

Rétention des nitrates par tronçon de cours d'eau dans le bassin de la Seine

Florence Curie^{1*}, Agnès Ducharne², Hocine Bendjoudi², Pascal Viennot³

¹ UMR Sisyphe, Jussieu, Florence.curie@ccr.jussieu.fr

² UMR Sisyphe, Jussieu

³ Centre de Géosciences, Ecoles des mines de Paris, Fontainebleau

Rétention des nitrates par tronçon de cours d'eau dans le bassin de la Seine	1
1. Bilans de nitrates dans les bassins versants désagrégés	2
1.1. Principe des bilans	2
1.2. Estimation d'un taux de rétention.....	3
1.3. Calcul des bilans de nitrates	3
1.3.1 Les flux en rivière.....	3
1.3.2 Le flux en provenance du bassin versant spécifique	4
1.3.3 Les apports ponctuels domestiques	5
2. Résultats	6
2.1. La rétention dans le bassin de la Seine	6
2.2. Etude de la variabilité saisonnière	8
2.3. Détermination des principaux facteurs de contrôle	8
2.3.1 Les facteurs susceptibles de contrôler la rétention	9
2.3.2 Influence du gradient amont-aval.....	10
2.3.3 Influence du revêtement alluvial	11
2.3.4 Influence de l'occupation du sol.....	12
2.3.5 Autres facteurs de contrôle.....	13
3. Conclusion.....	14

Les zones humides riveraines sont des environnements capables de réduire significativement les concentrations en nitrates des eaux qui les traversent (Burt and Pinay, 2005; Hill, 1996). Deux processus majeurs sont à l'origine de la rétention des nitrates : le prélèvement par la végétation et la dénitrification (Haycock *et al.*, 1993). Parmi ces deux processus, seule la dénitrification permet d'éliminer définitivement les nitrates en les transformant en N₂ (gazeux). L'azote prélevé par la végétation est, quant à lui, relargué lors de la minéralisation de la litière et ne constitue donc qu'un processus temporaire de rétention. Bien que ces capacités d'épuration fassent l'objet d'un consensus dans la communauté scientifique, celles-ci demeurent difficiles à quantifier que ce soit à l'échelle locale ou à l'échelle plus globale du bassin versant (Hattermann *et al.*, 2006; Montreuil and Mérot, 2006).

Notre objectif est de caractériser la rétention des nitrates à l'échelle régionale du bassin de la Seine et d'identifier les facteurs contrôlant la rétention à cette échelle. Lors d'une première étape nous avons estimé des taux de rétention en réalisant des bilans de nitrate dans des bassins versants de différentes tailles emboîtés les uns dans les autres. Afin d'améliorer les résultats obtenus lors de ce précédent travail, nous avons décidé de désagréger les bassins versants, ce qui permet de calculer des taux de rétention indépendants les uns des autres et de travailler sur des tronçons de bassins versants ayant des caractéristiques plus homogènes. La méthodologie par tronçon employée intègre les processus éliminant les nitrates dans les zones ripariennes et dans les cours d'eau eux-mêmes.

1. Bilans de nitrates dans les bassins versants désagrégés

1.1. Principe des bilans

Réaliser des bilans au niveau de la zone riveraine d'un bassin versant, nécessite de connaître les flux entrant et sortant de la zone humide (Figure 1). Lors de cette étude, nous avons considéré, comme précédemment, que le flux de nitrate en provenance du bassin versant (F_{BV}) vers la zone humide était composé d'un flux superficiel et d'un flux souterrain principalement lié à l'occupation du sol et aux pratiques culturales sur le bassin versant. Ne disposant pas de données concernant le flux en sortie de la zone, celui-ci est estimé à partir du débit en rivière et des concentrations en nitrates mesurées en rivière (F_{AVL}). De ce fait, les bilans de nitrates ne concernent pas seulement la zone humide riveraine mais également la rétention dans le cours d'eau ayant lieu dans la colonne d'eau et les sédiments.

Pour pouvoir désagréger les bassins versants et ne conserver que l'influence du bassin spécifique il faut supprimer la contribution amont et donc connaître le flux en rivière en entrée du bassin spécifique (F_{AMT}). L'anthropisation de la Seine étant très importante, il n'est pas rare que les débits à l'aval soient légèrement plus faibles que les débits à l'amont ce qui pose un sérieux problème dans la détermination des flux. Pour contourner cet inconvénient, nous avons utilisé les écoulements modélisés par le modèle MODCOU pour estimer les débits en rivière.

Les apports ponctuels liés aux rejets domestiques ont été pris en compte à travers les données des stations d'épuration (F_{STEP}). En revanche, les données concernant les rejets industriels étant trop peu précises en ce qui concerne l'azote, celles-ci n'ont pas été intégrées.

Dans un premier temps, les calculs ont été réalisés au pas de temps interannuel ce qui permet de considérer que l'écosystème riverain est à l'équilibre et donc de ce fait que le stockage d'azote sous forme de nitrate dans la zone humide riveraine peut être négligé. Dans ce cas, on peut faire l'hypothèse que l'assimilation et la restitution par la végétation se compensent et que seule la dénitrification est responsable des différences dans le bilan de nitrates.

Afin d'appréhender la variabilité saisonnière de la rétention, les bilans ont également été calculés pour chacune des saisons :

- janvier à mars : hiver
- avril à juin : printemps
- juillet à septembre : été
- octobre à décembre : automne

Dans ce cas, le stockage de nitrate dans la zone humide ne peut pas être négligé et c'est la rétention totale qui est caractérisée prenant en compte à la fois les effets de la végétation et la dénitrification.

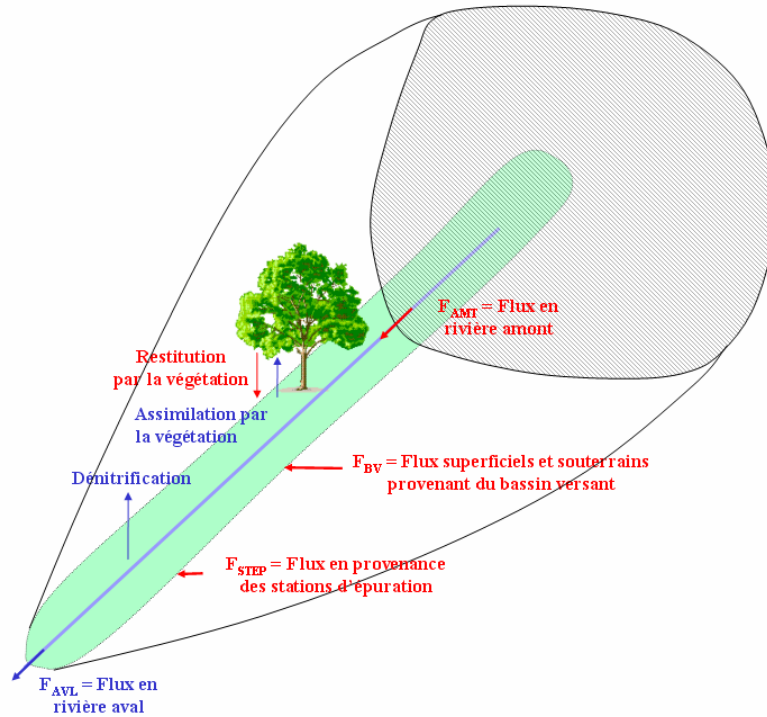


Figure 1 : Représentation schématique des flux en entrée et sortie de la zone humide riveraine. Les flux entrant sont représentés en rouge et les flux sortant en bleu.

1.2. Estimation d'un taux de rétenion

La rétenion riparienne et in stream est caractérisée par la différence entre le flux de nitrate exporté par la rivière à l'exutoire du bassin (F_{AVL}) et le flux de nitrate en entrée de la zone humide (F_{STEP} et F_{BV}) et du bassin versant spécifique (F_{AMT}). Cette rétenion est normalisée par le flux entrant pour donner le taux de rétenion du tronçon de cours d'eau, y compris la zone riparienne :

$$R = \frac{F_{ENTRANT} - F_{SORTANT}}{F_{ENTRANT}} = 1 - \left(\frac{F_{AVL}}{F_{BV} + F_{STEP} + F_{AMT}} \right)$$

Ce taux de rétenion estimé est égal à 1 lorsque la rétenion est totale, à 0 quand elle est absente et peut être négatif lorsque le système exporte des nitrates. Les calculs de taux de rétenion ont été réalisés sur une période de 8 ans, de 1996 à 2003.

1.3. Calcul des bilans de nitrates

1.3.1 Les flux en rivière

Les flux en rivière à l'aval (F_{AVL}) et à l'amont (F_{AMT}) sont calculés à partir des concentrations en nitrates mesurées au niveau des stations RNB (Réseau National de Bassin) et des écoulements fournis par le modèle STICS-MODCOU-NEWSAM en chaque maille du modèle MODCOU.

Les mesures de concentration en rivière aux stations RNB étant ponctuelles, nous avons réalisé une interpolation en créneau de ces mesures afin de générer une série continue sur la période 1996-2003. Le débit total par décennie est obtenu en sommant les écoulements souterrains et sous-racinaires pour chaque maille puis en réalisant la somme de ces écoulements sur le bassin contributif à la station RNB. Les flux en rivière sont ensuite calculés en multipliant pour chaque décennie les concentrations en rivière et les débits totaux calculés. Le flux moyen en rivière est enfin obtenu en moyennant la somme de ces flux décennaires pour chacune des périodes de temps sur lesquelles sont réalisées les calculs de taux de rétenion.

1.3.2 Le flux en provenance du bassin versant spécifique

Suivant la méthodologie utilisée par le modèle Sénèque, nous avons considéré que le flux de nitrate en provenance du bassin versant spécifique était composé d'un flux superficiel, essentiellement hivernal, et d'un flux souterrain :

$$F_{BV} = C_b * Q_b + C_s * Q_s$$

Avec C_b : la concentration souterraine en nitrates
 Q_b : le débit souterrain
 C_s : la concentration sous-racinaire
 Q_s : le débit superficiel

Comme lors du travail précédent, les concentrations sous-racinaires ont été estimées (Curie, 2006) à partir de l'usage du sol en affectant à chaque type d'occupation du sol de Corine Landcover une valeur de concentration en nitrates (Billen and Garnier, 2000; Billen *et al.*, 2007). Cependant, différents types de prairies (3 types) et de terres arables (12 types) ont été pris en compte en fonction de la région concernée comme c'est actuellement le cas dans le modèle SENEQUE (Thieu *et al.*, 2006). Les entrants azotés sont constants pour chacune des classes de végétation au cours de la période d'étude (Figure 2).

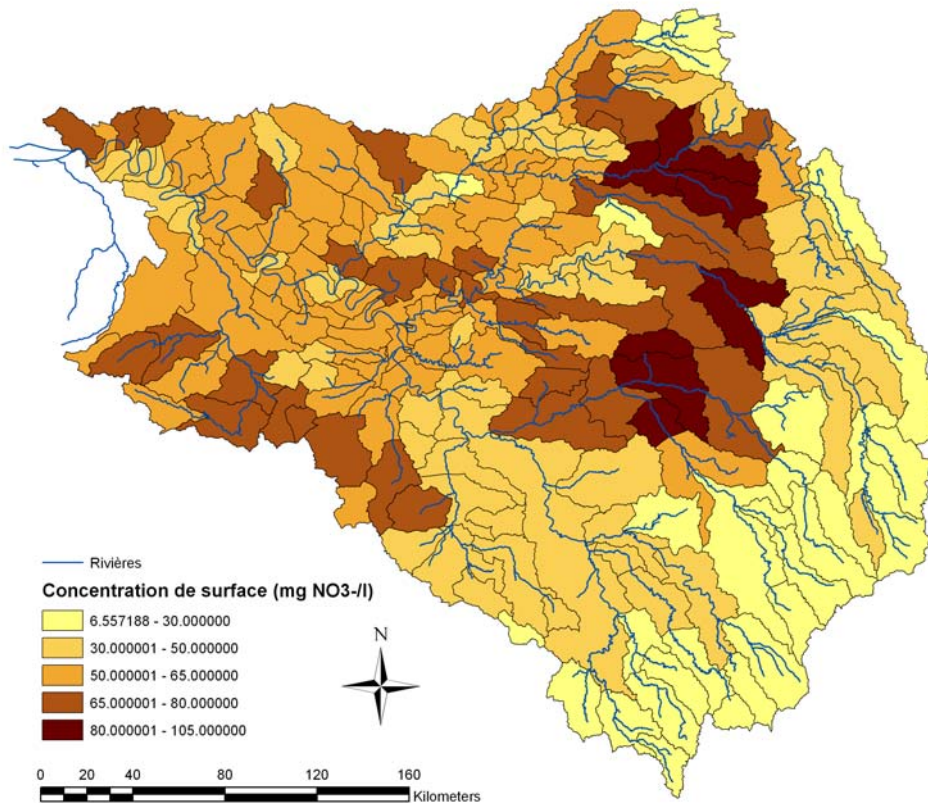


Figure 2 : Carte des concentrations sous-racinaires estimées à partir de l'occupation du sol de Corine landcover (2000) dans les bassins versants désagrégés.

Les concentrations souterraines sont celles du site ADES (Accès aux Données sur les Eaux souterraines) qui regroupe des données sur les eaux souterraines depuis 1995. Le choix du début de la période de calcul a été fortement conditionné par l'accès à ces données qui deviennent vraiment fréquentes et sont bien distribuées sur le bassin de la Seine à partir de 1996. Les valeurs de concentrations souterraines ont été moyennées sur la période 1996 à 2003 puis interpolées sur l'ensemble du bassin de la Seine par la méthode IDW (Inverse Distance Weight). Afin de conserver les avantages de la spatialisation des écoulements de MODCOU, les concentrations souterraines ont ensuite été recalculées sur le maillage du modèle MODCOU (Figure 3). Les flux de nitrate ont été déterminés pour chaque décade en chaque maille du modèle MODCOU puis sommés au prorata des surfaces de mailles comprises dans le bassin versant spécifique pour connaître le flux en provenance du bassin versant au pas de temps décadaire. La moyenne de ces flux sur les différentes périodes de temps a enfin été calculée pour obtenir F_{BV} .

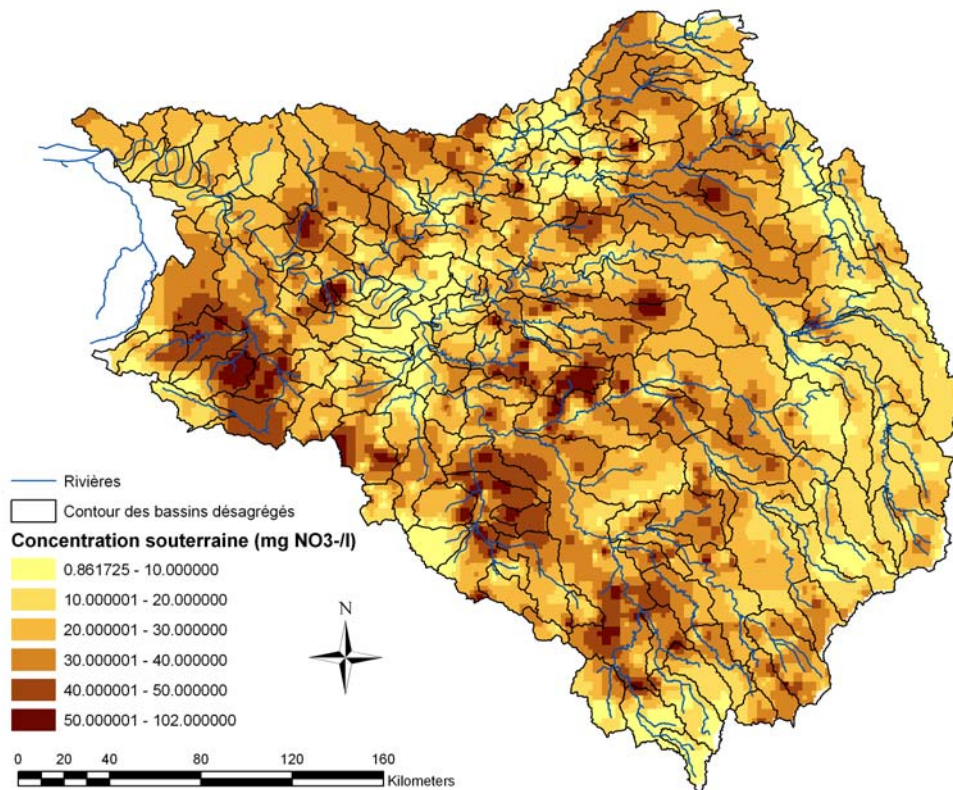


Figure 3 : Carte des concentrations souterraines ADES pour la période 1996-2003(en mg NO₃⁻/l) dans le maillage de surface du modèle MODCOU. Les contours des bassins versants étudiés sont représentés par un trait noir.

1.3.3 Les apports ponctuels domestiques

Les apports ponctuels domestiques ont été pris en compte de la même manière que dans Sénèque à travers les données de rejet des stations d'épuration (Servais and Billen, 2006). Le flux en provenance des stations d'épuration est calculé à partir de la capacité effective de la station (équivalent habitant) et des rejets spécifiques par équivalent habitant en fonction du type de traitement à la station.

2. Résultats

2.1. La rétention dans le bassin de la Seine

Les calculs de taux de rétention ont été réalisés pour chaque station RNB présentant au moins 5 mesures de concentrations en nitrates par an durant la période 1996-2003, ce qui représente 228 stations. Nous avons ensuite seulement conservé les bassins versants spécifiques d'une taille supérieure à 100 km² pour ne pas créer trop de disparité dans la taille des bassins versants et pour diminuer les erreurs d'estimation locales lors du calcul des flux en provenance du bassin versant. Au final, des taux de rétention ont été calculés pour 180 bassins avec des valeurs allant de -0.59 à 0.84 pour la période interannuelle. Parmi ces valeurs 34 sont négatives, mais la plupart ne le sont que très faiblement (Figure 4) et peuvent être assimilées à une rétention nulle sur ces bassins versants. Seules trois valeurs sont fortement négatives et peuvent correspondre à des erreurs dans les estimations des différents paramètres d'entrée (Cs, Cb, Qs, Qb ou Criv). Pour s'affranchir de ces éventuelles erreurs, toutes les valeurs négatives de rétention ont été supprimées ce qui représente environ 20% de notre échantillon. Le taux de rétention moyen est de 0.22 avant suppression des valeurs négatives et de 0.28 sans ces valeurs. Dans les deux cas, il existe bien une rétention globale dans le bassin de la Seine liée à la dénitrification puisqu'au pas de temps interannuel les effets de la végétation se compensent au cours de l'année.

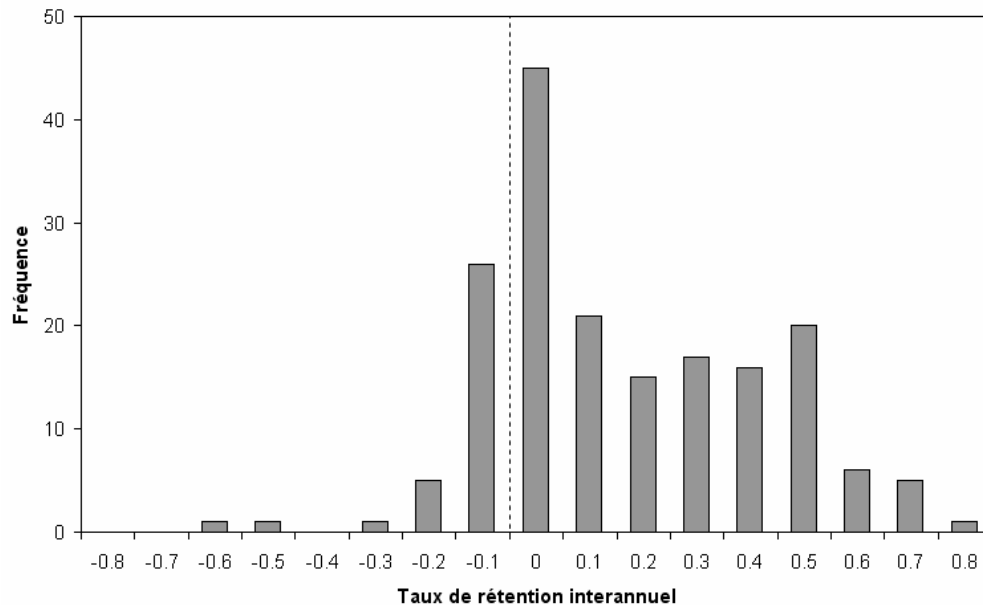


Figure 4 : Distribution des taux de rétention interannuel calculés sur la Seine

Les plus forts taux de rétention se situent majoritairement en tête de bassins versants (Figure 5). Les bassins localisés sur les grands axes quand à eux présentent des taux de rétention de plus en plus faibles en allant vers l'aval. La variabilité tend également à baisser lorsque les bassins sont situés plus à l'aval (Figure 6). Effectivement, même si la rétention effective en quantité d'azote par an est divisée par le flux total d'azote qui traverse le tronçon pour calculer un taux de rétention, plus le tronçon est aval, plus le flux d'azote qui le traverse est fort, et plus le taux de rétention paraît faible. Une autre voie pourrait être envisagée pour tenter d'estimer directement la rétention riparienne. Il s'agirait d'une part d'estimer indépendamment la rétention dans le cours d'eau, à partir de données d'activité biologique publiées dans la colonne d'eau et les sédiments, et d'autre part d'estimer le flux atteignant le cours d'eau à partir du versant par différence entre les sorties à l'aval du tronçon et toutes les autres entrées y compris les apports de l'amont. Il est clair que les erreurs d'estimation rendront probablement cette deuxième méthodologie caduque pour les ordres les plus élevés.

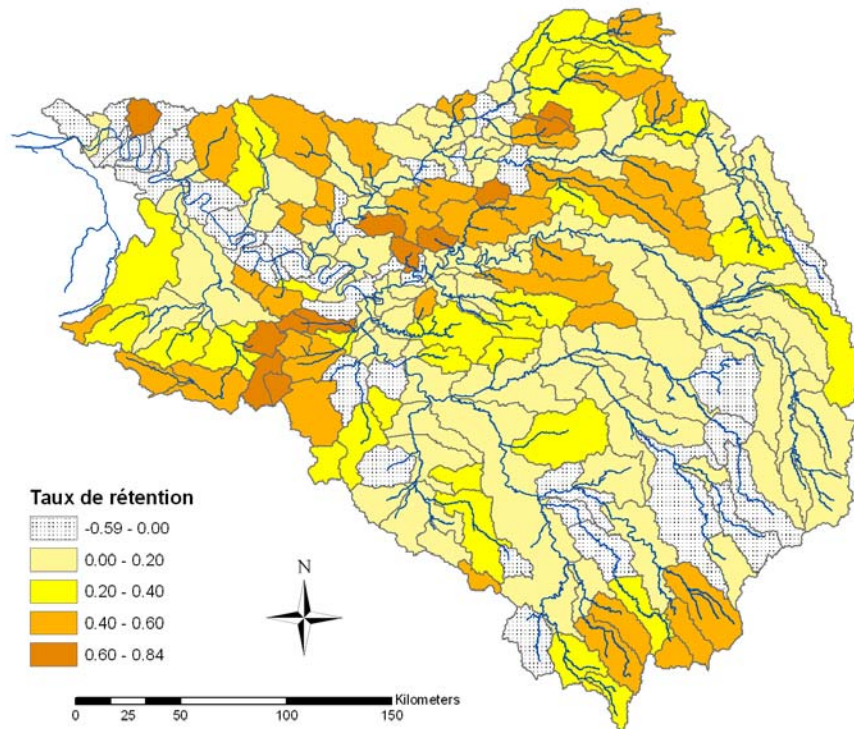


Figure 5 : Carte des taux de rétention dans le bassin de la Seine.

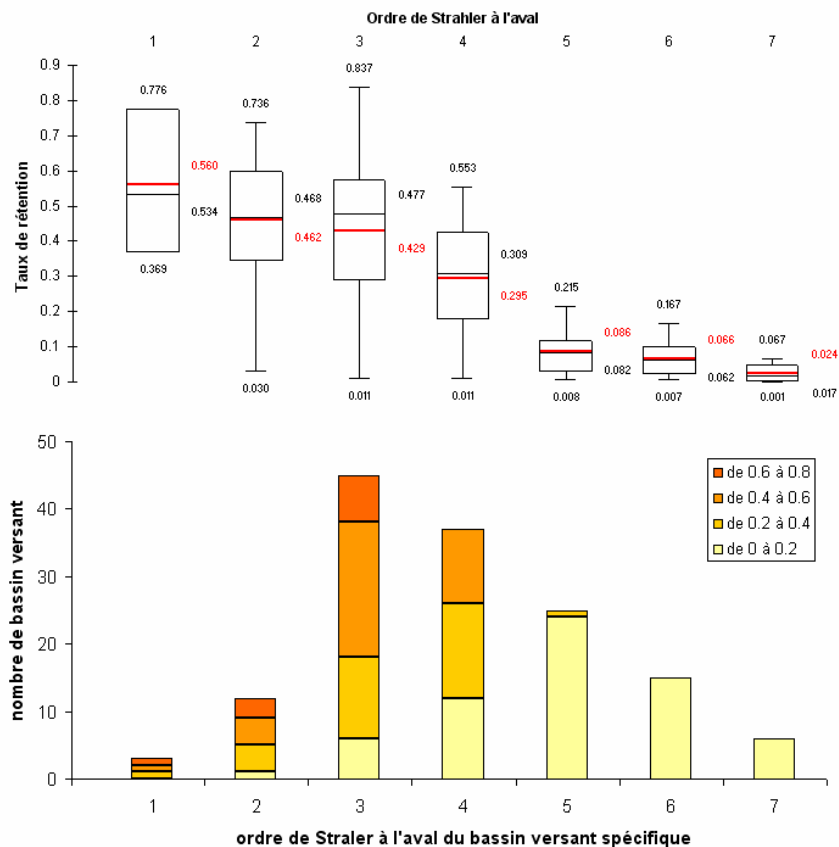


Figure 6 : Boite à moustache des taux de rétention pour les différents ordres de Strahler : le bas et le haut de la boîte correspondent respectivement au premier et au troisième quartile, la moyenne est représentée en rouge, la médiane par un trait noir et le minimum et le maximum par des traits à l'extérieur de la boîte dessinée par les quartiles.

2.2. Etude de la variabilité saisonnière

Le taux de rétention moyen présente un signal saisonnier avec une valeur plus importante en été, intermédiaire au printemps et en automne et plus faible en hiver (Figure 7). C'est la rétention totale (dénitrification + végétation) qui est ici prise en compte puisque les taux de rétention sont calculés à l'échelle de la saison et qu'à cette échelle les effets liés à la végétation ne se compensent pas. Ce résultat est conforme à nos précédentes analyses (Curie, 2006) et est en accord avec nos connaissances actuelles sur ces deux processus. Les prélèvements par la végétation sont plus importants au printemps et en été durant la période de croissance végétale et la dénitrification est favorisée par les fortes températures qui activent les cinétiques de réaction et permettent le développement des conditions anaérobies indispensables à la dénitrification.

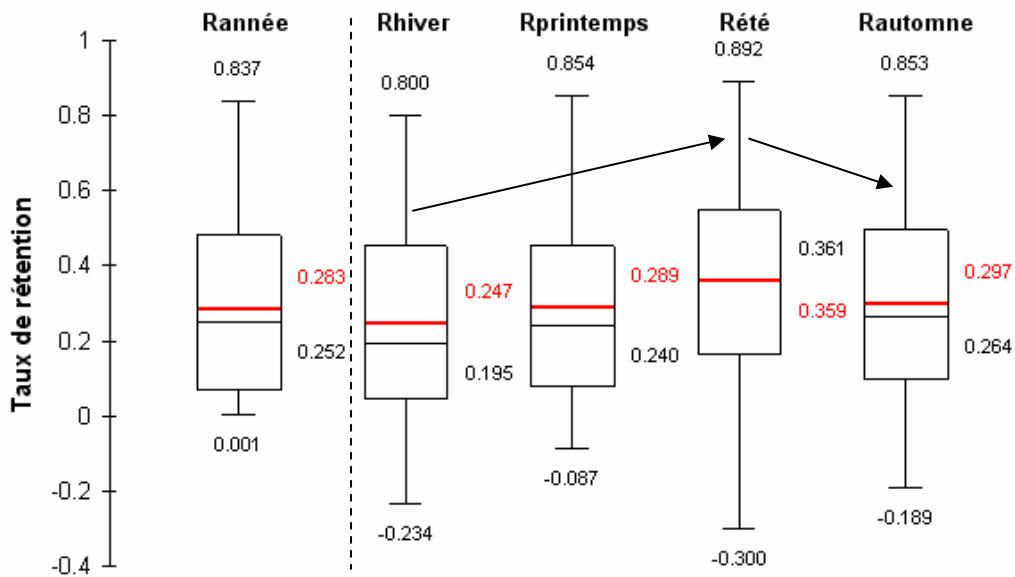


Figure 7 : Boîte à moustache des taux de rétention pour le pas de temps interannuel, et les 4 saisons (hiver, printemps, été et automne) : le bas et le haut de la boîte correspondent respectivement au premier et au troisième quartile, la moyenne est représentée en rouge, la médiane par un trait noir et le minimum et le maximum par des traits à l'extérieur de la boîte dessinée par les quartiles.

2.3. Détermination des principaux facteurs de contrôle

Le principal objectif de ce travail est de déterminer les facteurs de contrôle de la rétention des nitrates à l'échelle du bassin versant. Pour réaliser cette étude, nous avons commencé par calculer les facteurs susceptibles de jouer sur la rétention pour chacun des bassins versants retenus (cf partie 2.3.1) puis nous avons déterminé la matrice de corrélation de Pearson qui indique les corrélations entre chacune des paires de variables (matrice carrée). Ce travail nous a permis de faire un premier tri parmi ces facteurs en identifiant les relations les plus fortes avec le taux de rétention. Dans la suite de cette partie, ces relations sont analysées soit en utilisant des régressions linéaires simples lorsque les paramètres sont sans relation avec d'autres soit en utilisant des graphiques ACP lorsqu'ils appartiennent à une même famille (par exemple plusieurs classes d'occupation du sol). Ces analyses ont été effectuées à l'aide du logiciel XLSTAT Pro. Les détails de la méthode pour les ACP sont disponibles dans Curie (2006).

2.3.1 Les facteurs susceptibles de contrôler la rétention

Différents facteurs sont susceptibles de contrôler la rétention des nitrates à l'échelle des sous-bassins de la Seine. Ce sont principalement ici des facteurs locaux qui ont été recherché. Ces facteurs peuvent être constant dans l'année comme c'est le cas de l'occupation du sol ou des données géomorphologiques ou bien varier au cours des différentes saisons comme les données climatologiques et celles concernant la physico-chimie de l'eau. Les facteurs les plus importants ont été regroupés dans le Tableau 1 ainsi que les coefficient de corrélation liant ces facteurs aux taux de rétention.

Tableau 1 : Liste des facteurs susceptibles de contrôler la rétention des nitrates et coefficient de corrélation avec le taux de rétention.

Catégories de facteurs	Facteurs de contrôle	R	Facteurs de contrôle	R
Végétation dans le corridor alluvial	Pourcentage de zones urbaines	-0.217	Pourcentage de zones agricoles	-0.115
	Pourcentage de forêt	0.361	Pourcentage de zones humides	0.050
	Pourcentage de surface en eau	-0.255		
Indice topographique	Moyenne de l'indice topographique dans le corridor	-0.418	Pourcentage d'it supérieur à 12 dans le corridor alluvial	-0.493
Classification géomorphologique dans le corridor alluvial	Pourcentage de type emboîté	-0.509	Pourcentage de type incisé	0.205
	Pourcentage de type superposé	0.176	Pourcentage de type stable	0.238
Classification AESN	Pourcentage de ZH	-0.181		
Données géomorphologiques	Log(Aire amont)	-0.746	Pourcentage d'ordre1 de Strahler	0.488
	Log(Aire du bassin spécifique)	-0.168	Pourcentage d'ordre2 de Strahler	0.220
	Ordre de Strahler aval	-0.698	Pourcentage d'ordre3 de Strahler	0.112
	Densité de drainage	0.037	Pourcentage d'ordre4 de Strahler	-0.200
	Longueur de la rivière	-0.144	Pourcentage d'ordre5 de Strahler	-0.354
			Pourcentage d'ordre6 de Strahler	-0.323
		Pourcentage d'ordre7 de Strahler	-0.206	
Type de revêtement alluvial	Minéral	-0.433	Substratum	0.126
	Tourbe	0.253	Vallée sèche	0.238
Drainage	Aire drainée dans le corridor	-0.102		
Pédologie	Pourcentage d'argile dans le BV	-0.140	Pourcentage de sable dans le BV	0.043
	Pourcentage de limon dans le BV	-0.042		
Climatologie	Moyenne de la température maximum journalière	-0.210	Précipitations moyennes	-0.026
	Moyenne de la température minimum journalière	-0.136	Précipitations efficaces moyennes	-0.011
	ETP moyenne	-0.061		
Hydrologie	Débit exutoire	-0.414	Débit spécifique	-0.267
	La part du débit superficiel à exutoire	0.613	La part du débit superficiel spécifique	0.472
Physico-chimie de l'eau	Concentration en nitrate	-0.087	Demande biologique en oxygène	0.340
	Température de l'eau	-0.467	Oxygène dissous	-0.020
Paramètres d'entrée des bilans	Cs	0.055	Qsup/Qtot	0.474
	Cb	0.094	Qsout/Qtot	-0.474
	Fsup/Ftot	0.294	Fsout/Ftot	-0.294

2.3.2 Influence du gradient amont-aval

Le taux de rétention dans le cours d'eau et sa zone riveraine est fortement influencée par la position du bassin versant spécifique le long du gradient amont-aval (Figure 8). Les taux de rétention sont beaucoup plus faibles à l'aval qu'à l'amont et ce facteur apparaît comme l'un des principaux facteurs de contrôle de la rétention dans le bassin de la Seine.

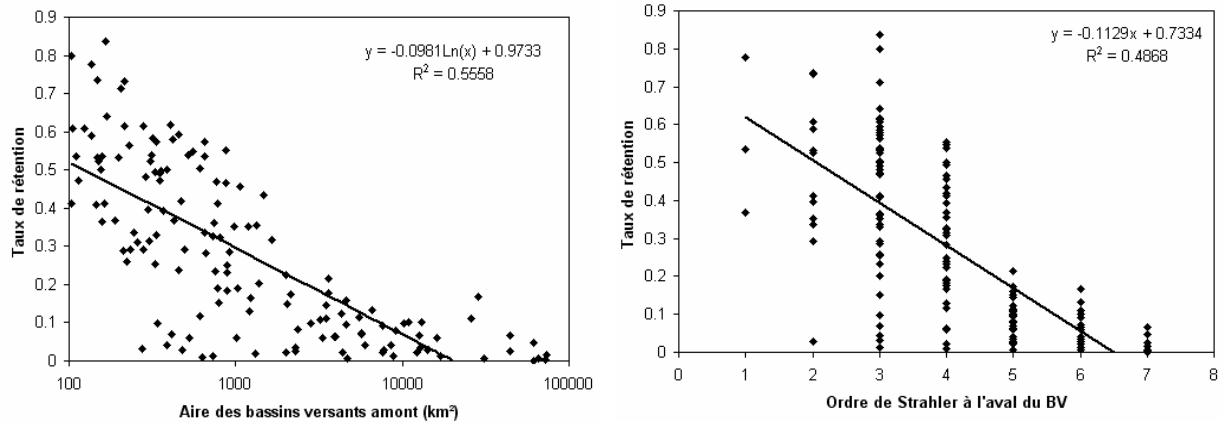


Figure 8 : Taux de rétention en fonction de l'aire des bassins versants amont (à gauche) et taux de rétention en fonction de l'ordre de Strahler à l'aval du bassin versant spécifique (à droite).

Ce résultat est lié à la méthode utilisée pour calculer le taux de rétention. En effet, plus le tronçon est situé en aval, plus les flux en rivière sont importants en comparaison des flux en provenance du bassin versant traversant la zone riveraine. La rétention, riparienne ou in-stream, même si elle est très active au niveau d'un tronçon situé à l'aval ramenée à sa longueur ou sa surface, reste faible par rapport à la totalité du flux d'entrée. De plus, dans le cas de la rétention riparienne, elle ne peut mécaniquement impacter qu'une petite partie de ces flux, ceux qui proviennent du versant local.

Afin de confirmer les résultats de rétention obtenus sur le bassin de la Seine, des tests de sensibilité ont été effectués en faisant varier les quatre principaux paramètres d'entrée de plus 10 % et de moins 10 % (Tableau 2). Quelque soit la configuration considérée, les taux de rétention restent en moyenne positifs sur le bassin de la Seine ce qui indique qu'il existe bien une rétention globale même en admettant des erreurs de 10 % sur les paramètres de calcul. Le minimum est de 0.13 et le maximum de 0.29 et dans ces deux cas extrêmes, la dépendance au gradient amont-aval reste importante.

Tableau 2 : Résultats des tests de sensibilité effectués sur quatre des paramètres d'entrée des bilans de nitrates : la part du débit superficiel (Q_s/Q_{tot}), la concentration sous-racinaire (C_s), la concentration souterraine (C_b) et la concentration en rivière ($Criv$).

Q_s/Q_{tot}	C_s	C_b	$Criv$	R
$Q_s/Q_{tot} + 10\%$	$C_s + 10\%$	$C_b + 10\%$	$Criv + 10\%$	0.2159
			$Criv - 10\%$	0.2874
		$C_b - 10\%$	$Criv + 10\%$	0.1836
			$Criv - 10\%$	0.2592
	$C_s - 10\%$	$C_b + 10\%$	$Criv + 10\%$	0.1757
			$Criv - 10\%$	0.2525
		$C_b - 10\%$	$Criv + 10\%$	0.1387
			$Criv - 10\%$	0.2202
Q_s/Q_{tot} normal	C_s normal	C_b normal	$Criv$ normal	0.2150
$Q_s/Q_{tot} - 10\%$	$C_s + 10\%$	$C_b + 10\%$	$Criv + 10\%$	0.2034
			$Criv - 10\%$	0.2765
		$C_b - 10\%$	$Criv + 10\%$	0.1667
			$Criv - 10\%$	0.2445
	$C_s - 10\%$	$C_b + 10\%$	$Criv + 10\%$	0.1663
			$Criv - 10\%$	0.2442
		$C_b - 10\%$	$Criv + 10\%$	0.1247
			$Criv - 10\%$	0.2080

2.3.3 Influence du revêtement alluvial

Dans les plans factoriels F1 et F2 qui expliquent le maximum de la variance de R, le taux de rétention R_{INTER} forme un très petit angle avec la présence de vallée sèche ($R = 0.238$) et de tourbe ($R = 0.253$), ce qui signifie que la rétention est corrélée avec ces deux variables (Figure 9). En revanche, le revêtement minéral se situe presque à l'opposé du taux R_{INTER} , cela indique qu'il existe une anti-corrélation entre le taux de rétention et ce paramètre ($R = -0.433$). Le revêtement présent dans le corridor alluvial semble donc jouer sur le taux de rétention. Ce résultat est conforme avec le fait la présence de carbone organique est indispensable à la réalisation du processus de dénitrification étant donné que la plupart des bactéries dénitrifiantes sont hétérotrophes. Le carbone organique favorise également le processus de dénitrification en accélérant la respiration aérobie donc l'anoxie (Davidsson and Leonardson, 1996). Les revêtements organiques sont riches en matière organique et peuvent donc favoriser le processus de dénitrification ce qui n'est pas le cas du revêtement minéral.

La présence de vallées sèches semble également favoriser la dénitrification. Ces corridors sont principalement situés en tête de bassin versant et correspondent à des cours d'eau temporaires. Dans ces zones, la dénitrification peut être favorisée par le battement de la nappe qui crée les conditions d'anoxie nécessaire au développement du processus de dénitrification. Ces résultats sont donc concordants avec nos connaissances actuelles sur la dénitrification.

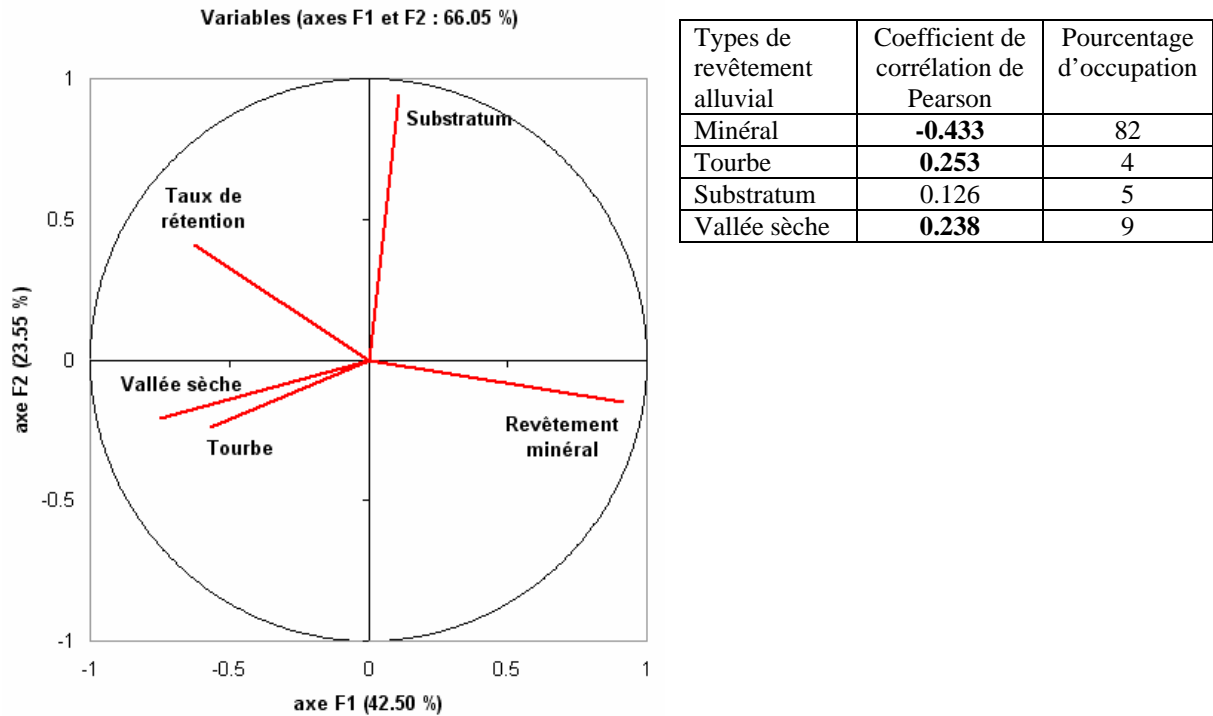


Figure 9 : Représentation du taux de rétention interannuel et des différents types de revêtement alluvial dans le plan des facteurs 1 et 2 (à gauche) et coefficient de corrélation de Pearson entre le taux de rétention et les types de revêtement alluvial (à droite). Les valeurs significatives au seuil alpha égal 0.05 sont ici indiquées en gras (test bilatéral).

2.3.4 Influence de l'occupation du sol

L'occupation du sol dans le corridor alluvial peut avoir une influence sur la rétention des nitrates. En effet, une zone cultivée sera probablement moins efficace en terme de rétention qu'une forêt ou encore une zone marécageuse active à la fois par dénitrification et par assimilation lors de la croissance de la végétation. Cette analyse a été conduite en utilisant les différents types d'occupation du sol de la base de données Corine Landcover dans le corridor alluvial de chacun des bassins spécifiques définis.

Le taux de rétention apparaît corrélé avec la présence de forêt ($R = 0.361$) et anti-corrélé avec le pourcentage de terres arables et de zones urbaines dans le corridor. Ces observations sont en accord avec ce qui était pressenti. En effet, les zones urbaines et agricoles sont davantage susceptibles de relarguer des nitrates (par lessivage des sols après application d'engrais et rejets domestiques) que d'en retenir. A l'inverse des milieux tels que les forêts peuvent faciliter la rétention des nitrates à la fois par dénitrification et par assimilation par la végétation.

Les zones humides sont connues pour être des environnements actifs vis-à-vis de la rétention des nitrates en permettant le développement des conditions nécessaires à la dénitrification. La faible corrélation obtenue entre le taux de rétention et le pourcentage de corridors occupés par des zones humide peut probablement s'expliquer par la très faible surface occupée en moyenne par les zones humides dans les bassins versants étudiés (0.7 %).

La rétention apparaît également assez fortement anti-corrélée avec les surfaces en eau. Ce résultat est assez surprenant et ne correspond pas à nos connaissances actuelles sur ces environnements. En effet, les surfaces en eau, tout comme les forêts et les zones humides sont connues pour avoir tendance à favoriser la rétention des nitrates. Ce résultat est probablement lié au jeu des

inter-corrélations entre les facteurs. En effet, les surfaces en eau sont très fortement corrélées avec l'aire du bassins versant emboîté ($R = 0.654$). Or, le taux de rétention est fortement anti-corrélé avec la taille du bassin versant amont ce qui entraîne une relation inverse avec la surface en eau. Ce résultat met en évidence une limite de la méthode utilisée ici pour déterminer les facteurs de contrôle : les facteurs identifiés ne sont en effet pas forcément indépendants les uns des autres et certaines relations peuvent être biaisées par l'influence d'autres facteurs.

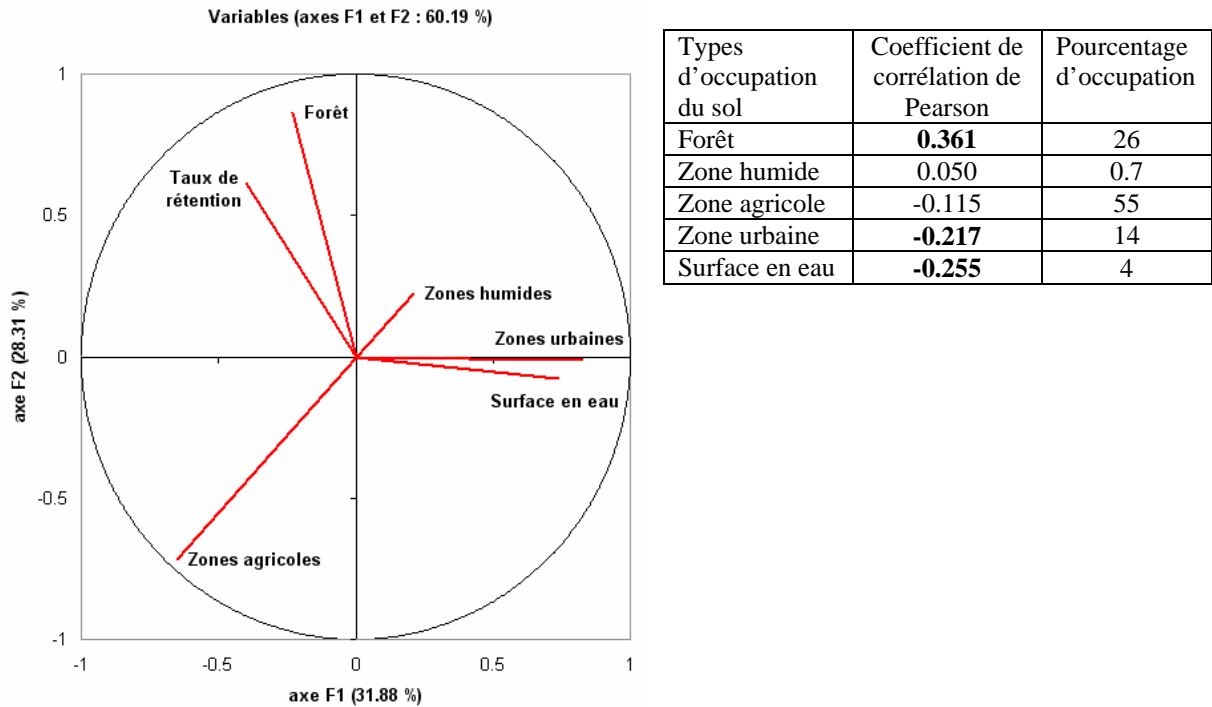


Figure 10 : Représentation du taux de rétention interannuel et des différents types de revêtement alluvial dans le plan des facteurs 1 et 2 (à gauche) et coefficient de corrélation de Pearson entre le taux de rétention et les types de revêtement alluvial (à droite). Les valeurs significatives au seuil alpha égal 0.05 sont ici indiquées en gras (test bilatéral).

2.3.5 Autres facteurs de contrôle

Lors de cette analyse, nous espérons mettre en évidence l'influence d'autres facteurs sur la rétention des nitrates. Par exemple, l'humidité potentielle du sol devrait avoir tendance à favoriser la dénitrification en permettant la mise en place des conditions d'anoxie qui lui sont nécessaire. Les températures élevées quant à elles activent les cinétiques de réaction et favorisent donc également la dénitrification.

Mais ces facteurs locaux sont fortement influencés par leur position le long du gradient amont-aval. La température de l'eau, par exemple, va avoir tendance à augmenter de l'amont vers l'aval avec son temps de séjour à l'air libre. De la même manière, les indices topographiques les plus élevés se trouvent dans la partie du bassin versant la plus aval. En effet, en aval, l'aire du drainage amont et donc la quantité d'eau recueillie y sont plus importants et la pente y est faible donc l'évacuation diminuée. Les corrélations observées entre la rétention et ces deux paramètres sont donc négatives, à l'inverse de ce que l'on attendait.

Le gradient amont-aval mis en évidence a donc tendance à masquer certaines relations entre des facteurs locaux et le taux de rétention. L'analyse des corrélations telle que nous la réalisons semble donc être une limite de la méthode de détermination des facteurs de contrôle.

3. Conclusion

La méthode de calcul utilisée nous a permis de calculer des taux de rétention indépendants les uns des autres. Ces taux de rétention ne concernent pas seulement la zone riveraine mais aussi la rétention ayant lieu dans la colonne d'eau de la rivière. Les valeurs obtenues sont plus faibles que lors de notre précédent travail dans les bassins versants emboîtés. Ceci peut être expliqué par le fait que les zones recevant les plus forts apports ponctuels avaient été exclues lors du précédent calcul. Or, ce sont dans ces zones, se situant en majorité à l'aval du bassin de la Seine, que nous trouvons actuellement les plus faibles taux de rétention.

L'analyse des taux de rétention nous a permis de mettre en évidence une composante saisonnière marquée avec des valeurs plus fortes en été qu'en hiver ainsi qu'une forte dépendance de la rétention au gradient amont-aval avec des valeurs plus variables et plus fortes en amont qu'à l'aval du bassin. Certains facteurs de contrôle locaux sont également fortement influencés par ce gradient amont-aval et cette dépendance masque certaines relations comme c'est le cas pour la température ou l'humidité du sol. Les analyses statistiques nous ont néanmoins permis de mettre en évidence l'influence de l'occupation du sol dans le corridor et du type de revêtement alluvial.

Cette forte dépendance de la rétention au gradient amont-aval empêche de déterminer avec précision des facteurs de contrôle locaux ayant un sens physique et donc de ce fait de créer un indice fonctionnel de la rétention à l'échelle des sous-bassins versants.

Références :

- Billen G, Garnier J. 2000. Nitrogen transfers through the Seine drainage network : a budget based on the application of the RIVERSTRAHLER Model. *Hydrobiologia* **410**: 139-150.
- Billen G, Garnier J, Némery J, Sebilio M, Sferratore A, Barles S, Benoit P, Benoit M. 2007. A longterm view of of nutrient transfers through the Seine river continuum. *Science of the Total Environment* **375**: 80-97.
- Burt T, Pinay G. 2005. Linking hydrology and biogeochemistry in complex landscapes. *Progress in Physical geography* **29**: 297-316.
- Curie F. 2006. Rétention de nitrates dans les zones humides riveraines : rôle des facteurs hydrologiques, géomorphologiques et biogéochimiques. Approche multi échelle dans le Bassin de la Seine. In *UMR Sisyphe*. Université Paris 6: Paris;200 pp.
- Davidsson TE, Leonardson LG. 1996. Effects of nitrate and organic carbon additions on denitrification in two artificially flooded soils. *Ecological Engineering* **7**: 139-149.
- Hattermann FF, Krysanova V, Habeck A, Bronstert A. 2006. Integrating wetlands and riparian zones in river basin modelling. *Ecological Modelling* **199**: 379-392.
- Haycock NE, Pinay G, Walker C. 1993. Nitrogen retention in rivers corridors: European perspective. *Ambio* **22**: 340-346.
- Hill AR. 1996. Nitrate removal in stream riparian zones. *Journal of environmental quality* **25**: 743-755.
- Montreuil O, Mérot P. 2006. Nitrogen removal in valley bottom wetlands: assessment in headwater catchments distributed throughout a large basin. *Journal of environmental quality* **35**: 2113-2122.
- Servais P, Billen G. 2006. Note sur le calcul des apports ponctuels à prendre en compte dans les modèles Prose et Sénèque à partir des données disponibles sur les rejets de STEPs. *Rapport d'activité du programme Piren Seine*: 10 pp.
- Thieu V, Billen G, Silvestre M, Garnier J. 2006. SENEQUE and Co : Développements logiciels et amélioration des outils. *Rapport d'activité du PIREN-Seine*: 10 p.