

Une typologie hydrologique des petites zones humides ripariennes

P. Durand⁽¹⁾, C. Gascuel-Oudou⁽¹⁾, C. Kao⁽²⁾ et P. Merot⁽¹⁾

(1) INRA, UMR Sol et Agronomie de Rennes et Quimper, 65 Route de Saint-Brieuc, 35042 Rennes CEDEX.

(2) CEMAGREF, Unité de Recherche DEAN « Ouvrages pour le Drainage et l'Étanchéité », Parc de Tourvoie, BP 44, 92163 Antony CEDEX

RÉSUMÉ

En conditions climatiques tempérées, dans des contextes géomorphologiques avec substrat à faible profondeur et faible perméabilité, à pentes modérées, la nappe est généralement proche de la surface du sol en bas de versant. Ces conditions conduisent de façon saisonnière à la présence de petites zones humides ripariennes de quelques hectares au plus. Ces zones sont insérées et dispersées au sein de paysages agricoles. Elles sont souvent oubliées des inventaires des zones humides bien qu'elles jouent un rôle important dans le contrôle de l'hydrologie et de la qualité des eaux des bassins versants. Une typologie hydrologique de ces petites zones humides est proposée ici pour accompagner la réflexion sur leur gestion raisonnée, confrontée à des objectifs parfois antagonistes de maintien de biodiversité et de lutte contre la pollution.

Cette typologie met en avant les notions de zone humide potentielle, effective et efficace. La zone humide potentielle est définie par des critères topographiques et pédo-climatiques utilisant notamment des indices topographiques. Ces indices sont facilement dérivés des bases de données topographiques et pédo-climatiques. La zone humide effective est définie par l'évaluation réelle des conditions hydriques, basées sur des observations, soit d'une humidité saisonnière moyenne, soit d'une analyse fréquentielle de la saturation des sols, soit idéalement d'une analyse des variations spatio-temporelles de la saturation des sols. L'efficacité hydrologique des zones humides peut être définie selon l'importance des fonctions de stockage de l'eau qu'elles exercent, en distinguant le stockage latéral et longitudinal. Les zones humides ont également une fonction de transfert qui fait intervenir la connectivité et les interactions entre le versant et la rivière. L'importance de ces différentes fonctions ne peut souvent être définie que par des mesures détaillées, relayées par des approches de modélisation. Quelques résultats obtenus sur de petits bassins versants ruraux sont présentés. Ils permettent de donner des ordres de grandeurs des flux. En dernière approche, un croisement entre cette typologie hydrologique et les fonctions épuratrices des zones humides souvent mises en avant est proposée.

Mots clés

Hydromorphie – Aménagement – inondation – pollution diffuse.

SUMMARY

A HYDROLOGICAL TYPOLOGY OF SMALL RIPARIAN WETLANDS

In a physiographic context dominated by humid temperate conditions, gentle slopes and low permeability bedrock, the groundwater table is generally close to the soil surface in the bottom lands of the headwater catchments. This generates narrow riparian wetlands of few hectares at most. They are inserted and scattered in the agricultural landscape. They are often overlooked in wetland inventories although they affect strongly the whole catchment hydrology and water quality. A hydrological typology of these small riparian wetlands is proposed to help to design their management, which has to deal with somewhat antagonistic objectives of conservation and pollution control.

The hydrological typology proposed here points out the interest to distinguish potential, effective and efficient riparian wetlands (Table 2). Potential wetlands can be defined using topographic and pedo-climatic criteria such as a topographic index. These criteria are easily derived from DEM and soil data base. Effective riparian wetlands are defined according to actual moisture conditions and based on observed space and time variations of the waterlogging, and ideally on a frequency analysis of waterlogging. The efficiency of these wetlands in terms of flood control is assessed by three major terms: lateral and longitudinal storage capacity, and flow processes, i.e., the connectivity and interaction with the hillslope and with the stream, that vary in space and time (Table 1). This can only be achieved by detailed measurements and modelling in experimental catchments. Finally this typology correspond in a more and more precise degree of accuracy for delimiting the riparian wetlands and quantifying the hydrological processes (Table 2). Some results obtained on small rural French Brittany catchments where storage capacity and hydrological processes are quantified and linked to criteria included in the typology are presented (Table 3). Finally, the hydrological typology is crossed with other functional aspects such as biodiversity and biogeochemical reactivity (Table 4).

Key-words

Waterlogging – flood control – Water Management – non point source pollution

RESUMEN

UNA TIPOLOGÍA DE LAS PEQUEÑAS ZONAS HÚMEDAS DE LAS ORILLAS DE LOS ARROYOS

En condiciones climáticas templadas, en contextos geomorfológicos con substratos a profundidad reducida y débil permeabilidad, con pendientes moderadas, el manto freático es generalmente cerca de la superficie del suelo en la zona baja de la vertiente. Estas condiciones son al origen temporal de pequeñas zonas húmedas de algunos hectáreas como máximo. Estas zonas están integradas y dispersadas en los paisajes agrícolas. Están a menudo olvidadas de los inventarios de las zonas húmedas aunque juegan un papel importante en el control de la hidrología y de la calidad de las aguas de las cuencas vertientes. Se propone aquí una tipología hidrológica de estas zonas húmedas para ayudar la reflexión sobre la gestión razonada, confrontada a objetivos a veces antagonistas de conservación de la biodiversidad y de lucha contra la contaminación.

Este tipología propone las nociones de zona húmeda potencial, efectiva y eficaz. La zona húmeda potencial se define por criterios topográficos y pedoclimáticos usando particularmente índices topográficos. Estos índices son fácilmente derivados de los bases de datos topográficas y pedo-climáticas. La zona húmeda efectiva se define por la evaluación real de las condiciones hídricas, basadas sobre observaciones, sea de una humedad estacional media, sea de un análisis frecuencial de la saturación de los suelos, sea idealmente de un análisis de las variaciones espacio-temporales de la saturación de los suelos. La eficiencia hidrológica de las zonas húmedas puede ser definida según la importancia de las funciones de retención del agua que ejercitan, distinguiendo retención lateral y longitudinal. Las zonas húmedas tienen igualmente una función de transferencia que hace intervenir la conectividad y las interacciones entre la vertiente y el río. La importancia de estas diferentes funciones a menudo son definidas solamente por medidas detalladas, relevadas por enfoques de modelización. Algunos resultados obtenidos sobre pequeñas cuencas vertientes son presentados. Permiten dar valores aproximados de los flujos. Un último enfoque propone un cruzamiento entre esta tipología hidrológica y las funciones depurativas de las zonas húmedas a menudo evocadas.

Palabras claves

Hidromorfía, manejo, inundación contaminación difusa.

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 al.*, 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 (Fustec et Lefeuvre, 2000). D'une part, 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 al.*, 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 N_2O et dans une moindre mesure de méthane, ce qui tendrait 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 et apparaissent comme de petits domaines, de quelques ares à quelques hectares, plus ou moins connectés entre eux et à la rivière. En hydrologie, la notion de zone humide de fond de vallée recoupe le concept de zone contributive ou de zone de source à surface variable qui a dominé l'hydrologie des régions tempérées sur socle depuis une vingtaine d'années (Hewlett et Troendle, 1975; Kirkby, 1976; Beven et Kirkby, 1979; Dunne, 1983; Beven, 1986; Merot, 1988). Selon ce concept, on considère en première approche, que les variations temporelles de l'extension de ces zones humides permettent de rendre compte de la genèse de l'ensemble des écoulements de crue dans le bassin versant : processus de ruissellement, processus de mise en charge et de décharge de la nappe par écoulement de nappe et exfiltration. On met ainsi en avant la relation forte entre la dynamique de la zone humide et l'hydrologie du bassin versant dans son ensemble.

Les objectifs de cet article sont : (i) de préciser le rôle hydrologique des zones humides et d'en proposer une typologie, en illustrant à partir d'études expérimentales menées sur deux

petits bassins versants ; (ii) d'examiner les moyens de mise en œuvre de cette typologie et son intérêt pour une autre fonction telle que le pouvoir épurateur.

PROCESSUS HYDROLOGIQUES DANS LES PETITES ZONES HUMIDES RIPARIENNES

Les zones humides de fond de vallée sont caractérisées par la présence d'une nappe à faible profondeur (0-30 cm), peu fluctuante, observée de façon saisonnière, approximativement de décembre à mars pour une année climatique moyenne. Le reste de l'année, le niveau de cette nappe est variable selon les contextes, tantôt restant proche de la surface, tantôt descendant à quelques mètres de profondeur. Ces zones sont en interaction avec l'ensemble du bassin versant. Cette interaction s'exerce à deux niveaux.

Une interaction avec le versant. Du fait d'une faible capacité de stockage et de transfert de ces petites zones humides, leur saturation saisonnière est due aux flux provenant de l'ensemble du versant. Ces flux peuvent être superficiels (pluie, ruissellement) ou souterrains (sol, nappe). Cette saturation implique la présence d'un niveau de faible perméabilité, à faible profondeur, continu sur l'ensemble du bassin versant, de nature pédologique ou géologique, limitant de fait les stockages et les transferts d'eau vers les aquifères profonds.

Une interaction avec le réseau hydrographique. Le réseau hydrographique a une influence sur la zone humide : par inondation lors de crues occasionnelles ; en fixant le niveau bas de la nappe à proximité du cours d'eau en étiage. En deçà, approximativement des ordres 2 à 3, l'interaction entre la zone humide et le versant reste cependant dominante. Au delà de l'ordre 3, la configuration même de la rivière, son éventuel aménagement, vont réguler plus directement le fonctionnement des zones humides riveraines, la configuration du bassin versant passant au second plan.

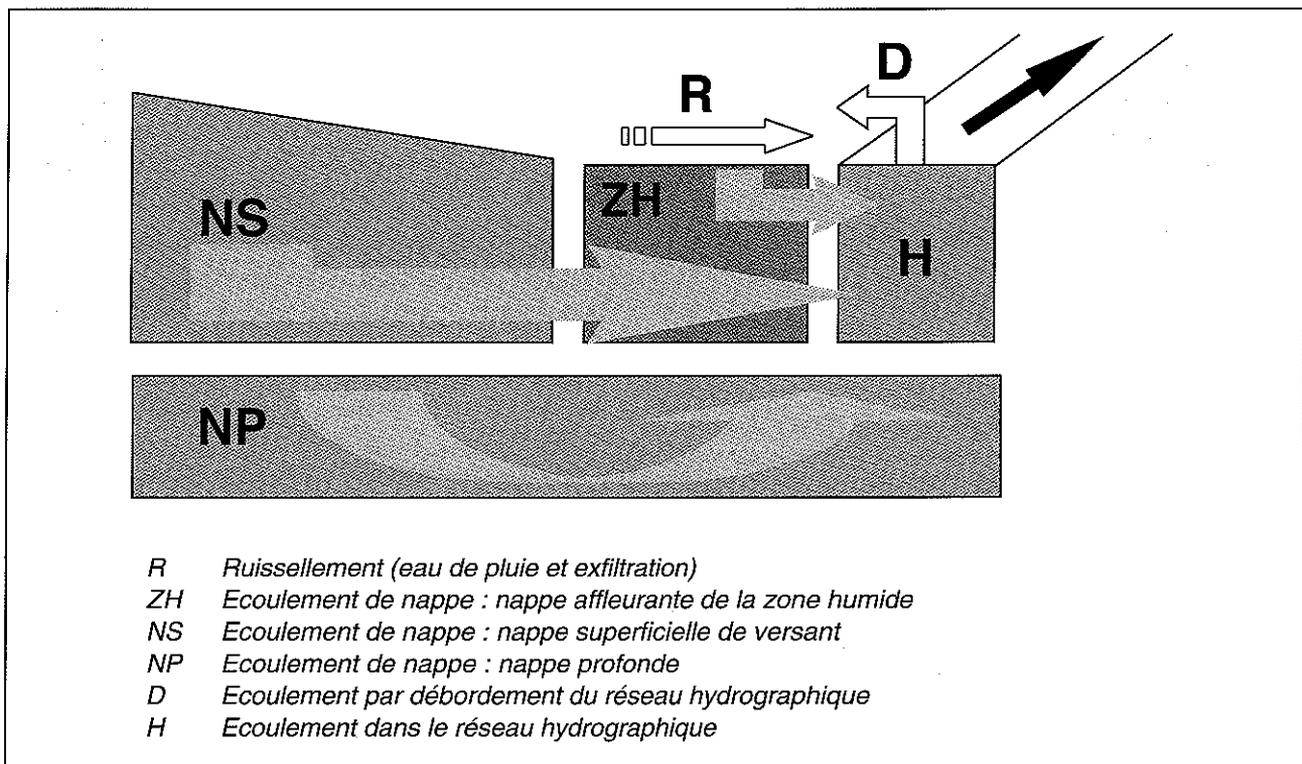
Ces interactions conduisent à identifier trois fonctions hydrologiques majeures des zones humides de fond de vallée (tableau 1).

Une fonction de transfert. La zone humide est une zone de transfert pour différents types d'écoulement (figure 1). Cette fonction de transfert se décline selon cinq composantes :

- 1) le ruissellement, comprenant le ruissellement sensu stricto (R) et l'exfiltration, écoulements rapides intervenant à l'échelle de la crue ;
- 2) l'infiltration et l'écoulement superficiel dans la zone humide (ZH) intervenant également à l'échelle de la crue ;

Tableau 1 - Les fonctions hydrologiques des zones humides ripariennes.**Table 1** - Hydrological functions of small riparian wetlands

| Echelle de temps | Fonction hydrologique | Déterminants | Ordre de Strahler du bassin versant |
|---------------------------|---|--|-------------------------------------|
| Dynamique Événementielle | Fonction de Transfert (FT) | - Importance relative des différents écoulements 1. Ruissellement 2. Nappe zone humide 3. Nappe versant 4. Nappe profonde 5. Réseau hydrographique - Continuité hydraulique Versant / Zone humide / Rivière | Ordre 1 |
| Dynamique Saisonnière | Fonction de Stockage Transversal (FST) | - Taille relative versant / zone humide - Continuité hydraulique versant / zone humide | Ordre 2 à 3 |
| Événements "occasionnels" | Fonction de Stockage Longitudinal (FSL) | - Temps de retour de crues inondantes | |

Figure 1 - Les différents écoulements mis en jeu au sein de la zone humide ou interagissant avec la zone humide.**Figure 1** - The different flowpaths in interaction with riparian wetlands.

3) l'écoulement de la nappe de versant vers son exutoire, souvent stratifié en profondeur (NS + NP), écoulement plus lent, conditionné par la recharge de la nappe dans le versant et le pouvoir drainant du réseau;

4) l'écoulement à surface libre dans le réseau hydrographique (H), écoulement rapide et concentré, très variable selon que l'on se situe dans la crue ou hors crue;

5) l'écoulement de surface en période d'inondation (D), conduisant à une redistribution des eaux en surface sur une période de quelques jours.

Selon la contribution relative des différents écoulements, la zone humide contrôle plus ou moins les flux d'eau et de polluants. En crue, les volumes et les vitesses de transfert dans la zone humide, liés aux caractéristiques physiques des sols (porosité et conductivité hydraulique) sont déterminants. Hors crue, ce sont les temps de résidence de l'eau dans la zone humide, liés majoritairement au temps qui sépare les crues, et donc au régime climatique, qui sont déterminants.

Une fonction de stockage transversal. La zone humide sert de lieu de stockage de l'eau provenant du versant (nappe, ruissellement). Cette fonction dépend de deux facteurs: d'une part, la taille de la zone humide relativement à celle du versant, d'autre part, la continuité spatiale avec les écoulements provenant du versant.

Une fonction de stockage longitudinal. La zone humide peut servir de lieu de stockage de l'eau provenant de la rivière par inondation. Cette fonction est liée à la fréquence des crues inondantes et à la topographie des lits moyens et majeurs.

Ces fonctions de stockage de l'eau provenant du versant ou du cours d'eau ont également un rôle sur la recharge de la nappe du bassin versant.

L'importance relative de ces différentes fonctions varie dans le temps et l'espace (*tableau 1*). La fonction de stockage transversal intervient surtout en début de la période pluvieuse, sur les bassins versants d'ordre 1 à 3. Cette fonction se définit donc à l'échelle annuelle et inter-annuelle. Après le début de la période pluvieuse, la nappe affleure dans la zone humide et fluctue peu. La zone humide joue alors plus un rôle de transfert que de stockage. Au delà de l'ordre 3, la fonction de stockage transversal et de transfert est progressivement remplacée par la fonction de stockage longitudinal, ou plus généralement d'interaction nappe/rievière, qui peut être activée tout au long de la saison hivernale, pour des événements climatiques caractérisés par un certain temps de retour.

TPOLOGIE HYDROLOGIQUE DES ZONES HUMIDES RIPARIENNES

L'objectif de cette typologie est de proposer un classement cohérent et opérationnel des zones humides: cohérent en ce sens qu'il s'agit de structurer les différentes méthodes d'investigation en usage; opérationnel dans la mesure où le choix d'une méthode doit être adapté aux moyens mobilisables, en premier lieu aux contraintes matérielles de coût, de couverture spatiale et temporelle et de techniques disponibles.

Il ressort ainsi du paragraphe précédent que le fonctionnement des zones humides ripariennes ne peut être dissocié de celui du bassin versant dans lequel elles s'inscrivent. La typologie proposée sera donc basée tout d'abord sur l'analyse de la zone humide considérée au sein de son bassin versant (*tableau 2*). Le premier niveau de la typologie définit des zones humides potentielles, représentant en quelque sorte une enveloppe extérieure quant à leur délimitation. 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 du fonctionnement hydrologique du bassin versant, ou plus généralement vis à vis d'une fonction particulière. 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 des différentes fonctions hydrologiques des zones humides telles que décrites précédemment, par le biais d'études détaillées.

Des zones humides potentielles

A défaut d'une mesure réelle de l'extension spatiale et temporelle de la zone humide basée sur des mesures de l'état hydrique des sols en surface, des indices topographiques sont souvent utilisés pour délimiter des zones potentiellement humides. Cependant, ces indices topographiques ne sont satisfaisants que sous réserve d'un fonctionnement naturel répondant aux conditions hydrologiques définies précédemment, à savoir la présence d'un substrat peu perméable à une profondeur faible sur l'ensemble du bassin versant. Ce niveau de profondeur doit avoir une topographie relativement concordante avec la surface du sol pour permettre une délimitation des zones d'alimentation provenant du versant. Selon différentes hypothèses hydrologiques et géométriques simplificatrices, on peut estimer les aires drainées et les flux à partir de la connaissance de la surface topographique. Des indices topographiques basés sur l'aire drainée en un point, assimilée au domaine d'alimentation, et sur la pente, assimilée au gradient hydraulique dans la nappe, sont calculés. Une valeur seuil, indicatrice d'un drainage naturel insuffisant, permet ainsi

Tableau 2 - Typologie hydrologique et guide méthodologique pour la gestion des zones humides ripariennes

Table 2 - A hydrological typology and methodologic guide for management of riparian wetlands

| Typologie | Base de la typologie | Base de la définition | Principaux Paramètres | Degré de difficulté** |
|-------------------------|--|--|--|-----------------------|
| Zone Humide Potentielle | Indicateurs (hypothèses simplificatrices*) | -Indices topographiques Variantes selon la calibration | Modèle Numérique de Terrain (pas 20 m) Carte géologique Carte des hauteurs pluviométriques annuelles | 1 |
| Zone Humide Effective | Appréciation de l'état hydrique de la zone humide | Intégration temporelle inter-annuelle Suivi de la dynamique de d'affleurement de la nappe | Cartographie de l'hydromorphie des sols ou des associations floristiques Télétection, Relevé de terrain Limnimétrie et Modélisation | 2 2 |
| Zone Humide Efficace | Appréciation des Fonctions Hydrologiques de la Zone Humide | Fonction de Stockage Longitudinal | Indicateur d'aménagement : typologie des fossés Indicateur de régime hydrologique : temps de retour des pluies Topographie de la zone humide et modélisation | 1 3 |
| | | Fonction de Stockage Transversal | Indicateur de taille relative de la Zone Humide / Versant Indicateur de continuité spatiale de la Zone Humide / Versant | 1 |
| | | Fonction de Transfert | Estimation des flux : mesure des paramètres physiques, tensiométrie, piézométrie et modélisation | 3 |
| | | | Estimation des flux et des vitesses de transfert : mesures des paramètres physiques, tensiométrie, piézométrie et modélisation | 3 |
| | | Bilan spatialisés : traçage interne à la zone humide, suivi hydrochimique en crue et hors crue | 4 | |

* Hypothèses hydrologiques et géométriques, sur la présence d'un imperméable, sur les relations entre surface topographique et position de la nappe.

** 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).

de délimiter les zones potentiellement humides. Différentes variantes dans le calcul de l'indice ont été utilisées (Band, 1986 ; O'Loughlin, 1986 ; Crave et Gascuel-Oudou, 1996). Dans le Massif Armoricain, l'indice utilisé intègre :

1) une aire drainée calculée selon un mode de répartition multidirectionnelle des flux ;

2) une valeur de pente correspondant non pas à la pente locale, mais au gradient entre le point considéré et le point du réseau hydrographique qui lui correspond sur l'arbre de drainage (Gascuel-Oudou *et al.*, 1998) ;

3) une calibration par la pluviométrie annuelle et la géologie en relation avec les caractéristiques des matériaux et les dynamiques tectoniques qui jouent un rôle sur les valeurs seuils (Chaplot, 1998).

Grâce à la généralisation des modèles numériques de terrain, l'utilisation de ces indices permet une cartographie rapide et peu coûteuse des secteurs en situation d'être potentiellement des zones humides. Toutefois, la présence de disconti-

nuités locales des matériaux (fracturation, variations du faciès des altérites...) et l'existence d'aménagements hydrauliques (drainage agricole, rectifications de cours d'eau...), modifient la saturation effective du sol et induisent des différences entre l'extension des zones humides prédites par ces indices et celles réellement constatées sur le terrain.

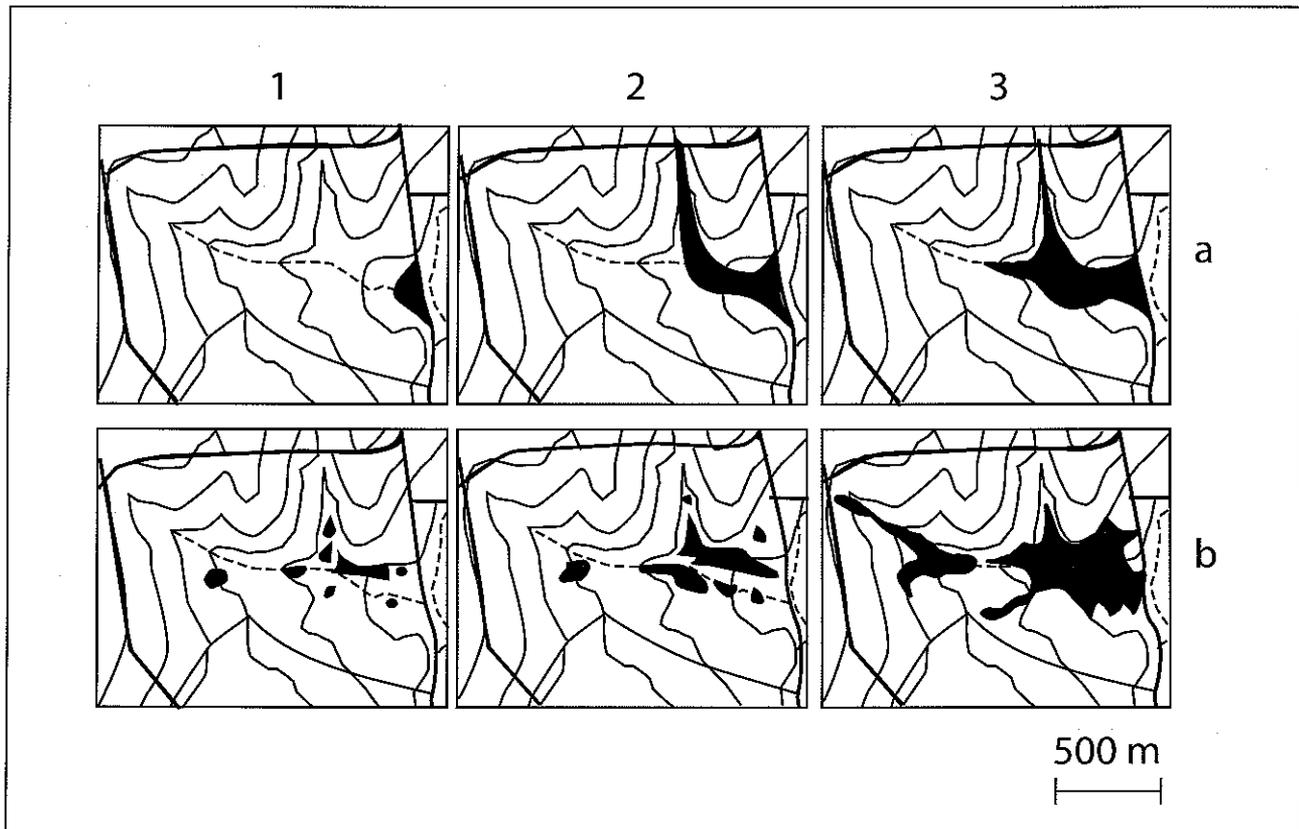
Des zones humides effectives

La mesure de la saturation des sols permet de délimiter des zones humides effectives, zones pour lesquelles la nappe affleure réellement en surface en période hivernale. Des degrés d'investigation très différents sont envisageables, ceux-ci pouvant aller d'indicateurs d'une saturation effective des sols, basés notamment sur l'observation de traits pédologiques ou de la diversité floristique, jusqu'à des observations ou des mesures permettant d'aborder la dynamique spatiale et temporelle de cette saturation.

Les traits pédologiques permettant d'estimer une fréquence de saturation des sols et de fournir une indication de l'exten-

Figure 2 - 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) ; par des observations de terrain (bas)

Figure 2 - Locations of riparian wetlands for three hydric levels of the Kervidy-Naizin catchment (56) : from hydrological modelling (Topmodel, Beven and Kirkby, 1979) (up) ; from field observations (down).



sion spatiale de la zone humide sont les traits d'hydromorphie des sols, caractérisés en général selon une intensité et une profondeur d'apparition. De même, l'analyse de la végétation fournit un diagnostic assez précis de la durée de saturation, pour peu que le couvert végétal soit en place depuis quelques années (Clément et Touffet, 1996; Regimbeau, 1999). Ces approches cartographiques requièrent souvent un levé spécifique du fait de la faible extension spatiale de ces zones humides et de la précision des critères à cartographier.

Le passage à une acquisition de données dynamiques permet une estimation de l'extension spatiale et temporelle de la zone humide. Ceci peut se faire par différentes approches : des relevés de terrain (Gascuel-Oudoux *et al.*, 1983), des images satellitaires (Brun *et al.*, 1990; Merot *et al.*, 1994; Normand *et al.*, 1996), ou des données de débit ou de piézométrie couplées à des approches de modélisation (Gascuel-Oudoux *et al.*, 1996; 1998). Ces approches dynamiques impliquent une instrumentation et une acquisition de données modérée, un suivi

ou une maintenance de l'ordre du jour par mois. En définitive elles permettent une bonne délimitation des zones humides et une estimation de leur rôle dans le bilan hydrologique global du bassin versant.

Des zones humides efficaces

L'efficacité des zones humides ne peut être appréciée que relativement à une fonction spécifique. On traitera ici des différentes fonctions hydrologiques des zones humides précédemment définies, fonction de stockage ou de transfert de l'eau.

La fonction de stockage transversal peut s'exprimer en terme de temps de remplissage de la zone humide, ou encore de cumul pluviométrique nécessaire pour que la nappe affleure en bas de versant. Cette fonction est liée à l'extension de la zone humide, à sa taille relative à celle du bassin versant, et à la profondeur de l'imperméable. Elle est également liée à l'existence de structures déconnectant les apports du versant de la zone humide. Ces structures peuvent

être par exemple un réseau bocager, la haie agissant comme tampon hydrologique en desséchant fortement le sol en été en relation avec l'évapotranspiration des arbres (Caubel-Forget et Grimaldi, 1999), ou un réseau de fossés qui dérivent une partie des écoulements.

La fonction de stockage longitudinal peut être approchée par un bon indicateur du caractère potentiellement inondable de la zone humide. Cet indicateur est basé sur la nature des ouvrages agricoles et des ouvrages de franchissement. En effet, les aménagements hydro-agricoles, les fossés en particulier, sont généralement dimensionnés pour des crues de période de retour annuel de l'ordre du l/s/ha. La présence de ces aménagements permet donc de supposer l'existence de zones potentiellement inondables pour une gamme d'évènements de période de retour supérieure à l'année. Cette fonction peut être évaluée plus précisément par modélisation hydraulique, en analysant la taille de la rivière et des fossés, le régime hydrologique et la géométrie interne de la zone potentiellement inondable (topographie détaillée, rugosité, connexité...).

La fonction de transfert dépend de nombreux facteurs souvent très difficiles à apprécier, portant sur l'importance des flux internes à la zone humide, la continuité hydraulique au sein de la zone humide, puis entre la zone humide et le ruisseau.

- **L'importance des flux internes** à la zone humide peut être évaluée à partir de plusieurs indicateurs : l'importance relative et les caractéristiques physiques des différents horizons du sol jusqu'à l'imperméable, celui-ci étant plus défini comme un domaine facilement saturable du fait d'une faible porosité, que par une faible conductivité hydraulique ; la dimension relative de la zone humide, appréciée par la longueur de son contour amont ou aval, ou de sa surface, rapportée au linéaire de cours d'eau ou au bassin versant ; l'importance de la dynamique spatiale de la zone humide, la possibilité d'extension allongeant les temps de résidence moyens ; l'occurrence des inondations par le cours d'eau. La dynamique des apports du versant et l'hétérogénéité interne de la zone humide (liée par exemple à la microtopographie...) sont très difficiles à aborder par des seuls critères hydrologiques à moins de fournir un réel effort d'instrumentation et de suivi des flux dans la zone humide à l'aide de capteurs, selon une résolution spatiale et temporelle importante, d'ordre décimétrique et horaire.

- **La continuité hydraulique** entre la zone humide et le ruisseau est un critère important. Un indicateur pertinent est la distance à laquelle la surface libre du ruisseau influence sur le niveau de nappe dans la zone humide. Cette distance peut varier de zéro à quelques dizaines de mètres. Celle-ci est cependant assez difficile à évaluer à moins d'une instrumentation importante.

Au delà de ces indicateurs simples, l'efficacité réelle des zones humides peut être quantifiée par l'évaluation des caractéristiques des différents horizons du sol, par des mesures physiques, par l'analyse de la dynamique des nappes par des suivis piézométriques, et par l'estimation des flux traversant ces différents horizons par modélisation hydrologique. Ce degré de connaissance requiert une instrumentation lourde (stations, capteurs), des coûts de maintenance (de l'ordre de la semaine/mois) et d'analyse élevés, des suivis continus automatisés. Des approches par traçage, impliquant des suivis hydrochimiques en crue et entre les crues, peuvent aussi être utilisées. Elles requièrent une instrumentation modérée, par préleveurs automatiques, des coûts d'intervention plus que de maintenance, des suivis intensifs en crue, plus espacés mais réguliers hors crue, des coûts analytiques élevés. En définitive seules ces approches permettent un réel bilan spatialisé, à la fois en termes de cheminement et de vitesse de transfert de l'eau. Ces études ne peuvent être réalisées que sur quelques sites qui servent de référence avec toutes les limites liées à la transposition et la généralisation des résultats d'un site à l'autre.

APPLICATION À DEUX BASSINS VERSANTS

Plusieurs bassins versants bretons sur substrat schisteux, principalement le bassin versant de Kervidy-Naizin (5 km²) dans le Morbihan, (Cheverry, 1998) et le bassin versant du Don (34 km²) en Loire-Atlantique, ont été suivis et instrumentés durant plusieurs années. Sur le bassin versant de Kervidy-Naizin, c'est la connexion des apports du versant et la dynamique interne de la zone humide, faisant essentiellement appel aux fonctions de stockage transversal et de transfert qui ont été étudiées, alors que sur le bassin versant du Cétrais, c'est la connexion à la rivière, faisant appel à la fonction de stockage longitudinal et de transfert qui a été étudiée. L'étude de ces deux bassins versants permet de fournir une évaluation quantitative des flux selon la typologie établie (tableau 3).

Sur le bassin versant de Kervidy-Naizin, le problème de la délimitation de la zone humide a été précisé. Une nette différence entre une délimitation potentielle et effective de la zone humide a été mise en évidence (Gascuel-Oudou *et al.*, 1996). La délimitation sur des critères topographiques ne permet qu'une estimation de la surface de la zone humide mais non sa localisation et sa forme précise (figure 2). La zone humide apparaît comme un patchwork de petits domaines, contrôlés par des hétérogénéités locales, s'interconnectant lorsque la saturation du bassin versant augmente. Cette connexion dépend pour partie des réseaux anthropiques tels que le parcellaire ou le réseau de fossés, et pour partie, d'une topographie locale et d'une organisation pédologique relativement complexe à l'échelle de quelques mètres.

Tableau 3 - Typologie sur les deux sites de bassins versants du Don et de Kervidy-Naizin.

Table 3 - Typology of the two study sites of Don and Kervidy-Naizin catchments.

| Typologie | | Bassin versant de Kervidy-Naizin (56) | Bassin versant du Don (44) |
|-------------------------|---|---|--|
| | | 5 km ² , Ordre 1 - 2 Relation Versant / Zone Humide | 34 km ² , Ordre 3 Relation Zone humide / Réseau hydrographique |
| Zone Humide Potentielle | | Indices topographiques Prédiction des surfaces et non des localisations | |
| Zone Humide Effective | | Etat hydrique du bassin versant Carte des sols, Radar, Relevés de terrain Hétérogénéité forte et dynamique par agrégation | Etat hydrique du bassin versant Carte des sols, Relevés de terrain Piézométrie |
| Zone Humide Efficace | Fonction de Transfert 1. Ruissellement 2. Nappe Zone Humide 3. Nappe versant 4. Nappe profonde 5. Réseau hydrographique | Vitesse de transfert : m/j Temps de résidence : de quelques jours à quelques dizaines de jours Contrôle des flux : gradient (2) si nappe non affleurante gradient (3) si nappe affleurante Bilan de l'eau : En crue : 1 = 10-25 % ; 2 = 10-30 % ; 3 = 40 - 80 % Hors crue : 2+3 = 70 - 90 % ; 4 = 10 - 30 % | Vitesse de transfert : 0,05 à 0,5 m/jour Temps de résidence dans le sol : 1 à 6 mois Débordement : période de retour annuel Temps de résidence des eaux de débordement : 1 à 5 j Stockage longitudinal : en crue débordante, 30 % du volume stocké en lit mineur |
| | Fonction de Stockage Transversal | Extension relative de la Zone humide Variations linéaires si topographie linéaire Limites fixes si discontinuité topographique (concavité) ou anthropique (fossé, haie) | |
| | Fonction de Stockage Longitudinal | | Vitesse de transfert : 0,5 à 1 m/s Temps de résidence : 0,5 à 3 jours |

Le bilan des flux interceptés par la zone humide en crue a été évalué par des méthodes de traçage (Durand et Torres, 1996). La contribution des flux transitant par les sols de la zone humide est de l'ordre de 10 à 30 %, le reste étant attribué au ruissellement de surface, de l'ordre de 10 à 25 %, et à l'écoulement de la nappe de versant, de l'ordre de 40 à 80 %. Hors crue, l'écoulement provenant de la nappe de versant est majoritaire, de l'ordre de 70 à 90 %, complété par un apport d'eau profonde en bas de versant de l'ordre de 10 à 30 % (Molénat, 1999).

Les temps de résidence de l'eau dans la zone humide sont courts, variant de quelques heures à quelques jours suivant la pluviosité (Bidois, 1999). Ce résultat a été obtenu par traçage et suivi géochimique *in situ* sur d'autres sites que celui de Naizin. Il a été confirmé par la modélisation des transferts dans la nappe sur le bassin versant de Naizin. Les vitesses de trans-

fert estimées sont assez rapides, de l'ordre de quelques mètres par jour (Molénat, 1999). Cependant, il existe une forte hétérogénéité de ces vitesses d'écoulements, et donc des temps de résidence de l'eau dans la zone humide, liés à des chemins d'écoulements préférentiels (Bidois, 1999).

Sur le bassin versant du Cétrais (34 km²), les travaux engagés ont visé à quantifier les interactions entre les zones humides et le fonctionnement hydraulique du réseau hydrographique. Des mesures à différents points du réseau des hauteurs d'eau et des débits ainsi que des observations complémentaires (topographie, rugosité des berges, points singuliers...) ont servi de support à une modélisation hydraulique du système hydrographique. Le calage et la validation du modèle (Aït Saadi, 1998) ont permis de vérifier que le réseau déborde pour des crues relativement courantes (période de retour annuelle), provoquant l'inondation temporaire des zones

Tableau 4 - Fonctions hydrologiques et pouvoir épurateur des Zones Humides. Application au cas des processus de dénitrification.
Table 4 - Hydrological and buffer functions in riparian wetlands. Application to the denitrification processes.

| Importance des flux | Cinétique des processus géochimiques | Géométrie des Ecoulements |
|--|---|---|
| Dynamique de la nappe de versant Continuité Versant / Zone Humide | Alternance d'apports d'azote et de conditions anaérobies Cinétiques redox Temps de résidence de l'eau | Flux superficiels importants Continuité et homogénéité des écoulements dans la Zone Humide |
| Surface relative de l'aire contributive à l'aire de la zone humide Discontinuités topographiques ou anthropiques (haie, fossés,...) | Linéaire d'interface Versant / Zone Humide | Répartition flux superficiels et profonds Hétérogénéité latérale des écoulements |

humides riveraines. La fonction de stockage longitudinal du système a donc ainsi pu être évaluée.

Lors d'un épisode-type de débordement lors d'une crue courante, le lit mineur du réseau stocke une part non négligeable du volume de crue (jusqu'à 30 %). Cet effet est une conséquence directe du fait que le gabarit du ru a été modifié suite à des opérations d'assainissement agricole. La zone humide stocke en surface des eaux provenant du ru. L'importance de ce stockage dépend étroitement de la topographie de la zone. Dans le cas étudié sur le bassin du Cétrais, l'intégralité de la zone humide potentielle est susceptible de stocker des eaux de surface mais le temps de résidence est court, tout au plus quelques jours. L'effet d'un débordement dans la zone humide n'a qu'un effet limité sur la capacité de laminage des crues courantes. Là encore, la taille même du réseau hydrographique a comme conséquence de "court-circuite" le fonctionnement de la zone humide: en crue il n'y a que très peu d'interactions entre les flux d'eau transitant longitudinalement dans le réseau et ceux provenant des versants et alimentant transversalement le système.

La fonction de stockage longitudinal d'une zone humide riveraine dépend ainsi à la fois des caractéristiques géométriques du lit mineur du réseau hydrographique, de la topographie du lit majeur et du fonctionnement hydrologique global du bassin. Cette fonction de stockage longitudinal apparaît donc très variable selon le degré d'aménagement et d'entretien du réseau hydrographique des bassins versants.

CROISEMENT DE CETTE TYPOLOGIE AVEC LE POUVOIR EPURATEUR DE LA ZONE HUMIDE

Dans cette partie, on se limitera au cas de la fonction épuratrice de la zone humide, en prenant l'exemple le plus discuté du processus de dénitrification et en se focalisant sur l'identi-

fication des contrôles hydrologiques participant à l'expression de ce processus. On peut distinguer dans ces contrôles trois composantes: les flux mis en jeu, la cinétique des processus géochimiques et la géométrie des écoulements (tableau 4).

Les flux de nitrates conditionnent la quantité d'azote disponible pour la dénitrification, et la dynamique des concentrations dans les sites potentiellement dénitrifiants. Ces flux sont à la fois liés aux fonctions de stockage transversal, longitudinal et de transfert. La fonction de stockage longitudinal est occasionnelle, mais peut permettre le dépôt de particules organiques, entretenant sur le long terme le potentiel dénitrifiant. La fonction de stockage transversal et la fonction de transfert interviennent, pour la première, sur les dynamiques saisonnières, pour la seconde, sur les dynamiques événementielles. Au delà de ces fonctions, les flux dépendent essentiellement des conditions agronomiques et hydrologiques amont et de la continuité spatiale entre le versant et la zone humide.

La cinétique des processus biogéochimiques met en jeu essentiellement la fonction de transfert. En effet, l'importance de la dénitrification dépend de deux facteurs contradictoires: le temps de résidence, qui doit être assez long pour permettre l'établissement de conditions réductrices (quelques jours), et la connectivité des flux, qui permet le renouvellement des nitrates dans des sites dénitrifiants. Ceci peut être obtenu par l'alternance de conditions de flux circulants et oxygénés, en crue, et de conditions de plus en plus stagnantes et confinées, hors crue. Dans le temps, il est ainsi nécessaire d'avoir une situation hydrologique impliquant un renouvellement périodique de l'eau de la zone humide par son évacuation régulière. Dans la pratique, on constate que ce sont des événements climatiques de moyenne fréquence, correspondant à des crues modérées et régulières, qui sont les plus adéquates: si les conditions deviennent trop humides, le confinement n'a pas lieu et les nitrates sont évacués avant d'être dénitrifiés. Dans l'espace, ces conditions d'alternance se rencontrent le plus souvent sur le pourtour de la zone humide. Les processus de dénitrification s'exprimeront donc mieux sous certaines conditions hydrologiques, tant dans le temps que

dans l'espace. Cet aspect du fonctionnement peut, en première approche, être basé sur une délimitation des zones humides effectives, c'est-à-dire prenant en compte les dynamiques spatiales et temporelles de l'extension de la zone humide en fonction des dynamiques climatiques.

La géométrie des écoulements met également en jeu la fonction de transfert. Elle doit être considérée dans ses dimensions verticales et latérales. Dans une dimension verticale, il s'agit principalement d'identifier les flux susceptibles de subir une dénitrification hétérotrophe. Les flux à travers les horizons organiques superficiels, biologiquement actifs pour la fonction "puits d'azote" sont ainsi essentiels (Curmi *et al.*, 1998). Ils sont souvent plus importants, plus rapides qu'en profondeur, du fait d'une conductivité hydraulique plus élevée dans les horizons superficiels. Il peut également exister des flux venant des niveaux profonds (altérites...) où la présence de sulfures (pyrite) peut permettre une dénitrification autotrophe (Molénat, 1999). Latéralement, il s'agit principalement d'analyser l'hétérogénéité spatiale des écoulements et la continuité entre le versant, la zone humide et le ruisseau. On rejoint là l'aspect cinétique abordé précédemment. Dans la réalité, la zone humide est souvent une juxtaposition de zones réduites, mais isolées du versant ou de la rivière, où l'eau ne transite pas, et de zones oxydées où l'eau transite rapidement. Cette géométrie des écoulements ne peut être abordée que par la définition des zones humides efficaces et donc par une approche de terrain et des mesures extrêmement détaillées dans l'espace. Toutefois, l'approche phytosociologique, un peu plus légère, peut fournir de précieux renseignements en délimitant les zones présentant des hypériodes et des niveaux trophiques différents.

CONCLUSION

Les zones humides sont des zones d'interface entre le versant et la rivière. Elles ont des fonctions hydrologiques propres, fonctions de stockage transversal et longitudinal, fonction de transfert de l'eau. Ces fonctions sont très liées à l'extension relative des zones humides par rapport au bassin versant, à l'hétérogénéité de ces zones et à leur connexion aux interfaces du versant et de la rivière. Le fonctionnement des zones humides dans les bassins versants d'ordre 1 à 3 apparaît en premier lieu lié au fonctionnement général du bassin versant. La classification proposée vise à distinguer trois niveaux d'approche, de précision croissante, impliquant par conséquent des moyens de caractérisation de plus en plus lourds : les zones humides potentielles, caractérisées par des indicateurs géographiques ; les zones humides effectives, caractérisées par la dynamique spatio-temporelle des états hydriques du bassin versant ; les zones humides efficaces, caractérisées par leur fonctionnement hydrologique interne et leur connectivité aux interfaces.

Dans la pratique, seules les définitions de zones humides potentielles ou effectives sont facilement réalisables. Elles permettent une délimitation des zones humides et non une appréciation de leur fonctionnement interne. Cette délimitation est importante car elle permet une estimation des surfaces concernées et de leur variabilité régionale, notamment à des fins de conservation ou d'aménagement. Pour être généralisées, ces estimations doivent cependant être calibrées par des observations de terrain selon les contextes géologiques et climatiques. Ces approches de délimitation ne permettent cependant pas un couplage direct avec d'autres types de fonctionnalités telles que le pouvoir épurateur. En effet, l'hétérogénéité des écoulements dans la zone humide et le degré de connexion aux interfaces a un rôle majeur qui ne peut être évalué que par des observations et des mesures relayées par la modélisation hydrologique et géochimique. En effet, si les zones humides sont souvent considérées comme des zones épuratrices, cette potentialité ne s'exprime que sous certaines conditions, impliquant une évacuation régulière dans le temps et uniforme dans l'espace des eaux au cours des crues. Ceci correspond à des flux superficiels relativement importants, une homogénéité latérale des écoulements et des conditions climatiques de moyenne fréquence. A chaque fois que la réalité s'écarte de ces conditions idéales, le rôle épurateur effectif des zones humides est diminué. De fait, il apparaît souvent en deçà des potentialités biogéochimiques du milieu, bien que les flux en interaction avec la zone humide soient globalement importants dans le bilan hydrologique.

L'effort de recherche devrait porter sur des méthodes de caractérisation plus opérationnelles de cette efficacité, sachant que les études ponctuelles lourdes sont souvent peu extrapolables.

La modification des aménagements et des usages de ces zones a des implications sur les fonctionnalités des zones humides, tantôt les court-circuitant (fossés, drains agricoles...) ou les déconnectant du versant (haie), tantôt favorisant et ralentissant les écoulements superficiels (drainage contrôlé, fossé d'amenée d'eau...). La typologie doit permettre de mieux analyser l'incidence de ces modifications en fournissant :

- une base de dialogue entre spécialistes de différentes disciplines ayant chacun une approche spécifique des zones humides. Cette base est fondée sur l'analyse des fonctions hydrologiques des zones humides, celles-ci jouant un rôle majeur sur l'ensemble des fonctions des zones humides ;
- une base de négociation avec les différents utilisateurs de l'espace qui peuvent par cette typologie mieux identifier les outils à mettre en œuvre et les conséquences de leur choix d'aménagement et de conservation des zones humides.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par le Programme National de Recherche sur les Zones Humides du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement dans le cadre du projet "Ty-Phon : typologie fonctionnelle des zones humides de fonds de vallée en vue de la régulation de la pollution diffuse", projet coordonné par P. Merot.

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 pp.
- 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. Litterature review and evaluation rationale. Operational draft technical report U.S. Army Corps of engineers waterways experiment station, Vicksburg, Mississippi, USA, 206 pp.
- Ait Saadi L., 1998 - Transfert de crues sur de petits bassins versants agricoles : évaluation de la capacité de stockage d'une zone humide de bas fond, Mémoire de DEA Hydrologie / Hydrogéologie, UPMC Paris VI, ENSMP, ENGREF, Cemagref
- Band R.C., 1986 - Topographic partition of watersheds with digital elevation models. *Water Resour. Res.*, 22, 256-534.
- Beven K.J., 1986 - Hillslope runoff processes and flood frequency characteristics. In Hillslope processes. Abrahams (Ed), Allen and Unwin, Boston, 187-202.
- Beven K.J. et Kirkby M.J., 1979 - A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* 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 1.
- Boutin C. et Keddy P.A., 1993 - A functional classification of wetlands. *J.V.S.*, 4, 591-600.
- Brun C., Bernard D., Vidal-Madjar D., Gascuel-Oudou C., Merot P., Duchesne J. et Nicolas H., 1990 - Mapping saturated areas with an helicopter borne C band scatterometer. *Water Resour. Res.*, 26, 945-955.
- Caubel-Forget V. et Grimaldi C., 1999 - Fonctionnement hydrique et géochimique du talus de ceinture de bas-fond : conséquences sur le transfert et le devenir des nitrates. In « Bois et forêts des agriculteurs », Ed. Cemagref, Actes de colloque, 169-189, 346 pp.
- Chaplot V., 1998 - Organisation spatiale des sols hydromorphes de fonds de vallée. Modélisation prédictive de leur distribution. Thèse de l'ENSAR, 280 pp.
- Chevry C., 1998 - Agriculture intensive et qualité des eaux. INRA Editions, 297 pp.
- Clément B. et Touffet J., 1996 - Quelques facteurs de la biodiversité végétale dans les prairies humides des corridors fluviaux. *Coll. Phytos*, 15, 317-347.
- Crave A. et Gascuel-Oudou C., 1996 - The influence of topography on space and time distribution of soil water content. *Hydrol. processes*, 11, 203-210.
- Curmi P., Durand P., Gascuel-Oudou C., Merot P., Walter C. et Taha J.-M., 1998 - Hydromorphic soils, hydrology and water quality: spatial distribution and functional modelling at different scales. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 50, 127-142.
- Dunne T., 1983 - Relation of field studies and modelling in the prediction of storm runoff. *J. Hydrol.*, 65, 25-48.
- Durand P. et Torres J.-L., 1996 - Solute transfer in agricultural catchments: the interest and limits of mixing models. *J. Hydrol.*, 181, 1-22.
- Fustec E. et Lefeuvre J.-C., 2000 - Fonctions et valeurs des zones humides. Dunod Ed.
- Gascuel-Oudou C., Branchard J.-P. et Merot P., 1983 - Essai de caractérisation globale et de modélisation du fonctionnement hydrique d'un petit bassin versant. *Bull. AFES*, 1, 3-15.
- Gascuel-Oudou C., Merot P., Hallaire V. et Robin P., 1996 - Structure des zones contributives de bas-fonds : modélisation et validation expérimentale. INRA Editions, Les colloques «Etude des phénomènes spatiaux», La Rochelle, déc. 1995, 78, 201-213.
- Gascuel-Oudou 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. In *Agriculture intensive et qualité des eaux*. INRA Editions, 129-141.
- Hewlett J.-D. et Troenle 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 pp.
- 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.
- Kirkby M.J., 1976 - Hydrograph modelling strategies. In " *Progress in physical and human geography* ". Ed Peek, R., Chisholm, M., Haggitt, P., 70-90.
- Kliwer B.A., Gilliam, J.W., 1995 - Water table management effects on denitrification and nitrous oxide evolution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 1694-1701.
- Knowles R., 1981 - Denitrification. *Ecol. Bull.*, 33, 315-329.
- Merot P., 1988 - Les zones de source à surface variable et la question de leur localisation. *Hydrol. continent.*, 3, 105-115.
- Merot P., Crave A., Gascuel-Oudou C. et Louhala S., 1994 - Effect of saturated areas on backscattering coefficient of the ERS1 SAR: first results. *Water Res. Res.*, 30,2, 175-179.
- Merot P. et Bruneau P., 1993 - Sensitivity of bocage landscape to surface runoff: application of the Beven index. *Hydrol. Processes*, 7, 167-176.
- Moiénat J., 1999 - Rôle de la nappe sur les transferts d'eau et de nitrate dans un bassin versant agricole : Etude expérimentale et modélisation. Doctorat de l'Université de Rennes
- Normand M., Loumagne C., Cognard A. L., Otlé C., Taconet O. et Vidal-Madjar D., 1996 - Observation et prise en compte de l'état hydrique des sols en hydrologie : une étude sur des bassins versants bretons. In *Hydrologie des pays celtiques*, Rennes France 8-11 juillet 96. Ed. INRA, les colloques, 79, 135-148.
- O'Loughlin E., 1986 - Saturation regions in catchments and their relations to soil and topographic properties. *J. Hydrol.*, 53, 229-246.
- 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 patterns of denitrification in a riparian forest. *Journal of Applied Ecology*, 30 (4): 581-591.
- Regimbeau C., 1999 - Typologies et fonctionnement de zones humides de fonds de vallées en Ille et Vilaine (Bretagne). Thèse de l'Université de Rennes 1, 213 pp.