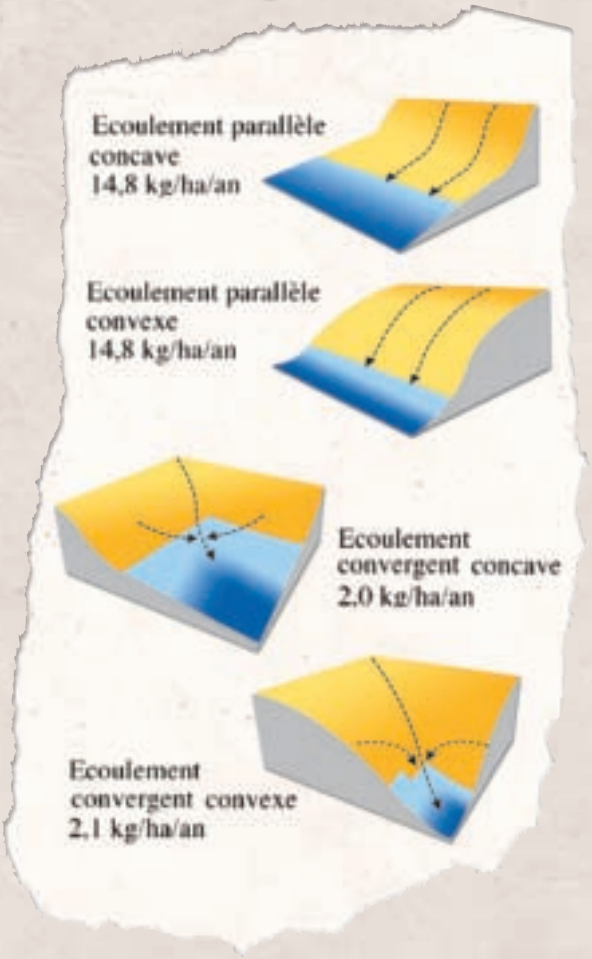


Variations des concentrations de nitrates sur un transect de 100 m depuis l'entrée de la forêt dans le ried gris et dans le ried gris.

LE RÔLE DES INTERFACES

La diminution des concentrations de nitrates peut être particulièrement importante à l'interface nappe-rivière ; une diminution significative peut se produire sur moins de un mètre (Essonne, Ill), quelques dizaines à une centaine de mètres sur la Garonne.
En bordure de Garonne, à Monbéqui, les parcelles dans lesquelles la dénitrification la plus importante peut être observée sont celles situées dans les zones d'infiltration des eaux de surface. La matière organique nécessaire aux processus microbiologiques est apportée par les eaux de surface, tandis que les eaux de la nappe fournissent les nitrates. Dans certaines zones éloignées des zones d'infiltration mais contenant des nitrates, la matière organique apparaît comme le facteur limitant de la dénitrification.
En Bretagne, une approche théorique par modélisation, pour partie validée expérimentalement, a montré que la morphologie des bassins versants influence fortement

l'efficacité dénitrifiante des zones humides, en particulier en fonction de l'importance des interfaces entre versants et zones humides (figures ci-dessous).



Dénitrification moyenne annuelle simulée, rapportée à la surface totale du bassin versant (Les zones bleues foncées correspondent à la dénitrification maximale)

Ainsi, le facteur le plus important pour évaluer l'efficacité d'une zone humide est bien plus la longueur de l'interface zones humides/versants terrestres que la surface totale de la zone humide. Ce sont généralement les premiers mètres de contact qui assurent la plus grande partie de la dénitrification.

Limites et perspectives

Les recherches menées dans le cadre du PNRZH ont montré l'importance, mais aussi la variabilité du rôle des zones humides en matière de diminution de la charge azotée des milieux humides. S'il est clair que cet effet existe, il est souvent difficile d'en prévoir les conséquences sur la qualité des écosystèmes à l'échelle de l'ensemble d'un bassin versant.

Les impacts des activités humaines sur les hydrosystèmes peuvent fortement réduire le rôle des zones humides en matière de régulation de l'azote :

- diminution de la fréquence d'inondation ;
- réduction des fluctuations de la nappe ;
- retournement des prairies et autres destructions de la végétation naturelle.

Impact du retournement des prairies sur les concentrations des nitrates dans la solution du sol de la vallée de la Meuse

Fertilisation	Nitrates dans la solution du sol à 40cm (mg/l)	
	Prairie	Terre labourée
60 kg/ha/an	<0,2	20
120 kg/ha/an	2	200

Les résultats des travaux permettent de formuler quelques préconisations opérationnelles visant à optimiser la fonction de diminution des nitrates dans les zones humides. Il s'agit entre autres de :

- conserver ou restaurer les champs d'inondations ;
- conserver ou restaurer les battements de nappe ;
- conserver ou restaurer une végétation naturelle (forêt, prairies) ;
- favoriser les surfaces de contacts entre les zones humides et leur environnement.

L'azote joue un rôle majeur dans les écosystèmes, mais il ne doit pas faire oublier les autres nutriments. Le phosphore constitue, en particulier, le premier des facteurs d'eutrophisation dans les milieux aquatiques ; à ce titre, sa régulation dans les zones humides mérite d'être mieux connue.

CONTACTS

RESPONSABLE DE L'ANIMATION "BIOGEOCHIMIE" :
Michèle Trémolières, CEVH/ULP, Institut de botanique, 28 rue Goethe, 67083 Strasbourg.
Tel 03 90 24 18 75,
tremolieres@geographie.u-strasbg.fr

BRETAGNE :
Patrick Durand,
patrick.durand@roazhon.inra.fr
Gilles Pinay,
pinay@cefe.cnrs-mop.fr

MEUSE :
Laurence Krebs, Université de Metz,
l.krebs@caramail.com

GARONNE :
José Miguel Sanchez Pérez, CESAC, actuellement Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes, LEH,
sanchez@ecolog.cnrs..fr

TOURBIÈRES :
André-Jean Francez,
andre-jean.francez@univ-rennes1.fr

9-Entre Scarpe et Escaut

Genèse et fonctionnement de zones humides d'affaissement minier

Exemple d'un étang d'effondrement près de Condé sur Escaut. La végétation est constituée de différentes ceintures d'hydrophytes, d'hélophytes (phragmites, massettes), et de saules blancs et cendrés.(Photo Daniel Petit)

Problématique

Au nord de la France, les zones humides situées entre Scarpe et Escaut présentent une grande originalité : leur caractère humide est entretenu par l'affaissement progressif de cavités minières après arrêt de l'exploitation (charbon). Les zones humides naturelles avaient été asséchées du fait du développement industriel et urbain (1840-1990).
La diminution des prélèvements aquifères et surtout les affaissements miniers contribuent à leur restauration, voire à leur ennoyage permanent.
Dans une région densément peuplée, la compréhension du fonctionnement complexe de ces zones humides représente un enjeu très fort vis-à-vis de l'alimentation en eau potable, de l'urbanisme, de la biodiversité…

Présentation de la recherche

Le projet de recherche visait à mieux comprendre le fonctionnement de ces zones humides, dans une optique d'aide à la gestion.

Deux sites-ateliers ont été choisis :
Mare à Goriaux et Condé sur Escaut.
Le projet comportait plusieurs volets complémentaires :

- délimitation des zones humides ;
- hydrologie ;
- biodiversité ;
- perception sociale.

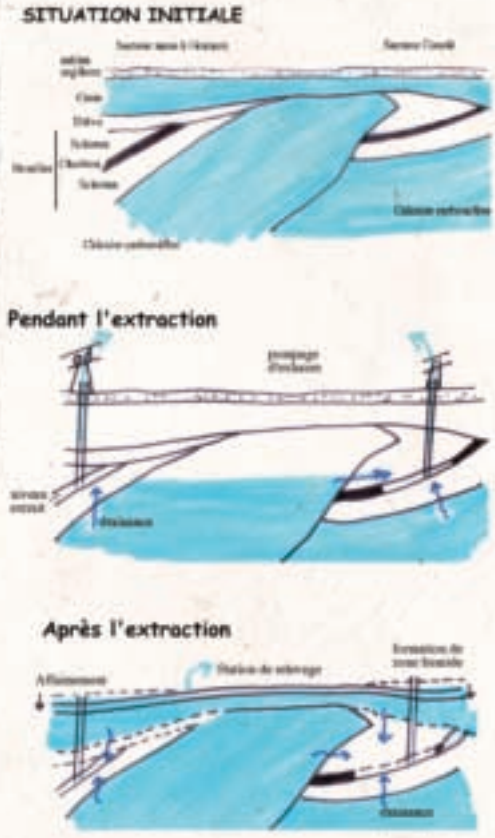
Genèse des zones humides : une création artificielle dans un contexte favorable

HISTORIQUE

Des zones humides se sont développées naturellement sur les terrains peu perméables et très plats qui supportent les vallées de l'Escaut et de la Scarpe. La mise en valeur agricole (drainage), l'industrialisation et l'urbanisme corrélatif ont entraîné la disparition du caractère humide de la plupart de ces sites.

L'extraction du charbon a modifié la situation. Durant l'extraction, il était nécessaire d'assurer un pompage continu de l'eau souterraine pour éviter l'ennoyage des puits et des chantiers d'extraction, avec rejet dans les rivières proches ; les pompages d'exhaure ajoutaient de l'eau souterraine aux flux superficiels.
Les extractions ont provoqué une modification de la topographie de surface, par affaissement (processus lent affectant un territoire vaste –plusieurs hectares-) ou effondrement (processus brutal, très localisé –quelques ares-, créant un escarpement au sol). Ces phénomènes ont été rendus possibles par l'absence de remblaiement de la plupart des cavités après extraction.
Cette évolution topographique, qui a accompagné l'extraction, dès 1850, a fait passer dans certains secteurs la surface du sol sous le niveau piézométrique de la nappe la plus superficielle, générant des zones inondables de façon irréversible. De plus, au cours de la phase d'effondrement, des fissures se sont parfois ouvertes dans le massif rocheux, modifiant les écoulements souterrains.

Aujourd'hui, l'extraction étant arrêtée, l'exhaure n'est plus nécessaire. Il n'y a donc plus d'apport d'eau souterraine au réseau hydrographique. En revanche, des stations de relevage des eaux pompent l'eau (jusqu'à 5000 m^3/jour pour certaines stations) pour rétablir un écoulement superficiel qui ne se fait plus naturellement, et ainsi éviter l'ennoiement de certains territoires.



Zones en bleu : terrains saturés en eau.
Traits bleus : axes principaux d'écoulement des eaux

Ne sont pas représentées ici la nappe des sables superficiels ni celle de la plaine alluviale de la Scarpe ou de l'Escaut. Ces nappes sont à fleur de sol et déterminent les zones humides.
Par ailleurs un aquifère est en cours de constitution dans le houiller fissuré par les affaissements.

L'ORIGINE DE L'EAU DES ZONES HUMIDES

L'eau présente dans les zones humides néoformées par affaissement topographique peut avoir au moins trois origines non exclusives :

- affaissement topographique atteignant le niveau de la nappe la plus superficielle ;
- tassement créant un point bas vers lequel convergent les ruissellements ;
- ennoiement de dépressions par remontée de nappe, à la suite d'une diminution des pompages et éventuellement de précipitations importantes.

Malgré leur origine artificielle, ces zones humides sont colonisées par une végétation typique des bords d'étangs.

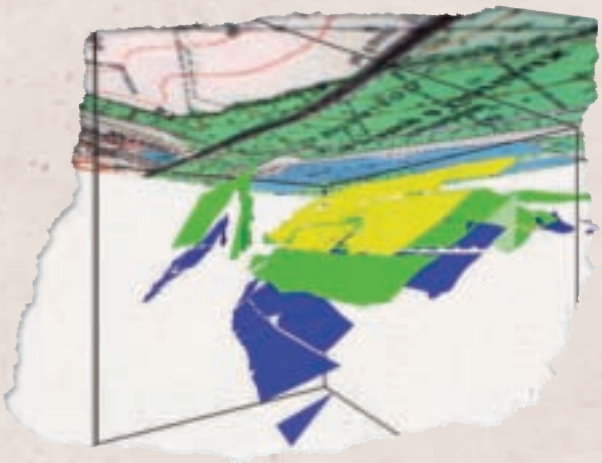
DES ZONES HUMIDES EN EXPANSION

La tendance actuelle est plutôt à l'extension des zones humides.
L'arrêt des pompages d'exhaure entraîne inéluctablement un remplissage progressif des terrains houillers excavés, lui-même peut être responsable de nouveaux affaissements. D'un autre coté, la remontée des eaux dans les terrains houillers provoque un gonflement des terrains auparavant désaturés. Ce gonflement est toutefois beaucoup plus limité que l'affaissement (de l'ordre de 10% de ce dernier).
Les mouvements de sol à venir sont sans comparaison avec ceux qui se sont produits jusqu'ici ; là où ils se produiront, ils seront de l'ordre de 0,5 à 1 mètre dans les 3 à 5 prochaines décennies, contre 1 à 10 m durant les 150 dernières années.

Dans le cadre du PNRZH, les chercheurs ont mené une reconstitution des situations historiques, à partir de plusieurs sources :

- analyse des cartes anciennes ;
- analyse des archives minières ;
- étude géologique.

Ces connaissances ont permis la mise au point de modèles qui permettraient de prévoir la reprise éventuelle d'affaissement en fonction de l'évolution aquifère des terrains houillers. La modélisation en trois dimensions des zones exploitées permet de mieux comprendre les affaissements et écoulements souterrains.



Parties exploitées de 3 veines de charbon sous la mare à Goriaux. La carte topographique à 1:25 000 est vue du dessous.

D'autres facteurs contribueront probablement au développement futur des zones humides :

- imperméabilisation croissante des terrains, entraînant un accroissement des débits de crues ;
- arrêt du fonctionnement de certaines stations de relevage, du fait de leur coût excessif, et du transfert de cette mission des Charbonnages de France (dissolution de l'entreprise) vers les collectivités.

F. Meilliez.

Entre Scarpe et Escaut, non loin de la confluence. Un drain (cours d'eau naturel ?) et une pâture mise en culture.

Limites et perspectives : des choix d'aménagement à venir

L'étude de ces systèmes néoformés par des perturbations anthropiques du sous-sol est loin d'être achevée.

D'ores et déjà, par couplage de données géologiques et hydrauliques, des modélisations en trois dimensions des zones anciennement exploitées permettent de mieux comprendre les causes des affaissements et des écoulements souterrains. L'étape ultérieure consistera à faire des prévisions à moyen-long terme de ces mécanismes.

La mise en évidence d'une tendance au développement des zones humides impose aux gestionnaires de ces espaces d'imaginer des choix d'aménagement. Convient-t-il de maintenir éternellement les niveaux d'eau actuels par des pompages pour contrer cette évolution ? Peut-on imaginer des modes d'occupation de l'espace qui permettraient une augmentation progressive de la présence superficielle d'eau, tout en sachant que celle-ci pourrait favoriser une reprise d'affaissement? Un telle option poserait des problèmes pour certaines activités humaines, mais elle ouvrirait des perspectives intéressantes pour le développement de la biodiversité, peu mise en valeur dans cette région. En effet, chaque nouvelle zone humide néoformée sera inévitablement le siège d'un accroissement local de la biodiversité.

Un tel motif peut-il suffire à justifier l'arrêt des pompages de profondeur ou de surface ?
Seuls des choix en matière d'aménagement global du territoire peuvent répondre à ces difficiles questions.

CONTACTS

CHEF DE PROJET :
Daniel Petit, Laboratoire de Génétique et Evolution des Populations Végétales, CNRS 8016, Université des Sciences et Technologies de Lille, 59655 Villeneuve d'Asq cedex, tel 03 20 43 40 76, daniel.petit@univ-lillel.fr

HYDROLOGIE / HYDROGÉOLOGIE :
Francis Meilliez, laboratoire de Sédimentologie et Géodynamique, Université de Lille, francis.meilliez@univ-lillel.fr

10-La Camargue

Un fonctionnement hydrologique entre nature et artifice

Le Vaccarès, le plus grand des étangs de Camargue (photo J.L. Michelot)

Problématique

La Camargue est sans doute la zone humide la plus célèbre de France, justement réputée pour la richesse de sa faune et l'originalité de ses paysages.
Résultant de centaines d'années d'actions des hommes sur leur environnement, le fonctionnement hydraulique de ce système est particulièrement complexe et reste encore mal connu. Le nombre de canaux d'irrigation et de drainage, et la complexité de leurs usages rendent difficile l'évaluation des flux d'eau et de matière.
Les conséquences de ce fonctionnement sont pourtant fondamentales, en particulier en matière de salinité des eaux, facteur clé pour le maintien du bon état écologique de la Camargue.
Aujourd'hui, la mise en place d'une gestion globale et concertée exige de comprendre les mécanismes qui régissent ce delta endigué.

Présentation de la recherche

La recherche menée dans le cadre du PNRZH a porté sur "l'île de Camargue" ou Grande Camargue, limitée par les deux bras du Rhône. L'objectif de ce travail a été de parvenir à une compréhension globale du fonctionnement hydrologique, prenant en compte les interactions entre les composantes hydrauliques, écologiques et sociales. Il devrait, à terme, en résulter des outils d'aide à la gestion.

Les travaux ont été particulièrement riches dans trois domaines :

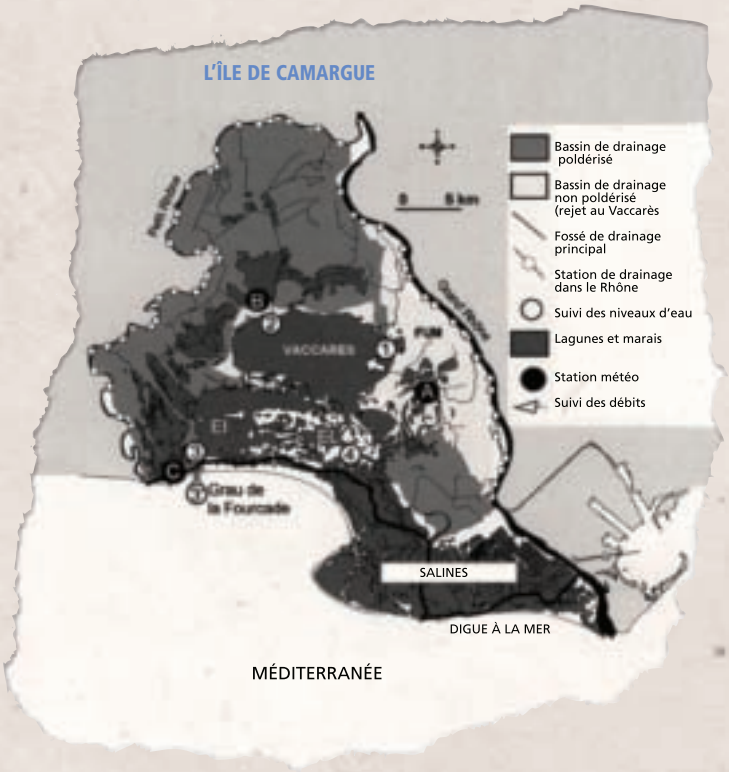
- fonctionnement hydrologique global ;
- modèle multi-agents d'aide à la décision (voir cahier Gestion) ;
- relation sel-eau-végétation (voir fiche n°II).

Un fonctionnement complexe et marqué par l'action de l'homme

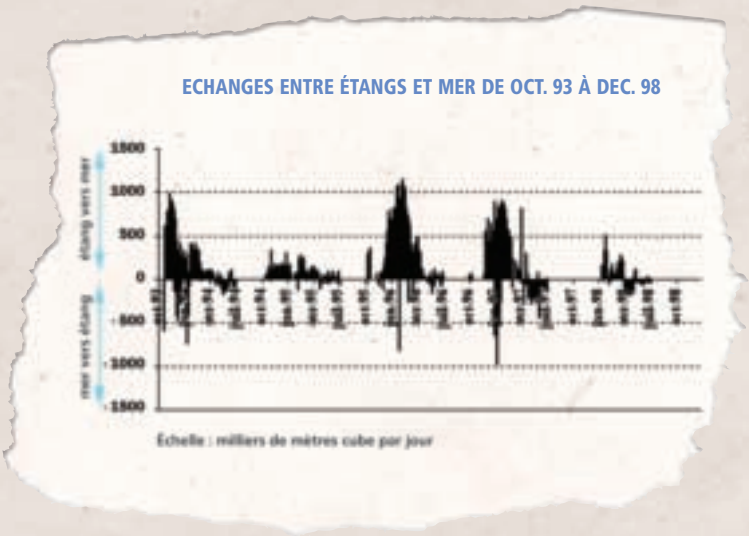
UN DELTA SANS FLEUVE ?

La Camargue constitue un système très artificialisé. Débuté dès l'époque romaine, l'endiguement total du delta a été achevé en 1869. Hors rupture des digues, les eaux du Rhône ne pénètrent plus naturellement dans le delta.

L'alimentation de la Camargue en eau douce provient principalement des 300 à 400 millions de mètres cube d'eau pompés annuellement dans le Rhône pour l'irrigation des rizières (environ 12 000 hectares).
Ces eaux alimentant le delta sont dirigées par un système très complexe de canaux vers les rizières et les marais à vocation cynégétique ou naturaliste.
Certains secteurs sont dits "poldérisés" ; l'eau résiduelle de l'irrigation (environ 50 % du volume total entrant en Camargue) y est renvoyée vers le Rhône par le biais de stations de relevage. Dans les secteurs non poldérisés, l'eau s'écoule directement vers l'étang du Vaccarès.



Les vannes sont gérées pour permettre la vidange des étangs (ouverture par vent du nord en automne), mais aussi pour faciliter l'entrée des poissons de mer dans les étangs (ouverture partielle de février à juin).
Par vent du sud, le sens d'écoulement s'inverse du fait de l'absence de relief.



DES PRÉCIPITATIONS RÉDUITES ET IRRÉGULIÈRES

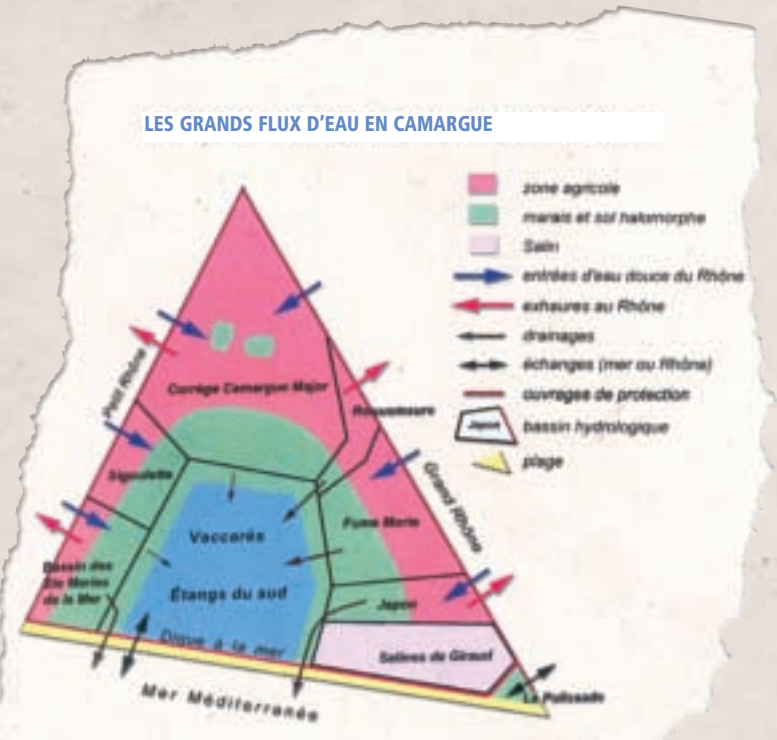
La Camargue, située en zone méditerranéenne, connaît un important déficit hydrique, réparti principalement entre mars et septembre (la pluviosité annuelle y est de l'ordre de 600 mm, pour une évapotranspiration potentielle de 1300 mm). Un autre trait important du climat camarguais est la très forte irrégularité des précipitations (de 250 à 1050 mm selon les années sur la période de 1963 à 1999), rendant impossible le calcul de bilans à partir de données portant sur un faible nombre d'années de suivi.

Les rythmes hydrologiques apparaissent aujourd'hui paradoxaux en Camargue, puisque la période de sécheresse naturelle correspond en fait à une période humide pour la végétation, du fait des apports massifs destinés à l'irrigation. La très forte variabilité du fonctionnement naturel est largement estompée par le caractère régulier des apports anthropiques.

DES ÉCHANGES AVEC LA MER CONTRÔLÉS PAR LES HOMMES

Le lien entre le delta et la mer s'effectue par une ouverture ("grau"), régulée par le "pertuis de la Fourcade", ouvrage vanné.

Les marais salants constituent un système à part, déconnecté du reste du delta. L'eau de mer introduite est dirigée vers différents étangs pour permettre une concentration progressive de la salinité jusqu'à la récolte du sel.



Dervieux, 2000

Un modèle pour comprendre et gérer le delta

L'étude hydrologique de la Camargue est particulièrement complexe, en raison de la platitude du relief et de l'anthropisation du système. Les méthodes hydrologiques classiques ne pouvant pas être utilisées dans un tel contexte, il a été nécessaire de développer une approche originale.

La modélisation mathématique s'est construite en deux sous-modèles emboîtés :

- modèle de drainage (bassin-versant) ;
- modèle hydrodynamique du système Vaccarès.

Ces deux éléments sont intégrés dans le modèle Hydrologie de l'Ile de Camargue (HIC).

BASSIN-VERSANT : MODÈLE DE DRAINAGE

Ce modèle vise à calculer les entrées d'eau dans le système Vaccarès, à partir des flux entrant ou sortant du bassin-versant (Camargue à l'amont des étangs) :

- pluies ;
- entrées d'eau d'irrigation ;
- évapotranspiration.

La mise en place de ce modèle a nécessité un important travail méthodologique.

Certains éléments du fonctionnement ont pu être analysés pour le bassin du Fumemorte, plus vaste bassin non poldérisé du delta, pour lequel étaient disponibles certaines données (niveaux d'eau…).
Les volumes pompés au Rhône ne sont pas quantifiés par les usagers. Tout un ensemble de données y a permis d'estimer ces volumes (caractères des installations, carnets de pompages, factures d'électricité…).
Sur ce bassin, les débits de sorties étaient connus. Il a donc été possible de calculer la différence entre entrées et sorties, qui correspond à l'évapotranspiration.

En parallèle, les surfaces cultivées en riz au cours des dix dernières années environ ont été évaluées par exploitation des images satellitaires et des photographies aériennes.
Le croisement de ces données a permis d'estimer la consommation en eau par hectare de riz.
Ces valeurs ont pu être interpolées sur l'ensemble des autres sous-bassins, en excluant ceux dont les eaux sont évacuées vers le Rhône.
A partir de ces éléments, il est possible d'estimer les volumes d'eau entrant dans le Vaccarès.

SYSTÈME VACCARÈS

Le système Vaccarès est constitué de trois unités (Vaccarès, étangs inférieurs est et ouest).
Le modèle calcule les échanges entre unités et avec l'extérieur en fonction de plusieurs paramètres :

Données statiques

- Topographie, bathymétrie des étangs ;
- Rugosité du fond, estimée à partir des cartes de la végétation aquatique.

Données variables

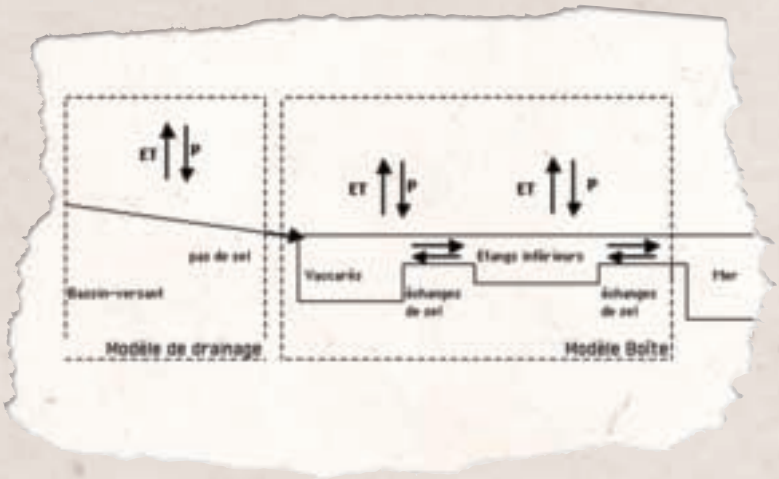
- Vent ;
- Niveau des étangs ;
- Niveau de la mer ;
- Etat du grau (ouvert-fermé) ;
- Entrées par le bassin-versant ;
- Pluie et évaporation.

Ce modèle hydrodynamique est bidimentionnel et horizontal ; il considère que le fond des étangs est colmaté (pas d'échange avec la nappe) et que la masse d'eau est homogénéisée lors des épisodes de vent.

Le vent constitue le principal facteur qui détermine les échanges entre étangs et mer. Le modèle calcule l'importance des échanges pour un épisode de vent donné (durée, vitesse, direction).
Un calcul de l'évolution des teneurs en sel des différents étangs est réalisé à partir de ces données.

MODÈLE GLOBAL

Le modèle global (HIC) intègre l'ensemble des éléments présentés précédemment (voir schéma ci-dessous).



Source : Chauvelon 2003

RÉSULTATS ET CALAGE

Les simulations réalisées jusqu'à présent ont servi à caler le modèle, à partir des données de la période 1993-1998. Elles ont montré que le modèle était capable de bien reproduire des événements passés pour lesquels on dispose d'observations.
Le modèle a également donné de premières indications intéressantes sur le fonctionnement du système. Ainsi, il est apparu que les apports du bassin versant n'avaient qu'un faible rôle sur les échanges en eau à l'intérieur du système Vaccarès. L'importance du rôle du vent a été confirmée.

Trois types de situations hydrologiques ont pu être identifiés, selon le cycle des cultures et le volume d'eau entrant :
Période culturale : apport d'eau douce important, grau fermé, niveau de remplissage des étangs variable.
Hors période culturale (grau généralement ouvert) :
- périodes de forts apports du bassin versant (crues) ;
- périodes d'étiage.

Limites et perspectives

Ce projet de recherche est de longue haleine ; s'il a d'ores et déjà permis de mieux connaître le fonctionnement du delta, le modèle se construit progressivement et doit encore être affiné :
- amélioration du modèle du bassin-versant ;
- amélioration du calage, sur la base de données observées récentes ;
- intégration des résultats du modèle dans le modèle multi-agents (voir cahier Gestion). Le principe de ce dernier modèle est de confronter une situation hydraulique aux réponses possibles des acteurs de la gestion de l'eau, puis d'analyser les conséquences de ces réponses en matière de satisfaction des différents partenaires. Il permet alors de choisir la modalité de gestion la plus intéressante pour tous. Ce modèle n'est pas un outil de gestion, mais un outil d'aide à la réflexion pour une gestion globale de l'eau.

A terme, ces différents modèles pourront être pleinement utilisés et intégrés dans des processus de gestion, par exemple pour prévoir les échanges et les teneurs en sel dans les étangs en cas d'augmentation ou de diminution de l'irrigation au cours des prochaines années.
Enfin, l'approche méthodologique originale développée au cours de cette recherche peut être transférable pour la modélisation d'autres hydrosystèmes complexes.

CONTACTS

CHEF DE PROJET :
Bernard Picon, laboratoire DESMID 1, rue Parmentier, 13200 Arles, tel 04 90 93 86 66, desmid@wanadoo.fr,

HYDROLOGIE/HYDRAULIQUE :
Marie-George Tournoud, Univ. Montpellier II, tournoud@msem.univ-montp2.fr
Philippe Chauvelon, Station biologique de la Tour du Valat, chauvelon@tourduvalat.org

MODÉLISATION MULTI-AGENTS :
Alain Dervieux, desmid@wanadoo.fr

A. Dervieux

11-La végétation des zones humides littorales

Marquée par l'interaction complexe de l'eau et du sel

Vue aérienne du marais de Brouage, anciennes salines et marais "plat". (photo E. Kerneis)

Problématique

Les marais littoraux, issus d'une sédimentation en milieu marin, et donc salés à l'origine, présentent une grande extension spatiale en France, tant sur la façade atlantique (Marais de l'Ouest) que sur la Méditerranée (Camargue, lagunes languedociennes).
L'alimentation en eau et la salinité de l'eau et du sol conditionnent en grande partie la composition de leurs communautés végétales et animales.
La gestion de ces espaces doit prendre en compte ces paramètres, très dépendants des activités humaines.

Présentation de la recherche

Deux projets de recherche du PNRZH ont porté sur ce thème.

MARAIS DE L'OUEST

Sur la façade atlantique, la végétation des prairies naturelles de marais a été étudiée sur deux sites gérés en eau douce :
- Breuil-Magné (marais de Rochefort) : 30 ha de marais plats gérés par la Fédération des chasseurs de Charente-Maritime, pour l'accueil des oiseaux d'eau
- Brouage : 170 ha d'anciennes salines acquises par le Conservatoire du Littoral.

Les travaux de recherche ont porté sur la relation entre groupements végétaux et niveaux d'hydromorphie et de salinité des sols.

E. Kerneis

Troupeau charolais dans le marais de Brouage, le long d'un canal.

CAMARGUE

Le travail a porté sur l'île de Camargue, délimitée par les deux bras du Rhône.
La recherche visait à comprendre comment la gestion de l'eau et les évènements hydro-climatiques affectent la structure et la dynamique des écosystèmes.

L'analyse est déclinée en 2 volets :
- étude des conséquences du fonctionnement hydrodynamique du Vaccarès et des étangs du sud sur la végétation aquatique et certaines espèces de crustacés (crevettes) ;
- étude des conséquences des aménagements et de la gestion hydraulique sur la végétation aquatique des marais périphériques.

J.L. Michelot

J.L. Michelot

La Camargue présente plusieurs facettes. Au centre, l'étang du Vaccarès est une lagune dont la salinité est actuellement d'environ 15g/l. Autour du Vaccarès, la gestion hydraulique des marais périphériques repose sur les apports d'eau douce amenée depuis le Rhône (photo du haut). Au Sud, la Camargue laguno-marine est alimentée par des eaux très salées (photo du bas).

Des milieux structurés par l'action de l'homme et de la nature

DES MARAIS AMÉNAGÉS

Les marais littoraux sont historiquement des milieux structurés par l'action conjuguée des mécanismes naturels et de l'homme.
Les deux régions étudiées sont marquées par la platitude du relief et la relation entre eaux douces et eaux salées.
Une différence importante repose sur le climat méditerranéen de la Camargue, favorisant dans les conditions naturelles, l'assèchement temporaire des marais et la concentration du sel durant l'été. En revanche dans les Marais de l'Ouest, un bilan hydrique positif favorise le dessalement progressif du sol.

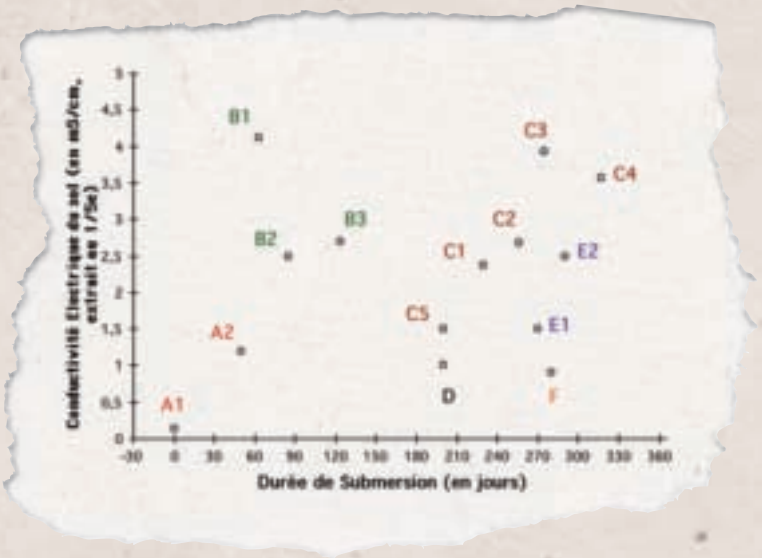
Le fonctionnement hydrologique des deux régions a été profondemment modifié par l'homme. Des digues limitent ou empêchent les intrusions d'eaux marines et la submersion par les eaux douces en provenance du bassin versant. Les entrées et sorties d'eau (Camargue) sont contrôlées par des ouvrages de régulation, connectés à un dense réseau de canaux et fossés.
Dans les Marais de l'Ouest, la topographie du terrain est localement artificialisée (micro reliefs liés à l'ancienne exploitation du sel), la microtopographie conditionnant fortement hydromorphie et salinité résiduelle du sol.

LES GRANDS FACTEURS DE RÉPARTITION DES GROUPEMENTS VÉGÉTAUX

Dans les deux régions, les chercheurs ont relié des relevés de végétation aux facteurs descriptifs du milieu.
Les principaux paramètres explicatifs ont pu être mis en évidence (tableau ci-dessous).

	Camargue	Marais de l'ouest
Localisation	Marais périphériques (doux à saumâtres)	Marais doux et desséchés
Paramètres explicatifs (par ordre décroissant d'importance)		
Eau	1. Importance des aménagements hydrauliques	1. Hydromorphie (durée et hauteur de submersion hivernale)
Sel	2. Salinité	2. Salinité résiduelle du sol
	3. Temporalité (eaux permanentes ou saisonnières)	
Autres facteurs	4. Taux de matière organique du substrat	3. Pratiques agricoles (conditions de pâturage)

Les études confortent les rôles déterminants de la salinité et de l'hydromorphie dans la répartition spatiale des communautés végétales. (voir figure ci-dessous).



Répartition des communautés végétales en fonction de la durée annuelle de submersion et de la salinité du sol (marais de l'Ouest). Les codes et les couleurs correspondent aux groupements végétaux :
A : Carici divisae-Lolietum pérennise
B : Apopecuro bulbosi-Juncetum gerardii
C : Scirpetum maritime compacti
D : Ranunculo ophioglosse-Oenanthum fistulosae
E : Heleochareto – Hippuridetum vulgaris
F : Caricetum ripariae

LE FONCTIONNEMENT HYDRIQUE, FACTEUR PRÉPONDÉRANT

Le régime hydrique influence fortement la composition et la répartition des communautés vivantes. Cet effet est direct (hauteurs d'eau, fluctuations, assèchements) ou indirect (influence de l'alimentation en eau sur la salinité).
Plusieurs caractéristiques jouent un rôle majeur sur le régime hydrique :

Le rythme des assèchements et des inondations constitue un facteur écologique primordial, distinguant marais temporaires et plans d'eau permanents.
Dans les marais de l'Ouest, la durée de submersion conditionne largement la composition des communautés végétales prairiales.

La gestion des flux d'eau est très importante pour les écosystèmes.
En Camargue, un indice d'aménagement hydraulique (densité de digues et canaux) explique particulièrement bien la composition des communautés végétales. Ces dernières décennies ont connu un développement de l'irrigation. L'eau, introduite initialement pour les besoins de la riziculture, devient disponible pour la gestion des milieux humides (chasse…). Ceci induit une tendance générale à l'adoucissement et un accroissement des communautés végétales liées à l'eau douce.

LE SEL : UN FACTEUR FAVORISANT UNE VÉGÉTATION ADAPTÉE

La salinité influence négativement la production de nombreuses espèces végétales, par un effet toxique direct du sodium et du chlore et par un effet indirect, en limitant, par différence de pression osmotique entre la plante et l'eau, l'accès à l'eau et aux sels nutritifs.
Aux plus forts niveaux de salinité, un faible nombre d'espèces hautement adaptées parvient à se maintenir (salicornes en particulier). Ces espèces sont peu nombreuses, mais plus originales (espèces spécialisées et méditerranéennes) que les espèces d'eau douce.
A l'opposé, à de très faibles niveaux de salinité, les espèces les plus compétitives occupent les milieux. Dans les deux cas, la diversité biologique est minimale.
A des niveaux intermédiaires, cependant, les espèces compétitives vont persister et les espèces colonisatrices vont exploiter les aires perturbées, permettant une diversité plus élevée. A ce titre, la gestion hydraulique actuelle en Camargue apparaît plutôt favorable à une plus grande diversité biologique, parce qu'elle permet la présence de milieux contrastés. Mais cette diversité artificielle est produite bien souvent au détriment du caractère méditerranéen de la zone humide littorale.

Une situation complexe : le cas du Vaccarès

Les travaux menés dans le cadre du PNRZH confirment l'importance du rôle des facteurs hydriques et de la salinité, mais ils mettent aussi en évidence la grande complexité des situations. Les facteurs ne doivent pas être considérés séparément, mais de façon globale, dans l'espace et dans le temps. Le suivi de la végétation du Vaccarès a permis de montrer que la réponse de l'écosystème aux changements de milieu étaient plus complexe que ce qui était attendu.

DES FLUCTUATIONS TRÈS MARQUÉES DE LA SALINITÉ

Ce plan d'eau a connu de très fortes évolutions au cours du temps :

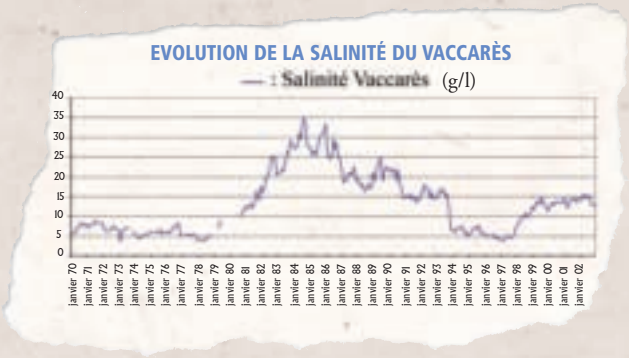
- jusqu'au début des années 1970, la salinité des étangs du système Vaccarès était basse (moins de 5 g/l), à cause de l'importance des rejets d'eau douce provenant de l'irrigation liée au développement alors important de la riziculture ;
- au début des années 1980, la salinité a fortement augmenté (jusqu'à 35 g/l) par la conjonction de deux processus : la diminution de la riziculture (moins

d'apports d'eau douce) et l'introduction d'eau de mer (volontaires et accidentelles) ;

• en octobre 93 et janvier 94, des crues quasi-centennales du Rhône ont provoqué des ruptures des digues et le déversement brutal de millions de mètres cube d'eau douce dans les étangs. Ce phénomène a accéléré (passage de 14,5 g/l à 6,5 g/l en quelques jours) la baisse de salinité du Vaccarès déjà amorcée par un redéploiement de la riziculture ;

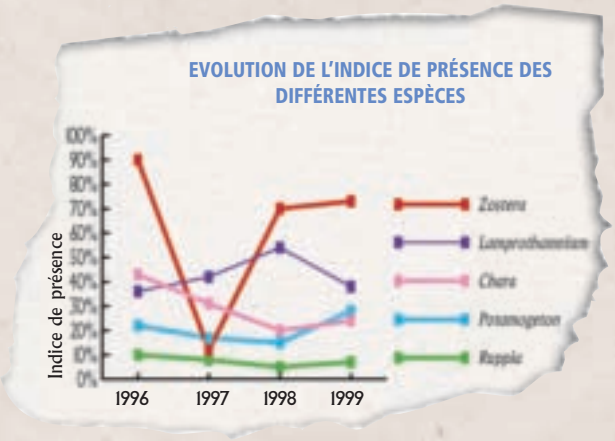
• les fortes précipitations des années suivantes ont maintenu un niveau de salinité très faible (3 g/l en 1997) ;

• à partir de 1997, à la faveur d'années plus sèches et d'une volonté collective et consensuelle des gestionnaires et des acteurs de l'eau, la salinité a augmenté à nouveau, en fonction d'objectifs (retour à environ 15 g/l).



UNE RÉPONSE INATTENDUE DE L'ÉCOSYSTÈME

Au début des années 1980, l'augmentation de la salinité a entraîné l'apparition et le développement de l'herbier à zostères, plante aquatique liée aux eaux marines. Les crues de 1993 et 1994 ont provoqué une régression considérable, mais décalée dans le temps, des zostères, sans augmentation importante des espèces d'eau douce.



Différents éléments peuvent permettre d'expliquer la réponse du milieu.

DES EFFETS INDIRECTS

Les recherches ont montré que la répartition des herbiers aquatiques était moins contrôlée par la salinité que par l'éclairement sub-aquatique. Le faible éclairement a affecté toutes les espèces, et en particulier les zostères, qui colonisent des zones profondes et donc sujettes à de fortes diminutions de l'éclairement. Cette évolution est probablement liée à la diminution de la salinité, qui en limitant la floculation des argiles, a provoqué une diminution de l'éclairement, préjudiciable à la végétation aquatique.

LE TEMPS EST UN AGENT DE COMPLEXITÉ

La réaction des écosystèmes aux changements du milieu est souvent décalée dans le temps. Ainsi, la chute de salinité du Vaccarès a eu un effet important sur les zostères seulement trois ans après les crues.

TOUTES LES ESPÈCES NE RÉAGISSENT PAS DE FAÇON IDENTIQUE

Des espèces végétales ou animales apparemment voisines peuvent réagir très différemment. Ainsi, la crevette grise *Crangon crangon* semble indifférente à la chute de salinité alors que d'autres crustacés, *Palaemonetes elegans* et *Carcinus aestuarii* sont cantonnés dans des zones de salinité élevées.

IL EXISTE DES SEUILS CRITIQUES

Les zostères ont diminué fortement dans le Vaccarès entre 1996 et 1997, alors que la salinité ne diminuait plus que légèrement. On peut considérer que le milieu a alors franchi des seuils :

• la diminution de la salinité, en limitant la floculation des argiles, a provoqué une diminution de l'éclairement, préjudiciable à la végétation aquatique ;

• après plusieurs années, les herbiers, trop affaiblis, ne pouvaient plus s'adapter au milieu.

LES MÉCANISMES DE COMPÉTITION, UN FACTEUR IMPORTANT DANS CERTAINES SITUATIONS

Quand la turbidité est forte, le recouvrement de toutes les espèces est affecté et la compétition ne semble jouer qu'un rôle secondaire. Par contre, lorsque les conditions physiques du milieu sont peu contraignantes, la compétition devient le principal mécanisme déterminant la distribution spatiale des espèces.

Les connectivités, clé la présence de certaines espèces

Une espèce ne colonisera un milieu favorable, par exemple sur le plan de la salinité, que si les connexions biologiques le permettent. Ainsi, en Camargue, la présence des jussies (*Ludwigia grandiflora et L. peploïdes*) est liée aux eaux douces permanentes, mais elle est fortement favorisée par la connexion entre canaux. Des résultats analogues ont été récoltés sur la crevette grise. La connectivité, ici d'origine anthropique (les canaux), est souvent favorable à la diversité biologique, mais elle peut avoir des effets négatifs, en particulier par l'installation, au détriment d'espèces indigènes, de plantes d'eau douce, dont les jussies, d'origine américaine et potentiellement envahissantes.

J.L. Michelot

La jussie

Limites et perspectives

Les résultats de ces travaux sont particulièrement intéressants en matière de gestion. Le fonctionnement hydrologique des marais saumâtres est généralement artificialisé, avec des effets importants sur différents facteurs écologiques, et sur la salinité en particulier.
Pour la Camargue, les chercheurs ont montré toute la complexité du système. Leur travail participe à l'évolution actuelle de la gestion de l'eau dans le delta, qui tend à rendre au milieu un peu de sa variabilité naturelle.
Les connaissances acquises dans ce travail ont été intégrées dans un modèle mathématique conduisant à la création d'un outil d'aide à la décision multi-critères en matière de gestion de l'eau (voir Cahier Gestion).
L'état actuel de la compréhension du système Camargue rend possible d'envisager la construction de modèle prédictif de l'évolution de la biodiversité en fonction de variables intégratives de la fonctionnalité. De tels outils permettraient de prévoir les changements de la flore, et de mettre en œuvre les actions susceptibles de les contrecarrer. L'application principale de cette démarche pourrait porter sur les conséquences de l'adoucissement des marais périphériques au Vaccarès. Dans les marais de l'Ouest, les chercheurs ont tenté d'utiliser les connaissances acquises sur le comportement des groupements végétaux comme une aide à la gestion des zones de prairies humides. Ainsi, ils ont constaté que des diminutions de deux mois des périodes d'hydromorphie du sol modifient l'abondance de certaines espèces (jusqu'à 20 % de recouvrement en plus ou en moins). De tels acquis peuvent avoir une importance en terme de gestion, par exemple pour imaginer les modalités d'un élevage bovin à la fois extensif et rémunérateur.
L'analyse de l'écologie des communautés végétales prairiales a permis de préciser les leviers d'action potentiels sur cette ressource multifonctionnelle (agricole et environnementale) : la gestion hydraulique et les pratiques de pâturage. Tout comme le sel et l'eau, le pâturage relativement extensif est un élément déterminant de la diversité végétale en prairie. Des données complémentaires fourragères et zootechniques illustrent la complémentarité entre communautés plus ou moins hygrophiles pour pallier au "trou d'herbe" provoqué par la sécheresse estivale. Ces résultats essentiellement à l'échelle de la station écologique (quelques m^2) ou de la parcelle (quelques ha), ouvrent, moyennant un élargissement au territoire de marais et au territoire de l'exploitation agricole, des perspectives nouvelles pour la gestion agri-environnementale des marais littoraux atlantiques.

CONTACTS

CAMARGUE :

Écologie du Vaccarès :
Patrick Grillas, Station biologique
de la Tour du Valat, Arles.
grillas@tourduvalat.org

Conséquences des aménagements hydrauliques sur la végétation aquatique :
Alain Dervieux et Jean-Christophe Aznar. DESMID-Université de la Méditerranée EA 3293,
alderv.desmid@wanadoo.fr

Les crustacés dans le système Vaccarès :
A.J. Crivelli, Station biologique de la Tour du Valat
a.crivelli@tourduvalat.org

MARAIS DE L'OUEST :

Végétation prairiale :
Eric Kernéïs, INRA
Saint Laurent de la Prée.
kerneis@stlaurent.lusignan.inra.fr

12-Vasières estuariennes

Dynamique des milieux et biodiversité

Vasière de l'estuaire de la Seine (photo J.L. Michelot)

Problématique

Les vasières estuariennes constituent des zones humides particulièrement sensibles. Elles jouent un rôle écologique très important au sein de l'hydrosystème et un rôle économique à travers la pêche.
Les vasières connaissent une dynamique extrêmement rapide, les évolutions naturelles, sédimentaires et écologiques, y sont en effet considérablement accélérées du fait de l'impact des activités humaines.
L'urgence de choix de restauration et de gestion de ces milieux est d'autant plus manifeste qu'ils sont situés au cœur d'espaces stratégiques en matière d'aménagement du territoire, qu'il s'agisse d'équipements portuaires (estuaire de la Seine) ou de tourisme (Mont Saint-Michel).

L'accroissement des connaissances sur la dynamique et le fonctionnement des vasières s'avère indispensable pour disposer, à terme, d'outils permettant de quantifier les impacts des activités humaines sur ces milieux fragiles, et de garantir la pérennité de ces zones humides.

Présentation des recherches

Le fonctionnement hydrologique des estuaires, thème particulièrement important et complexe, a été abordé dans d'autres programmes de recherches, tel le programme scientifique Seine-Aval. Le PNRZH a focalisé ses travaux sur d'autres sujets, en particulier les aspects écologiques, à partir de deux sites d'étude, l'estuaire de la Seine et la baie du Mont Saint-Michel.

L'estuaire de la Seine comporte une vasière principale, sur la rive droite, étendue sur 1000 hectares environ.
Ce site a fait l'objet de différents travaux de recherche visant, entre autres à :

- cartographier les milieux à partir de photographies aériennes basse altitude (ULM) ;
- proposer une typologie fonctionnelle des vasières ;
- analyser l'utilisation de l'espace par les invertébrés, les poissons et les oiseaux.

Dans la baie du Mont Saint Michel, les travaux ont porté sur la relation entre occupation de l'espace et biodiversité. Dans ce cadre, les chercheurs ont étudié les mécanismes de progression de la végétation sur les vasières.

E. Langlois

Vasières du Mont Saint-Michel

Cette fiche présente les résultats acquis en matière de dynamique des vasières, et de ses conséquences sur la biodiversité.

La vasière, un milieu en voie de disparition ?

Les vasières occupent une place importante dans les estuaires naturels. Leur formation résulte de l'équilibre marées montantes / marées descendantes, et de la rencontre des eaux douces chargées de sédiments en suspension avec les eaux salines qui favorisent le dépôt de ces sédiments.

Les vasières sont très importantes au sein de l'hydrosystème, à différents titres :

- elles constituent des zones de stockage et d'accumulation de matériaux fins (nature argileuse riche en matière organique) ;
- l'accumulation de matière organique a une forte incidence sur le niveau trophique du système, sa biodiversité, la régénération de substances nutritives ;
- elles possèdent un pouvoir tampon, de régulation de la ressource en eau autant quantitative (champ d'expansion des crues) que qualitative (adsorption des sels nutritifs) ;
- elles sont soumises à un fort hydrodynamisme (les marées) qui contrôle des cycles d'érosion-dépôt des matières en suspension transportées par le fleuve et donc *in fine* les cycles biogéochimiques du système.

Ce milieu très important connaît une diminution drastique sur les deux sites d'étude.

Les vasières de l'estuaire de la Seine régressent de manière particulièrement importante depuis quelques décennies. Cette régression a deux conséquences écologiques :

- une progression rapide, d'environ 40 mètres par an, de la vasière végétalisée (schorre) aux dépens de la vasière nue (slikke) ;
- un recul de la falaise qui marque la limite inférieure de la slikke.

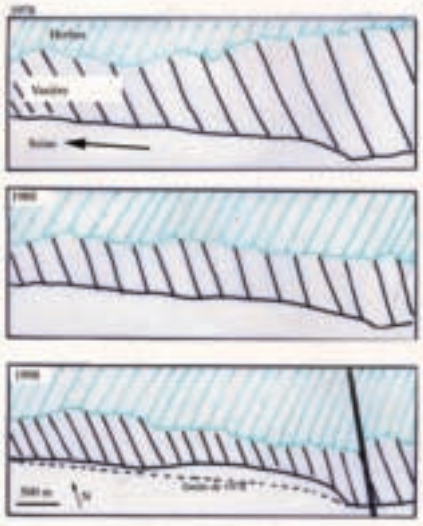
L'ampleur de ce phénomène est considérable ; les vasières sont passées de 13 000 ha en 1832 à 3 000 ha en 1980 et moins de 500 ha en 2000.

Cette évolution résulte de la concomitance de plusieurs mécanismes, tous associés à des activités anthropiques majeures :

- dragage du chenal navigable ;
- mise en place de digues submersibles dans les années 1960 ;
- ralentissement du courant suite à la mise en place du pont de Normandie, provoquant l'exhaussement de la vasière par dépôt de sédiments.

Les analyses détaillées, dans le temps et l'espace, montrent que l'évolution n'est pas régulière. Ainsi, la construction du pont de Normandie a favorisé l'exhaussement de la vasière et sa végétalisation, mais elle a également limité son érosion. Inversement, une brèche dans la digue basse a augmenté l'érosion de la vasière. Enfin, cette vasière connaît des modifications à court ou très court terme (échelle de la saison), les tempêtes érodant la slikke, alors qu'une compensation apparaît au cours de l'année qui suit (dépôt de sédiments).

EVOLUTION DES SURFACES DE VASIÈRES ENTRE 1978 ET 1998, À L'AVAL DU PONT DE NORMANDIE



L'appellation "vasières" figurée ici englobe tout l'espace non végétalisé découvert lors des marées de vives eaux

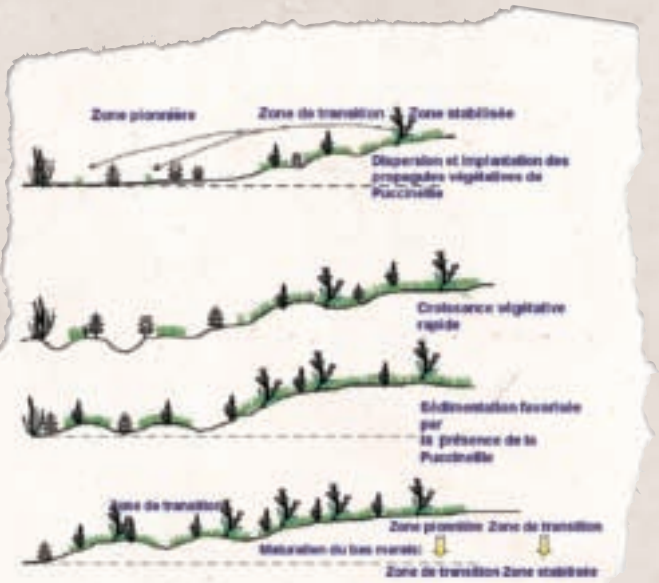
Les vasières de la baie du Mont Saint-Michel connaissent une évolution du même ordre. La sédimentation naturelle liée aux marées y est considérablement accrue par le fait des activités humaines :

- aménagement du Couesnon, rivière qui se jette dans la baie et qui ne peut plus jouer un rôle de chasse des sédiments ;
- création de vastes polders au début du XXème siècle ;
- création de la digue route d'accès au Mont.

L'accélération de l'envasement fait diminuer les durées d'inondation des vasières, permettant le développement des prés salés (herbus), de l'ordre de 20 ha par an depuis 1947. Ce site perd son caractère marin, et en l'absence de travaux, le Mont serait rapidement entouré d'une vaste zone prairiale.

La colonisation végétale des vasières : l'irrésistible progression des herbus

Dans la baie du Mont Saint-Michel, la colonisation des vasières (ou zone pionnière) est particulièrement rapide. Les premières plantes colonisatrices des vases nues sont les salicornes annuelles (*Salicornia fragilis*), qui peuvent localement recouvrir 50 % de la surface du sol après 3 ans seulement.
Spartina anglica et *Puccinellia maritima* (plantes pérennes) colonisent également les vases nues et occupent plus durablement le milieu.
Les vasières plus hautes (zone de transition) accueillent d'autres espèces, telles *Suaeda maritima*, *Salicornia ramosissima* et *Aster tripolium*, adaptées à des stades pédologiques un peu plus évolués. Au terme de cette évolution (zone stabilisée), on ne parle plus de vasière mais de bas marais : le recouvrement de la végétation est supérieur à 80% et la Puccinellie forme un tapis quasi continu.



Rôle de Puccinellia maritima dans la mise en place du micro relief du bas marais à partir de propagules végétatives implantées sur la zone pionnière (vasières ou slikke) et dans la dynamique de succession végétale qui en découle.

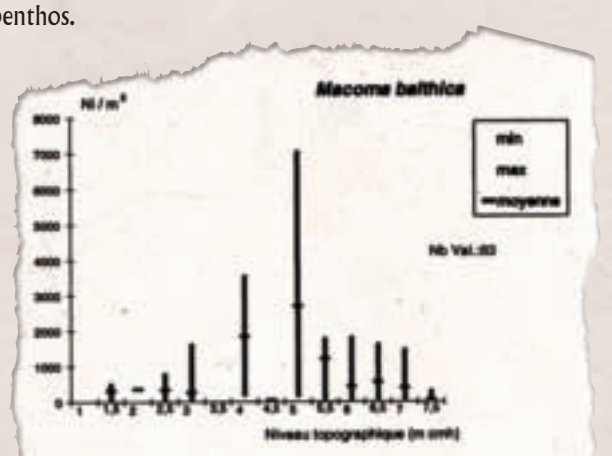
L'espèce la plus abondante, *Puccinellia*, a vu son recouvrement passer de 5-10% en juillet 1997 à 100% en 2000, dans la partie haute de la vasière (bas marais).
Une étude expérimentale a montré la grande adaptation de *Puccinellia* aux conditions du milieu et particulièrement à la sédimentation. Ainsi, une sédimentation de 4 à 8 mm par an stimule sa croissance.
Les *Puccinellia*, implantées sur le bas et moyen marais (schorre), produisent des fragments végétatifs transportés sur le haut des vasières à la faveur des marées. Une partie de ces fragments s'implante et entraine la création de microreliefs favorisant la sédimentation. Cette élévation du niveau topographique permet en retour l'implantation de nouvelles espèces.

La partie moyenne des vasières, espace privilégié pour la faune

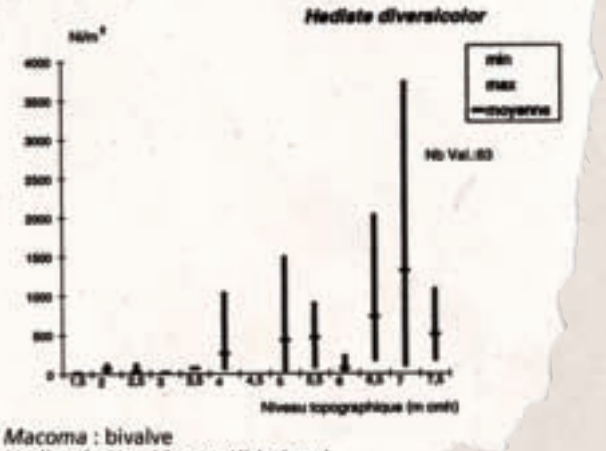
Les recherches menées dans l'estuaire de la Seine ont montré que toutes les vasières ne jouent pas le même rôle dans le cycle biologique des espèces animales.

MACROBENTHOS

Le macrobenthos est la source essentielle de nourriture pour les poissons et les crustacés. La répartition des différentes espèces est liée à la morphologie des vasières et notamment à la topographie, elle-même liée à la granulométrie et à la salinité. Au total, la moyenne, et surtout la haute slikke, apparaissent beaucoup plus productives en macrobenthos que la basse slikke, dont le substrat trop instable est perturbé par la forte vitesse du courant, qui interdit une installation permanente du benthos.



ABONDANCE DE DEUX ESPÈCES DE ZOOBENTHOS EN FONCTION DU NIVEAU TOPOGRAPHIQUE



Macoma : bivalve
Hediste (= Nercis) : annélide (vers)
Ni / m² : nombre d'individus au m²

A marée haute, les jeunes poissons dont les nourriceries sont dans l'estuaire viennent se nourrir du benthos dans la zone intertidale (zone de battement des marées).
L'utilisation des vasières par les poissons n'est pas uniforme. L'analyse des contenus stomacaux des poissons pêchés de l'estuaire de la Seine (Bar, Flet et Gobie) ont révélé que la slikke supérieure et la partie haute de la slikke moyenne abritent la fraction du zoobenthos intertidal effectivement consommée par les jeunes poissons.

OISEAUX

J.L. Michelot

l'avocette

le tadorne

L'Avocette s'alimente principalement dans la partie haute de la slikke. La réduction de cette partie de la vasière explique sans doute pourquoi l'espèce a fortement régressé localement depuis la fin des années 1970 alors qu'elle a progressé au niveau national.

Dynamique de la population d'avocettes dans la vasière principale de l'estuaire de la Seine.

	Nombre d'avocettes	Vasières (ha)
1970	5 000	1 500
1996	1 000	300

Une étude menée sur le Tadorne de Belon montre que les poussins se nourrissent préférentiellement dans les parties hautes et moyennes des vasières, les plus riches en invertébrés. La répartition des poussins de tadornes est considérée comme un bon indicateur des densités zoobenthiques des vasières.
Les adultes s'alimentent majoritairement dans la partie centrale de la vasière, peut-être du fait d'une alimentation moins spécialisée.

Limites et perspectives

Les résultats de ces travaux de recherche ont des implications en termes de gestion. Ils ont mis en évidence le rôle important de la partie haute de la slikke dans le fonctionnement biologique de l'estuaire ; ce point mérite d'autant plus d'être souligné qu'il s'agit du milieu qui disparaît le plus rapidement.

Il est intéressant de remarquer que la régression de la vasière se fait au profit d'habitats naturels de haute valeur écologique, telles les roselières (l'estuaire de la Seine abrite l'une des plus grandes phragmitaies de France). Toutefois, il apparaît que les vasières sont nettement plus rares à l'échelle nationale, et qu'elles jouent un rôle majeur à l'échelle de tout l'estuaire. La sauvegarde de ce milieu apparaît donc primordiale, mais les moyens permettant d'atteindre cet objectif ne sont pas encore déterminés avec précision.
Les recherches initiées par le PNRZH sur les vasières se poursuivent actuellement pour préciser ces points. Les données cartographiques issues de cette recherche ont alimenté le Système d'Information Géographique de l'Observatoire de l'estuaire, susceptible de devenir un outil d'aide à la gestion de l'espace.

CONTACTS

SEINE :

Chef de projet :
François Leboulenger. Laboratoire d'écotoxicologie milieux aquatiques. UPRES-EA 3222, Université du Havre. BP 540. 75058 Le Havre cedex. Tel 02 32 74 43 15. francois.leboulenger@univ-lehavre.fr

Typologie des milieux :
Didier Alard, ECODIV, didier.alard@univ-rouen.fr

Hydrologie :
Valérie Mesnage, Université de Rouen, valerie.mesnage@univ-rouen.fr

Benthos, poissons :
Christophe Bessineton, Cellule de suivi du littoral Haut-Normand, 16 quai Casimir Delavigne, 76600 Le Havre.

Avifaune :
Franck Morel, Groupe Ornithologique Normand, université de Caen, 14032 Caen cedex

Autre programme de recherche :
Programme scientifique Seine Aval

MONT SAINT MICHEL :

Chef de projet :
Jean-Claude Lefeuvre, UMR 6553 Ecobio, Université Rennes I, 36042 Rennes cedex. Tel 02 99 28 67 03, jean-claude.lefeuvre@univ-rennesl.fr

Végétation :
Estelle Langlois-Saliou, université de Rouen. estelle.langlois@univ-rouen.fr
Jean-Bernard Bouzillé et Anne Bonis, univ. Rennes 1. anne.Bonis@univ-rennesl.fr jean-bernard.bouzille@univ-rennesl.fr

Autres travaux :
Dynamique hydraulique et sédimentaire. Syndicat pour le rétablissement du caractère maritime du Mont Saint-Michel.

13–Le fonctionnement de la rivière de Kaw

La rivière Kaw traversant les marais sur lesquels on distingue les traces de la mise en valeur agricole de l'époque de l'esclavage. (Photo M. Dukhan)

Une première étape dans la compréhension de la plus grande zone humide française

Problématique

Les marais de Kaw, à l'est de la Guyane, couvrent 137 300 hectares ; il s'agit de la plus vaste zone humide française. Ces marais représentent un enjeu considérable en matière de conservation de la biodiversité, puisqu'ils abritent des espèces animales extrêmement rares, souvent menacées en Amérique du sud (Caïman noir, Héron agami…).
94 700 ha ont été classés en Réserve naturelle en 1998.
Avant d'envisager les mesures de gestion à mettre en œuvre pour protéger cet écosystème exceptionnel, il est indispensable d'en comprendre le fonctionnement.

Présentation de la recherche

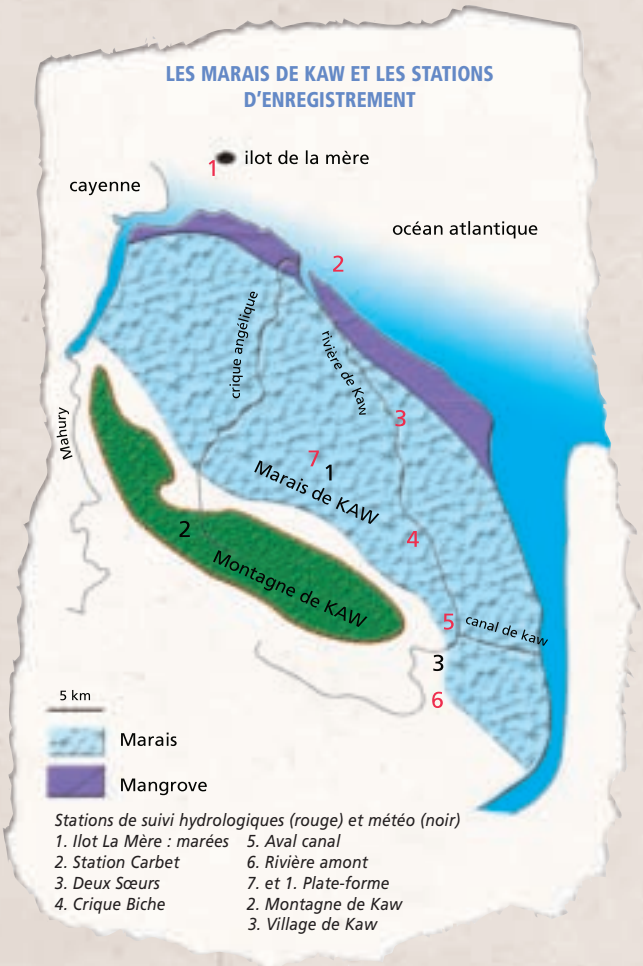
Le projet visait à renforcer les connaissances dans de nombreux domaines :

- sédimentologie et historique des marais ;
- fonctionnement hydraulique ;
- répartition des formations végétales, en liaison avec la topographie, l'hydrologie et l'hydro-chimie (voir Cahier Inventaire) ;
- connaissance des populations d'oiseaux, de poissons et de crocodiliens.

A cause de l'impossibilité d'accès aux marais eux-mêmes, l'étude s'est focalisée dans un premier temps sur la rivière de Kaw, le principal cours d'eau qui les longe et les draine. Les différents compartiments de l'hydrosystème ont été analysés (pluies, débits, physico-chimie, sédiments…).
Ces travaux permettent d'avoir une première vision d'ensemble du fonctionnement de ce système complexe

Le site : entre rivière et océan

Les marais de Kaw s'étendent le long du littoral, entre les estuaires des fleuves Approuague et Mahury. La rivière de Kaw traverse l'ensemble des marais avant de rejoindre l'océan, après un parcours de 60 kilomètres.
Le fonctionnement de la zone humide est lié à la rencontre de ces influences marines et fluviales.



Stations de suivi hydrologiques (rouge) et météo (noir)
1. Ilot La Mère : marées
2. Station Carbet
3. Deux Sœurs
4. Crique Biche
5. Aval canal
6. Rivière amont
7. et 1. Plate-forme
2. Montagne de Kaw
3. Village de Kaw

La dynamique côtière : un milieu en constante évolution

Le fonctionnement estuarien joue un rôle déterminant pour l'ensemble des marais en contrôlant les échanges d'eau entre le milieu continental et l'océan. Du fait de la grande instabilité du trait de côte, la structuration et le fonctionnement écologique actuels des marais doivent être considérés comme un état transitoire dépendant d'un ensemble de contraintes physiques qui s'expriment selon diverses échelles de temps et d'espace.
La géomorphologie de l'estuaire de la rivière de Kaw est conditionnée par les apports de l'Amazone, issus de l'érosion des sols des Andes et du bas bassin amazonien. L'Amazone apporte environ 1100 à 1300 milliond de tonnes de sédiments par an, dont 200 millions sont entraînés vers le nord-ouest sous forme de suspension et de bancs de vase fluide qui se déplacent le long des côtes.
Une fois stabilisées et au cours de leur exondation temporaire, en fonction des marées, les vasières sont très rapidement colonisées par des algues benthiques formant des tapis denses de diatomées et de cyanobactéries à la surface de la vase. Ce substrat permet la fixation d'une mangrove pionnière très dense dont la croissance est extrêmement rapide.
Des plantules établies en 1998 mesuraient déjà plus de 5 mètres en 2001. A partir de 2002, un éclaircissement du couvert végétal par compétition intraspécifique a permis la colonisation par de nouvelles espèces moins héliophiles. L'écosystème, initialement basé sur la productivité des algues benthiques, évolue ainsi vers une forêt de mangrove dont le fonctionnement trophique repose sur les processus intervenant dans la minéralisation de la litière.

L'évolution de la côte a des conséquences importantes sur les marais : conditions d'écoulement des eaux fluviales, intrusions marines dans les marais, répartition des communautés végétales…

Le littoral à deux dates (images Spot)

juin 1998 *juillet 2001*

Traitement des images : IRD, JM Froidefond

UN ÉQUILIBRE ENTRE MARÉES ET PLUIES

Les fluctuations de niveaux et de débits de la rivière résultent de deux composantes, l'une dépendante de la propagation de l'onde de marée (composante tidale), l'autre du collectage des eaux de pluies (composante fluviale). Afin de modéliser ces deux composantes, des suivis pluviométriques (au village et au sommet de la montagne de Kaw) et limnigraphiques initialement en deux stations ("Biche" et "Deux Sœurs ") ont été effectués. Ces informations ont été complétées par une modélisation de l'onde de marée incidente, à partir d'acquisitions marégraphiques en mer, à proximité de l'estuaire de Kaw (îlet la Mère).

La composante tidale

L'influence de la marée s'atténue progressivement vers l'amont. En période de vive-eaux, le marnage est de 1,4 à 2,2 mètres à l'embouchure, et 0,7 à 1,4 mètre à 10 kilomètres en amont. Le signal de marée met environ deux heures à se déplacer entre les deux points.
La marée dynamique affecte actuellement, alors qu'un banc de vase obstrue l'estuaire, des zones situées à plus de 30 kilomètres de la mer. Dans les années 1990, en l'absence de ce banc, l'effet devait probablement être plus important.

Photo D. Guiral.

Vasières et mangrove dans l'estuaire de la rivière de Kaw.

La composante fluviale

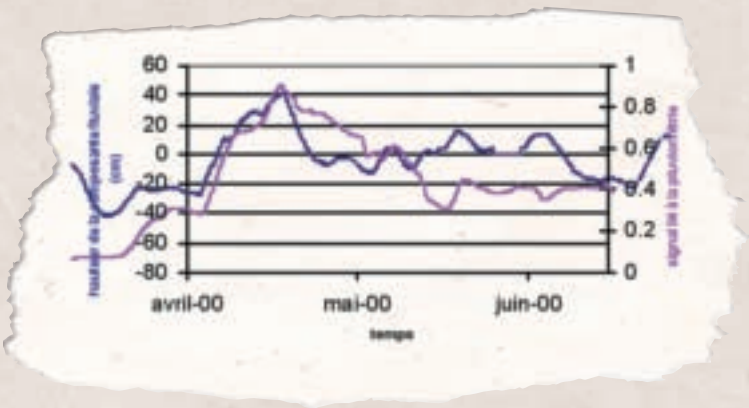
La composante fluviale des variations de niveaux d'eau est liée au régime des pluies, marqué par deux saisons principales : saison sèche de mi-juillet à novembre, saison des pluies de décembre à juillet avec un épisode de relatif arrêt des précipitations de mars à avril d'importance et de durée variables selon les années ("petit été de mars").
La pluviométrie est particulièrement forte sur la montagne

de Kaw, avec environ 4 000 mm par an. Elle est très variable d'une année à l'autre.
La rivière connaît deux saisons hydrologiques (période d'étiage et de crue), correspondant, avec un décalage d'environ deux mois, respectivement à la saison sèche et de pluies.

La relation eaux marines / eaux fluviales varie au cours de l'année. La différence moyenne de niveaux d'eau entre "marée basse" et "marée haute" est très amortie en période de crue avec un signal qui représente moins de la moitié du signal de la saison sèche lorsque les apports continentaux ne créent aucun obstacle aux intrusions marines.

Réponse de la rivière aux épisodes de pluie

La réponse de la rivière à un événement pluvieux a pu être modélisée au moyen d'une fonction de transfert établie empiriquement, calée sur des enregistrements limnigraphiques.
L'application de cette fonction de transfert au relevé horaire de la pluviométrie fournit une réponse pouvant être comparée sur une échelle mensuelle à la composante fluviale (graphique ci-dessous).

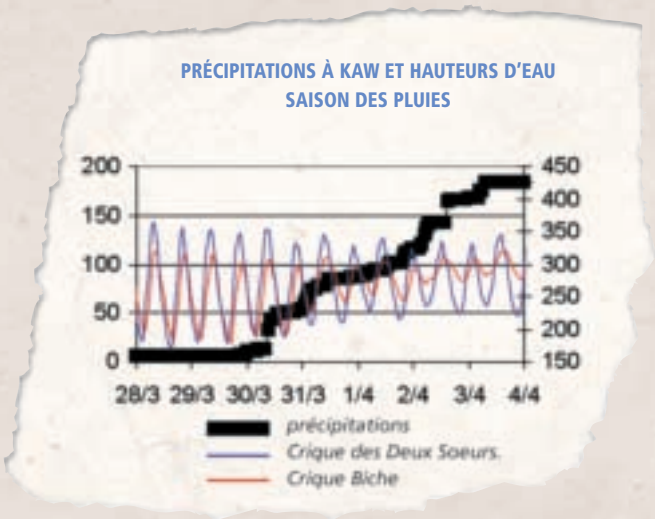


Source : J-P. Lefebvre, 2002

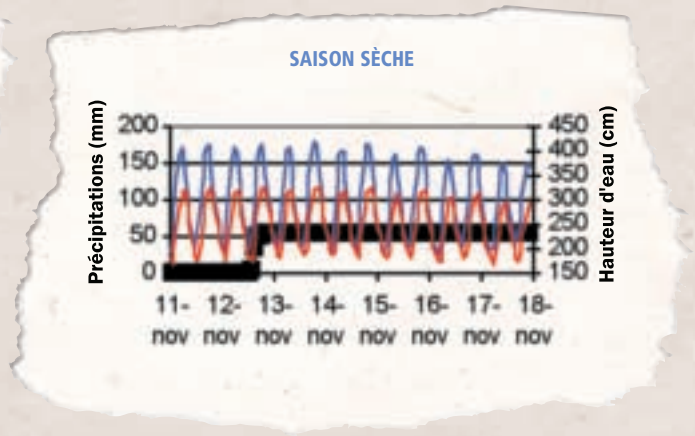
La phase d'augmentation des niveaux d'eau en relation avec les précipitations au cours de la grande saison des pluies est relativement bien décrite par l'application de cette fonction. A l'opposé, la phase de décrue observée est nettement plus rapide et atteint des niveaux moins importants que ceux prédits par le modèle. Ce résultat démontre l'existence de relations complexes entre la zone de marais et la rivière de Kaw.

En effet, les marais, alimentés par les pluies interceptées par le versant nord-ouest de la montagne de Kaw (face aux alizés), peuvent stocker des volumes considérables d'eau. Ils contribuent ainsi par débordement à alimenter d'une manière différée la rivière qui ne draine en direct qu'une partie du versant sud-ouest et sous le vent de la montagne de Kaw.

Ainsi, l'impact de la pluie est très différent selon la saison. En saison des pluies, les précipitations entraînent, avec un certain retard, un relèvement des niveaux d'eau sur la rivière et limite l'influence des marées (figure ci-dessous).



Par contre, en saison sèche, les précipitations, même importantes et brutales, ne provoquent pas de changement des niveaux d'eau (figure ci-dessous). Il est possible d'interpréter ce phénomène comme une fonction du marais ; les apports atmosphériques ne sont perceptibles que lorsque les capacités de stockage de la zone humide sont dépassées.



Le canal de Kaw

A l'époque de l'esclavage, un canal a été creusé pour permettre l'évacuation des productions agricoles via l'estuaire de l'Approuague. Ce fleuve dispose d'une capacité de transport des sédiments supérieure à celle de l'estuaire de Kaw ; il est donc moins soumis à l'instabilité liée au transit littoral des vases amazoniennes.
Ce chenal met ainsi la partie centrale de la rivière de Kaw en lien avec le système estuarien ; la marée, en fonction des saisons, peut transiter par ce canal et participer aux rythmes hydrologiques dans la rivière de Kaw.

Physico-chimie et biologie des eaux : le rôle des apports océaniques

La recherche a également porté sur la composition des eaux et ses conséquences en matière de développement planctonique.

PHYSICO-CHIMIE

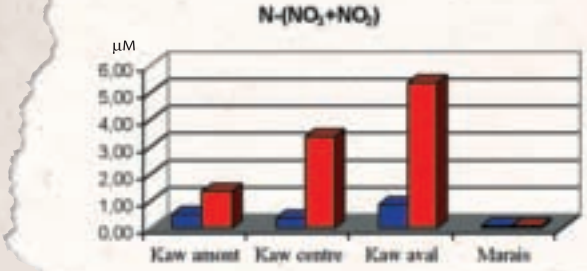
Les deux principales composantes de l'alimentation en eau du marais influent sur sa dynamique sédimentaire et hydrochimique.

L'estuaire est une zone de déstabilisation des vases, et donc d'eaux hyper-turbides. Les vasières connaissent en outre de fortes productions algales pendant les marées basses. En période d'étiage, les courants de jusant entraînent des matières minérales et organiques, dissoutes et particulaires, vers l'amont de la rivière. Ainsi, en période sèche, on note une augmentation significative de la salinité jusqu'à plus de 35 kilomètres de l'estuaire.

En période de hautes eaux, cette fertilisation par les exportations des vasières se produit à une échelle bien moindre alors que les intrusions d'eau océanique sont impossible. Les eaux sont alors strictement continentales très faiblement minéralisées, acides désoxygénées et pauvres en éléments nutritifs (figure ci-dessous) et en phytoplancton.

Du fait de ce fonctionnement, un gradient croissant de matières en suspension minérales et de sels nutritifs (ortho-phosphates, silicates et nitrates) est observé de l'amont vers l'aval.

CONCENTRATIONS MOYENNES EN NITRATES ET NITRITES AU COURS DE LA SAISON DES PLUIES (BLEU) ET DE LA SAISON SÈCHE (ROUGE)

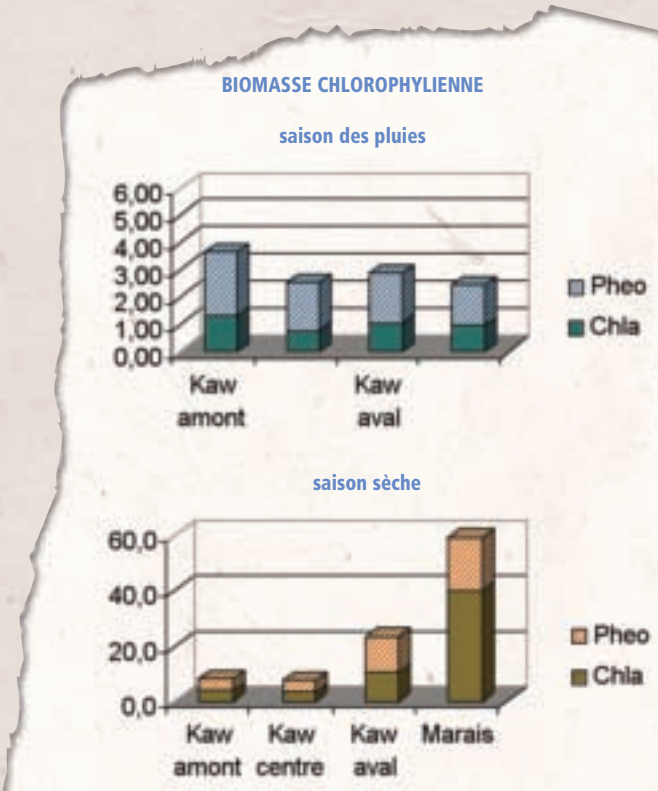


LE PHYTOPLANCTON

Les biomasses phytoplanctoniques ont été estimées au travers de la concentration des pigments chlorophylliens dans les eaux.
Le développement du phytoplancton apparaît lié à un équilibre entre différents facteurs : apports nutritifs, turbidité, concurrence avec les macrophytes flottantesY.

Le plancton peut connaître un développement important dans la partie médiane de la rivière, durant l'étiage (figure ci-dessous). A distance de l'estuaire le milieu est enrichi sur le plan trophique par les apports des marées, tandis que la turbidité n'est pas excessive. Au niveau de l'estuaire la turbidité due aux apports sédimentaires de l'océan limite les possibilités de développement du phytoplancton.
Durant les crues le plancton est peu abondant (5 fois moins) car limité par les faibles teneurs des eaux en nutriments et à de mauvaises conditions d'éclairement.

BIOMASSE CHLOROPHYLIENNE



Phéo : Phéopigments (pigments dégradés correspondant au phytoplancton mort ou consommé, mais aussi à des débris de la végétation terrestre et aquatique flottante)
Chla : Chlorophylle a (algues actives : phytoplancton)
Echelle verticale : µg.l-1
L'enrichissement très important constaté pour une mare permanente au coeur du marais (station marais) en saison sèche résulte de la fertilisation des eaux par les déjections des oiseaux qui temporairement se concentrent dans ces zones pour leur reproduction.

La rivière présente en général des concentrations basses en oxygène liés aux apports importants d'eau désaturée issus de l'immense marais. Le marais est essentiellement une prairie herbacée flottante dont la production d'oxygène photosynthétique ne contribue pas à l'oxygénation de la masse d'eau. A l'opposé, la minéralisation après sédimentation de la biomasse macrophytique est très consommatrice d'oxygène. Ainsi, dans un système palustre où la production phytoplanctonique est très limitée (détournement des éléments nutritifs vers les macrophytes qui bloquent l'accès à l'énergie lumineuse), les communautés algales qui se développent dans la rivière ont un rôle écologique très important en particulier en saison sèche. A cette période, la rivière concentre l'essentiel de la vie aquatique du marais ; les algues permettent alors à la rivière de constituer une zone refuge, en contribuant à une réoxygénation des eaux en fonction du cycle nycthéméral et en étant à la base d'un réseau trophique pélagique directement accessible pour les communautés zooplantonique et ichtyologique.

Limites et perspectives

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude permettent d'appréhender le fonctionnement de la partie estuarienne de la rivière de Kaw au travers de la modélisation des principaux paramètres qui interviennent dans sa structuration et son évolution. Ce travail devra être étendu à l'ensemble de la rivière de Kaw, avec une prise en compte plus fine de l'onde de marée secondaire transitant par le canal de Kaw.

Ces travaux montrent les difficultés rencontrées au cours de recherches concernant une zone humide mal connue et peu accessible. De nombreuses incertitudes persistent et justifient des études complémentaires sur :

- les variations de niveaux d'eau dans le marais en liaison avec la dynamique sédimentaire littoral et estuarienne ;
- les communautés végétales et animales caractéristiques des divers faciès du marais et leur degré d'interdépendance et interaction.

Depuis la fin du PNRZH, une station de suivi a été héliportée et déposée en décembre 2001 au cœur du marais (plate-forme flottante) ; elle permettra de comprendre et de suivre le fonctionnement (écologique, hydraulique, etc.) de ce secteur jusqu'à présent inaccessible, qui s'est révélé être actuellement le plus important site identifié à l'échelle de l'Amérique du sud pour la reproduction de divers oiseaux d'eau et de hérons.

photo M. Dulchan

La plate-forme dans son environnement

Les connaissances acquises, expliquent le bien-fondé des diverses mesures de conservation mises en place et servent déjà à éclairer les choix opérés par les gestionnaires. Ils aideront à définir les règles de contrôle de certains usages traditionnels (pâturage, brûlis, chasse, pêche) afin de permettre à ce milieu de conserver sa richesse biologique. De même, les résultats de la recherche présenteront des implications en matière d'éco-tourisme. Les demandes sont nombreuses pour réhabiliter le canal de Kaw à des fins éco-touristiques alors qu'il est actuellement presque totalement colmaté et envahi par la végétation. L'un des objectifs des études en cours est de déterminer, compte tenu du fonctionnement hydrologique actuel, si ce recalibrage ne serait pas de nature à permettre des intrusions salines régulières (en fonction des marées) et durables (en fonction des saisons) dans une zone écologique qui n'est soumise actuellement qu'aux effets amortis de la marée dynamique via l'estuaire de Kaw.

Enfin, ces recherches doivent aider à comprendre le fonctionnement et à aider à la gestion et la valorisation de milieux similaires situés dans des régions équatoriales, notamment sur le continent sud-américain.

CONTACTS

Chef de projet :
Daniel Guiral, laboratoire d'écologie littorale,
IRD, Route de Montabo, BP 165,
97323 Cayenne cedex, Guyane.
Tel 05 94 29 92 62,
guiral@cayenne.ird.fr

Hydrologie :
Jean-Pierre Lefebvre, IRD Cayenne,
lefebvre@cayenne.ird.fr

Remerciement :
"Scène SPOT fournie par Spot-Image grace au soutien du CNES (ISIS)

Glossaire

ADSORBTION : Rétention à la surface d'un solide des molécules d'un gaz ou d'une substance en solution ou en suspension (1)
AÉROBIE : Être vivant ou processus écologique exigeant la présence d'oxygène. (2)
ALCALIN : Désigne les milieux basiques, donc de pH supérieur à la neutralité. (3)
ALTÉRITES : Couches d'altération d'une roche. (4)
ANAÉROBIE : Organisme ou processus se développant seulement en absence d'oxygène (anaérobiose : vie en milieu dépourvu d'oxygène). (2)
ANOXIE : Désigne l'absence d'oxygène dans un milieu. (3)
BENTHIQUE : Organisme d'un écosystème aquatique vivant au contact du sol ou à proximité immédiate. (2)
COLLUVIONS : Matériaux accumulés par érosion en bas d'une pente. (3)
DÉNITRIFICATION : Réduction des nitrates en azote gazeux par des bactéries en situation d'anoxie, et en présence de carbone. (5)
DÉSORPTION : Phénomène inverse de l'absorption et de l'adsorption. (1)
ECRÊTEMENT : Processus naturel ou anthropique par lequel l'amplitude maximale des crues est diminuée par des dispositifs de rétention. (3)
ÉDAPHIQUE : Qui se rapporte au sol. (5)
ÉTIAGE : Niveau de basses eaux. (5)
ETP : Evapotranspiration potentielle.
ETR : Evapotranspiration réelle.
EUTROPHE : Qualifie un milieu riche en éléments minéraux nutritifs. (5)
EXFILTRATION : Ecoulements rapides intervenant à l'échelle de la crue.
GOUILLES : Bas-fonds humides dans les tourbières.
GRAU : Chenal par lequel une lagune communique avec la mer.
HALOPHILE : Qualifie un organisme adapté aux milieux salés. (5)
HÉLIOPHILE : Espèce végétale dont l'activité photosynthétique est maximale en pleine lumière. Espèce animale exigeant un fort ensoleillement pour présenter une activité normale (2).
HÉLOPHYTES : Plante aquatique développant un appareil aérien dépassant la surface de l'eau en été, alors qu'en hiver ne subsiste que la couche enracinée dans la vase. (2)
HYDROLOGIE : Science ayant pour objet l'étude de la nature, de la formation et des propriétés mécaniques, physiques et chimiques des eaux marines et continentales. (5)
HYDROPÉRIODE : Evolution dans le temps du niveau d'eau libre à proximité immédiate de la surface du sol, en dessous ou au dessus de celle-ci (6).
HYGROPHILE : Communauté végétale vivant dans les terrains humides (marécage, berge de cours d'eau, etc.). (2)
HYPODERMIQUE (écoulements) : Ecoulements d'eau situés juste sous la surface du sol.
INTERTIDALE (zone) : Zone de balancement des marées (découvertes à basse mer). (7)
LAGUNE : Terme général désignant des écosystèmes aquatiques situés en zone littorale, caractérisés par un faible renouvellement de leurs eaux lié au confinement. (5)
LIT MAJEUR OU PLAINE INONDABLE OU ZONE D'ÉPANDAGE DES CRUES : Largeur maximale d'une vallée susceptible d'être submergée par la rivière au cours de crues exceptionnelles ou saisonnières. (5)
LIT MINEUR : Largeur qu'occupent les eaux d'un cours d'eau en débit de plein bord, c'est-à-dire jusqu'au sommet des berges. (5)
LÔNE : Terme consacré dans le bassin du Rhône aux annexes fluviales : bras secondaire obturé à l'amont, bras mort, bras isolé, ancien méandre. (4)
MACRO BENTHOS : Organismes de taille supérieure à 2 mm qui constituent le benthos dans les écosystemes aquatiques.
MACROPHYTES : Végétaux de grande taille qui croissent dans la zone littorale des écosystemes aquatiques. (3)
MÉSOHYGROPHILE : Communauté végétale vivant dans les terrains d'humidité intermédiaire. (2)
MÉSOPHILE : Communauté végétale vivant dans les terrains drainés (peu humides). (1)
MÉSOTROPHE : Se dit d'un écosystème aquatique à un état intermédiaire entre les stades oligotrophe et eutrophe (2)
MICROPOLLUANTS : Polluant présent à faible concentration dans l'environnement. (3)
MODULE : Débit moyen annuel pluriannuel en un point d'un cours d'eau. (4)
NAPPE ALLUVIALE : Volume d'eau souterraine contenu dans des terrains alluviaux, en général libre et souvent en relation avec un cours d'eau. (5)
NAPPE PHRÉATIQUE : Nappe d'eau souterraine. (5)
NOURRICERIE : Site de séjour des juvéniles, souvent en zone côtière. (7)
NUTRIMENT : Espèce chimique utilisable telle quelle dans l'alimentation des cellules vivantes (azote, phosphore...). (2)
NYCTHÉMÉRAL (rythme) : Rythme caractérisant les variations d'activité des organismes au cours d'une période de 24 heures. (3)
OLIGOTROPHE : Caractérise un milieu naturel pauvre en éléments nutritifs en opposition aux milieux eutrophes. (5)
ORDRE DES COURS D'EAU : Un cours d'eau d'ordre 1 est un cours d'eau pérenne sans affluent pérenne. Un cours d'eau d'ordre 2 est formé par la confluence de deux ruisseaux d'ordre 1, un cours d'eau d'ordre 3 par la confluence de deux cours d'eau d'ordre 2 et ainsi de suite pour les numéros d'ordre supérieur. (8)
PRODUCTIVITÉ BIOLOGIQUE : Capacité d'un écosystème à produire de la matière vivante; par exemple, les végétaux chlorophylliens transforment par la photosynthèse les éléments minéraux en matière organique. (5)
RIPISYLVE : Terme désignant les formations arborées qui se développent le long des cours d'eau, composées en grande partie de saules et d'aulnes. (5)
RUGOSITÉ : Paramètre caractérisant la résistance à l'écoulement qu'oppose une surface (plaine, berge…), en fonction de sa structure physique.
SATURÉE (zone) : Partie d'un sol dont tous les interstices sont emplis par de l'eau. Dans la zone non saturée, l'eau est présente, sans que soit atteinte la capacité maximale de rétention du sol.
SCHORRE : Nom flamand des prés salés ou des marais maritimes, utilisé dans le langage morphologique des environnements littoraux tempérés. (7)
SLIKKE : Mot flamand désignant, dans un estuaire ou une baie, une étendue de vase limitée vers le haut par le niveau de haute mer de morte-eau (où elle passe au schorre). (7)
SOLIFLUXION : Phénomène géologique marqué par le glissement de matériaux solides peu consistants le long d'une pente sans qu'ils soient entraînés par de l'eau. (3)
SOLVANTS CHLORÉS : Molécules organochlorés constitués par des dérivés du méthane, de l'éthane ou de l'éthylène. (3)
ZONE HUMIDE : " ...on entend par zone humide les terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire ; la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année. ". (loi sur l'eau du 3 janvier 1992)

SOURCES :

(1) : Rey A., Rey-Debove J., 1983. Le Petit Robert. 2172 p.
(2) : Burgeap, Michelot, Acer, 2000. Les zones humides et la ressource en eau. Guide technique. Les études des Agences de l'Eau n°89.
(3) : Ramade F., 2002. Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. 2° édition. Dunod, 1075 p.
(4) : Site internet de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse.
(5) : Site internet de la Station biologique de la Tour du Valat.
(6) : Giraud F., 2002. Emergence d'un cadre méthodologique pour l'étude hydrologique des zones humides : quelles méthodes pour quels objectifs ? Actes du colloque de restitution du PNRZH, Toulouse.
(7) : Alard D. (coord.), 2002. Zones humides de la basse vallée de la Seine. Programme scientifique Seine-Aval. Région Haute Normandie, IFREMER, Agence de l'Eau Seine Normandie. 36p.
(8) : Fustec E., Lefeuvre J.C., 2000. Fonctions et valeurs des zones humides. Dunod, Paris, 426 p.

Sources d'information

LES DOCUMENTS GÉNÉRAUX SUR LE PNRZH

- Fiche récapitulative de présentation de l'ensemble du PNRZH (2002)
- Actes du colloque de restitution du PNRZH (Toulouse, octobre 2001)
- Fiches de présentation des projets PNRZH
- Cahiers thématiques

Ces documents sont disponibles auprès de :
veronique.barre@environnement.gouv.fr

Le site internet du PNRZH présente le contenu des projets de recherche, et permet de télécharger un certain nombre de rapports et de fiches : http://www.pnrzh.org/

Le numéro 36 de Zones Humides Infos, sur le PNRZH, donne un bon résumé des recherches : www.snpn.com/zhi.html

Un numéro spécial de la revue Photointerprétation, est en cours de réalisation.

LES PUBLICATIONS DES PROJETS DU PNRZH

Chaque projet de recherche du PNRZH a donné lieu à un rapport de synthèse, et à des publications scientifiques, souvent rédigées en anglais dans des revues internationales.

Quelques projets de recherche ont donné lieu à des documents de diffusion des résultats, par exemple sous forme de plaquettes d'information.

Ces publications et documents doivent être demandés directement aux chercheurs.

LES PÔLES RELAIS

Les pôles-relais du plan gouvernemental d'action pour les zones humides, ont pour vocation de mettre en place, coordonner et animer des pôles de compétences (connaissance, gestion durable et évaluation) sur six grands types de zones humides :

- Marais littoraux de l'Atlantique, de la Manche et de la Mer du Nord : Forum des marais atlantiques

http://www.forum-marais-atl.com/

- Lagunes méditerranéennes : Station biologique de la Tour du Valat

pole.lagunes.lr@wanadoo.fr

- Zones humides intérieures : Fédération des parcs naturels régionaux

http://www.parcs-naturels-regionaux.tm.fr/zones_humides/

- Tourbières : Espaces Naturels de France

http://www.pole-tourbieres.org/

- Mares et Mouillères : Institut européen du développement durable et Centre de biogéographie-écologie

http://www.polerelaismares.org

- Vallées alluviales : Conseil Supérieur de la Pêche (en cours de mise en place)

QUELQUES DOCUMENTS INCONTOURNABLES SUR LES ZONES HUMIDES

Il est possible de citer ici quelques documents non directement liés au PNRZH mais constituant des bases très importantes à connaître.

- Acreman, M.C. & Weng, P. (eds) 2003. Understanding hydrological processes in wetlands to improve management. Hydrology and Earth System Sciences, Special Issue, 7 : 146 p.
- Agence de l'eau Artois-Picardie & Conseil scientifique de l'environnement Nord-Pas-de-Calais. Les zones humides. Connaître, évaluer, gérer, sensibiliser. 4 fascicules. 2003.
- Burgeap, Michelot J.L., 2001. Fonctionnement des zones humides Première synthèse des indicateurs pertinents. Agir pour les zones humides en RMC. Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse. Guide technique SDAGE n° 5, 144 p.
- Burgeap, Michelot J.L., Acer, 2002. Les zones humides et la ressource en eau. Guide Technique. Les Etudes des Agences de l'Eau n°89.
- Chapuis J.L., Barre V., Barnaud G. (eds), 2001. Recréer la nature. Réhabilitation, restauration et création d'écosystèmes. Principaux résultats scientifiques et opérationnels. MATE, MNHN. 196 p.
- Chapuis J.L., Décamps H., Barnaud G., Barre V., (eds), 2002. Programme national de recherche " Recréer la nature " : Réhabilitation, restauration et création d'écosystèmes. Actes du colloque de Grenoble 11-13 septembre 2001. Rev. Ecol. (Terre Vie), suppl. 9, 261p.
- Fustec E., Lefeuvre J.C., 2000. Fonctions et valeurs des zones humides. Dunod, Paris, 426 p.
- Gaudillat, V., Haury, J. et coll. 2002 Les Habitats Humides. Cahiers d'habitats Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. La Documentation française, Paris, 457 p.
- Mitsch, W.J. & Gosselink, J.G., 2000 Wetlands. Third edition, Van Nostrand Reinhold Company, New-York, 920 p.

Enfin, l'IFEN (Institut Français de l'Environnement) fait vivre le site portail sur les zones humides qui donne accès à de nombreux centres de ressources sur ce thème :
http://www.ifen.fr/zoneshumides

Le PNRZH un ambitieux programme de recherche sur les zones humides

Le Programme National de Recherche sur les Zones Humides (PNRZH) constitue l'un des éléments du Plan d'action pour les Zones Humides, lancé par le gouvernement en 1995. Les objectifs de ce programme de recherche ont été de mieux comprendre le fonctionnement des zones humides pour offrir des résultats utilisables pour leur gestion ou leur restauration. Quatre axes de recherche avaient été définis : structure et fonctionnement des zones humides, rôle écologique et importance économique, interactions Nature-Société, modes d'actions pour la conservation et la restauration des milieux. Entre 1996 et 2001, le PNRZH a mobilisé 126 équipes scientifiques au sein de 20 projets, répartis sur l'ensemble du territoire national. La diffusion des résultats de ces travaux fait l'objet de différentes actions, dont trois cahiers thématiques :

Les zones humides et l'eau

Inventaire et caractérisation des zones humides

2005

Gestion des zones humides

2006

Les zones humides et l'eau

Ce cahier traite du fonctionnement hydrologique des zones humides, mais aussi des conséquences de ce fonctionnement en matière de physico-chimie, de géomorphologie ou de biodiversité.

FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE :

- tourbières
- petites zones humides de fond de vallée
- alimentation en eau des plaines alluviales
- dynamique des anciens bras fluviaux
- Camargue
- zones humides d'affaissement minier
- marais de Kaw (Guyane française)

FLUX BIOGÉOCHIMIQUES :

- azote
- carbone
- micropolluants

FONCTIONNEMENT DES ZONES HUMIDES ET BIODIVERSITÉ :

- vasières estuariennes
- bras fluviaux
- marais littoraux

Rédaction : Jean-Louis Michelot, Consultant en environnement, jean-louis.michelot@ecosphere.fr - Mise en forme : Béatrice Saurel, saurelb@free.fr

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Agences de l'Eau

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

août 2003

Le groupe de suivi

GENEVIÈVE BARNAUD
(Muséum National d'Histoire Naturelle,
Présidente du Conseil scientifique du PNRZH)
VÉRONIQUE BARRE
(Ministère de l'Ecologie
et du Développement Durable, DEEEE,
responsable du PNRZH)
MARIE-FRANCOISE BAZERQUE
(Ministère de l'Ecologie
et du Développement Durable, DE)
MARIE-FRANCE BOSSENIE
(Ministère de l'Ecologie
et du Développement Durable, DE)
LAURE CALLENS
(Forum des Marais atlantiques / Pôle relais Marais
littoraux atlantiques)
JEAN-CLAUDE FARDEAU
(Conseil scientifique du PNRZH)
FRANÇOIS GIRAUD
(BRGM, coordination du PNRZH)
GUY OBERLIN
(Conseil scientifique du PNRZH)
NATHALIE SAUR
(Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse)
DOMINIQUE TESSEYRE
(Agence de l'eau Adour-Garone)
ISABELLE VIAL
(Ministère de l'Ecologie
et du Développement Durable, DNP)
PHILIPPE WENG
(BRGM, coordination du PNRZH)
MARIE-CLAUDE XIMENES
(Institut Français de l'Environnement)

La rédaction de ce cahier a été menée en liaison étroite avec tous les chercheurs concernés : validations des textes, fourniture d'illustrations, mise à jour des connaissances.

Ce cahier est dédié à
FRANÇOIS GIRAUD,
chercheur au BRGM, disparu en 2002.
Avec enthousiasme et efficacité,
il a fortement contribué
à la coordination du PNRZH,
et a assumé la responsabilité de l'animation
hydrologie – hydraulique.

La réalisation du cahier

Rédaction : JEAN-LOUIS MICHELOT,
Consultant en environnement

Mise en forme : BÉATRICE SAUREL

Les partenaires financiers du PNRZH

Agences de l'eau
Ministère de l'écologie et du développement durable
Ministère de l'agriculture, de l'alimentation,
de la pêche et des affaires rurales
Ministère de l'Equipement, des transports,
du logement, du tourisme et de la mer.
BRGM

Ce cahier est disponible auprès de Véronique Barre. Responsable du PNRZH : veronique.barre@ecologie.gouv.fr
MEDD - D4E - SRP 20, avenue de Segur 75302 Paris 07SP