

Introduction de l'Atelier :
Comprendre la complexité
du fonctionnement des zones
humides : les apports méthodologiques du
PNRZH
*P. Steayert,
A. Duchein*

20

**Emergence d'un cadre
méthodologique pour l'étude
hydrologique des zones
humides : quelles méthodes
pour quels objectifs ?**
F. Giraud

22

**Options scientifiques adoptées
et premiers résultats de l'étude
d'un vaste et inaccessible marais
littoral équatorial : Le marais
de Kaw en Guyane française**
D. Guiral

32

**Synthèse critique des approches
spatiales développées dans le
cadre des projets du pnrzh :
propositions d'outils efficaces
selon les objectifs visés**
L. Hubert-Moy

48

**Apport des technologies de
l'information géographique au
management des zones humides –
Application à l'estuaire de la
Seine**

60

*A. Bourcier,
D. Alard,
J.-C. Bourcier,
I. Poudevigne*

**L'analyse des relations entre
les systèmes agricoles et
écologiques dans les zones
humides : complémentarité
entre approches fonctionnelles
et spatiales**

70

*C. Thenail,
D. Le Cœur,
J. Baudry*

**Construire une typologie
des petites zones humides
riveraines intégrant l'hydrologie
et la géochimie : les acquis du
programme Ty-Fon**

76

*P. Mérot,
P. Durand,
C. Gascuel-Oudou,
A. Jaffrezic,
C. Kao,
G. Pinay*

Synthèse de l'atelier :
Connaissance des zones
humides : outils, méthodes
et savoir-faire
P. Steayert

84

*Connaissance des zones humides :
outils, méthodes et savoir-faire*

INTRODUCTION

Comprendre la complexité du fonctionnement des zones humides : les apports méthodologiques du PNRZH

PATRICK STEYAERT (INRA-SAD DOMAINE EXPÉRIMENTAL DE ST LAURENT DE LA PRÉE)

steyaert@stlaurent.lusignan.inra.fr

ALAIN DUCHEIN (AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE)

alain.duchain@eau-adour-garonne.fr

Présentation de l'Atelier

Les recherches menées dans le cadre du PNRZH ont mobilisé de nombreux outils qui contribuent à faire avancer les principes et théories sur des sujets en prise directe avec le plan national d'action pour les zones humides. Quel est le caractère innovant de ces démarches ? Ces acquis sont-ils susceptibles d'être utilisés par les gestionnaires ? Dans quelles limites et à quelles conditions ?

Comment dépasser les descriptions à base d'inventaires physiques et/ou biologiques pour aller vers la compréhension des processus et phénomènes ? Comment mettre en cohérence des données hétérogènes à l'aide de SIG ? Comment implanter un réseau de suivi pluri-fonctionnel des zones humides ? Ces travaux permettent-ils de passer de la compréhension des processus à une typologie fonctionnelle des zones humides ?

Introduction à l'Atelier 1

Le PNRZH a mobilisé durant plus de trois ans de nombreuses disciplines scientifiques des sciences du vivant, des sciences des techniques et des sciences humaines. Par le biais des vingt projets retenus, il a couvert toute la diversité des zones humides françaises, allant des mares aux vastes zones humides littorales.

Ces zones humides sont des systèmes écologiques complexes, plus ou moins artificialisés, et font l'objet aujourd'hui de politiques de conservation ou de restauration. Dans ce cadre, un lien fort est à construire entre les chercheurs qui tentent de comprendre le fonctionnement de ces systèmes et les gestionnaires qui souhaitent en mesurer et modifier les tendances d'évolution. Outre que les chercheurs sont de plus en plus souvent impliqués dans la construction d'un argumentaire de la conservation (atelier 2), des problèmes que cela soulève et des moyens de les résoudre (ateliers 3 et 4), ils produisent aussi des outils, méthodes et savoir-faire dans le cadre de leurs recherches. Ceux-ci sont-ils susceptibles d'être utilisés par les gestionnaires, dans quelles limites et à quelles conditions ?

Il n'est pas possible ici de faire la synthèse de toutes les productions des projets du PNRZH mais il s'agit plutôt de proposer une catégorisation de ces outils et méthodes en relation avec leur contribution à accroître la capacité des gestionnaires pour agir.

De nombreuses données de base, utilisées par la recherche, relèvent souvent d'une activité d'inventaire. Il s'agit par exemple de données ornithologiques ou botaniques collectées avec des méthodes éprouvées (itinéraires échantillons, points d'écoute, lignes permanentes, etc.), de données issues de moyens de télédétection (occupation des sols, surfaces en eau, ...), de données hydrologiques acquises à l'aide de limnimètres, piézomètres, capteurs divers, etc. En tant que telles, ces données qui correspondent souvent à celles collectées par des gestionnaires, servent à déterminer les tendances d'évolution à plus ou moins long terme des systèmes étudiés, mais ne permettent pas d'expliquer ces évolutions et par conséquent de préciser comment faire pour intervenir sur ces systèmes. Elles posent aussi la question de la localisation et de la périodicité des mesures à effectuer pour disposer d'une information correcte sur les tendances d'évolution.

La plupart des projets ont développé des recherches dans le domaine de l'hydrologie et de l'écologie sensu lato, pour comprendre les processus à la base du fonctionnement des zones humides. Ces recherches s'appuient souvent sur des savoir-faire disciplinaires, et intègrent essentiellement des facteurs de variation des phénomènes de nature physico-chimique ou biologique, plus rarement de nature anthropique. Ce faisant, elles permettent de rendre compte de la dynamique des systèmes étudiés (et par exemple de préciser où, quand et comment il convient de mesurer certains paramètres d'évolution), sans pour autant donner les "clés" pour agir.

Lorsque des variables de gestion sont considérées dans l'analyse de ces processus, comme par exemple les pratiques agricoles ou de gestion des eaux, les pratiques d'aménagement de l'espace, etc., il est possible de rendre compte de l'effet des activités humaines sur la dynamique des systèmes étudiés et de préciser les moyens d'intervention pour les modifier.

Si les outils utilisés restent souvent ceux propres aux disciplines, les méthodes adoptées visent l'intégration des connaissances dans des démarches interdisciplinaires. Ces méthodes s'appuient sur l'énoncé d'une problématique commune et sur la définition des relations entre les différents objets étudiés par les disciplines. Elles peuvent déboucher sur des productions originales telles que les typologies. Elles nécessitent la mise au point d'une instrumentation spécifique pour pouvoir construire un cadre conceptuel commun et réaliser la mise en cohérence de données hétérogènes. Les Systèmes d'Information Géographiques en sont une illustration, appliquée aux recherches sur des questions et des objets ayant une forte dimension spatiale ou territoriale.

Enfin, on ne peut oublier la question des indicateurs de suivi des zones humides. Trop souvent, ceux-ci sont construits a priori, sans savoir s'ils sont réellement pertinents pour rendre compte des phénomènes en jeu. Cela résulte sans doute de la demande pressante des gestionnaires de disposer de ces outils. De notre point de vue, leur pertinence résulte de leur construction a posteriori, comme un produit des recherches portant sur l'analyse des processus.

Faut-il dès lors attendre que la recherche ait produit suffisamment de méthodes et de connaissances pour intervenir sur les évolutions des zones humides ? La recherche apporte des réponses partielles aux problèmes posés par la gestion des zones humides et de nombreuses autres formes de connaissances sont mobilisées dans les dispositifs associant souvent une diversité d'acteurs dans la définition des enjeux et moyens d'action. Plus que des outils "clés en main", il nous semble qu'il importe de considérer les ajustements de ces formes de connaissances qui s'opèrent dans ces dispositifs et les apprentissages auxquels ils donnent lieu. A ce titre, le PNRZH a produit relativement peu de méthodes de mise en œuvre de démarche de gestion concertée, ce qui nous semble être une perspective de recherche importante à développer.

Emergence d'un cadre méthodologique pour l'étude hydrologique des zones humides : quelles méthodes pour quels objectifs ?

ANIMATION TRANSVERSALE "FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE"

FRANÇOIS GIRAUD† (BRGM, SERVICE EAU - MONTPELLIER)

Il est universellement reconnu que la présence d'eau, permanente ou temporaire, douce, saumâtre ou salée, en surface ou à faible profondeur dans le sol, est indispensable à l'existence des zones humides. C'est d'ailleurs un des trois critères (avec le type de végétation et de sol) de classification et de définition juridique des zones humides (Ramsar, 1971 ; Loi sur l'Eau, 1992). L'hydrologie constitue donc le moteur du fonctionnement des zones humides.

Bien que, depuis trente ans, une somme considérable de réflexions, d'études et de travaux de recherche ait été produite sur les zones humides, peu de travaux scientifiques - ou alors seulement assez récemment - sont consacrés de manière spécifique à l'étude de leur fonctionnement hydrologique. Quand de tels travaux ont eu lieu, ils sont souvent restés très mono-disciplinaires produisant alors une vision trop compartimentée du fonctionnement hydrologique de la zone humide.

Les zones humides sont potentiellement présentes de l'amont à l'aval du bassin versant : tourbières, mares ou étangs, ripisylves, prairies humides, bras morts associés aux rivières, marais aménagés à vocation agricole plus ou moins marquée, vasières et prés salés sur le domaine littoral. C'est assez logiquement que tous les projets du PNRZH, mis à part quatre projets thématiques traitant plus particulièrement des relations homme-nature, ont abordé le fonctionnement hydrologique des zones humides. Ce sont, en fait, tous les types de zones humides qui sont étudiés du point de vue hydrologique mais avec des approches différentes selon qu'il s'agisse de petites mares forestières de quelques centaines de m², des zones humides de fonds de vallée en amont des bassins versants, de tourbières, de zones humides alluviales (Escaut, Seine, Garonne, Meuse, Rhin, Loire, Rhône, Ain, Doubs), ou de zones humides littorales comme celles des marais atlantiques, du marais de Kaw en Guyane, ou encore du delta de la Camargue qui couvre plus de 70 000 ha.

Le fonctionnement hydrologique de certaines de ces zones humides avait déjà été abordé avant le démarrage du PNRZH. C'est, par exemple, le cas des marais de Brouage sur la façade atlantique (Action Concertée sur les Marais de l'Ouest, Giraud, 1992 ; Anras, 1997), des zones humides de fonds de vallée du bassin versant du Coët Dan en Bretagne (Programme Bretagne Eau Pure II, Mérot et coll., 1995), ou encore des zones humides de la plaine alluviale de la Garonne (Programmes du GIS ECOBAG, Ruffinoni, 1995), de la Seine (PIREN Seine, Fustec et coll., 1998), du Rhin (PIREN Eau/Alsace, Sanchez-Perez, 1992) ou du Rhône (Bornette et coll., 1994). D'autres, au contraire, n'avaient pratiquement jamais fait l'objet d'étude hydrologique spécifique ; c'est notamment le cas des tourbières, et, plus encore, du marais de Kaw en Guyane, vaste zone humide d'environ 100 000 ha difficilement accessible.

Le premier constat est donc l'existence d'une grande variété de zones humides. Elle s'explique, d'une part, par la position de la zone humide au sein du bassin versant qui détermine ses relations avec son environnement hydraulique (eaux de surface et eaux souterraines), et, d'autre part, par les conditions climatiques. Le contexte hydrogéomorphologique et les conditions climatiques déterminent conjointement, et de manière prépondérante, le régime hydrologique naturel de la zone humide. La variété des zones humides s'explique ensuite par l'existence, ou au contraire par

l'absence, d'usages et de statuts juridiques. Quand ils existent, ils permettent de planifier des modes d'exploitation et de gestion hydraulique différents selon qu'il s'agisse de zones humides à vocation agricole, à vocation récréative ou de protection. Malgré la diversité des zones humides, est-il possible de décrire et d'étudier leur fonctionnement hydrologique à partir d'un schéma conceptuel générique qui pourrait se décliner pour chacun des types de zones humides ?

L'hydropériode,

UN CONCEPT UTILE MAIS LIMITÉ POUR L'ÉTUDE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE

Les définitions des zones humides mentionnent toutes la présence de l'eau mais sans donner de critères réellement quantitatifs : "étendues de marais, fagnes, tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas 6 mètres" (Ramsar, 1971), "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, 1992). D'autres définitions, aux USA par exemple, sont basées sur des appréciations plus quantitatives : "la nappe se situe à moins de 30 cm pendant une durée continue d'au moins 14 jours durant la période de croissance de la végétation, une année sur deux" (NRC, 1995). Ces définitions font toutes référence, de manière implicite ou explicite, à ce que l'on appelle communément l'hydropériode, c'est-à-dire l'évolution dans le temps du niveau d'eau libre à proximité immédiate de la surface du sol, en dessous ou au dessus de celle-ci.

L'étude du fonctionnement hydrologique des zones humides a donc débuté, logiquement, par le suivi des variations du niveau d'eau, que celui-ci soit au-dessus ou en dessous de la surface du sol. La figure 1 schématise l'hydropériode de quatre types de zones humides (Mitsch et Gosselink, 1993 ; Brinson, 1993 ; d'après Weng, 2000). Dans un marais principalement alimenté par des eaux de surface le niveau d'eau serait continuellement au-dessus du niveau du sol (fig. 1a) alors qu'il serait plutôt stable et continuellement en dessous du niveau du sol si l'alimentation était principalement d'origine souterraine (fig. 1d). Le niveau d'eau passerait périodiquement au-dessus et en dessous du niveau du sol dans le cas d'une zone humide littorale directement soumise au jeu des marées (fig. 1c) et seulement accidentellement dans le cas d'une zone humide alluviale, le niveau d'eau étant au-dessus du sol lors des périodes d'inondation (fig. 1b).

Bien que relativement simple à mettre en œuvre, l'étude de l'hydropériode fait déjà appel à plusieurs approches complémentaires basées sur des techniques différentes : limnimétrie lorsque le niveau d'eau évolue au-dessus de la surface du sol, pédologie et piézométrie lorsqu'il passe sous le niveau du sol. Le suivi limnimétrique est réalisé grâce à des échelles limnimétriques (observations ponctuelles) ou à des enregistrements limnimétriques (mesures en continu). La mesure du niveau piézométrique est effectuée grâce à des piézomètres (mesure ponctuelle, ou en continu si l'on installe un capteur). Dans la très grande majorité des cas, le suivi piézométrique des zones humides concerne seulement les horizons pédologiques, jusqu'à une profondeur de l'ordre de 2 à 3 mètres, au-delà de laquelle il est nécessaire de faire appel à des techniques de forage plus lourdes.

Si le concept de l'hydropériode est indispensable pour constater le fonctionnement hydrologique d'une zone humide, il reste néanmoins insuffisant pour le comprendre et le quantifier puisqu'il n'apporte aucun élément sur les mécanismes hydrologiques en jeu. Par exemple, dans le cas de la zone humide alluviale, il ne permet pas de déterminer l'origine de l'inondation : débordement de la rivière et/ou remontée de la nappe phréatique. En restreignant l'étude du fonctionnement hydrologique aux variations des niveaux d'eau dans et au-dessus du sol, le concept d'hydropériode offre une vision très simplifiée des écoulements dans laquelle le "compartiment sol" est considéré

comme homogène, sans différenciation des horizons pédologiques, mais surtout sans connexion avec l'environnement hydraulique de la zone humide. Les écoulements dans la zone saturée et non saturée du sol sont approchés avec une composante essentiellement verticale ; le fonctionnement hydrologique étant régi par l'infiltration et l'évapotranspiration. Dans le concept d'hydropériode, l'objet "zone humide" est limité au système composé du sol, de la plante et de l'atmosphère, avec une extension verticale limitée aux horizons superficiels du sol.

Le modèle conceptuel de fonctionnement hydrologique,

UNE ÉTAPE INCONTOURNABLE

L'élaboration de modèles conceptuels a pour objectif d'identifier les différents compartiments hydrologiques en jeu dans le fonctionnement des zones humides, leurs degrés de connexion, la contribution relative des eaux de pluie, souterraine, de surface ou marine, pour finalement estimer en ordres de grandeur les entrées et sorties, la capacité de stockage, et proposer des typologies hydrologiques fonctionnelles. Le modèle conceptuel de bilan hydrologique permet également d'identifier les compartiments pour lesquels les informations quantitatives sont disponibles ou absentes, afin de mettre en place le protocole d'acquisition adéquat. Enfin, le modèle conceptuel permet d'apporter des réponses certes qualitatives, mais rigoureuses, aux questions suivantes : d'où vient l'eau qui alimente la zone humide ? Où va-t-elle ?

Il ne fait aucun doute que la quantification des fonctions attribuées à une zone humide doit nécessairement reposer sur un modèle conceptuel valide qui décrit correctement ses relations hydrologiques avec son environnement, bassin amont et environnement aval. L'existence d'une zone humide est liée à un approvisionnement suffisant en eau pour compenser, au moins momentanément, les pertes par évapotranspiration, drainage profond (vertical) et drainage vers l'aval, associé à un contexte hydrogéomorphologique favorable, généralement la présence d'une formation géologique peu perméable. L'eau peut être d'origine météorique (pluie), souterraine (aquifère, source) et/ou de surface (ruissellement, rivière, marée). La présence d'une zone humide dans un bassin versant est donc liée au fonctionnement d'un réseau hydrographique qui peut être d'importance variable (d'ordre 1 à 2 pour les petites zones humides de fonds de vallée en tête de bassin, ordre 3 ou 4 pour les ripisylves associées aux grands fleuves) et/ou à une nappe sous-jacente, locale ou d'extension régionale.

Quel que soit le type de zone humide considéré, indépendamment de sa taille et de sa localisation dans le bassin versant, il apparaît non seulement possible mais également indispensable de proposer un modèle conceptuel de son fonctionnement hydrologique (fig. 2). Cette représentation conceptuelle est alors nécessairement tridimensionnelle. Les méthodes utilisables pour calculer ou estimer les différentes composantes du modèle sont présentées dans le tableau 1.

A titre d'exemple, il est intéressant de montrer comment l'élaboration d'un modèle conceptuel valide du fonctionnement hydrologique d'une ripisylve de la plaine alluviale de la Seine a permis de remettre en cause certaines idées reçues sur les relations entre la nappe, la ripisylve et la rivière (Weng et coll., 2000a). L'instrumentation et le suivi simultané, dans le temps et dans l'espace, des niveaux de la Seine, de la nappe alluviale et de la zone humide ont mis en évidence que les directions d'écoulement de la nappe étaient extrêmement variables sur des pas de temps relativement courts. En mai 1998, la rivière drainait la nappe alors qu'en septembre 1998, la rivière alimentait la nappe fournissant de l'eau à la zone humide. En octobre 1998, un écoulement mixte s'est mis en place, la rivière alimentant la zone humide dans sa partie amont, celle-ci étant drainée par la rivière dans sa partie aval (fig. 3). La ripisylve n'est donc pas systématiquement en position d'interface entre la nappe (amont) et la rivière (aval) ; son rôle sur l'élimination potentielle des nitrates peut donc être à reconsidérer en tenant compte de la forte variabilité des directions d'écoulement souterrains.

Paramètres	Matériel/ technique	Difficultés/ inconvénient	Exemple de mise en œuvre PNRZH
Pluie	Pluviomètre manuel Pluviomètre enregistreur	Représentativité	Tous les types de zones humides
Pluie efficace	à partir des pluies : estimation	Précision, variabilité	Seine, Garonne
Niveaux d'eau	Echelles limnimétriques Enregistreurs	Nivellement précis (cm), répété. Nivellement précis (cm)	Seine, Tourbières, MARLITROP, Loire
Vitesses d'écoulement	Courantomètre (hélice) Courantomètre (électromagnétique)	Faible vitesse (<cm/s) encombrement, végétation aquatique, faible profondeur inversion d'écoulement (marée, fermeture d'ouvrages) accessibilité Accessibilité	ARAMIS MARLITROP Rhône Camargue
Débits	Stations de jaugeage Seuils, ouvrages	Relation hauteur-débit non univoque. Manœuvre d'ouvrages Lois hydrauliques Manœuvres des ouvrages	Tourbières Camargue
Niveaux piézométriques (horizons pédologiques) Prairies	Piézomètres	Nivellement précis (cm) profondeur limitée (2-3 m)	Seine, TyFon, Tourbières
Niveaux piézométriques (aquifère) Scarpe	Puits fermiers, forage, piézomètres	Nivellement précis, niveau aquifère capté mal identifié, comblement, niveau influencé	Seine, Garonne, TyFon, Loire Escaut, Rhin
Stockage (dépression)	Cartographie, nivellement		TyFon
Stockage (sol zone non saturée)	Carottage échantillons de sol, étuvage Tensiométrie	Matériel adapté Echantillons de sol non perturbé Maintenance, interprétation délicate	Seine Seine
Propriétés hydrauliques (sol)	Pompages d'essai Test en laboratoire	Mise en œuvre longue, matériel adapté Matériel adapté, long	Seine
Propriétés hydrauliques (aquifère)	Pompages d'essai	Mise en œuvre longue, matériel adapté	Seine
Evaporation plans d'eau libre	Données météorologiques bac Colorado ou ETP Mesures expérimentales maintenance	Représentativité Mise en œuvre difficile,	Tourbières Tourbières, Seine
Evapotranspiration ETP	Données météorologiques Mesures expérimentales (flux de sève, chambre)	Passage ETP à ETR Mise en œuvre lourde, interprétation	Tous les types de zones humides Aucune
Ruissellement	A partir des pluies : estimation	Précision, variabilité	Aucune

L'intérêt du modèle conceptuel de fonctionnement hydrologique est illustré par la typologie hydro-géochimique proposée pour les zones humides de fonds de vallée en Bretagne (Durand et coll., 2000). Cette typologie distingue trois catégories hiérarchisées de zones humides : zones humides potentielles (ou enveloppe des zones humides), effectives (présentant les caractéristiques au moment de l'observation), et efficaces (définies selon une fonction donnée et un objectif à attein-

dre pour cette fonction). Pour rendre une zone humide efficace, il faut maîtriser les circulations d'eau en son sein, dans les trois dimensions de l'espace, ce qui est beaucoup plus délicat que d'assurer uniquement un certain degré d'humidité du sol. Développée pour les petites zones humides de fonds de vallée en Bretagne, cette typologie certainement généralisable reste encore à tester sur les différentes catégories de zones humides.

Le bilan hydrologique,

UNE APPROCHE OPÉRATIONNELLE POUR LA RECHERCHE ET LA GESTION

Finalement, en posant la problématique du fonctionnement hydrologique de manière rigoureuse et complète, c'est-à-dire en ne négligeant *a priori* aucun terme du bilan hydrologique, le modèle conceptuel constitue une étape préliminaire incontournable pour l'estimation quantitative des fonctions hydrologiques remplies par les zones humides. On attribue généralement aux zones humides le rôle d'"éponges hydrologiques" capables d'intervenir sur la régulation des crues, le soutien d'étiage, la ré-alimentation des aquifères, la stabilisation et la protection des sols, l'épuration des eaux. Toutefois, ces fonctions qui font des zones humides de véritables infrastructures naturelles, sont très rarement quantifiées. Cette vision très générale et positive du rôle des zones humides peut être modérée puisqu'il semblerait que dans certains cas elles pourraient accroître l'intensité des crues et ne participer que très faiblement au soutien d'étiage (Burt, 1995). D'autres auteurs indiquent que le drainage artificiel d'une zone humide pourrait contribuer à augmenter significativement le débit d'étiage (Robinson, 1990). De toute évidence, la relation entre l'effet sur l'écrêtement des crues et le pourcentage de superficie en zone humide du bassin versant n'est pas évidente. Celle-ci dépend très étroitement de la localisation des zones humides ainsi que de la saison. Amatya (1993) a montré, en modélisant le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant théorique, qu'une zone humide occupant 5% de la surface totale du bassin (7200 ha) et localisée à l'exutoire du bassin était aussi efficace vis à vis de l'écrêtement des crues qu'une zone humide occupant 40% du bassin mais localisée plus en amont de l'exutoire.

Le bilan hydrologique constitue une première approche vers l'évaluation quantitative du rôle hydrologique de la zone humide. Il a été établi sur la base d'un modèle conceptuel de fonctionnement hydrologique pour plusieurs zones humides du PNRZH. Pour certaines zones humides de fonds de vallée, en Bretagne, le bilan hydrologique calculé sur la période 1996-2000 met en évidence que l'apport d'eau souterraine en provenance de l'aquifère profond (schiste) pourrait représenter de 20 à 25% des apports du sol et des altérites (Molénat et coll., 2000). A l'opposé, le bilan hydrologique interannuel des zones humides de la plaine alluviale de la Seine, calculé sur la période 1979-1995, montre que celles-ci sont alimentées environ à 75% par les eaux de l'aquifère de la craie et à 25% par les précipitations efficaces directement sur la plaine alluviale (Weng et coll., 2000b). Ces deux exemples soulignent la nécessité de prendre en compte l'environnement régional (en l'occurrence les aquifères régionaux) dans l'étude hydrologique des zones humides en considérant des secteurs d'alimentation beaucoup plus vastes que la zone humide *sensu stricto*. La contribution des eaux souterraines, qu'elle soit majoritaire ou minoritaire, a des conséquences directes en termes d'évaluation du pouvoir épurateur des zones humides. Dans le cas des zones humides de fonds de vallée, la diminution des teneurs en nitrates au niveau de la zone humide elle-même pourrait être due à la dénitrification (mécanisme souvent évoqué) mais également à la dilution par des eaux souterraines appauvries en nitrates qui auraient pu subir une dénitrification autotrophe (avec réduction de la pyrite). D'autres exemples, extraits de la littérature, indiquent que la faible teneur en nitrates d'eaux souterraines échantillonnées au droit de zones humides n'était pas due à leur pouvoir épurateur mais simplement au fait que ces eaux souterraines se sont infiltrées en dehors des zones humides il y a plus de quarante ans, à une époque où les intrants chimiques agricoles étaient moins importants.

Sur la Garonne, la modélisation hydrodynamique des écoulements souterrains et de

surface a mis en évidence que la zone humide, localisée dans un méandre concave de la rivière, est alimentée en partie par l'eau de la rivière qui se mélange à l'eau de nappe. Toutefois, le débit d'infiltration peut varier de 600 m³/j à 7200 m³/j lorsque le débit de la Garonne passe de 100 à 300 m³/s. La simulation du passage d'une crue (1600 m³/s) a permis de mettre en évidence qu'au-delà de 300 m de distance du fleuve, la variation piézométrique de la nappe n'excède pas 20 cm (Weng et coll., 2003, fig. 4). Cette distance est de 500 m dans le méandre au niveau de la ripisylve. Cet exemple illustre l'intérêt de disposer d'un modèle conceptuel valide, appuyé sur une investigation détaillée du terrain (campagne de reconnaissance géologique permettant de cartographier l'épaisseur d'alluvions au niveau de la zone humide, de localiser d'anciens chenaux et d'implanter un réseau de 20 piézomètres sur environ 1 km²), pour quantifier le fonctionnement hydrologique de la zone humide. Un des résultats opérationnels a été de montrer qu'il est possible de délimiter la zone hydrologiquement active au sein de la plaine alluviale. Elle correspondrait à l'enveloppe de la zone humide effective selon la typologie proposée par Durand et coll., (2000). Comme précédemment, la bonne compréhension du fonctionnement hydrologique a permis de préciser le rôle épurateur des zones humides. La mise en œuvre d'un modèle de transport conservatif d'éléments dissous a, en effet, permis de différencier les secteurs où la diminution des concentrations en nitrates dans la nappe (100 mg/l) est due majoritairement à la dilution par l'eau de la Garonne moins chargée (10 mg/l) de secteurs où la diminution en nitrates est due à la dénitrification.

Enfin, l'exemple du bilan hydrologique, réalisé à l'échelle de la Camargue (70 000 ha), nous rappelle l'importance de considérer les composantes anthropiques du bilan, et non pas seulement les composantes naturelles du cycle de l'eau. En effet, en Camargue, les apports par pompage dans le Rhône représentent 360 Mm³, soit à peu près autant que les pluies (400 Mm³), elles-mêmes équivalentes aux pertes par évapotranspiration (400 Mm³) (fig. 5, Dervieux et coll., 2001). Des conclusions similaires avaient été apportées par Giraud et coll. (1991) pour le marais de Brouage (1500 ha), sur la façade atlantique, les prélèvements par l'irrigation représentaient de 40 à 60% du bilan hydrologique estival.

Conclusions

Plusieurs difficultés pratiques limitent, encore aujourd'hui, l'amélioration de la compréhension du fonctionnement hydrologique des zones humides : connaissance insuffisante de la topographie fine (qui conditionne les écoulements), chroniques de niveaux d'eau ou de débit absentes ou difficilement exploitables, frontières physiques du système à étudier mal définies et/ou variables dans le temps (cas des zones humides alluviales par exemple), caractérisation du domaine souterrain généralement absente, contribution des aquifères rarement prise en compte, hétérogénéité du sol et du sous-sol mal évaluée à l'échelle de la zone humide, EvapoTranspiration Réelle mal quantifiée bien qu'étant un des principaux moteurs du fonctionnement hydrologique.

La mise en place, dès le démarrage du PNRZH, d'une animation transversale consacrée à l'hydrologie des zones humides visait à proposer un cadre méthodologique commun aux projets, permettant ainsi de surmonter certaines des difficultés pratiques énoncées, pour finalement répondre à deux objectifs principaux et complémentaires. Il s'agissait d'abord d'apporter aux gestionnaires des éléments généraux de réponse sur le fonctionnement global de différents types de zones humides pour savoir si les multiples fonctions qui leur étaient attribuées étaient réelles (recharge de nappe, stockage, écrêtement de crues). Il s'agissait, ensuite, de fournir des éléments de connaissance plus pointus aux autres scientifiques, non hydrologues, mais dont le sujet nécessite de tenir compte du fonctionnement hydrologique de la zone humide, par exemple déterminer l'origine de l'eau (souterraine ou de surface) pour évaluer des taux de dénitrification, ou l'hydropériode pour mieux interpréter la distribution de population de poissons ou d'oiseaux d'eau.

Finalement, que le but soit de répondre en termes généraux (pour la gestion, à l'échelle du bassin ou de la zone humide) ou en termes plus pointus (pour la recherche, par exemple, à

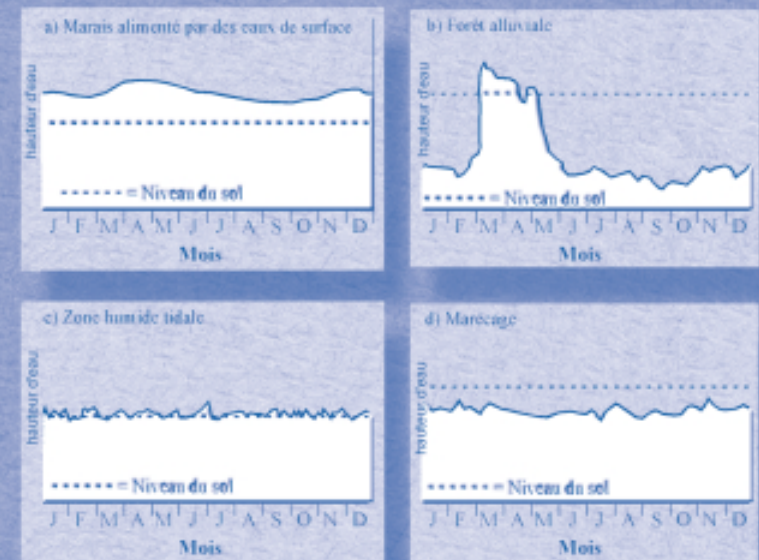
l'échelle du profil de sol ou de l'interface nappe-rivière pour quantifier finement la dénitrification), il a d'abord été indispensable de définir le modèle conceptuel de fonctionnement de chacune des zones humides étudiées. Ce modèle sert à identifier les différents compartiments hydrologiques en jeu, leurs degrés de connexion (effectif ou potentiel) et à préciser la géométrie du système dans les 3 dimensions de l'espace (limites amont/aval et surface/souterrain).

Ensuite, le calcul de bilans hydrologiques a permis d'estimer les entrées et sorties, la capacité de stockage de différentes zones humides, et finalement leur rôle hydrologique dans le bassin versant. La contribution relative d'eaux d'origines différentes (météorique, souterraine, de surface) a pu être déterminée pour élaborer une typologie appliquée aux zones humides de fonds de vallons. Le rôle, souvent sous-estimé des eaux souterraines, a été confirmé sur plusieurs types de zones humides. L'étude simultanée des eaux de surface et des eaux souterraines a également permis de remettre en cause la vision un peu trop figée du fonctionnement des ripisylves qui les plaçait en position d'interface obligatoire entre la nappe et la rivière. Le rôle épurateur des zones humides, essentiellement évalué au travers de l'élimination des nitrates par dénitrification et assimilation racinaire, est à relativiser au regard des mécanismes de dilution par des eaux moins chargées, qu'elles soient de nappe comme dans le cas des zones humides de fonds de vallée en Bretagne, ou de surface comme dans le cas des ripisylves de la plaine alluviale de la Garonne.

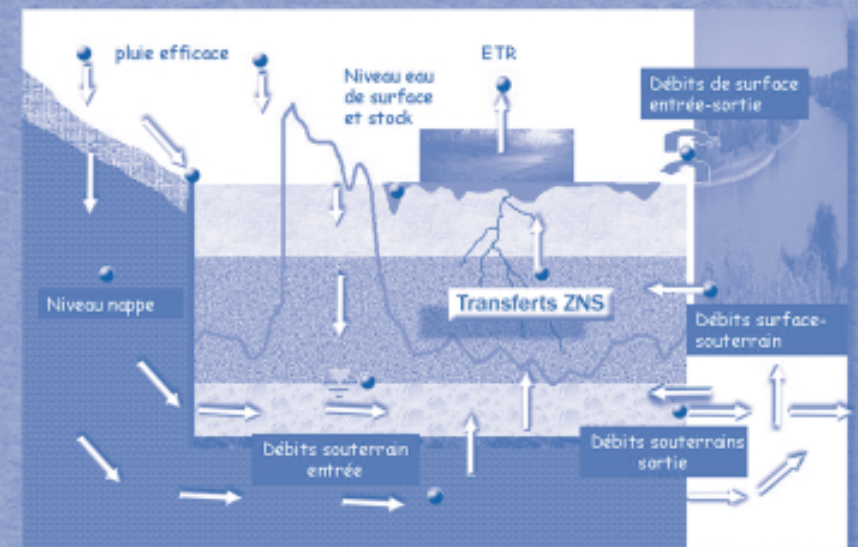
Par la variété et la complémentarité des sites étudiés, le PNRZH constitue une base de connaissance importante sur l'hydrologie des principaux types de zones humides à l'échelle du territoire, tout en précisant les limites d'application des résultats pour la gestion et en identifiant les lacunes qui restent à combler.

Bibliographie

- Amatya D.M.(1993). Hydrologic modeling of drained forest lands. Ph.D Thesis, North carolina State Univ, Raleigh, NC.
- Bendjoudi H. (2000). Fonctionnement des zones humides riveraines du cours moyen des rivières. Analyse et modélisation de la genèse des hétérogénéités structurales et fonctionnelles – Application à la Seine moyenne. Rapport final PNRZH, novembre 2000. 140 pages.
- Bornette G., Amoros C., Castella C. et Beffy J.L. (1994). Succession and fluctuation in the aquatic vegetation of two former Rhône river channel. Vegetatio. Vol. 110 : pp. 171-184.
- Anras L. (1997). Influence du réseau hydraulique sur la qualité des eaux de surface dans un marais littoral agricole : rôle des processus géochimiques à l'interface eau-sédiment. Thèse Univ Poitiers, 173 pages.
- Brinson M.M. (1993). A hydrogeomorphic classification for wetlands. Report of the US Army Corps of Eng., Vicksburg. N° WRP-DE-4.
- Burt T.P.(1995). The role of wetlands in runoff generation from headwater catchments. In Hydrology and hydrochemistry of British wetlands. J. Hughes and L. Heathwaite (eds) : pp. 21-38.
- Durand P., Gascuel-Odoux C., Kao C. et Merot Ph. (2000). Une typologie des petites zones humides ripariennes. Etude et Gestion des Sols : Vol. 7(3) : pp. 207-218.
- Fustec E., Greiner I., Schanen O., Gaillard S. et Dzana J.G. (1998). Zones humides : des milieux divers aux multiples fonctions. In La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé. Meybeck M., de Marsily G. et Fustec E. (eds), Elsevier, Paris : pp. 211-262.
- Giraud F., Chevallier C., Médion H. et Fleury R. (1991). Summer water budget of a french coastal agricultural marsh: the Moëze marsh (France). Revue des Sciences de l'Eau, Vol. 4 : pp. 521-542.
- Giraud F. (1992). Modélisation hydrologique d'un marais agricole drainé : perspectives pour l'étude du transfert d'azote et de phosphore dans le réseau hydraulique. Thèse Univ Rennes I. 224 pages.
- Mérot Ph., Ezzabar B., Walter C. et Arousseau P. (1995). Mapping soil waterlogging using digital terrain model. Hydrological Processes. Vol. 9: pp. 175-179.
- Mitsch W.J. et Gosselink J.G. (1993). Wetlands. VanNostrand Reinhold, New York. 722 pages.
- Molénat J., Gascuel-Odoux C. et Durand P. (2000). Le fonctionnement hydrologique des zones humides en interaction avec le versant ; le cas du bassin versant de Naizin-Kervidy. In: Ty-Fon, typologie fonctionnelle des zones humides de fonds de vallée en vue de la régulation de la pollution diffuse, rapport final PNRZH, septembre 2000 : pp. 19-24.
- National Research Council (1995). Wetlands, characteristics and boundaries. National Academic Press, Washington. 307 pages.
- Picon B. (2000). Les enjeux de la gestion hydraulique dans le delta du Rhône. Pour une formalisation des interactions entre dynamiques sociales et écologiques. Rapport final PNRZH, septembre 2000. 62 pages.
- Ruffinoni C. (1995). Rôle des ripisylves dans la réduction des pollutions azotées diffuses en milieu fluvial. Thèse Univ Toulouse III. 80 pages.
- Robinson M. (1990). Impact of improved land drainage on river flows. Report 113, Institute of Hydrology, Wallingford.
- Sanchez-Perez J.M. (1992). Fonctionnement hydrochimique d'un écosystème forestier inondable de la plaine du Rhin. Thèse Univ Louis Pasteur, Strasbourg I. 165 pages.
- Weng Ph. (2000). Fonctionnement hydrologique d'une zone humide alluviale, relations avec l'aquifère sous-jacent et les rivières. Exemple de la Seine moyenne. Thèse Univ Paris VI. 202 pages.
- Weng Ph., Coudrain A., Kao C., Bendjoudi H. (2000a). Fonctionnement hydrologique de la zone humide à l'échelle régionale. In: Fonctionnement des zones humides riveraines du cours moyen des rivières – analyse et modélisation de la genèse des hétérogénéités structurales et fonctionnelles – application à la Seine moyenne, Rapport final PNRZH, novembre 2000 : 51-66.
- Weng Ph., Coudrain A., Bendjoudi H. (2000b). La zone humide au sein du bassin versant. In: Fonctionnement des zones humides riveraines du cours moyen des rivières – analyse et modélisation de la genèse des hétérogénéités structurales et fonctionnelles – application à la Seine moyenne. Rapport final PNRZH, novembre 2000 : pp. 39-50.
- Weng Ph., Sanchez-Perez J., Sauvage S., Vervier Ph. et Giraud F. (2003). Assessment of the quantitative and qualitative buffer function of an alluvial wetland : Hydrological modelling of a large floodplain (Garonne river, France). Hydrological Processes. Vol. 17. (12): pp. 2375-2392.



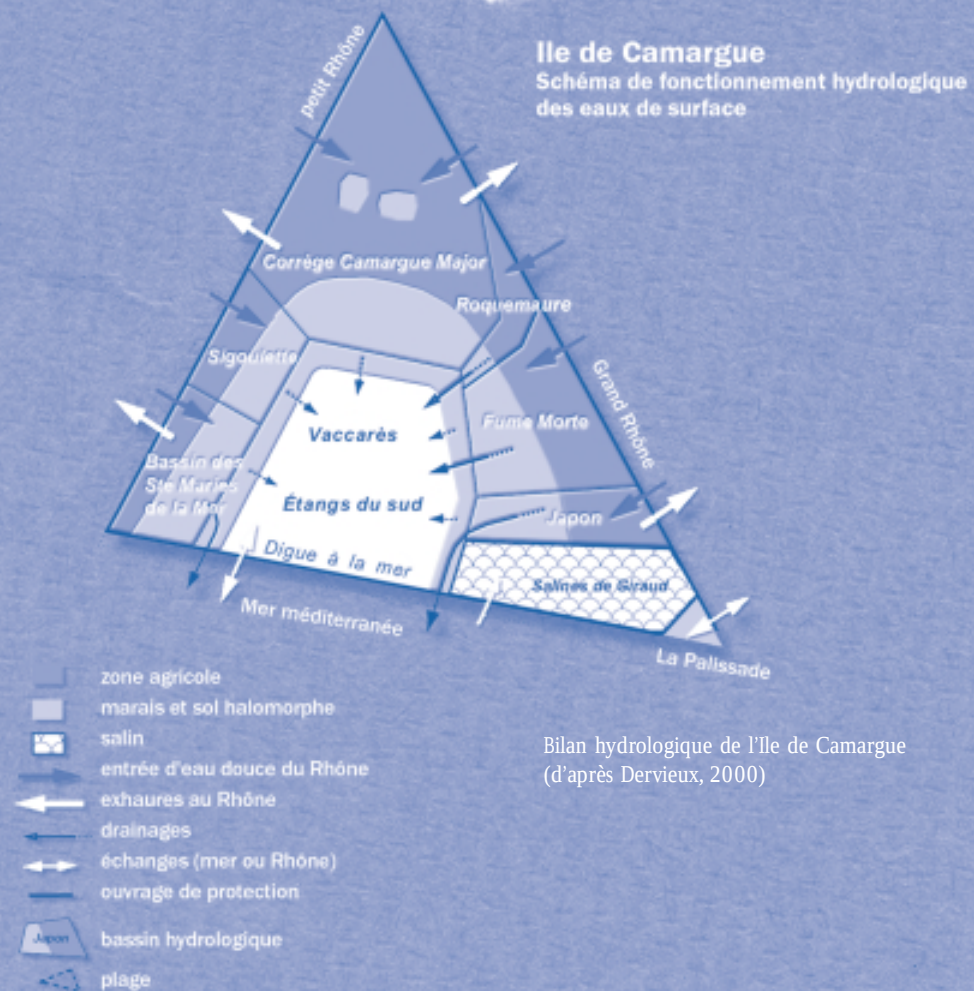
Exemples d'hydropériodes pour différents types de zones humides (d'après : Mistsch et Gosselink, 1993 ; Brinson, 1993, dans Weng, 2000)



Modèle conceptuel de fonctionnement hydrologique d'une zone humide (les points rouges représentent les processus à mesurer pour élaborer le bilan hydrologique global de la zone humide)



Modélisation de la variation piézométrique maximum au niveau d'une zone humide alluviale de la Garonne (site de Monbéqui, variations exprimées en mètre) durant une crue (Weng et coll., 2003).



Bilan hydrologique de l'Ile de Camargue
(d'après Dervieux, 2000)

**EVALUATION GLOBALE DES TERMES
DU BILAN HYDRIQUE**
(d'après Gindre et al 1999)

Options scientifiques adoptées et premiers résultats de l'étude d'un vaste et inaccessible marais littoral équatorial : Le marais de Kaw en Guyane française

D. GUIRAL (IRD, CAYENNE)

guiral@cayenne.ird.fr

Introduction

Armi les zones humides littorales de Guyane le marais de Kaw constitue un ensemble écologique remarquable tant par la richesse biologique de ses communautés végétales et animales que par sa superficie, 137 300 ha subdivisée en deux secteurs palustre 105 800 ha et marin 31 500 ha (fig. 1). Les marais et la mangrove de Kaw forment la plus vaste zone humide française reconnue pour sa valeur biologique au plan international et national (Site Ramsar ; 1993 - ZNIEFF de type I, 1992 - Réserve naturelle, mars 1998 - Parc Régional, mars 2001). Paradoxalement, si cette reconnaissance est unanime, elle ne reposait que sur des données très éparées relatives aux trois principaux cours d'eau qui drainent le marais (les criques Angélique et Gabrielle et la rivière de Kaw) et limitées à des inventaires botaniques et relatifs à certaines populations emblématiques d'oiseaux (hoatzins, canards musqués, ibis rouges), de poissons (tarpons et atipas), mais surtout de crocodiliens. En effet, il co-existe dans le marais et les rivières drainant la Montagne de Kaw quatre espèces de caïmans dont le caïman noir (*Melanosuchus niger*). Cette sous-population du marais de Kaw constituerait l'une des dernières populations au monde encore en équilibre et donc viable.

Les stratégies et les acquis du PNRZH

Avec une double justification d'ordre logistique et pragmatique, les écosystèmes fluviaux, estuariens et ripicoles des marais de Kaw-Roura, les seuls réellement accessibles, ont été prioritairement abordés dans le cadre du Chantier Guyane du PNRZH. Cependant, ces milieux d'eau libre ne sont pas représentatifs au plan écologique de l'immense marais intérieur d'eau stagnante couvert par une végétation flottante herbacée très originale. Ceinturée par des falaises très abruptes et par des forêts marécageuses inextricables et impénétrables, côté terrestre, et par des vasières très instables, le long du littoral, le marais est inaccessible par voie fluviale et terrestre. Ainsi, l'essentiel de la zone humide de Kaw-Roura en termes de superficie et de fonctionnement hydrologique est resté quasi quasiment vierge de toutes connaissances scientifiques jusqu'à une période très récente. Dans la continuité des opérations de recherche du PNRZH, menées principalement sur la Rivière de Kaw, une plate-forme flottante a été déposée par hélicoptère le 4 décembre 2001 dans une mare isolée et permanente du marais. Des travaux d'inventaire, en cours de réalisation, ont montré le caractère exceptionnel de cette mare (identification de plusieurs espèces végétales nouvelles pour la Guyane - présence de plus de 100 caïmans noirs - 86 espèces d'oiseaux recensées dont une nouvelle espèce pour

la Guyane : *Laterallus melanophaius* mais surtout plus importante aire de reproduction au monde pour des hérons forestiers nocturnes jusqu'alors considérés comme très rares : *Agami agamia* et *Cochlearius cochlearius*).

Un accès scientifique indirect à l'inaccessible : les outils de la télédétection

Afin d'obtenir "à distance" des informations sur le fonctionnement et la structuration de l'ensemble de la zone humide, il a été fait appel aux techniques de la télédétection avec le recours à certains capteurs jamais mis en œuvre en zone amazonienne. Il a été ainsi réalisé, en octobre 1998 :

- un survol quasi-systématique du marais avec utilisation d'un imageur hyper spectral aéroporté CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager) ;
- dix transects héliportés avec utilisation d'un Laser (total de 230 km avec des acquisitions de hauteur au sol tous les 20 cm et une précision effective de l'ordre de 5 cm).

Outre l'obtention de données descriptives et spatialisées il était recherché, par la combinaison de ces deux nouvelles techniques, une caractérisation des relations entre les formations végétales et la topographie. Ces nouveaux outils de télédétection ont été complétés d'approches plus traditionnelles (traitement d'images optiques Landsat TM et radar ERS-1) ce qui a permis une première description du fonctionnement hydrologique de l'ensemble de la zone du marais

La rivière de Kaw

Principal fleuve du marais, la rivière de Kaw constitue un hydrosystème complexe formant un continuum écologique qui draine deux sous-bassins versants radicalement différents aux plans topographique, géologique, et pédologique (voire climatologique). La rivière de Kaw et ses tributaires drainent, en amont, les formations forestières de la Montagne de Kaw colonisant des sols latéritiques cuirassés très pauvres et, en aval, un immense marais développé sur des sols argileux résultant de l'accumulation de vases marines d'origine amazonienne.

Sur la montagne de Kaw, les eaux de pluie, après une courte circulation initiale sur et sous la cuirasse latéritique localement fracturée, présentent un écoulement de type torrentiel. En limite du plateau et le long des pentes très abruptes les eaux de ruissellement et issues de résurgences alimentent un réseau très dense de ravines de faible profondeur dont le lit est constitué de gravelles issues du démantèlement de la cuirasse sommitale. A ces deux situations : plateau sommital et front de corniche correspondent deux unités paysagères (De Granville, 1986) :

- sur les sols très peu développés lorsque la cuirasse bauxi-latéritique est sub-affleurante, une forêt sèche, basse, constituée en majorité de petits arbres au tronc grêle, formant une voûte disjointe permettant le développement de tapis herbacés continus ;
- sur les pentes, une forêt haute diversifiée, riche en épiphytes, développée sur des sols ferrallitiques profonds et bien drainés.

A la base de la Montagne de Kaw, les eaux s'écoulent ensuite très lentement drainant divers types de formations végétales adaptées à des périodes plus ou moins longues de submersion, par l'eau douce, pour les formations strictement continentales : prairies et forêts marécageuses, et par des eaux à salinité variable, pour les formations littorales : mangrove.

L'extension de la montagne de Kaw vers le Sud (Montagne Favard) que contourne la rivière crée une importante discontinuité du cours de la rivière et des écoulements. L'existence de ce seuil oppose en saison sèche un secteur amont présentant une succession de très amples méandres à un secteur aval rectiligne dont l'orientation générale sud-est nord-ouest résulte de la dynamique de transport des sédiments amazoniens le long du littoral. En saison de pluie, cette discontinuité demeure. Le secteur amont se transforme en un vaste plan d'eau libre de faible profondeur. Le secteur aval, en relation direct avec l'océan, permet l'évacuation par divers affluents des eaux du marais localisé à l'est de la rivière de Kaw. Le secteur de méandres, qui évolue en fonction du régime des précipitations en une plaine d'inondation, est colonisé par un peuplement dense d'*Echinochloa polystachya* et de *Leersia hexandra*. Cette prairie développée sur d'anciens polders construits lors de la colonisation de la Guyane et de la période esclavagiste est actuellement régulièrement brûlée et pâturée (élevage extensif de zébus). Ces pratiques semblent s'accompagner d'une colonisation très rapide par une espèce arborescente *Montrichardia linifera* formant de vastes îlots monospécifiques au contour parfaitement circulaire.

L'immense marais qui s'étend au pied de la montagne de Kaw est un écosystème très original caractérisé par une végétation flottante dense de cypéracées (où dominant *Eleocharis interstincta* et *Rhynchospora gigantea*) et de fougères (*Blechnum serrulatum* et *Thelypteris interrupta*). Cette communauté constitue une strate plus ou moins épaisse flottante au cours de la saison de pluie et qui repose sur une tourbe acide ("pégasse") en saison sèche (Hoff, 1999). Le paysage très uniforme du marais herbacé est interrompu par des alignements de palmiers de haute taille (palmier "Bâche", *Mauritia flexuosa*) et par des îlots d'arbustes (*Chrysobalanus icaco*) développés sur des anciens cordons sableux orientés parallèlement au trait de côte actuel.

Les eaux drainant le marais à leur arrivée dans la rivière de Kaw sont caractérisées par une faible minéralisation (conductivité inférieure à 100 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), des concentrations très basses en oxygène (valeurs en général inférieures à 2 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) et un pH acide (inférieur à 6) lié à la présence de quantités très importante de substances organiques dissoutes. Ces caractéristiques résultent de l'abondance de la biomasse macrophytique flottante qui limite les échanges d'oxygène avec l'air. Dans ce contexte de sous-oxygénation, la minéralisation incomplète de la biomasse végétale conduit à la formation et l'accumulation de la pégasse et à la libération de composés humiques hydrosolubles. Ces eaux très peu productives se déversent en période de crue dans la rivière de Kaw après avoir traversé une forêt marécageuse caractérisée par une flore où domine un nombre restreint d'espèces (*Euterpe oleracea*, *Symphonia globulifera*, *Virola surinamensis* et *Calophyllum brasiliensis*). Le long de la rivière de Kaw, en aval des contreforts de la montagne Favard, se développe une forêt marécageuse ripicole relativement plus diversifiée avec, en plus des espèces précédentes : *Pachira aquatica*, *Pterocarpus officinalis* et *Genipa americana*. Enfin, les berges sont colonisées par divers peuplements quasi monospécifiques (un arbuste épineux *Machaerium lunatum* et une grande Aracée : *Montrichardia arborescens*). En amont et au niveau de la transition entre la zone de méandre et le cours linéaire de la rivière de Kaw, l'important rétrécissement du lit de la rivière s'accompagne du développement d'une graminée très vigoureuse (*Panicum elephantipes*) piégeant divers macrophytes flottants. En l'absence de faucardage cette végétation contribue, en saison sèche, à une quasi-dissociation de la plaine de Kaw en deux sous-bassins, en amont, une prairie hygrophile strictement continentale, en aval, des forêts marécageuses continentales puis estuariennes. En relation avec les apports salins par l'estuaire, la forêt marécageuse d'eau douce est progressivement remplacée par une formation de mangrove. Entre ces deux formations existent une zone de transition dénommée par Jeremie et Raynal (1999) "hiatus floristique" car présentant une flore moins diversifiée que les secteurs amont, de forêt marécageuse et aval, de mangrove.

La structuration paysagère de l'ensemble du marais et de la rivière de Kaw est ainsi directement déterminée par la dynamique des eaux et par l'hydrochimie qui, elle-même, résulte en particulier des bilans, au niveau de l'estuaire, entre les décharges des eaux continentales et les intrusions océaniques.

En contrôlant les échanges d'eau entre le milieu continental et l'océan, le fonctionnement estuarien joue un rôle déterminant dans la structuration de l'ensemble du marais. L'instabilité du trait de côte constitue la caractéristique majeure des écosystèmes estuariens et côtiers de la Guyane. Ainsi la structuration actuelle du marais ne peut être considérée que comme un état transitoire dépendant d'un ensemble de contraintes physiques qui s'expriment selon diverses échelles de temps et d'espace.

Un estuaire colonisé par des mangroves sous la contrainte des dynamiques littorales

La géomorphologie de l'estuaire de la rivière de Kaw s'inscrit dans le cadre général de la dynamique des côtes du Plateau des Guyanes sous l'influence des apports de l'Amazonie. Les apports sédimentaires de l'Amazonie, issus de l'érosion des sols des Andes et du bas bassin amazonien, sont compris entre 11 et 13.108 t par an (Meade et coll., 1985). Ils représentent environ 10% des apports terrigènes mondiaux aux océans. La moitié de cette charge sédimentaire à proximité du delta de l'Amazonie (6.3 ± 2.108 t) et moins de 5% des apports sont exportés directement vers le large (Kuehl et coll., 1986). En effet, une fraction importante des apports de l'Amazonie est entraînée vers le nord-ouest sous forme de suspension ($1.5.108$ t) et au sein de très importants bancs de vase fluide ($0.5.108$ t) qui transitent le long des côtes du Plateau des Guyanes (Eisma et coll., 1991). Les bancs de vase de 25 à 35 km de long en moyenne se déplacent sous l'action combinée des courants océaniques côtiers (Courant du Nord Brésil et des Guyanes) et des houles générées par les alizés. A proximité du littoral, la turbulence générée par le déferlement des vagues et les courants entraîne une remise en suspension des vases sédimentées. Il se crée ainsi des zones hyper-turbides qui agissent comme un amortisseur des turbulences induites par la houle. Le passage d'un banc de vase constitue ainsi une protection de la côte contre l'érosion et permet une progradation des vasières. A l'échelle de la Guyane, la contribution annuelle du matériel issu de l'érosion des sédiments préalablement stabilisés représente de 7 à 20% du volume total des bancs de vase en transit. Les parties intertidales des bancs de vase ont des vitesses moyennes de translation estimées à $0.9 \text{ km}\cdot\text{an}^{-1}$. (Froidefond, 1988). Ces sédiments transitoirement stabilisés permettent alors le développement très rapide de la mangrove.

La dynamique hydro-sédimentaire et ses incidences structurelles et fonctionnelles sur l'écosystème littoral et ses ressources ont été étudiées dans le cadre d'un chantier régional de Programme National Environnement Côtier (PNEC) dont les thématiques de recherche ont été définies en continuité avec les problématiques retenues dans le cadre du PNRZH.

Au cours des 30 dernières années pour lesquelles on dispose d'un suivi satellital, l'estuaire de Kaw a été profondément modifié (fig. 2), comme l'ensemble des estuaires de Guyane. En 1981, l'estuaire se prolonge relativement loin en mer. La rive droite de la rivière, sur plus de 4 km, correspond à une flèche de vase colonisée par la mangrove. En 1988, le sol de la partie centrale de la flèche prolongeant l'estuaire vers le nord-ouest a été totalement déstabilisé et repris par la dynamique littorale. La partie terminale de la mangrove rive droite a formé une île et la crique Angélique (cf. fig. 1), affluent de la rivière de Kaw, est devenue un fleuve. En octobre 1998, un banc de vase fluide commence à émerger lors des marées basses. Les eaux continentales drainant l'ensemble du bassin versant de la rivière de Kaw doivent alors se creuser un nouveau chenal dans les sédiments en cours de stabilisation. L'estuaire de la rivière de Kaw est alors prolongé de plus de 2 km. Depuis mi 1999, la jeune mangrove a présenté un développement extrêmement rapide. Au début de l'année 2002, un inventaire a montré que l'ensemble de la vasière est couvert d'une mangrove dense d'*A. germinans* qui progressivement s'éclaircit et permet un début de colonisation secondaire par des *Laguncularia racemosa*. Un nouvel écosystème reposant sur la minéralisation de la litière se substitue alors au stade de pré-colonisation qui était basé sur la production des communautés phytobenthiques.

A partir de relations allométriques (diamètres des troncs - phytomasse) la phytomasse épigée (exprimée en biomasse de matière sèche) des mangroves à l'estuaire de Kaw (Thevand, 2002) est estimée entre $90 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour les faciès les plus jeunes (densité 100 000 ind./ha diamètre moyen 3 cm) et $300 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour les faciès adultes (densité de l'ordre de 1 500 ind./ha pour un diamètre supérieur à 40 cm. Ces valeurs sont comparables à celles obtenues pour les autres secteurs littoraux colonisés par la mangrove en Guyane. Elles sont ainsi parmi les valeurs les plus fortes connues pour les mangroves mondiales suite aux synthèses bibliographiques de Saenger et Snedaker, 1993, Bétoulle, 1998 et Guiral, 1999.

La dynamique littorale détermine la configuration, et donc le fonctionnement de l'estuaire de Kaw. En outre, elle entraîne de radicales transformations de la base fonctionnelle des

écosystèmes immédiatement situés à l'aval de la rivière. D'une manière générale les cycles de marée contribuent à l'exportation d'une partie de la productivité des mangroves et des vasières vers les écosystèmes adjacents. Lors du flot, et plus particulièrement en période d'étiage, les intrusions marines assurent un transfert des modifications qualitatives et quantitatives de la productivité estuarienne vers les secteurs et les hydrosystèmes situés plus en amont. Les échanges d'eau à l'interface continent-océan jouent ainsi un rôle déterminant dans le fonctionnement de l'ensemble des écosystèmes drainés par la rivière de Kaw. Correspondant à l'axe de drainage principal du marais, c'est donc la structuration et le fonctionnement de l'ensemble de la zone humide qui sont ainsi déterminés à court, moyen et long terme par le transit des apports amazoniens.

Un fleuve dont l'hydrologie est sous la contrainte de l'évolution géomorphologique de son estuaire

Afin de connaître l'hydrologie de la rivière de Kaw et ses relations avec le climat, des limnigraphes et des stations climatologiques ont été installés dans le cadre du programme. Les données limnigraphiques actuelles ne correspondent qu'à des enregistrements de hauteurs d'eau et des calibrations seront encore nécessaires pour arriver à des estimations de volume et de débit.

Les enregistrements présentés sur la figure 3 montrent le rôle très important joué par les cycles de marées dans les variations de hauteur d'eau de la rivière de Kaw. Compte tenu de la très faible déclivité générale du bassin versant, la marée dynamique affecte des zones situées à plus de 40 km de la mer. Cependant Lefebvre et Guiral (2001) observent un amortissement des alternances basse-mer/haute-mer et vive-eau/morte-eau en fonction de l'éloignement de l'estuaire avec une amplification de ce phénomène au cours de la saison de pluie en liaison avec l'augmentation du débit des eaux continentales. Les variations de hauteurs d'eau sur l'essentiel du cours de la rivière de Kaw correspondent ainsi à l'addition de deux composantes d'origine différente et non corrélées : une composante tidale, liée aux cycles de marée et une composante fluviale, liée au régime des pluies.

Le signal tidal à l'estuaire de la rivière de Kaw a été assimilé à la marée enregistrée à l'Îlet la Mère, un îlot rocheux situé à environ 11 km au nord-ouest de l'estuaire de la rivière de Kaw dans une zone de bathymétrie de l'ordre de 5 m. Après digitalisation des enregistrements marégraphiques une décomposition des termes harmoniques, dépendant du contexte astronomique, a été réalisée. L'intrusion de la marée en zone estuarienne peut être estimée alors comme une simple propagation de la composante tidale en fonction de la distance à l'embouchure. Ainsi, selon la même stratégie que pour l'Îlet la Mère, une décomposition harmonique a été réalisée pour les enregistrements du limnigraphe implanté en février 1999 à la confluence entre la crique des 2 sœurs et la rivière de Kaw. Il est ainsi possible d'estimer à cette station, située à 10 km de l'estuaire, les amplitudes et les déphasages des caractéristiques de la marée à l'Îlet la Mère. Un décalage d'environ une heure et un amortissement significatif du marnage ont été ainsi mis en évidence. Si les marnages à l'estuaire de Kaw sont respectivement en vive-eau et en morte-eau de 2.0 m et de 1.2 m à la crique des 2 sœurs ils ne sont plus que 0,7 m et de 0,4 m.

En outre, une analyse plus détaillée (fig. 4) met en évidence un élément important du fonctionnement hydrologique de la rivière et du marais de Kaw. En novembre 2000, à la fin de saison sèche, un évènement pluvieux important et intense (50 mm de 14h à 19h, le 12/11) n'entraîne aucune modification des hauteurs d'eau. A l'opposé, en mars-avril 2001 au cours de la saison de pluie, un premier évènement pluvieux (35 mm de 9h à 13h le 30/3) conduit, dans un premier temps, à une augmentation des hauteurs d'eau minimales. La succession des évènements pluvieux entraîne ensuite une modification très importante des hydrogrammes, en particulier au niveau de la confluence avec la crique Biche. On constate un amortissement très important du signal de marée malgré une augmentation régulière des hauteurs d'eau maximales correspondant aux étales de haute mer à l'estuaire. Ce comportement hydrologique radicalement différent entre la saison de pluie (relation avec retard entre précipitations et hauteurs d'eau) et la saison sèche (absence d'impact des précipitations

même importante et brutale) met en évidence une fonction importante du marais. Les apports atmosphériques ne sont perceptibles que lorsque les capacités de stockage de la zone humide sont dépassées au cours de la saison de pluie.

La poursuite du traitement des données des 4 limnigraphes implantés depuis 2002 sur l'ensemble de la rivière de Kaw et l'instrumentation de la plate-forme au cœur du marais (limnigraphe et station météorologique) devrait permettre de déterminer : (i) si les intrusions marines sont affectées par les évolutions géomorphologiques estuariennes, (ii) les relations existant entre le régime des précipitations, les capacités de stockage du marais et l'hydrologie fluviale.

Le contexte climatologique et ses variabilités

Comme tout milieu écologique le marais de Kaw est très dépendant des conditions climatiques moyennes mais aussi de leurs variations. En outre, compte tenu de leur importance fonctionnelle et dans un contexte de grande homothermie (température moyenne annuelle de l'air de l'ordre de 26 °C avec des amplitudes journalières 4 à 5 fois supérieures à l'écart annuel entre le mois le plus chaud et le plus froid) les précipitations ont fait l'objet d'une investigation plus importante.

	Température moyenne journalière (°C)		Température absolue mensuelle (°C)	
	minimale	maximale	minimale	maximale
JUIN 2000				
Fin de saison des pluies				
Température air	22,59 (6h15)	29,54 (12h30)	20,92	32,20
Amplitude	6,95		11,27	
Température sol	26,26 (7h30)	29,08 (16h15)		
Amplitude	2,82			
OCTOBRE 2000				
saison sèche				
Température air	21,16 (6h15)	31,67 (14h00)	19,66	33,56
Amplitude	10,50		13,90	
Température sol	27,68 (7h15)	32,59 (14h45)		
Amplitude	4,91			
FÉVRIER 2001				
début de saison des pluies				
Température air	22,33 (6h15)	27,72 (13h30)	20,76	29,75
Amplitude	5,39		8,99	
Température sol	25,64 (8h00)	27,21 (17h00)		
Amplitude	1,56			

Les précipitations annuelles sur l'ensemble de la Guyane sont importantes, variant entre 2 et 4 m. A l'échelle globale, il existe un double gradient décroissant de la pluviométrie : majeur E-O et secondaire N-S. Le marais de Kaw situé au nord-est du département, dominé un relief forestier marqué qui fait obstacle aux alizés se situe ainsi dans la zone la plus pluvieuse de la Guyane (moyenne supérieure à 3 500 mm).

La Guyane est soumise à un climat équatorial humide, régulé par le balancement saisonnier nord-sud de la Zone Intertropicale de Convergence (ZIC) : zone de conflit entre les alizés humides en provenance du nord-est et des alizés plus secs du sud-est. Deux grandes saisons essentiellement déterminées par la pluviométrie sont ainsi identifiées :

- une saison de pluie de décembre à juillet entre-coupée de mars à avril par un épisode relativement plus sec et d'importance variable selon les années ;
- une saison sèche de août à novembre caractérisée par des écarts journaliers des températures marqués et un éclaircissement moyen journalier deux fois plus important qu'en saison des pluies mais avec une distribution horaire identique (proximité de l'équateur).

	Moyenne éclaircissement journalier (en j par cm ² /jour)	Valeur énergie maximale absolue (en W par m ²)	Répartition journalière (en %)		
			6h30 à 10h30	10h30 à 14h30	14h30 à 18h30
JUIN 2000	1433	1067 (12h15)	23	54	23
OCTOBRE 2000	1947	1080 (12h30)	26	53	20
FÉVRIER 2001	1061	865 (13h)	19	52	28

Le contexte hydrochimique et ses variabilités

Sur la rivière de Kaw, les eaux de surface de 15 stations sensiblement équidistantes, ont été échantillonnées aussi régulièrement que possible entre 1998 et 2002.

La première station correspond à l'arrivée des eaux en amont de la zone inondable et la dernière à la limite des zones colonisées par la mangrove mature. La distance qui sépare ces deux stations est de 50 km environ. Sept criques, alimentant directement la rivière, et cinq stations, en zone typiquement estuarienne, complètent ce protocole d'échantillonnage.

Les paramètres mesurés sont : le pH, la conductivité électrique et la concentration en ions chlorures, les concentrations en sels nutritifs (ortho-phosphates, somme des nitrates et des nitrites, azote ammoniacal, silicates), les charges en suspension minérale et organique, les concentrations en carbone, azote et phosphore particulaire, les concentrations en azote et phosphore organique dissous, la densité optique des eaux après filtration à 240 nm (substances jaunes), les concentrations en chlorophylles et en phaeo-pigments et en fer soluble. En outre, la variabilité liée au cycle de marée a été étudiée lors de campagnes de 24 h (en période de crue maximale et en fin d'étiage) selon un échantillonnage horaire en morte eau et vive eau pour deux stations estuariennes au sein d'une mangrove mature et dans un drain de drainage de la nouvelle vasière.

L'hydrochimie à l'échelle de la rivière et annuelle est essentiellement déterminée par les intrusions océaniques qui dépendent du débit de la rivière de Kaw, et donc du régime des précipitations. En période de précipitations, les eaux fluviales se répartissent sur l'ensemble de la zone côtière entraînant une dessalure importante des eaux de surface. A l'opposé, en saison sèche et d'étiage, les pénétrations d'eau marine affectent des secteurs de la rivière situés à 10 km de l'estuaire, avec une augmentation significative de la chlorinité pour les stations situées à plus de 20 km de l'estuaire.

Les répartitions longitudinales des charges particulières en suspension sont caractérisées par un gradient croissant amont - aval. En période d'étiage, on observe une accumulation turbide minérale très importante au niveau de l'estuaire. En période de crue, les concentrations sont dix fois

moins importantes, avec une contribution relative des particules organiques plus importante.

Un suivi de l'évolution de la conductivité des eaux en janvier 1999 (période de transition entre la saison d'étiage et de crue) au cours de plusieurs cycles de marée montre l'importance des échanges qui s'opèrent à l'estuaire de Kaw (fig. 5). Au cours des étales de basse-mer les eaux estuariennes correspondent à des eaux strictement d'origine continentale. Lors des étales de haute mer les eaux résultent d'un mélange en proportion variable d'eaux côtière et fluviale. La diminution progressive de la conductivité au cours des diverses phases de flot indique que les eaux pénétrant à marée haute sont de plus en plus diluées par les eaux fluviales et que la zone de mélange est localisée en aval de l'estuaire. Cette tendance est brutalement stoppée le 20/01 avec le passage au cours du flot d'une eau à forte proportion d'eau marine dont l'origine doit se situer en aval de la zone de mélange précédente. Cet apport massif d'eau marine est suivi au jusan par un accroissement très important des charges en suspension. Ces observations traduisent le contrôle joué par l'hydrodynamique dans la formation des zones hyper-turbides observées au sein de l'estuaire. Les suspensions minérales estuariennes ne sont pas uniquement dépendantes du transit littoral des vases amazoniennes. Elles résultent (i) d'une déstabilisation et d'une remise en suspension des sédiments déposés en amont de l'estuaire par les courants de flot et (ii) de leur transport ultérieur au cours du jusan qui assure ainsi un auto-curage du lit de la rivière.

Au niveau de l'estuaire, les processus de remaniements sédimentaires contribuent à une fertilisation des eaux de surface par mélange avec les eaux interstitielles temporairement piégées au sein des sédiments et très enrichies en azote ammoniacal. Cependant, ce couplage entre les eaux libres et les eaux interstitielles ne peut affecter significativement le fonctionnement hydro-chimique et écologique de la rivière de Kaw qu'en période de forte intrusion marine et donc au cours de l'étiage. Il en résulte des gradients d'enrichissement amont-aval et des variations saisonnières très importantes des concentrations nutritives entre les périodes de crue et d'étiage. Les concentrations en phosphore total en période d'étiage sont en moyenne de 2 µmol.l⁻¹, avec essentiellement des formes organiques dissoutes ou associées au matériel particulaire (fig. 6). La distribution spatiale du P particulaire est en outre similaire à celles des charges minérales en suspension. Cette concordance suggère l'existence d'un possible processus d'adsorption du P minéral sur les argiles au sein des sédiments préalablement à leur remise suspension par l'hydrodynamique estuarienne. Le mélange des eaux libres et des eaux interstitielles ainsi que des processus de désorption du P fixé sur les suspensions minérales peuvent alors expliquer les concentrations significatives d'ortho-phosphates localisées exclusivement en zone estuarienne. En période de crue, les concentrations en phosphore total dépassent rarement 1 µmol.l⁻¹. Pour le secteur amont de la rivière, on constate une quasi-absence d'ortho-phosphate, et une forte contribution du P organique dissous au P total. En zone estuarienne, les ortho-phosphates et le P particulaire correspondent à des fractions importantes du P total. En situation de charge minérale très faible le P particulaire doit alors essentiellement correspondre (et à l'opposé de la période d'étiage) à des formes organiques produites ou héritées des écosystèmes estuariens ou littoraux adjacents (vasière et mangrove).

Les études physico-chimiques, complémentaires aux approches hydrologiques, montrent très clairement l'importance des marées comme facteur de fertilisation de la rivière de Kaw. Ces fertilisations résultent principalement de remises en suspension des sédiments en zone estuarienne ou proche littorale. Leurs importances fonctionnelles seront d'autant plus grandes que le niveau moyen de la rivière est bas. Elles seront ainsi maximales en fin de période d'étiage alors que la rivière de Kaw constitue l'un des très rares écosystèmes d'eau libre à l'échelle de l'ensemble de la zone humide. A ce titre, elle doit constituer un milieu refuge pour de nombreuses espèces strictement aquatiques ou liées à l'eau par des liens trophiques (caïmans et oiseaux ichtyophages). En outre, et compte tenu du couplage entre climat et hydrologie, cet habitat refuge est en phase avec les périodes de plus fort ensoleillement et de plus grande richesse nutritive des eaux. Une conjonction favorable qui se traduit par une augmentation importante des concentrations en chlorophylle et par des cycles de variations nyctémérales d'oxygène plus marqués, indicateurs d'une plus forte biomasse et activité des producteurs autotrophes. En saison sèche existe ainsi les bases d'un réseau trophique susceptible de renforcer, voire d'autoriser, cette fonction d'habitat refuge de la rivière de Kaw.

Les approches et faunistiques et biologiques

Les observations abiotiques (climatologiques, hydrologiques, hydrochimiques et pédologiques) ont été complétées par deux études relatives à la distribution spatiale et temporelle des communautés d'oiseaux et de poissons. Les observations de terrain sont actuellement achevées et les données acquises sont en cours de traitement et de valorisation.

L'étude des communautés ichtyologiques réalisée par le Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris (P. Keith et F. Meunier) a permis de collecter plus de 110 espèces. Compte tenu des connaissances acquises, la richesse spécifique observée du marais est ainsi maintenant de 156 espèces (dont 7 espèces signalées qui n'ont pas été retrouvées au cours de cette étude). Parmi les espèces identifiées près d'une soixantaine sont signalées pour la première fois pour le bassin versant de la rivière de Kaw. Trois ou quatre d'entre elles pourraient être nouvelles pour la Science, ou tout du moins pour la Guyane. Ces inventaires reposant sur la mise en œuvre de divers engins de capture au cours de trois campagnes (deux en saison sèche, une en saison de pluie) montrent une structure des communautés ichtyologiques originale pour la Guyane avec uniquement deux types de peuplements. En raison d'un relief très contrasté il a été observé un passage, sans zone de transition, d'une communauté caractéristique des têtes de bassin à un peuplement de marais et de la partie haute du cours inférieur des fleuves.

L'étude de l'avifaune ("itinéraire-échantillon" de 10 jours mensuels au cours de 9 mois de l'année 2000 selon deux stratégies : - au fil de l'eau du début de la zone inondable jusqu'à l'estuaire (10 sections) et selon des transects (N = 9) perpendiculaires à l'axe de la rivière et représentatif des grandes formations végétales caractéristiques de la plaine inondable de Kaw) a été réalisée par J.L. Betoulle et B. Goguillon. Au total 111 espèces appartenant à 29 familles ont été recensées dans les zones de savanes de la plaine de Kaw dont seulement 35 espèces considérées comme strictement aquatiques (en terme d'habitat et de régime alimentaire). Cette dominance des espèces non aquatiques et caractéristiques de milieux ouverts et herbacées est aussi vérifiée en terme d'abondance : peuplement dominé par le sporophile des marais (*Sporophila minuta*), la moucherolle à tête blanche (*Arundinicola leucocephala*) et l'ani à bec lisse (*Crotophaga ani*). Les oiseaux d'eau les plus régulièrement observés sont le jacana noir (*Jacana jacana*), la talève azurée (*Porphyrio flavirostris*) et la grande aigrette (*Egretta alba*). En zone forestière (forêt marécageuse et mangrove) 124 espèces d'oiseaux appartenant à 35 familles ont été recensées. L'avifaune des forêts marécageuses d'eau douce, dominée par : l'amazone aourou (*Amazona amazonica*), l'ermite à brins blancs (*Phaethornis superciliosus*), le troglodyte à face pâle (*Thryothorus leucotis*) et l'alapi padulicole (*Sclateria naevia*) est très différente de celle observée en zone de mangrove où prédominent : le todirostre tacheté (*Todirostrum maculatum*), le conirostre bicolore (*Conirostrum bicolor*), la buse buson (*Buteogallus aequinoctialis*) et le grimpar des cabosses (*Xiphorhynchus guttatus*). Au total, sur l'ensemble de la plaine de Kaw accessible depuis la rivière (zone littorale et vasières exclues), 183 espèces ont été observées dont 150 de nicheuses.

études menées dans le cadre du PNRZH ont en particulier permis de confirmer cette assertion et d'en rechercher les causes fonctionnelles et structurelles. Depuis quelques années, les environnements amazoniens sont soumis à des atteintes anthropiques de plus en plus intenses, sources d'irréversibles dégradations. Dans un tel contexte, la Guyane, terre européenne en Amérique de Sud, se doit d'avoir un rôle régional exemplaire vis-à-vis de la préservation, de la conservation et de la valorisation des espaces naturels et tout particulièrement des zones humides littorales, très vulnérables, et comparativement aux forêts tropicales humides, encore si mal connues.

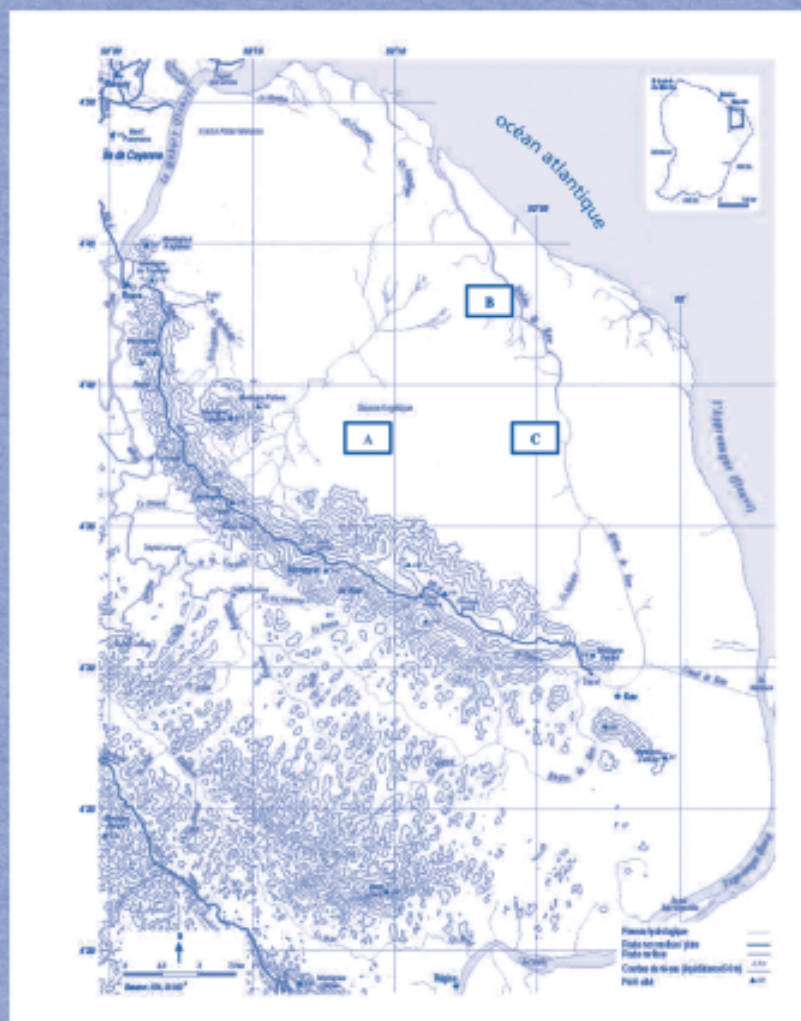
Bibliographie

- Betoulle J.L., 1998. variations spatio-temporelles de la production de litière et des apports en éléments minéraux dans les cinq faciès d'une mangrove en Guyane française. Thèse de doctorat de l'université P. Sabatier, Toulouse, 171 pages.
- Eisma D. P.G.E.F. Augustinus & C. Alexander, 1991. Recent and subrecent changes in the dispersal of Amazon mud. Netherlands Journal of Sea Research 28(3) : 181-192.
- Froidefond J.M., M. Pujos, X. André, 1988. Migration of mud banks and changing coastline in French Guiana. Marine Geology 84 (1-2) : 19-30.
- Granville J.J. de, 1986. Le projet de réserve biologique domaniale de Kaw. In : "Le littoral guyanais. Fragilité de l'environnement". Nature guyanaise, SEPANGUY, SEPANRIT : 161-178.
- Guiral D., 1999. Les écosystèmes à mangrove In : Rivières du Sud : société et mangroves ouest-africaines, Editions de l'IRD, Paris : 63-130.
- Hoff M., 1999. Etude de la flore et de végétation de la réserve naturelle des Marais de Kaw-Roura, Guyane française. Rapport mission PNRZH Guyane : 17 pages.
- Jeremie J. & A. Raynal, 1999. Végétation de la rivière de Kaw : gradient de végétation sur les 63 km du cours inférieur de la rivière. Rapport mission PNRZH Guyane : 4 pages.
- Kuehl S.A., D.J. DeMaster & C.A. Nittrouer, 1986. Nature of sediment accumulation on the Amazon continental shelf. Cont. Shelf Res. 6 : 209-225.
- Lefebvre J.P. & D. Guiral, 2001. Hydrodynamique de la rivière de Kaw : février 1999-mai 2001. Rapport PNRZH 13 pages.
- Meade R.H., T. Dunne, J.E. Richey, U. de M. Santos & E. Salati, 1985. Storage and remobilization of suspended sediment in the lower Amazon river of Brazil. Science, 228: 488-490.
- Saenger P. & S.C. Snedaker, 1993. Pantropical trends in mangrove above-ground biomass and annual litterfall. Oecologia, 96 : 293-299.
- Thevand A., 2002. Structure et dynamique des mangroves de la région de Kaw (guyane française) Etude par télédétection et analyse in situ. DEA Ecologie des systèmes continentaux. Université P. Sabatier, Toulouse, 31 pages.

Conclusion

En l'état actuel des connaissances, l'une des conclusions les plus évidentes du Chantier Guyane du PNRZH est la totale justification, *a posteriori*, de l'ensemble des mesures conservatoires et de protection qui ont été arrêtées pour le marais de Kaw. Il s'agit en effet d'un environnement et des écosystèmes pour lesquels l'Etat français a une responsabilité et des devoirs au plan international. Le marais de Kaw est situé dans une zone biogéographique réputée pour sa très haute biodiversité. Les

Figure 1

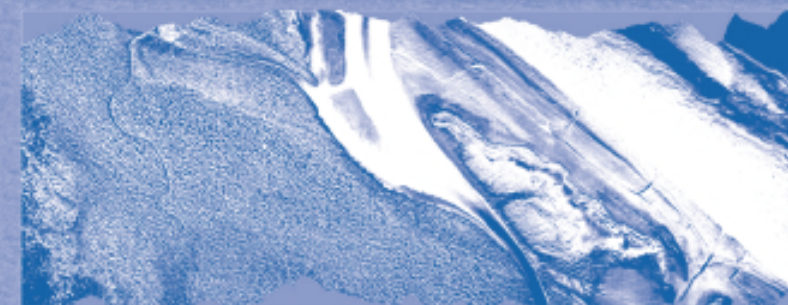


Le marais de Kaw en Guyane française
(A, site de dépose de la plate-forme,
B et C Limnigraphes de la crique des 2 sœurs et de la crique Biche)

Figure 2

Photographie aérienne 1981

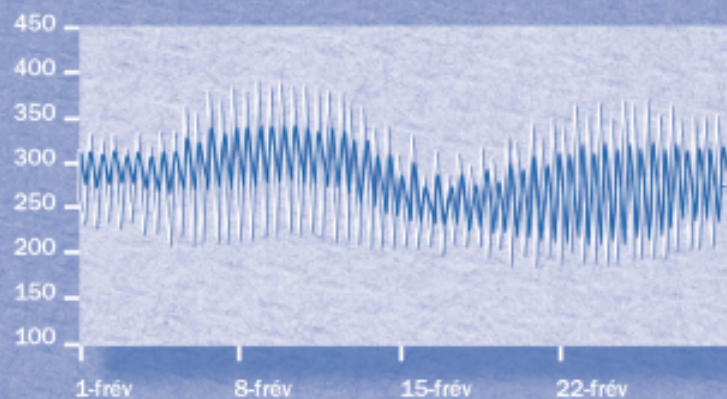
Landsat TM 1988



CASI 1998

Evolution géomorphologique de l'estuaire de la rivière Kaw et de sa confluence
avec la crique Angélique

Saison des Pluies



Hauteurs de la Rivière de Kaw en septembre 2000 et février 2001 au niveau de la crique des 2 sœurs (en blanc) et de la crique Biche (en bleu), cf fig 1

Saison Sèche

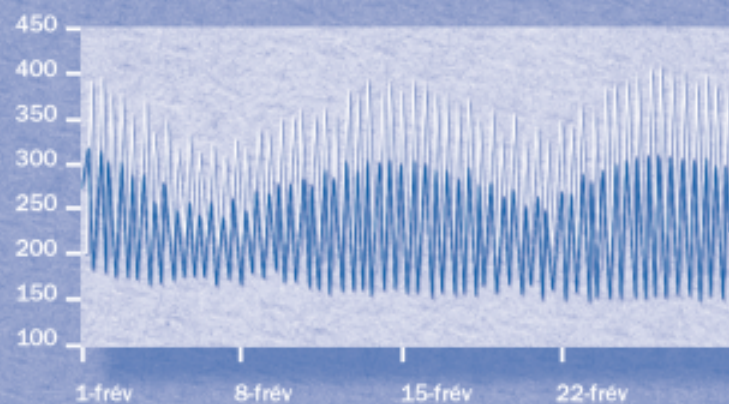
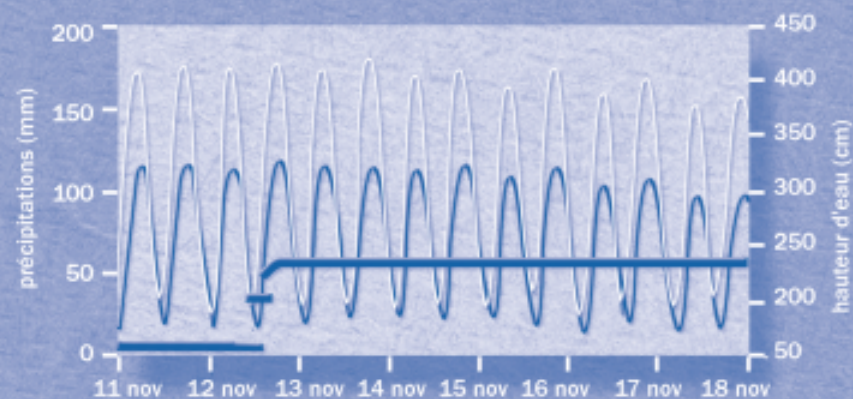


Figure 3

Figure 4



Enregistrements horaires des précipitations au village de Kaw et des hauteurs d'eau de la Rivière de Kaw en saison sèche (novembre 2000) et saison des pluies (mars-avril 2001) au niveau de la crique des 2 sœurs (en blanc) et de la crique Biche (en bleu).

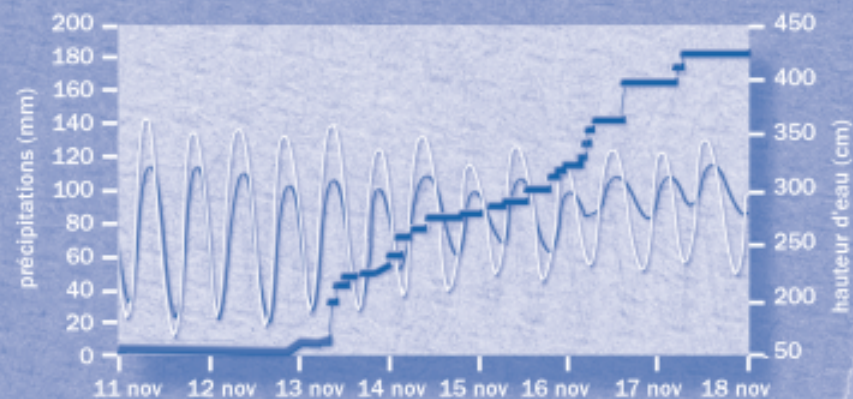
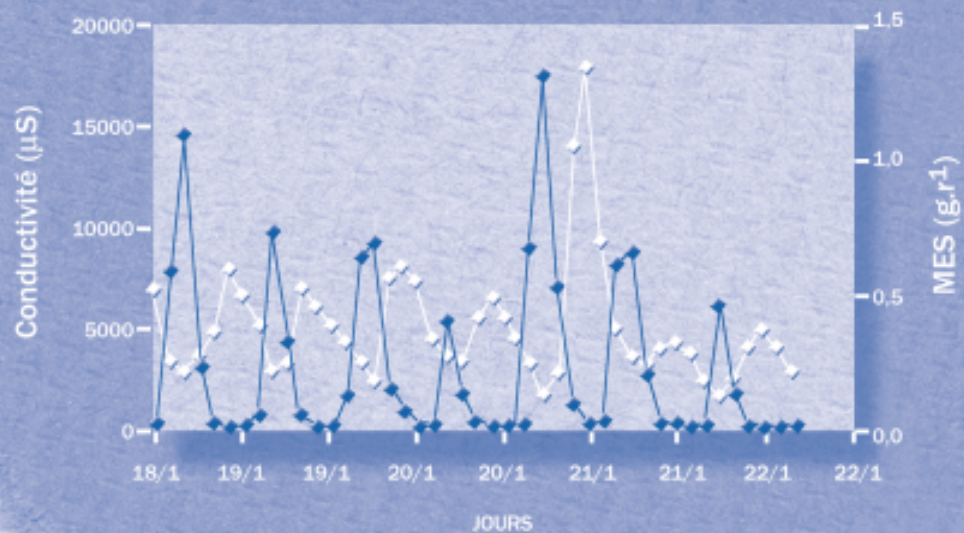
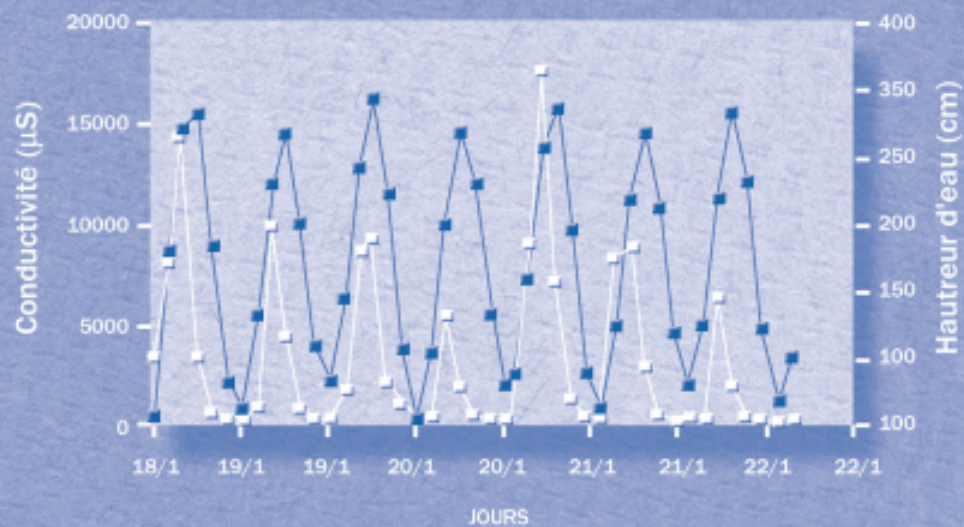


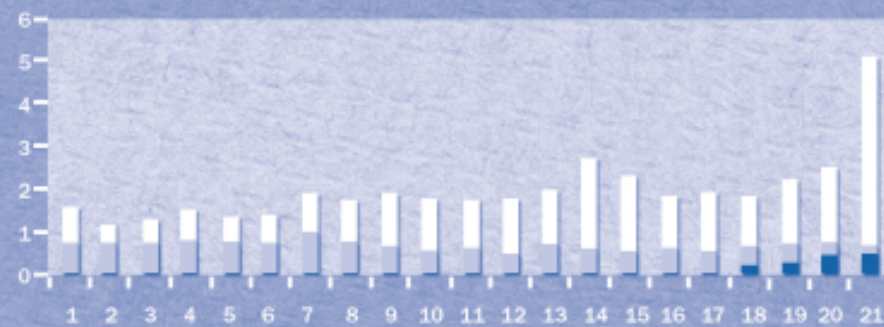
Figure 5



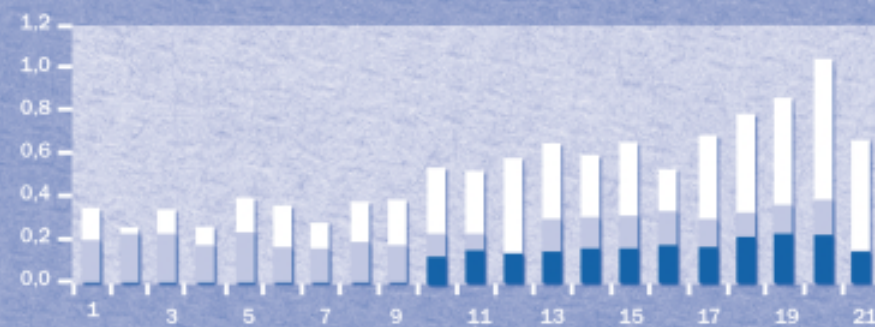
Au début de saison de pluie, évolution en fonction de la marée, de la conductivité et des charges en suspension à l'estuaire de Kaw.

Figure 6

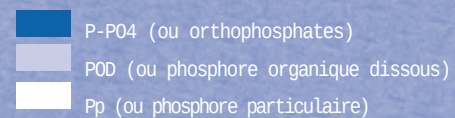
12/1999



07/2000



Concentrations (en $\mu\text{mol.l}^{-1}$) et répartition des différentes formes du phosphore dans les eaux de surface de la rivière de Kaw en période d'été (12/1999) et de crue (07/2000)



Synthèse critique des approches spatiales développées dans le cadre des projets du PNRZH : propositions d'outils efficaces selon les objectifs visés

ATELIER TRANSVERSAL "APPROCHES SPATIALES"

LAURENCE HUBERT-MOY (COSTEL UMR LETG 6554, UNIVERSITÉ DE RENNES 2)

hubert_l@uhb.fr

Les zones humides constituent depuis longtemps des objets d'étude privilégiés des écosystèmes et, en dépit de l'absence de définitions scientifiques universelles, les recherches sur ces milieux se sont multipliées depuis la prise de conscience conjuguée de leurs rôles fonctionnels, notamment dans les cycles biogéochimiques, et de leur disparition progressive face aux actions anthropiques. La plupart des zones humides font aujourd'hui l'objet de politiques de conservation ou de restauration, et la réaction de l'Etat français, avec l'élaboration d'un plan national, la création de l'Observatoire et la mise en place du programme national de recherche pour les zones humides, apparaît, à cet égard, salutaire.

L'évaluation des fonctions des zones humides et la mise en œuvre d'actions de protection ou de restauration nécessitent des opérations préalables d'inventaire et de caractérisation qui soulèvent des difficultés en raison de la diversité de leur nature, structure et fonctionnement. Fortement liées à l'origine disciplinaire des chercheurs et des gestionnaires, les approches scientifiques de ces milieux sont diverses, tandis que les critères de définition des zones humides et le choix des outils permettant d'effectuer des opérations d'évaluation et de suivi sur ces espaces ne sont pas toujours clairement exposés et justifiés. Ainsi, scientifiques et gestionnaires sont régulièrement confrontés au problème de délimitation et plus largement de définition de méthodes cohérentes d'approche spatiale des zones humides. Ces méthodes relèvent de démarches interdisciplinaires. Elles reposent sur la définition de problématiques communes, sur l'intégration de connaissances d'origine diverse et sur la détermination des relations entre les objets étudiés par les différents champs disciplinaires. Des typologies descriptives ou fonctionnelles peuvent résulter de leur mise en œuvre. Elles nécessitent le développement d'outils spécifiques tels que les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) afin de construire, à partir des données et des connaissances de chaque discipline, un cadre conceptuel commun et de réaliser la mise en cohérence de données hétérogènes. Aller au-delà des descriptions physiques et/ou biologiques des zones humides suppose donc, en plus d'un bon niveau de connaissance de leurs processus fonctionnels des échelles locales aux échelles régionales, la mise au point d'outils de traitement de données d'origine diverse afin de proposer une gestion pertinente de ces espaces.

Les méthodes d'approches spatiales développées au sein de seize projets du PNRZH peuvent être analysées de façon transversale au travers des actions qui ont été engagées dans le cadre des activités de l'atelier "Approches spatiales". Les objectifs de l'atelier, définis lors du séminaire de lancement du PNRZH à Lyon, comprennent, pour l'ensemble des projets, l'harmonisation des méthodes et/ou l'élaboration de liens entre ces méthodes. Cette démarche vise à rendre comparables les résultats obtenus, à déterminer en commun des règles simples et souples décrivant la précision géographique, la cohérence sémantique et les échelles d'analyse et de restitution des objets définis au

sein des zones humides et enfin à réfléchir aux modalités de mise à disposition et de vulgarisation des résultats obtenus.

Les actions entreprises dans le cadre de cet atelier, à partir des expériences acquises par les chercheurs au travers d'échanges méthodologiques et thématiques, se sont déroulées en deux étapes, l'une permettant de dresser un état des lieux des difficultés rencontrées au sein des différents projets lors de la mise en œuvre d'une méthode d'approche spatiale, l'autre ayant pour objectif d'établir un bilan critique des approches adoptées.

Les difficultés liées à l'approche spatiale des zones humides

Le développement et la mise en œuvre de méthodes d'approche spatiale sur les zones humides mettent en exergue des difficultés relevant autant de la complexité rencontrée dans la définition des objets à caractériser, accentuée par la diversité des zones humides étudiées, que du travail interdisciplinaire, nécessitant la détermination d'un cadre conceptuel commun. Les difficultés rencontrées peuvent, pour la plupart, s'appliquer à d'autres écosystèmes ou entités territoriales, mais elles sont particulièrement importantes dans le cas des zones humides en raison de leurs spécificités (aspect multifformes selon les saisons, niveau divers de modifications par les actions humaines...).

Un premier bilan, effectué au cours d'une réunion organisée les 9 et 10 février 1998 à l'issue de la première année du programme, a permis de mettre l'accent sur les problèmes rencontrés au sein des différents projets du PNRZH et de faire des recommandations pour tenter d'y remédier. Les problèmes recensés, non exhaustifs, ont trait essentiellement à la représentation spatiale des données et aux outils utilisés pour définir et caractériser les zones humides.

Les échelles de représentation spatiale

Dans le cadre de travaux interdisciplinaires, la variabilité des échelles spatiales utilisées constitue une difficulté importante. Les équipes de recherche travaillent à des échelles d'analyse et de restitution très diverses, la précision des représentations cartographiques variant selon l'objectif poursuivi : il n'est en général pas nécessaire de représenter les objets au centimètre près pour gérer une zone humide, alors qu'il peut en aller autrement si on veut sur le plan scientifique comprendre, modéliser ou simuler un aspect de son fonctionnement. Les différents besoins de la spatialisation de données imposent donc l'usage d'un référentiel géographique commun à haute résolution, tels que les orthophotoplans départementaux de l'Institut Géographique National (IGN) à 50 cm de résolution spatiale, en dépit des difficultés techniques de gestion de ces documents à une échelle régionale.

La spatialisation des mesures ponctuelles pose également des problèmes majeurs quant à la prise en compte de la répartition spatiale de l'échantillonnage, au forçage des modèles d'interpolation par les éléments structuraux du paysage (réseau hydrologique, etc.), à la mesure des erreurs résiduelles. De surcroît, les interpolations de mesures ponctuelles sont plus ou moins bien prises en charge, en raison des limites des modèles géostatistiques mis en œuvre et dans certains cas de la puissance de calcul des PC ou stations de travail.

Les outils de délimitation et de caractérisation

Les outils, s'ils restent utilisés la plupart du temps par la discipline qui les a mis en œuvre,

sont au service du projet dans une démarche interdisciplinaire. Certains outils, notamment ceux qui sont employés en hydrologie pour mesurer les flux, sont d'un usage courant. D'autres, en revanche, nécessitent encore des évaluations et/ou des améliorations.

La précision des modèles numériques de terrain (MNT) disponibles sur le marché conditionne la qualité de la modélisation du fonctionnement hydrologique des zones humides ; elle apparaît tout à fait insuffisante pour l'étude de la plupart des zones humides. La zonation des phénomènes analysés s'étend sur des gradients topographiques inférieurs à deux mètres, ce qui implique la disponibilité de MNT d'une résolution au moins décimétrique. En l'état actuel, il semble que la précision souhaitable ne puisse être atteinte par des moyens classiques qu'à des coûts totalement inaccessibles à des équipes de recherche. Il faudrait produire des MNT à haute résolution topographique avec l'emploi d'un global positioning system (GPS) "centimétrique" ou de lasers aéroportés ou encore améliorer la précision de MNT classiques par des campagnes de terrain.

En ce qui concerne l'outil télédétection, l'imagerie satellitaire de type SPOT - sous réserve du potentiel de SPOT 5 avec 2,5 m de résolution- ou ERS est d'un grand intérêt mais s'avère cependant peu adaptée à l'analyse de certaines zones humides, telles les zones de bas-fonds de vallées, ou à l'étude de processus écologiques de détail. Le recours, souvent nécessaire, à la photographie aérienne numérique ou aux spectro-imageurs aéroportés, requiert des dispositifs parfois lourds à mettre en œuvre. De plus, les prétraitements appliqués aux images, indispensables dans le cas d'études d'évolution de zones humides, n'intègrent que très rarement des corrections atmosphériques en raison, principalement, de leur difficulté de mise en œuvre à l'aide des logiciels disponibles. Or il est fortement recommandé de prendre en compte les effets liés aux variations de l'éclairement (distance Terre-Soleil, élévation solaire), au vieillissement du capteur, à la diffusion atmosphérique par les hautes couches et dans la mesure du possible, aux aérosols². Enfin, au niveau des traitements appliqués aux images, les méthodes automatiques ne fournissent pas toujours des résultats reproductibles et/ou exploitables, et peu de celles prenant en compte la composante temporelle des objets ont été évaluées pour l'étude des zones humides.

La modélisation du fonctionnement des zones humides

A ce jour, peu de modèles de fonctionnement ont été élaborés et mis en œuvre sur les zones humides. Le couplage des modèles hydrologiques et des SIG, l'une des voies prometteuses pour l'analyse fonctionnelle des zones humides, nécessite encore des développements méthodologiques et techniques importants.

Des approches spatiales différenciées

Les approches spatiales menées au sein des projets du PNRZH contribuent à une meilleure connaissance des zones humides étudiées et à la production de résultats méthodologiques nouveaux et significatifs.

Les projets du PNRZH couvrent la diversité des zones humides que l'on peut rencontrer sur le territoire national. Des approches spatiales différenciées ont été définies essentiellement selon les facteurs suivants :

- le type de zone humide considérée (fluviale, littorale ...) ;
- leur taille et leur répartition dans l'espace (de la mare aux zones humides littorales de la Guyane) ;
- le caractère avéré de leur présence et le niveau de connaissances déjà accumulées sur

ces espaces (de la Camargue où des décennies de recherches ont contribué à mettre à jour le fonctionnement de cet espace aux zones humides de fonds de vallées du Massif Armoricain qui ne sont pour la plupart pas encore inventoriées) ;

- la ou les fonctions étudiées sur ces zones humides et leur statut (par exemple pour la fonction "épuration", la zone humide potentielle, effective, efficace) ;
- la précision spatiale requise, dépendant des objectifs définis (gestion, modélisation,...).

Lorsqu'il s'agit de décrire le rôle fonctionnel d'une zone humide, l'analyse comparative des méthodes mises en œuvre aux travers des projets du PNRZH fait apparaître des similitudes au sein de grandes familles de zones humides. Par exemple, le fonctionnement hydrologique des zones humides fluviales est étudié dans les projets portant sur le Rhône, l'Ain, l'Allier et le Doubs (Amoros et coll., 2000), la Loire (Gautier et coll., 2000) et la Seine (Bendjoudi et coll., 2000) à travers une approche spatiale hiérarchique descendante dont les unités sont, à chaque niveau, définies par le fonctionnement hydrologique du système fluvial (fig. 1). Pour des secteurs où l'impact anthropique est élevé, comme c'est le cas dans de nombreux fonds de vallées en Bretagne (Mérot et coll., 2000) ou dans la Plaine de l'Escaut (Petit et coll., 2001), l'approche spatiale des zones humides à partir du concept de "zone humide potentielle" permet d'envisager la restauration de certaines fonctions de ces zones humides là où leur présence n'est plus avérée.

Cependant, en dépit de similitudes relevées au sein des seize projets du PNRZH, une analyse approfondie montre que chacun d'entre eux emprunte une approche spatiale originale. Elle permet également de souligner que l'origine disciplinaire des chercheurs conditionne l'orientation dominante des travaux : certaines fonctions des zones humides sont ainsi davantage détaillées selon les projets, ce qui détermine la structuration de l'approche spatiale menée.

Malgré la diversité des approches spatiales adoptées, ces travaux pourront être utiles aux gestionnaires. Ces derniers pourront s'inspirer des démarches mises en œuvre dans les projets selon les similarités existant entre la zone humide étudiée et celles des projets du PNRZH. Un cahier thématique sera élaboré à cet effet, à partir des expériences du PNRZH et des méthodes déjà utilisées par les Agences de l'Eau.

Des modèles conceptuels et des outils communs

La mise en œuvre d'approches spatiales différenciées selon les projets repose cependant sur des outils et des techniques communs qui ont fait l'objet d'une synthèse méthodologique transversale à travers l'atelier "Approches spatiales" du programme. Les développements méthodologiques ont porté sur les modèles conceptuels de bases de données gérées au sein de SIG (Systèmes d'Informations Géographiques) et sur l'évaluation de données de télédétection, un des outils constitutifs de ces systèmes.

Les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG)

Des SIG ont été développés dans la quasi-totalité des projets, à partir de bases de données existantes ou constituées dans le cadre du programme, afin d'assurer la sectorisation et les évaluations fonctionnelles des zones humides. Les bases de données à références spatiales ont été gérées au sein de SIG de façon différente selon les objectifs définis dans les projets. Trois niveaux d'utilisation des SIG se dégagent, avec une complexité conceptuelle et technique croissante.

La mise en correspondance d'attributs et de fonctions de la zone humide à partir d'un classique croisement de données.

Figure 2



L'outil de caractérisation des zones humides de l'hydrosystème Loire ;

(a) Construction de la base de connaissances ;

(b) Tables et relations implantées sous ACCESS ;

(c) SIG/statistiques graphiques interactives produites par l'environnement multi-objets 'ARPEGE' ;

des objets graphiques en interaction. Dans cet exemple, on a sélectionné des îles sur la carte d'évolution ;

ARPEGE' a zoomé sur l'image et la photographie aérienne et déterminé les pixels inclus dans ces îles en affichant leurs distributions ; le seul arc en contact est le contour d'une île qui lui-même est inclus dans la Loire

(d'où l'affichage de la Loire en entier dans la carte des polygones de la bande active) (Gautier et coll., 2000).

Elle permet par exemple de choisir les critères optimaux pour l'inventaire et la typologie des zones humides, d'étudier la relation synchrone entre les objets géographiques observés et d'émettre des hypothèses sur leur dynamique. Les relations entre le lit majeur actuel et les niveaux alluviaux anciens du système fluvial de la Seine ont, par exemple, été mises à jour à partir du croisement entre la carte comprenant la délimitation et la nature sédimentaire des couloirs fluviaux et la carte de délimitation des terrasses alluviales (Bendjoudi et coll., 2000).

L'étude des liens entre les mares et leur environnement (densité des mares, population, SAU, nombre d'exploitations agricoles) a contribué à déterminer la forte corrélation entre l'évolution des modes d'occupation des sols et du semis de mares et à ériger la connectivité entre les mares en tant qu'outil de préservation et de maintien de la biodiversité (Sajaloli et coll., 2000). Dans tous les cas de figures, les requêtes effectuées au sein des SIG peuvent être d'ordre spatial ou thématique (fig. 2a et 2b). Pour effectuer ces requêtes, les SIG peuvent intégrer des statistiques graphiques interactives afin d'aider l'expert dans son processus de construction des connaissances, en imbriquant plus fortement le traitement des données et l'acquisition de connaissances. Ce couplage méthodologique a notamment permis sur le système fluvial de la Loire de réaliser des explorations de la base de données associant cartes, images et distributions statistiques (fig. 2c, Gautier et coll., 2000) ; ce niveau d'exploitation de la base de données est déjà relativement complexe lorsque l'expert a 3 ou 4 types d'objets géographiques en interaction à gérer.

Dans les projets, un effort particulier a été effectué au niveau de l'élaboration de modèles conceptuels de données permettant d'explicitier les relations entre les données utilisées et produites (expression des inter-relations entre les objets inventoriés au sein de la zone humide). Des interfaces ont également été développées pour faciliter l'accès aux données, à travers la conception de fiches d'intégration pour l'importation de strates d'informations constituées sous d'autres environnements (Leboulanger et coll., 2000), la construction d'une base d'accueil de méta-données (Steyaert et coll., 2000) ou encore l'élaboration de sites web (Amoros et coll., 2000).

La production de simulations du fonctionnement de la zone humide par l'association SIG/Modèles : les fonctionnalités des SIG permettent de gérer l'ensemble des connaissances et données sur les zones humides tandis que les modèles décrivent et prédisent le comportement de ces systèmes dynamiques.

Une application a été mise en œuvre sur les Marais Atlantiques à travers l'utilisation associée d'un SIG mer côtière (ARCVIEW) et d'un modèle hydrodynamique (MARS) appliqué au bassin de Marennes-Oléron (interface : MODEL VIEW) (Steyaert et coll., 2000). Les données produites par le modèle ont été intégrées dans le SIG pour leur exploitation graphique. Les fonctionnalités du modèle et du SIG ont été associées pour caractériser la notion de bassin récepteur maritime d'une zone humide littorale, son extension, sa dynamique. La base SIG a servi à mettre en relation l'ensemble des connaissances et données sur le marais, provenant d'images de télédétection et de campagnes de terrain, et a montré l'influence très relative des marais par rapport à la Charente et à la Seudre sur les apports d'eau et de contaminants dans l'estuaire. Le SIG permet également de gérer les données géographiques en entrée et en sortie du modèle, tandis que le modèle décrit et prédit le comportement d'un système dynamique caractéristique de l'environnement littoral.

L'analyse géométrique des éléments constitutifs des zones humides à travers le couplage SIG/modèle met en évidence des caractéristiques structurales de ces espaces qui permettent d'approcher leur fonctionnement. Ainsi, la longueur de l'interface zones humides/versant détermine l'intensité de la dénitrification des zones tampons le long des cours d'eau (Mérot et coll., 2000), le degré d'isolement des mares est corrélé avec leur niveau de biodiversité (Sajaloli et coll., 2000).

Le couplage SIG/modèle statistique peut être utilisé pour une délimitation fonctionnelle des zones humides. Ce couplage a été réalisé à plusieurs reprises dans le cas de la fonction hydrologique (Steyaert et coll., 2000 ; Picon et coll., 2000), mais il peut être envisagé pour d'autres fonctions comme les fonctions biogéochimiques (Mérot et coll., 2000).

Un couplage modèle/SIG a mis en évidence les interdépendances entre différents modes

de gestion d'un territoire comme la Camargue (Picon et coll., 2000). Les données produites sur l'espace camarguais, structurées sous forme de couches d'information exploitées par un SIG, ont servi de paramètres d'entrée à une modélisation multi-agents pour simuler les effets de la gestion hydraulique.

Ces premiers résultats obtenus dans le cadre du programme sont prometteurs et montrent que ce type d'outil autorise une approche dynamique du fonctionnement des zones humides. Les prototypes de modèles utilisés nécessitent toutefois des calibrations et des améliorations ultérieures.

La constitution d'un outil de diagnostic, aujourd'hui finalisé dans trois projets.

Un diagnostic patrimonial des zones humides alluviales a été effectué sur des prairies alluviales du nord-est de la France. Il débouche sur une proposition de clés de gestion des écosystèmes prairiaux dans une optique de biodiversité. Le diagnostic, effectué à l'aide d'un SIG, a servi à mettre en évidence l'intérêt écologique de la zone, l'état de conservation des habitats et à proposer la mise en place de bioindicateurs de la zone humide ou encore de modalités de gestion conservatoire/restauration à mettre en œuvre (Muller et coll., 2000).

Un diagnostic territorial de l'estuaire de la Seine a été réalisé à l'aide d'un SIG dans l'optique de générer des indicateurs utiles aux aménageurs et décideurs. Un premier croisement des différentes couches relatives à la protection du patrimoine naturel de l'estuaire (RN, ZPS...) a produit un "synopsis quantitatif des mesures de protection". Cette analyse spatiale autorise l'identification et la classification de zones en fonction du cumul des mesures qui s'y exercent (Leboulanger et coll., 2000). A partir de ce croisement de données, l'addition du niveau de protection des mesures a permis de générer un "synopsis qualitatif du degré de protection du patrimoine naturel" qui identifie et classe les secteurs en fonction de leur degré de protection cumulé. Ces diagnostics territoriaux servent à synthétiser les contraintes environnementales du territoire estuarien, connaissance indispensable lors de projets d'aménagement du territoire et de planification. Ces documents soulignent également la lourdeur juridique d'une telle accumulation de protections allant du niveau local jusqu'au niveau international, ce qui rend difficile l'instruction des projets d'aménagement.

Le projet actuellement le plus abouti porte sur un diagnostic écologique d'une partie des zones humides fluviales du Rhône, du Doubs, et de l'Ain (Amoros et coll., 2000). Des bases de données construites sous ACCESS et comprenant des données d'origine diverse (géomorphologiques, hydrologiques, et données sur l'avifaune et la végétation aquatique) ont été traitées avec un SIG afin d'élaborer un diagnostic de ces zones humides. Le développement d'une interface de saisie de nouveaux cas avec possibilité de pondération des attributs autorise la mise en œuvre d'une application permettant à un chercheur ou à un gestionnaire de comparer le fonctionnement d'une zone humide fluviale donnée avec celui de zones humides déjà évaluées grâce à un classement par similarité. Le système de diagnostic ainsi développé a été porté sur un site Web conçu dans le cadre du projet pour mettre cet outil à disposition.

La télédétection

La télédétection, une des sources de données d'entrée de ces SIG et/ou modèles, est un outil d'approche spatiale qui a fait l'objet de développements particuliers au sein des projets du PNRZH. Ils ont contribué à évaluer l'apport et les limites de cet outil pour l'étude des zones humides et à définir de nouvelles approches pour la définition de ces zones. L'intérêt affiché pour la télédétection réside dans la mise en évidence d'événements difficilement perceptibles au niveau du sol (outil d'investigation), dans la spatialisation et la généralisation d'éléments observés, c'est-à-dire l'extension,

sous forme cartographique et statistique, de typologies élaborées localement (outil d'extrapolation), et dans l'analyse de l'évolution des zones étudiées (outil de suivi).

Face aux limites de capteurs "classiques" (optiques, avec une résolution spatiale allant de 10 à 30 m), peu adaptés à l'étude de milieux tels que les zones humides, des travaux ont montré l'intérêt de capteurs possédant des caractéristiques mieux adaptées.

L'évaluation du capteur hyperspectral CASI (Compact Airborne Spectral Imager), abordée dans deux projets, a établi la supériorité de ce capteur par rapport à d'autres outils pour caractériser des zones humides de fonds de vallées en Bretagne (Mérot et coll., 2000) et les zones humides de Guyane (Guiral et coll., 2001). Dans les deux cas de figure, l'intérêt de la haute résolution spectrale de ce capteur consiste essentiellement en une discrimination élevée de la végétation de la zone humide (Fig. 3). Les résultats obtenus en Bretagne mettent également en évidence une différenciation de pratiques agricoles qui influent sur la fonction dénitrifiante des secteurs d'étude, notamment du mode de gestion des prairies. Les deux rapports soulignent cependant la lourdeur du dispositif d'acquisition et du pré-traitement géométrique des images engendrée par l'utilisation de ce capteur aéroporté. Des travaux menés sur la Seine moyenne ont également montré le potentiel d'un domaine spectral sous-utilisé pour les recherches menées sur les zones humides, l'infra-rouge thermique (Bendjoudi et coll., 2000). L'acquisition simultanée d'images dans le visible et le thermique par le capteur ARIES avec une résolution au sol de 2 m a notamment permis une estimation des réserves en eau du très proche sous-sol et le repérage des anciens chenaux de la rivière qui, bien que non actifs la plupart du temps, peuvent jouer un rôle important dans les processus d'inondation (fig. 4).

Des séries multi-temporelles d'images satellitaires de type SPOT ont été exploitées dans des projets qui avaient pour objectif d'observer la dynamique des systèmes, à travers le développement de méthodes de traitement d'images multi-temporelles et parfois multi-capteurs.

Des analyses multi-temporelles des données ont généré des informations spatialisées sur l'évolution des surfaces en eau dans les Marais de l'Ouest (Figure 5, Steyaert et coll., 2000). Le traitement de séries de scènes SPOT XS (20 m) et P (10 m) couplées à des missions aériennes IGN a permis d'établir sur le Marais du Hode (Leboulanger et coll., 2000) et sur les plaines de la Scarpe et de l'Escaut (Petit et coll., 2001) un synopsis précis et complet des mutations paysagères sur une dizaine d'années. La construction d'un modèle multi-temporel d'occupation du sol à partir d'une série d'images satellitaires LANDSAT TM concernant la Camargue a montré sur une courte échelle de temps une réorientation massive et rapide du système cultural avec une montée en puissance de la riziculture en 93-94 (Picon et coll., 2000).

Le couplage de données de télédétection avec un modèle est réalisé par plusieurs projets dans le cas de modèles hydrauliques (Steyaert et coll., 2000) ou de modèles hydro-sédimentaires (évaluation de différents scénarii d'aménagement de digues dans le cadre des travaux envisagés pour le port du Havre, Leboulanger et coll., 2000). En Camargue, les données issues des documents de télédétection ont été confrontées aux données de débit pour quantifier les entrées d'eau dans l'hydrosystème et leur distribution aux parcelles agricoles (pour la réalisation du modèle hydrologique simplifié). L'identification des parcelles aux mêmes cycles culturaux, dérivée du modèle multi-temporel bâti à partir des images a permis, avec l'utilisation du MNT, de fournir une contribution à la quantification des flux d'eau par la mesure des surfaces ennoyées (Picon et coll., 2000).

Le développement récent de nouveaux capteurs satellitaires à très haute résolution spatiale (de l'ordre du mètre) et/ou à très haute résolution spectrale laisse entrevoir d'autres applications sur les zones humides, en complétant avantageusement les photographies aériennes par des acquisitions plus fréquentes, automatisées et couvrant de larges surfaces.

Conclusions

Les travaux menés par chacun des projets du PNRZH ont été conduits selon des démarches d'analyse spatiale différenciées, propres à chacune des zones étudiées en fonction des objectifs définis, du type de zone humide, de l'origine disciplinaire des chercheurs impliqués dans les projets... et ont débouché sur une meilleure compréhension du fonctionnement des zones humides et des milieux riverains ainsi que de leur évolution sous l'influence des actions anthropiques. Grâce à ces avancées, des approches différenciées peuvent être proposées selon le type de zone humide et selon la fonction que l'on veut étudier. Parallèlement, les activités menées dans le cadre de l'atelier transversal "Approches spatiales" se sont traduites par une réflexion conceptuelle commune sur les outils d'approche spatiale utilisés dans les projets, relative notamment au pré-traitement et au traitement des données, aux échelles spatiales et temporelles d'acquisition et de restitution de l'information. Ces échanges ont permis de mesurer l'implication et la forte motivation des équipes pour développer des outils adaptés et des démarches reproductibles.

On peut cependant noter des difficultés de mise en œuvre des approches spatiales développées. Elles sont liées à la prise en compte des données socio-économiques, à la formalisation de la complexité des entités spatiales identifiées au sein des zones humides et de leurs relations, à la méconnaissance des données existantes et aux problèmes d'accès à certaines informations. De plus, les limites et les conditions du transfert des outils, méthodes et savoir-faire vers les gestionnaires soulèvent encore un certain nombre de questions sur lesquelles les communautés des chercheurs et des gestionnaires devront se pencher dans un avenir proche, afin de créer des "formats standards" et contribuer ainsi à l'augmentation de la capacité d'action de ces derniers.

Au-delà du développement de connaissances spécifiques aux zones humides étudiées et des apports méthodologiques liés aux travaux qui permettront de constituer un guide "technique" utile aux aménageurs pour établir des diagnostics sur d'autres zones humides, une lecture transversale de l'ensemble des documents conduit à identifier un certain nombre d'éléments qui pourraient structurer de futures études sur les zones humides. Elles s'articuleraient autour de deux axes méthodologiques ;

- une meilleure prise en compte de la composante spatiale de la zone humide à travers une approche plus intégrée à l'échelle de la zone humide elle-même. Par exemple, le développement des approches multi-capteurs en télédétection avec notamment l'exploitation de données à très haute résolution spatiale sont très prometteuses (il faut cependant s'assurer que la dégradation de cette information de l'échelle locale à l'échelle régionale n'induit pas un bruit de fond nuisible à l'identification des zones humides ou de leurs fonctions). La composante spatiale de la zone humide peut également être considérée à travers le développement de modèles permettant de simuler le fonctionnement des zones humides selon l'évolution du milieu et des actions anthropiques ou encore à travers des approches effectuées à l'échelle de l'ensemble des bassins versants auxquels appartiennent les zones humides, par une meilleure prise en compte des notions de connectivité de ces unités spatiales par exemple ;

- une dimension temporelle plus affirmée à travers l'élaboration de méthodes de traitement d'informations mieux adaptées aux séries de données spatiales multi-temporelles et à leur intégration dans les modèles, tels qu'il peuvent s'exprimer par exemple à travers des modèles hydrodynamiques spatialement explicites permettant de décrire ou de prédire des tendances temporelles.

Cette dimension temporelle pourrait également être développée via l'utilisation des résultats spatialisés obtenus par des approches prospectives, afin de mieux expliquer le fonctionnement présent et l'emprise actuelle des zones humides sur le territoire et de constituer un outil d'aide à la décision pour des aménagements futurs.

Notes

1. L'animation de l'atelier "Approches spatiales" a été assurée successivement par F. Cuq (UMR 6554 Géosystèmes Brest) puis L. Hubert-Moy en coordination avec M.C. Ximenes (IFEN).

2. C. Kergomard (Laboratoire CNRS "Géographie des Milieux Anthropisés", Université des Sciences et Technologies de Lille) a organisé dans le cadre de l'atelier "Approches spatiales" les 19 et 20 juin 1998 à Lille des échanges techniques sur les corrections atmosphériques : l'idée retenue est d'adopter au sein des projets une méthode semi-empirique fondée sur l'utilisation de surfaces peu variantes et du logiciel 5S.

Bibliographie

- Amoros, C. et coll. 2000. Aide au diagnostic du fonctionnement des zones humides fluviales. Université de Lyon, UMR 5023 CNRS. Rapport final du PNRZH, 77 pages.
- Bendjoudi, H. et coll. 2000. Fonctionnement des zones humides riveraines du cours moyen des rivières. Analyse et modélisation de la genèse des hétérogénéités structurales et fonctionnelles. Application à la Seine moyenne. Université Pierre et Marie Curie, UMR 7619 Sysiphe. Rapport final PNRZH, 140 pages.
- Gautier, E. et coll. 2000. La détermination d'un espace de liberté pour le système fluvial ligérien : identification et spatialisation des unités morphodynamiques et écologiques fonctionnelles dans les valls libres et endigués de la Loire, enjeux et acteurs sociaux. Université d'Orléans UMR 8591 CNRS et autres partenaires. Rapport annuel d'avancement des travaux, 79 pages + annexes.
- Guiral, D. et coll. 2001. Marais littoraux tropicaux (MARLITROP). Etude et caractérisation des zones humides de la pleine côte guyanaise (Marais de Kaw) dans la perspective d'une gestion intégrée. Rapport d'avancement annuel, 69 pages.
- Leboulenger F. et coll. 2000. Zones humides de l'estuaire et des marais de Seine. Structure, fonctionnement et gestion. Région Haute-Normandie, Laboratoire d'écotoxicologie, Université du Havre. Rapport de synthèse de 2ème année, 57 pages.
- Mérot, P. et coll. 2000. TY-FON Typologie fonctionnelle des zones humides de fonds de vallée en vue de la régulation de la pollution diffuse. Fédération de recherche CAREN, INRA et autres partenaires. Rapport final du PNRZH, 115 pages.
- Muller, S. et coll. 2000. Biodiversité et fonctionnement des écosystèmes prairiaux inondables des vallées alluviales dans le Nord-Est de la France. Application à leur gestion conservatoire et restauration. Université de Metz, Laboratoire Ecotoxicité, Biodiversité et Santé environnementale, Laboratoire de Géographie Physique. Rapport final du PNRZH, 139 pages.
- Petit, D. et coll. 2001. Entre Scarpe et Escaut : Hydrosystème, Biodiversité et changements Socio-Economiques. Recherches pour un développement durable des zones humides. Université des sciences et Technologies de Lille, UPRESA CNRS 8016. Rapport final PNRZH, 183 pages.
- Picon, B. et coll. 2000. Les enjeux de la gestion hydraulique dans le delta du Rhône. Pour une formalisation des interactions entre dynamiques sociales et écologiques. Une approche préalable à la mise en place d'une gestion intégrée. Laboratoire DESMID. Rapport final du PNRZH, 75 pages.
- Sajaloli, B. et coll. 2000. Les mares, des potentialités environnementales à revaloriser. Centre de Biogéographie-Ecologie, Ecole Normale Supérieure de Fontenay Saint-Cloud UMR 8505 CNRS. Rapport annuel d'avancement des travaux, 86 pages + annexes.
- Steyaert, P. et coll. 2000. Projet ARAMIS. Elaboration de règles de gestion des eaux superficielles pour un développement intégré des zones humides littorales atlantiques. CEMAGREF, INRA et autres partenaires. Rapport final du PNRZH, 140 pages.

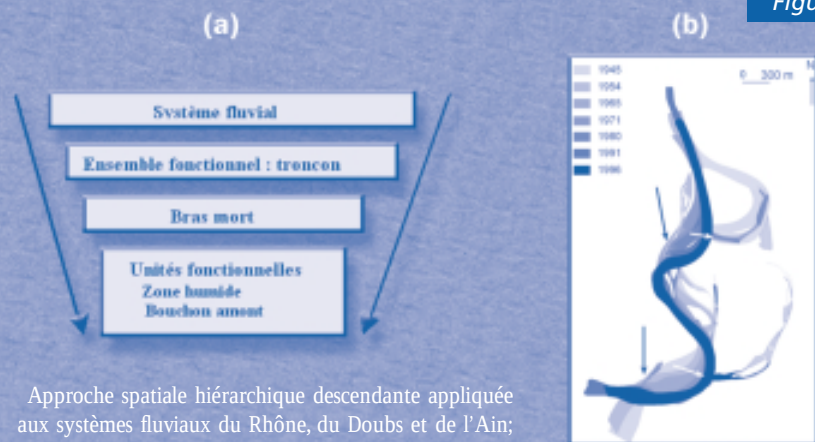


Figure 1

Approche spatiale hiérarchique descendante appliquée aux systèmes fluviaux du Rhône, du Doubs et de l'Ain;

(a) Les quatre échelles spatiales de l'étude

(b) Evolution récente du canal de l'Ain à l'origine de trois générations de bras, exemple du secteur de Blyes (Amoros et coll., 2000).

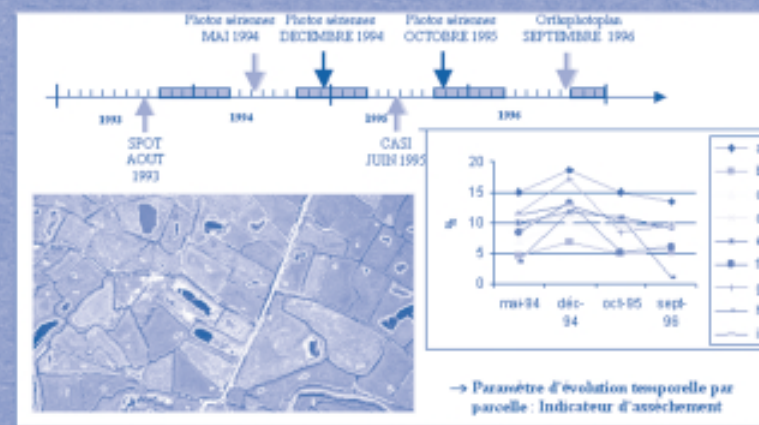


Image CASI et délimitation des zones humides (17/09/2000 sur le site de Plaine Fougères, 2 m de résolution ; Mérot et coll., 2000).

Figure 3



Image thermique et historique des méandres de la Seine (Bendjoudi et coll., 2000).



Extraction et évolution des surfaces en eau à partir de séries de données multi-temporelles de télédétection (Steyaert et coll., 2000).

Figure 5

Apport des technologies de l'information géographique au management des zones humides. Application à l'estuaire de la Seine

ALBAN BOURCIER, (CIRTAI, UNR 6063, UNIVERSITÉ DU HAVRE)

a.bourcier@normandnet.fr

DIDIER ALARD, (LABORATOIRE D'ÉCOLOGIE, U PRES EA 1293 ECODIV, UNIVERSITÉ DE ROUEN)

didier.alard@univ-rouen.fr

JEAN-CÔME BOURCIER, (CIRTAI, UNR 6063, UNIVERSITÉ DU HAVRE)

jean-côme.bourcier@univ-lehavre.fr

ISABELLE POUEVIGNE, (LABORATOIRE D'ÉCOLOGIE, UNR 6063, UNIVERSITÉ DE ROUEN)

isabelle.poudevigne@univ-rouen.fr

Introduction

Confluence des milieux terrestre, fluvial et marin, l'estuaire de la Seine regroupe un ensemble de zones humides à la fois biologiquement productives et variées. Cette embouchure est également l'exutoire d'un bassin versant de plus de 78 000 km², regroupant 30% de la population française et 40% de l'activité économique nationale. De ce fait et depuis de nombreuses années, elle se trouve confrontée à de sérieux problèmes de pollution aqueuse. Au niveau local, les activités humaines liées à l'exploitation des ressources estuariennes engendrent des conflits d'intérêt et d'usage de premier ordre. En outre, le développement industriel-portuaire de la zone du Havre, l'urbanisation et les activités agricoles intensives ne sont pas sans incidence sur le patrimoine naturel de cet estuaire (pollutions, comblement lié à la sédimentation ou atterrissement, régression, segmentation, diminution de la biodiversité...).

De manière à contribuer à une meilleure compréhension de la structure et du fonctionnement des zones humides de ce secteur et afin de faciliter la considération de ce type de milieu dans les dispositifs prévus par la loi sur l'eau (SAGE et SDAGE), neuf équipes scientifiques se sont impliquées dans l'élaboration de "l'Observatoire des zones humides de l'estuaire et des marais de Seine". Développé autour d'une architecture SIG préexistante, cet observatoire est devenu une composante fondamentale du Système d'Informations Territoriales (SIT) déjà opérationnel sur cet estuaire depuis quatre ans. Il s'efforce d'offrir aux différents organismes intéressés une approche globale qui fait actuellement défaut aux décideurs et gestionnaires du milieu.

Le PNRZH a donné l'occasion de réaliser quelques études significatives, alimentées par une BDD plurithématiques et exécutées à partir des possibilités d'analyses spatio-thématiques offertes par une chaîne de traitements SIG déjà validée.

De la nécessité d'un observatoire du patrimoine naturel en estuaire de Seine

Placé à l'intersection géographique, sociologique, économique et environnementale de divers enjeux, l'estuaire de la Seine s'affiche comme une zone littorale qui est soumise à des pressions anthropiques souvent divergentes sinon contradictoires de la part de la société. En effet, sa position au sein des écosystèmes lui confère des fonctions spécifiques et rares, sa localisation au sein des espaces géographiques lui offre des atouts stratégiques ; son urbanisation et son industrialisation de premier ordre ont besoin de se développer dans le respect d'un patrimoine écologique et paysager exceptionnel qui fait l'objet de préoccupations émanant à la fois des collectivités locales, des administrations, de l'État et de l'Europe. De plus, l'existence de pollutions variées, de risques technologiques, d'exploitations des ressources naturelles, d'un clivage amont/aval (Rouen/Le Havre), d'une disparité rive-droite/rive-gauche (Pays de Caux/Pays d'Auge), d'activités concurrentes... sont autant de problématiques significatives de cet espace singulier. Il est, entre autres, un lieu de passage essentiel pour les oiseaux migrateurs, d'abri et de nourricerie pour les ressources halieutiques et conchylicoles, ainsi que pour certaines espèces invasives. Auges estuarienne caractérisée par la juxtaposition de plaines alluviales et de plateaux calcaires, il offre une diversité paysagère exceptionnelle à laquelle se rattache une grande variété typologique de zones humides qui sont économiquement qualifiées d'infrastructure naturelle, de rein et d'éponge pour l'environnement. Or, le patrimoine naturel de cet estuaire subit les incidences des activités locales (industrialisation, urbanisation, agriculture, exploitation des ressources...) et nationales (40% de l'activité économique nationale). Cette confrontation d'intérêts multiples et les conflits qui en résultent posent le problème de la conservation des espaces naturels aux ressources limitées et à l'équilibre fragile.

L'aménagement de l'espace doit ainsi garantir un développement harmonieux en tenant compte des données naturelles, des besoins de la population et ceux de l'économie (Chappuis, 1993), à une échelle essentiellement locale mais également nationale voire internationale (Bailly, 1995). À toutes ces étapes, cette procédure concerne la nature et le paysage, et on perçoit combien il est indispensable de disposer d'un inventaire complet du patrimoine naturel et paysager en vue d'infléchir dans la bonne direction au moment du choix des options. Dans la perspective de répondre à cette nécessité, le SIT de l'estuaire de Seine dans le cadre du PNRZH est donc essentiellement exploité en tant qu'observatoire du patrimoine naturel, un véritable outil permettant la mise en œuvre d'un réel processus cognitif négocié, capable de fournir des diagnostics territoriaux et environnementaux nécessaires à l'aménagement de ce littoral si singulier.

Cet observatoire représente un des outils dont le potentiel permet de mieux gérer, analyser et planifier notre environnement (Bryant, 1993) et d'aborder l'aménagement de l'espace d'une façon globale et raisonnée comme le préconise désormais les directives prenant en compte les impératifs du développement durable au niveau local (circulaire Voynet). Il conviendrait ainsi de mettre à disposition d'un décideur ou d'un gestionnaire du milieu toute une palette d'indicateurs spécifiques de manière à traiter les rationalités divergentes, voire antagonistes, des différents acteurs de l'aménagement qui finissent par générer de véritables zones de conflits d'usage à caractère environnemental fortement marqué. L'observatoire a également comme objectif de combler un certain fossé entre recherche et pratique, et plus précisément entre chercheurs et techniciens/praticiens/politiques impliqués dans les décisions d'aménagement du territoire. Le SIT sur l'estuaire de la Seine vise la mise en cohérence de toutes les facettes d'une même réalité ; ainsi structurées, les données concernant un même espace pourront être simultanément intégrées au cours d'une même analyse, afin de mieux définir, dans le cadre du PNRZH, les objectifs environnementaux ayant trait aux zones humides et aux marais de Seine.

De la collecte de données à l'élaboration de diagnostics environnementaux

Ce SIT sur l'estuaire de Seine exploite une Base de Données Géographiques (BDG) multisource et plurithématique, constituée actuellement de plus de 80 strates d'informations en mode vectoriel, géoréférencée selon la projection conique conforme de Lambert et calée selon le système de coordonnées de référence de la zone Lambert I (système local du Nord de la France). Les informations en mode matriciel (images satellitales, orthophotos) viennent ponctuellement enrichir et mettre à jour les données en fonction des besoins. Toutes ces strates d'information répondent à divers critères de qualité (Laurini et coll., 1993) telles que l'exactitude, la précision et l'actualité (Rouet, 1991), et font chacune l'objet d'une fiche de métadonnées (Bourcier, 1998) en vue d'en garantir une exploitation adéquate et optimale. Un lien dynamique a été développé afin que ces métadonnées soient directement consultables depuis l'interface utilisateur du SIG-logiciel. L'exploitation pérenne et opérationnelle de ce SIT nécessite entre autres une mise à jour régulière de ses données parce qu'elles révèlent un territoire soumis à une très forte évolution spatio-temporelle. Ainsi, la collecte des données relatives au patrimoine naturel reconnu en estuaire de Seine est régulièrement réalisée auprès des organismes d'intérêt que sont les Directions Régionales de l'Environnement (DIREN Haute et Basse-Normandie), l'Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage, le Conservatoire des Espaces et des Rivages Lacustres (CERL), le Parc Naturel Régional de Brotonne... ce qui nécessite un partenariat efficace afin de répondre aux critères de qualité requis. Initialement, le format d'échange de ces données était de type papier (carte, plan cadastral...) ce qui impliquait une numérisation lourde et consommatrice de temps. Puis, tous les fournisseurs partenariaux ont opté pour les avantages de l'informatique (plates-formes SIG, DAO/CAO...) ce qui a permis d'améliorer l'opération d'actualisation. En outre, une BDG environnementale est par définition pluridisciplinaire et multisite ; sa qualité et sa pertinence dépendent entre autres de l'aptitude de l'équipe SIG à gérer les conflits entre disciplines, le cloisonnement protectionniste des organismes, les pyramides hiérarchiques et réglementaires... jusqu'au processus de rétention d'informations car l'information représente un pouvoir difficile à partager pour certains acteurs. Comme précité, toute procédure aménagiste concerne l'environnement, d'où la nécessité de disposer d'un inventaire complet du patrimoine naturel. Cette indispensable connaissance des richesses naturelles d'un territoire n'est donc plus à démontrer.

L'intérêt du patrimoine naturel en estuaire de Seine se traduit par la mise en œuvre de nombreuses dispositions d'origine nationale ou européenne : Zones Naturelles d'Intérêt Écologique Faunistique et Floristique, Zones d'Importance Communautaire pour les Oiseaux, Réserves Naturelles, Réserves Naturelles Volontaires, Réserves de Chasse, les Zones Spéciales de Conservation, Zones de Protection Spéciales, sites inscrits et classés, Arrêtés de biotope... À cela viennent s'ajouter la maîtrise foncière (CELRL), les mesures contractuelles (ex. conventions de gestion avec les Conservatoires Régionaux, Parc Naturel Régional)... Il apparaît évident que cet empilement de mesures rend difficile l'instruction des projets d'aménagement, d'autant que certaines d'entre elles sont peu claires, obsolètes, voire inadaptées ou contradictoires, et laissent des flous autorisant des interprétations subjectives. La superposition de toutes ces couches par le biais du SIG permet d'afficher la multiplicité des mesures incitatives et réglementaires qui existent actuellement sur ce territoire. On observe aussi un important recouvrement géographique entre ces mesures, ne facilitant pas la lecture cartographique. Somme toute, une telle représentation communique implicitement la "richesse patrimoniale" de ce milieu estuarien mais également, le trop-plein juridique qui lui correspond d'où le besoin d'une harmonisation du droit français dans ce domaine : "les estuaires français constituent un véritable défi pour le droit qui doit faire face à leur caractère hybride et plurifonctionnel. L'analyse du traitement juridique de ces espaces montre la faible réceptivité du droit national à leur spécificité voire une forte propension à promouvoir leur artificialisation en dépit de la connaissance désormais acquise de leur intérêt écologique mais aussi de leur vulnérabilité accrue" (Auger et coll., 1998).

En termes d'analyse spatiale, il est nécessaire de dépasser cette simple superposition de "calques", de combiner les configurations spatiales des entités et de synthétiser leurs informations. L'objectif est de générer une nouvelle strate d'information qui confronte, agrège et analyse les connais-

sances afin de traduire une autre facette de la réalité utile à la compréhension, décision et gestion du patrimoine naturel. La complexité du monde réel est ainsi rendue plus lisible et communicative. Grâce aux fonctionnalités topologiques du SIG, un croisement des différentes couches de ce patrimoine naturel a permis d'obtenir un "synopsis quantitatif des mesures de protection". Cette analyse spatiale autorise de façon aisée l'identification et la classification de zones en fonction du cumul des mesures qui s'y exercent.

Outre qu'un tel diagnostic est visiblement plus démonstratif de la multiplicité des mesures de protection, il affiche avec plus de pertinence le patrimoine naturel reconnu en estuaire de Seine et révèle explicitement l'importance patrimoniale des zones intertidales et des plaines, zones humides d'importance écologique reconnue dans le cadre du PNRZH (Bourcier, 1999). Le SIT permet des analyses spatio-thématiques en temps réel telles que le calcul du type, du nombre et de la surface de biotopes pour chacun des secteurs identifiés, autorisant ainsi une optimisation de la gestion et de la planification de ces milieux. Toujours dans l'optique de générer des indicateurs utiles aux acteurs du milieu et décideurs, le précédent croisement topologique est enrichi par l'ajout d'une information relative au niveau de protection juridique de ces zones. Il en découle cette fois-ci une "synopsis qualitative du degré de protection du patrimoine naturel" qui identifie et classe les secteurs en fonction de leur degré de protection cumulé. Les zones les plus protégées (coefficient très fort) se localisent principalement dans les plaines alluviales, ce qui confirme l'importance écologique de ces milieux. Ce diagnostic territorial complète avantageusement le document précédent en synthétisant commodément les contraintes environnementales du territoire estuarien... connaissance indispensable lors de projets d'aménagement du territoire et de planification. Ainsi sur un plan décisionnel, cette production traduit la lourdeur d'un tel empilement de protections (locales jusqu'à internationales) qui rend difficile l'instruction des projets et dossiers en cours sur cet espace (Port 2000). Atteindre une gestion optimale du patrimoine naturel à tous les niveaux d'organisation demanderait probablement une mise en cohérence de cette superposition protectionniste, tant au plan juridique que financier.

Cependant, cette synthèse offre l'avantage de représenter des unités homogènes de contraintes environnementales en s'affranchissant des limites administratives, ce qui est plus cohérent lorsque l'on désire appréhender l'environnement de façon globale à l'échelle estuarienne. Dans une optique de gestion optimale du patrimoine naturel, ne serait-il pas utile d'éviter la superposition pesante de tous ces périmètres de protection et, peut-être, de s'appuyer sur des engagements européens et internationaux (ex. réseau Natura 2000) qui devraient constituer des outils de protection puissants aux niveaux réglementaire et financier.

La pertinence des fonctionnalités d'analyse spatiale du SIT peut également être démontrée à travers l'évaluation des nuisances sonores du trafic routier sur l'avifaune : il s'agit d'une combinaison de couches d'information, sans aucun lien apparent entre elles, qui montre la complexité de la réalité et plus particulièrement l'influence des activités humaines sur l'environnement naturel. La plaine alluviale Nord de l'estuaire de la Seine souffre encore d'un antagonisme "patrimoine naturel/développement économique" qui rend difficile la mise en œuvre opérationnelle d'une réelle politique de développement durable. Dans ce contexte, l'analyse met en corrélation le trafic routier estuarien avec l'habitat naturel de la Spatule Blanche (échassier migrateur) afin de mesurer l'impact potentiel de la pollution sonore sur le territoire de cet oiseau. Les routes sélectionnées sont particulièrement intéressantes dans la mesure où elles sont adjacentes à la réserve naturelle de l'estuaire de la Seine et seront directement connectées à Port 2000 (future expansion de l'actuel port maritime). Les statistiques sur les flux de véhicules (légers et poids lourds) sont obtenues auprès des Directions Départementales de l'Équipement (DDE 14, 27, 76) et viennent renseigner le niveau sémantique de la strate d'information "Trafic routier". Le rayon de l'enveloppe sonore est calculé à partir d'un trafic de 5000 véhicules/jour (tous véhicules confondus – dans les deux sens) et correspond à un niveau de 70 dB/A. Le SIT permet ensuite de générer la zone de bruit (buffer ou zone-tampon) à partir des entités sélectionnées et de la croiser topologiquement avec la zone d'habitat de la Spatule Blanche. Le résultat crée une nouvelle strate d'information qui identifie précisément les secteurs potentiels de perturbation sonore. Par simple interrogation, il est aisé d'obtenir leur localisation et leurs attributs métriques (longueur, largeur, périmètre, surface...). Ce type d'analyse spatiale peut être exploité dans d'autres domaines (pollution atmosphérique, du sol...) avec l'aide de modules de calcul adaptés à la problématique afin de répondre à des études de simulation, d'impact ou de simple diagnostic.

L'observatoire a aussi prouvé son utilité dans la compréhension hydraulique du marais du Hode. L'analyse croisée des informations topographique, hydrologique et hydrogéologique a permis la création d'une typologie fonctionnelle des secteurs humides de ce sous-système. Dans un premier temps, l'imagerie SPOT a offert une vue synoptique des secteurs de faible réflectance incluant les zones humides, les boisements... En second lieu, l'intégration du réseau hydrographique associé à un complètement terrain a permis de préciser et de vérifier la localisation des secteurs couramment en eau. En dernier lieu, les dépressions topographiques et les courbes de niveaux (correspondant au toit de la nappe alluviale supérieure) ont été extraites et mises en cohérence avec les autres couches d'informations. Cette combinaison a permis d'expliquer l'existence de ces secteurs humides et a conduit à la création d'une typologie : zones soumises à la marée, directement ou indirectement selon la présence de vannes ; dépressions topographiques situées en dessous de 8 mètres, alimentées par les précipitations et souvent recoupées par la nappe alluviale ; mares perchées situées en dessous de 8,2 mètres, alimentées par les ruissellements mais rarement par les eaux alluviales ; enfin, cuvettes situées sous les 8,3 mètres, essentiellement alimentées par les précipitations (ou les eaux de résurgence au nord) car recoupées exceptionnellement par la nappe des alluvions supérieures. La pertinence de cette analyse a été confirmée ultérieurement, grâce à des analyses géochimiques effectuées sur des prélèvements d'eau sur place.

Un autre résultat intéressant concerne le suivi de l'évolution morpho-sédimentaire de la grande vasière nord de l'estuaire de Seine (à l'ouest du marais du Hode). Des données altimétriques (BD Alti) ont été exploitées afin de mettre en relief la dynamique sédimentaire de cette zone caractérisée par un engraissement et un atterrissement progressif. Une combinaison diachronique des informations altimétriques a permis de dresser un bilan sédimentaire de cette vasière entre 1980 et 1990 : le bloc-diagramme ainsi généré met en relief positif les secteurs d'accumulation sédimentaire et en relief négatif les zones d'érosion. Le reste de la topographie correspond à une situation d'équilibre ou à une évolution non significative. De plus, les volumes sédimentaires impliqués ont été quantifiés.

Enfin, dans le marais du Hode, des données ont été acquises sur les communautés de plantes phanérogames et sur les populations d'oiseaux nicheurs selon un échantillonnage spatialement explicite, permettant les transferts d'échelles et l'intégration dans des documents cartographiques variés. Les résultats montrent des décalages entre les patrons du paysage, évalués préalablement sur des critères physiologiques, et les distributions spatiales des assemblages d'espèces d'oiseaux modélisés par analyses statistiques. Par ailleurs, l'analyse des communautés végétales permet de détecter des variables clés dans le paysage agissant sur la structure et l'organisation de ces communautés à des échelles différentes. Ces résultats posent le problème de la pertinence de la notion d'indicateurs biologiques ou écologiques dans des milieux soumis à de fortes dynamiques (voire plus loin Les communautés écologiques en vallée de Seine).

Une structure de rencontre et de négociation

L'observatoire s'instaure ainsi comme une interface permettant aux équipes de recherche d'intégrer leurs données et de formuler des résultats interdisciplinaires à des fins opérationnelles directement exploitables par les acteurs de la planification et de l'aménagement régional. C'est aussi un outil de restitution des connaissances mis à la disposition des gestionnaires du milieu et un moyen de formuler des diagnostics pour les décideurs du territoire.

En définitive, l'outil SIG démontre ici sa pertinence pour la connaissance, l'aide à la gestion et à la décision du patrimoine environnemental d'un territoire tel que celui de l'estuaire de Seine, au moyen de diagnostics territoriaux, en vue de contribuer à une compréhension globale et nécessaire lors des opérations d'aménagement du territoire.

Dans ce contexte, les SIG trouvent un véritable champ d'application en tant qu'outils

capables de collecter, de structurer, d'harmoniser et d'analyser les connaissances sur le littoral estuarien en vue d'extraire commodément des diagnostics territoriaux et des synthèses utiles à la décision : outils techniques, méthodologiques et théoriques opératoires, leur exploitation raisonnée permet d'aborder et de résoudre les problèmes de l'aménagement du littoral d'une façon à la fois globale et consensuelle. Ils peuvent orienter vers un autre mode d'aménagement et de gestion par une meilleure compréhension des processus de fonctionnement et de transformation ; un mode ouvert à la complexité naturelle et humaine de cet espace si spécifique, qui englobe tous ses niveaux d'organisation et qui repose sur la vision de son développement durable. Le contexte particulier de ce territoire explique la mise en place et l'exploitation d'un SIRS spécifique à l'estuaire de Seine. L'observatoire des zones humides et des marais de Seine se positionne pour dépasser les limites institutionnelles d'un SIT et appliquer le potentiel d'un SIG dans le domaine de l'aménagement du territoire et de l'environnement, sur un espace géographique complexe qui nécessite une gestion multi-échelles et multi-acteurs (Prélaz-Droux, 1995).

L'étude des zones humides exige que l'on s'interroge sur l'interface société et nature, car les multiples activités qui s'exercent sur les territoires sont gouvernées par une logique d'ordre social. Même si ces milieux sont mieux considérés dans les processus de décision économique et sociale, ils restent souvent intégrés en fin d'étape ou bien les différents acteurs manquent d'éléments pour établir des priorités et anticiper les problèmes. Les pratiques et les procédures actuelles à différentes échelles démontrent une certaine faiblesse de l'anticipation des conséquences environnementales de l'aménagement des territoires, faute d'outils d'information appropriés, mais également, faute d'outils conceptuels. Dans ce contexte, les SIG s'affichent comme des "outils" appropriés car ils sont avant tout des systèmes d'information dont l'objectif est de décrire un territoire, de façon à améliorer sa connaissance et à permettre la description et l'analyse des phénomènes naturels et humains qui s'y produisent.

La mise en place de l'Observatoire des Zones Humides des Marais et de l'Estuaire de Seine veut contribuer à cette problématique en apportant des éléments de compréhension et de réponse. À la croisée des chemins de nombreuses disciplines, cet observatoire autorise la convergence et la complémentarité des divers modes de description et de formalisation de l'espace. Cependant, maîtriser ce type d'observatoire, et parvenir à la définition de méthodes d'analyses solides, impliquent d'être capable d'assimiler une part des langages différents et de leurs concepts associés, de façon à pouvoir dialoguer dans une véritable approche interdisciplinaire, mais surtout d'être à même de formaliser les questions dans un langage compatible avec les différentes composantes du système d'information. En outre, son exploitation opérationnelle nécessite une mise à jour régulière de sa base de données (donc un partenariat efficace entre les composantes), surtout dans le domaine de l'environnement estuarien qui se caractérise par une évolution spatio-temporelle rapide et un droit législatif complexe.

Les communautés écologiques en vallée de Seine

La dynamique des paysages de la basse vallée de la Seine est susceptible d'influencer bon nombre de communautés écologiques, et cela à deux niveaux. Au niveau local, le cumul des nombreux changements parcellaires modifie les conditions générales de vie des animaux et végétaux et la qualité de leurs habitats. Au niveau du paysage, cette dynamique affecte des caractéristiques générales du territoire à travers la fragmentation des habitats favorables aux espèces et par la modification des conditions d'accessibilité (phénomène d'insularisation de certains habitats). Ces changements d'utilisation des terres dont les conséquences se cumulent à bon nombre d'autres modifications de notre environnement s'inscrivent dans ce que l'on appelle maintenant classiquement le "changement global" (Vitousek, 1994). Le choix de la végétation phanérogame et de l'avifaune pour le suivi des communautés écologiques de la basse vallée de Seine est justifié par l'abondante littérature montrant que ces deux groupes taxonomiques intègrent les changements paysagers. Les récentes recherches en

écologie des communautés végétales et en écologie des paysages ont intégré les facteurs paysagers au travers des notions de "pluies de graines" provenant de l'environnement proche (Lyon et coll., 1995) et de "pool d'espèces" (Eriksson, 1993) constituant le fonds d'espèces disponibles pour un habitat notamment à l'échelle du paysage. Les oiseaux sont quant à eux connus pour répondre aux changements de structure du paysage et constituent de ce fait des indicateurs pertinents à cette échelle d'analyse (Pearson, 1993 ; Balent et Courtiade, 1992).

Au travers de ces deux types de communautés, nous montrons d'une part que la réponse de groupes différents est contrastée dans un même paysage et que, d'autre part, l'échelle d'analyse (local/paysage) détermine également la nature des facteurs en jeu dans la structure et l'organisation des assemblages d'espèces.

Pour obtenir une stratification de l'échantillonnage sur le marais du Hode, une cartographie des unités paysagères a été réalisée puis numérisée sous format vectoriel au sein du système d'information géographique. L'échantillonnage de l'avifaune nicheuse a été effectué selon une grille de mailles de 500 m par 500 m. Le protocole est décrit dans Chabrierie et coll. (sous presse a). Sur la même grille, chaque maille a été caractérisée sur le plan paysager en fonction de l'occupation du sol, de la structure et de la dynamique du paysage (Burel et Baudry, 1999). Un échantillonnage de la végétation a été réalisé en mai et juin sur un transect nord-sud situé au centre du marais, transect représentatif de la flore et des habitats présents sur le site. Tous les cinquante mètres le long de ce transect, la flore a été échantillonnée sur des surfaces de 16 m². Pour chacun des quarante neuf relevés sélectionnés, l'abondance relative des espèces a été estimée à partir de seize quadrats (0,25 m x 0,25 m) distribués régulièrement dans la surface du relevé. Pour chaque relevé, quatorze variables locales de milieu (physionomie et caractéristiques de la végétation, données station et sol) ont été collectées (Chabrierie et coll. sous presse b).

Deux scènes SPOT prises en mai 1987 et en mars 1997 ont été utilisées pour évaluer la répartition spatiale de la biomasse végétale en 1997 d'une part, et d'autre part pour prendre en compte la dynamique du paysage. Les valeurs des NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) ont été générées à partir des scènes SPOT pour réaliser une analyse à deux échelles. A l'échelle des relevés de végétation, des fenêtres de traitement (kernel) de neuf pixels (coefficients 1 ; 0,3 ; 0,2) ont fait l'objet d'une convolution (Lillesand et Kiefer, 1994). Pour chaque cellule de micro-paysages, un indice de changement (IC) a été obtenu par un calcul de différence centrée réduite entre les valeurs numériques de l'indice NDVI des deux dates. Pour chacune des mailles (25 pixels x 25 pixels) la variable 'IC' représente le pourcentage de pixels ayant changé entre 1987 et 1997. Ce traitement permet de détecter les principaux changements d'occupation du sol (Bourcier et Poudevigne, sous presse).

La typologie de la végétation prairiale permet de décrire 4 groupes : des prairies temporaires ou récentes (G1) au nord du transect, des prairies humides halophiles au sud du transect (G2) et au milieu une mosaïque de prairies humides plus ou moins sub-halophiles (G3) et de prairies mésophiles (G4). L'analyse sous contrainte (CCA validée par test de Monte Carlo avec $p < 0,1\%$) des données floristiques suggère l'importance de la dynamique récente du paysage, de l'humidité et des variables mésologiques (salinité, pH). Les résultats détaillés sont donnés dans Chabrierie et coll. (sous presse, c). Les mesures de structure et d'organisation de ces assemblages d'espèces montrent des patrons de variations contrastés. Les groupes les plus riches (G4) présentent une forte micro-hétérogénéité mais une faible originalité à l'échelle du paysage ainsi qu'une forte cohérence écologique. A l'inverse, les prairies les plus pauvres en espèces (G1) sont homogènes mais originales dans le paysage sur le plan floristique et présentent une faible cohérence écologique. Ces deux extrêmes caractérisent respectivement d'une part les milieux et les "taches" les plus stables (G4) et d'autre part les zones les plus dynamiques dans le paysage (G1).

Pour l'avifaune, la classification a priori des mailles ordonnées par ACP sur les variables de paysage, identifie quatre groupes. Elle distingue les grands ensembles structuraux qui décrivent le marais et se succèdent du nord au sud : les ensembles de culture au nord, les ensembles mixtes de prairies et cultures au centre, les prairies et les roselières au sud. La classification a posteriori des mailles ordonnées par une analyse sous contrainte (CCA validée par test de Monte Carlo avec $p < 0,01\%$) sur les données avifaune et paysage (12 variables du paysage x 68 mailles x 29 espèces d'oiseaux), distingue 3 groupes :

- le groupe 1 correspond à un paysage d'herbes hautes (roselière ou prairies) où domine l'eau. Les espèces d'oiseaux associées sont essentiellement *Panurus biarmicus*, *Acrocephalus scirpaceus*, ou *Acrocephalus schoenobanus*. Les éléments anthropiques sont rares et la richesse du paysage est faible ;
- le groupe 2 est un paysage de prairies homogène qui accueille essentiellement des espèces comme *Motacilla flava*, *Miliaria calandra*, *Anthus pratensis* ou *Alauda arvensis* ;
- le groupe 3 est un paysage anthropisé, dominé par les cultures, à richesse élevée avec des cortèges d'espèces telles que *Troglodytes troglodytes*, *Fringilla coelebs*, *Parus major* ou *Turdus merula*.

Les mesures de richesses spécifique et de cohérence écologique sur les assemblages d'oiseaux caractérisant ces trois types de mailles montrent là aussi des patrons de diversité élevés. Alors que la richesse spécifique des assemblages d'espèces est plus faible dans les étendues de prairies que dans les micro-paysages anthropisés, la cohérence écologique est plus forte dans les premières que dans les derniers. Les mailles de roselières et prairies montrent quant à elles des richesses intermédiaires mais une forte variance au niveau de la cohérence écologique.

À l'échelle du paysage, l'analyse de la végétation distingue les différents faciès de végétation. Les facteurs du milieu qui expliquent ces faciès sont essentiellement de nature abiotique tels que le niveau hydrique ou la salinité. Ces caractères dépendent de la macrotopographie, du type de sol et du type de gestion. À l'échelle de l'unité de végétation, l'analyse par CCA distingue une mosaïque d'espèces prairiales où les variations de l'environnement perçues à l'échelle du paysage (hydromorphie, salinité...) s'estompent devant des facteurs plus locaux biotiques et abiotiques. Le facteur hydrique joue un rôle important conditionné essentiellement à cette échelle par la microtopographie. À cette hétérogénéité du milieu s'ajoute l'hétérogénéité liée à la gestion qui va générer des mosaïques de perturbation. Le facteur dynamique explique une part importante de l'organisation des communautés prairiales. Dans des environnements changeants, les assemblages sont peu cohérents, et constituent vraisemblablement des communautés instables. A l'inverse, un environnement stable génère des communautés parfois plus pauvres spécifiquement mais surtout présentant un fort niveau d'organisation.

L'analyse oiseau-paysage identifie trois ensembles paysagers qui correspondent à trois types de réponse de l'avifaune aux caractéristiques structurelles de l'environnement. La répartition spatiale de ces ensembles (éloignement, surface), c'est-à-dire leur degré de fragmentation et de connectivité (Baudry et Merriam, 1988), est sans doute déterminante pour expliquer la diversité de l'avifaune dans le marais du Hode et nécessite d'autres études complémentaires sur les flux d'espèces. Paradoxalement, la classification préalable des paysages ne reprend qu'incomplètement ces trois ensembles, alors que les tests statistiques permettent de valider le choix des variables explicatives pour le modèle oiseau. L'une des différences semble en partie due à la variable "dynamique du paysage" d'importance inégale dans les deux analyses. L'hypothèse de l'inertie des compartiments biologiques face aux changements de l'environnement pourrait expliquer le décalage entre le paysage perçu par les oiseaux et la situation analysée a priori. En d'autres termes, le poids de l'histoire est, chez les oiseaux comme chez les plantes sans doute, un déterminant important de la qualité des paysages.

L'évaluation de la qualité biologique des zones humides au moyen des communautés écologiques pose le problème du choix du groupe biologique. Les communautés perçoivent différemment un même environnement. La hiérarchie des facteurs structurant les communautés dépend de l'objet d'étude. Ce problème, inhérent à toute la démarche de typologie, pose également le problème de la pertinence de la notion d'indicateur dans une démarche de suivi d'une zone humide. L'utilisation d'indicateurs biologiques ou écologiques classiques (par exemple la richesse spécifique) sous entend un équilibre "espèce (communauté)-milieu" pour être lisible. Il s'agit là d'une importante faiblesse des systèmes où l'ajustement des espèces à leur environnement est une situation généralement hors équilibre comme dans les milieux estuariens et les zones humides étudiées ici. L'analyse doit prendre en compte les relations entre espèces, et les mécanismes de coexistence au sein de la communauté (Alard et Poudevigne, sous presse). La cohérence écologique des communautés au travers de ces mécanismes de coexistence (fig. 1) est vraisemblablement une voie de recherche fructueuse mais non suffisante. Un assemblage d'espèces peut apparaître non cohérent pour des raisons différentes parce qu'il caractérise soit des milieux en forte dynamique soit des milieux stables mais très hétérogènes sur le plan des conditions abiotiques.

En guise de conclusion interdisciplinaire...

La notion d'aménagement et d'environnement exige que l'on s'interroge sur l'interface société et nature, car les multiples activités (parfois concurrentielles et antagonistes) qui s'exercent sur les territoires sont gouvernées par une logique d'ordre social. Même si l'environnement est mieux considéré dans les processus de décisions économique et sociale. L'aménagement de l'espace d'un estuaire tel que celui de la Seine ne peut être fructueux et harmonieux qu'à condition de mettre en place une structure arbitrant efficacement et équitablement les multiples enjeux qui le caractérisent actuellement. Une des solutions préconisées se nomme le développement durable, qui doit continuellement trouver son équilibre dans une dynamique bornée par l'économie, l'écologie et les besoins de la population, compatible avec des niveaux d'organisation locaux mais également nationaux et internationaux. Cette démarche de développement durable nécessite donc une approche globale et une compréhension interdisciplinaire en vue d'améliorer les processus de décision par le politique.

Dans ce contexte, le SIT sur l'estuaire de Seine trouve un véritable champ d'application en tant qu'instrument de gestion et de veille. Il permet notamment, de décrire les conditions et la distribution géographique des ressources naturelles et des lieux d'intérêt, d'accroître la comparabilité et la compatibilité de divers ensembles de données et, d'encourager l'analyse spatiale des impacts environnementaux qu'on pourrait autrement délaissier pour des raisons de difficultés analytiques ou de coûts" (Banque mondiale, 1993). Ce SIT s'affiche comme un outil approprié car il est avant tout un système d'information dont l'objectif est de décrire un territoire, de façon à améliorer sa connaissance et à permettre la description et l'analyse des phénomènes naturels et humains qui s'y produisent. Le SIT a ainsi permis de confronter, agréger et synthétiser des connaissances relatives au patrimoine naturel de l'estuaire de Seine en vue de créer des diagnostics territoriaux utiles à la compréhension, décision et gestion du territoire (Miellet, 1999).

Enfin, il demeure que ce sont des techniques comportant des limites même si elles permettent la combinaison de plusieurs sources de données. L'utilisateur doit toujours comprendre les conséquences de sa démarche et réduire tous les biais possibles dus à la qualité des données, aux problèmes liés au traitement des données ou à la sensibilité de la méthode utilisée (Marois, 1993). En d'autres termes, leur utilisation dans les processus de choix des grandes orientations et de prises de décisions exige de la part de l'intéressé une grande confiance dans la pertinence et dans la fiabilité des données exploitées ; garantir la qualité des données et leur interprétation s'avère donc crucial et capital avant tout processus décisionnel.

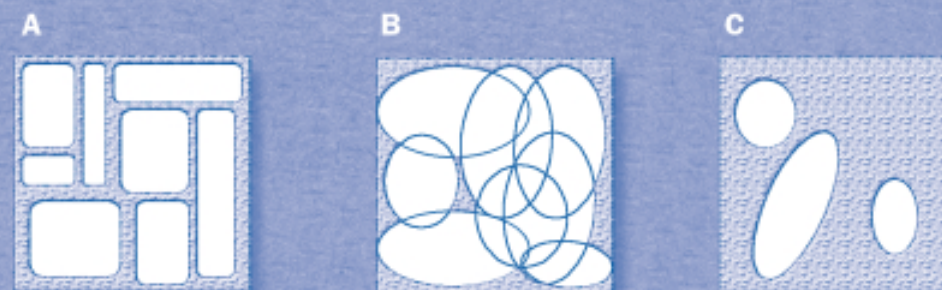
Bibliographie

- Alard, D. et Poudevigne, I. ; sous presse. Biodiversity in changing landscapes: from species assemblage to ecosystem organisation. Dans : Leuven, R.S.E.W., Poudevigne, I., Teeuw R. M. (Eds.), Application of GIS and remote sensing in river studies. Backhuys Publishers, Leiden.
- Auger, Ch. et Verrel J.-L. ; 1998. Les estuaires français – Évolution naturelle et artificielle, Plouzané, IFREMER.
- Bailey A. ; 1995. Les concepts de la géographie humaine, Paris, Éditions Masson.
- Balent, G. et Courtiade, B. ; 1992. Modelling bird communities/landscape patterns relationships in a rural area of South-Western France. *Landscape Ecology*, 6 : 195-211.
- Banque Mondiale ; 1993. Geographic information systems for environmental assessment and review. *Environmental Assessment Sourcebook*, Update, n° 3.
- Baudry, J. et Merriam, H. G. ; 1988. Connectivity and connectedness: functional versus structural patterns in landscapes. The second International Seminar of the International association for Landscape Ecology. *Münstersche Geographische Arbeiten* 29, 1988, Münster.
- Bourcier J.-C., Bourcier A. et Pouchin Th. ; 1998. L'Observatoire des zones humides - Zones humides de l'estuaire et des marais de Seine : structure, fonctionnement et gestion. Rapport de l'exercice 1998, Projet pilote n° 48, Programme national de recherche sur les zones humides, Centre interdisciplinaire de recherches en transports et affaires internationales, Université du Havre.
- Bourcier A., Bourcier J.-C. et Pouchin Th. ; 1999. Appréhension de la cinématique paysagère par télédétection spatiale en estuaire de Seine : contribution au Programme national de recherche sur les zones humides. La télédétection en francophonie : analyse critique et perspectives, Collection Actualité Scientifique, Éditions AUE.
- Bourcier A. et Poudevigne, I., sous presse. The use of spot imagery as a tool for ecological analysis of river floodplains : a case study in the Seine valley. Dans Leuven, R.S.E.W., Poudevigne, I. et Teeuw, R.M. (Eds.), Application of geographic information systems and remote sensing in river studies. Backhuys Publishers, Leiden.
- Bryant C.R. ; 1993. Les SIG au service de l'aménagement et du développement communautaire, SIG et Environnement. *Revue de Géographie Alpine*, n° 9, Grenoble, p. 63-66.
- Burel F. et Baudry J. ; 1999. Écologie du paysage. Concepts méthodes et applications. Dans Tec et Doc. Eds.
- Chabrierie O., Poudevigne I., Jackson A., Bureau F., Aubert M., Bourcier A., Van der Berg, S. et Alard D., sous presse. Les communautés écologiques de l'estuaire de la Seine: une approche hiérarchique. *Écologie*.

- Chabrierie O., Poudevigne I., Bureau F., Akpa M., Nebbache S., Aubert M., Bourcier A. et Alard D., sous presse. Biodiversity and ecosystem function in wetlands: a case study in the estuary of the Seine river, France. *Estuaries*.
- Chappuis J.-B. ; 1993. Protéger la nature – Guide pratique de la protection de la nature et du paysage, Lausanne, Éditions Delachaux et Niestlé.
- Eriksson O. ; 1993. The species pool hypothesis and plant community diversity. *Oikos*, 68 : 371-374.
- Laurini R. et Milleret-Raffort Fr. ; 1993. Les bases de données en géomatique. Paris, Éditions Hermès.
- Lillesand T.M. et Kiefer R.W. ; 1994. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley and sons, New York. 750 pages.
- Lyon J.G. et MacCarthy J. ; 1995. Wetland and environmental applications of GIS, Boca Raton, Éditions CRC Press.
- Marois C. ; 1993. Environnement et Systèmes d'Information Géographique, SIG et Environnement. *Revue de Géographie Alpine*, n° 9, Grenoble, Université Joseph Fourier, p. 11-14.
- Miellet Ph. ; 1999. SIG pour la gestion et l'aménagement urbain – Note de synthèse, SIG – Dossier documentaire, Paris, METL, p. 7-24.
- Pearson S.M. ; 1993. The spatial extent and relative influence of landscape-level factors on wintering bird populations. *Landscape Ecology*, 8, 3-18.
- Pornon H. ; 1995. Les SIG – Mise en oeuvre et applications. Paris, Éditions Hermès.
- Prelaz-Droux R. ; 1995. Système d'information et gestion du territoire : Approche systémique et procédure de réalisation. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, EPFL, Lausanne, Suisse.
- Rouet P. ; 1991. Les données dans les systèmes d'information géographique. Paris, Éditions Hermès.
- Vitousek, P.M. ; 1994. Beyond global warming : ecology and global change. *Ecology* 75(7) : 1861-1876.

Figure 1

Trois exemples de mécanismes de coexistence des espèces dans les communautés (chaque ellipse représente la niche écologique théorique d'une espèce pour deux gradients de l'environnement)



la ségrégation écologique qui permet aux espèces de minimiser les interactions compétitives (spatialement ou par spécialisation trophique), elles peuvent alors constituer des assemblages stables.

la coexistence hors équilibre qui constitue des assemblages écologiquement incohérents pour lesquels les mécanismes d'exclusion compétitive sont importants. Ces assemblages peuvent être instables ou en équilibre (donc durables) avec un régime de perturbation donné.

la colonisation de milieux récents pour lesquels les interactions sont faibles entre les espèces pionnières. Ces assemblages sont généralement des stades pionniers instables.

L'analyse des relations entre les systèmes agricoles et écologiques dans les zones humides : complémentarité entre approches fonctionnelles et spatiales

C. THENAIL (INRA-SAD ARMORIQUE)

thenail@roazhon.inra.fr

D. LE CŒUR (ENSAR - LABORATOIRE D'ÉCOLOGIE & SCIENCES PHYTOSANITAIRES ET INRA-SAD ARMORIQUE)

didier.lecoeur@agorennes.educagri.fr

J. BAUDRY (INRA SAD-ARMORIQUE)

jbaudry@roazhon.inra.fr

Introduction

De nombreux résultats sont aujourd'hui apportés sur les rôles écologiques (au sens large) des zones humides en paysage agricole. Ces rôles concernent en particulier la qualité de l'eau, via les flux d'eau et de substances dissoutes en surface, les flux érosifs, la contribution à des flux de profondeur (Haycock et coll., 1997; Mérot, 2000). Ils concernent aussi le maintien des espèces végétales et animales, via le maintien des habitats et des possibilités de déplacement/dispersion (Burel et Baudry, 1999). Si ces fonctions écologiques ont été analysées et sont reconnues aujourd'hui, c'est bien parce que les zones humides en question sont intégrées aux paysages agricoles, et donc aussi aux exploitations agricoles. Ces démarches se fondent en effet sur l'hypothèse d'une dégradation par l'activité agricole des ressources naturelles de bien collectif, qu'il faut pouvoir maîtriser. Il est aussi postulé dans ces démarches (souvent implicitement) que le maintien de l'activité agricole dans ces paysages est nécessaire, y compris dans les zones humides elles-mêmes (arguments sur la nécessité de maintenir l'ouverture du paysage en bord de cours d'eau par exemple). Cette dialectique est celle de la **multifonctionnalité de l'agriculture** (Baudry et coll., 1996). Il s'agit ainsi de définir les moyens de "piloter" les zones humides qui concilient production agricole et environnement, ce qui suppose d'évaluer les relations entre exploitations agricoles et zones humides dans ce sens (Baudry, 1997). Dans ce cadre, nous développerons deux notions complémentaires pour évaluer les relations entre activités agricoles et zones humides. La première est la notion de **contribution technique des exploitations agricoles à la dynamique des zones humides**. Elle dépend de la nature, de la diversité et de la surface d'emprise des activités d'une exploitation agricole en zone humide. Ces activités agissent en effet comme variables affectant les fonctionnements écologiques. La deuxième notion est celle de **concernement technique des exploitations agricoles par rapport aux zones humides**. Une exploitation est plus ou moins concernée par une zone humide selon les contraintes et atouts qui ont régi la mise en place des modes d'utilisation des parcelles en zone humide, mais aussi des rôles associés à ces modes d'utilisation dans l'exploitation. Ce concernement est aussi plus ou moins important selon la surface en zone humide occupée dans l'exploitation. Ces facteurs d'organisation et rôles dans l'exploitation représentent autant de **cibles d'intervention** mais donnent aussi des indications sur les **marges de manœuvre** possibles dans l'exploitation (Thenail et Baudry, 2000).

Contribution et concernement technique

DES EXPLOITATIONS AGRICOLES À L'ÉGARD DES ZONES HUMIDES. ILLUSTRATION AVEC LE CAS DES PETITES ZONES HUMIDES RIVERAINES DE COURS D'EAU

Contribution technique : comment évaluer la façon dont les exploitations agricoles influencent les dynamiques des zones humides ?

Nous partons du principe établi en écologie du paysage, de l'importance de la configuration spatiale dynamique des éléments du paysage sur les fonctionnements écologiques et leurs évolutions, en particulier concernant les processus de flux, déplacement, dispersion mentionnés en introduction.

Dans ce cadre, il nous importe d'abord de savoir quels sont les éléments de paysage qui sont sous l'influence directe ou indirecte des activités agricoles, et quels sont les modes et dynamiques de ces activités pouvant être moteurs des dynamiques écologiques. C'est le premier aspect de la contribution des exploitations à la dynamique d'une zone considérée. Un premier critère est celui de **l'occupation du sol** qui décrit la nature de ce qui couvre le sol une année donnée, donc les types de couverts végétaux (culture de maïs, etc.). Au cours de l'année sur une parcelle, se succèdent par ailleurs un ensemble d'actes de gestion technique de la culture ou de la prairie. Cette succession coordonnée peut être différente pour deux cultures identiques situées sur des parcelles différentes : nature des interventions (outils de travail du sol différents, pâture par vaches laitières ou par génisses), niveau des interventions (niveau de fertilisation, profondeur de labour, etc.), dynamique des interventions (nombre de passages, synchronisation des interventions, etc.). Cet ensemble coordonné est appelé **itinéraire technique**, chaque acte technique mais aussi leur combinaison jouent sur l'état du sol et du couvert végétal à un moment donné dans l'année et sur leur évolution au cours de l'année (Sebillotte, 1990). Enfin, deux cultures identiques situées sur deux parcelles différentes peuvent être intégrées dans des dynamiques pluriannuelles différentes. Ainsi, une parcelle en maïs l'année d'observation peut être intégrée dans une **succession culturale** où elle reviendra très souvent, en alternance avec une année de céréale par exemple, ou au contraire plus rarement, par exemple en alternance avec une céréale et une prairie semée laissée en place pendant trois ou quatre années. Ces successions culturales données en exemple montre des "motifs" assez précis qui se succèdent dans le temps. Dans d'autres cas, on construira une succession surtout en fonction de cultures "pivots" (Aubry et coll., 1998) qui nécessitent un délai de retour important. Dans tous les cas l'agriculteur organise l'utilisation d'une parcelle sur un pas de temps pluriannuel. Ces dynamiques régissent une variation de l'occupation du sol d'une année à l'autre, et donc de l'itinéraire technique réalisé sur la parcelle. L'état du sol et du couvert végétal est ainsi contingent non seulement de ce qui est mis en œuvre à un moment, mais aussi de la combinaison de ces activités combinées dans le temps : vitesse de retour d'une culture, durée de maintien d'une prairie, effets combinés des fertilisations successives etc.

Ces éléments du paysage dont nous parlons ici sont les **parcelles**, lieu principal de production agricole, mais d'autres éléments de paysages font aussi l'objet d'activités agricoles. Ce sont, par exemple, les espaces situés entre les parcelles ou **"interchamps"** (Baudry et coll., 1998), dont la gamme s'étend d'une simple limite réalisée par le labour (sa gestion se confond alors avec celle du champ) à une bande herbeuse plus ou moins étroite, enfin à une structure au sol plus forte (fossé, talus) présentant ou non arbres et arbustes. La structure et la végétation de ces interchamps sont influencées par la gestion des parcelles adjacentes (Thenail et coll., 2000). Elles sont aussi souvent l'objet elles-mêmes de pratiques de gestion coordonnées : curage, élagage, débroussaillage, etc. De la même manière que pour la parcelle, la nature et la dynamique intra-annuelle et pluriannuelle de ces activités conditionnent l'état et la dynamique d'état des interchamps. Comme pour les dynamiques de gestion des parcelles, on a pu montrer comment la végétation et la structure des interchamps (état, dynamique) jouent sur un certain nombre de fonctionnements écologiques.

Rendre compte de ces interventions sur les éléments du paysage nécessite que l'on prenne en compte la délimitation d'usage de ces éléments. Il s'agit des limites à l'intérieur desquelles s'applique un ensemble d'activités coordonnées par l'exploitant, en vue d'élaborer une production ou d'aboutir à un résultat d'entretien. D'élément du paysage, on passe ainsi à la notion d'élément d'un territoire d'exploitation géré de façon coordonnée. Les facteurs qui expliquent les activités de gestion des éléments de paysage en zones humides sont à l'origine de leurs dynamiques (Baudry et Thenail, sous presse). Prenons l'exemple de deux exploitations laitières utilisant des parcelles le long d'un même cours d'eau (fig. 1). Les successions culturales réalisées par les deux exploitations font intervenir maïs et prairie pour l'affouragement des animaux, et céréales, mais ces trois composantes apparaissent avec des fréquences différentes suivant les types de succession. Pour autant, les successions culturales allouées aux parcelles de proximité de cours d'eau ne sont pas les mêmes dans les deux exploitations. Les **parcelles notées "hydromorphes"** (c'est-à-dire en zone humide) ont plus de 80% de leur surface présentant une hydromorphie moyenne à forte dès la surface. Dans l'exploitation A, les parcelles en zone humide sont surtout utilisées en prairie permanente et en prairie de longue durée (prairie semée laissée en place pendant plus de 4 ans) en alternance avec maïs et blé ; ces prairies sont pâturées par les vaches laitières. Le siège de cette exploitation est situé en bord de cours d'eau et la surface autour de ces bâtiments est en zone humide, ce qui explique l'importance des prairies allouées aux vaches laitières au contraire des cultures. Par ailleurs, le manque de surface en zone non hydromorphe fait qu'une parcelle en zone hydromorphe est tout de même utilisée en culture. Dans l'exploitation B, les parcelles en zone humide sont surtout utilisées en prairies permanentes, allouées à la pâture des génisses. Le siège d'exploitation est en zone non hydromorphe, la surface qui l'entoure est suffisamment grande et saine pour que l'exploitant y installe des prairies pour la pâture des vaches laitières, de durée n'excédant pas 3 ans, en rotation plus fréquente avec maïs et blé. Ainsi, les deux exploitations A et B ne contribuent pas de la même façon à la zone humide, qui est plus utilisée par A que par B en surface, et parce que **les activités mises en œuvre sur les parcelles** concernées sont différentes, en termes de **nature** (type de pâture), **dynamique** (successions culturales), et **intensité** (pression de pâture plus forte pour A). Via ces processus, les changements tels que remembrement, changement de production etc., se répercuteront sur cette organisation spatiale des activités agricoles. Comprendre ces modes et facteurs d'organisation est nécessaire pour évaluer les conséquences de changements "spontanés" ou de projets d'aménagement ou de gestion portant sur les zones humides.

La délimitation d'usage des éléments du paysage qui permet de les voir comme éléments constitutifs du territoire de l'exploitation, amène à un autre regard sur la délimitation de la zone humide elle-même. La figure 2 présente ainsi une cartographie simplifiée du degré d'hydromorphie non pas de l'espace en continu, mais parcelle par parcelle (même carte qu'en figure 1). Une telle carte fait apparaître des différences dans la superposition entre structure parcellaire et hydromorphie. Ainsi dans certains cas (au nord de la zone cartographiée par exemple), **structure parcellaire et hydromorphie** se superposent parfaitement avec un talus qui ceinture les parcelles hydromorphes, et les sépare nettement des zones amont. Dans ce même cas, l'occupation du sol est nettement différenciée, avec une **"spécialisation" des parcelles hydromorphes** en prairie permanente, friche petits bois, etc., tandis qu'au-delà du talus s'étendent des cultures. Dans d'autres cas (au sud, zone des deux exploitations A et B par exemple), on observe un gradient d'hydromorphie à partir du cours d'eau (pente très légère), sur lequel sont distribuées des parcelles : l'hydromorphie par parcelle est plus hétérogène, aucun talus ne ceinture strictement la zone humide, et l'on observe une **mosaïque de modes d'occupation du sol** jusqu'au bord du cours d'eau. Ces configurations différentes sont dues aux interactions entre structure des parcellaires, milieu physique et organisation interne aux exploitations agricoles telles qu'analysées dans les deux exemples d'exploitations agricoles A et B. Ces différences sont donc à la fois en termes de mosaïque paysagère locale, en termes de contraste entre mosaïque locale et mosaïque du paysage englobant, enfin, en termes de **d'interface entre zone humide et paysage englobant**. Dans le premier cas (zone humide confinée par un talus de ceinture), la gestion du talus de ceinture sera très importante à comprendre au regard de son rôle écologique. Dans le deuxième cas, c'est la mosaïque d'interface qu'il faudra considérer en priorité. Dans l'optique d'analyser les interactions entre activités agricoles, zones humides et fonctionnements écologiques, ces exemples montrent aussi que la végétation, ou le niveau d'hydromorphie évalué sur un espace continu, ne peuvent être les seuls critères de délimitation d'une zone humide en paysage agricole.

Concernement technique des exploitations agricoles par une zone humide

L'exemple des deux exploitations laitières proposé précédemment montre qu'elles ne contribuent pas de la même manière à la zone humide, pour des raisons de surface utilisée dans la zone humide et de mode d'utilisation. Inversement, ces deux exploitations ne sont pas concernées de la même manière par cette zone humide (fig. 1). Tout d'abord, les parcelles en zone humide occupent une part plus importante en surface et en nombre de parcelles (en nombre d'unités à gérer) dans l'exploitation A que dans l'exploitation B. Ainsi, les contraintes liées à l'hydromorphie, à la proximité du cours d'eau, ont un plus grand poids dans l'organisation d'ensemble de l'exploitation A. Par ailleurs, du fait que le siège d'exploitation de A se trouve dans la zone humide, les **fonctions principales** (affourager les vaches laitières) dévolues aux parcelles qui l'entourent sont localisées dans cette même zone. Au contraire, la zone humide est moins contraignante pour l'exploitant B qui peut l'utiliser pour des **fonctions plus secondaires**, en l'occurrence des pâtures de génisses, qui demandent moins d'attention que les vaches laitières.

Ces **fonctions et contraintes** associées aux parcelles (maïs aussi haies, fossés, etc.) situées en zone humide, dépendent à nouveau des objectifs de l'exploitant mais aussi de la configuration d'ensemble du territoire d'exploitation et de la surface de l'exploitation en zone humide. Finalement, une exploitation est d'autant plus concernée par une zone humide, que la surface en zone humide représente une part importante de cette exploitation, et que les fonctions agricoles associées à la zone humide sont importantes. Ce point est essentiel à considérer dans une optique de projet portant sur une zone humide en paysage agricole. En effet, des changements proposés aux exploitations en termes d'**aménagement** ou de **gestion agricole** sur ces zones précises, vont être plus ou moins difficiles à mettre en œuvre, plus ou moins contraignantes pour l'organisation de la production, selon que l'exploitation est plus ou moins concernée par la zone humide. Ces obstacles pourront être levés si le projet est élargi à une surface plus grande que la zone humide, en considérant conjointement l'aménagement et l'organisation de la gestion d'ensemble du territoire de l'exploitation et du paysage.

Diversité des zones humides selon leur surface et configuration : variété des méthodes et différences de fonctionnement agricole

Outre les zones humides de fond de vallée, il existe des grandes zones humides littorales. Ces dernières sont, en fait, des milieux créés, aménagés pour l'agriculture où l'eau est très contrôlée, individuellement et collectivement, alors que dans les fonds de vallée, les fonctionnements pré-agricoles (inondation) peuvent subsister. Pour autant, dans les deux cas, la fragmentation de milieux ayant gardé un caractère humide par le drainage est un problème écologique majeur. En conséquence, la notion de contribution des exploitations agricoles à ces zones humides est là aussi très importante. Par ailleurs, des proportions beaucoup plus importantes des territoires d'exploitations agricoles peuvent faire partie de larges zones humides. Le niveau de concernement des exploitations par ces zones humides est donc là aussi un concept adapté, ce niveau peut être beaucoup plus important, et donc influencer beaucoup plus fortement non seulement l'utilisation du territoire de l'exploitation et son organisation d'ensemble, mais aussi le système de production lui-même. A l'inverse, la zone d'interface entre la zone humide et la mosaïque paysagère englobante est un espace beaucoup plus crucial dans le cas des petites zones humides, dès lors qu'il représente un espace important au regard de la petitesse de ces zones humides, et de la longueur de contact avec la mosaïque paysagère englobante.

Conclusions

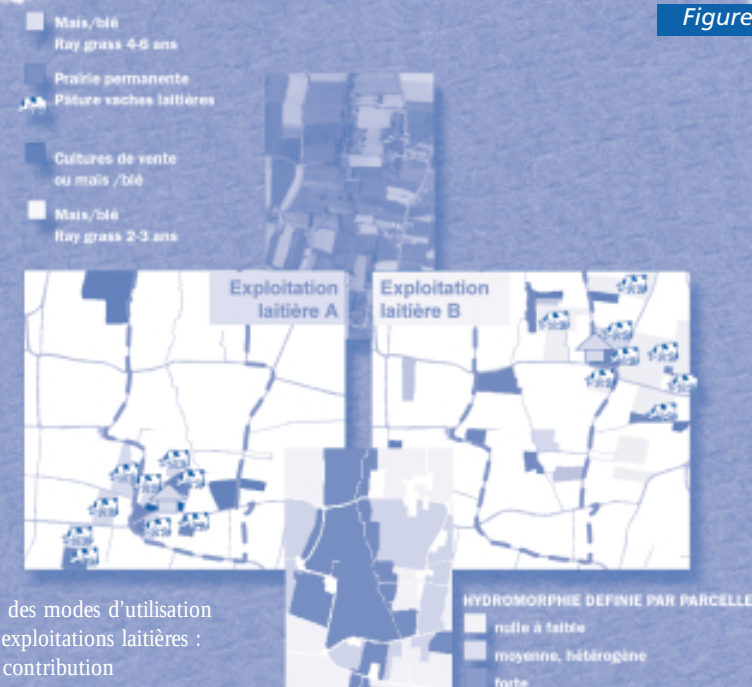
Les méthodes d'étude entre les exploitations agricoles et leur territoire ne sont pas spécifiques pour les zones humides. Les concepts de concernement et contribution peuvent s'appliquer à toute zone d'intérêt particulier. L'intérêt de ces concepts est de montrer que des modes de gestion particuliers, à finalité environnementale, ne peuvent s'appliquer indépendamment des exploitations agricoles. Il doit bien y avoir un **projet territorial de gestion** de la zone humide, coordonné entre des agriculteurs qui sont dans des situations différentes.

Un autre apport essentiel de la combinaison entre analyses fonctionnelle et spatiale des activités agricole et qu'elle peut aisément s'articuler avec l'approche fonctionnelle de l'écologie du paysage. Toutes deux soulignent le lien entre les zones humides et le territoire environnant, de même que des effets de distance et de surface. Mais si le territoire de l'exploitation est une **entité agricole fonctionnelle**, il est très rarement une **entité écologique fonctionnelle**.

Bibliographie

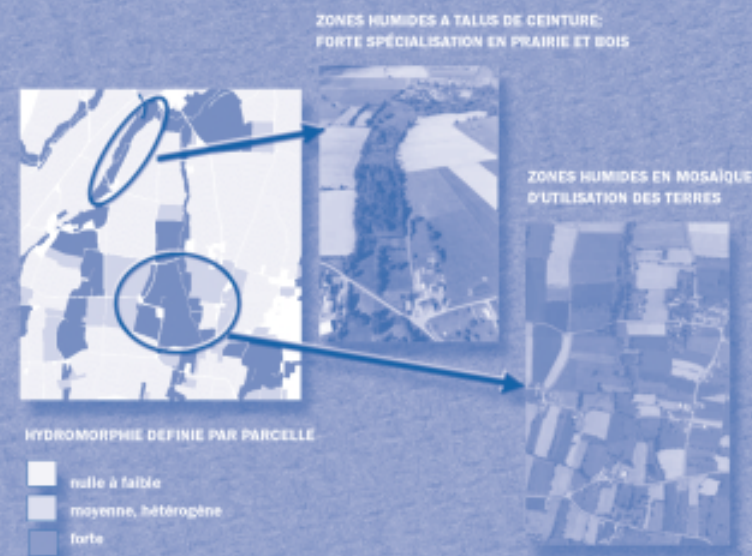
- Aubry, C., Biarnes, A., Maxime, F. et Papy, F. ; 1998. Modélisation de l'organisation technique de la production dans l'exploitation agricole: la constitution de systèmes de culture. Pages 25-43 in J. Brossier and B. Dent (eds), Gestion des exploitations et des ressources rurales. Paris, INRA Editions.
- Baudry, J. ; 1997. Buffer zones and farming systems. Pages 275-282 dans N. Haycock et coll. (eds), Buffer zones: their processes and potential in water protection (eds). Quest Environmental.
- Baudry, J. et coll., 1996. Approche spatiale des systèmes techniques agricoles et environnement. Pages 123-137 dans G. Allaire et coll. (eds), Nouvelles fonctions de l'agriculture et de l'espace rural. Enjeux et défis identifiés par la recherche., Toulouse, INRA.
- Baudry, J., Jouin, A., Thenail, C., 1998. La diversité des bordures de champ dans les exploitations agricoles de pays de bocage. Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires, 31: 117-134.
- Baudry, J. et Thenail, C., sous presse. Interaction between farming systems, riparian zones, and landscape patterns : a case study in western France. Landscape and Urban Planning.
- Burel, F. et Baudry, J., 1999. Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications. Paris, Editions Tec et Doc, 359 pages.
- Haycock, N. E. et coll. (eds), 1997. Buffer zones: their processes and potential in water protection. Harpenden, UK, Quest Environmental, 322 pages.
- Mérot, P., 2000. TY-FON, Typologie fonctionnelle des zones humides de fonds de vallée en vue de la régulation de la pollution diffuse. Fédération de recherche CAREN, INRA et autres partenaires. Rapport final du PNRZH, 115 pages.
- Sebillotte, M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. Pages 165-196 dans L. Combe et D. Picard (eds), Un point sur... les systèmes de culture. Paris, INRA Editions.
- Thenail, C. et Baudry, J., 2000. Relations entre les activités agricoles et l'utilisation des zones humides de fond de vallée. Pages 69-79 in P. Mérot (ed), TY-FON Typologie fonctionnelle des zones humides de fonds de vallée en vue de la régulation de la pollution diffuse. Fédération de recherche CAREN, INRA et autres partenaires. Rapport final du PNRZH.
- Thenail, C., Le Coeur, D. et Baudry, J., 2000. Relationships between field boundaries, farming systems and landscape: consequences on biodiversity pattern in agrarian landscapes. Pages 63-76 dans J. Brossier et coll. (eds), 4th European symposium on European Farming and Rural Systems Research and Extension: environmental, agricultural and socio-economic issues. Volos, AFSRE European group.

Figure 1



Organisation spatiale des modes d'utilisation des terres dans deux exploitations laitières : comparaison de leur contribution et concernement vis à vis d'une zone humide de fond de vallée.

Figure 2



Relation entre mosaïque paysagère interne à la zone humide et mosaïque englobante : comparaison de deux zones humides avec ou sans talus de ceinture.

Construire une typologie des petites zones humides riveraines intégrant l'hydrologie et la géochimie : les acquis du programme "Ty-Fon"

PH. MÉROT (INRA-ENSA, UMR SOL ET AGRONOMIE DE RENNES-QUIMPER)

pmerot@roazhon.inra.fr

P. DURAND (INRA-ENSA, UMR SOL ET AGRONOMIE DE RENNES-QUIMPER)

patrick.durand@roazhon.inra.fr

C. GASCUEL-ODOUX (INRA-ENSA, UMR SOL ET AGRONOMIE DE RENNES-QUIMPER)

cgascuel@roazhon.inra.fr

A. JAFFREZIC (INRA-ENSA, UMR SOL ET AGRONOMIE DE RENNES-QUIMPER)

anne.jaffrezic@roazhon.inra.fr

C. KAO (CEMAGREF, U.R. DEAN "OUVRAGES POUR LE DRAINAGE ET L'ÉTANCHÉITÉ", ANTONY)

cyril.kao@cemagref.fr

G. PINAY (CNRS, UMR ECOBIO UNIVERSITÉ DE RENNES 1, ACTUELLEMENT CEFE, MONTPELLIER)

pinay@cefe.cnrs-mop.fr

Introduction

Les petites zones humides de fond de vallée, souvent situées en zones agricoles, sont généralement oubliées des inventaires des milieux humides du fait de leur caractère diffus dans le paysage (Adamus et coll., 1987 ; 1991 ; Boutin et Keddy, 1993). Elles font l'objet depuis quelques années d'une attention particulière liée à différents enjeux antagonistes qui inciteraient tantôt à leur aménagement tantôt à leur préservation. Elles présentent pour certains polluants un pouvoir épurateur potentiel maintenant bien reconnu. C'est notamment le cas pour l'azote en relation avec les processus de dénitrification et de prélèvement biologique (Knowles, 1981 ; Pinay et Décamps, 1988 ; Johnston, 1991 ; Pinay et coll., 1993). Face à la dégradation de la qualité des eaux par la pollution diffuse d'origine agricole et aux problèmes de gestion de l'eau en milieu rural, ces zones apparaissent à l'aménageur de l'espace rural comme des éléments de régulation du fonctionnement hydrologique et géochimique des bassins versants. Mais elles sont aussi parfois considérées comme source potentielle d'émission de gaz à effet de serre, en premier lieu de N₂O et dans une moindre mesure de méthane, ce qui tendrait cependant à limiter leur utilisation à des fins d'épuration des eaux. Enfin, citées comme zones d'intérêt dans la loi sur l'eau de 1992, elles présentent souvent une richesse biologique qui inciterait à leur stricte conservation. En fait ces fonctions d'épuration, d'émission de gaz ou de maintien de la biodiversité sont très liées au fonctionnement hydrologique de ces zones, fonctionnement qui lui-même a fait l'objet de peu de travaux.

Ces zones humides sont bien représentées dans les massifs anciens mollement vallonnés de la zone tempérée, dans un contexte pédo-climatique où les nappes superficielles affleurent généralement en bas de versant. Elles couvrent de l'ordre de 15 à 20% de la surface des bassins versants d'ordre 1 à 3 (selon la classification de Stralher) et apparaissent comme de petits domaines, de quelques ares à quelques hectares, plus ou moins connectés entre eux et à la rivière (Aurousseau et Squidant, 1995).

L'objectif de cet article est de montrer comment le programme Ty-Fon a été le cadre d'une approche interdisciplinaire qui nous a amenés (Merot et coll., 2000) :

- d'une part à rechercher une cohérence entre les différentes approches des zones humides ;
- d'autre part à hiérarchiser ces différentes approches ;
- enfin à proposer des méthodes de mesure des fonctionnalités des zones humides.

Y a-t-il une cohérence entre les différentes approches des zones humides de fond de vallée ?

Les zones humides possèdent une "signature" spécifique dans les différents domaines de l'environnement (géomorphologique, hydrologique, biologique...), ce qui donne cette grande diversité et une grande richesse d'approches, mais aussi cette difficulté à clarifier ces approches.

Nous proposons un schéma qui articule les différentes méthodes de caractérisation des zones humides, mais aussi les processus en jeu (fig. 1). On notera que l'on considère ici que les zones humides se déterminent au regard du bassin versant dans lequel elles sont insérées.

Il s'agit de représenter les relations de "filiation" entre les différents domaines d'étude des zones humides, domaines d'étude qui correspondent à des processus établis sur les temps longs.

Ce schéma est placé sous deux contraintes : la contrainte climatologique et la contrainte géologique.

En effet, si la topologie qui relie les différents domaines d'étude est applicable à toutes les situations, l'intensité des relations par contre peut varier selon le climat ou la géologie. Ainsi, une même géomorphologie entraînera une extension différente des zones humides si les pluviosités, les perméabilités ou les porosités (liées à la géologie) sont différentes.

Le passage d'un niveau de connaissance à un autre est gouverné par un certain nombre de processus et de lois spécifiques qui déterminent in fine l'existence et la nature de la zone humide :

- une géomorphologie donnée présente, par exemple, un fond de vallée encadré par des versants. Cette géomorphologie est due à l'action sur le très long terme de l'érosion sur un matériau spécifique, qui peut de plus avoir été modifié par une tectonique récente (Chaplot et coll., 1999) ;
- elle induit des gradients hydrauliques, gouvernés par la topographie, qui entraînent une présence d'eau saturante (inondation...) en fond de vallée. Ces processus hydrologiques sont parfaitement décrits par des lois qui permettent de prédire spatialement la direction et l'intensité des flux d'eau. Les hydrologues ont ainsi inventé la notion de zone de source à surface variable, ou zone contributive qui est très proche de la notion de zone humide de fond de vallée (Hewlett et Troendle, 1975 ; Beven et Kirkby, 1979 ; Merot, 1988) ;
- cette présence d'eau saturante en fond de vallée induit ensuite, sous l'effet de facteurs biogéochimiques liés à l'anoxie, une différenciation morphologique des sols et la création de sols hydromorphes ou de sols organiques humides (sols tourbeux). La classification des sols intègre ainsi, pour déterminer des types de sols différents, des notions de durée de saturation et de profondeur de saturation. Les conditions liées à l'anoxie qui jouent sur le long terme vis-à-vis de la nature des sols interviennent également de façon actuelle sur la géochimie de la solution du sol et notamment la dénitrification ;
- les relations entre le type de sol et le type de végétation sont d'abord déterminées par l'usage du sol : usage agricole ou non, plus ou moins intensif. La végétation peut aller de la prairie humide à la flore naturelle jusqu'au boisement (Regimbeau, 1999). L'évolution de ces dernières années, qui montre un profond changement dans le rapport des agriculteurs aux zones humides, peut être comprise par l'étude de l'évolution des systèmes de production. Ceux-ci déterminent la contribution

des exploitations agricoles à la dynamique des zones humides, souvent liée au concernement de ces mêmes exploitations par les zones humides (Thenail et coll., même ouvrage). Comme précédemment, la végétation entre en interaction avec la solution du sol pour la modifier.

Cette proposition, basée a priori sur des critères définis à l'échelle d'un paysage, reste cependant applicable à l'échelle locale ; on voit par exemple à l'intérieur d'une zone humide, des associations végétales en mosaïque selon des différences d'altitude à l'échelle décimétrique. Les travaux menés par d'autres équipes sur le lit majeur de grands systèmes hydrologiques pourraient également s'y référer.

Ce schéma peut bien évidemment être discuté. Ainsi, on pourrait introduire des boucles de rétroaction sur des temps plus courts (par exemple, le développement de sols hydromorphes va agir sur l'hydrologie des zones humides ou encore une crue brutale peut modifier la géomorphologie de la zone riveraine).

Cependant, ce schéma présente l'intérêt d'une hiérarchisation globale des critères, à une certaine échelle d'espace et de temps. Il va conduire à un raisonnement en terme de flux (et non pas en concentration). Il permet une approche par modélisation et simulation de différentes situations. On verra dans la suite comment il sera la base d'une typologie qu'une approche empirique par site permettrait difficilement.

Il ressort enfin de cette approche que le fonctionnement des zones humides riveraines ne peut être dissocié de celui du bassin versant dans lequel elles s'inscrivent, contrairement à de nombreuses approches locales.

M à quelles notions de zones humides renvoient les différentes approches ?

Même si le schéma proposé ci-dessus propose une cohérence dans les différentes méthodes d'approche des zones humides, il reste à préciser le niveau auquel se situent les types de zone ainsi caractérisés. La typologie sera donc basée tout d'abord sur l'analyse de la zone humide considérée au sein de son bassin versant (tab. 1).

Zone humide	Basée sur	méthode
potentielle	indices topographiques carte des sols hydromorphes	modèle prenant en compte la surface drainée et pente topographique cartographie des sols
effective	usage du sol (drainage...) indice d'humidité végétation	différents niveaux d'investigations sont possibles
efficace	flux polluants entrant dans la ZH géométrie interne de la Z.H.	analyse par bassin versant étude au champ

Le premier niveau de la typologie définit des zones humides potentielles, représentant en quelque sorte une enveloppe extérieure quant à leur délimitation (fig. 2). Il s'agit de l'ensemble de la zone qui, sur des critères essentiellement géomorphologique et climatologique est ou devrait être humide. Le deuxième niveau définit, au sein de cette première délimitation, les zones humides effectives, qui présentent réellement un caractère de milieu humide, caractère qui a pu disparaître du

fait notamment d'aménagements, et d'en définir la temporalité. Enfin, le troisième niveau définit les zones humides efficaces, vis-à-vis d'une fonction spécifique (fonction hydrologique, géochimique, paysagère). La zone humide efficace peut être définie différemment selon la fonction considérée. Ces trois niveaux de définition correspondent à trois degrés dans les moyens à mobiliser, respectivement : des indicateurs d'accès facile ; une approche in situ de l'état hydrique du bassin versant ; une réelle appréciation d'une ou de plusieurs fonctions des zones humides telles que décrites précédemment, par le biais d'études détaillées (fig. 3).

Comment déterminer la notion d'efficacité ?

Alors que les notions de zone humide potentielle et zone humide effective sont intrinsèques à chaque zone humide, celle de zone humide efficace se réfère à une fonction particulière. Les 2 premières notions font appel à des approches relativement légères (tab. 1) alors que la troisième implique des approfondissements.

L'efficacité des zones humides ne peut être appréciée que relativement à une fonction spécifique. Ainsi, pour les fonctions hydrologiques des zones humides, on traitera d'une part des fonctions de stockage - transversal ou longitudinal -, et de fonction de transfert. Le tableau 2 résume les différentes propositions tel que l'on a pu les mettre en œuvre pour ces fonctions hydrologiques (pour plus de détail voir Durand et coll., 2000).

Typologie	Base de la typologie	Base de la définition	Principaux Paramètres	Degré de difficulté*
Zone Humide Efficace	Appréciation des Fonctions Hydrologiques de la Zone Humide	Fonction de Stockage longitudinal	Indicateur d'aménagement : typologie des fossés	1
			Indicateur de régime hydrologique : temps de retour des pluies	
			Topographie de la zone humide et modélisation	3
		Fonction de Stockage transversal	Indicateur de taille relative de la Zone Humide / Versant	1
			Indicateur de continuité spatiale de la Zone Humide / Versant	
			Estimation des flux : mesure des paramètres physiques, tensiométrie, piézométrie et modélisation	3
		Fonction de Transfert	Estimation des flux et des vitesses de transfert : mesures des paramètres physiques, tensiométrie, piézométrie et modélisation	3
			Bilan spatialisé : traçage interne à la zone humide, suivi hydrochimique en crue et hors crue	4

* 1 : facile, d'ordre typologique ;

2 : facile, avec instrumentation modérée, maintenance faible (j/mois) ;

3 : instrumentation lourde (capteurs, stations), coût de maintenance et d'analyse élevé (semaine/mois) ;

4 : instrumentation modérée (préleveur), coût d'intervention, coût analytique élevé lié à des suivis en crue (continu) et hors-crue (hebdomadaire).

L'évaluation de l'efficacité des fonctions biogéochimiques a également été abordée par des mesures locales (Bidois, 1999), même si les travaux n'ont pas été aussi loin que pour les fonctions hydrologiques. Parmi l'ensemble des facteurs complexes qui déterminent l'efficacité de la fonction épuratrice des zones humides de fond de vallée en termes de dénitrification, nous avons pu identifier dans le cadre du programme Ty-Fon un certain nombre de facteurs sensibles qui conditionnent cette efficacité. Un des facteurs déterminant de cette typologie à venir devrait être la géométrie relative de la zone humide au sein de son bassin versant. Un modèle spatialisé biogéochimique a pu simuler l'importance de la dénitrification (en terme de flux) selon la forme des versants alimentant la zone humide considérée (Beaujouan et coll., 2001, 2002). Il en ressort que le linéaire de contact entre la zone humide et le versant est un facteur déterminant de cette efficacité, alors que le rôle de la L'évaluation de l'efficacité des fonctions biogéochimiques a également été abordée par des mesures locales (Bidois, 1999), même si les travaux n'ont pas été aussi loin que pour les fonctions hydrologiques. Parmi l'ensemble des facteurs complexes qui déterminent l'efficacité de la fonction épuratrice des zones humides de fond de vallée en termes de dénitrification, nous avons pu identifier dans le cadre du programme Ty-Fon un certain nombre de facteurs sensibles qui conditionnent cette efficacité. Un des facteurs déterminant de cette typologie à venir devrait être la géométrie relative de la zone humide au sein de son bassin versant. Un modèle spatialisé biogéochimique a pu simuler l'importance de la dénitrification (en terme de flux) selon la forme des versants alimentant la zone humide considérée (Beaujouan et coll., 2001, 2002). Il en ressort que le linéaire de contact entre la zone humide et le versant est un facteur déterminant de cette efficacité, alors que le rôle de la surface de la zone humide apparaît secondaire (fig. 4). Cette notion de linéaire de contact intègre en fait les connaissances sur un certain nombre de processus qui fondent la méthode : rôle du temps de séjour dans la dénitrification, installation de conditions redox favorables à la dénitrification, nécessité d'un flux d'azote en entrée de la zone, etc. A côté de cette démarche typologique basée sur la modélisation des flux, une autre approche plus globale a été testée : Elle montre qu'il est possible, en préalable, de classer rapidement les zones humides en fonction de leurs fonctions de stockage, recyclage ou exportation d'azote grâce à des indicateurs phyto-écologiques.

Beaujouan V.; Durand P. et Ruiz L., 2001. Modeling the effect of the spatial distribution of agricultural practices on nitrogen fluxes in rural catchments. *Ecological Modelling* : 137 (1), 93-105

Beaujouan V.; Durand P., Ruiz L., Aurousseau P. et Cotteret G., 2002. A hydrological model dedicated to Topography-bases simulation of nitrogen transfer and transformation. Rationale and application to the geomorphology-denitrification relationship. *Hydrological Processes* : vol.16 (2), p.493-507

Beven K.J. et Kirkby M.J., 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Science Bulletin*. 24, 43-69.

Bidois J., 1999. Aménagement de zones humides ripariennes pour la reconquête de la qualité de l'eau : expérimentation et modélisation. Doctorat de l'Université de Rennes I - mention Biologie : 214 pages et annexes

Boutin C. et Keddy P.A., 1993. A functional classification of wetlands. *Journal of Vegetation Science*, 4, 591-600.

Chaplot V.; Walter C. et Curmi P., 1999. Arguments cartographiques en faveur du rôle de la tectonique récente sur la distribution régionale des sols du Massif Armoricain. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. : 329, 487-493

Durand P.; Gascuel-Oudoux C.; Kao C. et Merot P., 2000. Une typologie des petites zones humides ripariennes. *Etude et Gestion des Sols* : 7 (3), 207-218

Gascuel-Oudoux C.; Merot P.; Crave A.; Gineste P.; Taha A. et Zhang Z., 1998. Les zones contributives de fonds de vallée : localisation, structure et fonctionnement hydrodynamique. *Agriculture intensive et qualité des eaux*, Cheverry, C (Ed); Science Update (FRA), INRA Editions, Paris (FRA) : 129-141

Hewlett J.D. et Troendle C.A., 1975. Non point and diffused water sources: a variable source area problem, In *Irrigation and drainage division symposium*, ASCE Logan, Août 1975, Watershed Management, 46 pages.

Johnston C.A., 1991. Sediment and nutrient retention by freshwater wetlands: effects on surface water quality. *Critical Reviews in Environmental Control*, 21 (5,6): 491-565.

Knowles R., 1981. Denitrification. *Ecological bulletin*, 33, 315-329.

Merot P., 1988. Les zones de source à surface variable et la question de leur localisation. *Hydrologie continentale*, 3, 105-115.

Merot P. et coll., 2000. Ty-Fon Typologie fonctionnelle des zones humides de fonds de vallée en vue de la régulation de la pollution diffuse. Fédération de recherche CAREN, INRA et autres partenaires. Rapport final du PNRZH, 115 pages.

Pinay G. et Décamps H., 1988. The role of riparian woods in regulating nitrogen fluxes between alluvial aquifer and surface water: a conceptual model. *Regulated Rivers*, 2: 507-516.

Pinay G., Roques L., et Fabre A., 1993. Spatial and temporal pattern of denitrification in a riparian forest. *Journal of Applied Ecology*, 30, 581-591.

Regimbeau C., 1999. Typologies et fonctionnement des zones humides de fond de vallée en Ille et Vilaine (Bretagne). Thèse de doctorat de l'université de Rennes I. 213 pages.

Conclusion

La réflexion sur la typologie des zones humides riveraines a été menée en prenant en compte la place de chaque zone humide au sein de son bassin versant, paramètre qui conditionne à la fois sa structure et sa dynamique.

Les notions de zones humides potentielles, effectives et efficaces proposées correspondent à un outil typologique utile :

- pour clarifier et ordonner les différentes méthodes utilisées dans l'étude et la caractérisation des zones humides, méthodes qui renvoient à des processus différents ;
- pour aider à la négociation, avec les usagers, du devenir des zones humides, fonction du niveau d'intérêt, de moyens et de connaissances sur ces zones humides.

Des éléments méthodologiques sont proposés in fine pour évaluer l'efficacité des fonctionnalités hydrologiques et géochimiques.

BIBLIOGRAPHIE

Adamus P.R., Clairain E.J., Smith R.D. et Young R.E., 1987. Wetland evaluation technique. Vol. II. Methodology. Operational draft technical report U.S. Army Corps of engineers waterways experiment station, Vicksburg, Mississippi, USA, 206 pages.

Adamus P.R., Stockwell L.T., Clairain E.J., Morrow, M.E., Rozas L.P. et Smith R.D., 1991. Wetland evaluation technique. Vol. I. Literature review and evaluation rationale. Operational draft technical report U.S. Army Corps of engineers waterways experiment station, Vicksburg, Mississippi, USA, 206 pages.

Aurousseau, P. et Squidant, H., 1995. Rôle environnemental et identification cartographique des sols hydromorphes de bas fonds. Ingénieries EAT, n° spécial Rade de Brest, 75-85.

Figure 1

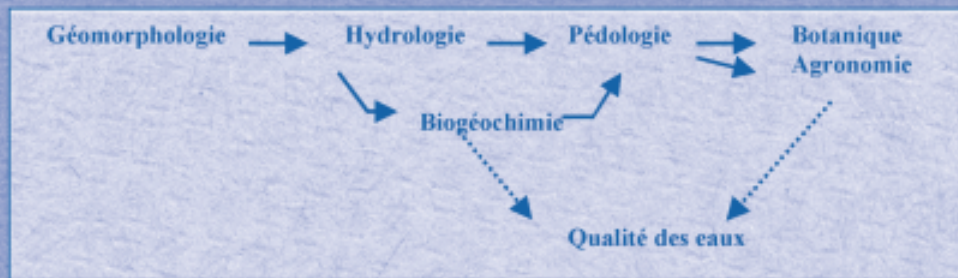
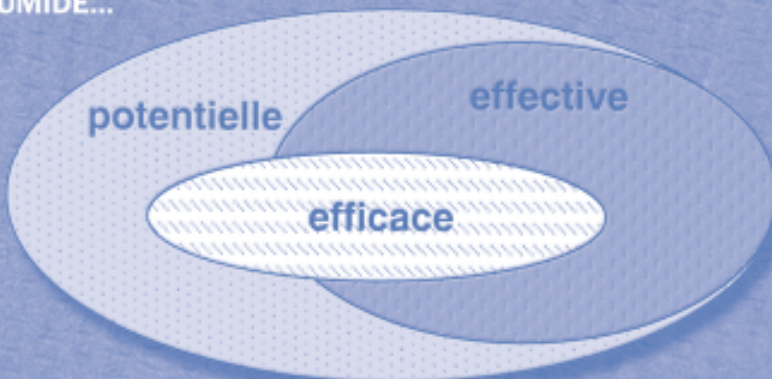


Schéma de relations entre les critères de caractérisation des zones humides

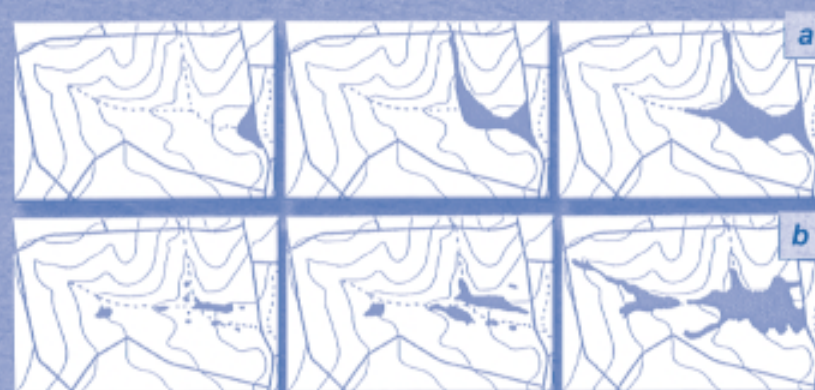
Figure 2

ZONE HUMIDE...



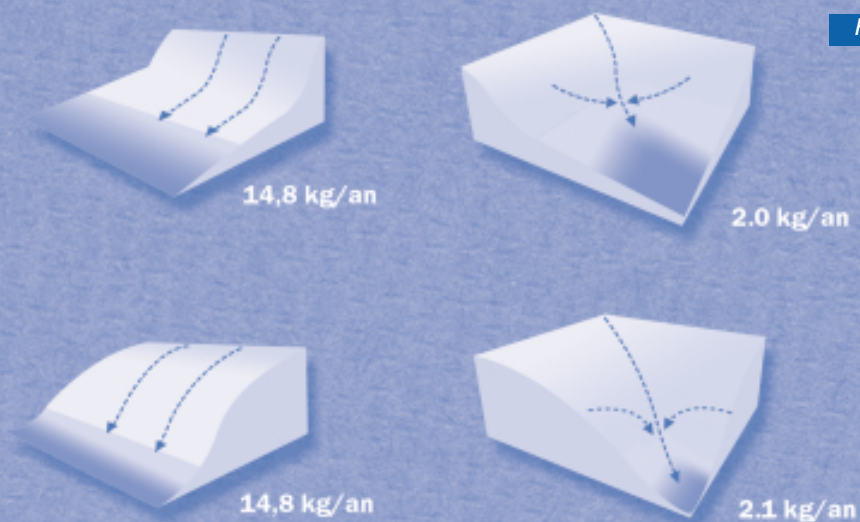
Hiérarchisation des zones humides

Figure 3



Localisation des zones humides pour trois états hydriques du bassin versant de Kervidy-Naizin (56) : par un modèle hydrologique à base topographique (Topmodel, Beven et Kirkby, 1979) (haut) la figure a correspond à une zone humide potentielle; par des observations de terrain (bas) la figure b correspond à une zone humide réelle (d'après Gascuel et coll., 1998).

Figure 4



Rôle de la géomorphologie : dénitrification moyenne annuelle simulée pour quatre bassins, exprimé en kg d'azote par hectare de bassin versant et par an (d'après Beaujouan et coll., 2002)

SYNTHÈSE

Connaissance des zones humides :
outils, méthodes et savoir-faire

PATRICK STEYAERT (INRA – SAD. DOMAINE DE ST LAURENT-DE-LA-PRÉE)
steyaert@stlaurent.lusignan.inra.fr

Les préoccupations des gestionnaires face à la complexité du fonctionnement des zones humides

Pour les Agences de l'Eau, les zones humides dont elles doivent coordonner la gestion constituent encore des "boîtes noires" pour lesquelles "un programme volontariste d'interventions financières est affiché depuis 1997" mais qui laisse un sentiment d'inachevé, malgré l'accompagnement de quelques initiatives locales. L'action des Agences pour la conservation et la restauration des zones humides suppose de progresser dans deux domaines auxquels le PNRZH a contribué : celui de la construction d'un cadre commun pour la réalisation d'observatoires des zones humides, et celui de la construction d'un argumentaire social pour justifier les actions menées.

S'agissant du cadre commun, "les Agences seront amenées à établir à plus ou moins long terme une banque de données structurée pour suivre l'évolution de ces zones au niveau des bassins". L'échéance de 2004 imposée par la Directive Cadre Européenne pour le suivi des zones protégées, dans lesquelles figureront plusieurs zones humides remarquables, invite à y réfléchir et à répondre à certaines questions importantes :

- quels sont les indicateurs et les variables-clés d'action à retenir pour construire ces bases de données, et quelle est l'universalité de ces critères permettant de proposer un cadre commun ?
- comment différencier les zones humides entre elles, des plus patrimoniales aux plus banales, des mieux conservées aux plus dégradées, ..., sans entrer dans les excès de descriptions trop précises et de l'exhaustivité de ces caractérisations ? Autrement dit, quels critères choisir, avec quel degré de précision et comment les acquérir, à quelles échelles d'espace-temps ?

S'agissant de la construction d'un argumentaire pour la conservation des zones humides, les Agences de l'Eau "fonctionnent principalement sur la base de concertations des principaux acteurs et des intérêts qu'ils représentent. Or, ce sont surtout les personnes de sensibilité écologique qui se préoccupent de la sauvegarde et de la gestion des zones humides". Comment trouver et construire les arguments qui mettent en valeur les diverses fonctionnalités de ces milieux, pour élargir le cercle des partenaires intéressés et faciliter ainsi la mobilisation des fonds public ? Quelles sont les méthodes qui aident à rassembler, à mieux faire converger les intérêts autour des zones humides ? Mais aussi, étant donné la multitude des acteurs concernés par la gestion de ces milieux, notamment les propriétaires, "comment faire émerger des porteurs de projets ou des maîtres d'ouvrages légitimes pour mener une politique de conservation plus globale et plus offensive ?"

Ce besoin de "convaincre un conseil d'administration de l'intérêt d'agir sur ces milieux" renvoie à des problèmes concrets et se traduit en besoin de références, de connaissances précises pour déterminer notamment le rôle "d'infrastructure naturelle" des zones humides, par exemple dans leur fonction de réduction des pollutions diffuses : "j'aimerais pouvoir dire aux membres de mon conseil d'administration, si vous gérez bien, dans un bassin donné, ces zones humides, elles interceptent tel pourcentage de pollution diffuse, et cela revient moins cher que d'investir dans tel ou tel équipement...".

La compréhension du fonctionnement des zones humides à l'aide à la gestion

Un témoignage concernant le projet tourbière confirme que le PNRZH a pu répondre à certaines de ces préoccupations, en l'occurrence en précisant "quel est le bon état de conservation des tourbières, qui constituent huit habitats différents dans la nomenclature européenne", et en préconisant des solutions pour en améliorer le fonctionnement écologique. De nombreux autres projets apportent des exemples similaires, en particulier lorsque l'attention a été portée sur la manière de construire des partenariats entre chercheurs et gestionnaires (voir à ce sujet les exposés et synthèse de l'atelier "Mise en forme des connaissances scientifiques pour servir une action durable").

Les exposés montrent cependant la difficulté que les chercheurs éprouvent :

- à se dégager d'une démarche très analytique justifiée par le caractère disciplinaire de leurs recherches, qui réduit la complexité des zones humides aux quelques fonctions ou aux quelques processus fondamentaux analysés ;
- et à proposer des règles applicables à l'ensemble de la zone d'étude ou généralisables à d'autres zones que celles qu'ils étudient.

Que ce soit dans l'analyse des processus ou dans leur représentation à l'aide d'outils tels que les Systèmes d'Information Géographique, les recherches portent essentiellement sur les fonctions écologiques sensu lato (hydrologique, biologique), intègrent moins souvent des questions d'ordre économique ou sociologique, et donnent à voir une partie seulement du rôle des zones humides en tant qu'infrastructure naturelle ("sur l'ensemble des projets, il y a toujours une fonction qui est dominante. C'est davantage le fonctionnement physique qui a été abordé, ce qui pose des questions de représentation spatiale comme de diagnostic"). En privilégiant des actions de sauvegarde au regard d'une fonction bien connue, le risque existe de créer des conditions irréversibles pour la réalisation d'une autre ("on s'est aperçu, dans le projet prospective, que si on optimise une fonction, on peut créer des irréversibilités par rapport à d'autres").

Comment alors d'une part généraliser les connaissances issues de ces recherches analytiques réalisées sur des zones humides présentant chacune des particularités et d'autre part, éviter de privilégier dans l'action une ou quelques fonctions au détriment d'autres ?

L'analyse du fonctionnement hydrologique des zones humides

Le travail réalisé dans l'atelier d'animation transversal hydrologie apporte quelques éléments de réponse à la première question. La plupart des projets ont assez logiquement engagé des travaux pour préciser le fonctionnement hydrologique des sites, que ce soit par des approches descriptives centrées sur la caractérisation de l'hydropériode (Giraud, 2002), ou par des travaux plus analytiques visant à quantifier certains phénomènes (échanges hydrauliques superficiels ou profonds). A partir des recherches menées sur les différents sites du PNRZH, un modèle conceptuel du fonctionnement hydrologique de ces zones humides a été réalisé pour :

- préciser les relations hydrauliques existant entre les différents compartiments qui les composent ;

- déterminer les termes du bilan hydrologique qu'il convenait de prendre en compte dans les dispositifs de mesure et dans les modèles ;
- et fixer les variables physiques et de gestion qui interviennent sur les processus hydrologiques.

Bien que chaque zone ait un fonctionnement hydrologique particulier, un cadre commun d'analyse a pu être élaboré et constitue en soi un outil pour les gestionnaires, dans la mesure où il leur permet de construire une représentation en trois dimensions de ce fonctionnement, de comprendre quelle est la part des actions humaines (aménagement, gestion) dans ce fonctionnement ou encore de définir un protocole de mesure de paramètres hydrologiques pour suivre les évolutions des systèmes sur le long terme (définition des paramètres pertinents à mesurer, localisation de ces mesures à l'échelle des bassins).

Un exemple particulièrement riche nous est fourni par les travaux menés en Guyane (Guiral et coll., 2002), où la zone centrale du marais de Kaw constitue la majeure partie de la zone humide et joue un rôle clé dans son fonctionnement hydrologique. Les chercheurs ont réalisé une étude intégrée, sur le plan hydrologique, d'un continuum écologique constitué d'amont en aval par les rivières, les savanes inondables, les forêts marécageuses et les mangroves en zone estuarienne. Les phénomènes complexes et en constante interaction de précipitations, d'écoulement, de sédimentation, de migration de bancs de vase, de submersion par les eaux salées, etc., ont fait l'objet d'un important travail d'acquisition de données par diverses méthodes hydrologiques et de télédétection. Ces données servent à la fois à construire le modèle de fonctionnement hydrologique de la zone mais aussi à en quantifier les échanges hydrauliques principaux.

Les travaux en hydrologie sont ainsi une base de connaissance essentielle du fonctionnement des zones humides. Cependant, les projets qui ont tenté d'établir les relations entre ces connaissances et les principales fonctions écologiques sont moins fréquents. C'est principalement la relation entre les échanges hydrauliques et la fonction épuratrice des zones humides qui a fait l'objet de recherches approfondies. Un exemple original de modèle conceptuel nous est fourni par les travaux menés sur les fonctions hydrologiques des petites zones humides riveraines (Merot et coll., 2002). Ici, le modèle construit a posteriori résulte d'un important travail d'observation et de mesures sur le terrain. Il propose une typologie des zones humides selon leur capacité à répondre à une fonction, en l'occurrence les capacités épuratrices, notamment vis-à-vis de la transformation de l'azote. Ainsi, trois types de zones humides sont distingués :

- potentielle, définie par des critères topographiques et pédo-climatiques. C'est la limite spatiale et temporelle extérieure théorique de la zone humide ;
- effective, évaluée par la réalité des conditions hydriques. Ses limites varient spatialement en fonction de l'évolution des états de saturation des sols ;
- efficace, évaluée par son rôle sur le processus étudié.

Cette typologie présente une grande valeur heuristique, qui n'a pas échappé aux participants au colloque : "La proposition méthodologique du projet TY-FON ne pourrait-elle pas être étendue à toutes les zones humides ? Elle présente l'avantage de partir sur la délimitation du territoire et sur l'identification des usages et des fonctionnalités et évite d'entrer dans des analyses monodisciplinaires" ; "Une des ambitions dans le bassin RMC est de définir les espaces de fonctionnalité, mais c'est très délicat à établir, nous n'avons pas le droit de nous tromper car ces espaces deviendront espaces de précaution et nous n'avons pas de méthode". Dans tous les cas, ces notions semblent pouvoir être utilisées soit par des chercheurs ou des gestionnaires, pour qualifier les zones humides et s'engager dans un débat interdisciplinaire, que ce soit pour préciser les phénomènes à étudier et les échelles d'observation à privilégier ou

que ce soit pour déterminer les enjeux de conservation ou de restauration ainsi que leur localisation (voir à ce sujet la synthèse de l'atelier "Des fonctionnalités des zones humides à la légitimité de la conservation").

Si les notions de zones humides potentielles et effectives peuvent relever de dispositifs de mesures a priori simples à mettre en œuvre, il n'en est pas de même pour celle de zone humide efficace. Par exemple, concernant le processus de dénitrification étudié dans le projet TY-FON, des essais de restauration d'une zone humide potentielle en zone humide efficace ont été réalisés et ont montré que "la zone humide est définie comme une zone saturée en eau pendant un certain temps alors que ce qui provoque l'évolution des sols, de la géochimie de l'eau ou de la flore, c'est la circulation de l'eau. Il faut que l'eau circule dans les sols pour que l'efficacité épuratrice soit maximale...". Il peut donc y avoir antagonisme entre les différentes fonctions assignées aux zones humides, ce qui rend la délimitation des zones efficaces délicates à établir. Cette notion pose dès lors la question de l'échelle spatiale à considérer qui conditionne "la coexistence de différentes fonctions qui existaient à l'origine sur des espaces beaucoup plus vastes. Plus on élargit l'échelle à laquelle on espère restaurer, plus on peut espérer cumuler les différentes fonctions. On ne peut pas faire coexister plusieurs fonctions sur des petits mouchoirs...".

On voit ainsi que, même si les connaissances scientifiques doivent permettre de déterminer l'efficacité des zones humides pour différentes fonctions, on ne peut se passer d'un débat social qui hiérarchise les priorités d'action (enjeux, objectifs et moyens d'action ou encore échelles de mise en œuvre) en s'appuyant notamment sur ces connaissances. Et on voit aussi que ce débat ne peut s'affranchir d'une réflexion plus approfondie sur la place de la zone humide dans des ensembles géographiques plus vastes. Pour poursuivre sur l'exemple de la dénitrification, "la concentration en nitrate des nappes phréatiques se situe en Bretagne entre 100 et 250 mg/l, alors que celle des rivières est de l'ordre de 42 mg/l. Il y a donc bien un effet tampon des zones humides mais aussi d'autres éléments structuraux du paysage. Le paradoxe, c'est que si on observe bien cet effet à l'échelle des paysages, il est très difficile de caractériser les flux à des échelles plus locales. Autrement dit, les zones humides ont certainement un rôle à conserver ou à restaurer sur le long terme, mais si vous voulez que les eaux soient moins polluées, il faut diminuer la source de pollution d'abord. Je connais des agriculteurs en Bretagne qui voudraient que les zones humides fonctionnent comme des trous à nitrates...".

Les outils de représentation spatiale et d'analyse des zones humides

Pour développer des analyses plus intégrées du fonctionnement des zones humides, de nombreux projets ont fait appel aux outils de l'information géographique, que ce soit dans la perspective de faire discuter ensemble des chercheurs de différentes disciplines, ou dans celle de produire un outil d'aide à la gestion des zones humides.

La plupart des gestionnaires utilisent de plus en plus souvent ce genre d'outils dans une perspective cartographique, que ce soit pour représenter les limites géographiques des zones d'intervention, ou pour représenter des données brutes issues d'inventaires ou de travaux de caractérisation des zones humides. En particulier, il est de plus en plus souvent fait appel aux images issues de la télédétection ou de photos aériennes, qui permettent de produire des informations à grande échelle et pour divers pas de temps. Cependant, "il faut veiller aux méthodes adoptées pour réaliser les pré-traitements afin de pouvoir comparer les images entre elles et aussi veiller à la reproductibilité de ces méthodes, ou du moins des résultats, car on peut faire dire n'importe quoi à une image à partir du moment où on la traite avec des outils sophistiqués". Cela invite les producteurs de cartes à considérer la puissance de ces représentations dans les débats sur la conservation

des zones humides et à être vigilants sur les conditions de leur production mais aussi sur les informations mobilisées : que représentent-elles, au service de quels objectifs et définis par qui ? Par exemple, il est beaucoup plus simple a priori (pour des raisons d'acquisition mais aussi de représentation cartographique) de donner à voir des données physiques sur les systèmes étudiés plutôt que des données socio-économiques. Ce déséquilibre d'information peut interagir fortement avec les points de vue exprimés lors de concertations sur les enjeux de gestion.

Le développement de ces outils cartographiques et de gestion de l'information pose de nombreuses questions de méthode sur la représentation spatiale et temporelle des données, la conception des outils de gestion de l'information et la diffusion des informations.

Les chercheurs comme les gestionnaires mobilisent une grande quantité d'informations très diverses dont ils souhaitent produire une représentation spatiale. Si chacun d'eux construit son propre système cartographique, sans veiller aux possibilités d'échange d'informations avec d'autres, ces bases de données resteront confidentielles et peu utilisables. L'une des conditions de cet échange est la construction d'un référentiel géographique commun, dont la résolution spatiale sera fonction du degré de précision attendu pour la représentation cartographique. De nombreux travaux du PNRZH menés par des spécialistes des SIG consistent à veiller à la bonne concordance géographique des différentes couches d'information. Une autre condition de l'échange réside dans la construction des méta-données, autrement dit, les données sur les données : nature des informations, conditions de collecte, échelles, etc. Des méthodes pour gérer ces méta-données ont été mises au point dans certains projets du PNRZH.

Ce référentiel géographique commun et ces méta-données sont des conditions nécessaires pour concevoir des SIG. Dans de nombreuses situations, la complexité informatique de ces systèmes conduit chercheurs ou gestionnaires à se préoccuper dans un premier temps des modalités techniques de leur construction plutôt que des finalités auxquelles ces systèmes visent à répondre. Il est souvent procédé par accumulation des couches d'informations et par essais de mises en relation de ces informations, plus que par recherche de cohérences et de sens à donner à ces mises en cohérence. Ce qui fait dire à un participant "qu'il manque encore souvent une étape préalable qui est l'étape de la conceptualisation pour la mise en place de ces systèmes. Pourquoi crée-t-on un SIG ? Il faut s'interroger au préalable sur la part de la réalité qu'on veut modéliser, ce qui va nous permettre de dire pourquoi et comment on va modéliser, donc quelles sont les formes logiques et matérielles sous lesquelles on va représenter la réalité".

De même, la complexité de la mise en oeuvre de ces outils ainsi que leur spécificité pour la représentation de données spatialisées conduit souvent à négliger la dimension temporelle des processus étudiés. "Il faut s'interroger sur les limites de ces outils en tant qu'ils figent une réalité à un instant donné et procurent difficilement une vision dynamique des zones humides". Des développements sont actuellement en cours, par exemple dans le couplage de SIG avec des modèles hydrauliques ou hydro-sédimentaires. Enfin, ces SIG ne sont pas producteurs de données mais accumulent et mettent en cohérence des données existantes. Or, et cela rejoint les aspects déjà évoqués sur les risques liés aux analyses thématiques, le caractère partiel des connaissances intégrées dans les SIG introduit un déséquilibre d'information pour l'utilisation de ces outils dans une perspective de gestion. Pour remédier à cette difficulté, des méthodes nouvelles apparaissent "qui tentent d'intégrer dans les SIG non seulement des mesures issues de l'instrumentation ou de la recherche mais aussi des perceptions ou des représentations de diverses catégories d'acteurs sur les zones humides". La construction de ces SIG comme outil d'aide à la décision devient alors l'enjeu principal et accorde une place plus importante aux produits de l'interaction qui s'opère

entre le concepteur de l'outil et ses utilisateurs (connaissances représentées, échelles d'espace et de temps, mises en relations, etc.). Ici, c'est la valeur heuristique de ces outils qui est privilégiée dans la perspective d'un développement durable et concerté des zones humides.

L'information, et donc les outils qui visent à la représenter, est au coeur d'enjeux de pouvoir qui s'expriment fortement lorsqu'il y a des conflits d'usage des territoires, ce qui fait dire à Bourcier et al., [2002] "que la qualité et la pertinence d'une base de données géographiques dépendent entre autres de la capacité de l'équipe SIG à gérer les cultures de conflits interdisciplinaires, le cloisonnement protectionniste des organismes, les pyramides hiérarchiques et réglementaires,... jusqu'au pouvoir de rétention d'informations...". La disponibilité des informations pour un usage public et le partage des données sont des éléments qu'il convient de ne pas négliger dans la construction d'un SIG. Par exemple, concernant l'observatoire de l'estuaire de la Seine, une participante demande "si le SIG est uniquement dans le labo, ou s'il est utilisé par d'autres, voire disponible pour d'autres partenaires sur d'autres sites...". La réponse à cette préoccupation ne va pas de soi et démontre l'imbroglio juridico-administratif dans lequel oeuvrent les concepteurs de SIG. "Pour certaines données comme celles de l'IGN, nous les avons acquises à moindre coût à condition de ne pas les diffuser. Pour d'autres, comme celles issues de la quasi-totalité des services déconcentrés de l'Etat, nous avons signé des conventions qui peuvent être négociées avec d'autres utilisateurs potentiels. Enfin, lorsqu'il s'agit de données produites par les chercheurs, celles-ci sont généralement communicables sans démarche particulière, sauf si les contrats qui ont permis de financer leur acquisition l'interdisent formellement". Autrement dit, un SIG mobilisant des données issues de différentes sources est rarement diffusable dans son intégralité aux gestionnaires sans accords complémentaires avec les différents fournisseurs de données. Ceci ne doit pas occulter le fait qu'un SIG comporte aussi une méthodologie de mise en cohérence de données, et que c'est surtout cet aspect qui peut présenter un intérêt pour les gestionnaires travaillant sur d'autres zones humides. Le programme de valorisation du PNRZH prévoit notamment la diffusion d'un cahier thématiques sur ce volet de la recherche.

Les méthodes appliquées aux enjeux de conservation de la nature en zones humides

La plupart des projets du PNRZH ont comporté des travaux sur l'étude de l'évolution de composantes de la biodiversité, que ce soit la végétation ou la faune. Dans de nombreuses zones humides, ces composantes font déjà l'objet d'inventaires diachroniques, se basant sur des observations menées par des associations de protection de la nature ou par des naturalistes, souvent bénévoles. Les méthodes pour réaliser ces inventaires sont généralement connues (relevés phytosociologiques, points d'écoute, itinéraires échantillons,...) et permettent de suivre les évolutions de ces composantes sur le long terme. Elles font nécessairement partie des missions dévolues aux observatoires des zones humides, intégrables dans un cadre commun de suivi de ces milieux, et sont aussi promises à un bel avenir du fait des divers zonages écologiques qui se mettent en place dans le cadre des politiques publiques. Cependant, ces méthodes sont confrontées à la complexité et à la diversité du vivant le long d'un continuum milieu aquatique-milieu terrestre et, dans la plupart des cas, les composantes biologiques suivies sont celles qui sont les plus facilement observables et pour lesquelles des compétences existent. Une représentante de la pêche professionnelle note par exemple : "je n'ai entendu le mot poisson dans aucun des exposés, alors que les zones humides, surtout estuariennes, sont essentielles comme zones de transit pour nos géniteurs et d'alimentation pour nos juvéniles...". Le choix des composantes biologiques suivies n'est donc pas neutre dans un débat qui porte sur la conservation ou la restauration des zones humides car les actions qui seront mises en oeuvre auront souvent tendance à privilégier les composantes qui seront les mieux connues.

Pour éviter cet écueil, certains travaux font référence à la notion de "typologie fonctionnelle" ou à celle d'espèces "bio-indicatrices". Il peut s'agir de dépasser la simple description de la biodiversité pour créer des ensembles écologiques homogènes (unités paysagères, communautés végétales) ou identifier des espèces représentatives dont l'inventaire peut être facilité. Par exemple, les espèces végétales s'organisent dans l'espace en réponse à des facteurs de milieu (salinité, hydro-morphie,...) et à des facteurs de gestion et il est plus simple d'inventorier géographiquement ces communautés plutôt que toutes les espèces présentes. Il peut aussi s'agir de préciser les caractéristiques essentielles des zones humides qui leur permettent de remplir un certain nombre de fonctions, comme celle d'habitat écologique ou d'apports en ressources trophiques. Ces analyses, bien que prometteuses, sont confrontées à un certain nombre de difficultés qui rejoignent celles déjà évoquées concernant la définition de zones humides efficaces et qui expliquent pourquoi il est délicat, à l'heure actuelle, d'en dégager des pistes pour la gestion. Ces deux notions supposent en effet de disposer d'une bonne connaissance des processus régissant le fonctionnement écologique des zones humides. Ceux-ci ne sont jamais stabilisés et doivent être appréhendés à différentes échelles d'espace (de la station au paysage, de la micro-région à l'aire de répartition des populations,...) et de temps (du temps court de la saison ou d'une phase du cycle de vie au temps long de plusieurs années, voire de plusieurs décennies). Ces difficultés d'ordre méthodologique ne peuvent cependant pas servir de justification pour l'inaction, mais doivent inciter les acteurs de terrain à prendre du recul par rapport aux actions qu'ils mettent en oeuvre : ainsi par exemple, privilégier la conservation d'une espèce ou de certaines catégories d'espèces peut entraîner des évolutions de milieux défavorables à d'autres.

Cette remarque prend encore plus d'importance lorsque sont mis en jeu les intérêts économiques des principaux usagers des zones humides. Sur l'exemple des poissons relaté ci-dessus, la même intervenante signale "qu'en vingt ans, en Camargue, la production d'anguille est passée de 1500 tonnes par an à 30 tonnes, les civelles ne peuvent plus remonter par les pelles qui sont fermées parce que le maïs ne supporte pas l'eau salée...". Surpêche de l'anguille au stade juvénile, dégradation de la qualité du milieu aquatique, rupture des connexions hydrauliques, ..., il s'agit d'une question complexe qui mêle processus naturels et anthropiques, enjeux de conservation des zones humides et enjeux socio-économiques. La relation entre ces deux catégories de processus n'a que peu été explorée par les travaux de recherche du PNRZH. Des essais de mise en relation existent, par croisement d'informations écologiques avec des données portant sur les modalités de gestion des eaux superficielles ou sur les pratiques agricoles, que ce soit avec ou sans l'aide de SIG. Mais "il existe des différences de temporalité et de spatialité entre les deux types de processus, et il aurait été intéressant de voir comment les découpages spatio-temporels proposés dans l'analyse des activités agricoles permettent d'établir des relations entre ces deux catégories de fonctionnement très différents". Les interprétations restent délicates à réaliser et les outils sont d'un développement récent (voir notamment les méthodes d'analyses en écologie du paysage). Par contre, "les outils et méthodes pour analyser les activités agricoles existent", que ce soit pour acquérir à grande échelle des informations sur l'occupation des sols (outils de télédétection), ou pour analyser comment les différentes catégories d'activités sont organisées sur les territoires ruraux et au cours des saisons (typologie de fonctionnement des exploitations agricoles, analyse des systèmes de culture et des systèmes fourragers). Il s'agit, plus que de produire une simple description des éléments des systèmes, de comprendre l'enchaînement spatial et temporel de ces éléments pour analyser comment ils interagissent avec des processus écologiques.

Conclusion

Le PNRZH a impliqué un nombre considérable de chercheurs sur une grande diversité de zones humides en France. Dans de nombreux projets, des partenariats ont été construits avec les gestionnaires, que ce soit pour participer en amont à l'élaboration des programmes de recherche ou pour, en aval, traduire en termes opérationnels les résultats et acquis de ces travaux. Généralement, ces partenariats permettent de répondre localement aux questions souvent évoquées par les gestionnaires, qu'exprime une participante au colloque : "Je suis toujours préoccupée par le lien recherche-gestion. Est-ce que vos recherches ont des incidences dans les objectifs du plan de gestion de ces sites, dans quelles conditions et comment ?". Ils permettent aussi aux chercheurs de remplir pleinement leur fonction "d'alerte" sur des problèmes potentiels ou avérés, nouveaux car résultant directement des progrès récents au niveau conceptuel et méthodologique.

Que ce soit pour le partage d'informations, la mise à disposition de connaissances ou de méthodes pour savoir comment faire, voire la fourniture d'arguments pour apporter une justification aux actions de conservation, la recherche est souvent sollicitée là où elle est menée. Si les réponses apportées peuvent se construire à l'échelle des sites de travail dans l'interaction chercheur-gestionnaire, leur généralisation à l'ensemble des zones humides ne va pas de soi. Les ateliers transversaux du PNRZH, lorsqu'ils ont pu être menés à bien, ont fait la preuve de leur efficacité pour réaliser cette généralisation : construction de cadres conceptuels communs, synthèses des méthodes utilisées par les chercheurs, repérage des difficultés à surmonter, mise en commun d'expériences de travail, etc. Le colloque final du PNRZH a aussi constitué un moment privilégié de communication aux gestionnaires des résultats des travaux, qui devrait trouver son prolongement dans les différentes publications scientifiques ou techniques qui en résulteront.

La synthèse des exposés et interventions de l'atelier montre d'une part l'accuité des attentes des gestionnaires en termes de méthodes et d'outils pour mieux inventorier et comprendre le fonctionnement des zones humides et d'autre part les difficultés pour construire des démarches et des connaissances permettant de prendre en compte dans les actions de gestion l'ensemble des fonctions des zones humides. La contribution de la recherche à la conservation et à la gestion des zones humides est aussi un processus dynamique dont il convient d'analyser les apports sur le moyen terme ! Cela invite cependant à ne pas attendre de la recherche qu'elle propose des outils clé en main pour agir, mais plutôt à construire des dispositifs de partenariats entre chercheurs et gestionnaires. A ce titre, les pôles relais du plan national d'action en faveur des Zones Humides, du fait de leur mission de médiation et d'appui aux gestionnaires à l'échelle de plusieurs régions, peuvent constituer des lieux privilégiés d'échange et de communication des connaissances.

Bibliographie

Les citations sont limitées à quelques communications de l'atelier "Connaissance des zones humides : outils, méthodes et savoir-faire"
Bourcier A., Alard D., Bourcier J.-C. et Poudevigne I. Apport des technologies d'information géographique au management des zones humides. Application à l'estuaire de la Seine. Comm. Coll. PNRZH, Toulouse, 22-24 oct. 2001
Giraud E. Emergence d'un cadre méthodologique pour l'étude hydrologique des zones humides : quelles méthodes pour quels objectifs ? Comm. Coll. PNRZH, Toulouse, 22-24 oct. 2001
Guiral D. Options scientifiques adoptées et premiers résultats de l'étude d'un vaste et inaccessible marais littoral en zone tropicale : le marais de Kaw en Guyane française. Comm. Coll. PNRZH, Toulouse, 22-24 oct. 2001
Mérot Ph., Durand P., Gascuel-Odoux C., Jaffrezic A., Kao C. et Pinay G. Construire une typologie des petites zones humides riveraines intégrant l'hydrologie et la géochimie : les acquis du programme Ty-Fon. Comm. Coll. PNRZH, Toulouse, 22-24 oct. 2001