

Fonctionnement du Territoire ‘Bassée’

*E. Fustec, H. Bendjoudi, S. Gaillard, P. Weng, F. Boyer, Ph. Boët, O. Shannen,
S. Croguennec, G. Billen*

UMR Sisyphe, UPMC

Fonctionnement du Territoire ‘Bassée’	1
<i>E. Fustec, H. Bendjoudi, S. Gaillard,</i>	<i>1</i>
1. Préambule (<i>E. Fustec et H. Bendjoudi</i>)	3
2. Mise en place et dynamique actuelle de la plaine alluviale (<i>S. Gaillard</i>)	6
2.1. Mise en place de la plaine alluviale : les héritages morpho-sédimentaires	6
2.2. Dynamique actuelle du système	7
2.2.1 Fonctionnement du lit mineur à différentes échelles	7
2.3. Conclusion	10
3. Aspects historiques des impacts humains dans la Bassée (<i>F. Boyer</i>)	11
3.1. Les aménagements pour la navigation	11
3.1.1 Dragages et protection des berges	11
3.1.2 Barrages fixes à pertuis, éclusées et navigation intermittente / barrages mobiles, écluses à sas et navigation continue.	11
3.1.3 Dérivations éclusées, rescindement de méandres	12
3.2. La gestion des annexes hydrauliques en relation avec les usages des sols	13
3.2.1 Etat des lieux au 18 ^{ème} siècle	13
3.2.2 Données du cadastre parcellaire napoléonien et évolution des annexes hydrauliques au 19 ^{ème} siècle	15
3.2.3 Entretien et aménagements du réseau d’annexes hydrauliques en relation avec l’activité agricole	16
3.2.4 Conclusions	17
3.3. Evolution de l’utilisation récente des sols (<i>ECOSPHERE pour le PNRZH</i>)	18
3.3.1 1. Rappel de l’objectif de l’étude	18
3.3.2 La photo interprétation	18
3.3.3 Les résultats	18
4. Caractéristiques hydrologiques du corridor fluvial de la Seine moyenne (<i>P. Weng et H. Bendjoudi pour le PNRZH</i>)	20
4.1. Fonctionnement hydrologique.	20
4.1.1 Bilan hydrologique.	21
4.1.2 Les mécanismes d’inondation.	24
4.1.3 Fonctionnement hydrologique local.	25
4.1.4 Schéma conceptuel du fonctionnement de la zone humide.	29
4.2. Étude de la zone non-saturée.	30
4.2.1 Utilisation de la tensiométrie.	30
4.2.2 Modélisation de la zone non saturée.	30
4.2.3 Suivi de l’infiltration par méthode thermique.	31
5. L’intervention des zones humides sur les flux de matières	33
5.1. La rétention des M.E.S. et des polluants associés. (<i>E. Fustec</i>)	33
5.2. La rétention et l’élimination de l’azote	34
5.2.1 Mise en évidence de l’hétérogénéité fonctionnelle de la Bassée amont (<i>I. Greiner et E. Fustec</i>)	34
5.2.2 Essai de mesure in situ de la dénitrification (<i>S. Croguennec et E. Fustec pour le PNRZH</i>)	36

5.2.3 Evaluation des capacités de rétention de la Bassée par la méthode des bilans d'azote (G.Billen)
37

6.	Fonctionnement et impact des gravières en eau (<i>O. Shanen et E. Fustec</i>)	40
6.1.	La variabilité spatio-temporelle du fonctionnement des gravières en eau.....	41
6.2.	L'impact hydrodynamique des gravières en eau.....	42
6.3.	L'influence des lacs de gravières sur la qualité des eaux.....	43
7.	L'importance des annexes hydrauliques et des zones inondables pour les peuplements piscicoles.....	45
7.1.	L'importance relative des annexes naturelles et artificielles.....	45
7.2.	Modélisation de l'habitat de reproduction du brochet.....	47
7.3.	Faisabilité d'un projet de réhabilitation d'un méandre de la Seine : le bras de La Grande-Bosse.....	49
7.3.1	Modélisation hydraulique du bras mort.....	49
7.3.2	Analyse hydrologique.....	49
7.3.3	Modélisation de l'habitat piscicole.....	51
7.3.4	Mise en place du suivi du site.....	52
8.	Conclusion.....	52
9.	Références	54

1. Préambule (*E. Fustec et H. Bendjoudi*)

"La Bassée" désigne le vaste secteur du corridor fluvial de la Seine dans son cours moyen, depuis Méry/Seine et la confluence avec l'Aube à l'amont jusqu'à la confluence avec l'Yonne à l'aval. Entaillée dans les assises de craie du Crétacé supérieur, cette **plaine alluviale** s'étend sur près de 80 km avec une largeur moyenne de 4 km et une faible pente de l'ordre de 0,6 ‰. Elle se divise en deux secteurs distincts : (*Figure 1*).

- la "**Bassé amont**", généralement désignée comme Plaine de Méry/Seine ou Plaine de Romilly et demeurée relativement "naturelle",

- la "**Bassée aval**", de Nogent/Seine à Montereau-Fault-Yonne, profondément transformée par les aménagements du fleuve et les activités humaines

L'ensemble de cette plaine alluviale s'étend sur trois départements, l'Aube, la Marne, la Seine-et-Marne, et sur les deux régions de Champagne-Ardenne et d'Ile-de-France.

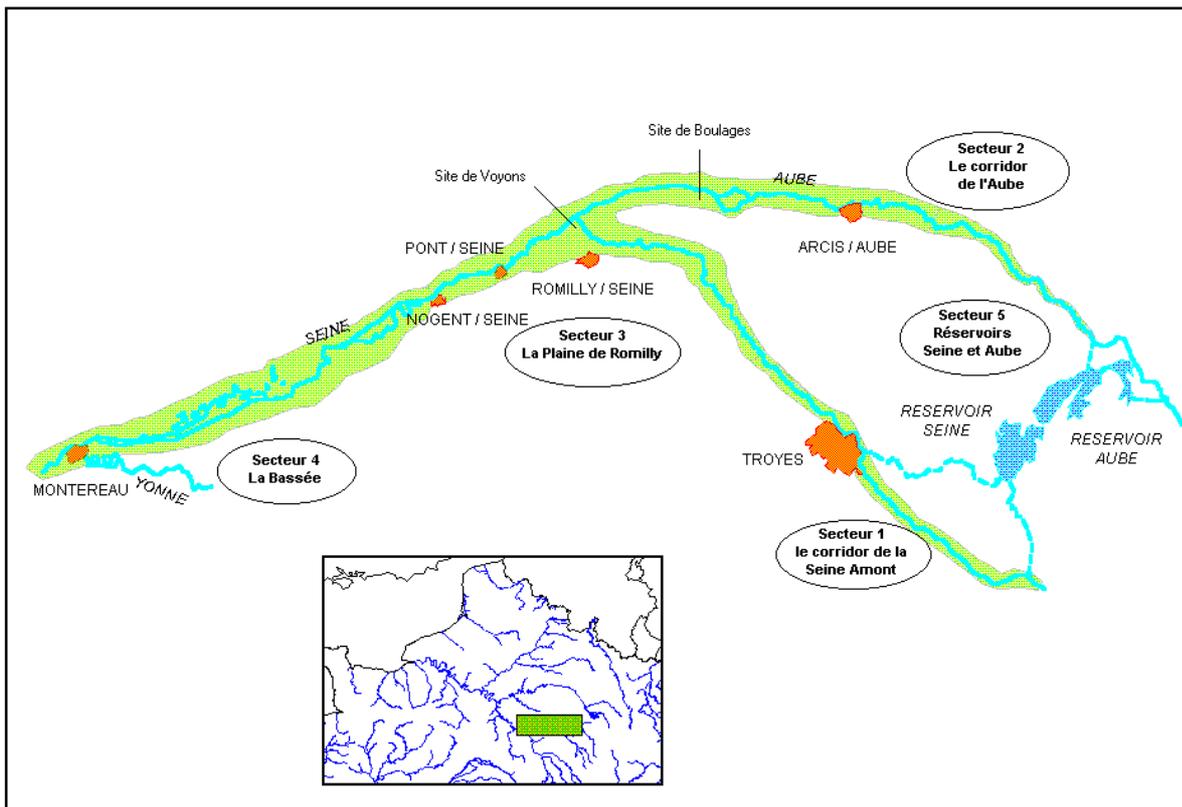
Fréquentée et utilisée par les hommes depuis les temps préhistoriques comme en témoignent de multiples vestiges, elle est cependant restée quasiment vide de tout habitat humain permanent. Les villages s'alignent, en effet, de part et d'autre de la plaine, à la rupture de pente entre celle-ci et les coteaux adjacents, juste au-dessus des niveaux atteints par les plus hautes eaux des crues historiques. De l'amont à l'aval, la Bassée constitue, en effet, une vaste **zone d'expansion des crues** où les inondations sont fréquentes et souvent prolongées, ce qui assure une réduction et un retard des pointes de crue dans l'agglomération parisienne.

Divers **aménagements** récents ont cependant modifié, de manière très sensible, le fonctionnement hydrologique de ce secteur du corridor fluvial, en particulier de la Bassée aval. Pour réduire davantage les risques d'inondation en région parisienne, plusieurs **barrages-réservoirs** ont été construits, dont deux à l'amont de la Bassée sur la Seine (Lac d'Orient) et sur l'Aube. Ces barrages ont vocation à écrêter partiellement les crues et à soutenir les étiages. Dans la Bassée aval, la **chenalisation** de la Seine pour la navigation (au gabarit de 3000 tonnes) a entraîné une diminution de la fréquence des inondations. Ce déficit d'inondation, auquel il faut ajouter les effets induits par le **drainage** et les **endiguements** réalisés à l'aval du barrage Aube, à titre de dédommagement pour les agriculteurs, facilite l'écoulements des eaux lors des crues ce qui augmente les débits de pointe de la Seine et raccourcit le déphasage avec les pointes de crues de l'Yonne. Au total, ces aménagements locaux réduisent l'effet écrêteur du barrage Aube.

Le **gîte aquifère** de la Bassée constitue une des dernières grandes réserves d'eau de bonne qualité de la région parisienne. Dans la Bassée aval notamment, les meilleurs sites de forage ont été localisés, leur productivité estimée et des acquisitions foncières ont été réalisées par l'Agence de l'eau Seine-Normandie en vue de préserver cette ressource potentielle.

La Bassée était, autrefois, dévolue à l'élevage extensif et à la production de fourrages. Ces usages ont cédé le pas à une **agriculture intensive**, favorisée par le drainage et la moindre inondabilité des secteurs protégés par les aménagements. Ces zones agricoles restent cependant sensibles aux inondations de printemps, même de courte durée, d'où la demande des agriculteurs du maintien, au niveau des barrages, d'une capacité d'écrêtement suffisante de ces crues printanières.

L'**extraction des granulats** s'est particulièrement développée dans la Bassée qui constitue le dernier grand gisement de matériaux alluvionnaires en Ile-de-France. Cette exploitation a été particulièrement intensive dans la Bassée aval où elle a engendré un nouveau paysage de plans d'eau qui couvrent plus de 2000 ha. Ces extractions se sont étendues au secteur aval de la Plaine de Romilly. Certains plans d'eau ont été réaménagés pour la pêche, la chasse ou les loisirs nautiques, mais beaucoup d'entre eux sont demeurés en l'état et ne sont pas gérés. Les nouvelles réglementations, qui exigent de prévoir la remise en état des sites après exploitation, conduisent maintenant à des réaménagements plus "écologiques" des plans d'eau ou à la reconstitution de zones humides.



Figure

1. La Bassée amont et la Bassée aval au sein de la "zone atelier Seine-amont"

La vaste zone humide fluviale que constitue la Bassée, offre un ensemble d'écosystèmes **d'intérêt écologique majeur** au plan régional. Elle présente, en effet, une grande diversité de paysages (prairies, boisements spontanés ou non, marais, bras morts, plans d'eau...), héberge nombre de plantes protégées et se caractérise par une grande richesse faunistique, tant en ce qui concerne l'avifaune que la faune piscicole.

La multiplicité des ressources (eau, alluvions, sols fertiles, paysages, flore, faune) et des usages, l'incohérence entre certaines politiques d'aménagement ou de gestion, ont, de tout temps, engendré des **conflits** au sein de ce territoire et entre celui-ci et les secteurs à l'amont. Aujourd'hui encore, divers **projets** anciens ou nouveaux maintiennent une pression très forte sur la Bassée, particulièrement dans son secteur aval :

- création en cours d'une réserve naturelle de 800 ha environ et projet de restauration fonctionnelle du bras mort de la Grande Bosse,
- projet de création de casiers de surstockage des eaux de crue dont la faisabilité est à l'étude.
- projet ancien, et toujours d'actualité, de prolongement du canal à grand gabarit de la Seine., au moins jusqu'à Nogent/Seine.

La préservation du gîte aquifère demeure une priorité qui pose avec acuité la question de la poursuite des extractions de granulats et appelle un développement des pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement.

C'est cette diversité d'usages et d'enjeux, souvent contradictoires, qui a conduit une équipe du programme **PIREN-SEINE**, alors dans sa première phase, à étudier le comportement des divers acteurs en présence et les conditions de mise en œuvre des arbitrages nécessaires pour parvenir à une cohérence globale dans la gestion d'un territoire complexe comme celui de la Bassée. Ces travaux, menés par le GREBAR, ont été rassemblés, en 1992, dans une plaquette intitulée "Quel avenir pour la Bassée ?".

Le démarrage d'une deuxième phase du Piren-Seine, en 1993, a vu apparaître un nouveau thème de recherche, intitulé "Corridor fluvial", coordonné par E.Fustec, dont l'objectif était de mettre en évidence la genèse, le fonctionnement et certains des rôles majeurs des zones humides fluviales du bassin de la Seine.

Les investigations ont été alors centrées sur l'ensemble de la Bassée, les vallées de la Seine et de l'Aube, à l'amont de celle-ci, ainsi que sur les barrages en dérivation sur ces deux cours d'eau. En raison de son intérêt, dû à la diversité des milieux riverains, des usages et des types d'impacts qui s'y manifestent, l'ensemble de ces secteurs a été retenu par le GIP-Hydrosystèmes parmi les zones-ateliers mises en place, en 1995, à l'échelle nationale. Cette "Zone-Atelier Seine-Amont" (*Figure 1*), comme les autres zones retenues a pour vocation de permettre d'appréhender les caractéristiques physiques, chimiques, biologiques ou socio-économiques des corridors fluviaux à une échelle régionale et, pour cela de concentrer les efforts de recherche par le développement de programmes interdisciplinaires.

En 1997, alors que les recherches menées dans le cadre de la troisième phase du Piren-Seine s'orientaient vers la caractérisation et l'évaluation fonctionnelle des corridors fluviaux à l'échelle de l'ensemble du bassin de la Seine, des investigations approfondies se sont poursuivies sur la Zone-Atelier dans le cadre d'un nouveau programme de recherche retenu par le **PNRZH** (Programme National de Recherche sur les Zones Humides). Ce programme, intitulé "Fonctionnement des zones humides riveraines du cours moyen des rivières –Analyse et modélisation de la genèse des hétérogénéités structurales et fonctionnelles-Application à la Seine moyenne" a été coordonné par H. Bendjoudi. Il a eu pour but d'accroître les connaissances sur l'histoire géologique et humaine du corridor fluvial et, surtout d'analyser et de modéliser le fonctionnement hydrologique qui conditionne la structure et l'ensemble des propriétés des zones humides fluviales de ce secteur.

Seuls ont été retenus dans le présent rapport les résultats concernant la Bassée dans son ensemble. Les résultats obtenus dans le cadre du Piren-Seine, ayant déjà fait l'objet d'une large diffusion (rapports annuels du Piren-Seine; Actes du Colloque "la Seine et son bassin : de la Recherche à la Gestion, Paris, 1993; Chapitre 5 de l'ouvrage "la Seine en son Bassin : fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé", Elsevier, 1998) sont résumés dans leurs aspects essentiels pour permettre de plus larges développements sur les acquis les plus récents, notamment dans le cadre du programme du PNRZH

2. Mise en place et dynamique actuelle de la plaine alluviale (S. Gaillard)

Inscrite dans les assises de craie du Crétacé supérieur, la plaine fluviale de la Seine est caractérisée par une succession de faciès hydrogéomorphologiques dans les différentes dimensions de l'hydrosystème. Cette succession de faciès dans le gradient amont - aval, mais également dans le plan horizontal et dans le plan vertical, contribue à la formation d'un paysage en mosaïque, ce qui confère à ce secteur une forte originalité.

Les résultats synthétisés ici sont extraits des thèses de J.G. Dzana (1997) et de S. Gaillard (1999). Après avoir rappelé les différentes étapes de la mise en place de la plaine alluviale, plusieurs aspects relatifs à la dynamique actuelle du système (fonctionnement du lit mineur à différentes échelles, structure hydrogéomorphologique et mise en eau de la plaine alluviale) sont présentés.

2.1. Mise en place de la plaine alluviale : les héritages morpho-sédimentaires

La Figure 2 représente une coupe stratigraphique de référence obtenue à Granges - sur - Aube (vallée de l'Aube) quelques kilomètres en amont de la Bassée. Fournissant une séquence stratigraphique complète depuis le Préboréal jusqu'à l'actuel, cette coupe permet de reconstituer les différentes étapes de la mise en place des plaines fluviales à l'Holocène en Champagne crayeuse (Gaillard, 1999). Associée à des calages chrono - et bio - stratigraphiques (carbone 14, analyses palynologiques, ...), cette coupe montre que trois phases successives d'érosion - sédimentation consécutives à des oscillations bioclimatiques sont à l'origine de la structure hydrogéomorphologique actuelle de l'hydrosystème et de son fonctionnement.

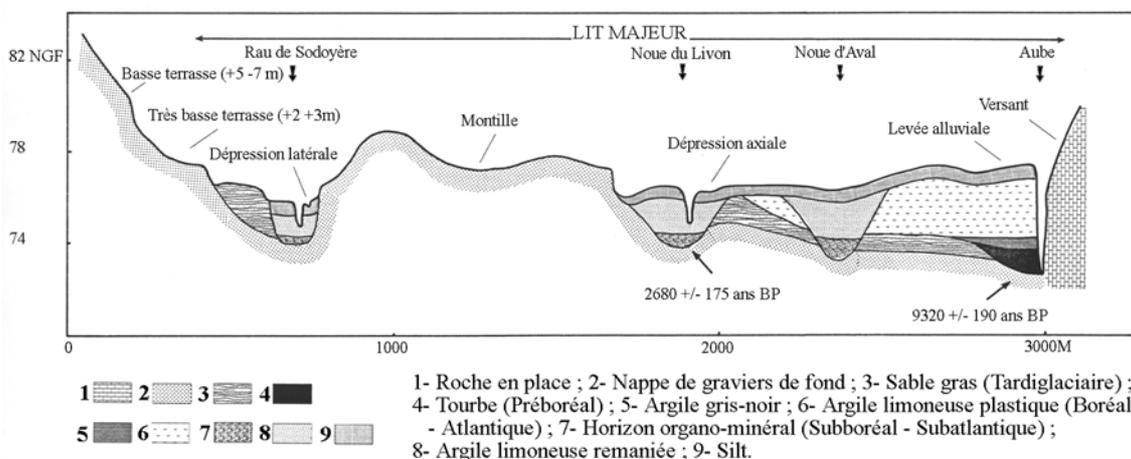


Figure 2. Coupe stratigraphique du fond de vallée dans le cours inférieur de l'Aube

- Après la mise en place d'une nappe de graviers attribuable à la dernière période froide (Pléniglaciaire supérieur) dont l'épaisseur varie de 5 à 13 m selon les secteurs, on a montré qu'un premier cycle érosion-sédimentation était à l'origine du dégagement de la très basse terrasse ainsi que des "montilles" notés *f*₁ sur les cartes géologiques. Ce cycle est intervenu au Tardiglaciaire lorsque s'amorçait un glissement vers un climat plus chaud et humide (15 000-10 000 ans BP). Caractérisée par une incision de 3 à 4 m de la nappe de graviers, opérée par un chenal en tresse, suivie d'une sédimentation de matériaux sablo-limoneux au Dryas récent (11 000-10 000 ans BP), cette phase marque une rétraction des systèmes fluviaux qui a conduit à la formation des lits majeurs actuels.

- Un second cycle érosion-sédimentation couvre la première moitié de l'Holocène qui se situe entre 10 000 et 4 700 ans BP. Il est caractérisé par un surcreusement de 2 à 3 m des dépôts sablo-limoneux mis en place antérieurement. La tourbe découverte à la base de cette séquence a pu être datée 9320 ± 190 ans BP. Elle renferme 60 % d'essences de pin (*Pinus*) et 25% de noisetier (*Corylus*), ce qui dénote d'un net adoucissement du climat, accompagné d'une densification du couvert végétal et de la formation de sols sur les versants. Dans ce contexte biostasique, l'énergie de la rivière décroît de même que les débits solides, d'où

la mise en place de dépôts fins fossilisant la tourbe (argile gris-noir et argile limoneuse plastique). Ce cycle est à l'origine de la métamorphose du lit fluvial (*i. e.* changement de style fluvial). On assiste en effet à partir de 9320 ± 190 ans BP à une concentration des écoulements dans un chenal unique, qui constitue le lit mineur actuel, ainsi qu'à la formation de chenaux secondaires de type anastomosé en position latérale, ces chenaux représentant un héritage du système en tresse développé au Pléni- et au Tardiglaciaire.

- Durant la seconde moitié de l'Holocène (chronozones Subboréal et Subatlantique), le fonctionnement du système est caractérisé par une réactivation de la dynamique fluviale. Ce troisième cycle est imputable, d'une part, à une augmentation de la pluviosité, de l'intensité et de la fréquence des crues et, d'autre part, comme l'indiquent les pollens découverts à la base de la séquence dans un horizon organominéral, aux premiers défrichements et à la mise en culture des versants dès le Néolithique qui ont entraîné une intensification de l'érosion. Au plan stratigraphique, ce cycle est marqué par une reprise des écoulements dans les chenaux secondaires suivi d'une accumulation généralisée et accélérée (taux d'accrétion compris entre 0.75 et 0.78 mm/an) provoquée par l'érosion agricole. Dans la vallée de l'Aube, le début de cette troisième phase sédimentaire est datée 2680 ± 175 ans BP.

2.2. Dynamique actuelle du système

2.2.1 Fonctionnement du lit mineur à différentes échelles

La métamorphose fluviale enregistrée durant la première moitié de l'Holocène est à l'origine de la mise en place du lit à méandres mobiles que l'on observe actuellement dans les secteurs non chenalés de la Bassée. Malgré une puissance brute faible ($\Omega < 250 \text{ W.m}^{-1}$) du cours d'eau dans ce secteur, l'instabilité du lit mineur dans le plan horizontal est essentiellement due aux caractéristiques granulométriques du matériel composant le fond du lit et les berges. En effet, le lit est emboîté dans la nappe de graviers pléni-glaciaire et présente des berges composites avec à la base des sables et des graviers et au sommet des argiles et des limons, ce qui constitue un facteur favorable au développement des lits à méandres et à l'érosion latérale

A partir de travaux réalisés à différentes échelles de temps et d'espace, la mobilité du lit a été quantifiée et les processus à l'origine de la migration du lit fluvial ont été précisés. La Figure 3 se rapporte à l'évolution du tracé en plan, au pas de temps séculaire, dans le secteur compris entre Pont-sur-Seine et Nogent-sur-Seine. Ces données ont été acquises par superposition de tracés en plan à différentes dates. Un traitement informatique des axes médians a permis dans un second temps de caractériser les tracés et de quantifier la mobilité horizontale (Levassor et al, 1994; Dzana, 1997; Gaillard et al, 1998). Dans ce tronçon subnaturel, les principaux résultats sont les suivants :

- on note un allongement significatif du tracé en plan (+ 18%) entre 1828 et 1990 associé à un accroissement de la sinuosité du lit ;

- sur la même période, les aires balayées apparentes, qui permettent d'appréhender en terme de bilan les processus érosion-dépôt, varient de 50 à plus de $400 \text{ m}^2/\text{km}^{-1}/\text{an}^{-1}$.

Ces résultats, en particulier l'allongement du tracé, sont à mettre en relation avec la fermeture progressive des chenaux secondaires hérités de la dernière période froide, qui induit une concentration des écoulements dans le lit mineur donc une augmentation des vitesses et des forces tractrices (Gaillard et al, 1998; Gaillard, 1999).

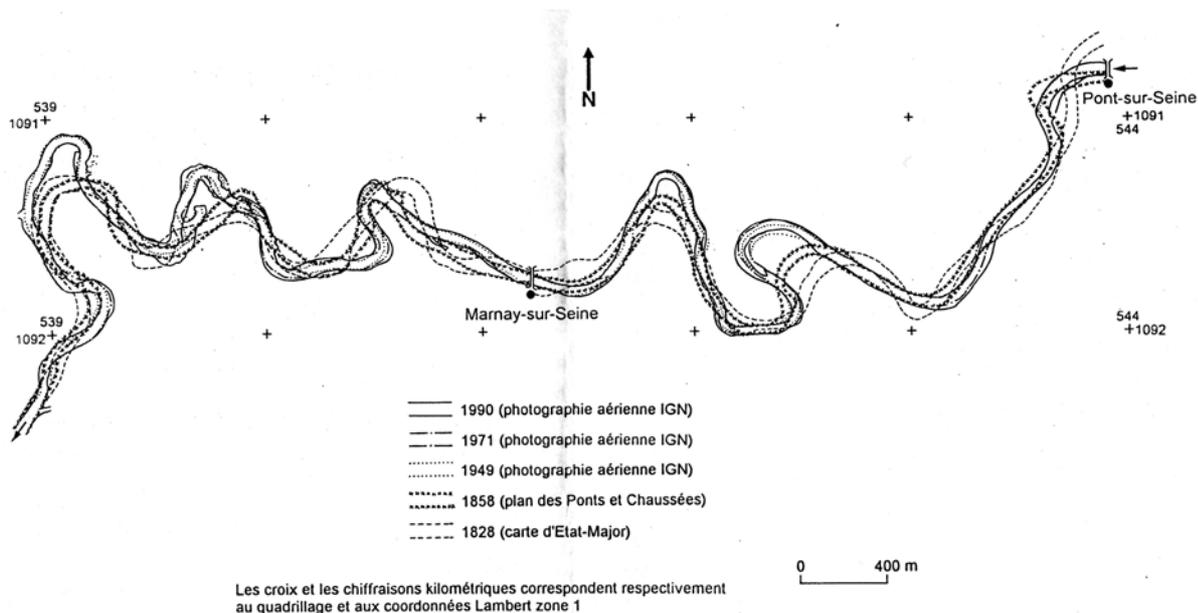


Figure 3. Evolution du tracé en plan à l'échelle séculaire.

Le document suivant (Figure 4) se rapporte à l'évolution d'une section transversale du lit mineur au pas de temps annuel. Il permet d'appréhender les ajustements du lit consécutifs aux variations de débits. Cette figure confirme - pour des pas de temps courts - une importante mobilité du cours d'eau dans les zones de courbures maximales (*apex*) avec des reculs en berges concaves de près de 1,5 m entre l'étiage de mai 1992 et la crue de janvier 1993. Ce recul est associé à un surcreusement de la mouille en pied de berge sous l'effet des courants secondaires (*i. e.* composante transversale de l'écoulement) et à la construction d'un banc sablo-graveleux en berge convexe.

A l'inverse, les mesures réalisées entre la crue de janvier 1993 et l'étiage suivant (juin 1993) montrent une réduction de la taille et de l'asymétrie de la section transversale du lit suite au remblaiement du talweg ; le recul de la berge concave reste sensible (0,5 m) suite à l'effondrement de la partie sommitale de la berge. Ce comportement du lit fluvial associant des phases de dilatation de la section transversale en crue et de rétraction en étiage a été observé sur de nombreux sites. Il démontre que les différentes variables morphologiques qui caractérisent le cours d'eau tendent à s'ajuster de façon quasi permanente aux fluctuations de débits. Ces travaux ont également permis de montrer que les flux dont la fréquence est inférieure ou égale à 22.9% sont capables d'effectuer un travail géomorphologique (Gaillard, 1999).

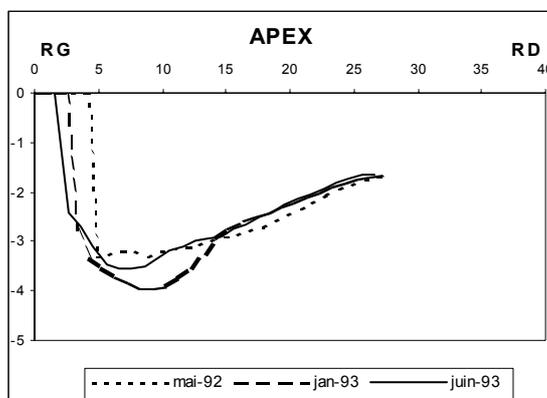


Figure 4. Ajustements du lit mineur consécutifs aux crues et aux étiages.

2.2 - Structure hydrogéomorphologique et mise en eau de la plaine fluviale

Le document suivant (Figure 5) est un profil transversal de la plaine alluviale de la Bassée levé au théodolite entre Courtavant et Pont-sur-Seine. Il illustre l'hétérogénéité des faciès hydrogéomorphologiques dans le plan transversal. Schématiquement, on peut distinguer dans la plaine délimitée par la très basse terrasse pléni-glaciaire et les "montilles" deux grandes unités hydro-sédimentaires :

- la bande de méandrage qui correspond à l'espace de migration latérale du lit mineur ; constituée d'un ensemble d'unités morphologiques élémentaires tels que des méandres recoupés (*oxbow lakes*), des dépressions arquées de convexité (*scroll bars*), etc... La bande de méandrage joue un rôle important dans la dynamique écologique du système ; par le jeu des processus érosion-dépôt qui s'y exercent, elle influe sur le renouvellement des biotopes et favorise l'accroissement de la production primaire ; elle intervient également sur la dynamique des populations piscicoles (Amoros et Petts, 1993).

- le lit majeur qui constitue l'espace naturel d'expansion des crues. L'amplitude topographique dans ce secteur est de 2 - 3 m environ, ce qui est dû à la présence de levées alluviales en bordure des chenaux les plus actifs et de dépressions longitudinales drainées par des noues. Si la formation des levées résulte de processus de sédimentation subactuels dus aux crues, les dépressions longitudinales ainsi que les noues constituent, en revanche, des héritages des différents cycles d'érosion-sédimentation tardi- et postglaciaires (Gaillard, 1999).

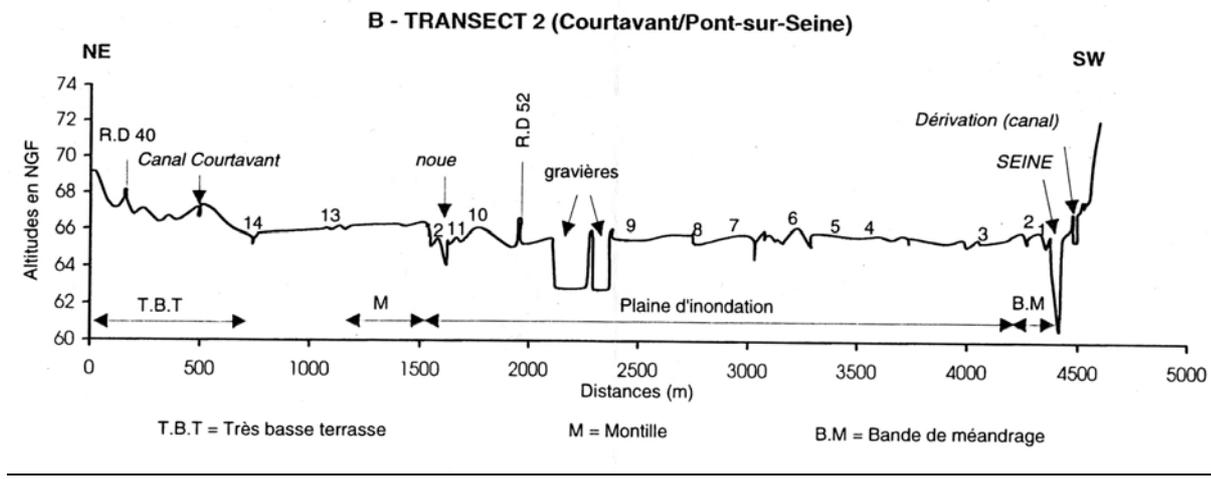


Figure 5. Profil transversal de la Bassée de Courtavant à Pont-sur-Seine.

La Figure 6 se rapporte à l'inondation de la plaine fluviale au cours de l'hiver 1993-1994 de Saint-Just-Sauvage à Pont-sur-Seine. Ce document, qui constitue un instantané de l'inondation pour une crue de forte fréquence (durée de retour : 1,24 ans le 17 janvier 1994), a permis de mettre en évidence la complexité des processus de submersion du lit majeur lors des crues. Ces processus conduisent à une dissipation de l'énergie des écoulements, à la rétention et/ou au ralentissement d'une grande partie des eaux de débordement. Plusieurs types de flux y participent : des flux longitudinaux, transversaux et verticaux qui sont le plus souvent interconnectés.

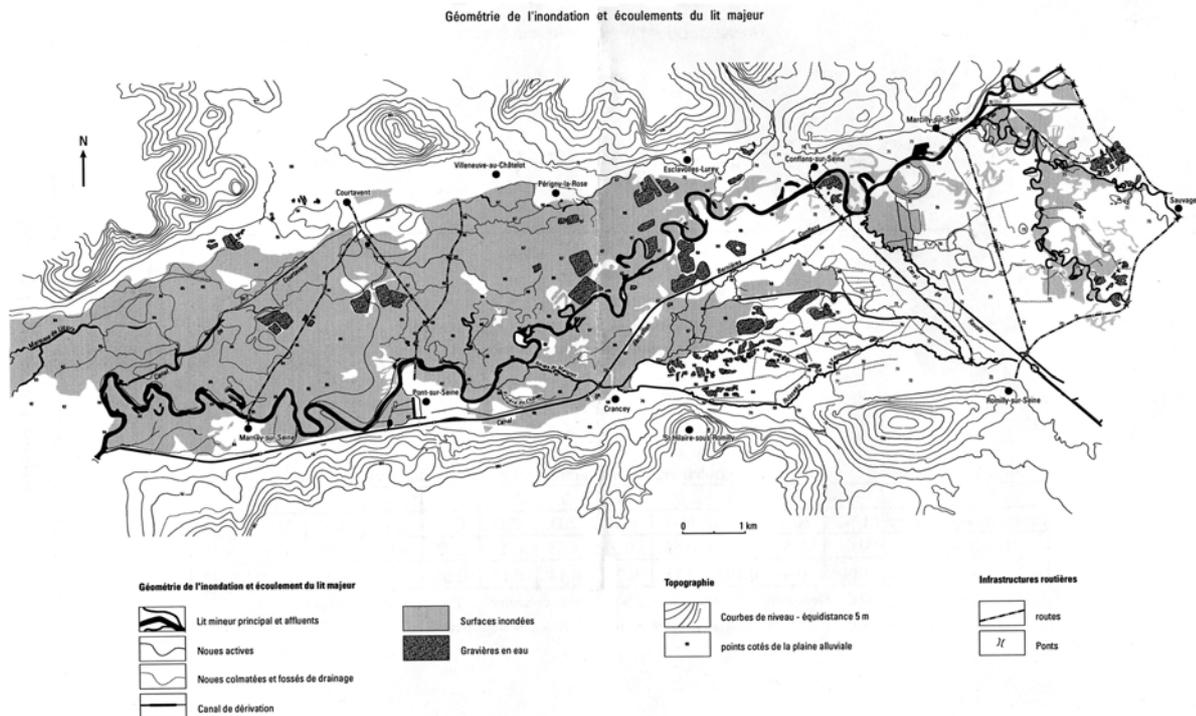


Figure 6. Inondation de la plaine alluviale au cours de l'hiver 1993 - 1994.

Les flux longitudinaux sont essentiellement représentés par les lits mineurs qui contribuent également à l'alimentation des annexes hydrauliques telles que les anciens méandres et les dépressions arquées de convexité. Les eaux se répartissent également dans les chenaux secondaires (nouses) au sein de la plaine. Sur l'Aube, les débits écoulés par les nouses actives ont été évalués à 15% du débit en transit dans le lit mineur (Dzana et Gaillard, 1995).

Les flux transversaux (eaux de débordement) correspondent aux échanges entre le lit mineur, les chenaux secondaires et la plaine inondable. Leur importance varie en fonction de la morphologie des chenaux et trois mécanismes ont été distingués : lorsque le lit est bordé par une levée alluviale, le remplissage des dépressions s'opère via des brèches ; dans les secteurs à méandres, la mise en eau de la plaine se fait surtout par déversement depuis les concavités des boucles à faible rayon de courbure où l'augmentation de la résistance à l'écoulement entraîne une surélévation locale de la ligne d'eau ; enfin, dans certains secteurs, une réduction de la capacité du lit mineur « à pleins bords » peut entraîner des débordements généralisés. La morphologie du lit mineur et de la plaine exerce donc un contrôle important sur la rétention des eaux de crues, les dépressions latérales isolées par des levées jouant un rôle prépondérant en tant que système de stockage de ces eaux.

Les flux verticaux liés aux remontées phréatiques interviennent également dans la mise en eau de la plaine mais ils restent difficiles à appréhender à cette échelle (voir § 4). C'est là un point important pour le fonctionnement général des hydrosystèmes fluviaux. Les secteurs de déversement des eaux de débordement 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.

2.3. Conclusion

La plaine alluviale de la Bassée présente aux plans hydrogéomorphologique et fonctionnel des caractéristiques particulières qui la différencie très nettement des systèmes, comme par exemple, celui de la Garonne où une typologie dégageant une succession de lits parallèles au chenal principal a été établie en fonction des débits de crues : lit majeur immédiat (crue annuelle), lit majeur normal (crue décennale) et lit majeur exceptionnel (crue cinquantennale) (Gazelle, 1993). La Bassée constitue ainsi un système nettement plus complexe dû à la fois au poids des héritages morfo-sédimentaires tardi- et postglaciaires, mais également à la diversité des flux hydriques qui interviennent dans la submersion du lit majeur.

3. Aspects historiques des impacts humains dans la Bassée (F.Boyer)

Si l'analyse des conditions de mise en place, au cours des derniers millénaires, de systèmes alluviaux permet de mieux appréhender les contraintes naturelles qui s'exercent dans ce milieu, il apparaît tout aussi nécessaire d'examiner l'importance des actions humaines qui, au cours des derniers siècles, ont façonné les systèmes, assuré leur persistance ou, au contraire, ont engendré leur dégradation voire leur disparition. L'étude des influences anthropiques dans la Bassée a comporté trois volets : les deux premiers, sous la responsabilité scientifique de F.Boyer (LGA, Paris VI) ont porté sur les aménagements dans le lit mineur depuis la période médiévale jusqu'au début du 20^{ème} siècle ainsi que sur la gestion des annexes hydrauliques du lit majeur durant cette période. Ces travaux ont été réalisés conjointement dans le cadre du PIREN-SEINE et du PNRZH. Le troisième volet, réalisé par le Bureau d'Etudes "ECOSPHERE" dans le cadre du PNRZH, rend compte de l'évolution de l'utilisation des sols de la Bassée au cours des 50 dernières années.

3.1. Les aménagements pour la navigation

Les recherches dans ce domaine, comme pour le suivant, se sont appuyées sur les documents des Archives départementales de la Seine-et-Marne et de l'Aube, les Cartes et Plans de la B.N.F. et du Service de la Navigation de la Seine, les documents des Archives Nationales.

A l'échelle historique, plusieurs types d'actions sur le lit mineur se sont succédé avec des recouvrements chronologiques. Ces actions visaient d'abord à établir une liberté de circulation sur la voie d'eau, en éliminant ou en réglementant les autres activités liées au lit mineur. Leur but était, ensuite, d'accroître la durée de navigabilité ainsi que les capacités des embarcations par augmentation du tirant d'eau. Jusqu'au milieu du 19^{ème} siècle, la nécessité d'approvisionner Paris en bois, par flottage, entravait les progrès de la navigabilité. La possibilité d'une navigation continue ne sera totalement réalisée que dans le dernier tiers du 19^{ème} siècle, avec la construction d'une suite de barrages mobiles à écluses.

3.1.1 Dragages et protection des berges

La lutte contre les obstacles à la navigation peut être juridique ou effective et technique. Des dispositions légales apparaissent dès le Moyen Age et mettent en évidence, jusqu'à la fin du 18^{ème} siècle, des conflits d'intérêt entre les acteurs de la navigation, le pouvoir royal, le prévôt des marchands de Paris, les mariniers, les marchands de bois flottés et les autres partenaires sur le fleuve (meuniers, seigneurs riverains, bénéficiaires des pêcheries...).

Les rectifications du lit naturel ont d'abord consisté à supprimer les seuils et haut-fonds qui se cumulaient avec les basses-eaux pour prolonger la durée du chômage de la navigation. Un document conservé à la B.N. atteste qu'une cinquantaine de hauts-fonds existaient vers 1850 entre Nogent/Seine et Montereau, la plupart utilisés comme gués de 50 cm environ de profondeur. Appelés "baissiers" par les navigants, ils pouvaient faire l'objet de dragages. Ces opérations, effectuées au moyen de dragues à vapeur, se sont intensifiées pendant le Second Empire et ont constitué la première phase menant à la navigation continue sur la Haute-Seine.

Par ailleurs, le maintien des berges était un souci constant pour protéger le chemin de halage parcouru par les attelages de chevaux pour "la remonte". Les berges, soumises à la dynamique du fleuve, sont par endroits (concavités) fortement érodées, tandis qu'elles s'engraissent ailleurs (convexités). Les zones de convexité des méandres pouvaient s'exhausser au point de mettre hors d'eau de nouvelles terres nommées "accrues", cultivées en prairies fauchées et cadastrées au 19^{ème} siècle. Ce toponyme témoigne de la proximité historique de processus d'érosion-sédimentation de grande ampleur. Ils seraient intervenus vers le 16^{ème} siècle, en relation avec les variations climatiques du Petit Age Glaciaire. Les berges sont systématiquement renforcées par la construction de "perrés" (enrochements) sous le Second Empire à l'aval de Montereau, probablement un peu plus tard à l'amont.

3.1.2 Barrages fixes à pertuis, éclusées et navigation intermittente / barrages mobiles, écluses à sas et navigation continue.

Jusqu'au 19^{ème} siècle, la navigation était intermittente, réglée par des éclusées opérées au niveau des "pertuis", qui sont des ouvertures d'une dizaine de mètres pratiquées dans un barrage fixe. Ces ouvertures

pouvaient être plus ou moins obturées par des madriers ou "aiguilles". Ce système ancien conditionnait la navigation comme le flottage du bois. De 1624 jusqu'à 1871, le système des éclusées a fonctionné sur l'Yonne lorsque le niveau de l'eau était à moins de 0,50 m au-dessus du niveau d'étiage. Quelques barrages à pertuis, construits sur la Haute-Seine en amont de Montereau fournissaient des éclusées supplémentaires à l'aval de la confluence avec l'Yonne, mais la navigation à l'aval de Montereau était limitée à 160 jours par an, avec un tirant d'eau < 1m, en raison de l'absence de barrages sur ce secteur.

Les actions sur le lit de la Seine culminent au début de la deuxième moitié du 19^{ème} siècle, afin de rendre la navigation continue avec un tirant d'eau minimum de 1,60 m. Cette situation nouvelle a été acquise à l'aval de Montereau à partir des années 1870 après la mise en service de 12 barrages mobiles, associés à des écluses à sas et construits à partir de 1860. Dans le secteur de la Bassée, entre l'Yonne et l'Aube, 5 barrages ont été construits d'aval en amont : Courbeton et La Grande Bosse en 1857, Vesoult vers 1860, Beaulieu vers 1864; le barrage de Conflans vers 1858 date de la construction des 3 écluses du canal de dérivation de Conflans à Bernières, en amont de Nogent/Seine. Le projet de navigation continue jusqu'à Marcilly/Seine (confluence Aube-Seine) voit le jour en 1876, amenant la construction du barrage de Jaulnes en 1886. Seul ce barrage a subsisté jusqu'à nos jours, les autres ont été reconstruits au cours du 20^{ème} siècle.

3.1.3 Dérivations éclusées, rescindement de méandres

L'importance du méandrage de la Seine entre Troyes et Montereau a amené un type particulier d'aménagement, la dérivation. Creusée artificiellement, elle diminue la distance à parcourir, mais augmente la pente de la ligne d'eau ce qui peut nécessiter la construction d'écluses à sas pour maintenir les niveaux. Nous avons pu reconstituer la chronologie de ces dérivations de Troyes à Montereau dont la construction s'est étalée sur tout le 19^{ème} siècle.

L'idée de rendre la Seine navigable jusqu'à Troyes a conduit, dès la fin du 17^{ème} siècle, à la réalisation d'une série de petites dérivations entre Troyes et le confluent de l'Aube. Elles ont rapidement disparu faute d'entretien. Napoléon Ier relance un projet de navigabilité de la petite-Seine et du canal de la haute-Seine. Après une amorce de réalisation au début du 19^{ème} siècle, le projet est modifié et aboutit, finalement à une dérivation continue avec de nombreuses écluses, mise en service en 1846. Trois autres dérivations sont réalisées entre 1850 et 1900 de l'amont vers l'aval : de Conflans à Bernières, de Beaulieu à Villiers, de Bray à la Tombe. La navigation continue devient possible de la confluence de l'Aube à Montereau.

Dans la Bassée, des résections de méandres, autre type de dérivation, ont été également réalisées durant cette période : méandre de Noyen, en 1809 (Figure 7), deux méandres à Vesoult vers 1860, la boucle de la Grande Bosse dont le rescindement accompagné d'une écluse figure sur un plan de 1857, le méandre de Marolles, recoupé avant 1888.

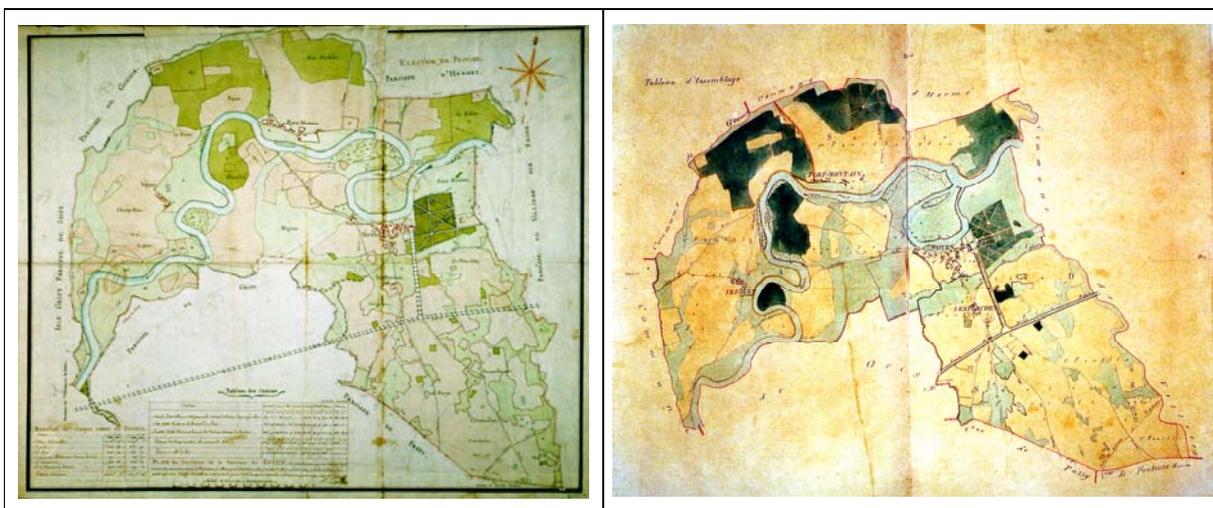


Figure 7. Plan de la paroisse de Noyen/Seine sur le cadastre de Berthier (1786) et tableau d'assemblage du

cadastre napoléonien de la commune de Noyen /Seine (1828), montrant la permanence des secteurs boisés et la résection du méandre intervenue entre les deux dates.

3.2. La gestion des annexes hydrauliques en relation avec les usages des sols

3.2.1 Etat des lieux au 18^{ème} siècle

Depuis le 17^{ème} siècle, sans doute, jusqu'au début du 20^{ème}, la mise en valeur herbagère est une constante de l'économie agricole du couloir alluvial de la Seine entre Troyes et Montereau et en particulier dans la Bassée. *"Les prairies sont le principal revenu de l'élection (de Nogent). Elles sont de différente qualité ... (certaines) valent jusqu'à 1.000 livres l'arpent, d'autres ne valent pas 100 livres Elles s'afferment de 10 à 25 livres l'arpent et rapportent de 200 à 400 bottes de foin. Les meilleures sont les bas prés, les moindres sont les hauts".* (Mémoire sur la généralité de Paris, 1700, cité par Mireille Touzery, Atlas de la Généralité de Paris au XVIIIème siècle—un paysage retrouvé, 1995). *"Depuis Marnais jusqu'à Nogent tout le côté droit de la Seine en descendant est une vaste prairie d'où l'on tire beaucoup de foins pour Paris. Depuis Nogent jusqu'à Brai, ce sont des prés continuels, mais moins vastes".* (Cours de la Seine et des rivières et ruisseaux qui y affluent levé sur les lieux par ordre de ... Turgot prévôt des marchands ... par M. l'Abbé Delagrive ... présenté l'an 1738, Atlas manuscrit sur parchemin, B.N. Cartes et plans).

Pour chacune des paroisses de la Généralité de Paris, dont la Bassée faisait partie, un arpentage par masse de culture, non par parcelle, est réalisé entre 1776 et 1791, sous la direction de l'Intendant général Bertier de Sauvigny. En Bassée, hormis quelques paroisses comprises entièrement dans le lit majeur, tous les autres finages comportent un terroir composite, à cheval sur les prairies humides du couloir alluvial et les terres labourables des versants. Leur relevé cadastral a été effectué entre 1783 et 1785 et les espaces herbagers ou boisés ont été cartographiés en différents tons de vert. La prédominance des prés de fauche et des pâtures est manifeste dans le couloir alluvial, en association localement avec des terres labourables. Les bois bien délimités occupent des surfaces restreintes. Quant aux friches et marais, ils sont absents ou négligeables sur une majorité de paroisses. Les 250 hectares existant se répartissent essentiellement entre quatre paroisses, Jaulnes, Mouy, Mousseaux et surtout Bazoches-lès-Bray avec 126 hectares. Notons déjà que les habitants de cette commune offriront une résistance opiniâtre au dessèchement entrepris 40 ans plus tard sur leur territoire.

En relation avec la mise en valeur agricole presque complète de la Bassée au 18^{ème} siècle, l'organisation hydrographique du lit majeur de la Seine est restituée avec plus ou moins de précision par quelques documents cartographiques.

- La "Carte générale de La Motte Tilly et de ses environs à une ou deux lieues autour du château" (carte murale visible au château de La Motte, début 18^{ème}?), montre un réseau anastomosé de chenaux continus au nord de la Seine ainsi que le méandrage accentué d'une section de chenal, dont l'essentiel se retrouve actuellement dans la Vieille-Seine de la Bassée, entre Melz et Noyen.

- Le premier plan de la Seigneurie d'Everly, antérieur à 1840, révèle un réseau organisé de chenaux artificiels rectilignes, associé à une occupation totale du sol qui équilibre prairies et terres labourées. Le deuxième plan de la même Seigneurie, véritable parcellaire terminé en 1778, témoigne d'une extension des herbages au dépens des terres. Les compléments apportés au réseau hydrique antérieur sont liés à l'aménagement des eaux d'un nouveau château et de son parc et sans doute aussi à la création de mares-abreuvoirs.

- La Carte de Cassini (1757) donne une image complète, mais à plus petite échelle, de l'ensemble du couloir alluvial. Malgré la schématisation du tracé des cours d'eau, leurs connections anastomosées paraissent devoir être retenues. Curieusement, les trois chenaux qui circulent dans le lit majeur au nord de Nogent diffluent à partir d'un émissaire de rive droite, que l'on identifie sans peine au Resson, mais qui, contrairement à l'actuel Resson, rejoignait directement la Seine en amont de Nogent. Vers l'ouest, un seul chenal, proche du versant nord, présent sur la carte de La Motte Tilly, persiste entre Hermé et Gouaix, et relie continûment les anastomoses de Nogent à celles d'Everly, qui rejoignent le lit mineur de la Seine peu avant sa confluence avec la Voulzie. Soulignons que, comme aujourd'hui, la Seine ne reçoit aucun affluent de rive droite entre Resson et Voulzie. Cette dernière traverse le couloir alluvial sans dévier de son cours nord-sud pour rejoindre le lit mineur de la Seine. Tout autre est le parcours d'un affluent du même versant

plus en aval, l'Auxence actuelle, dont le tracé s'infléchit brusquement au bas du versant et longe le bord nord du lit majeur sur plusieurs kilomètres avant de confluer avec la Seine un peu en amont de Marolles, sous le seul nom de "la Vieille Seine".

Les plans topographiques levés en Bassée pour les besoins du cadastre "Bertier" fournissent des données hydrographiques abondantes et précises. Plusieurs types de chenaux peuvent y être distingués et d'une certaine manière hiérarchisés :

Les "Vieille Seine", au cours large, continu, souvent méandré ;

Les "noues", plus étroites, avec des sinuosités peu accentuées, leur tracé direct est susceptible d'interruptions et d'artificialisation ;

Les fossés artificiels rectilignes, à largeur constante et changement de direction brusques.

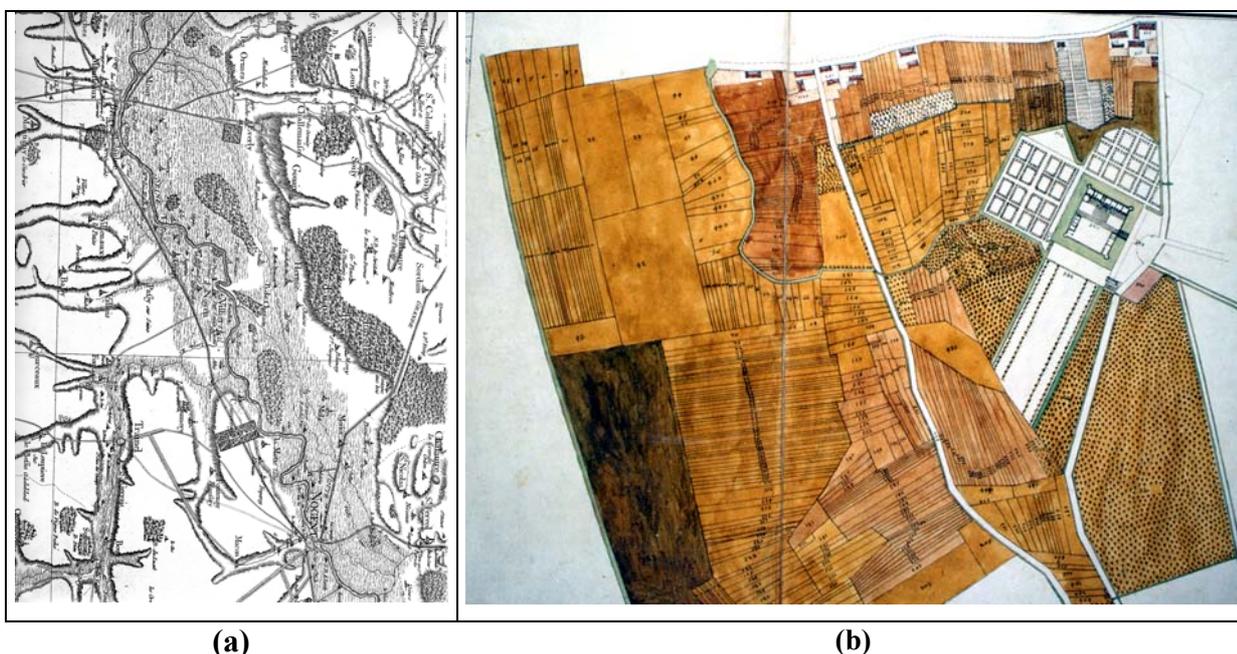


Figure 8. (a) : Extrait de la carte de Cassini entre Nogent/Seine et Bray/Seine. (b) : Premier plan parcellaire de la Seigneurie d'Everly, feuille du château.

Deux territoires, ceux de Saint-Sauveur et de Vimpelles, montrent un réseau de chenaux de plusieurs types interconnectés. Le réseau artificiel ancien d'Everly n'apparaît pas, alors qu'un réseau du même type est porté dans les prairies de Bazoches-lès-Bray. Sur le reste du couloir alluvial, la situation hydrographique est plus simple, mais permet de fixer pour la première fois un certain état des écoulements et des artificialisations pour l'ensemble de la Bassée. Deux paroisses, Villiers et Noyen, s'étendant de part et d'autre de la Seine, en montrent de bons exemples. Sur Villiers, une partie des eaux d'un affluent de rive gauche, l'Orvin, est détournée par un chenal artificiel vers un chenal naturel rejoignant le fleuve plus en amont. En rive droite, un chenal sinueux est connecté à l'amont et à l'aval avec le lit mineur, mais seule la section aval est notée "noue courante"; actuellement, la connexion amont n'existe plus et l'ancien tracé amont est mémorisé par la limite départementale Aube et Seine et Marne.

Sur Noyen, aucun aménagement ne figure au sud de la Seine; au nord, en revanche, deux chenaux importants sont tracés précisément, accompagnés de flèches indiquant sans ambiguïté leur sens d'écoulement. Il s'agit, à l'est, d'une "Vieille Seine" très méandrée, surtout sur les territoires voisins de Villiers, Hermé et Melz, - c'est la Vieille Seine actuelle de l'est de la Bassée, présente aussi sur tous les documents antérieurs, tandis qu'à l'ouest, une autre Vieille Seine, non méandrée et peu sinueuse, se connecte

au lit mineur un peu en amont de Port-Montain, se dirige d'abord vers le nord puis vers l'ouest et enfin vers le sud-ouest, constituant la limite de Noyen avec Hermé et Gouaix. La Vieille Seine méandrée présente un sens d'écoulement régulier vers sa confluence avec la Seine, mais sa section amont sur Melz est "à sec" (1783); sur la Vieille Seine de Port-Montain, le sens d'écoulement, clairement indiqués par des flèches opposées, s'inverse dans le tracé ouest-est, la section orientale s'écoulant vers la Seine et la section occidentale dirigeant les eaux vers Everly . Le point d'inversion correspond au lieu-dit "Les Closeaux" du futur cadastre napoléonien, ce toponyme pouvant renvoyer à une vanne de répartition des eaux. Notons par ailleurs que les méandres de Noyen et de Vezout ne sont pas recoupés.

3.2.2 *Données du cadastre parcellaire napoléonien et évolution des annexes hydrauliques au 19^{ème} siècle*

Le cadastre napoléonien et ses plans parcellaires à grande échelle fournissent des données complètes et fiables sur l'occupation des sols et le tracé des annexes hydrauliques à l'époque des levers, c'est-à-dire entre 1825 et 1829 pour la plupart des communes de la Bassée. L'état hydrique des annexes est restituable dans une certaine mesure, si l'on prend appui, à la fois, sur les plans parcellaires et sur les registres associés qui donnent la nature des cultures et le classement fiscal parcelle par parcelle. Dans chaque commune, la toponymie des lieux-dits qui subdivisent les sections du plan cadastral doit aussi être prise en compte : elle est souvent ancienne et sa confrontation avec la nature de l'occupation du sol, lors de l'établissement du cadastre, peut révéler des évolutions hydriques notables. De la même manière, la forme très allongées de certaines parcelles et leur agencement spatial peut livrer le palimpseste de chenaux devenus inactifs ou intermittents à la même époque, ce qui est confirmé par le classement en prés fauchés de ces parcelles.

Sans entrer dans le détail de l'analyse des microtoponymes significatifs de l'état hydrique, il est nécessaire d'éclaircir l'évolution sémantique de deux termes fondamentaux pour la Bassée, "*noue*" et "*gué*" (*nouë* et *gay* au 18^{ème}). Avant de désigner des structures linéaires, ces termes avaient une acception aréale : la *noue* est une prairie marécageuse, parfois un terrain bas inondé dans les débordements (Godefroy, 1888, Dictionnaire de l'ancienne langue française et de tous les dialectes du 9^{ème} au 15^{ème} siècle) ou une terre grasse et humide (Littré, éd.1947), le *gué* peut être un herbage, un terrain bas, mais aussi un abreuvoir. Au 18^{ème} siècle, le sens de *noue* comme chenal apparaît sur les plans de paroisse du cadastre Bertier et c'est cette désignation linéaire qui finit par prévaloir dans le langage fiscal, technique ou géographique du 19^{ème} siècle.

Les données du cadastre "napoléonien" confirment la mise en valeur complète du lit majeur . Un bilan par type de culture et par commune, en cours de réalisation, montre l'exclusion presque totale des "friches, broussailles et marais", qui n'atteignent pas 20 hectares pour un ensemble de dix communes, avec en particulier 2,6 ha sur Bazoché au lieu des 126 ha sur le cadastre Bertier. Les bois sont réduits et les plantations de peupliers restent anecdotiques. Le développement ubiquiste des prairies, tant pour la vente du foin que pour l'élevage local des bovins, se traduit par la création exceptionnelle de cinq classes de prés en Bassée au lieu des trois habituellement prévues dans les directives générales d'évaluation cadastrale. Il est tentant de rapprocher cette multiplication des classes fiscales de prairies de la demi-douzaine de niveaux floristiques prairiaux, reconnus en liaison avec les durées d'inondation, dans les couloir alluviaux de l'Aube et de la Seine en Champagne crayeuse L'établissement d'une correspondance entre les classes fiscales et les associations floristiques, par le biais de la productivité fourragère, ouvrirait la voie d'une restitution paléo-environnementale pouvant remonter jusqu'aux forêts inondables, remplacées par les groupements prairiaux à la faveur des déforestations d'origine anthropique. En Bassée, l'utilisation du microtoponyme "*veuve* ou *vove*", d'origine celtique et signifiant bois, pourrait indiquer des reliques de cette forêt, tel le "Bois de Veuve" à Everly, dont la fixation toponymique remonte à une époque où le mot "*veuve*" n'était plus compris.

A l'est de la Bassée, la mise en valeur herbagère se corrèle assez bien avec l'état hydrique du réseau de chenaux, tel que le révèlent les plans parcellaires. De fait, la continuité qui prévalait au 18^{ème} siècle semble bien rompue sur plusieurs sections des annexes hydrauliques chenalissantes. Par exemple, la Vieille Seine de Port-Montain n'existe plus, sa branche nord-sud est une suite de longues parcelles registrées en prés. Le chenal du nord, qui alimentait une série de cinq gués-abreuvoirs, se résout en tronçons discontinus depuis Melz jusqu'à Toury et disparaît plus à l'ouest. De la même manière, au nord de Nogent, le Resson, sous le nom de ruisseau de la Forêt, s'arrête brusquement au niveau de la route en chaussée de Saint-Nicolas, relayé vers l'ouest par une série de prés allongés. Le cadastre napoléonien manifeste aussi l'existence d'instabilités hydriques. Sur la commune d'Hermé, en 1827, les méandres de la Vieille Seine

amont sont entièrement cadastrés et occupés par des parcelles de prés très allongées, avec quelques mares résiduelles qui marquent sans doute l'affleurement de la nappe phréatique. Une évolution est possible au pas de temps de la décennie, puisqu'à l'amont immédiat, la Vieille Seine est colorée en bleu sur le plan de Melz levé en 1837. Son cours constitue une seule parcelle qualifiée de "noue" et cependant placée en classe 3. Sur la commune du Mériot, de nombreuses parcelles d'abord notées "noue" sur le registre, sont corrigées d'abord en "marais" puis finalement en "prés". Au vu de toutes ces modifications convergentes de l'état hydrique des annexes hydrauliques et du caractère exhaustif de la valorisation agricole, l'hypothèse d'une variation climatique se traduisant par une série d'années plus sèches devient tentante.

3.2.3 Entretien et aménagements du réseau d'annexes hydrauliques en relation avec l'activité agricole

Les modifications et les additions introduites dans le système naturel des annexes hydrauliques en lit majeur ne datent pas seulement du 19^{ème} siècle : la mise en place des moulins, des "mottes" et des châteaux, l'implantation des agglomérations, des fermes et du réseau ferroviaire, les nécessités de la culture et de l'élevage (abreuvoirs), ont pérennisé au long des siècles des modifications plus ou moins discrètes du système hydrographique naturel. Cela suppose l'entretien des parties utilisées ainsi que l'adaptation aux changements éventuels, qu'ils soient d'ordre climatique ou anthropique.

Le type d'entretien le plus traditionnel est le *curage à fond vif* qui ne modifie pas la section originelle du chenal. Le défaut de curage engendre l'engorgement des sols et le débordement des petits cours d'eau. Traditionnellement, par exemple, la Voulzie devait être curée tous les vingt à trente ans. En revanche, un approfondissement exagéré du chenal curé peut conduire à un amoindrissement de la productivité fourragère. Que ce soit de manière générale ou sur des points précis, les documents anciens témoignent d'une bonne connaissance empirique et séculaire du milieu naturel hydrique plus ou moins aménagé et de sa sensibilité aux actions de l'homme.

C'est dans ce contexte de gestion traditionnelle que se placent deux exemples opposés d'aménagements hydriques qui permettent de confirmer la prévalence de la vocation herbagère de la Bassée au moins jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle.

- Le conflit du "marais de Bazoches" (1832-1852)

Entrepris en vertu de la loi de 1807, le dessèchement d'une zone humide au sud de la Seine, considérée un marais par le concessionnaire, Davy de Balloy, rencontra une opposition opiniâtre de la communauté des éleveurs de Bazoches-lès-Bray qui bénéficiaient traditionnellement du droit d'usage de ces pâtures communes. Dès l'enquête préalable, la qualité de "marais" de cette zone humide fût discutée par les habitants : un chenal artificiel longitudinal évacuait rapidement les eaux de débordement du fleuve proche, le caractère humide étant plutôt lié à la présence de sources, confirmée par l'implantation de "routoirs" pour le rouissage du chanvre. L'opposition de toute la commune de Bazoches, son Maire en tête, ne pût que retarder de dix ans l'aménagement final du "marais" (1842). Après la réalisation, la communauté dépossédée continua d'opposer une résistance sourde aboutissant même à des incarcérations et assortie d'une longue procédure jusqu'à la transaction de 1852. Encore après ce règlement judiciaire, les litiges et les colères persistèrent sur le problème des "routoirs"; il fallut toute l'intelligence et la sensibilité psychologique de l'Ingénieur en chef Chanoine pour résoudre les problèmes à l'amiable et calmer les esprits après plus de vingt ans d'affrontements.

- Le projet d'irrigation dans l'est de la Bassée (1866-1876)

En opposition complète avec les objectifs du dessèchement de Bazoches, le projet d'irrigation du "marais" d'Everly et du secteur de Neuvry, à l'est de la Bassée, mené à bien en 1876, avait répondu à la demande locale. Un curage d'assainissement avait été réalisé précédemment, dont on savait à l'avance qu'il pouvait avoir un impact négatif sur la productivité herbagère; des chenaux, actifs au 18^{ème} siècle, ou même des paléo-chenaux avaient été rouverts pour organiser un réseau interconnecté entre la grande noue d'Hermé à l'amont, la grande noue de Neuvry à l'aval ainsi qu'avec le système ancien des "vidées" de la zone humide d'Everly. L'impact du nouveau réseau collecteur s'était révélé d'autant plus négatif pour la production

fourragère que l'on était rentré dans un cycle d'années sèches. C'est précisément ce réseau rénové d'annexes hydrauliques qui va être le support du projet d'irrigation appelé à pallier sa trop grande efficacité !

Le projet précise bien que l'irrigation se fera par imbibition latérale du sol et non par débordement. L'eau est prise en Seine à la faveur de l'élévation permanente de la ligne d'eau dans le bief du proche barrage du Vezoult, nouvellement construit. La prise d'eau est réalisée en tête du chenal de Port-Montain, redevenu actif comme au 18^{ème} siècle, mais avec un sens inversé de l'écoulement. La distribution de l'eau d'irrigation le long des prairies est effectuée par un système de vannes permettant de régler les hauteurs d'eau dans les mini-biefs successifs, avec une précision de l'ordre du décimètre.

Ce projet, conçu et mené rapidement à bien par l'Ingénieur ordinaire des Ponts et Chaussées de Provins, est un bel exemple de synergie entre la connaissance traditionnelle du milieu humide et la capacité d'un service technique de l'Etat à faire aboutir un aménagement généralisé impliquant plusieurs communes dans l'irrigation de 700 hectares de prairies.

3.2.4 Conclusions

De la première phase d'enquête rétrospective sur la Bassée se dégage l'alternance de situations hydriques relativement contrastées, au pas de temps de la dizaine ou de la centaine d'années. Leur lecture peut se faire à travers les variations d'état et de tracé des annexes hydrauliques, conjointement ou non avec les variations de l'occupation du sol. Pour la suite de l'enquête et à l'aube du 20^{ème} siècle, deux fils directeurs se présentent : le déclin des prairies naturelles en fonction de l'abandon de la traction hippomobile et de la diversification de l'alimentation du bétail, le développement des plantations de peupliers dans la plaine alluviale peut-être liée à ce déclin ou à une modification positive durable des niveaux phréatiques.

Malgré son caractère "instantané", à l'échelle pluriséculaire, le cadastre parcellaire "napoléonien" est un jalon incontournable et unique par sa généralité. Au travers des parcelles sinueuses et allongées, cadastrées en prés, et de leur enchaînement, il nous livre le palimpseste non seulement des méandres recoupés historiquement mais, aussi, des paléo-chenaux holocènes et peut-être antérieurs. Grâce aux travaux novateurs de Stéphane Gaillard, l'on sait mieux systématiser le rôle des héritages tardiglaciaires et holocènes dans la configuration actuelle du réseau hydrographique naturel des plaines alluviales, d'où l'intérêt du jalon cadastrale pour mieux comprendre l'interaction des données naturelles et du développement de l'emprise anthropique sur ces milieux humides particulièrement accueillants pour l'homme depuis plusieurs millénaires. Les découvertes archéologiques de l'équipe de Daniel Mordant en Bassée, appuyées par les études paléo-environnementales des archéo-botanistes et des archéo-zoologistes en témoignent amplement. Le parcellaire napoléonien fixe aussi un état des lieux à partir duquel peut se lire l'évolution des deux derniers siècles de la Bassée, si l'on a soin de rapporter, autant que possible, les données sur le découpage des sections cadastrales en lieux-dits, toujours transposables dans le cadastre actuel. Ces lieux-dits, toujours nommés, sont aussi des lieux de mémoire humaine et "d'écologie rurale" et le lien des micro-toponymes avec les caractéristiques naturelles ou anthropisées n'est jamais anodin.

Sans vouloir occulter les négligences, les erreurs ou l'aléa historique dans les actions humaines sur la zone étudiée, *nous avons acquis la conviction d'avoir perçu des communautés successives profondément adaptées et adaptables à la portion humide de leur milieu naturel et qui en ont acquis une connaissance empirique suffisante pour en assurer la gestion précise.* Quant à l'aléa climatique au pas de temps pluriannuel, il est reconnu et pris en compte, non seulement dans la gestion de la Bassée, mais aussi dans les bilans annuels et la politique de bonification des terres agricoles par drainage à l'échelle du département, comme en témoignent les rapports annuels du Préfet au Conseil Général de Seine et Marne.

Les cycles d'années sèches ou humides reconnus par Belgrand (1872), étaient sans doute, aussi, dans la mémoire des marinières dont les périodes d'activité et les conditions de navigation en dépendaient étroitement. De même, ces variations étaient bien enregistrées par les exploitants des prairies de fauche, dont la production en poids de foin dépendait de l'imbibition des sols par la nappe phréatique à des périodes favorables à la croissance de l'herbe et à sa récolte. On sait aussi que le chanvre cultivé dans les chènevières voisines et mis à rouir dans les eaux claires et vives issues directement des nappes en bas de versant, alimentait les corderies de Nogent dont le débouché important était l'activité fluviale de transport. On sait, enfin, que les ports étaient nombreux entre Troyes et Montereau et que les grains et le foin y étaient chargés pour transiter vers l'aval et surtout vers Paris. Ainsi, "gens de l'eau et gens de la terre" communiquaient

directement ou indirectement à travers leurs activités, liées dans la durée au comportement de l'eau et à ses cycles.

3.3. Evolution de l'utilisation récente des sols (*ECOSPHERE pour le PNRZH*)

3.3.1 1. Rappel de l'objectif de l'étude

L'objectif était de retracer, en termes statistiques, l'évolution de l'utilisation des terres dans les vallées de la Seine et de l'Aube (de Montereau-Fault-Yonne à Arcis-sur-Aube et Troyes), depuis la fin de la seconde Guerre Mondiale, et plus particulièrement de mesurer les transferts entre les prairies, les cultures, les boisements "naturels", les peupleraies, les carrières...

Compte tenu de l'objectif poursuivi et de l'étendu de l'aire d'étude, ce travail est basé sur la photo-interprétation, au cours de 5 périodes différentes d'un pas de 10 ans.

En 1998, la démarche globale de cette analyse a été menée avec la participation d'un stagiaire en Maîtrise sur une portion de la zone d'étude : la Bassée aval, tronçon de la vallée de la Seine, compris entre Montereau-Fault-Yonne et Nogent-sur-Seine, et connu pour ses richesses écologiques et ses ressources naturelles.

3.3.2 La photo interprétation

Les différentes étapes du travail

La première étape a consisté à établir une typologie des unités d'occupation de sol (UOS) assez aisées à identifier sur photo aériennes, tant par leur signature photographique que par leur taille.

21 catégories ont ainsi été distinguées (sols nus, chemins, voies ferrées, eaux courantes naturelles, plans d'eau de carrières, eaux libres naturelles stagnantes, canaux et rivières recalibrées, cultures et jeunes friches post-culturelles, friches, prairies, zones humides, coupes forestières, jeunes plantations et vergers, groupements arbustifs non linéaires, peupleraies denses ou plantations de résineux, boisements semi-naturels, boisements naturels, alignements d'arbres ou d'arbustes, saulaies de bord d'étangs et de canaux, espaces bâtis et abords et enfin routes goudronnées)

Une approche par échantillonnage ayant été retenue, l'étape suivante a consisté à sélectionner et positionner 60 transects perpendiculaires à l'axe des vallées de la zone d'étude ; chacun étant distant de 2 km du précédent. 21 transects couvrent la Bassée aval.

Pour analyser les 60 transects au cours des 5 périodes retenues (1948-53 ; 61-62 ; 71-76 ; 87-90 et 95-97), 306 photographies aériennes ont été nécessaires. Pour la Bassée aval, c'est environ 126 photographies.

Pour chacun des transects et pour les 5 périodes analysées, la taille et la nature des UOS ont été déterminées puis saisies.

Les limites de la méthodes et difficultés rencontrées

La photo-interprétation, qui constitue un outil intéressant pour l'analyse des milieux naturels et leur évolution présente toutefois un certain nombre de limites qui peuvent parfois biaiser les résultats. Il est donc particulièrement important d'en avoir conscience lors de l'exploitation des données. Les principales difficultés sont liées à la déformation des photos, aux échelles variant d'une mission à l'autre, à la mauvaise qualité des vues anciennes (cas des missions de 1949 à 1961) et enfin à l'interprétation elle-même (certains catégories étant difficiles à distinguer).

3.3.3 Les résultats

Deux programmes informatiques d'exploitation des données ont été réalisés et testés sur les 21 transects de la Bassée aval.

Le programme n°1 permet d'établir les données brutes d'occupation du sol pour chacune des 5 missions.

Le programme n°2 construit les matrices de transition entre les différents types d'occupation du sol. Il conduit à 10 matrices : 1949>1961, 1949>1976, 1949>1987, 1949>1997, 1961>1976, 1961>1987, 1961>1997, 1976>1987, 1976>1997 et 1987>1997.

Afin de rendre les résultats plus lisibles, une redéfinition simplifiée des types d'occupation du sol a été effectuée.

Tableau 1. Résultats de l'exploitation des données brutes de l'occupation des sols de la Bassée

	1949	1961	1976	1987	1997
eaux naturelles et zones humides	3,2%	3,2%	3,1%	3,4%	2,7%
canaux et rivières recalibrés	0,6%	0,6%	1,0%	1,8%	2,3%
gravières	0,9%	1,5%	5,9%	10,6%	13,5%
bâti et surfaces équipées	3,7%	4,1%	5,2%	5,7%	5,8%
cultures	41,7%	42,7%	46,0%	43,1%	40,8%
prairies	13,0%	8,9%	2,6%	1,3%	1,3%
fouffrés arbustifs	9,1%	8,5%	7,2%	7,8%	6,9%
bois à exploitation intensive	17,4%	15,5%	12,9%	10,7%	9,9%
boisements à exploitation extensive	6,5%	9,2%	9,4%	9,3%	9,8%
boisements naturels à semi-naturels	3,8%	5,8%	6,7%	6,4%	7,0%
	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
total des boisements	36,8%	39,0%	36,2%	34,2%	33,6%

Une première interprétation du tableau des données brutes (Tableau 1) ainsi que de la matrice de transition 1949>1997 permet de mettre en évidence les évolutions fondamentales suivantes (Figure 9):

- les prairies ont régressé de 90%, entre 1949 et 1997, et ne représentent plus aujourd'hui que 1,3 % du territoire. Cette chute s'est produite essentiellement dans les années 70, au profit des cultures et dans une moindre mesure des boisements et des carrières ;

- les cultures constituent la principale occupation du sol de la Bassée aval, soit environ 40 % du territoire. Cette proportion n'a pas beaucoup évolué au cours du temps. Cependant les cultures ont bougé dans l'espace, en se développant au détriment des prairies et en perdant des surfaces au profit des carrières. Au total, environ 60 % du territoire de la Bassée aval a été occupé à un moment donné par les cultures ;

- les carrières se sont développées à partir des années 70, essentiellement au détriment des cultures. Après exploitation, elles se transforment en plan d'eau et en friches. Elles représentent aujourd'hui environ 13,5 % du territoire ;

- les formations boisées ont connu une légère décroissance depuis les années 70 et représentent aujourd'hui environ 34 % de la surface de la Bassée aval. Cette stabilité apparente masque en réalité une modification importante au sein des différentes catégories de boisements. Les exploitations intensives (peupleraies) se sont en effet effondrées de 60%, tandis que les exploitations extensives et les bois naturels à semi-naturels voyaient leur surface augmenter de la même proportion ;

- les autres milieux occupent une surface beaucoup plus limitée. Quelques évolutions significatives sont toutefois à noter, notamment l'augmentation des surfaces urbanisées (villes, routes...) et des cours d'eau recalibrés au détriment des rivières naturelles.

- Cette étude a donc permis d'évaluer l'incidence des activités humaines sur l'évolution de cette zone humide depuis la fin de la dernière guerre mondiale. La pression anthropique s'est révélée fatale à l'égard de certains milieux ; les plus remarquables (les prairies) étant les plus affectés.

- Ces résultats confirment qu'il est urgent que les partenaires concernés par la gestion de cette zone (élus, administrations, industriels, associations...) prennent des mesures permettant de sauvegarder les quelques milieux écologiquement riches encore présents, afin de maintenir un équilibre entre l'exploitation des ressources naturelles de la région et la protection du patrimoine naturel. Le classement d'une partie de la Bassée aval en Réserve Naturelle (dossier en cours d'instruction depuis 1995) pourrait être l'une des solutions les plus adaptées.

EVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL DE 1949 A 1997

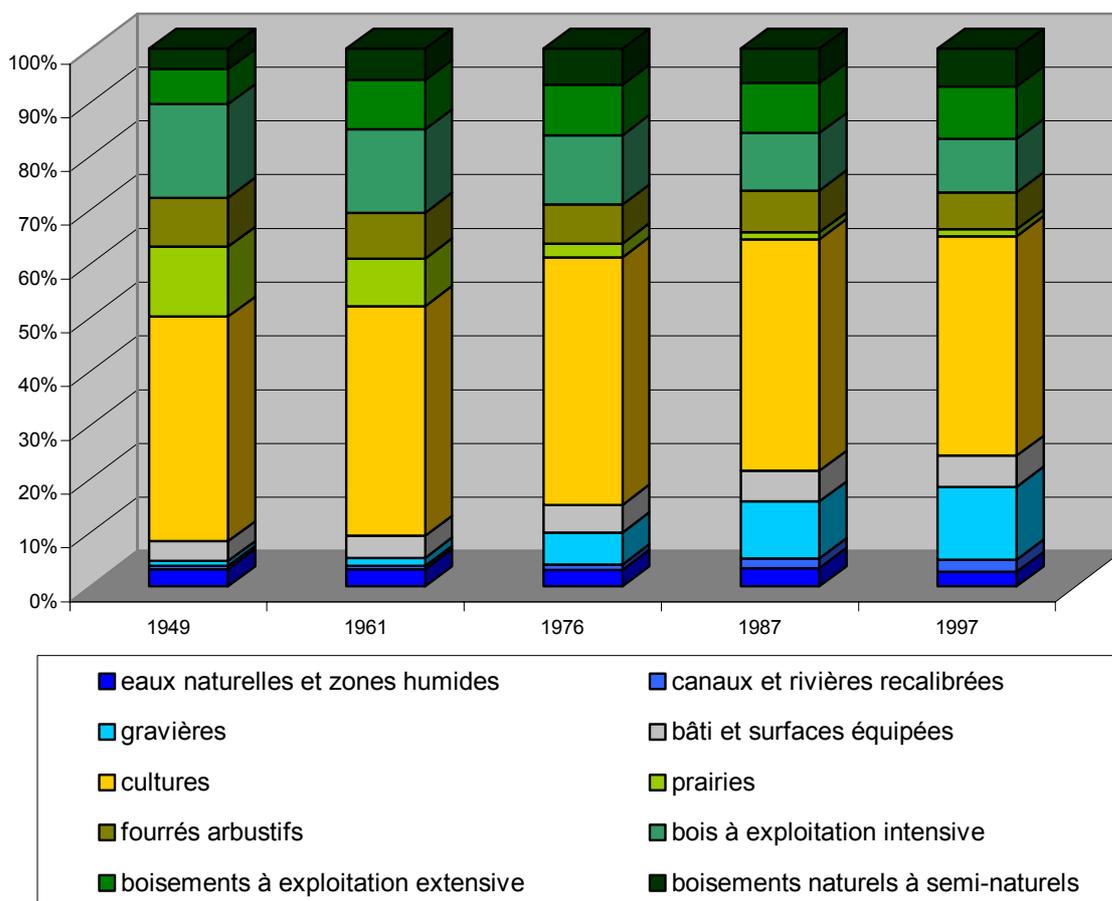


Figure 9. L'évolution de l'occupation des sols dans la Bassée au cours des 50 dernières années

4. Caractéristiques hydrologiques du corridor fluvial de la Seine moyenne (P.Weng et H.Bendjoudi pour le PNRZH)

4.1. Fonctionnement hydrologique.

Le paramètre hydrologique le plus immédiat est le niveau de l'eau qui apparaît comme un facteur de contrôle du fonctionnement des zones humides. Godwin et Bharucha (1931) ont mis très tôt en avant l'importance du niveau d'eau dans ces milieux. On s'est ensuite intéressé à la fluctuation de ce niveau en terme de fréquence et de durée de la saturation ou de la submersion décrites par l'hydropériode ou signature hydrologique de la zone humide (Brinson, 1993 ; Skaggs et al., 1991 ; Winter, 1992). Cette notion a même été utilisée pour classer les zones humides (Cowardin et al. 1979).

Cependant cette notion à elle seule ne permet pas d'expliquer tous les aspects du fonctionnement des zones humides. Nous avons donc eu recours aussi aux outils classiques de l'hydrologie et de l'hydrogéologie

: circulations, échanges, bilans, modélisation. L'objectif est de connaître et de modéliser les caractéristiques principales des circulations superficielles et souterraines : (i) sens et vitesse de circulation de l'eau à différentes profondeurs et époques dans les corps sédimentaires étudiés ; (ii) origine des eaux ainsi que leur variation au cours de l'année ; (iii) mécanismes d'inondation et (iv) fonctionnement de la zones non saturée.

4.1.1 Bilan hydrologique.

Bilan hydrologique à l'échelle du bassin.

Le bilan hydrologique de la région a été établi pour la période 1979 à 1995 (Weng, 2000). Le bassin (2,840 km²) concernée par ce bilan est représentée Figure 10. Il inclut la plaine alluviale (840 km²), les affleurements de la craie sur le plateaux encadrant cette plaine (1870 km²) et les affleurements des argiles de Gault à l'extrême sud-est (130 km²). Dans cette région, les bassins versants superficiel et hydrogéologique coïncident.

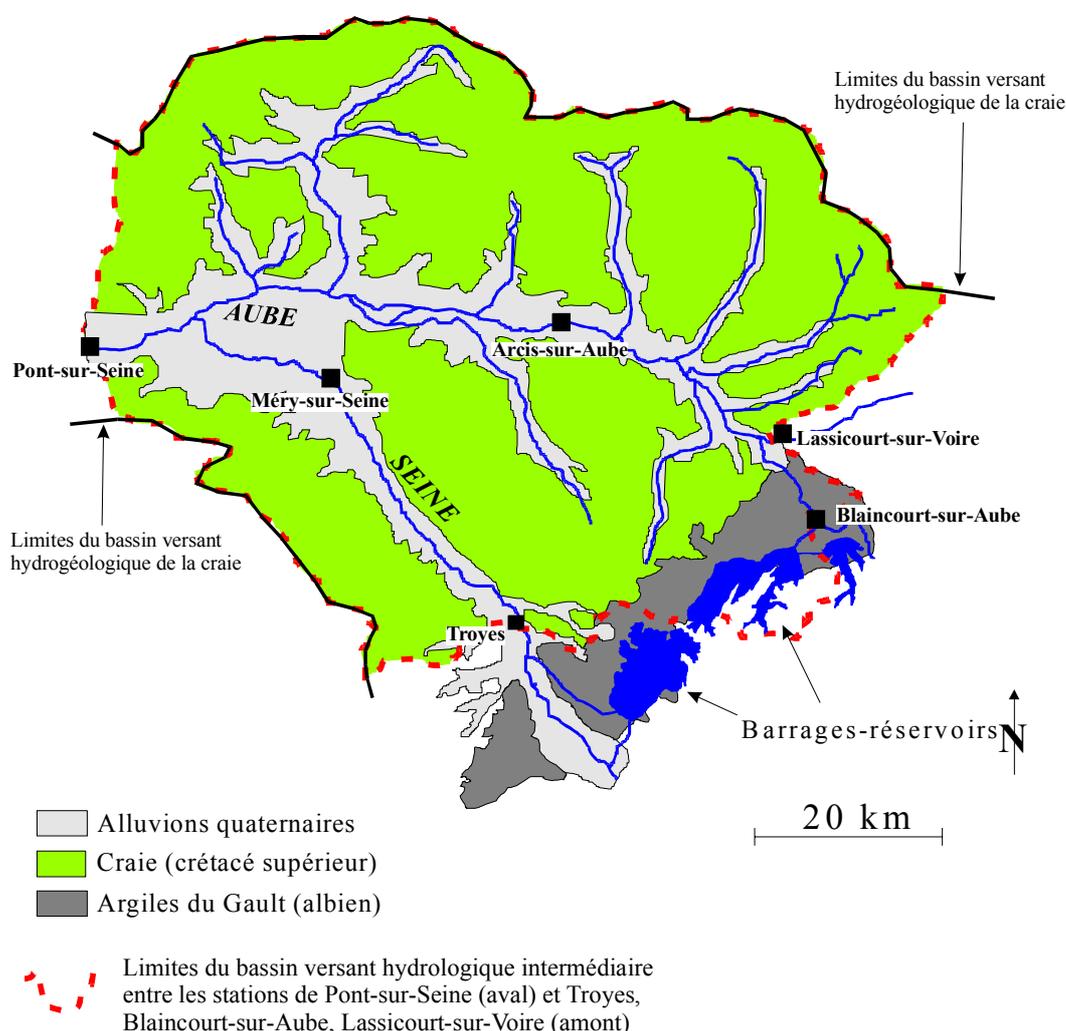


Figure 10. Limites du bassin pour lequel a été établi le bilan hydrologique régional (Weng, 2000)

Les entrées sont les écoulements de surface et les précipitations efficaces. Les premiers, débits des rivières à l'entrée de la zone étudiée (Lassicourt, Blaincourt et Troyes), proviennent des restitutions des deux grands barrages en amont (réservoirs Aube et de Seine). A partir des données de la Banque Hydro, ces entrées atteignent 631 Mm³.an⁻¹ à Blaincourt, 227 Mm³.an⁻¹ à Lassicourt et 1056 Mm³.an⁻¹ à Troyes, avec une incertitude de 5 à 7% en fonction du débit mesuré (d'après la Charte de qualité des mesures hydrométriques, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, 1998). Pour estimer la pluie

efficace (recharge) nous avons utilisé l'ETP Penmann fournie par Météo-France à la station de Troyes ; l'évapotranspiration réelle (ETR) a été calculée, en supposant le ruissellement négligeable, par la méthode de Thornthwaite (Thornthwaite, 1954). en utilisant une capacité du réservoir du sol de 75 mm pour toute la région. Cette valeur a été choisie de façon à équilibrer le bilan hydrologique. En effet, une valeur de 100 mm - généralement admise sous climat tempéré (Greiner, 1997 ; Mégnién, 1979) – donne une recharge faible. La capacité du sol retenue donne une recharge annuelle moyenne de 183 mm soit $520 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$. On peut admettre pour cette entrée une incertitude de l'ordre de 3 à 7% (suivant les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Météorologie, OMM, 1994)..

Les sorties sont les débits de la Seine mesurés à Pont sur Seine ($2485 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$) et l'écoulement souterrain, à travers les alluvions et la craie à l'ouest du bassin. A l'aide des cartes piézométriques et de quelques valeurs des transmissivités (Mégnién, 1979), nous avons estimé ces sorties souterraines à moins de $4 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$, ce qui, compte tenu des incertitudes précédentes permet raisonnablement de les négliger.

Le Tableau 2 donne les différents termes du bilan annuel moyen. La différence entre les entrées et les sorties ($51 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$) doit être considérée à la lumière de l'incertitude résultante qui est de l'ordre de 10 à 15% (addition des variances) soit 245 à $370 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$. On peut donc considérer que le bilan est équilibré et que les valeurs d'entrée et de sortie sont validées.

Tableau 2. Bilan hydrologique régional sur la période 1979-1995.

	Entrées		Sorties	
	$10^6 \text{ m}^3.\text{an}^{-1}$	Incertitude	$10^6 \text{ m}^3.\text{an}^{-1}$	Incertitude
Recharge	520	3 à 7%	***	***
Entrée de surface à Blaincourt-sur-Aube	631	5 à 7%	***	***
Entrée de surface à Lassicourt-sur-Voire	227	5 à 7%	***	***
Entrée de surface à Troyes	1056	5 à 7%	***	***
Sortie de surface à Pont-sur-Seine	***	***	2485	5 à 7%
Sortie alluvions (écoulement souterrain)	***	***	p.m.	p.m.
Total	2434		2485	10 à 15%
Différence			51	

Bilan hydrologique à l'échelle de la zone humide alluviale.

En supposant que la variation du stock est nulle à l'échelle inter-annuelle, on peut établir (Weng *et al.*, 1999) un bilan hydrologique pour la zone humide alluviale (840 km^2). Celle-ci est alimentée par les pluies efficaces (Q_{PZH}) et la nappe aquifère de la craie (Q_{CRZH}) et est drainée par les rivières (Q_{ZHR}), soit :

$$Q_{PZH} + Q_{CRZH} = Q_{ZHR}$$

Pour la période 1979-1995, en moyenne annuelle; $Q_{PZH} = 154 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$ ($183 \text{ mm}.\text{an}^{-1}$ sur 840 km^2) et $Q_{ZHR} = 571 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$ (différence entre les sorties et les entrées de surface). Soit $Q_{CRZH} = 417 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$. **Ainsi sur la période 1979-1995, la zone humide alluviale a été alimentée à 73% en volume par les eaux de l'aquifère crayeux, et à 27% par les précipitations efficaces.** Ces valeurs prouvent qu'il est nécessaire de prendre en compte les eaux souterraines (d'échelle régionale) dans l'étude de l'hydrologie des zones humides. Le problème des zones humides n'est donc pas à regarder "du dessus", en se limitant à la surface de la zone humide mais dans un contexte d'hydrosystème, en tenant compte d'une zone d'alimentation beaucoup plus vaste que la zone humide *stricto sensu*.

Ces bilans ne nous donnent pas l'ETR sur la zone humide mais avec une infiltration moyenne de 183 mm/an sur le bassin versant entier (alluvions + craie + argiles de Gault), pour une pluie moyenne de 662 mm/an et une ETP moyenne de 710 mm/an, on arrive à une ETR de 479 mm/an. L'ETR représente donc approximativement 67% de l'ETP sur l'ensemble du bassin. En fait nous montrerons plus loin que l'ETR dans la zone humide alluviale peut atteindre 95% de l'ETP.

Évaluation de la capacité de stockage de la zone humide alluviale.

En comparant les valeurs journalières des débits à l'entrée et à la sortie de la zone humide alluviale, il est possible de mettre en évidence la fonction de stockage de la zone humide durant les épisodes de crue. Lorsque, suite à l'arrivée d'une crue, le niveau de la rivière monte, l'eau s'infiltré par les berges et est stockée dans les alluvions pour être restituée plus tard. Nous avons essayé de quantifier ce rôle régulateur de la zone humide. La Figure 11 donne, par exemple, pour l'année 1991-92, les débits entrant à l'amont de la zone et les volumes stockés ou restitués.

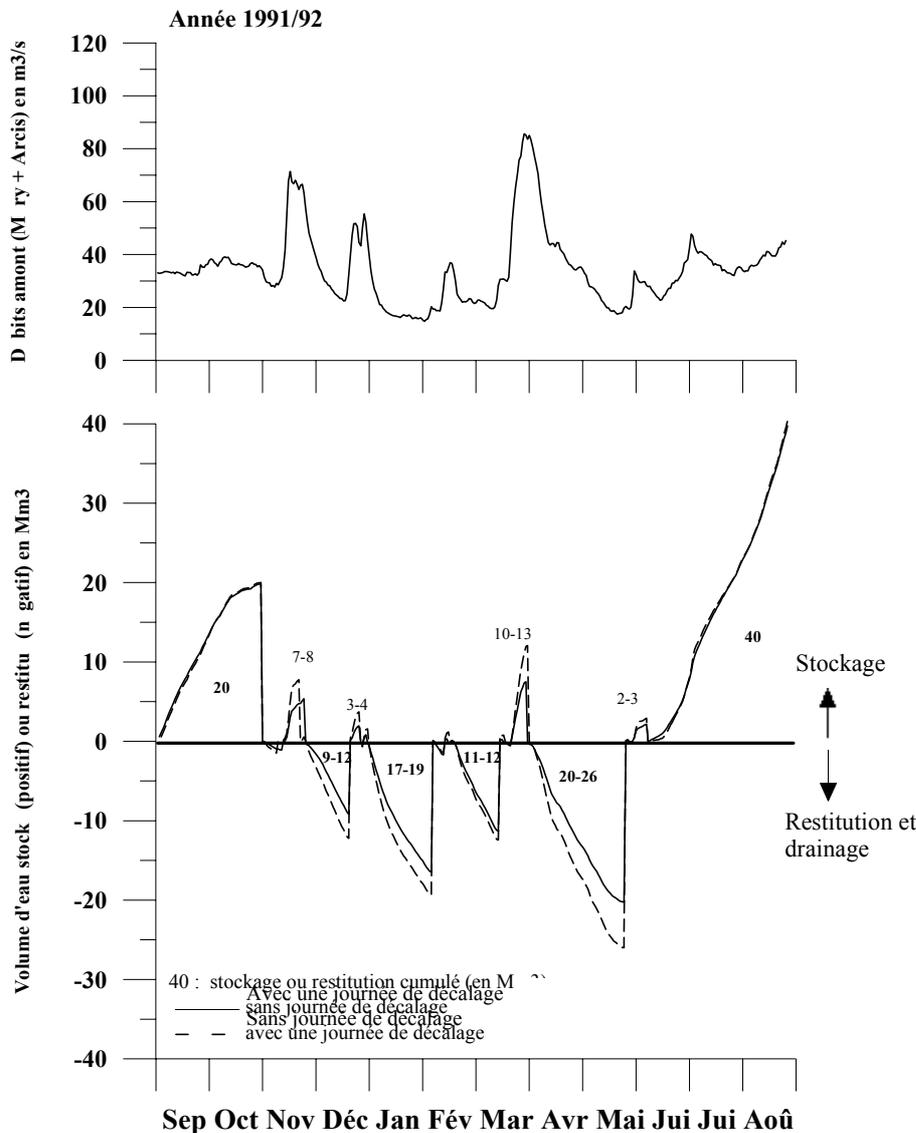


Figure 11. Évaluation de la fonction de stockage de la zone humide pour 1991/1992 (Weng, 2000).

Ces volumes sont calculés par différence entre les entrées et les sorties avec ou sans un jour de décalage, les valeurs positives représentant un stockage et les négatives une restitution. Il faut noter que l'important stockage qui commence au mois de juin (et peut être même celui de septembre octobre), est en réalité un déficit dû, comme nous le mettrons en évidence plus loin, à l'alimentation de l'évapotranspiration par le soutien d'étiage.

Cette période de forte évaporation mise à part on doit s'attendre à ce que, pour le reste de l'année le stockage soit peu ou prou égal à la restitution. Or celle-ci apparaît plus importante. La différence ne peut être due qu'à la contribution du bassin intermédiaire. Il nous est actuellement difficile de l'évaluer, mais on peut estimer que le zéro de l'axe du stockage devrait se situer quelques 5 Mm³ plus bas. A partir de cette remarque le volume stocké peut représenter jusqu'à 15 Mm³ sur une semaine. Ramené à la surface de la plaine

alluviale, et en prenant une porosité efficace de 10%, ce volume représente une variation d'à peine 0,18 m de la surface piézométrique.

Notons qu'une expérience avait été montée en septembre 1991 pour mesurer directement le stockage des berges (Tajjar, 1993). Les conclusions en avaient été que : (i) le stockage est significatif pour des durées d'une semaine mais proportionnellement moins important si la variation du débit se prolonge au delà d'un mois ; (ii) le stockage est plus important dans les parties les moins aménagées pour la navigation.

4.1.2 Les mécanismes d'inondation.

Les niveaux d'eau à l'intérieur et à l'extérieur du bac du site d'observation de Voyons ainsi que dans le piézomètre de surface (1m de profondeur) ont été enregistrés de novembre 1998 à mai 1999 (Figure 12). Il n'y a aucun délai entre les différents enregistrements de la montée des eaux ce qui milite en faveur d'une inondation par remontée de la nappe phréatique plutôt que par submersion de surface suite à un débordement de la Seine. L'inondation a bien pour origine la montée du niveau de la rivière mais elle se fait par infiltration à travers les dépôts alluviaux perméables et ensuite exfiltration verticale.

Ce schéma de fonctionnement, en période d'inondation, est confirmé par la carte piézométrique (Figure 14b) qui montre que l'écoulement souterrain est parallèle à la rivière, dirigé vers le canal, avec le même gradient hydraulique que la rivière elle-même.

Nous avons voulu savoir si ce fonctionnement était général ou seulement valable pour les deux années d'observation. Pour cela quatre carottes de sol de 80 cm ont été prélevées, deux sur notre site d'étude et les deux autres sur un site voisin plus élevé, jamais inondé et non perturbé par les activités humaines (site "stable"). Les teneurs en ^{137}Cs des carottes ont été mesurées tous les 10 cm. Le ^{137}Cs provient des retombées atmosphériques des tests nucléaires des années 60 et de l'accident de Tchernobyl de 1986. Il présente une demi-vie de 30 ans et est très fortement fixé par les particules du sol. Ce traceur est fréquemment utilisé pour étudier l'érosion ou l'accumulation des sols (Richtie et McHenry, 1975). Si la zone humide est alimentée par débordement de la rivière, les MES, marquées en ^{137}Cs , vont se déposer sur la zone humide, dont l'activité surfacique en ^{137}Cs devient ainsi plus forte que celle d'un site "stable". En revanche, en cas de remontées de nappe il n'y a pas d'apport de particules marquées. L'activité en ^{137}Cs sera donc plus forte pour un site inondé par débordement que par un site qui ne l'est pas. Les résultats obtenus montrent que l'activité moyenne en ^{137}Cs du site de Voyons (2098 et 2888 Bq/m²) est inférieure à celle du site "stable" de référence (2519 et 3769 Bq/m²). Notons que l'activité régionale, basée sur 17 échantillons prélevés dans toute la région, est de 3171 Bq/m².

On peut donc conclure que dans cette partie de la zone humide au moins, l'inondation est d'origine phréatique (ce mécanisme a été bien illustré par les inondations de 2001 de la vallée de la Somme). Il faut bien noter les conditions qui gouvernent ce type de fonctionnement : régulation des débits par les barrages amont et crues de période de retour de moins de 10 ans. Si on s'intéresse à l'ensemble de notre zone humide, à partir des observations de terrain, on peut conclure que les inondations résultent aussi bien de débordement, de la rivière elle-même ou par mise en eau d'anciens bras, que de remontées phréatiques. Ces dernières apparaissent sous la forme de mares de plus en plus importantes dans les points bas dès le début de la crue.

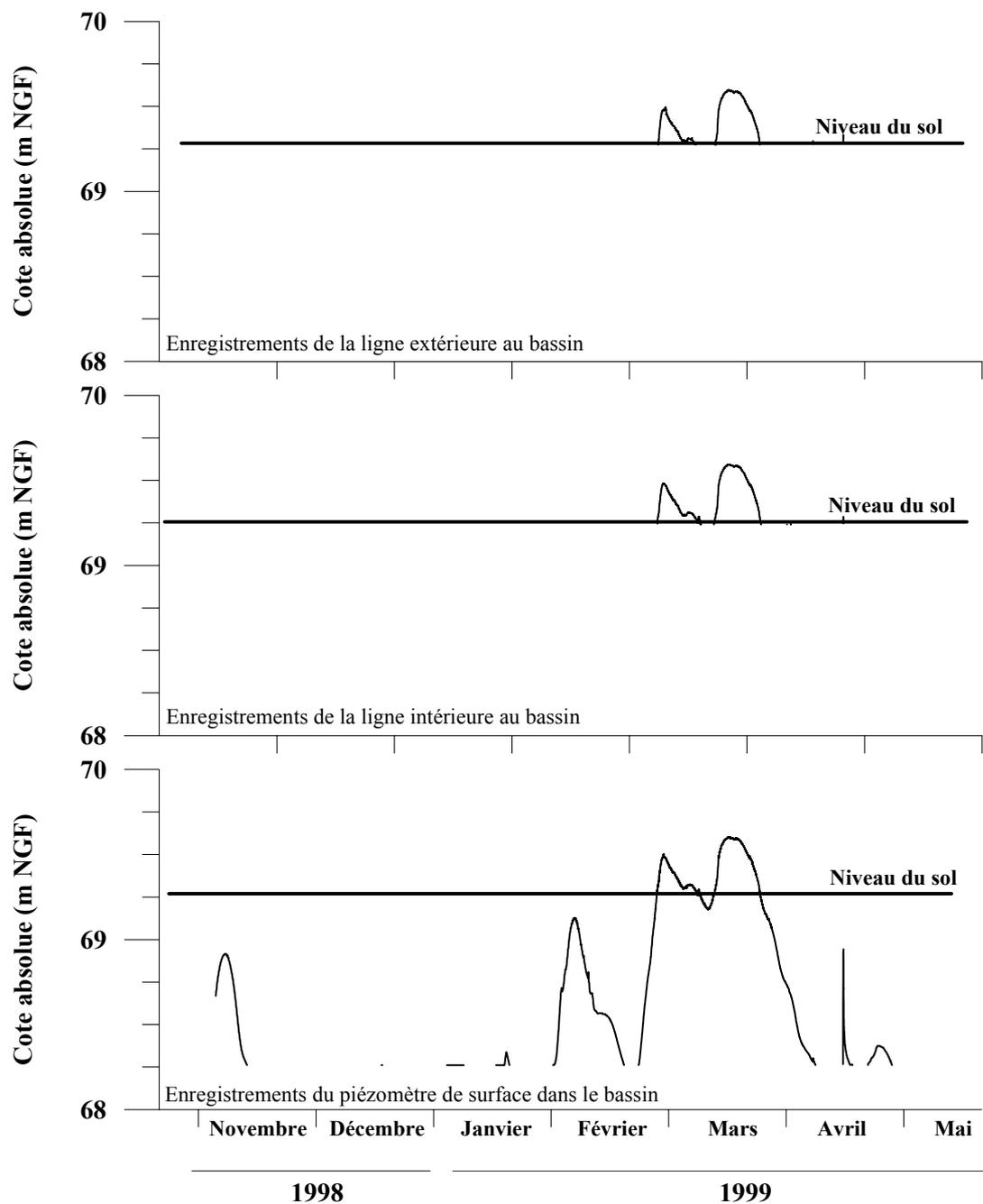


Figure 12. Enregistrement des niveaux d'eau à l'intérieur (haut) et à l'extérieur (centre) du bac et dans le piézomètre superficiel (bas), d'après Weng, 2000.

4.1.3 Fonctionnement hydrologique local.

Hors période de crue, il existe deux configurations des relations entre la Seine et la zone humide, le drainage par la Seine et l'infiltration depuis la Seine.

En conditions normales.

La Figure 13 permet de comparer les charges hydrauliques mesurées dans les piézomètres P37 et P38 (dont la position est donnée en Figure 14).

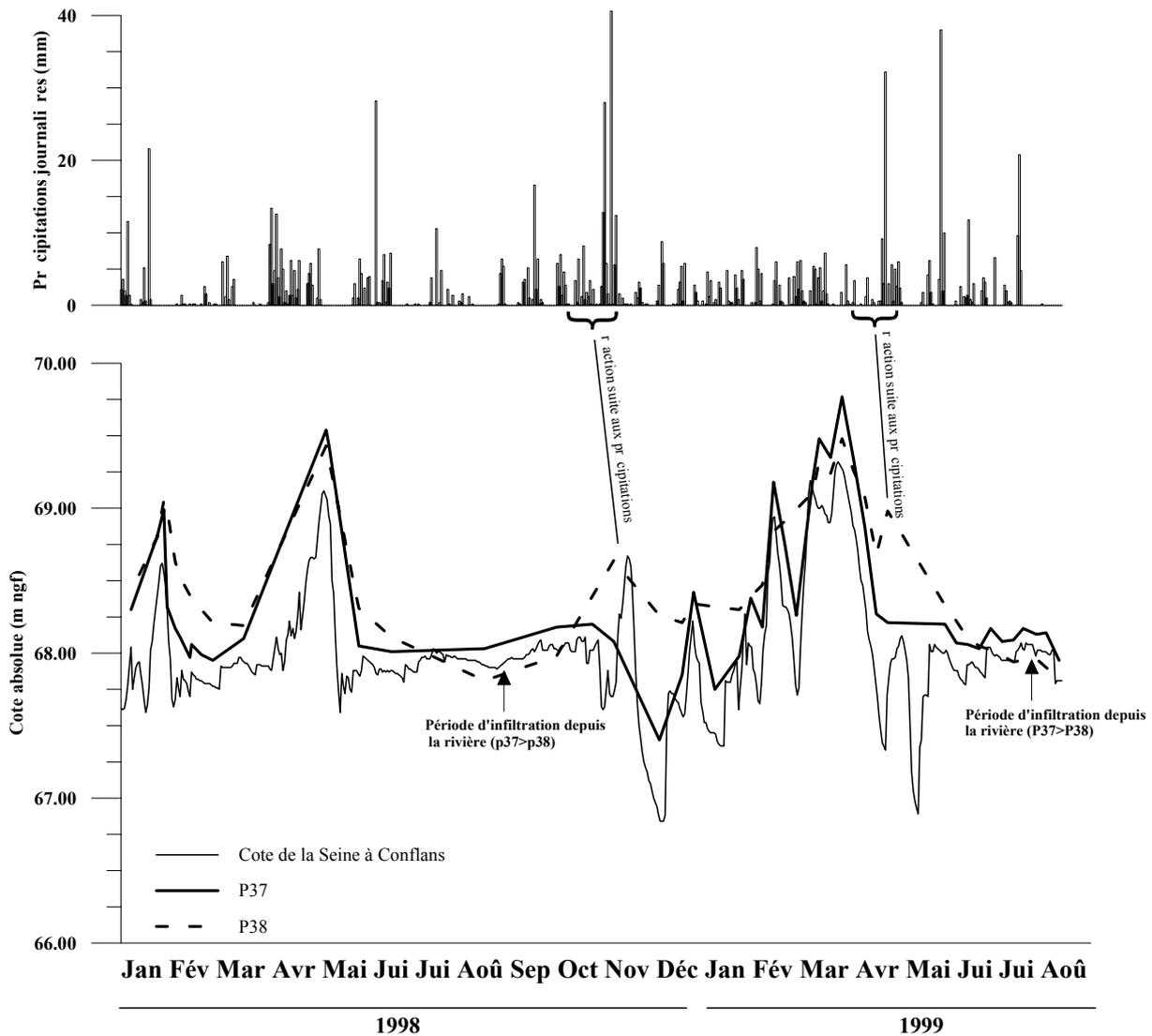


Figure 13. Relation entre la cote de la Seine et le niveau d'eau dans la zone humide (Weng, 2000).

Excepté en été (Figure 14c) et durant les inondations (Figure 14b), l'eau s'écoule de P38 vers P37 c'est à dire vers la rivière. Celle-ci joue donc le rôle de drain pour la zone humide, durant près de 60% du temps (Figure 14a). Le gradient hydraulique est variable, dépendant surtout du niveau de la rivière donc de la gestion des barrages réservoirs amont.

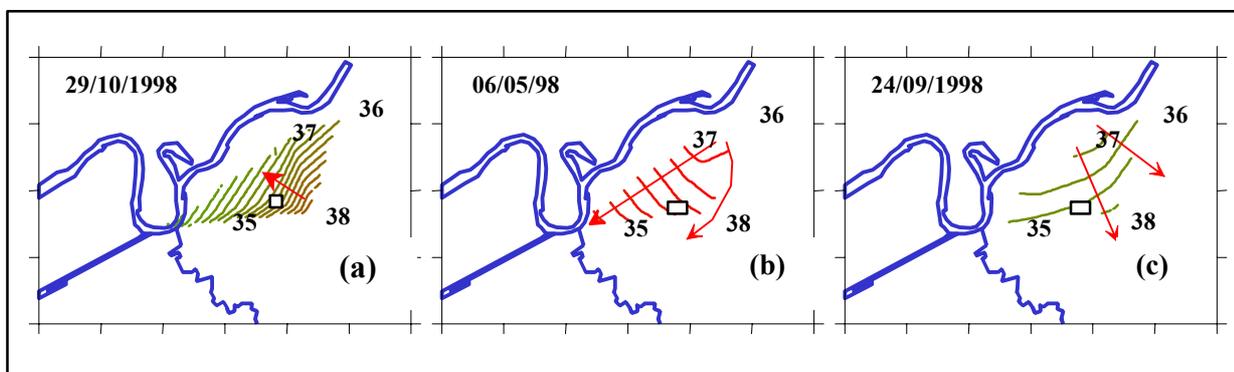


Figure 14. Circulations souterraines dans la zone humide à différentes périodes de l'année : (a) en période normale, (b) en période de crue et (c) en période estivale

En période estivale.

Pendant l'été (Figure 14c) l'eau souterraine circule dans le sens Seine-zone humide. Nous avons déjà vu que à cette période de l'année, une partie de l'eau fournie par les barrages pour le soutien des étiages, était perdue par évapotranspiration dans la zone humide. Un essai de quantification de ces pertes sera présenté plus loin.

Mise en évidence de circulations verticales entre la craie et les alluvions.

A partir des mesures du niveau de l'eau dans les piézomètres (l'un P15 dans la craie, l'autre P6 dans les alluvions, respectivement à 15 et 6 m de profondeur) du site de Voyons nous avons déterminé le gradient hydraulique vertical entre les alluvions et la craie sous-jacente (Figure 15). Il apparaît clairement que ce gradient correspond à un flux ascendant, sauf pour un jour ou deux, tout au long de la période de mesure. Ce gradient, de l'ordre de quelques millièmes la plus part du temps, peut atteindre de fortes valeurs après des épisodes de crue lorsque le niveau de l'eau dans la rivière (et dans les alluvions) décroît rapidement alors que celui de la craie reste encore élevé (Weng *et al.*, 1999).

Pour quantifier le flux ascendant de la craie vers les alluvions, nous avons besoin d'une estimation des conductivités hydrauliques des différents matériaux. Nous avons procédé pour cela à des chocs hydrauliques (slugs tests , Hvorslev, 1951) dans trois piézomètres, à la craie, aux alluvions grossières et au niveau supérieur argileux (Tableau 3).

Tableau 3. Détermination des conductivités hydrauliques pour les différents horizons

Piézo mètre	Argiles- limoneuses	P6m (alluvions grossières)	P15m (craie)
K (m/s)	$8 \cdot 10^{-7}$ à $10 \cdot 10^{-7}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$6.98 \cdot 10^{-4}$ à $8.73 \cdot 10^{-4}$

Ce genre de test donne plutôt la conductivité horizontale pour les formations étudiées. Pour estimer la conductivité verticale nous nous appuyerons sur Weng (2000) qui à partir de l'équation de la diffusivité et des variations du niveau dans les piézomètres P6 et P15 estime que la conductivité verticale (K_v) est environ 40 fois plus faible que la conductivité horizontale (K_h). Ce qui nous donne pour la conductivité hydraulique verticale de la craie une valeur de $1,9 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$. Avec cette valeur et un gradient vertical moyen de 2 pour mille, le flux entre la craie et les alluvions serait de $3,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ qui représente environ deux fois la valeur obtenue par le bilan hydrologique établi pour une période de 16 ans. Ceci signifie que, selon toute vraisemblance, ce flux vertical n'est pas uniformément réparti sur toute l'étendue de la zone humide. Il est plus fort au niveau du site expérimental de Voyons qui est situé à seulement 500 m de la rivière et reçoit une alimentation, à partir de la craie, supérieure au reste de la plaine alluviale développée sur plus de 4 km de large.

Néanmoins, quelle que soit la valeur de ces chiffres, ceci montre sans ambiguïté que la zone humide est rechargée par la craie sous-jacente.

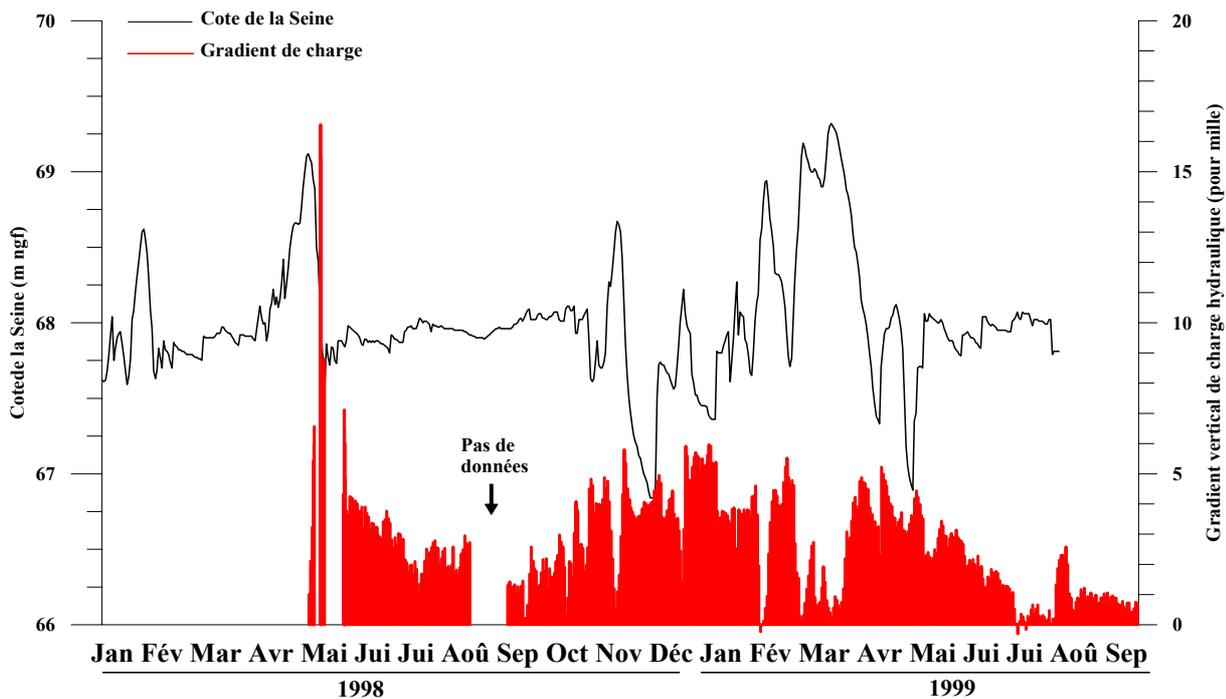


Figure 15. Evolution de la cote de la Seine et du gradient vertical de charge hydraulique (craie-alluvions) en fonction du temps (Weng et al, 1999)

Étude de l'évapotranspiration en période estivale.

En été, l'évolution du niveau de l'eau dans la zone humide montre deux types de variations : (i) des variations de grande amplitude contrôlées par les variations du niveau de la Seine ; (ii) des oscillations de plus faible amplitude et de période journalière. L'enregistrement de ces variations (Figure 16) pour les piézomètres P6 et P15, montre que les niveaux maximums sont enregistrés vers 7 h du matin et les plus faibles vers 7 h du soir. La fluctuation journalière est de l'ordre de quelques centimètres.

L'explication de ce phénomène est que le niveau de l'eau dans la zone humide, autour de 1,4 m de profondeur en été, est tel qu'il permet de satisfaire une très grande partie de la demande évaporatoire. Durant le jour, le niveau baisse suite notamment aux prélèvements racinaires et à la demande évaporatoire de l'atmosphère alors que durant la nuit l'aquifère est rechargé par la rivière ou par la craie sous-jacente au moment où la demande racinaire est nulle ou plus faible. Godwin et Bharucha (1931) ont fait de pareilles observations et les ont rapportées à l'évaporation ou à l'évapotranspiration. Pensant qu'il y avait là une façon simple de quantifier l'évapotranspiration réelle, nous avons tenté de comparer les amplitudes journalières des oscillations du niveau de l'eau à l'ETP Penmann fournie par Météo-France. Mais contrairement aux conclusions des travaux cités, aucune corrélation n'a pu être établie, qui nous aurait permis d'estimer l'évapotranspiration à partir de l'enregistrement des fluctuations piézométriques. Peut être cela est-il dû au fait que l'ETP utilisée est une valeur représentative plutôt de la région que des conditions locales.

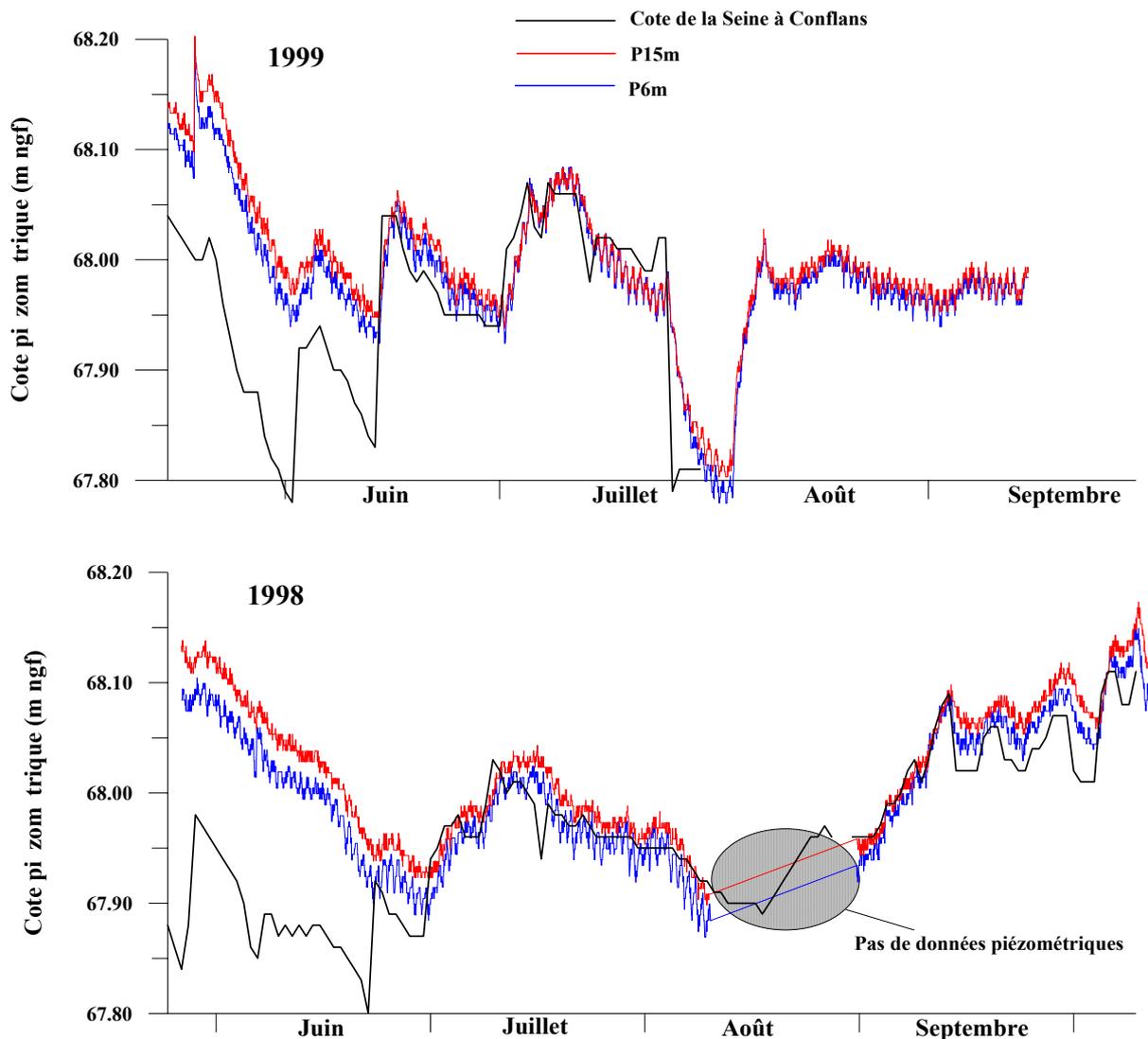


Figure 16. Fluctuations du niveau de l'eau dans la zone humide durant les étés 1998 et 1999. Le niveau de la Seine est mesuré à 1 km en aval du site des mesures piézométriques (Weng, 2000).

4.1.4 Schéma conceptuel du fonctionnement de la zone humide.

A partir des données piézométriques et tensiométriques, un schéma de fonctionnement hydrologique de la prairie alluviale peut être proposé. Hors période de crue, la nappe alluviale alimente généralement la rivière avec une pente hydraulique moyenne de 0,5‰. L'épaisseur du domaine non saturé est de 1,20 m (hiver) à 1,30 m (été), les circulations y sont descendantes lorsque l'évapotranspiration est faible, ascendantes lorsque celle-ci est forte.

En période de crue, l'eau sature la totalité ou presque des horizons supérieurs. Lorsque le niveau de la rivière baisse, le drainage des premiers horizons de sol (argiles limoneuses) est assuré par les alluvions. Dans le même temps, la baisse du niveau de la Seine provoque une baisse rapide de la charge hydraulique dans les alluvions. La nappe de la craie, de transmissivité 2 à 10 fois inférieure à celle des alluvions (Mégnién, 1979) réagit moins rapidement aux variations de la cote de la rivière, ce qui engendre des différences de charge hydraulique entre ces deux nappes et se traduit par l'apparition d'une importante composante verticale ascendante. On peut dès lors déduire que la gestion anthropique de la cote de la Seine a une conséquence directe sur les circulations dans les nappes sous-jacentes et donc sur la qualité chimique de celles-ci. Un tel schéma de fonctionnement doit être généralisable à l'ensemble des régions de zones humides riveraines de fleuve en régions tempérées et où les niveaux d'eau sont soumis au contrôle anthropique.

4.2. Étude de la zone non-saturée.

La zone non-saturée du sol représente la zone de battement de la nappe superficielle de la zone humide. Le passage répété de conditions oxygènes à des conditions anoxiques gouverne la dynamique des processus biogéochimiques qui s'y déroulent. Il est donc important d'en connaître le fonctionnement.

4.2.1 Utilisation de la tensiométrie.

Les relevés tensiométriques effectués sur le site de Voyons montrent deux types de profils de charge hydraulique bien distincts (Figure 17). De novembre à mai, nous trouvons des profils en infiltration (Figure 17a) : les charges hydrauliques diminuent avec la profondeur, devenant constantes à partir du moment où le capteur est au dessous du niveau de la nappe. La période pendant laquelle de tels profils sont observables est relativement longue. Cependant cette infiltration a peu d'effet sur le niveau de la nappe, lequel est entièrement contrôlé par le niveau de la Seine. L'aquifère est bien rechargé mais le flux entrant est assez vite évacué vers la rivière. Sur la plupart des profils relevés on peut noter la présence d'une surpression locale vers 1 m de profondeur au niveau de la couche du sol riche en argile. L'hypothèse retenue est que cette surpression est causée par le gonflement des argiles, en particulier la smectite (détectée par diffractométrie X) autour du tensiomètre.

A partir de mai un plan de flux nul commence à apparaître aux alentours de 40 cm de profondeur. L'évapotranspiration commence à être suffisamment importante pour provoquer un flux ascendant dans la partie supérieure du sol, alors que la recharge hivernale est encore en train de s'infiltrer dans la partie inférieure (Figure 17b).

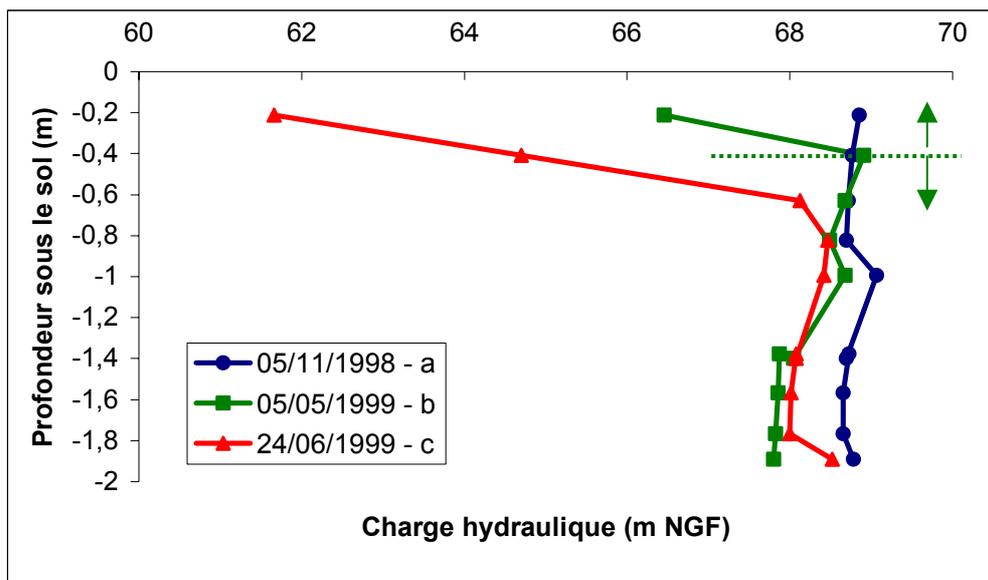


Figure 17. Profils tensiométriques enregistrés au site de Voyons à trois périodes de l'année : (a) infiltration en période hivernale, (b) flux divergent en début de période estivale, (c) évapotranspiration en été.

A partir de juin (Figure 17c), l'horizon de flux nul disparaît et un profil d'évapotranspiration commence à s'installer. Il faut noter que ces profils d'évapotranspiration correspondent à la période au cours de laquelle les oscillations nyctémérales sont observées.

4.2.2 Modélisation de la zone non saturée.

La modélisation (Weng, 2000 ; Bendjoudi *et al.*, 2002) a été effectuée en une dimension pour une colonne verticale de sol. L'objectif en est d'estimer les flux d'infiltration ou d'évapotranspiration transitant à travers la zone non saturée du sol. Le modèle utilisé a été développé au sein du BRGM (MARTHE, Modélisation d'Aquifère par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements, Thiery, 1990, 1993).

La colonne de sol a été divisée en 3 horizons : argile limoneuse sur les 80 premiers centimètres, argile jusqu'à 110 cm et ensuite alluvions grossières jusqu'à 7 m. Les conditions aux limites sont les suivantes :

- au sommet de la colonne un flux imposé correspondant au bilan pluie-évaporation ; ce flux est en fait ajusté au fur et à mesure (en pourcentage de l'ETP) pour caler le modèle ;
- au fond de la colonne une charge imposée correspondant à la cote du piézomètre P6.

Ne disposant pas de relations $K(h)$ et $\theta(h)$ expérimentales, nous avons utilisé les relations de van Genuchten (Van Genuchten, 1980) pour décrire le comportement du sol en fonction de la saturation. Pour paramétrer ces relations, nous nous sommes dans un premier temps référés à la littérature (Brooks & Corey, 1964 ; Van Genuchten, 1980 ; Mualem, 1976) avant de les déterminer par calage du modèle. La teneur en eau à saturation θ_s a été mesurée sur le terrain à la sonde TDR, en février 1999 alors que la nappe était affleurante ($\theta_s = 46\%$).

Le modèle a été calé en régime transitoire et testé sur une période de 114 jours. Les résultats obtenus au pas de temps journalier montrent une bonne correspondance entre les charges simulées et les mesures obtenues par tensiométrie. La période de simulation correspond à deux sous périodes de 57 jours chacune l'une humide (8 avril au 3 juin 1999) et l'autre sèche (4 juin au 30 juillet 1999). Le modèle montre que durant la saison humide, l'infiltration atteint l'aquifère et que le niveau de celui-ci serait plus haut que mesuré si on supprime la connexion avec la rivière. Ceci rejoint donc la remarque déjà faite à propos des résultats de la tensiométrie : la pluie recharge bien l'aquifère mais celui-ci est rapidement drainé par la Seine.

Durant la saison sèche, le modèle donne une évapotranspiration réelle de 1,7 mm par jour, ce qui correspond à 93% de l'ETP. Cette valeur confirme ce qui a déjà mis en évidence par l'étude du stockage aussi bien que des oscillations nyctémérales : la rivière recharge la zone humide en période de forte évapotranspiration. Ce schéma est inversé par rapport à une situation naturelle où, en été, l'aquifère alluvial soutient la rivière. Ceci montre la très forte influence de la gestion anthropique (soutien des étiages par les réservoirs amont) sur le fonctionnement de la zone humide.

4.2.3 Suivi de l'infiltration par méthode thermique.

Différentes études ont mis en évidence la relation existant entre le flux d'eau dans le sol et le transfert de chaleur, l'infiltration de l'eau permettant en effet la convection de la chaleur. L'idée est donc de voir si, en observant les variations de température le long d'un profil vertical, on peut déterminer la vitesse d'infiltration de l'eau.

Principe de la méthode

Lorsqu'un fluide se déplace dans un milieu poreux à la conduction thermique s'ajoute un phénomène de convection. La solution de l'équation de la chaleur dépend alors de deux paramètres, Γ (coefficient de diffusivité thermique) et u (composante verticale de la vitesse de Darcy) qui peuvent être estimés à partir du rapport des températures à deux profondeurs différentes.

(1) Étude des variations périodiques.

Pour un signal périodique (Tabbagh *et al.*, 1999) il est intéressant d'exprimer Γ soit à partir de la différence de phase entre deux profondeurs (Γ_{phase}) soit à partir du rapport d'amplitude entre les mêmes profondeurs (Γ_{amp}). La différence entre ces deux diffusivités apparentes est une fonction monotone croissante de u , qui peut ainsi être estimé si l'on dispose d'une table de correspondance entre cette différence et u .

(2) Étude des variations transitoires.

Pour des variations transitoires, Γ et u peuvent être calculés par une procédure d'optimisation (moindres carrés par exemple) en cherchant le meilleur ajustement entre la température $T(z_2, t)$ observée à un

niveau donné z_2 et la température $T^*(z_2, t)$ calculée par prolongement à partir de la température mesurée à une autre profondeur z_1 (Bendjoudi *et al.*, 2001).

La méthode permet aussi de déterminer, en plus du flux d'eau, l'humidité du sol pour la période considérée.

Application aux données expérimentales.

Trois sondes thermiques ont été disposées dans une fosse creusée en avril 1998, sur le site de Voyons, dans la zone alternativement saturée et non-saturée du sol, aux profondeurs de 20, 40 et 75 cm. Sur ce terrain, le toit de la nappe phréatique se trouve à 1.20 m à l'étiage, tandis que l'eau affleure en période de crue. Les mesures, poursuivies jusqu'à mi-1999 (Figure 18), ont été faites au pas de temps horaire pendant plus d'une année.

A ces faibles profondeurs, les ondes thermiques résultent des variations atmosphériques, dont elles reproduisent les oscillations saisonnières et journalières, modulées par l'influence de facteurs météorologiques non périodiques. Par exemple, les vagues de froid ou de chaleur particulières translatent l'ensemble des valeurs suivant l'axe des températures et les périodes de ciel dégagé augmentent l'amplitude des variations diurnes. Mais, le signal comporte toujours des termes sinusoïdaux aux trois profondeurs, quelle que soit la période d'étude retenue, dont l'atténuation et le déphasage par rapport aux conditions de surface augmentent avec la profondeur.

(1) Variation annuelle.

Nous avons d'abord considéré un cycle annuel allant du 17 juillet 1998 au 16 juillet 1999. Ce choix est justifié par le souci de laisser le sol se stabiliser après la mise en place des sondes et d'éviter la crue exceptionnelle de mai 1998.

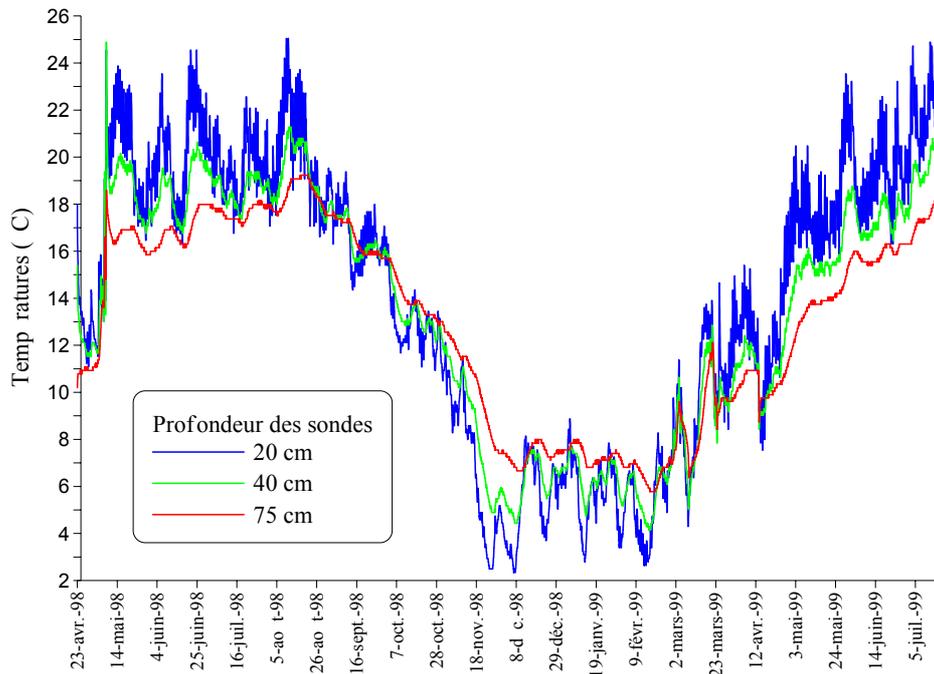


Figure 18. Suivi de température sur le site de Voyons (R. Guérin)

Pour le couple de sondes (20-75 cm), nous obtenons pour la diffusivité apparente, des valeurs de $0,2847 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ par différence de phase et $0,2416 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ par rapport d'amplitude, ce qui correspond à $\theta = 0,326$ et $u = 527 \text{ mm}/\text{an}$. Ces valeurs ayant été obtenues à partir d'un seul cycle, doivent être considérées avec précaution mais elles sont très vraisemblables. En effet, pour la même période on enregistre une ETP de 1189 mm et des précipitations de 945 mm. La valeur de u correspond en moyenne annuelle à la différence entre un flux descendant, la recharge et un flux ascendant, l'ETR. Par ailleurs, si on admet que, compte tenu de la topographie, le ruissellement est nul, alors la somme de la recharge et de l'ETR est égale à la pluie. On

en déduit donc que la recharge est de 209 mm/an et que l'ETR = 736 mm/an ce qui correspond à 62% de l'ETP, ratio tout à fait compatible à celui établi à l'aide du bilan inter-annuel présenté plus haut.

(2) Variations transitoires.

Après la crue de mai 1998 on note une variation importante au niveau des profils de température (Figure 19). En appliquant la méthode transitoire pour la période du 13 mai au 7 juin 1998, on obtient pour le couple 20-40 cm (à 75 cm, les variations sont trop faibles pour pouvoir être exploitées), $u = -4,73$ mm/j et $\theta = 0,46$. Pendant la même période la précipitation moyenne est de 1,04 mm/j et l'ETP de $-3,68$ mm/j. Si on faisait l'hypothèse que l'humidité du sol ne varie pas pendant la période, hypothèse *a priori* trop grossière, on aurait une recharge négative de $-1,85$ mm/j et une ETR de $-2,89$ mm/j. Les profils tensiométriques présentant de grands changements pendant cette période n'ont pas permis une vérification de ces résultats.

Par contre, pour la longue période hivernale allant du 14 novembre au 22 décembre 1998, en utilisant le couple 20-40 cm, on obtient $u = 2,09$ mm/j et $\theta = 0,373$. En utilisant le modèle de van Genuchten et le profil tensiométrique mesuré le 3 décembre au milieu de la période, on obtient $u = 2,01$ mm/j et $\theta = 0,44$.

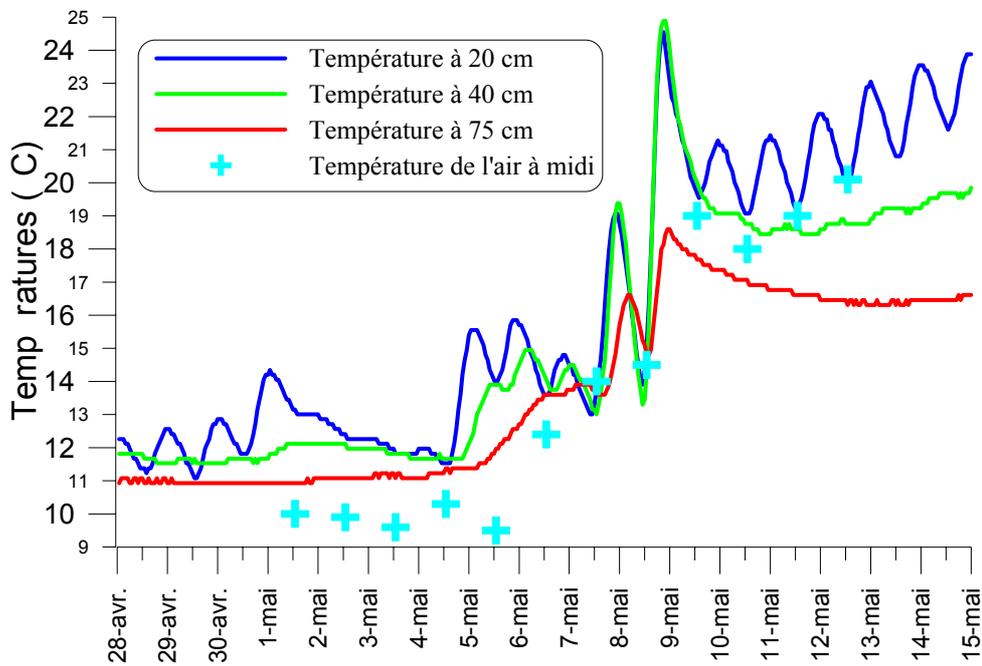


Figure 19. Valeurs de la température du sol à Voyons durant la crue de mai 1998 (R.Guérin)

5. L'intervention des zones humides sur les flux de matières

L'un des objectifs du thème "Corridor fluvial" de la deuxième phase du Piren-Seine était la mise en évidence et l'évaluation de l'impact des zones humides riveraines sur les flux de matières particulaires et dissoutes qui transitent dans ces interfaces ou qui y sont produites. Les résultats essentiels acquis dans le secteur de la Bassée amont sont brièvement rappelés. L'étude concernant l'intervention des milieux humides sur les flux d'azote s'est poursuivie avec un essai de mesure directe de la dénitrification dans le cadre du programme du PNRZH et une évaluation des capacités de rétention des plaines alluviales, intégrée à la modélisation des transferts d'azote réalisée au cours de la phase récente du Piren-Seine.

5.1. La rétention des M.E.S. et des polluants associés. (E.Fustec)

Lorsqu'un débordement des eaux intervient en périodes de crue, la vitesse des écoulements et l'énergie de transport des eaux diminuent au sein de la plaine alluviale, entraînant une sédimentation des matières en suspension et des éléments qui leur sont associés. Les particules les plus grossières et les plus

lourdes se déposent d'abord en bordure du chenal, la sédimentation des particules les plus fines et les plus légères n'intervenant que dans les zones plus éloignées du chenal où la lame d'eau est plus mince et les écoulements très ralentis.

Ces processus ont été mis en évidence et quantifiés sur un site de peupleraie en bordure de la Seine, au nord de Romilly, à l'aide de pièges à sédiments et de carottages suivis d'analyses isotopiques (¹³⁷Cs notamment) qui ont permis d'évaluer la vitesse d'accumulation des particules au cours des 35 dernières années. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4. Stocks et vitesses d'accumulation des sédiments déposés, rétention du phosphore, de l'azote organique, du carbone organique et des métaux, à différentes distances de la Seine dans le site inondable de Maizières-la-Grande-Paroisse (Aube), au cours des 35 dernières années, (d'après Engerran, 1995, et Khebibèche, 1997)

Eléments	5 m du chenal	35 m du chenal	70 m du chenal
Vitesse d'accrétion des sédiments (mm/an)	14	10	5
Taux d'accumulation des MES (tonnes/ha/an)	150	100	60
Phosphore total (kg/ha/an)	135	124	104
Azote organique (kg/ha/an)	513	430	515
Carbone organique (kg/ha/an)	4860	5975	5470
Cuivre (kg/ha/an)	5	3,5	1,3
Zinc (kg/ha/an)	12	10	3
Plomb (kg/ha/an)	2,8	2,3	0,5
Chrome (kg/ha/an)	6,5	7	2
Nickel (kg/ha/an)	1	0,7	0,4

L'analyse de la biodisponibilité du phosphore piégé, par une méthode d'échanges isotopiques, a montré qu'une faible partie seulement des stocks immobilisés pouvait être mobilisée vers la phase liquide: 70 à 85 % de ce phosphore n'est pas mobilisable avant au moins un an. C'est ainsi que les stocks de phosphore total des sédiments, enfouis il y a 35 ans environ, n'ont diminué que de 1 % par an en moyenne (Fustec et al, 1998).

Les stocks de métaux piégés lors de la sédimentation des matières en suspension sont peu élevés, en raison de la faible contamination des eaux par les métaux dans les secteurs à l'amont de la Bassée. Les teneurs en métaux dans ces dépôts sont moyennement corrélées aux teneurs en argiles des sédiments mais elles sont très fortement liées aux teneurs en matière organique de ces derniers.

5.2. La rétention et l'élimination de l'azote

L'étude de l'impact des zones humides riveraines sur les flux d'azote a comporté plusieurs étapes : (i) une analyse des caractéristiques fonctionnelles d'une plaine alluviale en relation avec la distribution des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines, (ii) la mesure en place de la dénitrification, (iii) l'évaluation des capacités de rétention des zones riveraines par la méthode des bilans à l'échelle des bassins versants.

5.2.1 Mise en évidence de l'hétérogénéité fonctionnelle de la Bassée amont (I. Greiner et E. Fustec)

Les études géomorphologiques avaient fait apparaître l'hétérogénéité des corridors fluviaux qui résulte de la dynamique ancienne et actuelle des rivières. Une cartographie détaillée de l'occupation des sols a également mis en évidence une diversité de modes d'occupation des sols dans le secteur de la Bassée amont (Plaine de Romilly): les surfaces en eau couvrent 4,3 % du territoire, les ripisylves, boisements alluviaux et peupleraies occupent 46 % de sa superficie (10 000 ha environ) et les 49,7 % restants regroupent des parcelles cultivées, des prairies ou des friches. Ces indications laissaient présager un fonctionnement biogéochimique diversifié au sein de cette zone.

Pour appréhender cette hétérogénéité fonctionnelle, un dispositif de 100 piézomètres a été implanté sur l'ensemble de la plaine de Romilly, selon un maillage régulier. Il a permis de suivre les variations du

niveau de la nappe souterraines et des paramètres physico-chimiques de la qualité des eaux. Plusieurs caractéristiques fonctionnelles du système ont été mises en évidence durant la période d'étude (1994-1995) :

- Le niveau moyen de la surface de la nappe sur l'ensemble de la zone s'est établi à 1,12 m de profondeur, avec un niveau toujours à moins de 1 m de profondeur dans 55 % des piézomètres.

- Il existe une relation entre la profondeur de la nappe et l'occupation des sols : Les secteurs où le niveau moyen se situe entre 0 et 2 m sont majoritairement occupés par des marais à hélrophytes, des boisements naturels, des peupleraies ou des prairies. Les secteurs à nappe plus profonde (> 2 m) sont entièrement cultivés);

- La concentration moyenne en oxygène dissous dans la nappe est faible, entre 1,7 et 2,7 mg O₂/l mais avec des variations plus ou moins marquées au cours de l'année selon les secteurs. Les secteurs à nappe proche de la surface ont toujours des teneurs faibles, les nappes profondes (généralement dans des matériaux plus filtrants) sont davantage oxygénées. Les périodes d'inondation s'accompagnent d'une certaine réoxygénation des nappes sous-jacentes. Les conditions d'oxydo-réduction sont très variables d'un secteur à l'autre.

- Les concentrations en nitrates varient, en moyenne, sur l'ensemble de la plaine, entre 9,1 et 17,1 mg/l, selon les saisons, donc très nettement inférieures à celles enregistrées dans les nappes des coteaux adjacents (40 à 80 mgNO₃/l).

Ces investigations ont abouti au constat que dans le vaste système alluvial de la Bassée amont, il n'existe qu'un nombre limité de "types" de fonctionnement pour ce qui concerne la dynamique de l'azote, en relation avec un certain nombre de caractéristiques des milieux.(tableau 5)

Tableau 5. Relations entre la profondeur de la nappe, le potentiel redox (Eh), l'occupation des sols et les concentrations en nitrates dans la nappe, distribuées en 4 classes : <5, de 5 à 10, de 10 à 25 et > à 25,5 mgNO₃/l, durant la période 1994-1995, dans la Bassée amont (d'après Greiner, 1998).

Nombre de sites	45	11	19	13
Nitrates (mgNO ₃ /l)	1,5 ± 1,5	6,0 ± 1,0	16,2 ± 3,4	51,7 ± 22,7
Profondeur nappe (m)	0,93 ± 0,38	0,90 ± 0,37	1,13 ± 0,46	1,91 ± 0,93
Eh (mV)	248 ± 67	301 ± 78	352 ± 45	392 ± 112
% zones boisées	58	64	32	8,5
% friches	11	18	10,5	8,5
% prairies	13	18	10,5	-
% zones cultivées	18	-	42	83
% zones urbaines	-	-	5	-

Sur le nombre de sites où les piézomètres sont restés opérationnels pendant toute la durée de l'étude, on constate que 85 % d'entre eux présentent des teneurs en nitrates inférieures à 25 mgNO₃/l et que 64 % présentent des teneurs inférieures à 10 mgNO₃/l, soit moins que dans la Seine (environ 15 mgNO₃/l)..

La

Figure 20 montre les variations saisonnières des concentrations en nitrates mesurées dans 4 piézomètres représentatifs de ces différents types fonctionnels.

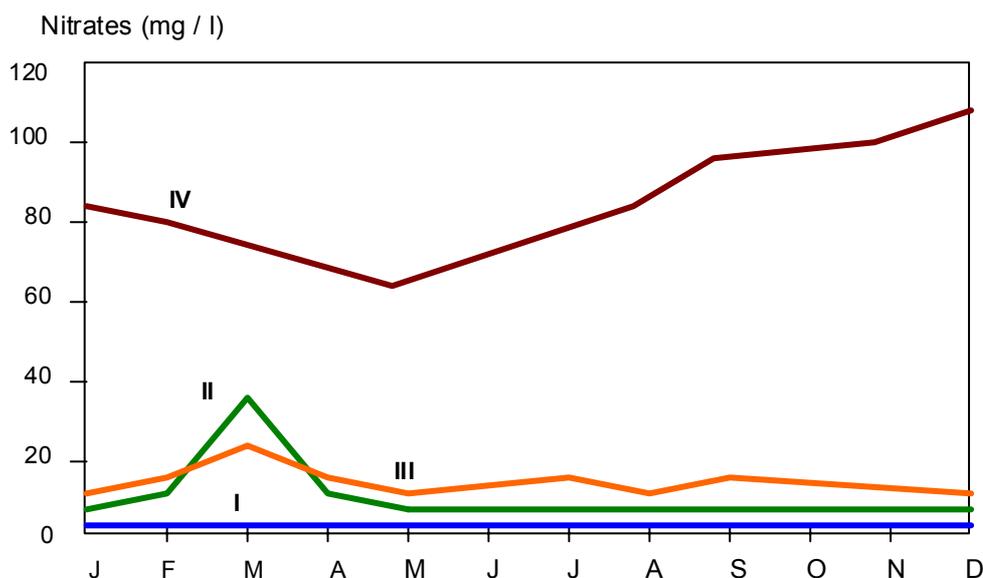


Figure 20. Les divers types d'évolution saisonnière des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines de la Bassée amont

On sait que la réduction des teneurs en nitrates dans les zones humides est essentiellement imputable à l'absorption de cet élément par les végétaux et à la dénitrification. On estime que les quantités d'azote dénitrifiées sont jusqu'à 10 fois supérieures aux quantités stockées annuellement et durablement dans les végétaux. Dans le type I, la dénitrification paraît très efficace toute l'année, alors que dans le type IV, les processus de rétention et d'élimination sont absents. Entre ces deux types extrêmes de fonctionnement, les 2 autres types, assez proches, montrent une activité dénitrifiante moins importante, durant la majeure partie de l'année, que dans la situation de type I et insuffisante à compenser l'absence d'absorption par les végétaux durant leur repos hivernal (d'où les 2 pics de entre février et avril).

5.2.2 Essai de mesure *in situ* de la dénitrification (S. Croguennec et E. Fustec pour le PNRZH)

Après avoir constaté l'efficacité de la zone de la Bassée amont sur la réduction des teneurs en nitrates dans la nappe alluviale, nous avons essayé d'estimer l'intensité de la dénitrification dans cette zone. On sait que ce processus microbien exige des conditions d'anaérobiose (absence d'oxygène), la présence de carbone facilement utilisable par les bactéries et des nitrates. La mesure de la dénitrification reste difficile et n'est toujours pas standardisée. Nous avons opté pour une méthode de mesure *in situ* récemment développée par Starr *et al.* (1996) et Bragan *et al.* (1997). Le dispositif de mesure a été installé sur le site de Voyons (cf § 4), afin de bénéficier des acquis d'autres équipes sur les écoulements souterrains dans cette zone expérimentale.

Le dispositif pour évaluer la vitesse de dénitrification comportait un piézomètre d'injection de 1,5 m de profondeur, entouré de 8 piézomètres semblables, disposés en cercle. Cette disposition permet d'avoir l'assurance d'intercepter un traceur injecté dans le piézomètre central, lorsqu'on n'a pas de certitude sur la direction locale de l'écoulement. Dans ce site, caractérisé par la présence d'une couche supérieure argileuse, les piézomètres atteignent la zone anoxique sous cette couche. Le rayon du cercle a été déterminé à partir de la vitesse d'écoulement. Celle-ci ayant été estimée à 10 cm/j, un rayon de 30 cm laissait présager un temps de transfert de l'ordre de 2 à 3 jours entre le piézomètre d'injection et les piézomètres de mesure.

La méthode consiste à injecter simultanément un traceur (bromure), une solution de nitrate et de l'acétylène. L'acétylène sert à inhiber la dernière phase du processus de dénitrification, c'est-à-dire la réduction de N_2O en N_2 ; il provoque ainsi une accumulation de N_2O dont la mesure permet d'estimer le taux de dénitrification. En l'absence de nitrates dans les eaux de la nappe, on a injecté au préalable (pendant 3 jours) une solution de nitrates à 10 $mgNO_3/l$ afin d'activer et de stabiliser le processus de réduction des nitrates. Cette pré-injection introduisant, dans l'aquifère, de l'oxygène dissous dans la solution de nitrates, une

quantité d'éthanol adéquate à été ajoutée à cette injection pour assurer la consommation de cet oxygène par les bactéries. Les tests se sont déroulés entre le 30 avril et le 12 mai 1998.

Les calculs ont été faits à partir de l'analyse des eaux dans les différents piézomètres et en ne retenant que celui qui s'est révélé situé dans la direction principale de l'écoulement. La valeur du pic de N₂O (55 µgN/l), un temps de transfert de 2,6 jours (estimé à partir du temps d'arrivée du bromure) en tenant compte du facteur de dilution du bromure (0,048) donnent un taux de dénitrification de 0,44 mgN/l/j (Croguennec, 1998). En adoptant une porosité de 30 % et une profondeur efficace de 0,10 m pour ce test, on obtient un taux de dénitrification de 48,3 kgN /ha /an sur ce site. Nous considérons que cette valeur est nettement sous-estimée. En effet, la période pour effectuer ces essais, début mai, avait été retenue car elle devait correspondre à une situation moyenne et relativement stable des conditions hydrologiques dans la zone humide. Or, une crue tardive s'est manifestée à cette période, entraînant une certaine ré-oxygénation des eaux souterraines et une augmentation de la vitesse des écoulements, conditions susceptibles de réduire les capacités dénitrifiantes de la zone.

5.2.3 Evaluation des capacités de rétention de la Bassée par la méthode des bilans d'azote (G.Billen)

On a vu que les caractéristiques morphologiques et hydrologiques des grandes plaines alluviales en général, et de la Bassée en particulier, en font des zones propices à la dénitrification. L'hétérogénéité des conditions locales est cependant telle qu'il est très difficile d'évaluer a priori l'importance du processus de dénitrification à l'échelle de l'ensemble de la plaine alluviale concernée à partir de telles mesures.

Une autre approche, complémentaire, peut être mise en oeuvre. Elle consiste à dresser le bilan des flux d'azote à l'échelle de sous-bassins versants, pour lesquels le bilan des apports en provenance du bassin versant et des sorties par le réseau hydrographique peuvent être quantifiées avec une précision raisonnable. Ce travail a été réalisé par A. Cosson (1996) sur le bassin de la Seine en amont de Montereau pour deux années de conditions hydrologiques contrastées (1991 et 1994).

Le domaine géographique a été divisé en 4 sous-bassins, de manière à individualiser le bilan du bassin propre de la Seine entre Montereau et la confluence Seine-Aube, pour lequel la Bassée représente une gigantesque zone humide riveraine (Figure 1).

Les postes du bilan d'azote sont ensuite évalués de la manière suivante :

les apports d'azote accompagnant les eaux superficielles sont évalués en multipliant le débit d'écoulement superficiel par la concentration moyenne des eaux sous-racinaires résultant de l'usage du sol du bassin versant (tableau 6).

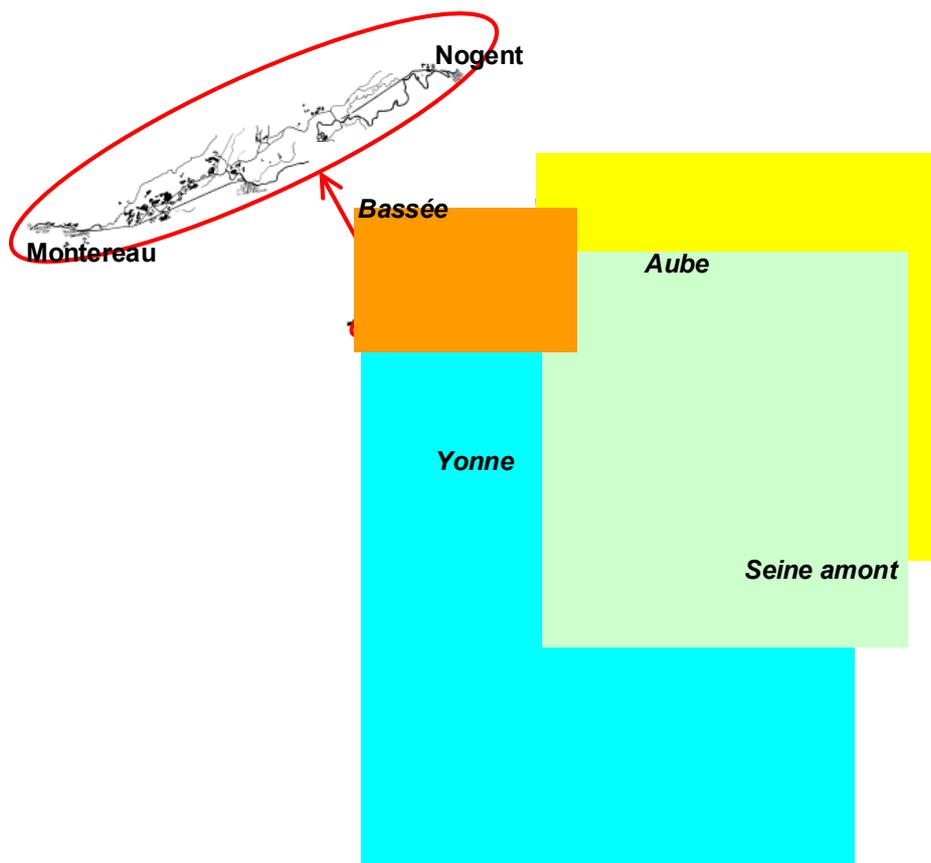


Figure 21 Division en 4 sous-bassins du bassin de la Seine en amont de Montereau. Pour chacun de ces sous-bassins, un bilan hydrologique est d'abord établi, distinguant dans le débit des cours d'eau du réseau hydrographique, une composante phréatique (débit de base) et une composante superficielle, conformément à la démarche du modèle Hydrostrahler (Billen & Garnier, 1999).

les apports d'azote accompagnant l'écoulement de base sont obtenus en multipliant les flux d'eau correspondants par la concentration moyenne en nitrates des principaux aquifères contributifs, établie à partir des données rassemblées par Fritz (1994) à partir de la base du BRGM. (Tableau 7). Notons que ces données concernent la période 1985-1989. Les données antérieures, également disponibles, montrent clairement une lente augmentation de la teneur en nitrates de ces aquifères.

Tableau 6. Usage du sol dans les 4 sous-bassins de la Seine en amont de Montereau (d'après le RGA 1998) et concentration en nitrates sous-racinaires associées (selon Benoît et al., 1995 et Billen et al., 1999)

	Seine amont	Aube	Yonne	'Bassée'	
superficie totale, km ²	3959	4750	11243	6579	conc NO ₃
surface agricole utile, %	52 %	59 %	55 %	70 %	ss-racin. (mgN/l)
surface forestière	48 %	41 %	45 %	30 %	0.5
céréales	30 %	30 %	30 %	42 %	10
cult. industrielles	10 %	10 %	10 %	13 %	25
legumes sec et protéagineux	2 %	6 %	2 %	10 %	25
luzerne	4 %	5 %	3 %	3 %	6
prairies tjs en herbe	6 %	7 %	9 %	1 %	6
vignoble	1 %	0 %	1 %	0 %	-

Tableau 7 Surface contributive et concentration moyenne en nitrates (selon Fritz, 1994) des principaux aquifères des 4 sous-bassins de la Seine en amont de Montereau

aquifère	code BRGM	Seineamt	Aube	Yonne	Bassée	1975-1979 mgN-NO3	1985-1989 mgN-NO3
alluvions récentes		7 %	21 %	21 %	61 %	-	-
Champigny et o 3aire	CHS	-	-	9 %	1%	9.5	11.3
Craie (crétacé sup)	SEN, TUR, CEN	13 %	32 %	19 %	36%	5.6	6.4
calcaire jurassique	POR, KIM	5 %	3 %	2 %	2 %	7.6	10
marne-calc jurassique	OXF	12 %	14 %	7 %	-	5.0	5.9
base du Jurassique	DOT, DOJ	63 %	30 %	29 %	-	5.8	5.5
socle cristallin	SOC	-	-	15 %	-	1.6	1.8

Les *apports ponctuels*, résultants de la pollution domestique et industrielle, traitée ou non en station d'épuration ont été évalués à partir des données fournies par l'AESN, compte tenu d'une charge spécifique de 10 gN/eqhab/jour.

L'*exportation* d'azote total par les cours d'eau à l'exutoire des sous-bassins est calculée à partir des mesures de concentration et de débit aux stations correspondantes.

Le bilan s'établit alors de la manière suivante :

Tableau 8. Bilan des apports et des transferts d'azote dans le réseau hydrographique de 4 sous-bassins de la Seine amont.

année sèche (1991)

en kTN/an	Seine amt	Aube	Yonne	Bassée
apports diffus superficiels	6.9	5.3	8.2	3.2
apports diffus phréatiques	1.3	2.7	5.1	4.9
apports ponctuels	0.4	0.2	0.5	0.1
apports d'amont	-	-	-	11.2
total inputs	8.6	8.2	13.9	19.4
sortie à l'exutoire	6.0	5.2	9.0	14.5
rétention	2.6	2.9	4.9	4.9
<i>rétention en % des apports du bassin versant propre (apports d'amont exclus)</i>	30 %	36 %	35 %	62 %

année humide (1994)

en kTN/an	Seine amt	Aube	Yonne	Bassée
apports diffus superficiels	13.2	6.6	14.6	2.8
apports diffus phréatiques	1.5	4.0	8.5	7.2
apports ponctuels	0.4	0.2	0.5	0.1
apports d'amont	-	-	-	17.3
total inputs	15.1	10.8	23.6	27.4
sortie à l'exutoire	10.3	7.0	15.5	21.2
rétention	4.8	3.8	8.1	6.2
<i>rétention en % des apports du bassin versant propre (apports d'amont exclus)</i>	31 %	35 %	34 %	64 %

Ces bilans indiquent donc de manière très reproductible une rétention-élimination de l'ordre de 30% des apports d'azote en provenance du bassin versant pour les sous-bassins Seine amont, Aube et Yonne. Cette élimination s'élève à plus de 60% dans le secteur de la Bassée.

Une part de cette rétention/élimination peut résulter de processus internes aux cours d'eau eux-mêmes, notamment de la dénitrification benthique. L'estimation directe de l'intensité de ce processus dans

les cours d'eau en période estivale (Tableau 9) montre des valeurs de l'ordre de 5-20 mgN/m²/h. Compte tenu de la surface de fond de rivière de l'ensemble des cours d'eau et plans d'eau des sous bassins considérés, il est donc possible d'évaluer grossièrement l'ordre de grandeur de la dénitrification benthique (Tableau 10).

Tableau 9. Mesures de dénitrification benthique dans les cours et les plans d'eau du bassin de la Seine et d'autres rivières atlantiques (en période estivale)

bassin	milieu	dénitrification, mgN/m ² /h	auteurs
Seine	Seine fluviale en aval de Paris	6 – 40	Chesterikof et al., 1992
	Lac du Der	3 – 17	Garnier et al., 1999
	Bassin de Méry /Oise	3 – 20	Billen et al, 1989
Escaut	divers cours d'eau (ordre 3-6)	7 – 40	De Becker, 1985
Meuse	divers cours d'eau (ordre 3-7)	0 – 13	De Becker, 1985

Tableau 10. Estimation du rôle de la dénitrification benthique dans les 4 sous-bassins du système Seine amont

	Seine amt	Aube	Yonne	Bassée
surface de fond de rivière d'ordre ≥3, km ²	10	9	34	5
surface de plan d'eau, km ²	28	23	12	3
dénitrification, mgN/m ² /h	5 – 20	5 – 20	5 – 20	5 – 20
dénitrification, kT/an	1.2 – 4.5	0.7 – 2.8	1.4 – 4	0.25 – 1
dénitrification totale, kT/an (cf tableau 3)	1.6 – 6.6	2.9 – 8.1	4.9 – 8.1	4.9 – 6.2

Si dans les bassins amont de la Seine, de l'Aube et de l'Yonne, la dénitrification benthique est susceptible de jouer un rôle significatif dans le bilan d'azote, notamment grâce au rôle des barrages réservoirs, elle est loin par contre d'expliquer le défaut de bilan observé dans le bassin propre de la Bassée, tel que présenté dans le Tableau 8.

Par contre, le potentiel de dénitrification des zones humides de la Bassée permet d'expliquer l'élimination d'azote déduite du bilan. Appliqué à une superficie de 300 km², la taux de dénitrification mesuré dans la plaine alluviale de la Bassée (4-5 TN/km²/an au minimum, voir plus haut) et celui estimé précédemment pour les gravières en eau de la zone (4-6 TN/km²/an, Schanen, 1998), permet d'estimer une dénitrification d'au moins 1,5 kTN/an.

La dénitrification dans les milieux humides alluviaux est donc le processus principal de rétention/élimination de l'azote dans le bilan d'azote des grands axes fluviaux. Ce bilan montre en outre une plus grande efficacité de la plaine alluviale de la Bassée par rapports aux zones riveraines des petits cours d'eau de tete de bassin dans l'élimination de la pollution nitrique diffuse en provenance du bassin versant propre.

6. Fonctionnement et impact des gravières en eau (*O.Shanen et E. Fustec*)

La plupart des corridors fluviaux du bassin de la Seine ont été soumis à l'extraction de matériaux alluvionnaires nécessités par le développement des zones urbaines et des voies de communication. L'un des objectifs du Piren-Seine, affiché en 1993, étant d'analyser le fonctionnement des zones humides fluviales et d'évaluer leur rôle sur les flux de matières, il convenait d'estimer l'importance des perturbations fonctionnelles susceptibles d'être induites par l'exploitation des granulats.

Alors que la Bassée amont se prêtait parfaitement à l'étude des caractéristiques fonctionnelles d'un milieu peu perturbé, la Bassée aval constituait un site des mieux appropriés à l'étude de l'impact hydrodynamique et biogéochimique des gravières en eau. Les résultats de ces travaux ayant déjà fait l'objet d'une large diffusion (Schanen, 1998. Schanen *et al*, 1998; Fustec *et al*, 1998), nous n'en rappellerons ici que les principaux acquis.

6.1. La variabilité spatio-temporelle du fonctionnement des gravières en eau

Avant d'engager des études plus approfondies, une première série d'investigations a été menée, en 1993, sur l'ensemble des secteurs amont et aval de la Bassée pour examiner la qualité des eaux superficielles et souterraines. L'analyse du rôle des milieux humides sur les flux d'azote constituait un des principaux objectifs du programme, d'où une attention particulière portée aux teneurs en nitrates dans les eaux. Les prélèvements ont été effectués en période de hautes eaux (Février) et de basses eaux (Juillet). Les résultats sont donnés dans le Tableau

Tableau 11. Moyenne des concentrations en nitrates (en mgNO_3/l) dans les eaux de la Bassée, de Méry/Seine à Montereau en Février et Juillet 1993 (D'après Schanen, 1993).

Type de site	Nombre de sites	Hautes eaux (Février)	Basses eaux (Juillet)
Seine	6	25,4	13,6
Aube	1	28,3	14,5
Canal de dérivation	1	26,9	13,4
Ruisseaux en pied de coteaux	10	41,5	23,7
Noues de type I	7	26,9	17,8
Anciens méandres	2	3,0	1,0
Gravières	10	2,6	0,9
Noues de type II	4	0,8	1,6
Casiers du projet de canal	1	1,3	1,4

Deux groupes d'écosystèmes aquatiques apparaissent à l'évidence. L'un constitué des systèmes d'eaux "courantes" qui présentent des teneurs variables mais toujours relativement élevées en nitrates ($>10 \text{ mgNO}_3/\text{l}$): Seine, Aube, ruisseaux longeant la plaine alluviale au pied des coteaux dont ils drainent les eaux fortement polluées, canal de dérivation (de Bernières à Conflans), alimenté par la rivière et "noues" d'un premier type qui sont des chenaux dans la plaine alluviale, connectés au réseau hydrographique. Le second comprend des systèmes à vitesse d'écoulement réduite ou essentiellement alimentés par les eaux souterraines de la nappe alluviale et qui présentent de faibles teneurs moyennes en nitrates ($<10 \text{ mgNO}_3/\text{l}$): anciens méandres, gravières en eau, casiers du projet de canal à grand gabarit et "noues" de type II qui sont alimentées par les eaux de la nappe (comparables aux "rivières phréatiques des Rieds alsaciens).

Tableau 12. Concentrations en nitrates (en $\text{mg NO}_3/\text{l}$), mesurées dans 10 gravières en eau de la Bassée, en 1993 (D'après Schanen, 1993)

Sites	Localisation	Hautes eaux (Février)	Basses eaux (Juillet)
G1	300 m Seine / 3 km Est Montereau	3,5	0,9
G2	1 km Seine / S.E. Egligny	0,09	0,7
G3	200 m Seine / S.E. Egligny	0,5	0,8
G4	< 100 m Seine / 2 km W Noyen/Seine	1,6	0,9
G5	Limite pied coteau / Est Hermé	38,8	1,0
G6	1,5 km Seine / Est Crancey	1,7	1,0
G7	1,5 km Seine / Nord St Hilaire-sous-Romilly	0,4	0,6
G8	700 m Seine / Nord Crancey	6,0	1,0
G9	300 m Seine / Nord Crancey	7,0	2,0
G10	2 km Seine / proche zone urbanisée	-	5,8

En examinant les teneurs en nitrates mesurées dans les 10 sites de gravières (Tableau 12), on a pu cependant constater des variations souvent assez marquées en fonction de la localisation des sites et de la saison. Les faibles teneurs estivales permettaient d'envisager l'existence, au sein des gravières, de processus de rétention (absorption par les végétaux) et/ou d'élimination des nitrates (dénitrification). Les teneurs plus élevées en fin d'hiver laissent supposer une contamination par des apports d'origine agricole, particulièrement dans les zones en limite des coteaux (G5). Durant cette période l'ensemble des processus biologiques de rétention et d'élimination des nitrates peuvent être réduits au sein des plans d'eau. En été, des pollutions d'origine domestique peuvent également affecter certains sites (G10).

Ces travaux préliminaires ont montré la nécessité de mener des études plus approfondies sur un ensemble de gravières, de façon à intégrer, au moins en partie, la variabilité fonctionnelle de ces écosystèmes et de leur environnement. Dans la partie centrale de la Bassée aval, sur les communes d'Egligny et de Vimpeles, 9 lacs de gravières, répartis en deux groupes et localisés à proximité immédiate de la Seine, ont été retenus. Ces lacs diffèrent par leur taille (0,6 à 26 ha), leur profondeur (1,3 à 3,2 m) et leur âge (2 à 30 ans). En outre, 2 plans d'eau du secteur de Vimpeles reçoivent des rejets d'eau de lavage des granulats. Ces gravières ont été réaménagées avec des alluvions argilo-limoneuses assez hétérogènes et peu perméables, réparties sur leur pourtour sur une épaisseur de 2 à 4 m. 16 piézomètres ont été répartis autour des plans d'eau.

Le suivi des paramètres classiques de la qualité des eaux (température, oxygène, pH, potentiel redox, matières en suspension, carbone organique, nitrates, ammoniacque, phosphates, silice dissoute, chlorophylle *a*) ont confirmé une variabilité spatiale et temporelle, assez marquée pour au moins certains paramètres, au sein de cet échantillon de lacs de gravières (Schanen, 1998).

6.2. L'impact hydrodynamique des gravières en eau

La présence des gravières induit une mise en charge de la nappe sur une grande partie de la plaine alluviale, en période de hautes eaux comme à l'étiage. La modification des écoulements souterrains en basses eaux (octobre 1995) est représentée sur la figure 22. La mise en charge de la nappe, qui concerne les sites d'exploitation anciens comme les plus récents, est due au processus de colmatage du fond et des parois des gravières mais, également à la présence et à la texture des remblais.

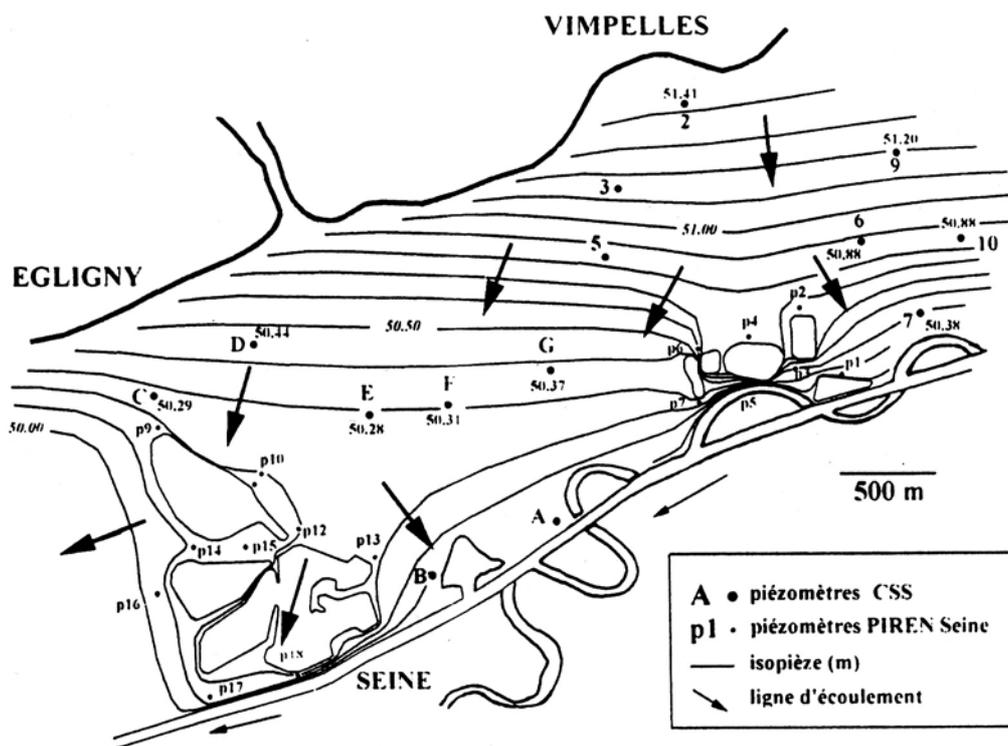


Figure 22. Modification de la surface piézométrique, liée à la présence de lacs de gravières, dans la Bassée aval en période de basses eaux (octobre 1995)(d'après Schanen, 1998).

La mise en charge de la nappe s'accompagne d'un rabattement important de celle-ci à l'aval des plans d'eau. Ce rabattement est caractérisé par des gradients hydrauliques moyens compris entre 6 et 54 % en période de basses eaux, les gradients les plus forts étant observés dans les 2 gravières qui reçoivent des eaux de lavage des granulats. Ces phénomènes, dans un secteur où la Seine est canalisée, ne peuvent qu'entraîner une réduction des échanges alternés entre la nappe et la rivière comme ceux qui se manifestent dans le secteur moins perturbé de la Bassée amont.

Ces travaux ont également montré que la présence des gravières induisait un déficit d'alimentation de la nappe alluviale, lié à l'évaporation des plans d'eau. Ce déficit a été estimé à 7-8 litres par seconde et par km² pour la période 1994-1995. En 1996, qui fut une année sèche, le déficit a atteint 1,3 litres par seconde et par km², ce qui a entraîné un abaissement de la nappe compris entre 0,6 m et 1 m.

6.3. L'influence des lacs de gravières sur la qualité des eaux

Avant que ces études soient entreprises dans la Bassée, quelques travaux, menés notamment en Plaine d'Alsace et en bordure de la Garonne, avaient mis en évidence une amélioration de la qualité des eaux souterraines au cours de leur transit dans des gravières et, en particulier, la capacité de celles-ci à réduire les flux de nitrates (Eberentz et Rinck, 1987; Sinoquet, 1987; Helmer et Labroue, 1993). L'idée d'un impact négatif des lacs de gravières sur la qualité des eaux continuait cependant de prévaloir chez la plupart des gestionnaires de l'eau et de l'environnement. Au motif que les eaux des nappes, devenues plus vulnérables par leur mise en contact avec l'atmosphère, sont soumises à des contaminants d'origine aérienne ainsi qu'à des pollutions engendrées par les travaux d'extraction. L'objectif du Piren-Seine était donc de contribuer à accroître nos connaissances sur les phénomènes intervenant au sein de ces systèmes et sur leurs conséquences pour la qualité des eaux.

Pour évaluer l'impact des gravières sur les flux de matières, il a fallu parvenir à une connaissance fine des écoulements, par la détermination des paramètres hydrologiques et hydrogéologiques tels que le temps de séjour de l'eau dans les plans d'eau et la perméabilité des milieux poreux aux différentes interfaces entre nappe et gravières. Un modèle a été élaboré, permettant de déterminer les transmissivités des milieux poreux aux interfaces et les débits associés, par optimisation du bilan hydrologique des gravières (Schanen *et al.*, 1998). Le modèle a été testé sur les 5 plans d'eau du secteur de Vimpeles et affiné par des mesures supplémentaires (mesure de l'évapotranspiration réelle, traçages à l'iode et au brome pour valider les paramètres de perméabilités des berges et des temps de résidence de l'eau. En 1995, les valeurs de perméabilité des berges étaient comprises entre $2 \cdot 10^{-8}$ et $4 \cdot 10^{-4}$ mètres par seconde, et celles des débits entre 10^{-4} et 13 litres par seconde.

A partir des résultats fournis par ce modèle et des données de suivi de la qualité des eaux dans les plans d'eau et le réseau piézométrique environnant il a été possible d'établir les flux de matière aux interfaces nappe-gravières (Figure 23).

Sur ces bases, il a été possible de quantifier les capacités d'épuration éventuelles des systèmes constitués par les lacs de gravière et leurs ceintures de remblais. Les milieux étudiés se comportent, dans l'ensemble, comme des pièges vis-à-vis des éléments introduits par la nappe. Les flux d'azote étaient réduits de 31 à 85 % (42 à 61 kgN / ha / an, retenus dans la biomasse ou éliminés par dénitrification), ceux de phosphore jusqu'à 50 % (1,1 kgP /ha / an).

Certaines gravières exporteraient, cependant, plus de phosphore dans la nappe aval qu'elles n'en reçoivent de l'amont. Cela résulte de la non-prise en compte dans ces premiers bilans des apports atmosphériques d'azote et de phosphore et de ceux dus à l'érosion des berges ou aux retombés de débris végétaux. En prenant en compte les apports atmosphériques d'azote (8,8 kgN /ha /an) et de phosphore (0,66 kgP /ha /an), les plans d'eau retiendraient de 51 à 70 kg d'azote par hectare et par an (35 à 87 % des apports totaux) et de 0,38 à 1,76 kg de phosphore par hectare et par an (42 à 63 % des apports totaux).

A ces bilans positifs quant à l'influence des gravières sur la qualité des eaux, qui confirment les résultats obtenus en Alsace et dans la plaine alluviale de la Garonne, il convient d'ajouter quelques remarques :

- Dans les plans d'eau comme dans les zones humides fluviales, une grande partie de l'azote peut être éliminée par dénitrification. Le phosphore, lui, ne subit pas de transformations conduisant à des exportations sous formes gazeuses. Dans les plans d'eau, une partie du phosphore piégé "tourne" dans le système, absorbé par les végétaux (algues ou plantes aquatiques), puis restitué dans les sédiments avec leurs débris. Les études sur la biodisponibilité du phosphore dans les plans d'eau de la Bassée, ont montré que le phosphore de ce stock organique pouvait passer à l'état soluble plus facilement que le phosphore associé à la matrice minérale des sédiments. Comme c'est aussi le cas dans la plupart des zones humides, une fraction du phosphore peut donc être exportée par les eaux. Les sorties de phosphore, qui restent cependant très

modérées, ont été observés en hiver (période de décomposition des débris végétaux), ce qui a alors peu d'influence sur la qualité de la rivière adjacente, car il n'y a pas de développement algal durant cette période.

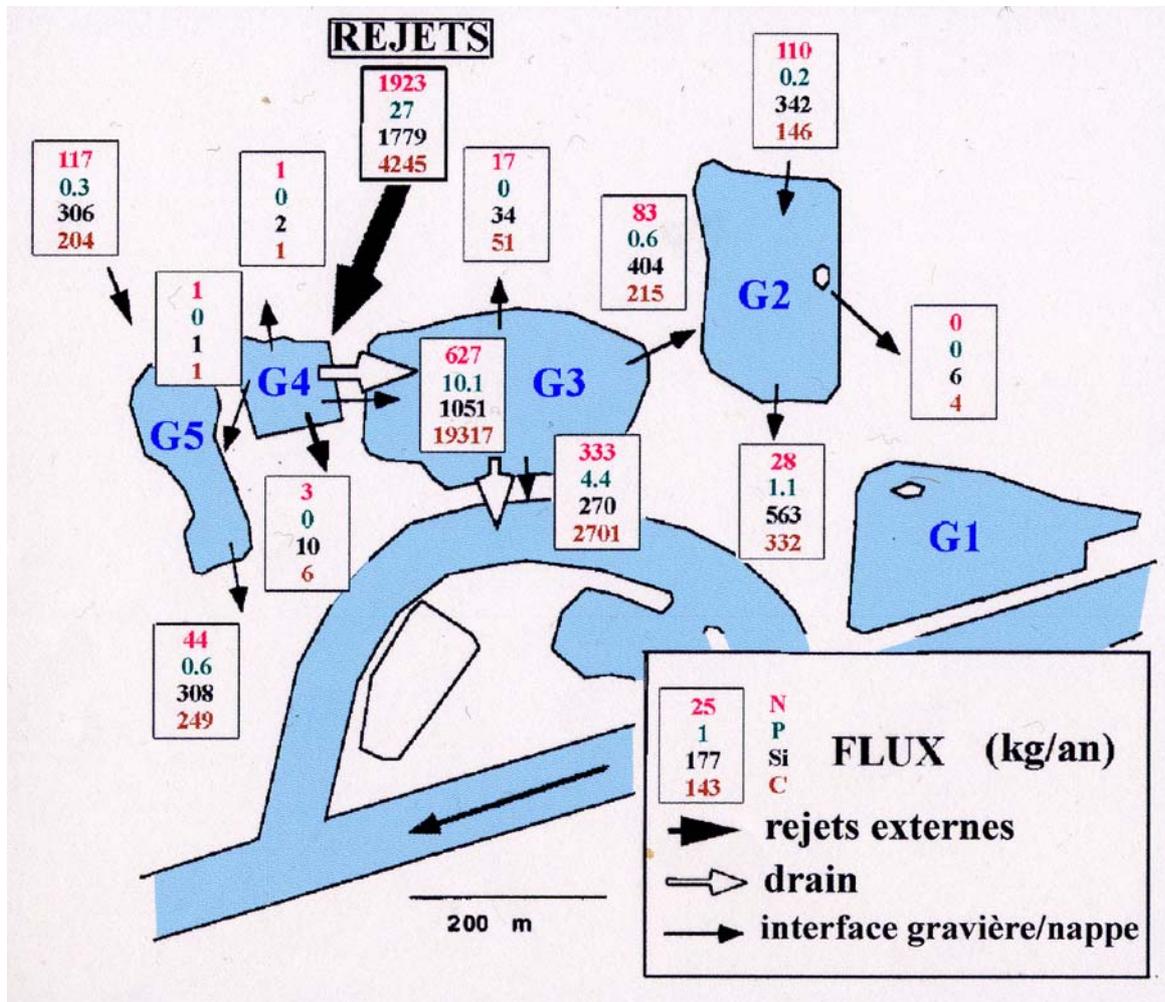


Figure 23. Flux d'azote, de phosphore, de carbone organique et de silice aux interfaces nappe-gravières, établis en 1995 (en kg/an) et taux de rétention de l'azote et du phosphore.

- le suivi de la qualité des eaux dans les piézomètres installés autour des plans d'eau, ont mis en évidence, une intervention importante de certains types de remblais sur la qualité des eaux, entrant ou sortant des gravières. Les teneurs en oxygène des eaux sont toujours très faibles au sein des remblais (entre 0,5 et 1,8 mg O₂/l), dénotant des conditions réductrices assez marquées. Ces conditions peuvent être induites par la faible perméabilité des matériaux et/ou à l'incorporation de matériaux très organiques dans ces remblais. Les eaux qui traversent ces remblais, surtout à l'aval des plans d'eau, sont appauvries en nitrates et la dénitrification peut s'y poursuivre, d'où une accentuation du caractère réducteur de ces milieux qui peut conduire à la réduction du fer et du manganèse, entraînés par les eaux à l'état soluble. C'est là un point important à considérer lorsque des sites sont exploités à proximité de réserves en eaux souterraines exploitables.

- les lacs de gravières, en milieu alluvial, constituent comme les zones humides des systèmes de rétention et de recyclage d'éléments polluants mais, comme ces dernières leur fonctionnement et leurs capacités sont susceptibles d'être perturbés par des rejets domestiques ou industriels significatifs ou des usages trop intensifs (pisciculture, campings insuffisamment aménagés...). La mise en culture de zones à l'aval des gravières, sans limitation des apports de fertilisants ou des traitements phytosanitaires, est en mesure, comme

c'est fréquemment le cas dans la Bassée, d'annuler les effets positifs des lacs de gravière sur la qualité des eaux.

7. L'importance des annexes hydrauliques et des zones inondables pour les peuplements piscicoles

À l'état naturel, la plaine alluviale constitue une mosaïque de milieux qui favorisent le déroulement des trois phases essentielles du cycle de vie des poissons, telles que définies par Nikolsky (1963), Harden Jones (1968) et Schlosser (1991). Ces milieux péri-fluviaux du lit majeur sont donc essentiels pour de nombreuses espèces, mais que l'artificialisation du lit majeur compromet gravement (Ward & Stanford 1995, Welcomme 1995).

En particulier, la phase liée à la ponte et au développement des jeunes poissons de l'année est la plus déterminante pour le maintien des peuplements piscicoles (Mann 1996). De cette phase dépend le recrutement des peuplements piscicoles, c'est-à-dire, la quantité de juvéniles intégrant le peuplement adulte. Son bon déroulement est lié à la spécificité des exigences des espèces vis-à-vis de leurs habitats de pontes (Balon 1975, Grandmottet 1983) et des habitats nécessaires au développement des jeunes (Copp 1989, Schiemer *et al.* 1991), ainsi qu'à la faible mobilité de ces premiers stades (œufs, larves et jeunes).

Nous avons donc évalué ce rôle fondamental des milieux péri-fluviaux du lit majeur à travers la composante alevinique (les premiers stades des jeunes individus), considérée à la fois comme potentiel de recrutement et indicateur fonctionnel du milieu aquatique (Copp *et al.* 1990).

Ces travaux ont concernés la plaine alluviale de La Bassée, située en amont de Paris, qui offre un gradient amont-aval d'artificialisation croissante. Deux secteurs contrastés en terme de niveau d'anthropisation ont été étudiés : une zone amont « *sub-naturelle* », et une zone aval très fortement aménagée.

7.1. L'importance relative des annexes naturelles et artificielles

À l'aval de la confluence de l'Aube, où la Seine peut être considérée comme une « *zone sub-naturelle* » car elle demeure caractéristique de l'évolution morphologique du fleuve dans sa plaine alluviale, l'existence d'une zonation latérale fonction du degré de connexion des annexes avec le chenal actif a été mise en évidence, conforme à celle déjà établie dans des contextes peu perturbés. Dans les différents types d'annexes en communication permanente avec le chenal principal, les peuplements des jeunes poissons de l'année se répartissent en effet selon leur degré de rhéophilie et répondent à un gradient spatial qui évolue des milieux lotiques (courants) aux milieux lenticques (calmes). Ce gradient spatial se manifeste également vis-à-vis des groupes de reproduction constitués par les espèces piscicoles (Tales *et al.* 1996).

Ce gradient spatial, le long duquel les espèces piscicoles se succèdent selon leur degré de rhéophilie et leur stratégie de reproduction, est assimilable à une zonation latérale du fleuve, par analogie à la zonation piscicole longitudinale. Cette zonation latérale sur la Seine amont est globalement conforme à celle déjà établie sur le Rhône (Figure 24) en contexte peu anthropisé (Copp & Penaz 1988), laquelle répond à la typologie géomorphologique de sa plaine alluviale (Amoros *et al.* 1982). Cette situation témoigne du caractère encore relativement préservé de ce secteur de la Seine.

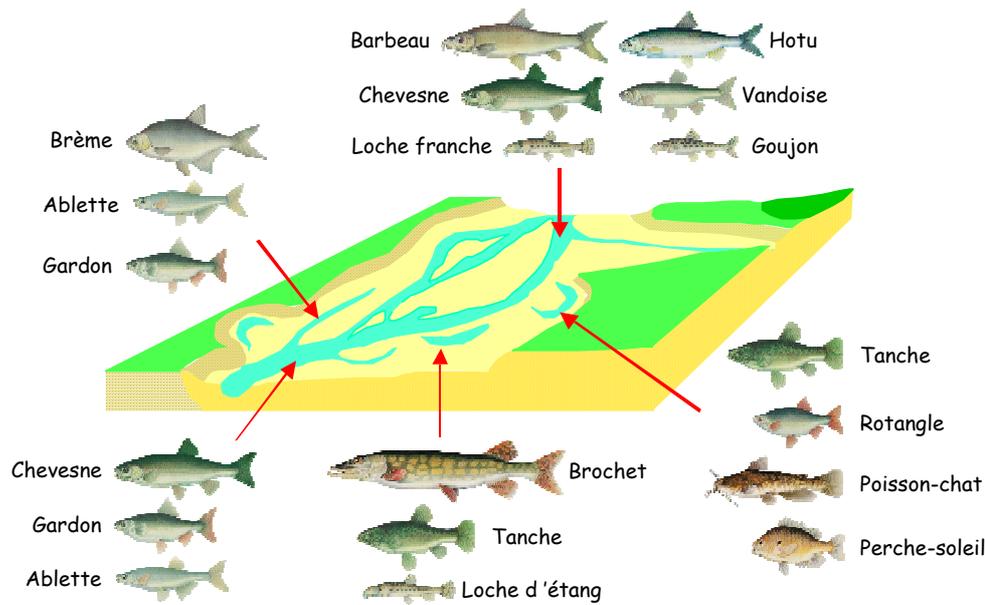


Figure 24. Zonation latérale des espèces piscicoles : l'exemple du Haut-Rhône (d'après Roux & Copp 1993)

Ces travaux ont également conduit à dégager les principaux facteurs structurant les peuplements de juvéniles des annexes hydrauliques à trois échelles spatiales emboîtées : le micro-habitat, le méso-habitat (à l'échelle d'une annexe) et le macro-habitat (à l'échelle du tronçon de cours d'eau). Leur influence respective a été hiérarchisée montrant que la richesse et la structure des peuplements à l'échelle locale est en partie conditionnée par des facteurs et processus agissant à des échelles spatiales supérieures. (Berrebi-dit-Thomas 1999, Berrebi-dit-Thomas *et al.* 2001).

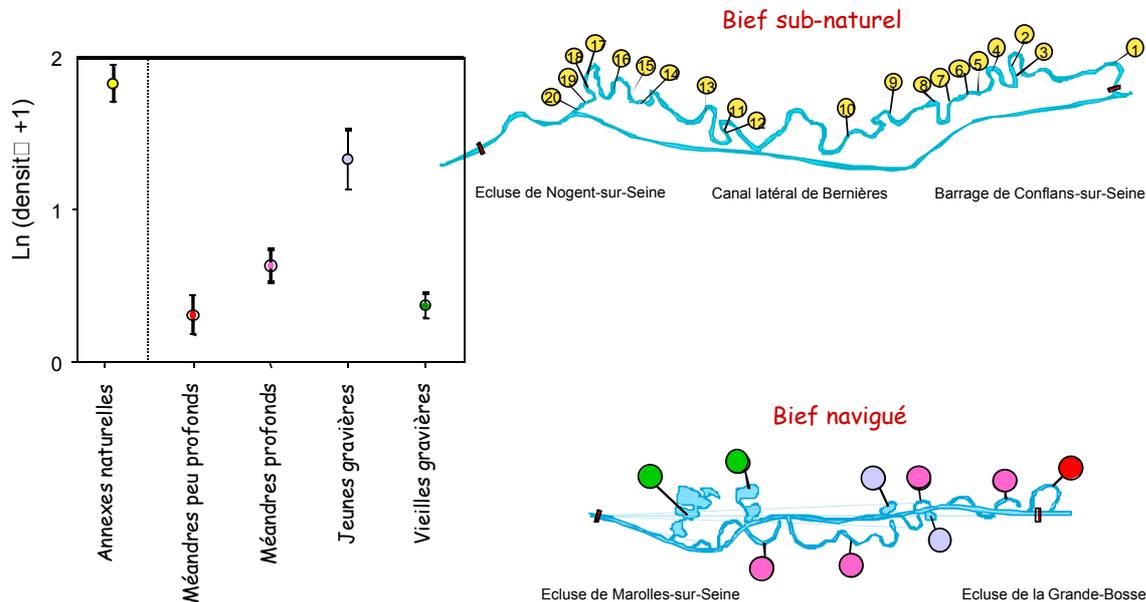


Figure 25. Densités d'alevins dans des annexes hydrauliques d'origine naturelle ou d'origine artificielle de deux biefs de la Seine (d'après Berrebi-dit-Thomas 1999).

Les résultats obtenus mettent en outre en évidence une différence importante dans la structure des peuplements entre les annexes naturelles et artificielles (générées par les aménagements). Les annexes artificielles ne permettent pas un recrutement aussi dense (Figure 25) et aussi diversifié que celui des annexes naturelles (Figure 26). La majorité de ces nouvelles annexes ne sont en effet propices qu'à des espèces fortement limnophiles, en particulier la perche-soleil et le poisson-chat. Cette situation s'explique notamment par la faible diversité des habitats offerts par ces milieux et leur faible ouverture sur le chenal. En

effet, seules les gravières les plus récentes, qui présentent de nombreuses plages de gravier ainsi qu'une ouverture importante sur le chenal, relativement à leur taille, hébergent des peuplements de jeunes poissons de l'année, comparables à ceux observés dans les annexes naturelles (Berrebi-dit-Thomas & Boët 1997, Berrebi-dit-Thomas 1999).

Selon ses caractéristiques morphométriques, chaque annexe hydraulique possède donc un peuplement de juvénile spécifique. Il est donc facile de conclure qu'une diversité importante d'annexes hydrauliques naturelles engendrera des peuplements riches et diversifiés. En revanche, ces résultats réfutent l'hypothèse selon laquelle les annexes artificielles générées par les aménagements peuvent se substituer aux annexes naturelles en remplissant un rôle comparable vis-à-vis des peuplements de juvéniles de poisson.

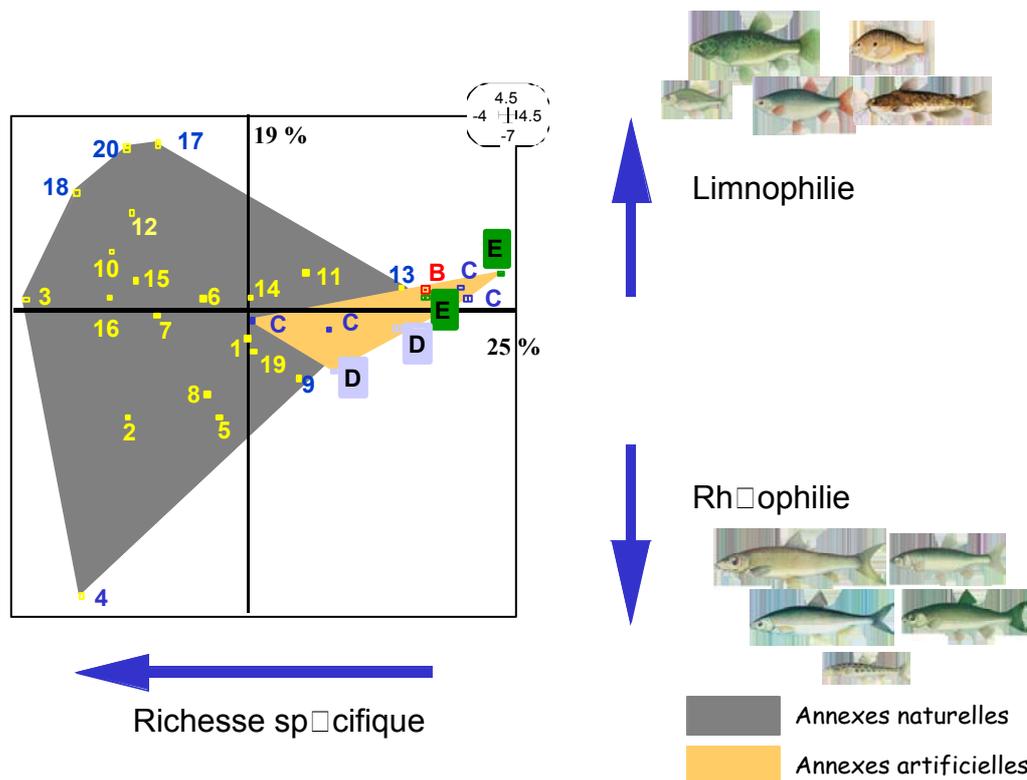


Figure 26. Structure des peuplements d'alevins selon l'origine, naturelle ou artificielle, de 29 annexes hydrauliques de deux biefs de la Seine (d'après Berrebi-dit-Thomas 1999). Carte factorielle des sites dans le plan F1F2 de l'ACP normée du tableau des fréquences de 20 espèces capturées. La figure illustre la plus grande diversité des situations dans les annexes d'origine naturelle, comparé aux annexes d'origine artificielle.

7.2. Modélisation de l'habitat de reproduction du brochet

Au plan fonctionnel, a été réalisée une modélisation de l'habitat de reproduction du brochet, espèce hautement représentative des grands cours d'eau potamiques et de leurs relations fonctionnelles avec leur plaine d'inondation (Monfort *et al.* 1996).

Dans le secteur de la plaine de La Bassée, où la dynamique des inondations est fortement influencée par la gestion des barrages-réservoirs de l'Aube et de la Seine, le succès de la reproduction du brochet est sérieusement pénalisé. Ce poisson se reproduit lors des crues printanières, dans le lit majeur des fleuves, où il dépose ses œufs de préférence sur des prairies. Cette grande dépendance vis-à-vis du fonctionnement latéral du fleuve fait de sa présence un indicateur du bon fonctionnement de l'écosystème.

Afin de fournir des éléments d'aide à une meilleure « gestion écologique » des barrages-réservoirs, une modélisation de l'habitat de reproduction du brochet a donc été réalisée dans ce secteur de la plaine de La Bassée, potentiellement favorable à l'espèce.

Le modèle biologique, qui traduit les relations entre la densité relative de l'espèce et les valeurs de certaines variables d'habitat restituées par le modèle hydraulique, a été établi sur la base d'une expertise de la bibliographie existante. Trois critères sont retenus pour définir les courbes des préférences du brochet : la nature du couvert végétal, la hauteur d'eau et la vitesse ; bien qu'essentielle lors du développement embryonnaire, la température est écartée car considérée comme un processus non maîtrisable soumis aux aléas climatiques. Pour chaque valeur de ces variables, des coefficients de préférence compris entre 0 et 1 sont attribués.

La zone d'étude régulée par deux barrages-réservoirs, a fait l'objet d'une cartographie afin, d'une part, de repérer les zones favorables à la fraie et, d'autre part, de déterminer les surfaces potentiellement inondées en fonction d'une gamme de débits.

Une chronique des débits couvrant la période de 1960 à 1989 a été reconstituée à partir des mesures disponibles dans la banque HYDRO. Ces données sont exploitées par un modèle hydraulique couplé au modèle biologique. Les paramètres hydrauliques ainsi restitués sont utilisés pour le calcul des surfaces d'habitat utilisables par le poisson (Surfaces Potentielles Utiles : SPU).

Les résultats conduisent à situer les débits offrant des conditions optimales à la reproduction du brochet aux alentours de 150 à 175 m³/s. À ces valeurs en effet la quasi totalité des prairies présentes dans la zone étudiée sont recouvertes et leur surface est largement suffisante au stock de géniteurs susceptibles d'être présents dans le lit mineur de la rivière.

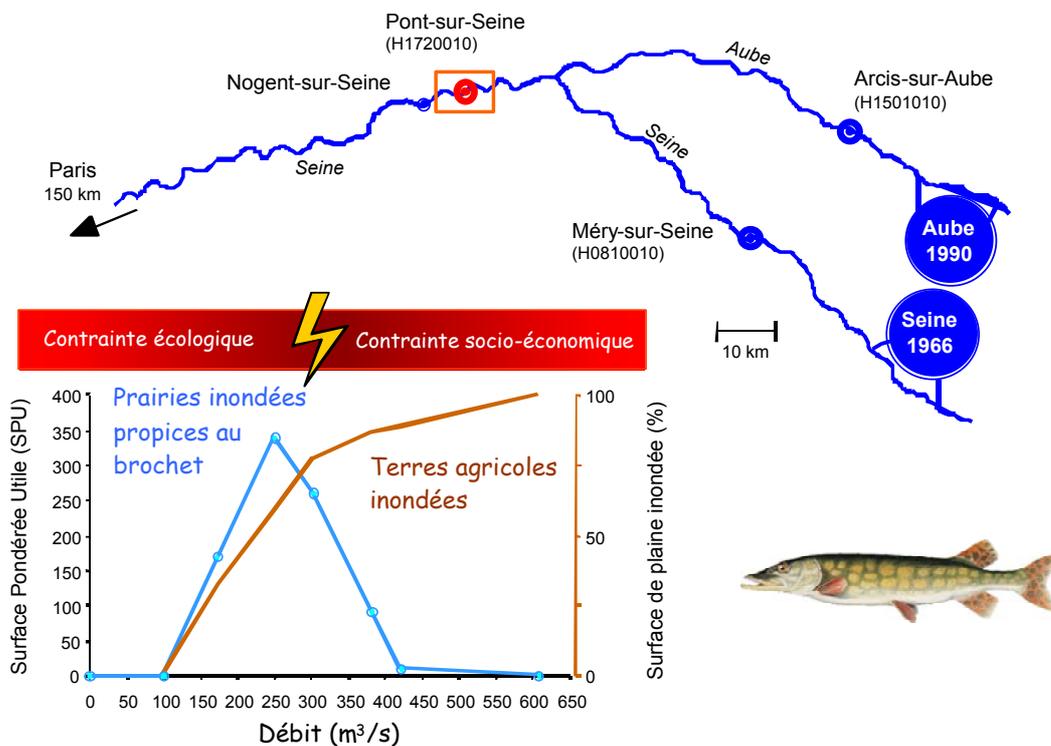


Figure 27. Modélisation de l'habitat de reproduction du brochet. Carte de situation de la zone d'étude et courbe d'évolution de la surface pondérée utile en fonction du débit dans la Seine (d'après Monfort et al. 1996).

Par ailleurs, la comparaison de l'ensemble des courbes obtenues pour les différentes simulations de débits (naturel, 1 barrage, 2 barrages) entre 1966 à 1989, permet de juger des conséquences des aménagements. Comparé au régime naturel simulé, une diminution sensible et générale des valeurs des SPU-classées est en effet enregistrée pour les régimes soumis à 1 et 2 barrages, et l'actuelle gestion entraîne une baisse de la capacité d'accueil d'environ 30 %. En outre, indépendamment des événements climatiques, les conditions hydrauliques, qui étaient en moyenne favorables au brochet une année sur deux, en régime naturel, ne conviennent maintenant qu'une année sur cinq seulement, en raison de la régulation par les deux barrages-réservoirs. Enfin, avec deux barrages, apparaissent au cours de la période considérée quatre années nulles qui n'existaient pas auparavant.

7.3. Faisabilité d'un projet de réhabilitation d'un méandre de la Seine : le bras de La Grande-Bosse

Dans la partie canalisée à l'aval de La Bassée, en l'absence de dynamique morphogène la gestion des milieux péri-fluviaux représente un enjeu pour la pérennité de nombreuses espèces piscicoles pour lesquelles ils constituent d'indispensables zones de reproduction et de nourricerie des alevins. Dans ce secteur en particulier, le vieillissement naturel des bras-morts dû au manque de connectivité avec le chenal actif, réduit leurs potentialités piscicoles à un petit nombre d'espèces de faible valeur (poissons-chats et perches-soleil).

Dans un tel contexte, seule la réhabilitation des milieux annexes existants peut permettre de maintenir de manière durable un peuplement piscicole diversifié à l'échelle d'un secteur de cours d'eau. D'après nos études antérieures, deux actions complémentaires apparaissent nécessaires : rétablir leur degré de connectivité avec le chenal et améliorer la qualité de leurs habitats.

Ancien méandre rescindé de la Seine, situé dans le secteur de Bray-sur-Seine (77) en contexte anthropisé, le bras de la Grande-Bosse constitue un site potentiellement favorable à une telle expérimentation

Actuellement dans un état de comblement avancé, il se trouve en effet au droit d'un barrage-écluse d'une hauteur de chute de 3 m. Le différentiel de hauteur d'eau entre la partie amont et aval de ce bras pourrait ainsi être mis à profit pour dériver par une réouverture à l'amont un débit créant des zones courantes. La morphologie de ce site est en outre très peu modifiée. Ses berges naturelles supportent une ripisylve abondante et une végétation aquatique diversifiée. Son chenal n'a pas été approfondi, ce qui est un atout pour obtenir des habitats de qualité, une fois l'excès de sédiments enlevé.

L'opération consisterait donc à rétablir une connexion amont avec le chenal principal de manière à recréer un chenal secondaire présentant des habitats diversifiés, courants et calmes, potentiellement favorables à la reproduction de la plupart des espèces présentes sur l'ensemble du secteur.

Le suivi scientifique de cette opération pour évaluer son efficacité fournirait des règles directement applicables en matière de réhabilitation de milieux similaires. Préalablement, une étude de faisabilité a été engagée.

7.3.1 Modélisation hydraulique du bras mort

Pour simuler le fonctionnement hydraulique du site, une modélisation numérique de l'ensemble bras-mort chenal de la Seine a été réalisée. Celle-ci s'appuie sur une topographie dressée à partir de mesures de hauteur d'eau sur 14 sections réparties sur l'ensemble du bras de manière à représenter au mieux ses variations de volume, par la prise en compte des ruptures de pente, des rétrécissements ou élargissements (Figure 28).

Une estimation de la vitesse moyenne sur chaque section a été réalisée au moyen d'un modèle de calcul d'écoulement unidimensionnel en régime permanent (Fluvia), qui effectue un calcul de ligne d'eau en fonction d'un débit donné.

En introduisant comme contrainte les gammes de vitesse définies par les exigences biologiques des espèces piscicoles, la valeur du débit requis, ainsi que les nécessités techniques de l'ouvrage de dérivation de ce débit à partir du chenal principal, ont été déterminés. Les simulations réalisées conduisent à évaluer le débit optimal à environ 20 m³/s. Un tel débit dans le bras demande une ouverture rectangulaire de 4 m² de section placée au fond. Une ouverture de taille identique mais placée en surface ne permet en effet qu'un débit de 8 m³/s, insuffisant.

7.3.2 Analyse hydrologique

Pour vérifier qu'il est réellement possible de dériver vers le bras un débit de 20 m³/s et donc de le soustraire au chenal sans conflits d'usage, notamment vis-à-vis de la navigation dans le chenal principal, le contexte hydrologique local a été analysé.

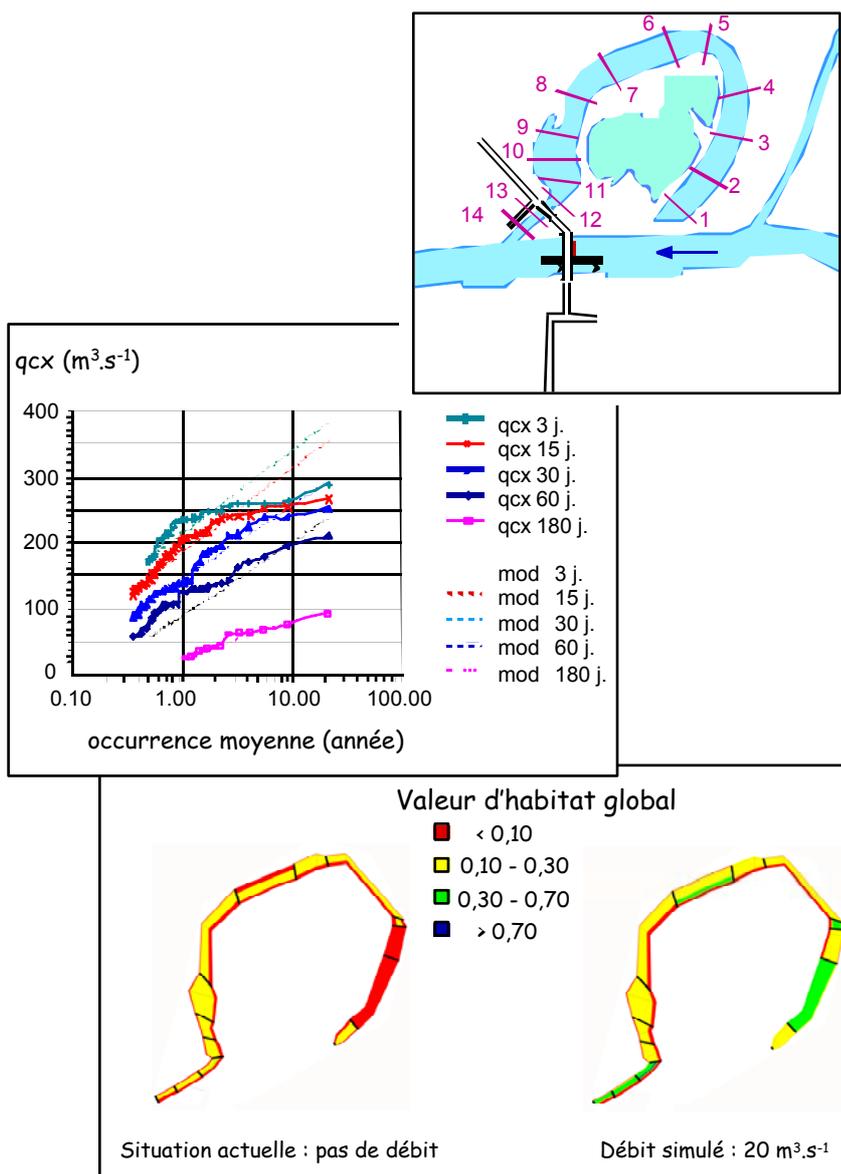


Figure 28. Étude de faisabilité de la restauration d'un ancien méandre de la Seine rescindé : le bras de La Grande-Bosse (aval de Bray-sur-Seine, 77). Schéma du site et des transects du modèle hydraulique ; valeurs des débits-seuils sur la chroniques 1961-1976 ; modélisation de l'habitat du barbeau fluviatile pour deux gammes de débit (d'après Tales et al. 2001).

En fait, un débit de 20 m^3/s correspond globalement au débit de la Seine à l'aplomb du site, en période de basses eaux. D'emblée, il a donc été envisagé de ne remettre le bras en eau qu'en période de hautes eaux, quand le débit de la Seine n'est pas limitant, c'est-à-dire en hiver et au printemps. A priori, cette contrainte ne s'oppose pas à la vocation piscicole des objectifs initiaux de l'aménagement. En effet, les espèces piscicoles les plus exigeantes vis-à-vis de la présence de zones courantes sont également celles qui se reproduisent le plus précocement, à la fin de la période de hautes eaux. Les espèces à reproduction estivale sont davantage indifférentes à la vitesse de courant, voire affectionnent les zones calmes.

S'appuyant sur l'analyse des chroniques hydrologiques de la Seine entre les mois de novembre et avril (1961-1976), des valeurs de débits-seuils à 3, 15, 30, 60 et 180 jours, ont été déterminées. Celles à 180 jours, qui couvrent donc les six mois de la période de hautes eaux et correspondent à notre objectif, restent supérieures à 18 m^3/s .

Le calage d'une loi de probabilité de réalisation de ces débits-seuils sur l'échantillon de la chronique analysée permet d'évaluer les occurrences des gammes de débits selon les durées envisagées. Dans le cas présent, 20 m^3/s déviés de la Seine vers le bras mort en période de hautes eaux sont nécessaires. Si par

exemple, la navigation requiert elle aussi 20 m³/s, la remise en eau du bras n'est alors envisageable que un débit de la Seine d'au moins 40 m³/s. Le modèle de débit-seuil à 180 jours montre alors que cette remise en eau n'est réalisable en moyenne qu'une année sur deux. De la même façon, le modèle montre qu'il est possible de disposer chaque année de débits élevés sur des courtes durées (plus de 200 m³/s pendant 3 jours) pour permettre le nettoyage hydraulique du bras mort.

Sur la base des caractéristiques techniques du barrage-écluse, fournies par le SNS (subdivision de Nogent-sur-Seine), et selon un scénario de fort trafic fluvial avec un temps de remplissage/vidange d'une 1/2 heure, et un total de 48 éclusées en 24 heures, l'évaluation d'un débit minimum pour les besoins de la navigation conduit à une valeur journalière requise de 5,5 m³/s. En doublant cette valeur pour tenir compte de possibles débits de fuites ou de la nécessité du soutien de la ligne d'eau pour d'éventuels ouvrages aval, soit de l'ordre de 10 m³/s, il faut donc au total et en première approximation un débit-seuil amont de 30 m³/s pour assurer simultanément le fonctionnement de l'écluse et du bras à maintenir en eau.

Le risque de défaillance d'un débit-seuil de 30 m³/s pour chacun des mois de la saison novembre à mai est évalué ; cette défaillance est nulle pour les mois de mars et avril, maximale pour les mois de novembre et décembre (respectivement ce risque est alors de 6/16 et 3/16).

7.3.3 Modélisation de l'habitat piscicole

En simulant l'impact sur l'habitat physique de différents débits dans le bras par modélisation, la quantification de l'habitat favorable pour plusieurs espèces piscicoles permet une validation biologique de la valeur de débit optimal à réintroduire. La méthode employée est celle des microhabitats (Souchon *et al.* 1989, Pouilly *et al.* 1995, Ginot *et al.* 1998)

Les données d'entrée du logiciel sont la topographie du site, des relevés de substrat et les données hydrométriques de vitesse du courant et de hauteur d'eau. En l'absence de mesures de vitesse de courant, puisqu'il n'y a pas de débit actuellement, cette variable est arbitrairement fixée à 5cm/s. Elle correspond biologiquement pour les poissons à une classe de vitesse nulle, mais permet au modèle d'effectuer les calculs d'habitat ultérieurs.

Le dépouillement topographique réalisé par le logiciel permet la visualisation du site notamment par les profils en travers de chaque transect (14 au total) lesquels confirment le caractère encore relativement intact de sa morphologie. Leurs formes sont en effet variées et des sections peu profondes succèdent à d'autres, plus creusées, ce qui correspond globalement à une alternance radier/mouille classique de la dynamique des cours d'eau naturels.

La modélisation de l'habitat conduit à estimer l'effet probable de la réintroduction de débit dans le bras de La Grande Bosse pour les espèces piscicoles (Figure 28). Elle montre des résultats variables selon les espèces considérées : la réintroduction de débit s'avère effectivement favorable pour l'habitat des espèces rhéophiles, tandis qu'elle altère celui des espèces limnophiles mais ne semble pas affecter notablement celui des espèces eurytopes. La capacité d'habitat pour les espèces rencontrées actuellement dans le bras ne devrait donc pas être profondément modifiée puisqu'elles appartiennent à ce dernier groupe. Pour certaines d'entre elles, la SPU d'habitat diminue mais demeure cependant à un niveau élevé, relativement à la surface du bras, ce qui confère tout de même au site une capacité potentielle d'habitat importante pour ces espèces. Seules les espèces limnophiles pâtissent de la réintroduction de débit dans le bras car leur habitat potentiel diminue, même à faible débit. Toutefois, ces espèces ne sont pas caractéristiques du site. Et par ailleurs, à l'échelle plus globale du secteur, laquelle doit être prise en compte dans une telle opération de réhabilitation (Williams *et al.* 1997), d'autres bras morts constituent d'excellents habitats lentiques dans lesquels elles se développent. Ainsi, même si localement l'intervention peut se révéler néfaste pour quelques espèces, à l'échelle du secteur de la Seine, elle contribue à maintenir la biodiversité piscicole.

Globalement, ces résultats confirment l'intérêt de rétablir du débit dans le bras mort, puisque cela permettrait d'améliorer l'habitat des espèces sensibles sur ce secteur de la Seine sans nuire aux autres composantes du peuplement. Cette modélisation permet également de préciser la gamme de débit optimal à réintroduire dans le bras mort. Des effets seuils constatés pour certaines espèces indiquent en effet qu'à partir de valeurs de l'ordre de 10 à 15 m³/s, le débit a un effet positif sur l'habitat.

7.3.4 *Mise en place du suivi du site*

Avec la prise de conscience de la nécessité d'agir pour préserver les milieux de plaine alluviale, les opérations de réhabilitation sont devenues de plus en plus nombreuses. Mais il s'avère que faute de suivis adéquats, l'évaluation de leur efficacité est peu réalisable (Kondolf & Micheli 1995). Ainsi les avancées dans le domaine des connaissances de l'écologie de la restauration des systèmes fluviaux restent peu nombreuses.

La mise en place d'une véritable démarche d'évaluation de l'efficacité des opérations de réhabilitation est pourtant indispensable. Une fois l'objectif de la réhabilitation clairement identifié, elle débute avec l'élaboration d'un protocole de suivi. Ce dernier doit intégrer initialement la totalité des étapes à accomplir, y compris le suivi post-réhabilitation (Henry & Amoros 1995). C'est une démarche de ce type qui est mise en œuvre sur le site de La Grande-Bosse.

Un tel protocole de suivi comprend plusieurs étapes. Il vise d'abord à établir l'état initial du site expérimental par un suivi de pré-réhabilitation. Ensuite, après la réalisation du projet d'aménagement, le suivi de post-réhabilitation débute jusqu'à ce que le site atteigne le stade espéré ou, à défaut, un état stable. Un site témoin est aussi soumis à la même procédure afin d'identifier les processus d'évolution naturelle.

Le choix des indicateurs de suivi est primordial puisque ce sont eux qui doivent permettre par la suite de juger de l'efficacité de l'opération de réhabilitation. Dans le cas présent, l'objectif initial étant de réhabiliter le bras en tant que site pour la reproduction des poissons, les peuplements piscicoles sont les indicateurs majeurs choisis pour évaluer l'efficacité de l'aménagement, en particulier les peuplements de jeunes poissons de l'année.

Le peuplement adulte est inventorié deux fois dans l'année : au printemps avant la reproduction et à l'automne après la reproduction, dans deux bras (bras aménagé + bras témoin), ainsi que dans le chenal afin de connaître les espèces présentes. Les juvéniles sont échantillonnés lors de plusieurs campagnes par pêche électrique par échantillonnage ponctuel d'abondance afin d'obtenir des résultats quantitatifs. Le nombre de points est « proportionnel » à la taille des deux milieux étudiés. Ces campagnes sont réalisées selon une fréquence mensuelle durant la saison de reproduction. Elles débutent en avril afin de prendre en compte le résultat de la reproduction des espèces les plus précoces, comme le brochet.

À chaque point de pêche, des paramètres d'habitat sont relevés, physico-chimiques (température de l'eau, oxygène dissous, pH, conductivité et turbidité), morphologiques (substrat, hauteur d'eau, vitesse, type de berges, abris, ombrage, etc.) et biologiques (ripisylve, végétation, chlorophylle, carbone organique dissous). Par ailleurs, deux paramètres font l'objet d'un suivi continu en raison de leur importance vis-à-vis de la faune piscicole : la hauteur d'eau est enregistrée par un limnimètre pour surveiller les éventuelles variations de niveau d'eau brusques engendrées par la gestion du barrage-écluse ; la température est mesurée en continu par des enregistreurs autonomes immergés dans les deux bras et le chenal. Ce suivi du site a débuté dès 1999.

8. Conclusion

Les études destinées à appréhender le fonctionnement hydrologique du système, sa dynamique et certaines de ses fonctions ont été principalement menées dans la partie amont de la Bassée où l'emprise des aménagements et des activités humaines est restée limitée, laissant notamment la dynamique du fleuve s'exercer librement. Le secteur aval de la Bassée, plus proche de l'agglomération parisienne, a été soumis, depuis des siècles, à divers aménagements destinés au contrôle des eaux ainsi qu'à des activités susceptibles de perturber son fonctionnement global et ses propriétés. C'est donc le secteur qui a été retenu pour analyser les raisons de ces aménagements hydrauliques, leurs relations avec les usages des sols, leur évolution au cours du temps et leurs conséquences.

Deux aspects essentiels ressortent de l'ensemble des travaux liés, d'une part, aux contraintes naturelles qui s'exercent sur l'ensemble de la zone et, d'autre part, aux actions humaines engagées depuis plusieurs siècles et dont les effets se sont manifestés, de façon plus ou moins réversible, à des échelles locales ou sur l'ensemble du secteur.

1. Le fonctionnement de base de la Bassée apparaît caractérisé par l'importance de la contribution de l'aquifère régional de la craie à son approvisionnement en eau (plus de 70 % du volume d'eau qui y

transite annuellement). La nappe de la craie, la nappe alluviale et le réseau hydrographique de la Seine constituent un ensemble en équilibre dynamique, marqué par des échanges permanents entre ses différentes composantes. Si l'écoulement longitudinal reste dominant, de nombreux transferts latéraux et verticaux se manifestent, avec des inversions de leur direction en fonction des conditions climatiques (flux ascendants ou descendants entre nappe alluviale et aquifère de la craie, flux latéraux de drainage ou de recharge de la nappe alluviale par la rivière).

La contribution importante de la nappe de la craie, la fréquence et la durée des inondations assurent le maintien du caractère humide de la zone où les variations du niveau de la nappe restent modérées (1 m en moyenne dans la Bassée amont). L'extension des zones inondables et le maintien d'eaux souterraines à faible profondeur pendant la plus grande partie de l'année sont autant de conditions favorables à l'amélioration de la qualité des eaux (rétention des matières en suspension et des polluants associés, élimination des nitrates par dénitrification).

La dynamique ancienne et actuelle de la Seine, demeurée très active dans la Bassée amont où elle ne subit pas de contraintes, a façonné la plaine alluviale. Les mouvements du chenal et les débordements sont à l'origine de la création et du renouvellement de nombreuses formes, en particulier de divers types d'annexes hydrauliques. Ces habitats variés constituent autant de niches écologiques favorables à la diversité biologique du corridor fluvial, notamment à celle des peuplements de poissons.

2. Utilisée depuis la Préhistoire, la Bassée, comme la plupart des zones humides, est un espace rural dont la gestion a plus ou moins varié au cours du temps, en fonction des aléas climatiques, de l'évolution des besoins socio-économiques et des progrès des techniques.

Ce qui frappe, en premier lieu, c'est le poids différent des pressions humaines sur les secteurs amont et aval de la Bassée. Le rôle du **secteur amont** en tant que zone d'expansion des crues a été maintenu et les habitants continuent à "vivre avec les inondations", sans constructions en zones inondables et avec mise en culture des zones pas ou peu submersibles. La circulation des eaux dans cette zone n'en a pas moins été soumise, par le passé, à des modifications dont on ne retiendra que les plus apparentes, faute d'études historiques dans ce secteur : des dérivations anciennes pour des projets de navigation et pour l'établissement de moulins, dont bon nombre ont disparu, ainsi que des canaux et des fossés de drainage.

Le régime hydrique est aujourd'hui contrôlé par un système de vannes à hauteur de Méry/Seine, mais il est surtout conditionné par la gestion des barrages-réservoirs établis à l'amont sur l'Aube et la Seine. La double vocation de ces lacs, écrêtement des crues et soutien des étiages a des effets contradictoires sur certaines des fonctions de ce secteur: les volumes d'eau des lâchures estivales, dont une partie recharge temporairement la nappe alluviale, sont bénéfiques pour la persistance des processus qui améliorent la qualité des eaux (dénitrification) mais l'écrêtement des crues en fin d'hiver-début de printemps se révèlent préjudiciable à la réalisation de bonnes conditions pour la reproduction du brochet..

Pour satisfaire les besoins de Paris (navigation, flottage du bois), dès le 16^{ème} siècle, les aménagements du lit de la Seine ont pris davantage d'ampleur dans le **secteur aval** de la Bassée : suppression de seuils puis construction de barrages et de dérivations, recoupement de méandres. Les propriétaires ont, dès lors, mis en œuvre une gestion très fine des niveaux d'eau dans les multiples chenaux secondaires, noues, canaux et fossés de la plaine alluviale afin d'assurer leur approvisionnement en eau et d'optimiser la production fourragère des prairies qui couvraient la majeure partie de ce territoire. Cela ne s'est pas fait sans quelques conflits locaux résultant, à certains moments, des besoins en eau divergeants des navigants et des agriculteurs. Il y a eu aussi des variations des conditions hydriques dans la plaine alluviale, dues à des changements climatiques (sécheresses prolongées) ou au temps nécessaire à l'ajustement des niveaux d'eau après des aménagements dans le lit de la Seine.

Après une longue période de gestion plus ou moins consensuelle, marquée par une forte capacité d'adaptation des usagers de ce secteur de la Bassée aux conditions climatiques et aux aménagements du fleuve, des conflits sérieux et prolongés ne sont apparus qu'à la fin du 19^{ème} siècle avec des projets d'assèchement pour la mise en culture de surfaces importantes, la production de fourrages pour la capitale devenant moins rentable. On passait là d'actions d'ajustement, d'adaptations, à modifications plus marquées et plus difficilement réversibles.

Le processus s'est amplifié au 20^{ème} siècle avec la chenalisation de la Seine, l'extension d'une agriculture intensive et l'exploitation des matériaux alluvionnaires, multipliant enjeux et conflits d'intérêts entre les usagers. L'intégrité de la zone humide subit alors des altérations plus profondes qui n'ont cependant pas fait disparaître la totalité des caractéristiques et de propriétés intéressantes de ce milieu, comme ce fut le cas pour bien d'autres zones humides.

Certes, la chenalisation de la Seine a provoqué un déficit d'inondation préjudiciable tant à l'aval de la zone que pour le fonctionnement biogéochimique de la zone elle-même et son intérêt écologique, notamment en ce qui concerne les peuplements piscicoles. Le prolongement du canal à grand gabarit ne pourrait qu'accroître le phénomène et ses conséquences. La circulation des eaux souterraines est, par ailleurs, fortement perturbée par l'extraction des granulats et le colmatage des gravières remises en eau. L'agriculture, de son côté, est source de produits polluants pour les eaux souterraines et superficielles du secteur; elle demande également un écrêtement plus efficace des crues printanières. L'absence de réaménagements appropriés pour de nombreux plans d'eau et la mise en culture de vastes surfaces ont dégradé la qualité du paysage alluvial.

Cependant, la gestion des barrages en périodes d'étiages et la régulation des niveaux d'eau dans la Seine assurent le maintien le niveau de la nappe alluviale à une faible profondeur sur une grande partie du territoire, garantissant le maintien des caractéristiques floristiques et faunistiques du système humide ainsi que la persistance des processus biogéochimiques d'épuration des eaux. Ces processus sont également maintenus au sein de la plupart des plans d'eau. Il est certain que, comme par le passé, c'est la gestion de l'eau qui reste le facteur déterminant de la pérennité du milieu humide et de ses fonctions. Mais, la préservation de la qualité des milieux et sa restauration partielle sur certains sites fortement altérés ne peut qu'être favorisée par des projets de mise en réserve des sites les moins dégradés, de remise en eau de certaines zones lors des crues avec un suivi permettant d'en mesurer tous les effets. Les ressources en eau et le patrimoine biologique de cette zone aval de la Bassée, devenue un vaste site expérimental, ne peut que bénéficier aussi des expériences de réaménagements écologiques des plans d'eau, de récréation de zones humides sur des sites exploités et de restauration de la dynamique des anciens méandres comme sur le site de la Grande Bosse. L'amélioration de la qualité du milieu passe également par la mise en œuvre de pratiques agricoles plus respectueuses de cet environnement.

9. Références

Amoros C. & Petts G. E., 1993. *Hydrosystèmes fluviaux*, Paris: Masson, 300 p..

Amoros C., Richardot-Coulet M. & Pautou G. (1982) - Les "ensembles fonctionnels" des entités écologiques qui traduisent l'évolution de l'hydrosystème en intégrant la géomorphologie et l'anthropisation (exemple du Haut-Rhône Français). *Revue de Géographie de Lyon*, 57, 49-62.

Balon E.K. (1975) - Reproductive guilds of fishes : a proposal and definition. *J. Fish. Res. Board Can.*, 32 (6), 821-864.

Belgrand M., 1872. *La Seine : études hydrologiques. Régime des pluies, des sources, des eaux courantes. Applications à l'agriculture*. Dunod, Paris, pp 332-349.

Bendjoudi H., Weng P., Guérin R. et Pastre J.F., 2002. The Riaprian Wetland of the Middle Reach of the Seine River : Historical Development, Reconnaissance and Present Hydrologic Functioning, A Case Study, accepté *Journal of Hydrology*.

Bendjoudi H., Cheviron B., Guérin R. et Tabbagh A., 2001. Determination of infiltration using transient variations of soil profile temperature: test using Voyons (Aube, France) experimental data ; soumis *Water Resouces Research*.

Benoît, M. Saintot, D., Gaury, F. (1995). Mesures en parcelles d'agriculteurs des pertes en nitrates. Variabilité sous divers systèmes de culture et modélisation de la qualité de l'eau d'un bassin d'alimentation. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 81: 175-188.

- Berrebi-dit-Thomas R. & Boët P. (1997) - *Biodiversity of young-of-the-year fish assemblages from natural and artificial backwaters in the Seine River floodplain (France)*. Ninth Intern. Congress of European Ichthyologists (CEI9) "Fish Biodiversity", 24-29 August, Trieste, Italy.
- Berrebi-dit-Thomas R. (1999) - Le recrutement des communautés piscicoles dans les annexes hydrauliques de la plaine de La Bassée (Seine). *Thèse Doct. Univ. Paris VI, spécialité Ecologie*, 271 p.
- Berrebi-dit-Thomas R., Boët P. & Tales E. (2001) - Macrohabitat characteristics influencing young-of-the-year fish assemblages in connected lentic backwaters in the Seine River (France). *Arch. Hydrobiol.*, 135 (2-4), 119-135.
- Billen, G. and J. Garnier. (1999). *Nitrogen transfer through the Seine drainage network: a budget based on the application of the RIVERSTRAHLER Model*. *Hydrobiologia* 410: 139-150.
- Bragan R. J., J. L. Starr, et al. 1997. "Shallow groundwater denitrification rate measurement by acetylene block." *Journal of Environmental Quality* 26: 1531-1538.
- Brinson M., 1993. A Hydrogeomorphic classification of wetlands, US Army Corps of Engineers (Waterways Experiment Station), Wetlands Research Program, Technical Report WRP-DE-4, 71 p..
- Brooks R.H. et Corey A.T., 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper*, 3. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 27 pages.
- Copp G.H. & Penaz M. (1988) - Ecology of fish spawning and nursery zones in the flood plain, using a new sampling approach. *Hydrobiologia*, 169, 209-224.
- Copp G.H. (1989) - The habitat diversity and fish reproductive function of floodplain ecosystems. *Environ. Biol. Fish.*, 26, 1-27.
- Copp G.H., Olivier J.-M., Penaz M. & Roux A.-L. (1990) - *Juveniles fishes as functional describers of fluvial ecosystem dynamics*. Symp. on Floodplain Rivers, April 9-11 1990, Baton Rouge, Louisiana, USA.
- Cosson, A. (1996). Quantification des grands flux d'azote à l'échelle des bassins de l'Aube, de l'Yonne et de la Seine en amont de Montereau. *Rapport de stage d'option de l'Ecole Polytechnique*.
- Cowardin, L.M., Carter, V., Golet, F.C. et LaRoe, E.T., 1979. Classification of Wetlands and Deepwater Habitats of the United States. FWS/OBS-79/31, U.S. Fish and Wildlife Service, Washington.
- Croguennec S., 1998. L'élimination des nitrates en zones humides : mise en évidence et mesure in-situ de vitesses de dénitrification. Mémoire de DEA, Lab. Géologie Appliquée, Paris VI. Paris, Université Paris XII.
- 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*, 581-582, 191-200.
- Dzana J. G., 1997. *Le lit de la Seine de Bar à Montereau: Etude morphodynamique, rôle des aménagements*, Thèse de Géographie: Université de Paris I, 411 p..
- Eberentz P. et Rinck G., 1987. Impact qualitatif des carrières en eau sur les nappes souterraines. Rapport de synthèse du BRGM n0 87 SGN 567 HNO-ALS. 25 p.
- Fritz, M (1994). Etude statistique sur la contamination en nitrates des cours d'eau et des nappes principales du bassin de l'Yonne et de la Seine en amont de Montereau. *DEA Hydrologie, Université de Paris VI*.
- Fustec E., Greiner I., Schanen O., Gaillard S. et Dzana J.G., 1998. Les zones humides riveraines : des milieux divers aux multiples fonctions. In : M. Meybeck (Editor), *La Seine en son bassin ; Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*. Elsevier : 211-262.
- Gaillard S., 1999. L'Aube : dynamique morphosédimentaire holocène et fonctionnement actuel d'un hydrosystème à faible énergie, Thèse de Géographie : Université Paris IV, 238 p..
- Gaillard S., Levassor A., Mussot R., Dzana J.G., Bommer B. & Godard A., 1999. Fonctionnement du lit fluvial de la Seine à différentes échelles de temps et d'espace. In Le Coz C., Tassin B., Thévenot D. (éds),

Pluie et Environnement (Actes des huitièmes journées du Diplôme d'Etudes Approfondies : Sciences et Techniques de l'Environnement), Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, p. 97-111.

Gazelle F., 1993. "Submersion du lit majeur de la Garonne en aval de Toulouse: Approche écologique et méthodologique", *Au fil de l'eau, Hommage à René Frécaut*, 321-328.

Genuchten M.T.v., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*, 44 : 892-898.

Ginot V., Souchon Y., Capra H., Breil P. & Valentin S. (1998) - EVHA 2.0. Evaluation de l'habitat physique des poissons en rivière. Guide méthodologique. Cemagref, Ministère de l'Environnement, 82 + annexes p.

Godwin, H. et Bharucha, F.R., 1931. Studies in the ecology of Wicken Fen - I The ground water level of the Fen. *Journal of Ecology*, 19 : 449-473.

Grandmottet J.-P. (1983) - Principales exigences des téléostéens dulcicoles vis-à-vis de l'habitat aquatique. *Ann. sci. Univ. Franche-Comté, Besançon, Biol. Anim.*, 4ème sér. (fasc. 4), 3-32.

Greiner I., 1997. Analyse de la variabilité fonctionnelle de la plaine alluviale de la Seine et modélisation des transferts de nitrates. Thèse Sciences de l'eau. Paris, UPMC: 241 + annexes.

Harden Jones F.R. (1968) - *Fish migration.*, Edward Arnold, London, 325 p.

Helmer C. et Labroue L., 1993. Dénitrification in gravel pit-lakes. *Hydrobiologia* 252 : 35-44.

Henry C.P. & Amoros C. (1995) - Restoration ecology of riverine wetlands .1. A scientific base. *Environmental Management*, 19 (6), 891-902.

Hvorslev J.M., 1951. Time lag and soil permeability in ground-water measurements, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Missouri.

Kondolf G.M. & Micheli E.R. (1995) - Evaluating stream restoration projects. *Environmental Management*, 19 (1), 1-15.

Levassor A., Dzana J. G., Gaillard S., 1994. " Sur l'évolution historique de la Seine et de l'Aube", Rapport d'activité 1994/II (Piren-Seine), Thème : Corridor fluvial, analyse et modélisation des systèmes fluviaux anthropisés, 66 p..

Mann R.H.K. (1996) - Environmental requirement of European non-salmonid fish in rivers. *Hydrobiologia*, 323, 223-235.

Mégniën C., 1979. Hydrogéologie du centre du bassin parisien, 98. BRGM, 532 pages.

Monfort O., Breil P. & Boët P. (1996) - *Selection of an ecological reference flow : support by modeling the habitat of a key species, the northern pike.* p. 133-146, In: M. Leclerc, H. Capra, S. Valentin, A. Boudreault & Y. Côté (Eds), ""Ecohydraulics 2000" 2nd IAHR international symposium on hydraulics and habitats", Quebec City, June 11-14, 1996, INRS-Eau, B.

Mualem Y., 1976. A new model for predictiong the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12 : 513-522.

Nikolsky G.V. (1963) - *The ecology of fishes.* (L. Birkett, Trans.) (from the Russian Ed.), Academic Press, London, 352 p.

Pouilly M., Valentin S., Capra H., Ginot V. & Souchon Y. (1995) - Microhabitat methodology: Principles and procedures. *Bull. Fr. Pêche et Pisciculture*, (336), 41-54.

Ritchie J.C. et McHenry J.R., 1975. Fallout 137Cs : a tool in conservation research. *Journal of Soil and Conservation Research*, 30 : 283-286.

Roux A.-L. & Copp G.H. (1993) - *Peuplements de poissons.* p. 151-166 in : C. Amoros & G.E. Petts (Eds.), *Hydrosystèmes fluviaux*, Masson, Paris.

Schanen O., 1993. Fonctionnement hydrodynamique et biogéochimique des milieux d'interface terre-eau : impact sur les flux d'azote dans la vallée de la Seine. mémoire DEA Hydrologie et Hydrogéologie quantitatives, 40 p.

Schanen O., 1998. Analyse et modélisation de l'impact hydrodynamique et biogéochimique des lacs de gravières sur la nappe alluviale du Val de Seine. Thèse Doctorat Université Paris VI, Spécialité Sciences de l'eau, 273 p.

Schanen O., Bendjoudi H., Levassor A., Fustec E., 1998. Quantification des écoulements Nappe-Gravières en zone alluviale, par optimisation des paramètres du bilan hydrologique. C.R.Acad.Sci., Paris, 326 : 107-112.

Schiemer F., Spindler T., Wintersberger H., Schneider A. & Chovanec A. (1991) - Fish fry associations : important indicators for the ecological status of large rivers. *Ver. Internat. Verein. Limnol.*, 24, 2497-2500.

Schlösser I.J. (1991) - Stream fish ecology : a landscape perspective. *Bioscience*, 41 (10), 704-712.

Sinoquet C., 1987. Impact d'une ballastière en eau sur la qualité des eaux souterraines : Cas de deux ballastières alsaciennes et modélisation mathématique appliquée aux échanges hydrochimiques et hydrothermiques. Thèse de doctorat, Université L. Pasteur, Strasbourg, 239 p.

Skaggs, R.W., Gilliam, J.W. et Evans, R.O., 1991. A computer simulation study of pocosin hydrology. *Wetlands*, 11 : 399-416.

Souchon Y., Trocherie F. & Fragnoud E. (1989) - Les modèles numériques des microhabitats des poissons : application et nouveaux développements. *Sciences de l'Eau*, 2 (4), 817-841.

Starr J. L., Sadeghi A.M. et al., 1996. "A tracer test to determine the fate of nitrate in shallow groundwater." *Journal of Environmental Quality* 25: 917-923.

Tabbagh A., Bendjoudi H. and Benderitter Y., 1999. Determination of recharge in unsaturated soils using temperature monitoring, *Water Resources Research*, 35, 8, p. 2439-2446.

Tajjar M.H., 1993. Modélisation de l'hydrodynamique des échanges nappe-rivière, simulation d'une lachure expérimentale en Seine en période d'étiage. Thèse Université de Paris 6, 174 pages.

Tales E., Boët P. & Berrebi-dit-Thomas R. (1996) - Les peuplements de poissons de l'année de quelques types d'annexes fluviales dans la plaine de la Bassée (Seine). *Bull. Fr. Pêche et Pisciculture*, 343 (4), 189-202.

Thiery D., 1990. Logiciel MARTHE. Modélisation d'Aquifère par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour un calcul Hydrodynamique des Ecoulements - version 4.3. R32210 EAU 4S 90, BRGM, Orléans.

Thiery D., 1993. Résolution matricielle et nouvelles géométries dans le logiciel MARTHE. 4S EAU R 37762, BRGM, Orléans.

Thorntwaite C.W., 1954. The measurement of potential evapotranspiration. J.M. Mather, Seabrook, New Jersey, 255 pages.

Ward J.V. & Stanford J.A. (1995) - Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation. *Regulated Rivers*, 11 (1), 105-119.

Welcomme R.L. (1995) - Relationships between fisheries and the integrity of river systems. *Regulated Rivers*, 11 (1), 121-136.

Weng P., 2000. Fonctionnement hydrologique d'une zone humide alluviale, relations avec l'aquifère sous-jacent et les rivières. Exemple de la Seine moyenne. Thèse de Doctorat, Université Paris VI, Paris, 202 pp.

Weng P., Coudrain-Ribstein A., Kao C., Bendjoudi H. & de Marsily G., 1999. Mise en évidence de fortes circulations verticales temporaires entre zones humides et aquifères alluviaux et régionaux. *C.R.Acad.Sci.*, Paris, Science de la Terre et des Planètes, 329 : 257- 263.

Williams J.E., Wood C.A. & Dombeck M.P. (1997) - *Watershed restoration : principles and practices.*, American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 559 p.

Winter, T.C., 1992. A physiographic and climatic framework for hydrologic studies of wetlands. In : R.D. Roberts and M.L. Bothwell (Editors), *Aquatic Ecosystems in Semi-Arid Regions : Implications for Resources Management.* Symposium Series, Saskatoon : 127-148.