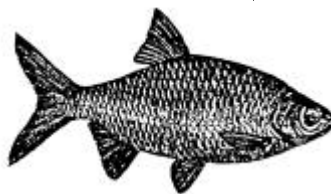
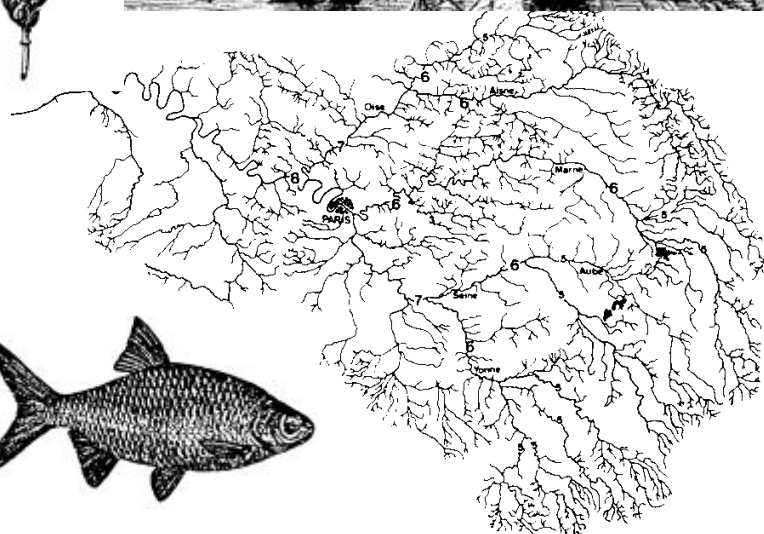


Programme PIREN-Seine 1998-2001

Typologie et fonctions des zones humides riveraines

Direction et secrétariat:
UMR CNRS 7619 Sisyphe
Université P&M Curie
Tour 26, 5e étage, boîte 123
4, place Jussieu
75005 Paris



Rapport de Synthèse, Février 2002

Typologie et fonctions des zones humides riveraines

Stéphan GAILLARD ¹, Mathieu SEBILO^{2,3}, Daniel BRUNSTEIN⁴, David N'GUYEN-THE ⁵,
Micheline GRABLY³, Eliane FUSTEC², Hocine BENDJOUDI ², Jean - Paul BRAVARD ⁶,
Aïcha AMEZAL ⁷, Gilles BILLEN², André MARIOTTI³

¹ IGARUN, Université de Nantes, GEOLITTOMER - LETG - UMR 6554

² UMR Sisyphe, Paris

³ UMR Biogéochimie isotopique, Paris

⁴ LGP, UMR 8591, Meudon

⁵ BRGM, Nancy

⁶ Université Lumière - Lyon 2, IUF, UMR 5600

⁷ Agence de l'Eau Seine - Normandie

sg.sg@wanadoo.fr

sebil@biogeodis.jussieu.fr

INTRODUCTION	4
1. INVENTAIRE TYPOLOGIQUE DES ZONES HUMIDES RIVERAINES DES COURS D'EAU SUR DES BASES HYDROGÉOMORPHOLOGIQUES	6
1.1. Classification géomorphologique	6
1.2. Classification hydrologique	10
1.3. Le Système d'Information Géographique « Zones Humides Riveraines » : un outil pour caractériser les hydrosystèmes fluviaux et identifier les différents types de zones humides dans le gradient amont - aval.	11
1.3.1 Architecture du SIG.....	11
1.3.2 Principaux résultats : l'exemple du bassin de la Marne	12
2. LE RÔLE DES ZONES HUMIDES RIVERAINES DANS LA RÉTENTION DE L'AZOTE D'ORIGINE DIFFUSE.	18
2.1. Mise en évidence et estimation de la rétention riparienne des nitrates	18
2.1.1 Principes de l'établissement des bilans de rétention riparienne.....	19
2.1.2 Estimation de la rétention riparienne en diverses stations du bassin de la Marne	19
2.1.3 Rôle du drainage agricole	20
2.2. Utilisation de la composition isotopique des nitrates comme marqueur de dénitrification riparienne	21
2.2.1 Principes	21
2.2.2 Anomalie isotopique des nitrates dans les eaux de surface	22
2.2.3 Relation entre anomalie isotopique et rétention	22
2.3. Relation entre la rétention riparienne et la typologie géomorphologique des zones humides riveraines	24
2.3.1 Principes	24
2.3.2 Calibration de l'estimateur	24
3. DISCUSSION ET CONCLUSION	27
4. RÉFÉRENCES	29
5. ANNEXE : CATALOGUE DES DONNÉES ET DES MÉTA-DONNÉES.....	31
5.1. Les données sources	31
5.1.1 Cartes géologiques à 1/50 000 ^e (BRGM).....	31
5.1.2 Cartes topographiques à 1/25 000 ^e (IGN).....	31
5.1.3 Carte hydrogéologique du Bassin de Paris à 1/500 000 ^e (Albinet).....	31
5.2. La base de données « Zones Humides Riveraines »	31
5.2.1 Couverture « corridors fluviaux »	31
5.2.2 Couverture « système de terrasses ».....	32
5.2.3 Couverture « formes fluviales »	32
5.2.4 Couverture « annexes hydrauliques »	32
5.2.5 Couverture « temps de concentration ».....	32
5.2.6 Couverture « perméabilité des terrains »	32

Introduction

Les zones humides ont un intérêt fonctionnel reconnu. Elles favorisent l'auto - épuration des eaux souterraines et superficielles, la rétention des crues et, dans certains cas, la recharge des nappes. Elles sont, par ailleurs, caractérisées par une extrême diversité biologique (Pinay *et al.*, 1990 ; Mitsch & Gosselink, 1993 ; Fustec & Lefeuvre, 2000).

Face à la dégradation importante de ces milieux, mise en évidence par l'évaluation des politiques publiques (Bernard, 1994), l'Agence de l'Eau Seine - Normandie a mis en place, dès 1997, une politique de préservation des zones humides. Cette politique se manifeste par des aides financières pour la réalisation d'études, de travaux de restauration et d'entretien, des acquisitions foncières et la mise en place de cellules d'assistance technique à l'entretien de ces milieux. Cette politique implique aussi la définition de stratégies d'actions et de priorités, qui sont directement liées à une meilleure connaissance des caractéristiques, des fonctions et des valeurs des zones humides, d'où le soutien à des travaux de recherche. Dans ce contexte, l'Agence accorde enfin des subventions pour des sites qui présentent, selon les termes du VIII^e programme, « conjointement un intérêt vis - à - vis de la ressource en eau et du patrimoine ».

Si les zones humides à fort intérêt patrimonial sont connues – il s'agit des milieux faisant l'objet d'un inventaire (Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique, ZNIEFF ; Zones Importantes pour la Conservation des Oiseaux, ZICO, ...), de protections réglementaires (réserves naturelles, arrêtés préfectoraux de biotope, zones de protections spéciales, ...) ou d'engagements internationaux (RAMSAR, ...) –, les sites qui présentent un potentiel important vis - à - vis de la ressource en eau ne sont, à ce jour, pas identifiés. C'est pourquoi il est important de développer des méthodes et des outils permettant : (1) de délimiter et de caractériser ces milieux et (2) de définir des indicateurs permettant d'évaluer leurs fonctions vis - à - vis de la ressource en eau ; ces travaux devant déboucher sur des typologies fonctionnelles à même d'éclairer les décisions de gestion.

L'inventaire puis la sélection de sites prioritaires vis - à - vis de la ressource en eau (par exemple, les zones humides à fort pouvoir de réduction des flux de nitrates) permettra de créer une dynamique forte auprès des acteurs locaux en vue de définir les stratégies d'actions les plus efficaces (restauration de sites, plantation de forêts alluviales, de bandes enherbées, ...) pour améliorer la qualité des eaux superficielles et souterraines. Il est important de noter que cette démarche s'inscrit dans le cadre de la Directive Cadre du 23 - 12 - 2000 (n° 2000 / 60 / CE) qui fixe comme objectif le retour à un bon état écologique des rivières d'ici 15 ans.

Face aux attentes des gestionnaires des ressources en eau et aux lacunes majeures constatées dans ce domaine, des équipes scientifiques ont engagé des travaux dans le cadre de programmes de recherches : Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement de la Seine (PIREN - Seine) ; Programme National de Recherche sur les Zones Humides (PNRZH). Ces travaux visent à évaluer, à l'échelle du bassin de la Seine, quatre fonctions majeures des zones humides riveraines des cours d'eau (régulation des crues, rétention des particules et des polluants associés, rétention et élimination des nitrates et maintien des peuplements piscicoles). L'objectif de ce rapport est de décrire les différentes étapes de la méthode ainsi que les outils développés pour procéder à ces évaluations fonctionnelles.

L'évaluation des fonctions des zones humides riveraines des cours d'eau vis - à - vis de la ressource en eau (stockage d'eau à court et à long terme, rétention et/ou recyclage d'éléments particuliers et dissous, ...) ou des peuplements piscicoles (habitats de reproduction, de refuge, ...) passe par l'identification des différents types fonctionnels depuis les têtes de bassin jusqu'aux plaines fluviales drainées par les cours d'eau de rang supérieur (Brinson *et al.*, 1994). Dans cette perspective, la méthode développée pour caractériser l'action des zones humides à l'échelle du bassin de la Seine sur les flux d'eau et de matière et, plus globalement, sur le fonctionnement écologique des systèmes aquatiques continentaux repose sur trois étapes :

- la première étape consiste à inventorier et à classer les zones humides riveraines des cours d'eau sur des bases hydrogéomorphologiques ; les critères retenus à ce niveau étant considérés comme des déterminants du fonctionnement des systèmes écologiques (Salo, 1990 ; Brinson *et al.*, 1993, 1994 ; Maltby *et al.*, 1994) ;
- la seconde étape a pour objet la sélection d'indicateurs et la construction d'indices synthétiques permettant d'évaluer les fonctions des zones humides riveraines (ressource en eau et peuplements piscicoles) en termes de présence/absence et d'intensité ;
- la troisième étape s'appuie sur la constitution de bases de données géoréférencées et sur le développement d'applications qui assurent l'identification et la spatialisation des différents types de zones humides riveraines ainsi que l'élaboration des typologies fonctionnelles.

L'objectif est de fournir aux gestionnaires un outil d'aide à la décision en matière de gestion voire de restauration des zones humides riveraines des cours d'eau à l'échelle du bassin de la Seine. D'après la classification proposée par Brinson (1993), on entend par zone humide riveraine : les cours d'eau et les plaines fluviales qui les bordent. Cet outil doit aussi permettre aux équipes du PIREN - Seine de procéder à un changement d'échelle en extrapolant les résultats qu'ils ont acquis sur des sites ateliers à des ensembles plus vastes qui présentent les mêmes caractéristiques de point de vue de leur structure hydrogéomorphologique et de leur fonctionnement. Ainsi par exemple, les résultats de la typologie des zones humides riveraines de l'ensemble du chevelu hydrographique doit permettre une paramétrisation du rôle biogéochimique de ces zones dans le modèle SENEQUE (Billen & Garnier, 2000).

Ce rapport s'articule de la façon suivante :

(1) Nous présenterons d'abord les éléments conduisant à la typologie hydrogéomorphologique des zones humides riveraines : nous en rappèlerons les bases, nous décrirons le Système d'Information Géographique dédié à la caractérisation de ces milieux et présenterons les principaux résultats obtenus dans le bassin de la Marne – sur lequel nous avons centré nos travaux – pour les niveaux 2 et 3 du système de classification ;

(2) Nous montrerons ensuite l'intérêt de cette typologie sur l'exemple de la fonction d'épuration des apports diffus de nitrates que peuvent remplir les zones humides.

On trouvera, enfin, en annexe un catalogue des données et des méta - données ; il s'agit ici de décrire la structuration de la base de données et d'en préciser l'extension géographique en l'état actuel de l'avancement du travail.

1. Inventaire typologique des zones humides riveraines des cours d'eau sur des bases hydrogéomorphologiques

L'inventaire typologique des zones humides riveraines à l'échelle du bassin de la Seine s'appuie sur l'élaboration de classifications théoriques sur des bases géomorphologiques et hydrologiques. Il s'agit, à ce stade, de définir les différents types de zones humides riveraines rencontrés dans le bassin de la Seine et le fonctionnement hydrologique qui leur est associé. Le couplage des deux classifications est assuré au moyen d'un SIG développé à cette fin.

1.1. Classification géomorphologique

En raison de l'étendue de la zone d'étude (le bassin de la Seine s'étend sur plus de 76 000 km² ; le linéaire de rivières atteint 23 000 km), une approche analytique centrée sur l'extraction puis l'analyse statistique d'un jeu de variables morphologiques caractérisant les lits fluviaux et les plaines alluviales n'apparaît pas applicable (Bernot *et al.* 1996 ; Gaillard, 1999). Pour cette raison, nous avons développé une méthode théorique centrée sur le concept de système morphologique hiérarchisé et emboîté (Salo, 1990 ; Amoros & Petts, 1993). La structure des plaines et des lits fluviaux résultant de processus géomorphologiques qui se réalisent à différentes échelles de temps et d'espace, nous avons cherché à replacer la compréhension des paysages de fonds de vallées et la définition des différents types de zones humides riveraines dans une perspective génétique et dynamique.

La figure 1 présente le système de classification des zones humides riveraines établie sur des bases génétiques et dynamiques. Cette classification intègre une série de variables représentatives des différentes échelles de temps et d'espace auxquelles la mise en place et le fonctionnement actuel des hydrosystèmes fluviaux peuvent être appréhendés.

Quatre niveaux sont proposés. Le niveau d'entrée de la classification (niveau 1) correspond au système « zone humide riveraine » défini par Brinson *et al.* (1993) dont nous cherchons à préciser la variabilité dans le gradient amont - aval. Les niveaux 2, 3 et 4 correspondent à l'intégration de 3 variables géomorphologiques :

- évolution du profil en long des cours d'eau (niveau 2 / pas de temps géologique) ;
- dépôts sédimentaires holocènes (niveau 3 / pas de temps holocène) ;
- mosaïques hydrogéomorphologiques (niveau 4 / pas de temps actuel).

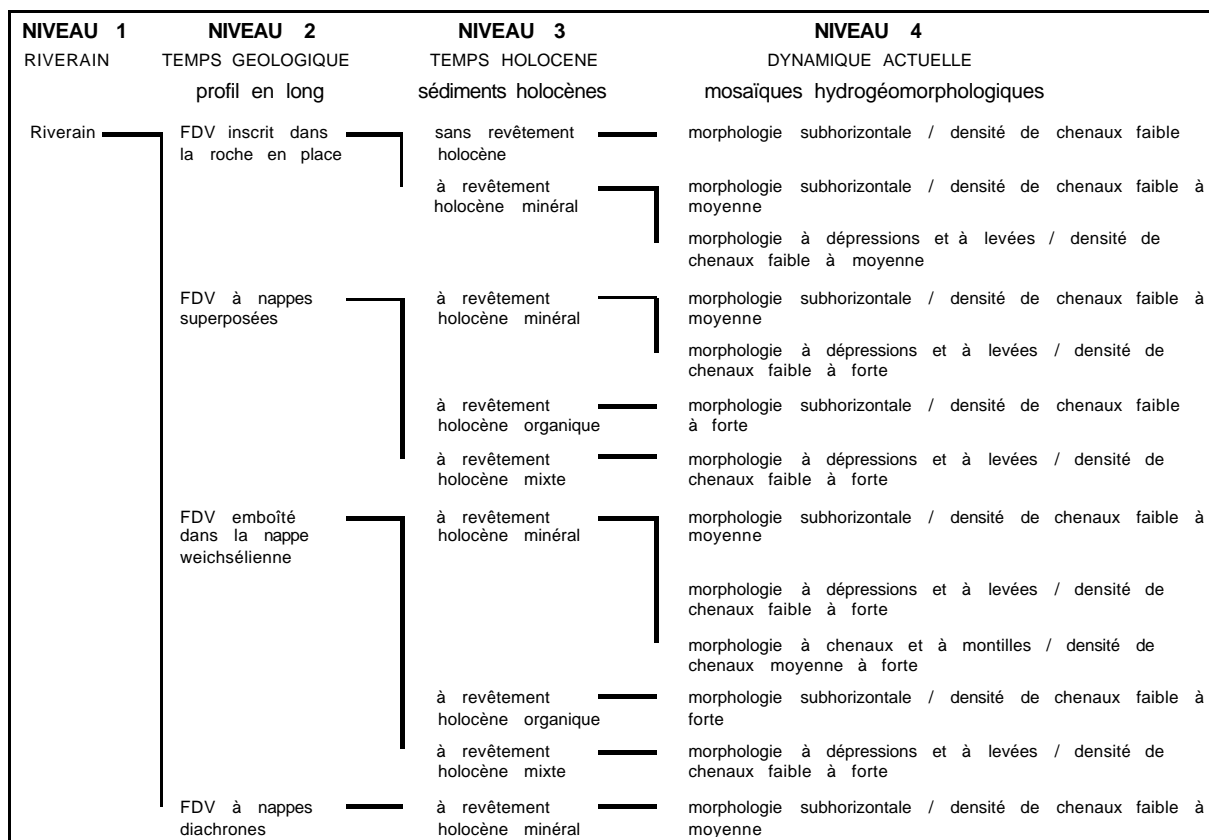


Figure 1: Classification géomorphologique des zones humides riveraines des cours d'eau sur des bases génétiques et dynamiques.

Les variables intégrées aux niveaux 2, 3 et 4 possèdent plusieurs modalités et contrôlent des caractéristiques morphologiques et fonctionnelles des couloirs fluviaux.

La variable « évolution du profil en long des cours d'eau » (niveau 2) intervient sur les macroformes (largeur et pente du système). Elle comprend les modalités suivantes : incision, exhaussement, emboîtement et stabilité à partir desquelles nous avons défini 4 sous - systèmes caractérisés par des dispositifs stratigraphiques spécifiques. Comme cela a été montré, ces sous - systèmes sont contrôlés (1) par des modifications dans le rapport débit liquide/débit solide des rivières dues au changement bioclimatique postglaciaire et (2) par la pente du plancher alluvial hérité de la dernière période froide (Schumm, 1977 ; Richards, 1982).

La variable « dépôts sédimentaires holocènes » (niveau 3) comprend quatre modalités : absence de dépôt (*i.e.* fond de vallée inscrit dans la roche en place) ; dépôt à dominante minérale ; dépôt à dominante organique ; dépôt mixte (*i.e.* organo - minéral). Indépendamment de la présence d'aquifères régionaux, ce niveau intervient sur la constitution d'aquifères locaux (*i.e.* nappes d'accompagnement des cours d'eau) ainsi que sur les échanges verticaux entre les milieux de surface et de subsurface ; il joue également sur la dynamique de l'azote via la teneur en matière organique des nappes de revêtement holocène.

Au niveau 4, la variable « mosaïques hydrogéomorphologiques » caractérise les associations de mésoformes les plus couramment observées dans le bassin de la Seine (Gaillard, 1999). Elle comprend trois modalités : morphologie subhorizontale ; morphologie à levées et à dépressions ; morphologie à chenaux et à montilles. A chacun de ces dispositifs, nous avons associé des caractéristiques relatives aux annexes hydrauliques drainant les couloirs fluviaux (densité de chenaux secondaires faible, moyenne, forte). Ces caractéristiques sont dépendantes des dispositifs morphologiques ainsi que des variables prises en compte aux niveaux supérieurs de la classification (niveaux 2 et 3). La variable « mosaïques hydrogéomorphologiques » exerce un contrôle sur les

transferts d'eau et de matière dans les couloirs fluviaux lors des inondations (mise en eau, stockage et vidange des plaines fluviales, rétention des flux particuliers, ...); elle intervient également sur la nature et la distribution des habitats pour la flore et la faune (Hughes, 1980 ; Lewin & Hughes, 1980 ; Dzana & Gaillard, 1995 ; Fustec *et al.*, 1999 ; Boët, 2000).

La figure 2 illustre, de façon schématique pour certains types de paysages fluviaux, la déclinaison des sous - systèmes, classes et sous - classes géomorphologiques en fonction des échelles spatio - temporelles retenues.

Selon le principe d'emboîtement des échelles de temps et d'espace retenu pour cette étude, il est important de noter que les classes et sous - classes définies aux niveaux 3 et 4 ont été induites des conditions d'évolution à long terme du système (*i.e.* évolution du profil en long des cours d'eau). Ceci a permis de définir au niveau 4, treize types de paysages fluviaux.

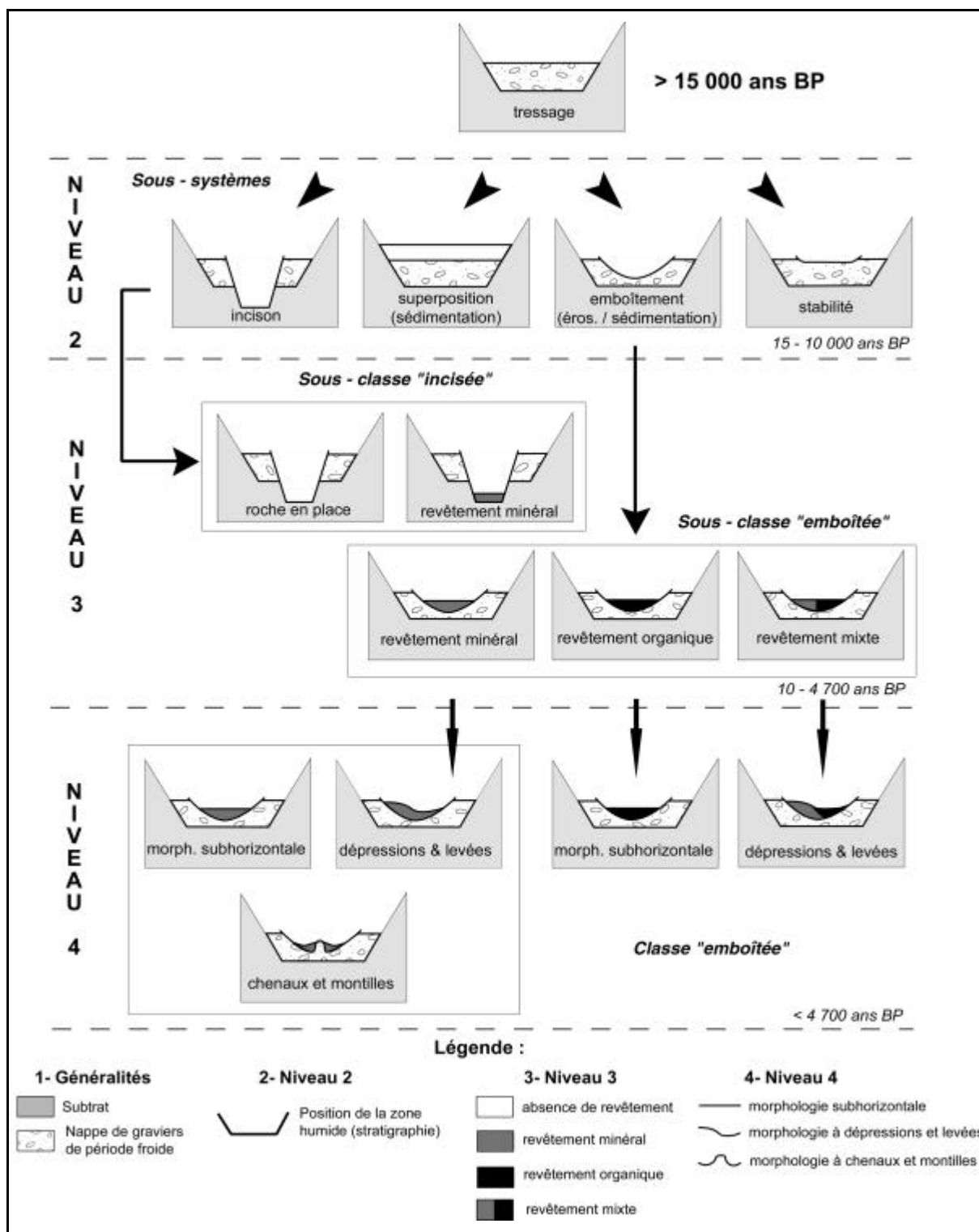


Figure 2 : Déclinaison des sous - systèmes, classes et sous - classes géomorphologiques en fonction des échelles spatio - temporelles.

1.2. Classification hydrologique

De la même façon, nous avons cherché à définir le fonctionnement hydrologique des zones humides riveraines. Il existe de nombreux essais de caractérisation des zones humides à partir des échanges hydriques avec leur environnement. Certains auteurs distinguent par exemple, aussi bien dans les entrées que dans les sorties, d'une part les eaux terrestres (eaux de surface et souterraines) et d'autre part les eaux atmosphériques (précipitations et évapotranspiration) (Lent *et al.*, 1997).

On peut aussi distinguer entre flux de surface (incluant précipitations et évaporation) et flux souterrains (Bendjoudi & de Marsily, 2000). Cette dernière classification prend mieux en compte la vitesse des transferts hydriques avec l'environnement. On peut distinguer en effet des transferts rapides (eaux superficielles ou atmosphériques) et des transferts plus lents (eaux souterraines). Les premiers donnent lieu à un régime de fonctionnement contrasté, très fortement corrélé avec les apports atmosphériques, alors que les derniers absorbent les variations trop brutales et contribuent à assurer un fonctionnement plus régulier tout au long de l'année.

Sur cette base, trois types de régime hydrologique, caractérisés par leur hydropériode (figure 3), peuvent être définis :

- régime hydrologique dominé par les apports atmosphériques et de surface ; ce type est caractérisé par une grande variabilité fortement liée aux conditions climatiques ; il est plutôt caractéristique de l'amont des bassins (a) ;
- régime hydrologique mixte (b) ;
- régime hydrologique dominé par les apports souterrains ; la variabilité est ici atténuée par le stockage en période de crue et la décharge des nappes en période d'étiage ; ce type est plutôt caractéristique de l'aval des bassins (c).

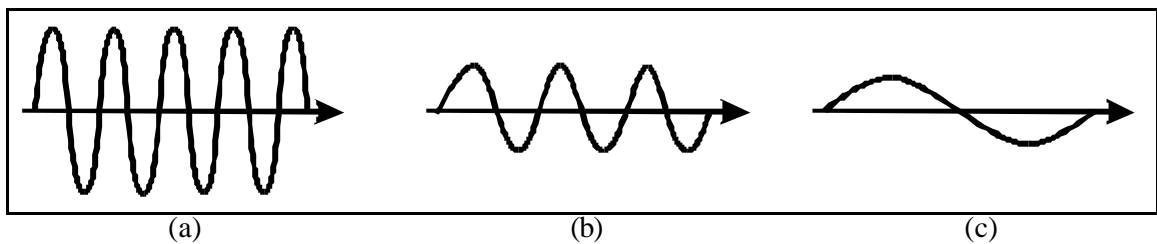


Figure 3: Les 3 types de régime hydrologique en fonction de l'importance relative des transferts hydriques de surface et souterrains. (la flèche matérialise le niveau zéro de la plaine fluviale).

Ainsi, si l'on parcourt un bassin versant de l'amont vers l'aval, on constate que les eaux souterraines jouent un rôle de plus en plus important, contribuant à « assagir » le comportement hydrologique (laminage des crues et soutien des étiages). Différents du point de vue de leur influence sur le régime hydrique, transferts rapides et transferts lents le seront aussi du point de vue de leur rôle dans le transport, le dépôt ou la reprise des matières en suspension notamment.

1.3. Le Système d'Information Géographique « Zones Humides Riveraines » : un outil pour caractériser les hydrosystèmes fluviaux et identifier les différents types de zones humides dans le gradient amont - aval.

Après avoir décrit l'architecture du SIG dédié aux zones humides riveraines, les principaux résultats obtenus dans le bassin de la Marne sont présentés de la façon suivante : (1) inventaires typologiques de niveaux 2 et 3 sur des bases géomorphologiques ; (2) caractérisation et distribution des régimes hydrologiques et (3) couplage des données géomorphologiques et hydrologiques assurant la classification hydrogéomorphologique à différentes échelles.

1.3.1 Architecture du SIG

La figure 4 montre l'architecture du SIG développé pour inventorier et identifier les zones humides riveraines aux différents niveaux de la classification hydrogéomorphologique et pour évaluer leurs fonctions. Le SIG a été réalisé avec les logiciels MapInfo et MapBasic (version 6) sur PC (système d'exploitation Windows NT). Les différents fichiers de la base sont dans le système de projection Lambert II étendu de l'IGN.

Le SIG assure deux fonctions : (1) le stockage et la gestion des bases de données spatialisées et (2) l'exécution d'applications. Les données sont en mode vectoriel. La base de données générique contient des données gérées dans le cadre du PIREN - Seine. Ces données sont utilisées pour produire de nouvelles couvertures ou pour élaborer des indicateurs destinés aux évaluations fonctionnelles (Corine Land Cover, base de données sols, ...). La base de données hydrogéomorphologique contient des couvertures spécifiques dédiées à la caractérisation physique et hydrologique des couloirs fluviaux. Elle fournit une information spatialisée sur les zones humides riveraines à l'échelle du bassin de la Seine et permet de renseigner les variables prises en compte aux différents niveaux de la classification. Les données ont été obtenues par numérisation de cartes (couvertures « corridors fluviaux », « perméabilité », etc...) ou en combinant différentes couches issues de la base de données générique (couverture des « temps de concentration », par exemple, construite à partir du MNT GTOPO30 de l'USGS, du réseau hydrographique et de la formule empirique de Kirpich (Chow et al., 1988)). Afin de disposer d'une information homogène à l'échelle du territoire étudié, les données source utilisées pour la numérisation sont : les cartes géologiques du BRGM à 1/50 000^e, les cartes topographiques de l'IGN à 1/25 000^e et la carte hydrogéologique du bassin de Paris à 1/500 000^e d'Albinet.

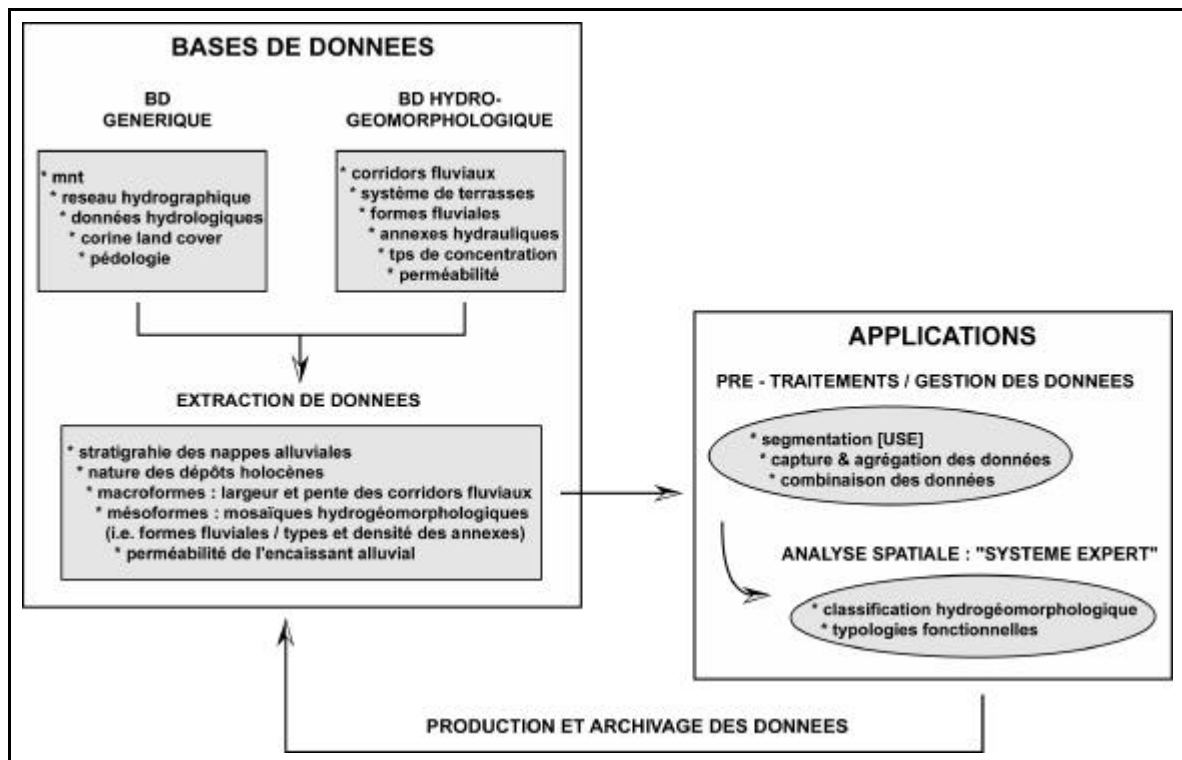


Figure 4 : Architecture du Système d'Information Géographique.

Les applications développées en parallèle permettent de caractériser les zones humides riveraines et d'identifier les types aux différents niveaux de la classification hydrogéomorphologique. L'identification des types de zones humides riveraines repose sur quatre modules qui assurent respectivement :

- la segmentation des couloirs fluviaux en unités spatiales élémentaires (USE) ;
- la capture et l'agrégation dans les USE des données des différentes couches d'informations ;
- la combinaison des données via une analyse multi - critères ;
- un système expert permet *in fine* de ventiler les données ; il assure l'identification aux différents niveaux des types hydro - géomorphologiques ainsi que leur spatialisation.

Sur le même principe, un module dédié aux évaluations fonctionnelles est en cours de réalisation.

1.3.2 Principaux résultats : l'exemple du bassin de la Marne

Inventaires typologiques de niveaux 2 et 3 sur des bases géomorphologiques

La figure 5 se rapporte au bassin de la Marne. Il s'agit d'une sortie cartographique obtenue en superposant deux couvertures (« corridors fluviaux » et « système de terrasses ») de la base de données hydrogéomorphologique. Ces couvertures permettent (1) de décrire les relations stratigraphiques entre les plaines fluviales actuelles (couverture « corridors fluviaux ») et les niveaux alluviaux plus anciens mis en place au cours de la dernière période froide (couverture « système de terrasses ») et (2) de préciser la nature des sédiments de remplissage holocène (couverture « corridors fluviaux »). Elles sont utilisées pour identifier les types de zones humides riveraines aux niveaux 2 et 3 de la classification géomorphologique.

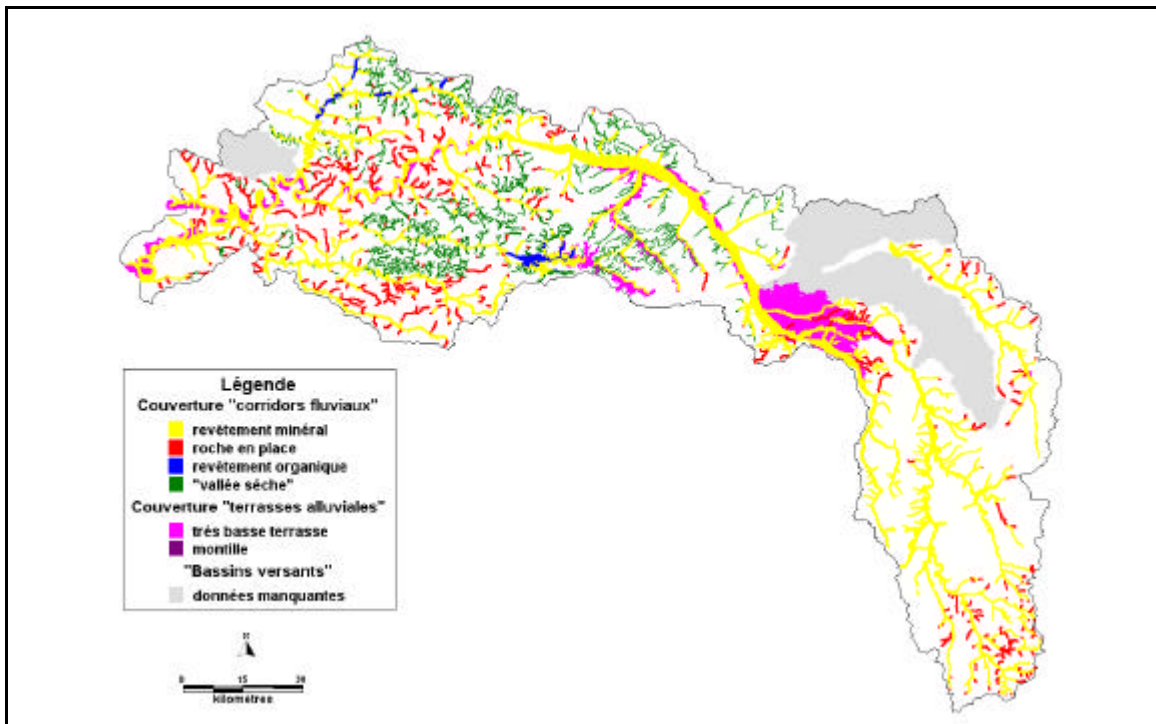
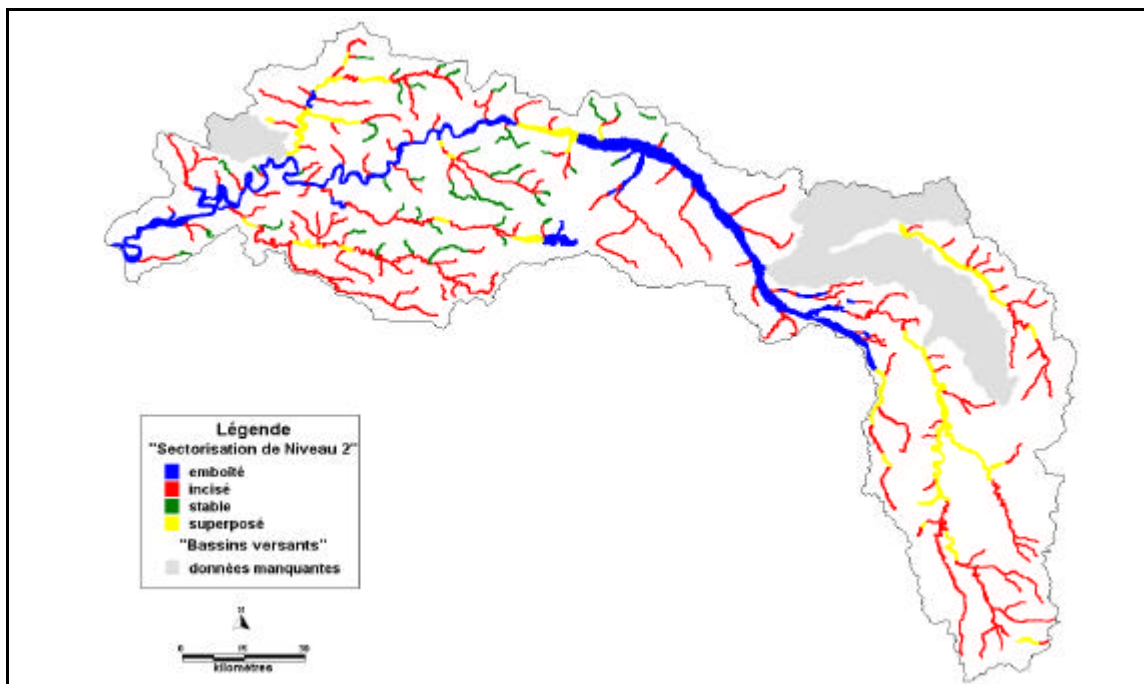
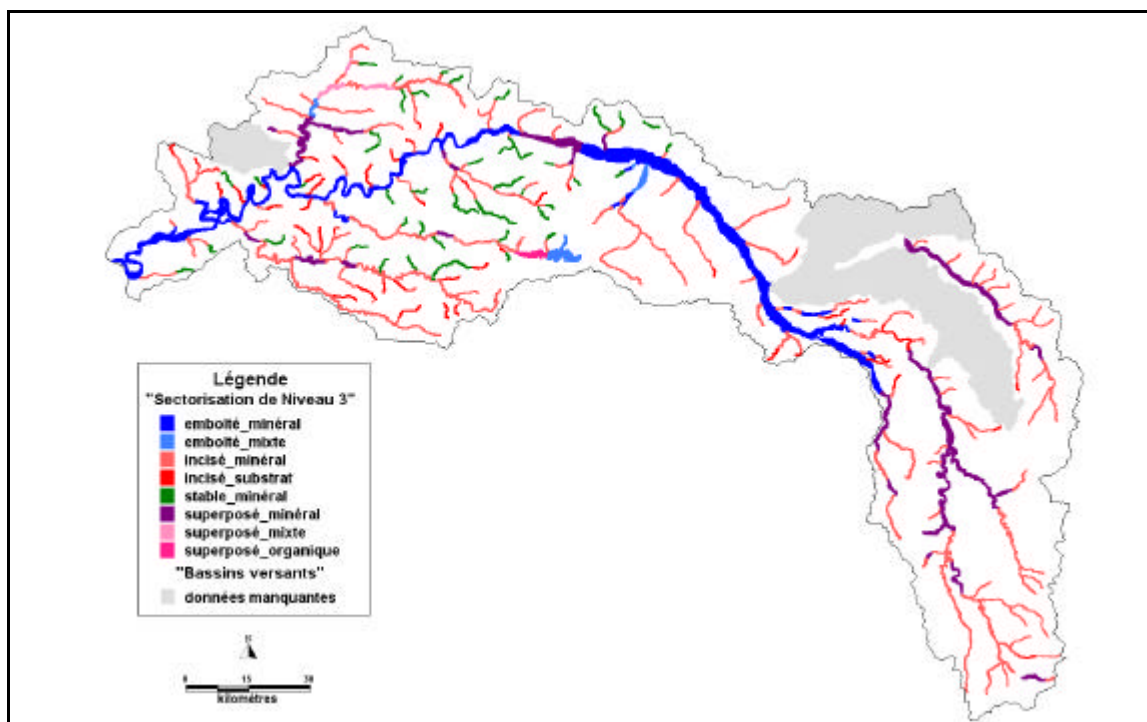


Figure 5 : Bassin de la Marne : extrait de la base de données utilisée pour caractériser et identifier les types de zones humides riveraines aux niveaux 2 et 3 de la classification géomorphologique (l’item « données manquantes » concerne quatre bassins [Saulx, Théroanne, Chée et Vière] pour lesquels nous ne disposons pas de données actuellement).

Les documents suivants (figures 6a et 6b) montrent les inventaires typologiques réalisés sur la Marne aux niveaux 2 et 3 de la classification géomorphologique à partir de ces deux couvertures et des applications décrites plus haut. L’inventaire pour le niveau 4, à partir des couvertures décrivant la morphologie des couloirs fluviaux et le réseau d’annexes hydrauliques (couvertures « formes fluviales » et « annexes hydrauliques »), est en cours de réalisation. Avec quatre sous - systèmes et huit classes discriminés respectivement aux niveaux 2 et 3, l’approche retenue permet de caractériser la variabilité longitudinale des hydrosystèmes fluviaux à différentes échelles d’espace et de mettre en évidence des ensembles spatialement continus qui présentent des propriétés homogènes aux plans géomorphologique et fonctionnel. Pour ces deux niveaux, les logiques de distribution des types dans le gradient amont - aval font principalement intervenir des facteurs internes dus à la dynamique fluviale ; en particulier (1) la pente du plancher alluvial héritée de la dernière période froide qui fournit l’énergie entrant dans le système et (2) l’évolution longitudinale dans le rapport débit liquide/débit solide (Gaillard, 1999). Localement, des facteurs externes interviennent tels que la lithologie et l’hydrogéologie ; ils rendent compte par exemple de la présence et/ou de l’absence de certains types de revêtements sédimentaires.



(a)



(b)

Figure 6 : Bassin de la Marne : inventaires typologiques aux niveaux 2 (fig. 6a) et 3 (fig. 6b) de la classification géomorphologique.

Caractérisation et distribution des régimes hydrologiques

Les figures suivantes se rapportent aux données utilisées pour caractériser les zones humides riveraines en fonction des échanges hydriques avec leur environnement. Pour caractériser les transferts lents (régime dominé par les apports souterrains), nous avons retenu la perméabilité de l'encaissant de la zone humide (figure 7). Pour caractériser les transferts rapides (régime dominé par les apports atmosphériques et de surface), nous avons retenu une caractéristique liée à la partie superficielle du bassin versant au point considéré de la vallée alluviale (fig. 8). Le temps de concentration

correspondant est défini comme le temps mis par une particule d'eau provenant de la partie la plus éloignée du point d'observation pour atteindre ce point (Roche, 1963). Plus ce temps est faible plus la vitesse de transfert est importante.

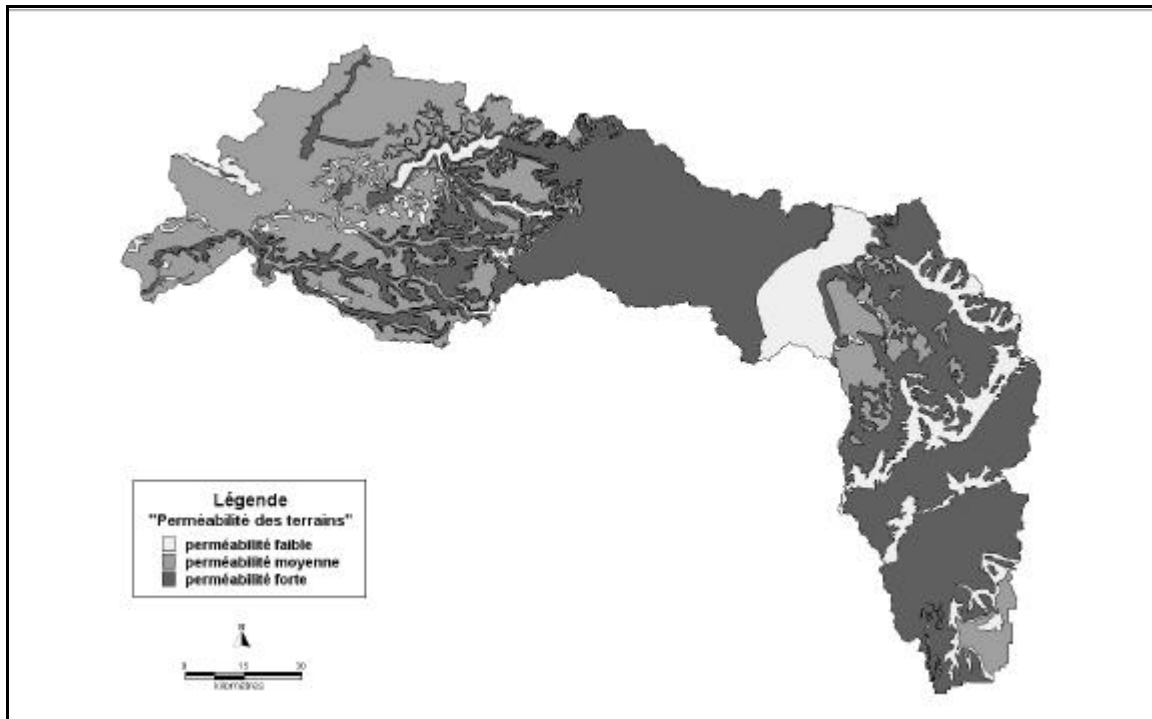


Figure 7 : Perméabilité des terrains (source : Albinet, 1967).

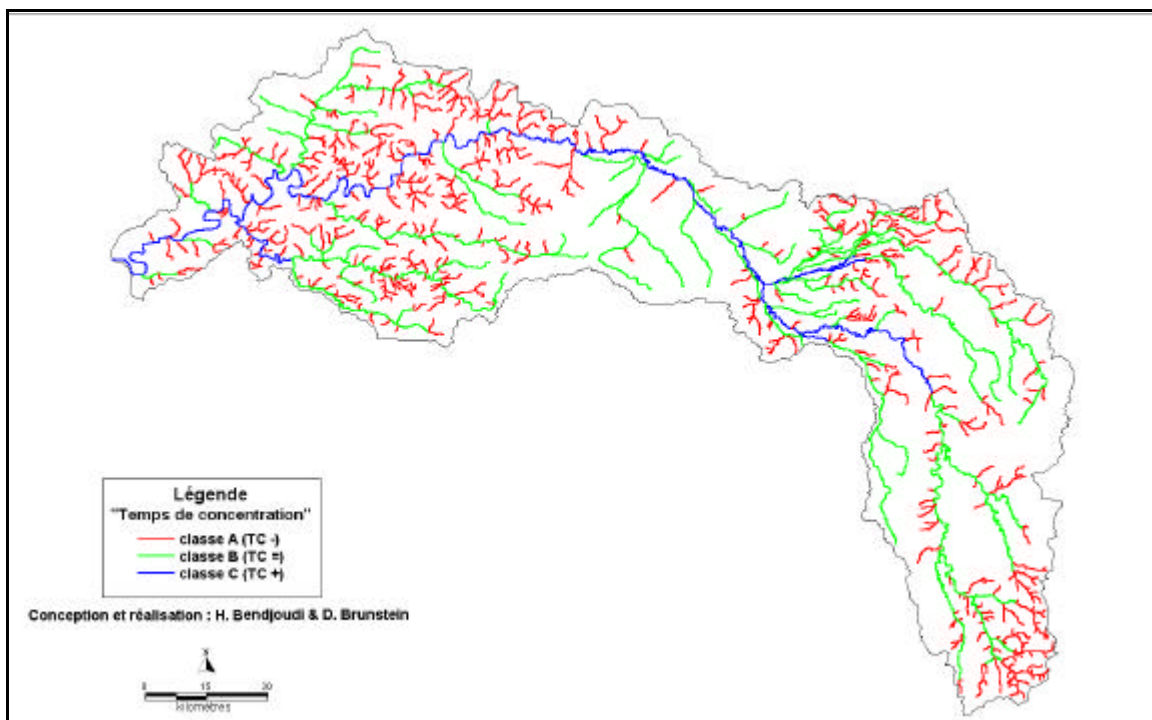


Figure 8 : Temps de concentration.

La figure 9 se rapporte à la distribution des régimes hydrologiques. Le type 1 correspond à des apports atmosphériques et de surface dominants, le type 2 à des apports mixtes et le type 3 à des apports souterrains dominants. Cet inventaire est issu d'un traitement réalisé à partir des deux couvertures précédentes.

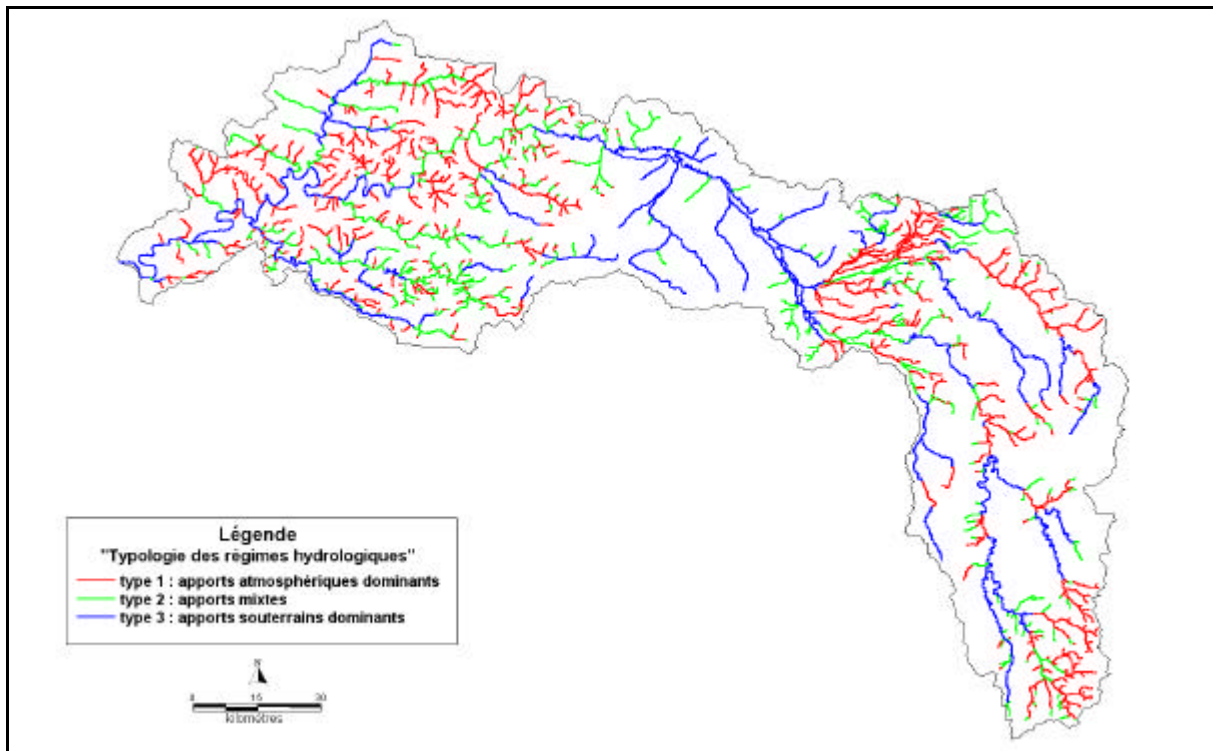


Figure 9 : Typologie des régimes hydrologiques.

Relativement aux approches qui privilégient une logique de type amont - aval *stricto sensu* dans laquelle se succèdent : (1) des apports atmosphériques dominants, (2) des apports mixtes et (3) des apports souterrains dominants ; ce document met en évidence, dans de nombreux cas, l'existence de gradients inverses. C'est le cas, par exemple, sur le Grand et le Petit Morin ainsi que sur certains affluents de l'Ourcq où prédominent dès les têtes de bassins des apports souterrains dominants et/ou des apports mixtes. C'est là un point important pour le fonctionnement général des hydrosystèmes fluviaux. En effet, les secteurs de déversement des eaux de débordement via les cours d'eau (apports atmosphériques dominants) sont des zones où vont sédimenter une grande partie des MES et des produits associés. Ce n'est pas le cas des secteurs soumis à des inondations phréatiques.

Couplage des données géomorphologiques et hydrologiques.

La figure suivante (figure 10) donne l'inventaire typologique réalisé en couplant le niveau 2 de la classification géomorphologique et la classification hydrologique. Douze sous - systèmes codés A à L, qui présentent des caractéristiques communes aux plans hydrologique et géomorphologique, sont discriminés à ce niveau.

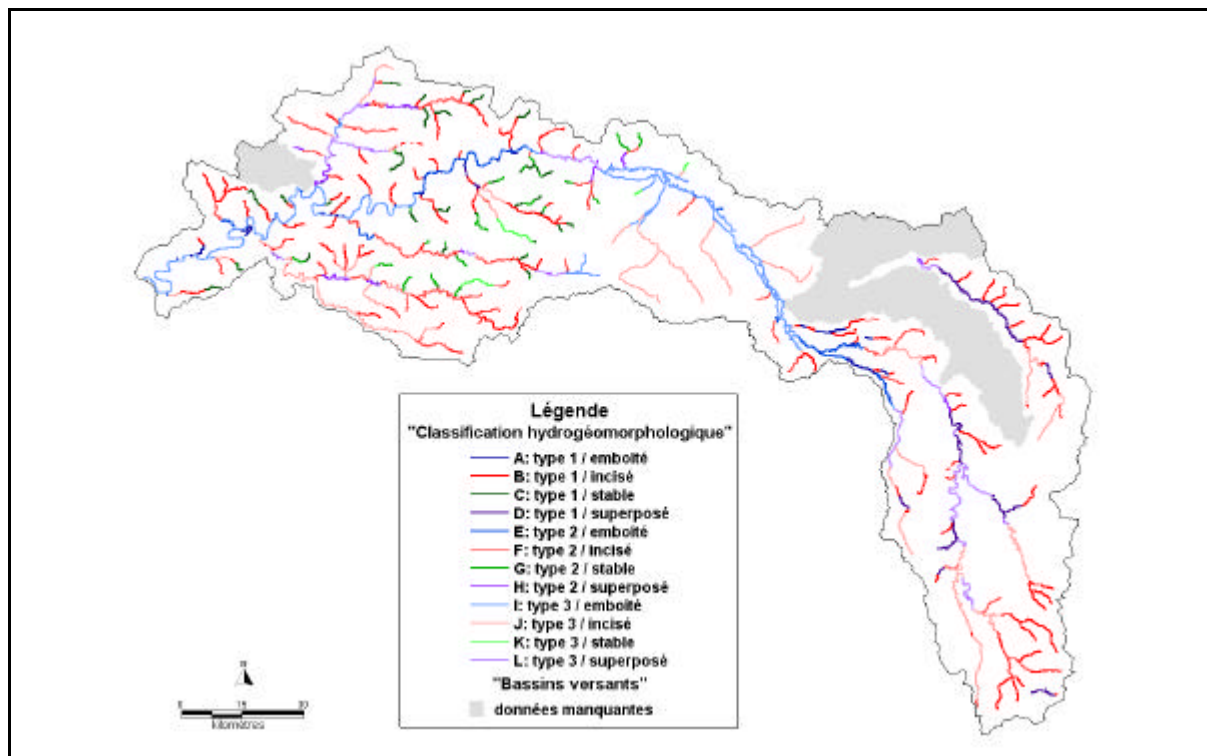


Figure 10 : classification hydrogéomorphologique (inventaire typologique de niveau 2).

2. Le rôle des zones humides riveraines dans la rétention de l'azote d'origine diffuse.

Les bilans d'azote réalisés à l'échelle de grands réseaux hydrographiques révèlent qu'une part significative des nitrates exportés des sols agricoles est éliminée par dénitrification, au niveau des zones humides ripariennes.

L'étude de la composition isotopique naturelle des nitrates offre un moyen de caractériser, et de quantifier ce processus de dénitrification, et ainsi de confirmer ces bilans, puisque le processus de dénitrification riparienne s'accompagne d'un enrichissement isotopique parfaitement détectable de l'azote des nitrates résiduels. L'outil isotopique est en fait assez bien adapté à l'étude de grands bassins hydrographiques pour lesquels il peut fournir une estimation minimale de la rétention riparienne intégrée sur l'ensemble du linéaire de cours d'eau en amont de la station échantillonnée.

Nous allons montrer ici que les estimations qui peuvent être faites de la dénitrification riparienne par ces méthodes en divers sites du bassin de la Marne sont cohérentes avec la classification géomorphologique des corridors fluviaux, ce qui permet de proposer un estimateur de la rétention riparienne des nitrates à partir cette classification.

2.1. Mise en évidence et estimation de la rétention riparienne des nitrates

De nombreux travaux dans la littérature ont montré le rôle important que peuvent jouer les zones humides riveraines comme site de dénitrification des nitrates diffus d'origine agricole (Wassenaar *et al.*, 1995; Battaglin *et al.*, 1997; Cey *et al.*, 1999; Hill *et al.*, 2000). Ces zones, constituent ainsi une sorte de filtre naturel qui élimine une partie des nitrates en provenance du bassin versant, avant même que ceux-ci ne rejoignent les eaux de surface (figure 11). La plupart de ces travaux consiste en des études de cas, portant sur des sites locaux, à partir desquels il est fort difficile d'extrapoler à l'échelle du bassin versant. Seuls Pinay *et al.*, (2000) en établissant une relation entre la dénitrification potentielle des alluvions constitutives des zones riveraines et leurs caractéristiques de granulométrie et de contenu organique franchissent une étape vers une telle extrapolation.

L'approche que nous avons adopté est différente parce qu'elle part d'emblée de l'échelle du bassin : nous avons tenté de déduire la rétention riparienne d'un bilan d'azote de l'hydrosystème.

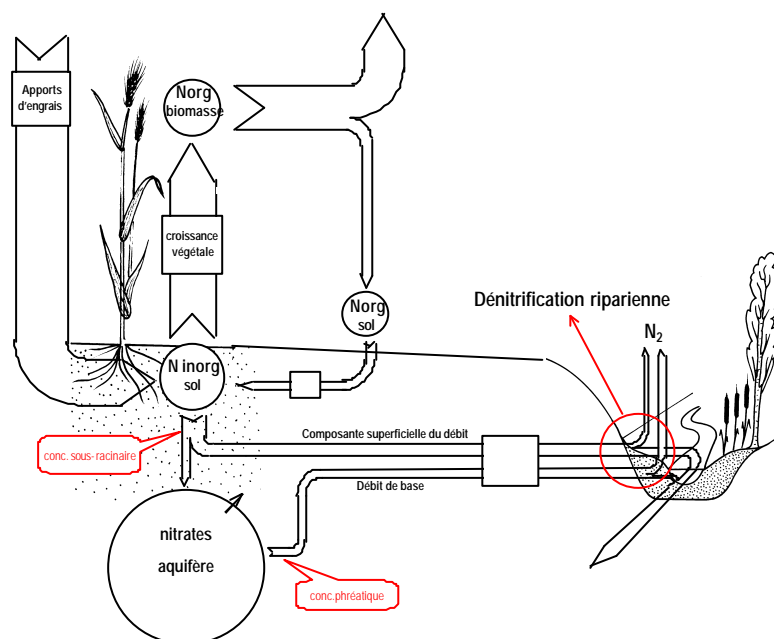


Figure 11. Schéma de principe du mode d'action des zones humides riveraines dans la rétention des nitrates diffus d'origine agricole.

2.1.1 Principes de l'établissement des bilans de rétention riparienne

On peut considérer, et c'est le principe de calcul du modèle SENEQUE, que le débit des cours d'eau, et donc leur teneur en nitrates résulte de la somme de 2 composantes :

- . le ruissellement superficiel et l'écoulement de sub-surface.
- . l'écoulement phréatique de base.

En attribuant une concentration constante en nitrates à chacune de ces 2 composantes, on rend bien compte des variations saisonnières de concentrations nitriques observées.

La teneur en nitrates des composantes les plus superficielles du débit représente la concentration dans l'eau du sol de la zone sous-racinaire, en relation directe avec les pratiques agricoles.

La concentration associée au débit de base est la teneur moyenne des aquifères contributifs, qui intègre éventuellement l'effet des pratiques agricoles sur un grand nombre d'années, et ne sont donc pas nécessairement en équilibre avec les pratiques actuelles.

Cependant, comme on le voit sur l'exemple bien documenté du Grand Morin, les concentrations observées dans la rivière sont sensiblement inférieures à celles attendues du mélange des eaux souterraines et superficielles, ce qui permet d'estimer une rétention riparienne de l'ordre de 25% sur les flux superficiels, et de l'ordre de 50% sur les flux phréatiques (figure 12).

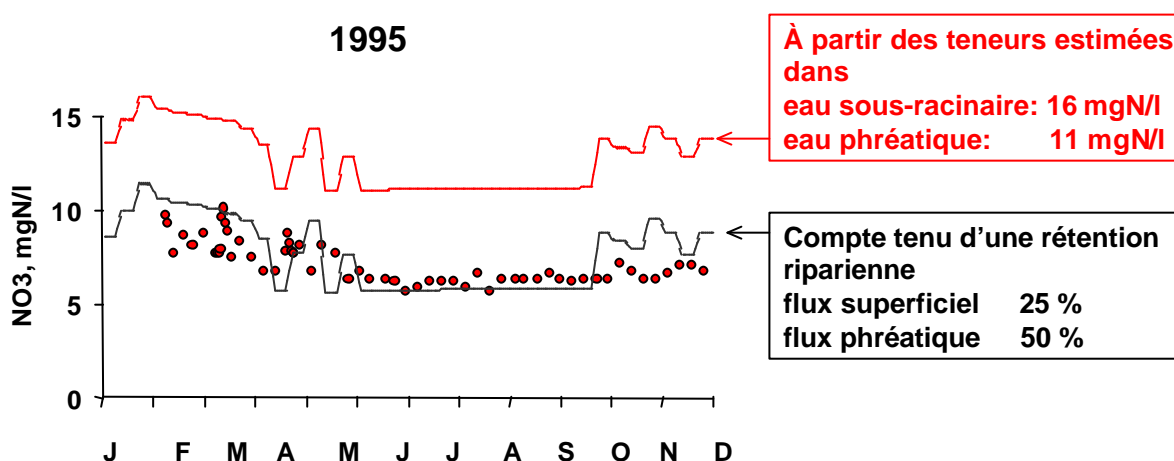


Figure 12. Simulation des variations saisonnières de la concentrations en nitrates à l'exutoire du bassin versant du Grand Morin, pour l'année 1995.

2.1.2 Estimation de la rétention riparienne en diverses stations du bassin de la Marne

Cette approche de bilan d'azote a été étendue à toutes les stations du bassin de la Marne pour lesquelles nous disposons de suffisamment de mesures de concentration en nitrates, ainsi que d'informations sur les teneurs dans les eaux de surface et les eaux souterraines qui les alimentent. Nous avons ainsi déterminé un taux de rétention riparienne pour une série de sous-bassins correctement documentés (figure 13). Selon les bassins, la rétention d'azote varie de 25% à 80%. La variabilité est la plus forte pour les plus petits ordres; à l'échelle de l'ensemble du bassin de la Marne, la rétention est de l'ordre de 50-60% (figure 15).

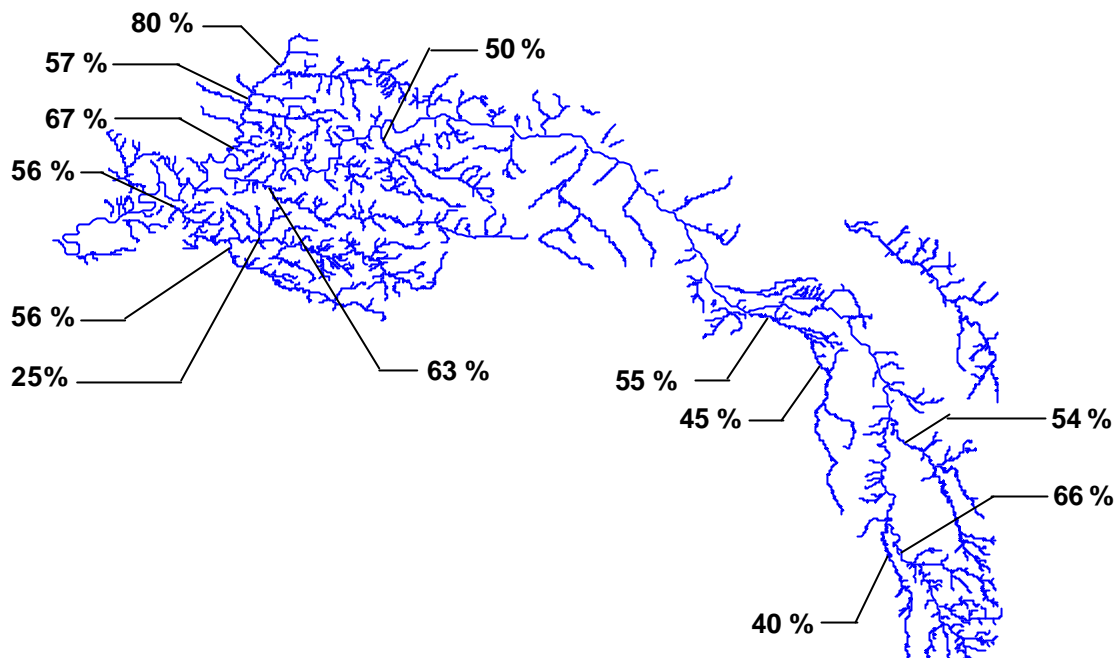


Figure 13. Carte des estimations de rétention d'azote par dénitrification riparienne pour des sous-bassins de la Marne.

2.1.3 Rôle du drainage agricole

Le drainage agricole est de toute évidence un facteur important en prendre en compte dans la variabilité de la rétention riparienne. Le drainage aboutit en effet à un court-circuiter les zones filtres riveraines potentiellement dénitrifiantes. L'extension du drainage agricole dans le bassin de la Seine, tel qu'il peut être déduit des données disponibles dans le RGA de 1988 est présenté dans la figure 14.

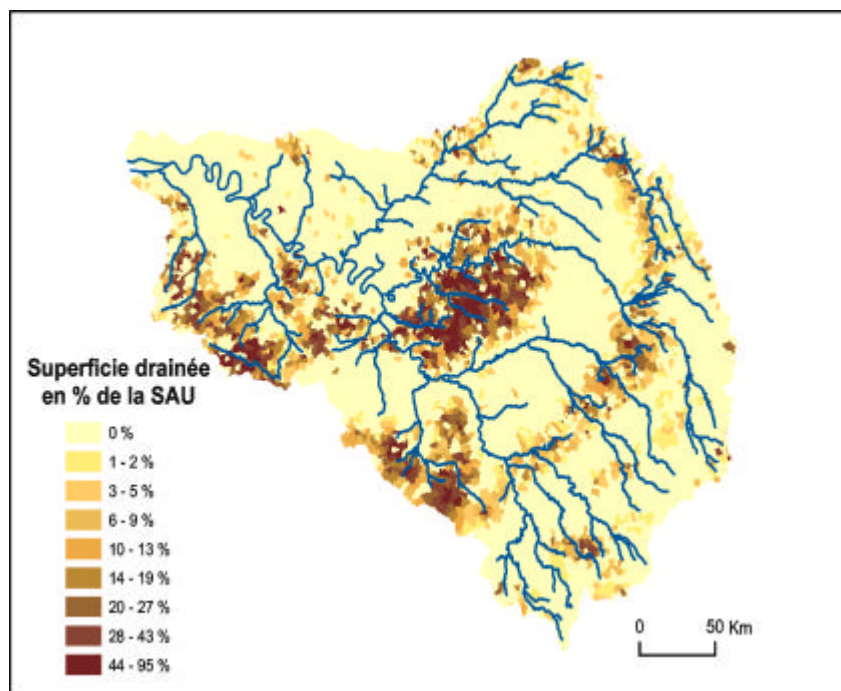


Figure 14. Carte de l'intensité du drainage agricole sur l'ensemble du bassin de la Seine (RGA 1988).

La figure 15, qui regroupe l'ensemble de nos estimations de rétention riparienne (y compris sur des bassins situés en dehors du bassin de la Marne), montre à la fois l'effet de lissage des hétérogénéités locales lorsqu'augmente la taille du bassin versant, et, sur les plus petits bassins, l'effet de diminution de la rétention du drainage.

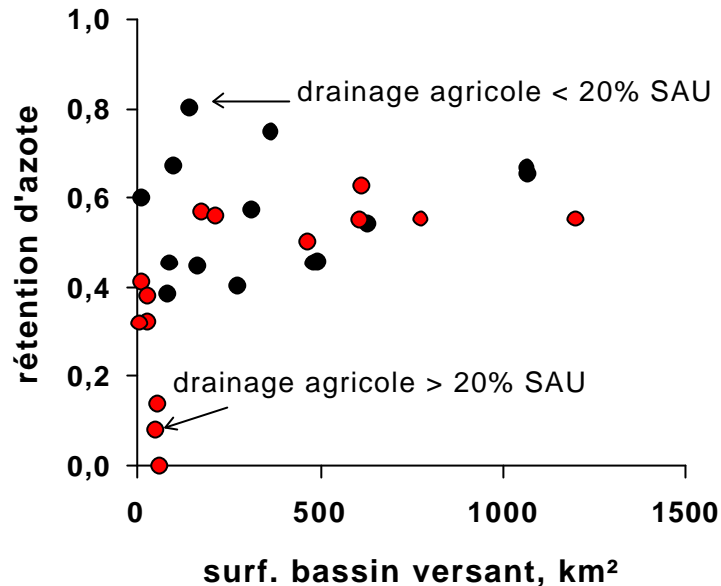


Figure 15. Relation entre la rétention d'azote et la taille du bassin versant pour des bassins avec et sans drainage agricole.

2.2. Utilisation de la composition isotopique des nitrates comme marqueur de dénitrification riparienne

2.2.1 Principes

Au cours du processus de dénitrification en milieu fermé, la diminution des teneurs en nitrate s'accompagne d'une augmentation de la composition isotopique des nitrates résiduels, $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ ‰. Il existe dans ce cas une relation logarithmique entre la concentration en nitrates et leur composition isotopique associée (Mariotti, 1982) :

$$d_s = d_{s_0} + e \ln C/C_0$$

où C et C_0 sont respectivement la concentration résiduelle et initiale des nitrates, et δ_s et δ_{s_0} sont respectivement la composition isotopique du substrat au temps considéré et au temps initial des nitrates.

e est le facteur d'enrichissement isotopique du processus de dénitrification, évalué à - 18 ‰.

De nombreuses études sur des sites locaux ont montré que le passage d'un écoulement d'eau souterraine riche en nitrates à travers une zone humide riparienne active en ce qui concerne la dénitrification, s'accompagne effectivement d'une augmentation de la composition isotopique de l'azote des nitrates résiduels (Böttcher *et al.*, 1990 ; Aravena *et al.*, 1998 ; Battaglin *et al.*, 1998 ; Kendall *et al.*, 1998).

Au contraire, nous avons montré que la dénitrification benthique, ayant place dans le lit même des cours d'eau, n'est pas accompagnée d'un signal isotopique très marqué, parce que le processus

limitant est, dans ce cas, la diffusion des nitrates à travers l'interface eau-sédiment, processus qui n'est pas discriminant du point de vue isotopique (Sebilo *et al.*, in press).

La mise en évidence d'un enrichissement isotopique du pool de nitrates dans les cours d'eau, par rapport à la composition des sources de nitrates qui le constitue peut donc constituer une confirmation du rôle dénitrifiant des zones humides riveraines, indépendante de la méthode des bilans d'azote.

2.2.2 Anomalie isotopique des nitrates dans les eaux de surface

L'analyse de la composition isotopique des nitrates des eaux de surface en période estivale dans les bassins du Grand Morin, du Petit Morin et de l'Ourcq montre en effet une fréquente anomalie positive en ^{15}N , par rapport aux eaux de drains ou aux eaux de captages souterrains (figure 16).

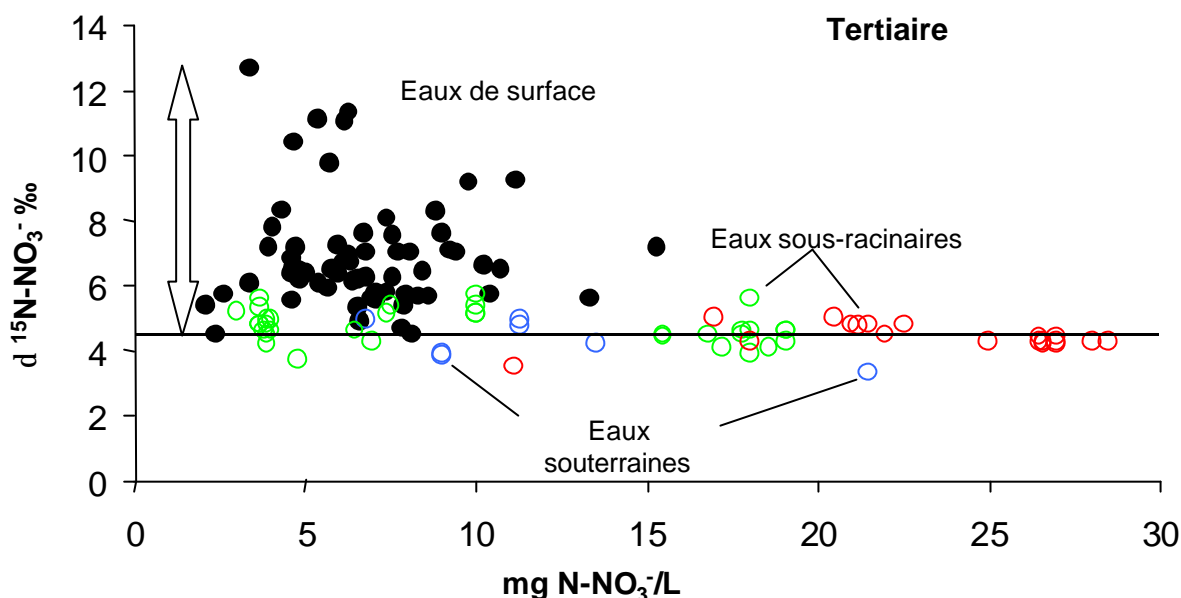


Figure 16. Comparaison des concentrations et compositions isotopiques de l'azote des nitrates des cours d'eau d'ordre 1 à 4 des régions tertiaires du bassin de la Marne avec celles des eaux de drains agricoles ou d'eaux de captage souterrains. (Campagnes d'échantillonnage en été 1999, 2000 et 2001).

Notons qu'une contamination par des nitrates d'origine domestique, dont on sait qu'ils sont caractérisés par des valeurs élevées de $\delta^{15}\text{N}$ pourrait elle aussi provoquer une anomalie isotopique par rapport aux sources diffuses de nitrates. Nous pouvons toutefois exclure ce biais, dans la mesure où notre échantillonnage s'est limité à des cours d'eau ne drainant que des zones de faible densité de population (<25 hab/km²) où la contribution domestique aux flux d'azote écoulés est marginale. Les anomalies isotopiques confirment donc bien la réalité du processus de dénitrification riparienne.

2.2.3 Relation entre anomalie isotopique et rétention

Dans la situation théorique où le filtre riparien est réparti de façon homogène, retenant toujours la même fraction du flux de nitrates qui le traverse avant d'atteindre le cours d'eau, on peut attendre une relation, dérivant de la formule de Rayleigh, permettant de relier l'anomalie isotopique au pourcentage de rétention riparienne globale (Sebilo *et al.*, in press). Dans ce cas idéal, la rétention riparienne globale se déduit directement de l'anomalie isotopique (relation G=1 dans la figure 17).

Mais cette hypothèse d'une distribution uniforme de l'activité des zones ripariennes est irréaliste. En réalité, la dénitrification riparienne se produit au niveau de « points chauds localisés » caractérisés par la présence de matière organique en abondance, dans les dépôts alluviaux (Hill *et al.*, 2000). Dans le cas extrême où la dénitrification est complète au niveau de ces points chauds et qu'aucune dénitrification ne se produit ailleurs, aucun enrichissement isotopique n'est observé, quelle que soit l'importance de la rétention globale.

Il faut alors considérer une distribution hétérogène du filtre riparien, tant au niveau stationnel (distribution hétérogène des microsites de dénitrification au sein de la zone humide riveraine), qu'au niveau du bassin (distribution hétérogène des zones humides dans le chevelu hydrographique). Considérons ainsi une situation théorique où il existe une fraction (G) du flux de nitrates provenant du bassin traversant une zone riparienne active, et la fraction complémentaire ($1-G$) correspondant à la part de nitrates directement transférée dans le chevelu, c'est à dire court-circuitant les zones humides ripariennes actives (figure 16). On montre alors facilement que le signal isotopique résultant est toujours plus faible, à rétention globale identique, que celui qui aurait résulté d'une dénitrification homogène. Par exemple, dans une situation théorique où $1/4$ du flux nitrique court-circuite les zones actives de dénitrification, et que celles-ci réduisent totalement le flux restant, la rétention globale sera de 75% sans qu'aucune anomalie isotopique ne soit détectable. Si la réduction dans les zones actives est de $2/3$, la rétention globale sera de 50 %, mais avec un signal isotopique plus faible que celui prévu pour cette rétention apr la formule de Rayleigh.

A cause de l'hétérogénéité de la distribution du processus de dénitrification à l'échelle du bassin versant, l'anomalie isotopique ne permet donc qu'une estimation par défaut de la rétention riparienne.

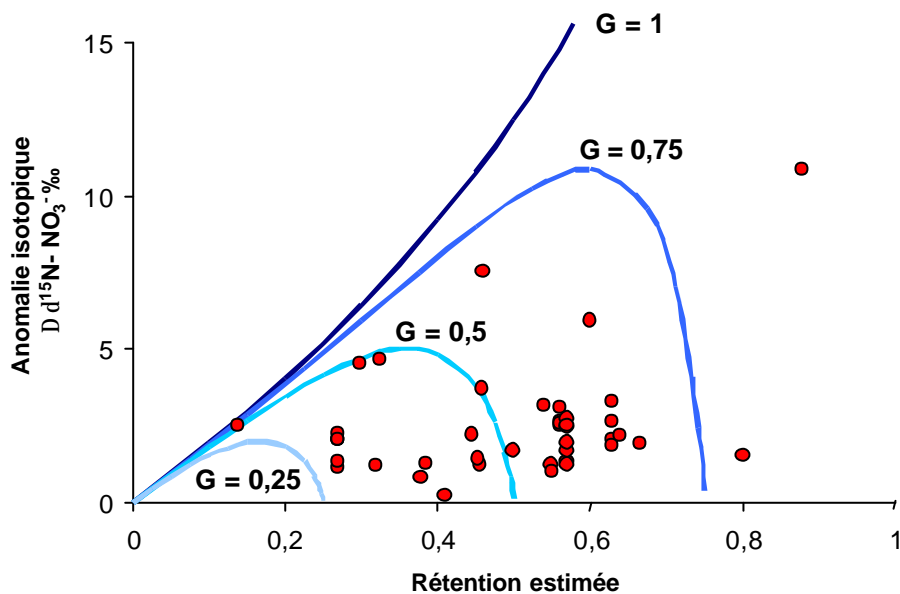


Figure 16. Relations théoriques entre l'anomalie isotopique des nitrates résiduels et la rétention riparienne globale, pour diverses valeurs du paramètre G , indiquant la part du flux nitrique court-circuitant les zones actives de dénitrification.

Les observations d'anomalie isotopique dans les nitrates résiduels des cours d'eau du Grand Morin, du Petit Morin et de l'Ourcq sont également portées en fonction de la rétention riparienne déduite d'un bilan des nitrates en ces stations.

Avec cette restriction, les mesures d'anomalie isotopique réalisées sur les eaux de surface du bassin de la Marne sont compatibles avec les estimations de rétention riparienne déduite des bilans d'azote.

2.3. Relation entre la rétention riparienne et la typologie géomorphologique des zones humides riveraines

Notre objectif est ici de mettre en relation les estimations de rétention riparienne disponible sur les sous-bassins de la Marne, discutées ci-dessus, avec la typologie géomorphologique des zones humides riveraines des cours d'eau du chevelu hydrographique de ces sous-bassins.

2.3.1 Principes

La méthode semi-empirique utilisée a consisté à bâtir un estimateur de rétention riparienne traduisant la distribution des différents types de fond de vallées dans le linéaire du bassin, avec leur aptitude propre à la dénitrification, tout en tenant compte de l'effet du drainage agricole.

L'estimateur (Ret) est défini de la manière suivante :

$$\text{Ret} = \sum_i (\text{Typ}_i \cdot \text{coef}_i) \cdot (1 - \text{drainage})$$

où Typ_i représente la proportion de fond de vallée de type i dans le linéaire du réseau
 coef_i est un coefficient représentant l'aptitude de chaque classe i à la rétention d'azote
drainage représente la proportion de la surface du bassin versant soumise au drainage agricole.

La forme du terme de drainage traduit le fait que les flux transitant par un système de drains court-circuitent les zones humides riveraines, quel que soit leur pouvoir dénitrifiant.

Le coefficient d'aptitude à la dénitrification de chaque classe typologique a été déterminé au départ sur base des caractéristiques propres ces classes : ainsi on attribue un coefficient faible aux fonds de vallée incisées dans la roche, alors qu'un coefficient plus élevé est attendu des systèmes superposés à revêtement organique. La valeur de ces coefficient est ensuite ajustée systématiquement pour tester la relation entre l'estimateur et la rétention riparienne dans le jeu de données disponible.

2.3.2 Calibration de l'estimateur

La calibration de l'estimateur a été effectuée sur le jeu de données (encore limité à ce stade de l'étude) disponible sur le bassin de la Marne (figure 17).

Il conduit à affecter les coefficients de rétention suivant aux différents types de zones humides riveraines :

système incisé dans la roche en place	0.2
système incisé à revêtement minéral	0.5
système emboîté à revêtement minéral	1
système emboîté à revêtement mixte	1
système stable à revêtement minéral	0.5
système superposé à revêtement minéral	0.75
système superposé à revêtement mixte	2.5
système superposé à revêtement organique	3

Une relation satisfaisante est alors obtenue entre l'estimateur ainsi défini et l'évaluation de la rétention riparienne déduite des bilans d'azote ($r^2=0.6$) (Figure 18).

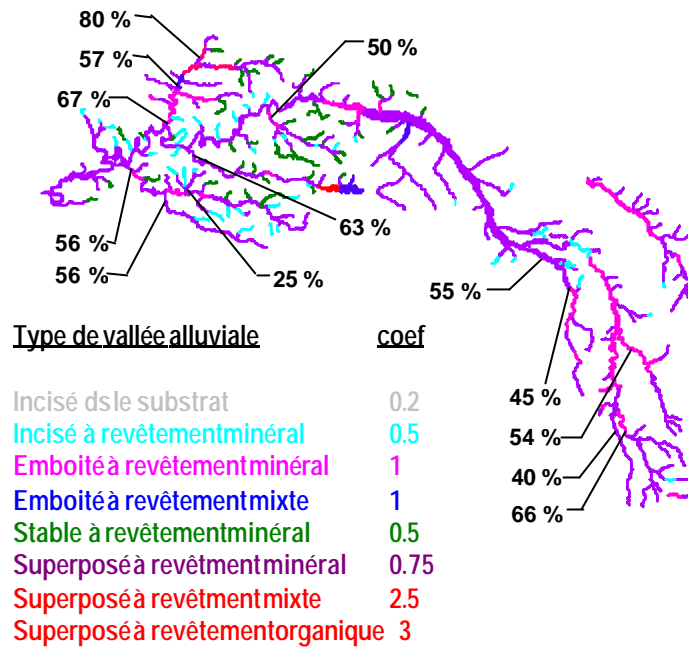


Figure 17. Jeu de données disponible sur la Marne pour la calibration des coefficients de l'estimateur de rétention riparienne.

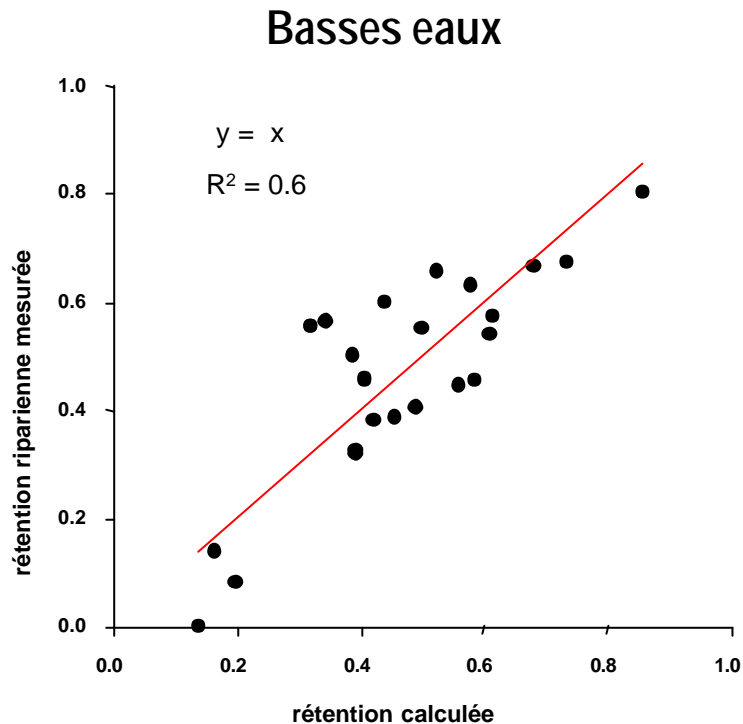


Figure 18. Calibration de l'estimateur de rétention riparienne par rapport aux estimations par bilan de la rétention effective.

Cette analyse, quoiqu'encore préliminaire, démontre la pertinence de la typologie géomorphologique des zones humides par rapport à leur fonction de dénitrification.

Cette démarche devra, à terme, être étendue à la totalité du bassin de la Seine en intégrant le niveau 4 du système de classification hydrogéomorphologique. L'intégration de ce niveau est en effet importante, dans la mesure où, il prend en compte l'hétérogénéité des faciès hydrogéomorphologiques dans les différents types de zones humides riveraines ainsi que de nombreux facteurs d'altération dus aux activités humaines.

3. Discussion et conclusion

Le travail réalisé a donc permis de proposer une typologie fonctionnelle des zones humides riveraines des cours d'eau, basée sur les conditions de la géomorphologiques de la mise en place des formations alluviales et sur leur fonctionnement hydrogéologique. Les données nécessaires à cette typologie ont été rassemblées sur le bassin de la Marne sur lequel la démarche a été menée à son terme.

Parrallèlement, sur le même bassin de la Marne, l'importance d'une des fonctions essentielles des zones humides riveraines, l'épuration des flux nitriques en provenance du bassin versant, a pu être mise en évidence et quantifiée. Une approche par bilan sur des petits et moyens bassins versants permet montre une rétention riparienne de 20 à 80 % de l'azote en provenance des eaux souterraines et superficielles. Les mesures de composition isotopiques confirment l'existence d'une processus de dénitrification riparienne.

Nous avons montré d'autre part qu'il est possible d'estimer l'importance de la dénitrification riparienne à partir de la distribution des classes typologiques de zones humides riveraines dans le linéaire d'un bassin versant, à condition de prendre en compte l'extension du drainage agricole, qui court-circuite le rôle filtre de ces zones. Ceci démontre la pertinence de la typologie géomorphologique proposée en terme d'évaluation des fonctionnalités des zones riveraines.

Les fonctions des zones humides recouvrent un ensemble très varié de processus physico - chimiques et biologiques (Fustec *et al.*, 1996). Elles peuvent être regroupées en quatre catégories : (1) fonctions hydrologiques vis - à - vis du régime des eaux tels que le contrôle des crues ou la recharge des nappes ; (2) fonctions biogéochimiques intervenant sur la qualité des eaux (stockage des sédiments, rétention et/ou élimination des nutriments et des polluants) ; (3) fonctions d'habitat pour la flore et la faune et (4) fonctions de récréation.

L'objectif est, à terme, d'évaluer, outre la fonction d'élimination de la pollution nitrique diffuse, trois autres fonctions des zones humides riveraines : la régulation des crues, la rétention des particules et des polluants associés, et le maintien des peuplements piscicoles. La démarche retenue pour ces évaluations s'appuie (1) sur l'analyse des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des corridors fluviaux ainsi que sur l'analyse de leur niveau d'altération via le SIG et (2) sur la sélection d'un ensemble de critères. Validés par des études scientifiques, ces critères seront affectés d'un coefficient de présence ou d'importance fonctionnelle. Sur cette base, on pourra ensuite déterminer l'existence de chaque fonction dans les différents secteurs discriminés par la classification hydrogéomorphologique et estimer leur amplitude de réalisation par un indice (Brinson *et al.*, 1995). Le tableau 1 montre les critères retenus pour évaluer les fonctions de régulation des crues et de rétention et d'élimination des nitrates.

Tableau 1. Critères retenus pour évaluer les fonctions de régulation des crues et de rétention et d'élimination des nitrates

REGULATION DES CRUES	RETENTION ET ELIMINATION DES NITRATES
Largeur de la plaine d'inondation (Lp)	Apports d'eau de ruissellement et de subsurface (Erss)
Pente de la plaine d'inondation (Pp)	Fréquence des débordements (Fc)
Densité des chenaux et des annexes hydrauliques (Dca)	Lessivage des nitrates (Ln)
Macrotopographie de la plaine d'inondation (Tp)	Macrotopographie de la plaine d'inondation (Tp)
Connexion lit mineur/plaine d'inondation (endiguement) (Ccp)	Revêtements de tourbe ou d'argile (Rta)
Fréquence des débordements (Fc)	Sinuosité du lit mineur [transferts souterrains](SI)
Connexion à un aquifère profond (Ap)	Régulation des niveaux d'eau [transferts nappe - rivière](Ne)
Temps de transfert (Tt)	Type de végétation (V)
Type de végétation (rugosité) (V)	Drainage agricole (Da)
Obstacles construits (Oc)	

La fonction de régulation des crues est définie comme la capacité d'une zone humide à réduire les débits de pointe de crues et donc à modérer leurs effets en aval. Cette fonction est assurée par le processus de laminage dû au stockage et/ou au ralentissement des eaux de débordement en amont de la zone considérée (Oberlin, 2000). Il est important, par ailleurs, de noter que cette fonctionnalité a des incidences sur d'autres fonctions des zones humides comme la qualité des eaux ou les habitats pour les biocénoses. Pour estimer la fonction de régulation des crues, dix critères seront retenus. Basés sur des caractéristiques qui contrôlent la manifestation de cette fonction, ces critères permettent de préciser la nature des flux entrant dans la zone humide (connexion avec un aquifère, temps de transfert) et sa sensibilité au risque d'inondation (fréquence des débordements). Ils interviennent également sur les capacités potentielles de stockage d'eau de la zone humide (largeur et macrotopographie de la plaine, densité des chenaux et des annexes hydrauliques), sur les vitesses d'écoulement (pente de la plaine, type de végétation, obstacles construits) ainsi que sur les échanges transversaux entre le cours d'eau et sa plaine (endiguement). Ces critères seront renseignés quantitativement ou de façon semi-quantitative et affectés d'un coefficient entre 0 et 1. A titre d'exemple, l'indice pour estimer la fonction de régulation des crues est le suivant :

$$F = [(Lp + Pp + Dca + Tp + Ap + Tt + V + Oc)]^{/8} * Fc * Ccp]^{1/3}$$

Il varie de 0 (absence de la fonction) à 1 (présence de la fonction, réalisation forte).

En conclusion, l'approche proposée permet de caractériser la structure hydrogéomorphologique des zones humides riveraines des cours d'eau et d'identifier des secteurs fonctionnels à différentes échelles spatiales (Amoros *et al.*, 1987). Basée sur un jeu de variables relativement aisé à acquérir à partir des documents cartographiques et des bases de données disponibles, cette méthode est plus souple à mettre en œuvre qu'une approche analytique classique centrée sur l'extraction et l'exploration statistique d'un ensemble de variables caractérisant les couloirs fluviaux (Gaillard, 1999).

Permettant de préciser la variabilité du type zone humide riveraine défini par Brinson *et al.* (1993, 1994), le système de classification proposé dans cette étude et la caractérisation multi-échelles qui en découle sont enfin susceptibles d'être appliqués à d'autres bassins versants présentant des contextes hydrogéomorphologiques similaires ainsi que des trajectoires d'évolution comparables. Le transfert à d'autres bassins, dans des contextes différents, peut également être envisagé sous réserve de compléter le système de classification. Ceci peut être fait en intégrant de nouvelles modalités aux variables considérées à chaque niveau du système typologique.

Appliqués, à terme, à l'échelle du bassin de la Seine, les inventaires typologiques et les évaluations fonctionnelles fourniront une information cohérente sur les caractéristiques physico-chimiques, biologiques et anthropiques des hydrosystèmes fluviaux ainsi que sur leur capacité à réaliser des fonctions vis-à-vis du régime et de la qualité des eaux ou des habitats pour les biocénoses. Basés sur les connaissances scientifiques actuelles, les critères retenus pour les évaluations et les indices proposés permettront d'estimer ces fonctions en terme d'ordre de grandeur (Adamus & Stockwell, 1983 ; Brinson *et al.*, 1995). De ce point de vue, ces évaluations et les typologies fonctionnelles qui en découleront fourniront aux gestionnaires et aux planificateurs un outil de synthèse permettant de résoudre les problèmes liés aux prises de décision en matière de gestion voire de réhabilitation et de restauration des zones humides riveraines.

4. Références

- ADAMUS P. R. & STOCKWELL L.T. (1983). *A method for wetland functional assessment*, vol. I: Critical review and evaluation concepts, vol. II: FHWA assessment method, US Département of Transportation, Federal Highway Administration Reports FHWA - IP - 82 - 23 & FHWA - IP - 82 - 24, Washington DC, 176 p. & 134 p..
- AMOROS C., ROUX A. L., REYGROBELLET J. L., BRAVARD J. P. & PAUTOU G. (1987). A method for applied ecological studies of fluvial hydrosystems. *Regulated Rivers*. 1, 17-36.
- AMOROS C. & PETTS G. E. (1993). *Hydrosystèmes fluviaux*, Paris : Masson, 300 pp.
- ARAVENA R., EVANS M.L. & CHERRY J.A. (1993). Stable isotopes of oxygen and nitrogen in source identification of nitrate from spic systems. *Ground water*. 31 (2) : 180-186.
- BATTAGLIN W.A., KENDALL C., GOOLSBY D.A. & BOYER L.L. (1998). Plan of study to Determine of the Isotope ratios d15N and d18O can reveal the sources of nitrate discharged by the Mississippi river into the Gulf of Mexico. US Geological Survey open-file report pp: 97-230.
- BENDJOUDI H. & DE MARSILY G. (2000). Le fonctionnement hydrologique des zones humides. In *Fonctions et valeurs des zones humides* (ed: Fustec E. & Lefeuvre J. C.). Dunod : 61-81.
- BERNOT V., CALLAND V., BRAVARD J. P. & FOUSSADIER R. (1996). La sectorisation longitudinale du Vidourle (Gard - Hérault), *Revue de Géographie de Lyon*, 4, 323 - 339.
- BILLEN G. & GARNIER J. (2000). Nitrogen transfers through the Seine drainage network : a budget based on the application of the Riverstrahler model, *Hydrobiologia*, 410, 139 - 150.
- BOËT P. (2000). Fonctions des zones humides pour les poissons, In *Fonctions et valeurs des zones humides* (ed: Fustec E. & Lefeuvre J. C.). Dunod : 245-259.
- BÖTTCHER J., STREBEL O., VOERKELIUS S. & SCHMIDT H.L. (1990). Using isotope fractionnement of nitrate-nitrogen and nitrate-oxygen for evaluation of microbial denitrification in a sandy aquifer. *Journal of hydrologie*. 114 : 413-424.
- BRINSON M. M. (1993). A hydrogeomorphic classification for wetlands, USACE, Waterways Experiment Station, Technical Report WRP - DE - 4, 79 pp.
- BRINSON M. M., KRUCZYNSKI W., LEE L. C., NUTTER W. L., SMITH R. D. & WHIGHAM D. F. (1994). Developing an approach for assessing the functions of wetlands, In *Global wetlands : old world and new* (ed: Mitsch W. J.), pp 615-624. Elsevier, Amsterdam.
- BRINSON M. M., HAUER F. R., LEE L. C., NUTTER W. L., RHEINHARDT R. D., SMITH R. D. & WHIGHAM D. F. (1995). A guidebook for application of hydrogeomorphic assessments to riverine wetlands, USACE, Waterways Experiment Station, Technical Report WRP - DE - 11, 113 pp.
- CEY EE., RUDOLPH D.L., ARAVENA R. & PARKIN R. (1999). Role of the riparian zone in controlling the distribution and fate of agricultural nitrogen near a small stream in southern Ontario. *Journal of Contaminant Hydrology*. 37 : 45-67.
- CHOW V. T., MAIDMENT D. R. & MAYS L. W. (1988). *Applied hydrology*, New York : Mc Grow Hill ed..
- DZANA J. G. & GAILLARD S. (1995). Zones inondables et topographie des lits majeurs : l'exemple de l'Aube et de la Seine supérieure. *Annales de Géographie*. 191-200, 581 - 582.
- FUSTEC E., FROCHOT B., BENDJOUDI H. & THIBERT S. (1996). Les fonctions des zones humides : revue bibliographique, Paris : Agence de l'Eau Seine - Normandie, Université Paris 6, 144 pp.
- FUSTEC E., GREINER I., SCHANEN O., GAILLARD S. & DZANA J. G. (1999). Les zones humides riveraines : des milieux divers aux fonctions multiples. In *La Seine en son Bassin : Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé* (ed : Meybeck M., de Marsily G., Fustec E.), pp 211-262. Elsevier, Paris.
- FUSTEC E. & LEFEUVRE J. C. (2000). *Fonctions et valeurs des zones humides*, Paris : Dunod, 426 pp.
- GAILLARD S. (1999). L'Aube : dynamique morphosédimentaire holocène et fonctionnement actuel d'un hydrosystème à faible énergie. *Thesis* : Université Paris IV, 238 pp.

- GAILLARD S., AMEZAL A., BRAVARD J. P., FUSTEC E., BENDJOUDI H., BRUNSTEIN D. & N'GUYEN – THE D. (in rev). Inventaire et fonctions des zones humides dans la bassin de la Seine, *Actes du colloque Scientifiques et Décideurs : agir ensemble pour une gestion durable des systèmes fluviaux*, Lyon, 11 pp.
- HILL A.R., DEVITO K.J., CAMPAGNOLO S. & SANMUGADAS K. (2000). Subsurface denitrification in a forest riparian zone : Interactions between hydrology and supplies of nitrate and organic carbon. *Biogeochemistry*. 51 : 193-223.
- HUGHES D. A. (1980). Floodplain inundation : processes and relationships with channel discharge. *Earth Surface Processes*. 5: 297-304.
- KENDALL C. (1998). Tracing nitrogen sources and cycling in catchments. In *Isotope Tracers in Catchment Hydrology* (ed. C. Kendall and J.J. McDonnell), pp 521-576. Elsevier, Amsterdam.
- LENT R. M., WEISKEL P. K., LYFORD F. P. & AMSTRONG D.S. (1997). Hydrologic indices for nontidal wetlands. *Wetlands*. 17 : 19-30.
- LEWIN J. & HUGHES D. A. (1980). Welsh floodplain studies (II): Application of a qualitative inundation model. *Journal of Hydrology*. 46 : 35-49.
- OBERLIN G. (2000). Le contrôle des crues, In *Fonctions et valeurs des zones humides* (ed : Fustec E. & Lefeuvre J. C.), pp 83-105. Dunod, Paris.
- MALTBY E., HOGAN D. V., IMMIRZI C. P., TELLAM J. H. & PEIJL M. (1994). Building a new approach to the investigation and assessment of ecosystem functioning, In *Global Wetlands : old world and new* (ed : Mitsch W. J.), pp 637-658. Elsevier, Amsterdam..
- MARIOTTI A. (1982). Apports de la géochimie isotopique à la connaissance du cycle de l'azote. *Thesis*. Université Pierre et Marie Curie.
- MITSCH W. J. & GOSELINK J. C. (1993). *Wetlands*, New York : Van Nostrand Reinhold Company, 722 p..
- PINAY G., DECAMPS H., CHAUVET E. & FUSTEC E. (1990). Functions of ecotones in fluvial systems , In *The ecology and management of aquatic - terrestrial ecotones* (ed : Naiman R. J., Décamps H.), pp 141-171. UNESCO, PARIS.
- PINAY G., BLACK V.J., PLANTY-TABACCHI A.M., GUMIERO B. & DECAMPS H. (2000). Geomorphic control of denitrification in large river floodplain soils. *Biogeochemistry*. 50 (2). 163-182.
- ROCHE M. (1963). *Hydrologie de surface*, Paris : Orstom & Gauthier - Villars.
- RICHARDS K. (1982). *Rivers : forms and process in alluvial channels*, New York : Methuen, 358 p..
- SALO J. (1990). External processes influencing origin and maintenance of inland water - land ecotones , In *The ecology and management of aquatic - terrestrial ecotones* (ed : Naiman R. J., Décamps H.), pp 37-64. UNESCO, PARIS.
- SEBILO M., BILLEN G., GRABLY M. & MARIOTTI A. (In Press). Isotopic composition of nitrate-nitrogen as a marker of riparian and benthic denitrification at the scale of the whole Seine River system. *Biogeochemistry*.
- SCHUMM S. A., 1977. *The fluvial system*, New York : Wiley, 338 p.
- WASSENAAR L.I. (1995) Evaluation of the origin and fate of nitrate in the Abbotsford aquifer using the isotopes of ^{15}N and ^{18}O in NO_3^- . *Applied Geochemistry*. 10 : 391-405.

5. ANNEXE : Catalogue des données et des méta-données

Dans cette annexe, la base de données élaborée dans le cadre de la classification hydrogéomorphologique des zones humides riveraines est décrite et son extension spatiale précisée. De plus, on trouvera dans un article à paraître (Gaillard et al., 2002) différentes sorties cartographiques qui n'ont pas été intégrées dans ce rapport.

Le SIG a été réalisé avec les logiciels MapInfo et MapBasic version 6.0 sur PC (système d'exploitation Windows NT). Les différents fichiers de la base sont dans le système de projection Lambert II étendu de l'IGN. Les données source sont des images géoréférencées (GIF). Les données interprétées sont en mode vectoriel. Dans un premier temps, les données source sont présentées, on décrit ensuite la base de données.

5.1. Les données sources

5.1.1 *Cartes géologiques à 1/50 000^e (BRGM)*

Images scannées par quart de feuille et géoréférencées. Ces images sont disponibles sur les bassins versants suivants : Eure, Marne, Seine supérieure et Yonne.

5.1.2 *Cartes topographiques à 1/25 000^e (IGN)*

Images scannées. Chaque fichier correspond à une feuille. Ces images sont disponibles sur les bassins de l'Eure et de la Marne.

5.1.3 *Carte hydrogéologique du Bassin de Paris à 1/500 000^e (Albinet)*

Images scannées et géoréférencées (2 feuilles).

5.2. La base de données « Zones Humides Riveraines »

Les couvertures produites sont les suivantes :

- « corridors fluviaux »
- « système de terrasses »
- « formes fluviales »
- « annexes hydrauliques »
- « temps de concentration »
- « perméabilité des terrains »

5.2.1 *Couverture « corridors fluviaux »*

Descriptif. Couloirs fluviaux numérisés à partir de l'interprétation des cartes géologiques BRGM à 1/50 000^e. La numérisation des couloirs fluviaux donne l'extension des zones inondables pour la crue séculaire.

Identification des données. Les objets numérisés sont décrits par : (1) des identifiants se rapportant aux bassins versants traités ainsi qu'aux cours d'eau auxquels ils sont associés ; (2) des codes qui décrivent la nature du matériel alluvial (roche en place, revêtement minéral, revêtement organique).

Cette couverture est disponible sur les bassins de l'Eure, de la Marne, de l'Yonne et de la Seine supérieure.

5.2.2 Couverture « système de terrasses »

Descriptif. Les terrasses alluviales ont été numérisées à partir des cartes géologiques BRGM à 1/50 000^e. Elles correspondent aux anciennes plaines fluviales mises en place lors de la dernière période froide.

Identification des données. Les terrasses sont décrites par différents attributs qui décrivent – après interprétation des cartes – la nature des données traitées.

Cette couverture est disponible sur les bassins de l'Eure, de la Marne, de l'Yonne et de la Seine supérieure.

5.2.3 Couverture « formes fluviales »

Descriptif. Données saisies à partir des cartes topographiques IGN à 1/25 000^e. Ces données fournissent une représentation simplifiée de la « structure en mosaïque » des couloirs fluviaux.

Identification des données. Les éléments de la mosaïque fluviale sont décrits par des attributs se rapportant aux différents types de faciès géomorphologiques.

Cette couverture est en cours de certification. Elle sera disponible, à court terme, sur les bassins de l'Eure et de la Marne.

5.2.4 Couverture « annexes hydrauliques »

Descriptif. Caractérisation du réseau hydrographique et des annexes hydrauliques obtenue en complétant le réseau hydrographique fourni par l'AESN (1/50 000^e) par numérisation des cartes topographiques IGN à 1/25 000^e.

Identification des données. La caractérisation du réseau hydrographique comporte 5 attributs : (1) le type de segment (lit mineur, bras secondaire, noue endogène, noue exogène, annexe hydraulique, fossé, canaux d'alimentation de moulin et de navigation) ; (2) la connexion qui définit les relations entre les éléments du réseau ; (3) le type d'écoulement ; (4) le degré d'artificialisation des segments ; (5) la longueur.

Cette couverture est en cours de certification ; elle sera disponible, à court terme, sur les bassins de l'Eure et de la Marne.

5.2.5 Couverture « temps de concentration »

Descriptif. Temps de concentration calculés à partir du MNT GTOPO30 de l'USGS, du réseau hydrographique et de la formule empirique de Kirpich (Chow et al., 1988).

Identification des données. Les données sont décrites par différents attributs (segment de cours d'eau, temps de concentration exprimé en seconde, ...).

Cette couverture est disponible sur l'ensemble du bassin de la Seine.

5.2.6 Couverture « perméabilité des terrains »

Descriptif. Structures géologiques et hydrogéologiques digitalisées à partir de la « Carte Hydrogéologique du Bassin de Paris » à 1/500 000^e (Albinet, 1967).

Identification des données. Les données sont décrites par les attributs suivants : (1) étage ; (2) faciès ; (3) perméabilité ordonnée en 3 classes (faible, moyen, fort).

Cette couverture est disponible sur l'ensemble du bassin de la Seine.