

Caractérisation de la rétention d'azote dans le bassin de la Seine et détermination des facteurs de contrôle

Florence Curie¹, Agnès Ducharne², Hocine Bendjoudi², Pascal Viennot³ et Christophe Viavattene³

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

² UMR Sisyphé, Jussieu

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

Caractérisation de la rétention d'azote dans le bassin de la Seine et détermination des facteurs de contrôle.....	1
1. Bilans de nitrates dans les zones humides riveraines	2
1.1. Principe général.....	2
1.2. Estimation d'un taux de rétention.....	3
2. Comparaison des données disponibles sur le bassin de la Seine	4
2.1. Concentrations sous-racinaires	4
2.2. Concentrations souterraines.....	5
2.3. Débits sous-racinaires et souterrains	6
2.4. Conclusion.....	7
3. Calcul des taux de rétention	8
3.1. Choix des bassins versants	8
3.2. Taux de rétention calculés	9
3.2.1 Taux de rétention R_{QBH}	10
3.2.2 Taux de rétention R_{QMOD}	11
3.2.3 Taux de rétention R_{Q0}	11
3.3. Comparaison des taux de rétention obtenus avec les différents types de bilans	12
3.4. Conclusion.....	12
4. Résultats	12
4.1. Etude de la variabilité saisonnière.....	12
4.2. Etude de la variabilité spatiale.....	13
4.3. Croisement des taux de rétention avec différents facteurs de contrôle potentiels	14
4.3.1 Les paramètres physico-chimiques.....	14
4.3.2 L'occupation du sol	16
4.3.3 Paramètres géomorphologiques.....	18
4.3.4 Les indices topographiques	20
4.4. Vers un indice fonctionnel	20
5. Conclusions et perspectives.....	22
6. Références	22

Notre objectif est de caractériser la rétention d'azote dans les zones humides riveraines à l'échelle la plus fine possible dans un grand bassin versant d'échelle régionale, le bassin de la Seine. Pour répondre à cet objectif, nous avons choisi de réaliser des bilans de nitrate dans des bassins versants de différentes tailles emboîtés les uns dans les autres. Ces bilans devraient nous permettre, dans un premier temps, d'obtenir une représentation spatiale de la rétention d'azote sur l'ensemble du bassin de la Seine puis dans un second temps d'appréhender les facteurs contrôlant la rétention d'azote à l'échelle de sous-bassins versants. Cette étape d'identification des facteurs de contrôle constitue une première approche de typologie fonctionnelle sur le bassin de la Seine.

1. Bilans de nitrates dans les zones humides riveraines

1.1. Principe général

Afin de caractériser la rétention d'azote par les zones humides riveraines, nous avons choisi de réaliser des bilans dont le principe consiste à étudier les variations du stock de nitrates dans ces milieux au cours du temps :

$$\frac{\Delta S_{NO_3}}{\Delta T} = I_{NO_3} - O_{NO_3} \quad (1)$$

Avec : ΔS_{NO_3} = variations du stock du nitrate dans la zone humide

ΔT = incrément de temps

I_{NO_3} = flux de NO_3^- entrant dans la zone humide riveraine pendant ΔT

O_{NO_3} = flux de NO_3^- sortant de la zone humide riveraine pendant ΔT

Pour réaliser les calculs de bilan dans la zone humide, il est nécessaire de connaître le flux de nitrate sortant de la zone humide, or nous ne disposons pas de telles informations. Les données auxquelles nous avons accès sont les concentrations et les débits mesurés en rivière. Ces mesures étant intégratives de l'ensemble des processus ayant lieu en amont du point de mesure, nous avons du réaliser des bilans pour les zones humides de l'ensemble du bassin versant contributif à la station de mesure.

Lors de cette étude, nous avons considéré que le flux de nitrate en entrée de 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.

Les apports ponctuels liés aux rejets domestiques et industriels non pas été directement pris en compte dans les bilans. Cependant, pour éviter des sous-estimations des flux de nitrate entrant dans la zone humide riveraine les bassins recevant des apports ponctuels trop important ont été éliminés (cf partie 3).

En ce qui concerne la restitution et la rétention des nitrates par la végétation, bien que les flux se compensent au pas de temps annuel, ils peuvent avoir une grande importance au niveau saisonnier. La rétention des nitrates par la végétation a lieu durant la période estivale, tout comme la dénitrification tandis que la restitution des nitrates par la végétation se produit en période automnale. La prise en compte de ces flux liés à la végétation dépendra donc du pas de temps considéré pour réaliser les bilans de nitrates.

Trois pas de temps ont été considérés pour le calcul des bilans de nitrate : le pas de temps estival, le pas de temps annuel et le pas de temps interannuel.

(1) le pas de temps annuel et (2) le pas de temps interannuel : A ces pas de temps (et tout particulièrement au pas de temps interannuel), on peut considérer que l'écosystème riverain est à l'équilibre et donc de ce fait que le stock de azote sous forme de nitrate dans la zone humide riveraine peut être négligé. En effet, dans ce cas, on peut faire l'hypothèse que l'assimilation et la restitution par la végétation se compensent, cette hypothèse reste vraie à partir du moment où il n'y a pas d'exportation de la matière organique (par récolte). La rétention de nitrate par la zone humide riveraine correspond alors à la dénitrification et le bilan peut être noté :

$$F_{BV} - F_{RIV} = F_{DEN} \quad (2)$$

avec : F_{BV} = flux en provenance du bassin versant par écoulement souterrain et superficiel

F_{RIV} = flux de la zone humide vers la rivière

F_{DEN} = flux lié à la dénitrification

- (3) le pas de temps estival : à ce pas de temps, le stockage de nitrate dans la zone humide ne peut pas être négligé. Cependant, on peut faire comme hypothèse que la restitution par la végétation est faible et en tout cas inférieure à l'assimilation par la végétation. La somme des flux liés à la végétation (assimilation et restitution) est donc un flux sortant. Dans ce cas, les bilans permettent de caractériser la rétention totale (assimilation et dénitrification) et peuvent être notés :

$$F_{BV} - F_{RIV} = F_{DEN} + F_{ASS} - F_{RES} \quad (3)$$

avec : F_{ASS} = flux d'assimilation par la végétation

F_{RES} = flux de restitution par la végétation

1.2. Estimation d'un taux de rétention

Pour chacun des pas de temps considéré, le rapport entre le flux en rivière (F_{RIV}) et celui provenant du bassin versant amont avant transit par les zones humides (F_{BV}) permet donc d'estimer un taux de rétention de nitrate (R) dans la zone humide riveraine du bassin versant considéré :

$$R = \frac{F_{BV} - F_{RIV}}{F_{BV}} = 1 - \left(\frac{F_{RIV}}{F_{BV}} \right) = 1 - \left(\frac{Q_{RIV} \times C_{RIV}}{Q_{BV} \times C_{BV}} \right) \quad (4)$$

Ce taux de rétention estimé est égal à 1 lorsque la rétention est totale, à 0 quand elle est absente et peut être négatif lorsque la zone humide exporte des nitrates.

Pour réaliser ces bilans, il va donc falloir estimer le plus finement possible :

- la concentration en rivière (C_{RIV})
- la concentration en provenance du bassin versant (C_{BV}) qui dépend de la concentration sous-racinaire (C_S), du débit sous-racinaire (Q_S), de la concentration souterraine (C_B) et du débit souterrain (Q_B) :

$$C_{BV} = (C_S * Q_S + C_B * Q_B) / (Q_S + Q_B) \quad (5)$$

2. Comparaison des données disponibles sur le bassin de la Seine

Différents types de données peuvent être utilisées pour le calcul des bilans de nitrates (**Tableau 1**). Ces données peuvent être divisées en deux parties, d'un côté les données mesurées ou cartographiques et de l'autre les sorties d'un modèle permettant de simuler l'hydrodynamique et la contamination nitrique du bassin de la Seine, le modèle STICS MODCOU NEWSAM (Brisson et al., 2003; Ledoux, 1980; Ledoux et al., 1989). Les données mesurées présentent l'inconvénient de ne pas être spatialisées sur l'ensemble du bassin de la Seine et sont fournies à des pas de temps variables. Les données mesurées devront donc être interpolées pour réaliser les calculs de bilans de nitrates. Le modèle numérique spatialisé MODCOU/STICS permet quant à lui d'obtenir une couverture spatiale et temporelle exhaustive mais ces données sont des simulations calibrées pour reproduire localement les observations et constituent donc une forme d'interpolation.

Tableau 1 : Résumé des différentes données sources utilisées en entrée des bilans

	Données estimées	Données simulées
Criv	Données RNB	
Qb	Banque HYDRO	MODCOU
Qs	Banque HYDRO	MODCOU
Cb	Données RNDE	MODCOU / STICS
Cs	Corine Landcover	MODCOU / STICS

2.1. Concentrations sous-racinaires

La **Figure 1** présente les deux types de données de concentration de surface disponible sur le bassin de la Seine : d'un côté les concentrations simulées par le modèle MODCOU/STICS et de l'autre les concentrations estimées à partir de l'occupation du sol en affectant une valeur de concentration moyenne annuelle en nitrate à chacun des types d'usage du sol (Billen and Garnier, 2000) à partir de la base de données Corine Landcover (IFEN, 1994). Les concentrations de surface simulées par MODCOU/STICS sont celles obtenues à partir de 12 zones agricoles prenant en compte les pratiques agricoles de 1990 à 2000. Les nouvelles simulations basées sur les petites régions agricoles (PRA) et considérant les pratiques agricoles de 1970 à 2000 n'ont pas été utilisées lors de ce travail.

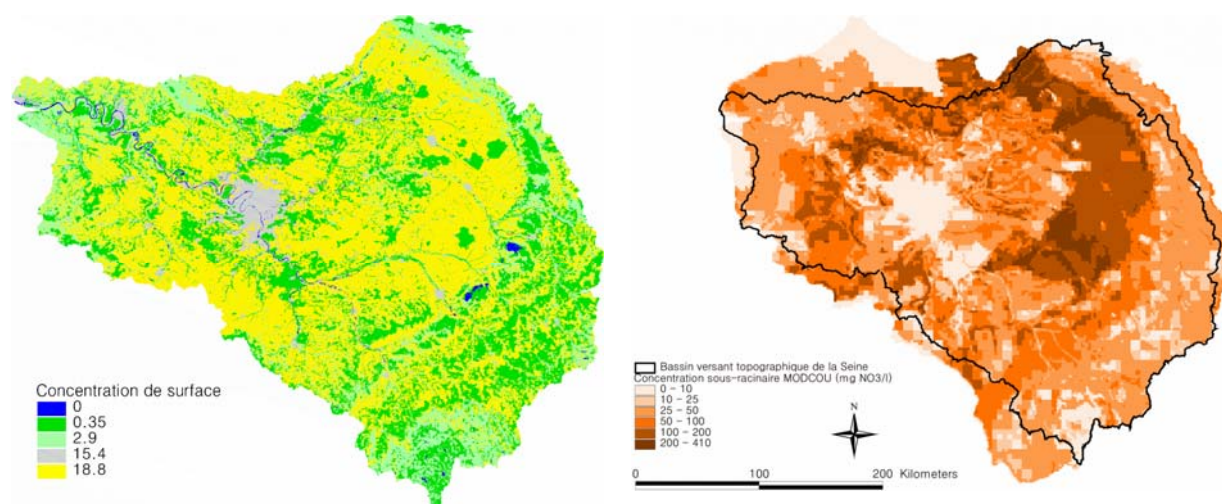


Figure 1 : Résultats de l'estimation des concentrations de surface en mgN/l à partir de la base de données Corine Land Cover (1987-1994) dans le bassin versant topographique de la Seine (à gauche) Concentrations sous-racinaires en nitrate simulées par le modèle STICS-MODCOU-NEWSAM en mg NO₃/l pour l'année 1996 (à droite).

Il est délicat d'appréhender les concentrations sous-racinaires en nitrates. Les seules mesures dont on dispose sont celles effectuées grâce à des bougies poreuses. Ces mesures ne peuvent être que

ponctuelles et localisées. Il n'est donc pas possible de vérifier la représentativité des cartes obtenues aussi bien pour les estimations à partir de l'occupation du sol que pour les sorties du modèle STICS.

Nous avons comparé les deux sources de concentrations sous-racinaires afin de tester leur cohérence (**Figure 2**). On remarque de grandes différences de concentrations de surface en particulier au niveau de l'auréole de la Craie (zone agricole de la Champagne crayeuse) où les concentrations sous-racinaires de MODCOU sont beaucoup plus fortes que celles estimées à partir de l'occupation du sol. A l'inverse les concentrations dans la région parisienne au centre de la carte sont moins fortes pour MODCOU qu'avec les estimations établies à partir de la végétation.

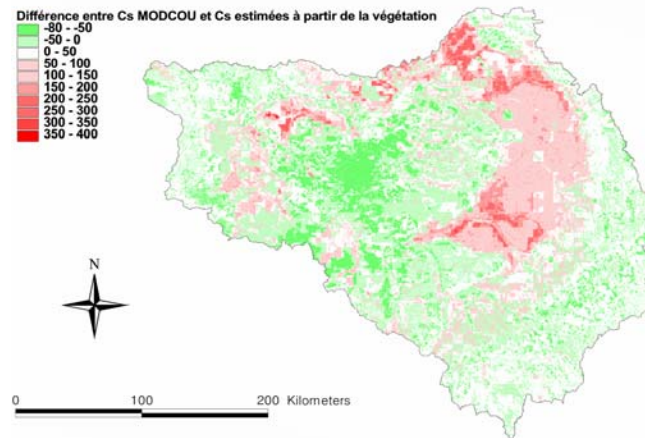


Figure 2 : Carte des différences entre les concentrations de surface MODCOU (1996) et celles estimées à partir de l'occupation du sol (1987-1994) en $\text{mg NO}_3/\text{l}$ ($C_{\text{MODCOU}} - C_{\text{OCCUPATION DU SOL}}$)

2.2. Concentrations souterraines

La concentration de base (C_b) peut être fournie par le modèle MODCOU-STICS ou déterminée à partir des concentrations souterraines de la base de données RNDE. Nous avons utilisé les résultats obtenus lors de la campagne de mesure de 1997-1998. Les concentrations souterraines moyennes en nitrate ont été interpolées sur l'ensemble du bassin de la Seine par la méthode IDW (Inverse Distance Weight) (**Figure 3**). Sur cette figure, on remarque que la distribution des points n'est pas homogène sur l'ensemble du bassin versant, la partie nord en particulier ne présente aucun point de mesure. Cette zone n'est donc pas fiable en matière de concentration souterraine.

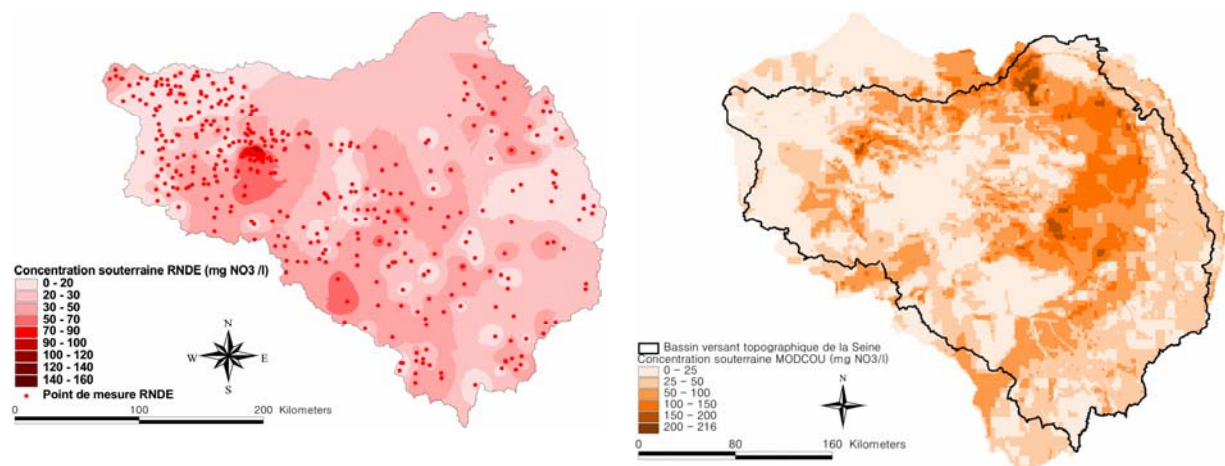


Figure 3 : Concentrations de base en $\text{mg NO}_3/\text{l}$ pour l'année 1997-1998 dans le bassin versant topographique de la Seine (à gauche) Carte des concentrations souterraines en $\text{mg NO}_3/\text{l}$ sur le bassin de la Seine simulées par STICS-MODCOU-NEWSAM pour l'année 1996 (à droite).

Comme pour la concentration sous-racinaire précédemment, la concentration souterraine montre des valeurs nettement surestimées au niveau de la région de la Champagne Crayeuse (**Figure 4**). Ces fortes valeurs découlent des fortes valeurs de concentrations sous-racinaires injectées dans le modèle pour cette zone.

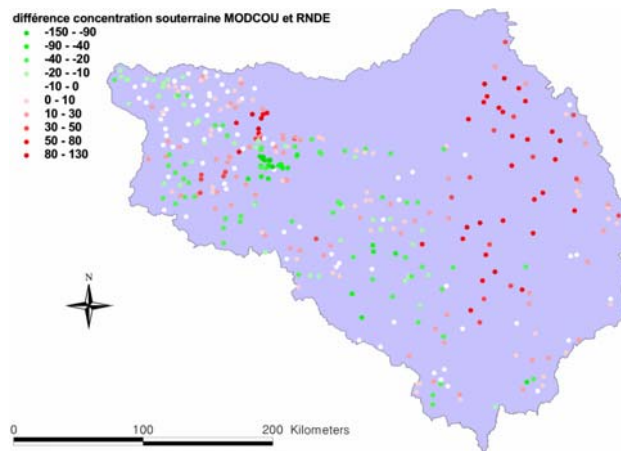


Figure 4 : Différence entre les concentrations souterraines calculées par le modèle MODCOU et celles mesurées (Base de données RNDE 1997-1998)

2.3. Débits sous-racinaires et souterrains

Une première méthode pour déterminer les débits sous-racinaires et souterrains consiste à utiliser les débits mesurés en rivière au niveau des stations de la banque HYDRO. Les stations RNB et les stations de la banque HYDRO ne coïncident pas forcément et pour faire des bilans à l'amont des stations RNB, nous avons donc dû recalculer les débits en chaque station RNB. Pour réaliser ces calculs, nous avons utilisé les stations de débit voisines (Banque HYDRO) en interpolant les débits en fonction de la superficie des bassins versants. Une fois les débits estimés au niveau des stations RNB, ceux-ci doivent être séparés en écoulement de base et écoulement superficiel. Cette séparation a été réalisée en prenant en compte la géologie du bassin versant et la saison. Cette séparation offre des performances satisfaisantes dans le bassin de la Seine en dépit de sa simplicité (Bacq and Billen, 2003; Curie, 2006).

Une autre solution pour appréhender les débits souterrains et sous-racinaires consiste à utiliser les sorties du modèle STICS-MODCOU qui sont des écoulements spatialisés sur les différentes mailles du domaine de surface et des 3 aquifères du domaine souterrain (Ledoux et al., 1989).

Pour évaluer la qualité des écoulements simulés par MODCOU, nous avons procédé à la comparaison entre les débits totaux calculés à partir des sorties de MODCOU avec les débits réels mesurés en chacune des stations de la Banque HYDRO.

Les écoulements simulés à partir des sorties MODCOU ne sont pas en parfaite adéquation avec les débits mesurés en rivière (**Tableau 2**). Le critère de Nash moyen est inférieur à 0.7 et la valeur de RMSE n'est pas très proche de 0. Les biais moyen et biais relatif moyen positifs indiquent que le modèle a tendance à surestimer de manière générale les valeurs de débits. Une partie de cet écart entre les simulations et les observations peut être imputée au fait que les débits reconstitués à partir des écoulements de MODCOU sont différents des débits directement simulés dans le modèle MODCOU, qui intègrent les transformations de l'hydrogramme dans le réseau hydrographique et sont nécessairement de meilleure qualité.

Tableau 2 : Valeurs minimums, maximums, moyennes et écart type des différents critères calculés pour caractériser les différences entre les débits simulés et les débits observés au niveau des stations de la banque HYDRO.

	Nash (-)	RMSE (m3/s)	Biais (m3/s)	Biais relatif (%)
Valeur minimum	-1.67	0.12	-7.60	-91.5
Valeur maximum	0.87	252.28	53.24	328.8
Moyenne	0.49	8.54	1.12	7
Ecart type	0.37	25.38	6.72	51

2.4. Conclusion

Toutes les données d'entrée utilisées (concentrations sous-racinaire et souterraine, débits sous-racinaires et souterrains et concentrations en rivière) pour les calculs des taux de rétention de nitrates dans les ZHR présentent des erreurs plus ou moins importantes qu'il est généralement difficile d'estimer. Ceci constitue une limite très forte de notre approche, car les incertitudes se reportent évidemment sur les taux de rétention que nous pouvons calculer à partir de ces différents paramètres, et pénalisent fortement l'analyse des relations entre ces taux de rétention et leurs possibles facteurs de contrôle.

En ce qui concerne les débits, même en utilisant des débits réels mesurés en rivière, la phase de recalcul des débits au niveau des stations RNB, lorsque les stations RNB ne sont pas situées au même endroit que les stations HYDRO, peut introduire des erreurs. Ces débits recalculés doivent ensuite être séparés en écoulement de surface et écoulement souterrain. Cette phase de séparation est également potentiellement à l'origine d'erreur et est réalisée selon une méthode très simple. Les débits fournis par MODCOU ne sont également pas parfaits, mais présentent cependant deux avantages : (1) la séparation des écoulements superficiels et souterrains est réalisée sur de meilleures bases physiques prenant en compte la lithologie mais aussi, la végétation et la météo, (2) il existe une cohérence spatiale dans les données simulées qui pourrait permettre de désagréger les bassins versants emboîtés en bassins versants indépendants afin d'affiner l'analyse fonctionnelle. La comparaison entre les débits simulés par MODCOU et les débits mesurés en rivière montre une certaine corrélation même si des erreurs persistent localement. Ces deux sources d'information ont donc été retenues pour estimer par la suite les taux de rétention.

En ce qui concerne les concentrations souterraines, les concentrations simulées par MODCOU montrent de grandes différences par rapport aux concentrations mesurées. Cette constatation est particulièrement vraie au niveau de la zone de la Champagne Crayeuse où les concentrations MODCOU sont fortement surestimées. Les concentrations estimées à partir des données RNDE semblent donc plus fiables même si ce sont des données ponctuelles qu'il nous a fallu interpoler pour obtenir des données sur l'ensemble du bassin de la Seine. Ce sont ces concentrations qui ont été retenues pour estimer les taux de rétention.

La qualité des concentrations sous-racinaires générées à partir de l'occupation des sols et par le modèle MODCOU-STICS est très difficile à évaluer à l'heure actuelle, aucune carte de ces concentrations n'ayant été réalisées pour le moment à partir d'observations. Les deux estimations que nous avons réalisées sont très différentes, en particulier au niveau de la Champagne Crayeuse, où les concentrations sous-racinaires de MODCOU sont beaucoup plus fortes que les estimations à partir de l'occupation des sols. Comme l'analyse précédente indique que les concentrations souterraines simulées par MODCOU sont fortement surestimées dans cette région, on peut supposer que les concentrations sous-racinaires de MODCOU le sont aussi. Les différences étant beaucoup plus faibles entre les deux estimations dans les autres zones du bassin versant, ce sont donc les concentrations sous-racinaires estimées à partir de l'occupation des sols qui ont été retenues pour estimer les taux de rétention des nitrates par les zones humides riveraines.

3. Calcul des taux de rétention

3.1. Choix des bassins versants

Il nous reste, pour effectuer les calculs de taux de rétention, à choisir la dernière donnée indispensable à ces calculs, la concentration en rivière. Les concentrations mesurées en rivière au niveau des stations RNB donnent une information intégrative de l'ensemble des processus ayant lieu dans les zones humides riveraines situées en amont du point de prélèvement. Nous avons donc commencé par définir les bassins versants correspondants à chacune des stations RNB. Nous avons ensuite sélectionné les bassins présentant au moins 6 mesures de nitrates par an sur au moins 2 ans pour la période 1990 à 2000, ce qui correspond à 311 stations de mesures. Nous avons ensuite exclu les bassins versants recevant ponctuellement plus de l'équivalent de 20 hab/ km² (ce qui correspond à 200 g de Matière azotée par jour et par km²) à partir des données des rejets de stations d'épuration afin d'éliminer les problèmes liés à des rejets ponctuels trop importants. A ce stade, il reste alors 217 stations réparties de façon assez homogène sur le bassin de la Seine (**Figure 5**), seuls les cours aval de la Seine et de l'Oise ne présentent pas de stations RNB sélectionnées du fait des forts rejets ponctuels reçus dans ces zones. Nous avons enfin exclu les bassins versants situés dans la partie nord du bassin de la Seine (BV Oise), la base RNDE ne présentant pas de valeurs de concentrations souterraines dans cette zone. Au final il reste 172 stations.

Les très grands bassins versants ne sont pas pris en compte dans cette étude à cause des apports ponctuels. Parmi les bassins versants sélectionnés, 86 % ont une taille inférieure à 5000 km².

Les taux de rétention étant calculés sur un grand nombre de stations, il est possible de réaliser des tests statistiques sur les données. Cependant, les bassins versants considérés étant emboîtés les uns dans les autres, les taux de rétention calculés ne sont donc pas complètement indépendants, certains des bassins versants définis intégrant d'autres bassins versants plus petits. En effet, 38% des bassins sélectionnés sont des têtes de bassin, 16% contiennent un autre bassin versant et 46% en contiennent plus d'un.

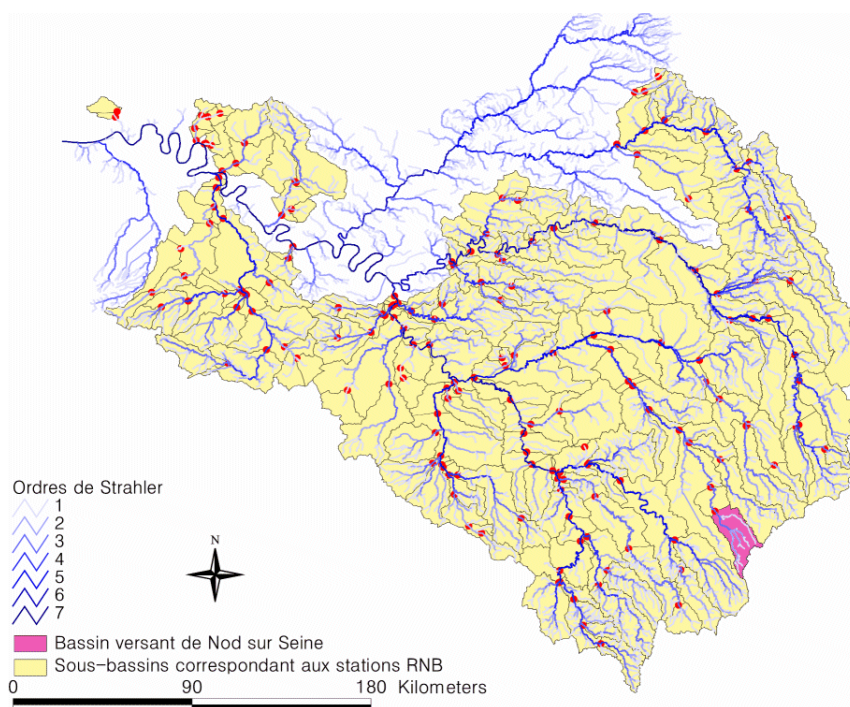


Figure 5 : Stations RNB et bassins versants associés présentant plus de 6 valeurs de teneurs en nitrate par an pour au moins 2 ans sur la période 1990 à 2000 et recevant moins de l'équivalent de 20 habitants par km² (172 stations).

3.2. Taux de rétention calculés

Après avoir comparé les différentes données sources permettant d'estimer Cb, Cs, Qs et Qb, les données de concentrations simulées par le modèle MODCOU n'ont pas été retenues pour les calculs de taux de rétention. Les données qui vont être utilisées par la suite sont récapitulées dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Données retenues pour les calculs de taux de rétention

	Données estimées	Données simulées
Criv	Données RNB	
Qb	Banque HYDRO	MODCOU
Qs	Banque HYDRO	MODCOU
Cb	Données RNDE	
Cs	Corine Landcover	

Nous avons choisi d'effectuer à partir de ces données trois calculs différents de taux de rétention :

- (1) sur l'ensemble de l'année à partir des débits de la banque HYDRO, des données RNDE et de Corine Landcover (Q_{BH})
- (2) sur l'ensemble de l'année à partir des données de débits MODCOU, des données RNDE et de Corine Landcover (Q_{MOD})
- (3) en période d'étiage à partir des seules données RNDE (Q_0)

et cela à chaque fois sur trois périodes de temps différentes :

- (1) pour une année sèche : l'année civile 1996 (R_{SEC})
- (2) pour une année humide : l'année civile 2000 (R_{HUM})
- (3) pour la période 1991 à 2000 (années civiles) ce qui représente 10 années complètes de mesures : interannuel (R_{INTER})

Nous avons effectué, au total, 9 calculs différents de taux de rétention synthétisés dans le **Tableau 4**. Les taux de rétention Q_{BH} et Q_{MOD} permettent d'accéder à la dénitrification puisque la rétention et la restitution par la végétation se compensent à l'échelle annuelle. Le taux Q_0 renseigne quant à lui sur la rétention totale à la fois par la végétation et par la dénitrification.

Tableau 4 : Caractéristiques des différents taux de rétention calculés sur le bassin de la Seine.

Pas de temps de calcul	Origine des débits	Période de calcul	Taux calculé
Estival	X	1996	$R_{Q_0, SEC}$
		2000	$R_{Q_0, HUM}$
		1991-2000	$R_{Q_0, INTER}$
Annuel	↗ Séparation des Q de la Banque Hydro	1996	$R_{Q_{BH}, SEC}$
		2000	$R_{Q_{BH}, HUM}$
		1991-2000	$R_{Q_{BH}, INTER}$
	↘ MODCOU	1996	$R_{Q_{MOD}, SEC}$
		2000	$R_{Q_{MOD}, HUM}$
		1991-2000	$R_{Q_{MOD}, INTER}$

Pour tous les bilans à tous les pas de temps, nous avons utilisé les concentrations souterraines RNDE obtenues lors de la campagne de mesure de 1997-1998. Les concentrations sous-racinaires

utilisées sont celles déterminées à partir de l'occupation du sol de la première version de Corine Landcover.

3.2.1 Taux de rétention R_{QBH}

Les débits utilisés sont ceux de la Banque HYDRO, recalculés en chaque station RNB puis séparés selon la méthode empirique évoquée précédemment. Les débits souterrains (Q_b) et sous-racinaires (Q_s) calculés au pas de temps décadaire sont ensuite moyennés sur les trois périodes de temps définies précédemment ($INTER$, SEC , HUM).

La concentration souterraine est obtenue en réalisant la moyenne des concentrations interpolées par méthode IDW à partir des données RNDE pour chacun des bassins versants contributifs des stations RNB. La concentration de surface en nitrate (C_s) est obtenue en réalisant la moyenne des concentrations au prorata des surfaces occupées par les différents types d'occupation du sol dans les bassins versants amonts contributifs des stations RNB.

Les concentrations souterraines et sous-racinaires étant des valeurs moyennes utilisées pour tous les pas de temps (R_{INTER} , R_{SEC} , R_{HUM}) sur lesquels sont calculés les taux de rétention, nous avons déterminé le flux moyen en provenance du bassin versant (F_{BV}) pour chaque période de calcul en multipliant ces concentrations moyennes aux débits souterrains et sous-racinaires moyens correspondant aux différentes périodes de calcul.

Les mesures de la concentration en rivière aux stations RNB sont ponctuelles. Afin de pouvoir disposer de mesures continues pour les différentes périodes sur lesquelles sont calculées les taux de rétention, nous avons choisi de réaliser une interpolation en créneau des valeurs de concentration. La **Figure 6** montre le résultat de cette interpolation pour l'année 1996 à la station de Nod sur Seine.

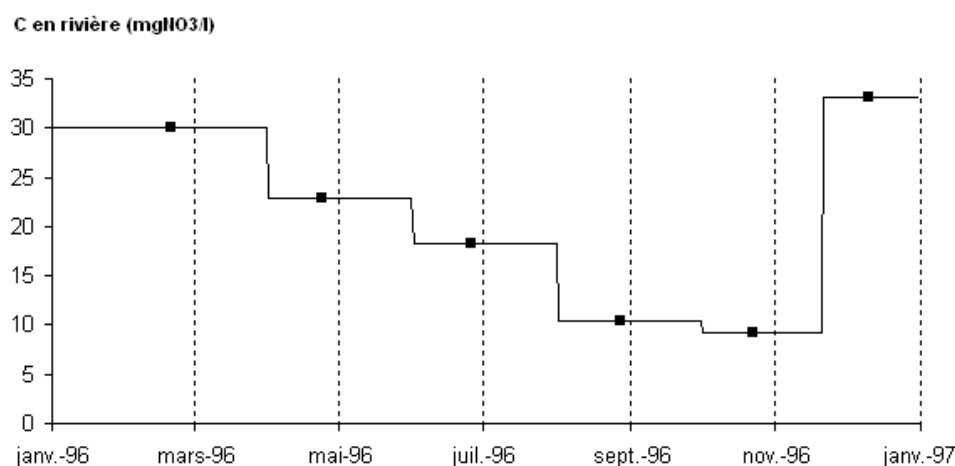


Figure 6 : Interpolation des concentrations mesurées en rivière pour l'année 1996 à la station de Nod sur Seine.

Les concentrations en rivière étant variables dans le temps, le flux en rivière a été calculé pour chaque décade en multipliant la concentration en rivière interpolée par le débit mesuré en rivière. Nous avons ensuite procédé à la moyenne de ces flux sur les différents pas de temps sélectionnés afin d'obtenir le flux moyen en rivière (F_{RIV}).

Le taux de rétention est ensuite obtenu en appliquant la formule suivante :

$$R = 1 - \left(\frac{F_{RIV}}{F_{BV}} \right) \quad (6)$$

où F_{RIV} = flux moyen en rivière sur la période de calcul

F_{BV} = flux moyen en provenance du bassin versant sur la période de calcul.

3.2.2 Taux de rétention R_{QMOD}

Les écoulements sont fournis par le modèle STICS-MODCOU-NEWSAM en chaque maille du modèle MODCOU. Afin de conserver les avantages de cette spatialisation des écoulements, les concentrations souterraines interpolées à partir des données RNDE et sous-racinaires obtenus à partir des données d'occupation du sol de Corine Landcover ont été recalculés sur le maillage du modèle MODCOU.

Les flux de nitrate en chaque maille du modèle MODCOU et pour chaque décade ont été calculés de la manière suivante :

$$F = C_b * Q_b + C_s * Q_s \quad (7)$$

On réalise ensuite la somme de ces flux calculés en chaque maille au prorata des surfaces de mailles comprises dans le bassin versant contributif à la station RNB pour connaître le flux en provenance du bassin versant au pas de temps décadaire. Puis on calcule la moyenne de ces flux sur les 3 périodes de temps définies précédemment ($INTER$, SEC , HUM).

De la même façon que précédemment, les concentrations mesurées en rivière ont été interpolées en créneau afin de pouvoir calculer un flux en rivière (**Figure 6**). Le débit total par décade 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 décade les concentrations en rivière et les débits totaux calculés. Le flux moyen en rivière est enfin obtenu en moyennant la somme de ces flux décadaires pour les 3 périodes de temps sur lesquelles sont réalisées les calculs de taux de rétention ($INTER$, SEC , HUM).

Les taux de rétention sont ensuite obtenus de la même manière que pour le taux précédent à partir des flux moyens en rivière et des flux moyens en provenance du bassin versant.

3.2.3 Taux de rétention R_{Q0}

En période d'étiage soutenu, l'écoulement superficiel peut être négligé devant l'écoulement souterrain. Dans ce cas, le débit total est égal au débit de base et les débits peuvent alors être éliminés des équations. La concentration en provenance du bassin versant est alors égale à la concentration souterraine. Les écoulements n'étant pas pris en compte nous avons considéré que la concentration en rivière pouvait être directement moyennée sur la période d'étiage que nous avons choisi comme allant du 180^{ème} jour de l'année (29 juin) au 270^{ème} (29 septembre).

Le taux de rétention est alors calculé de la manière suivante pour les 3 périodes de temps sélectionnés précédemment ($INTER$, SEC , HUM) :

$$R = 1 - \frac{\overline{C_{RIV}}}{C_b} \quad (8)$$

Avec : $\overline{C_{RIV}}$: Moyenne des concentrations mesurées en rivière entre le 180^{ème} jour de l'année (29 juin) et le 270^{ème} (29 septembre) pour chacune des stations RNB

C_b : concentration souterraine obtenue en réalisant la moyenne des concentrations interpolées par méthode IDW à partir des données RNDE (cf partie **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) pour chacun des bassins versants contributifs des stations RNB.

Nous avons procédé à ces bilans afin de limiter les sources possibles d'erreur sur les données d'entrée. En effet, le calcul du taux de rétention estival permet de s'affranchir des écoulements et peut donc être réalisé en ne prenant en compte que la concentration souterraine pour laquelle nous disposons de données mesurées qui, même si elles sont interpolées, semblent moins entachées d'erreur que les autres. Néanmoins, ce taux de rétention présente l'inconvénient de ne pas pouvoir dissocier la rétention due à la croissance végétale et celle attribuable à la dénitrification.

3.3. Comparaison des taux de rétention obtenus avec les différents types de bilans

Tableau 5 : Valeurs statistiques calculées pour les 3 types de taux de rétention (R_{QBH} , R_{QMOD} et R_{Q0}) pour les 3 périodes ($INTER$, SEC et HUM) sur les 172 stations sélectionnées.

taux de rétention		Moyenne	Ecart type	Maximum	Minimum
R_{QBH}	$INTER$	0.37	0.17	0.79	-0.06
	SEC	0.37	0.20	0.80	-0.25
	HUM	0.34	0.20	0.80	-0.50
R_{QMOD}	$INTER$	0.41	0.16	0.79	-0.06
	SEC	0.41	0.20	0.80	-0.25
	HUM	0.41	0.17	0.85	-0.10
R_{Q0}	$INTER$	0.47	0.26	0.92	-0.34
	SEC	0.51	0.27	0.98	-0.50
	HUM	0.36	0.42	0.89	-0.57

Les moyennes des différents taux de rétention calculés sont toutes du même ordre de grandeur et supérieures à 0 ce qui indique qu'il existe bien une rétention globale dans les bassins versants étudiés. Cette rétention est comparable à celle précédemment évaluée par modélisation sur le bassin de la Seine avec des taux de 47,5 % pour la Seine amont, 55% pour la Marne et 28% pour l'Eure en 1990 et 1995 par Billen et al. (2001).

On remarque que la moyenne des taux de rétention calculés en période d'étiage (R_{Q0}) pour la période interannuelle ($INTER$) et pour l'année sèche (SEC) est légèrement plus élevée que les autres moyennes des autres taux de rétention. Cette tendance tendrait à montrer que prélèvement par la végétation vient s'ajouter à la dénitrification lorsque les calculs des taux de rétention sont effectués en période estivale ce qui n'est pas le cas lorsque les taux de rétention sont calculés sur une année complète, l'assimilation et la restitution par la végétation se compensant.

On peut également remarquer que les moyennes des taux de rétention pour l'année sèche (SEC) sont plus élevées que pour l'année humide (HUM) pour les taux de rétention calculés en étiage (R_{Q0}) et pour les taux calculés avec les débits de la banque HYDRO (R_{QBH}). Toutes les valeurs minimum des taux de rétention calculées sont négatives, ceci peut être du soit à un relargage de nitrate soit à une mauvaise estimation des entrées d'azote dans la zone humide.

3.4. Conclusion

Lors du croisement avec les facteurs susceptibles de contrôler la rétention, les taux mesurés sur l'année humide (HUM) et l'année sèche (SEC) ne seront pas pris en compte. En effet, le stockage dans la zone humide riveraine ne peut pas réellement être négligé pour ces taux de rétention, et on préférera donc des taux calculés en interannuel pour lesquels le stockage en zone humide n'intervient pas et qui ont en principe une meilleure représentativité sur le long terme puisque la source de bruit liée à la variabilité climatique est supprimée.

4. Résultats

4.1. Etude de la variabilité saisonnière

Afin de pouvoir étudier la variabilité saisonnière, nous avons du procédé à des calculs de taux de rétention au pas temps décadaire. Les données et le principe sont exactement les mêmes que pour les calculs de R_{QBH} à ceci près que nous n'avons pas réalisé la moyenne des flux en rivière et des flux en provenance du bassin versant sur l'année et que ce sont les flux décadaires qui ont servi au calcul de taux de rétention décadaire.

La **Figure 7** présente l'évolution des taux de rétention décadaire calculés selon le principe de Q_{BH} pour l'année civile 1996 et l'année 2000 à la station de Nod sur Seine.

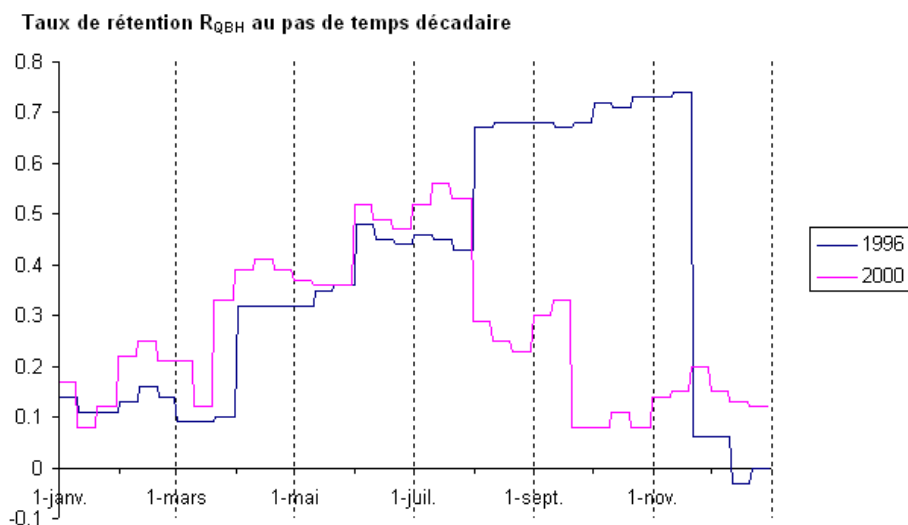


Figure 7 : Evolution des taux de rétention décadaire calculés selon le principe de R_{QBH} pour l'année civile 1996 (sèche) et pour l'année 2000 (humide) à la station de Nod sur Seine.

On constate que pour les deux années sélectionnées, le taux de rétention est assez faible en période hivernale et qu'il augmente durant la période estivale. Cette constatation est en parfait accord avec le fait que les prélèvements de nitrate par la végétation sont plus importants au printemps et au début de l'été et que la dénitrification est favorisée par les fortes températures et donc accrue en période estivale. Les moyennes en été des taux de rétention au pas de temps décadaire sont plus élevées que celles en hiver (**Tableau 6**).

Les signaux ne présentent pas exactement la même forme pour les deux années. En effet, le taux de rétention atteint des valeurs plus élevées pour l'année 1996 que pour l'année 2000 et la période durant laquelle le taux est plus fort est plus longue en 1996 qu'en 2000 se prolongeant largement durant l'automne. Cet exemple permet d'appréhender la variabilité de la rétention au cours de l'année ainsi que de constater qu'en une même station la rétention peut être très différente d'une année sur l'autre, ce qui devra être approfondi lors d'une prochaine étude.

Tableau 6 : Moyenne des taux de rétention sur l'année sur la période estivale et sur la période hivernale pour la station de Nod sur Seine obtenus avec le taux de rétention R_{QBH} réalisés au pas de temps décadaire.

Moyenne des taux de rétention décadaire	R_{QBH}	
	1996	2000
Sur l'année	0.38	0.27
Durant la période estivale (21 juin au 23 septembre)	0.58	0.38
Durant la période hivernale (21 décembre au 21 mars)	0.11	0.17

4.2. Etude de la variabilité spatiale

Nous avons représenté spatialement le taux de rétention $R_{QBH, INTER}$ sur le bassin de la Seine. Les plus forts taux se situent majoritairement en tête de bassins versants. Les taux moyens au contraire sont localisés sur les grands axes de l'Aube, de la Marne, de l'Yonne, du Loing et de la Seine avant Paris. Les bassins versants étant emboîtés les uns dans les autres, les taux de rétention situés plus à l'aval correspondent à de plus grandes surfaces, ce qui explique les valeurs moyennes observées dans ces zones.

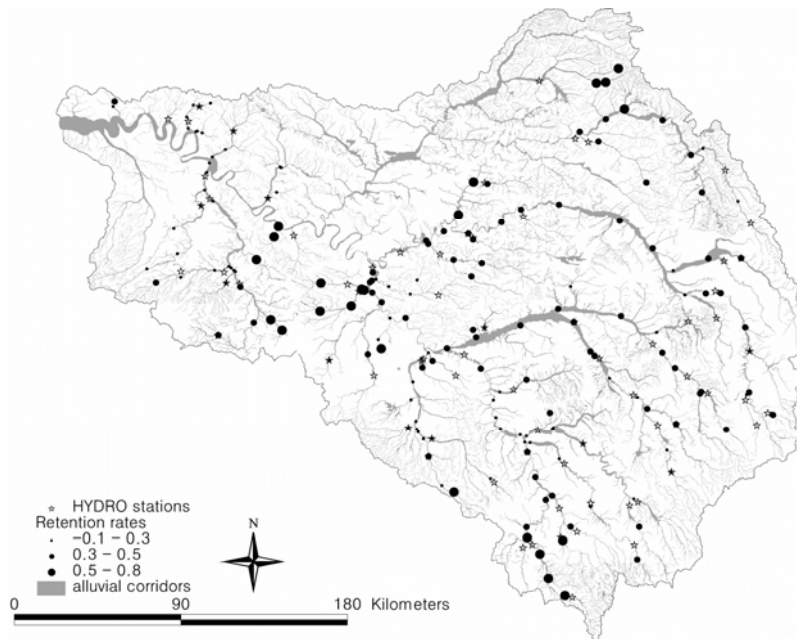


Figure 8 : Cartes de la répartition des taux de rétention $R_{QBH, INTER}$ sur le bassin topographique de la Seine.

4.3. Croisement des taux de rétention avec différents facteurs de contrôle potentiels

Un des objectifs de ce travail est de déterminer les facteurs de contrôle de la rétention des nitrates à l'échelle du bassin versant. Parmi les taux de rétention calculés précédemment nous en avons retenus deux qui renseignent sur des aspects différents de la rétention des nitrates : (1) le taux $R_{QMOD, INTER}$ qui est davantage ciblé sur la dénitrification et le taux $R_{Q0, INTER}$ qui est indicatif de la rétention en période d'étiage donc à la fois de la dénitrification et de la rétention des nitrates par la végétation. Ce sont ces deux taux de rétention qui ont été croisés avec différents paramètres (géochimiques, géomorphologiques, occupation du sol et variables extraites des indices topographiques) susceptibles de contrôler la rétention des nitrates à l'échelle de sous-bassins versants. Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé des analyses en composantes principales (ACP) effectuées à l'aide du logiciel XLSTAT Pro. Les détails de la méthode sont disponibles dans Curie (2006).

4.3.1 Les paramètres physico-chimiques

Deux mécanismes sont supposés à l'origine de la rétention d'azote par les zones humides, la dénitrification et la rétention d'azote par la végétation. L'absence d'oxygène dissous et la présence de carbone organique dissous sont des conditions indispensables à la mise en place du processus de dénitrification qui peut également être favorisé par la température. L'assimilation par la végétation est également sensible à la température et augmente lorsque celle-ci est élevée. Certains paramètres physico-chimiques ont donc une influence non négligeable, à l'échelle locale ou à celle du processus sur la rétention des nitrates. Nous avons donc voulu savoir si cette influence des paramètres physico-chimiques sur la rétention des nitrates existait également à l'échelle des sous-bassins de la Seine.

De nombreux paramètres physico-chimiques sont mesurés au niveau des stations RNB en rivière. Nous avons testé l'influence de 6 d'entre eux sur les taux de rétention : la température de l'eau en rivière en °C (notée TEMP), le pH, la teneur en oxygène dissous en mgO_2 / l (notée OXY), la demande biologique en oxygène (notée DBO), la concentration en ammonium (noté NH_4), la concentration en nitrite (noté NO_2).

Pour chacun des deux taux de rétention $R_{Q0, INTER}$ et $R_{QMOD, INTER}$, nous avons sélectionné les valeurs des paramètres qui correspondent à la période sur laquelle sont réalisés les calculs. Les moyennes ont été réalisées en été (21 juin au 23 septembre) sur la période 1991 à 2000 pour les croisements avec le taux $R_{Q0, INTER}$ et sur l'ensemble de l'année sur la période 1991 à 2000 pour les croisements avec $R_{QMOD, INTER}$.

Une analyse en ACP a été menée sur les paramètres géochimiques mesurés en période estivale et sur le taux $R_{Q0, INTER}$ (**Figure 9**).

Valeurs propres	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé
2.62	37.41	37.41
1.70	24.26	61.67
1.03	14.7	76.37
0.70	10.17	86.54
0.42	5.99	92.53
0.30	4.29	96.82
0.22	3.18	100.00

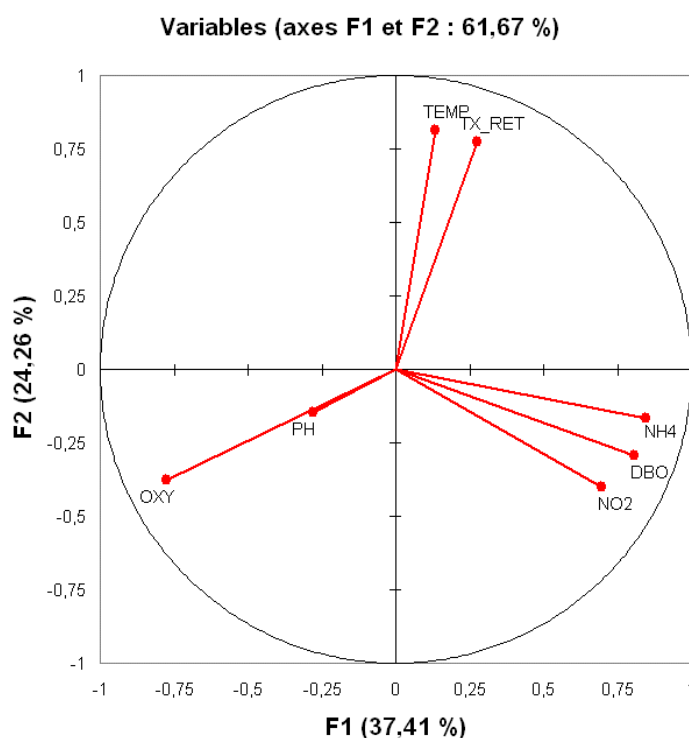


Figure 9 : (à droite) Valeurs propres et pourcentages de variance obtenus lors de l'ACP effectuée entre $R_{Q0, INTER}$ et les paramètres physico-chimiques (à gauche) Représentation des paramètres physico-chimiques dans le plan des facteurs 1 et 2.

Dans les plans factoriels F1 et F2 qui expliquent le maximum de la variance de R, le taux de rétention $R_{Q0, INTER}$ forme un très petit angle avec la température, ce qui signifie que ces deux variables sont fortement corrélées (**Figure 9**). La teneur en oxygène dissous ainsi que le pH se situe presque à l'opposé du taux $R_{Q0, INTER}$, cela indique qu'il existe une anti-corrélation entre le taux de rétention et ces deux paramètres. Les autres paramètres chimiques testés lors de cette analyse (concentration en ammonium, en nitrite et demande biologique en oxygène) formant un angle droit avec le taux de rétention sont considérés comme indépendants. Ces résultats sont confirmés par la table des corrélations.

La représentation du taux de rétention ($R_{Q0, INTER}$) en fonction de la température met bien en évidence la corrélation qui existe entre ces deux paramètres (**Figure 10**). Cette relation est conforme à ce qui était attendu et indique que même à l'échelle d'un sous-bassin versant les variations spatiales de température sont liées à celles de rétention des nitrates. Le coefficient de corrélation de cette relation n'est pas très élevé ($R^2 = 0.21$), cependant cette faible valeur peut être imputée au fait que la température n'est pas le seul facteur influant sur la rétention des nitrates en zone humide.

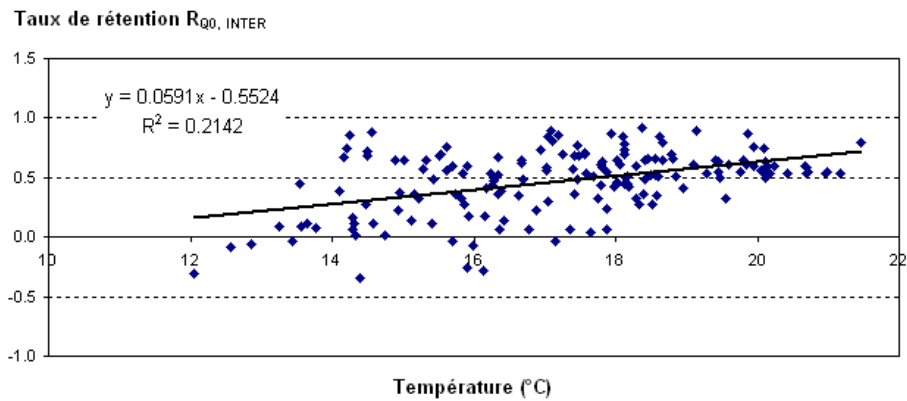


Figure 10 : Taux de rétention $R_{Q0, INTER}$ en fonction de la température moyenne de l'eau en période estivale.

Le même type de relation n'a pas pu être mis en évidence avec $R_{QMOD, INTER}$.

4.3.2 L'occupation du sol

L'occupation du sol en zone humide riveraine 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 de l'AESN sur les zones riveraines à composante humide (AESN, 2006). Nous avons choisi cette base de donnée pour sa résolution bien meilleure dans les corridors alluviaux que la base de données Corine Landcover.

Au premier niveau de la classification des zones riveraines à composante humide, 8 grands types d'occupation du sol sont renseignés : les eaux de surface, les forêts humides, les prairies humides, les marais intérieurs, les marais littoraux, les terres arables et les zones urbaines.

Ces différents types ne sont renseignés que dans la fraction du corridor alluvial considéré comme humide. Nous avons réalisé le calcul du pourcentage de surface couvert par chacun des types de milieux dans chaque bassin versant contributif à la station RNB. Dans notre zone d'étude les marais littoraux sont absents (**Tableau 7**).

Les résultats de l'ACP réalisés entre les 7 catégories présentes et le taux $R_{Q0, INTER}$ sont présentés **Figure 11**. Le taux de rétention apparaît corrélé avec le pourcentage de surface en eau 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 zones en eau peuvent faciliter la rétention des nitrates à la fois par dénitrification et par assimilation par la végétation.

Valeurs propres	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé
2.09	26.10	26.10
1.91	23.91	50.02
1.16	14.43	64.45
1.02	12.79	77.24
0.73	9.08	86.32
0.63	7.89	94.20
0.47	5.80	100.00

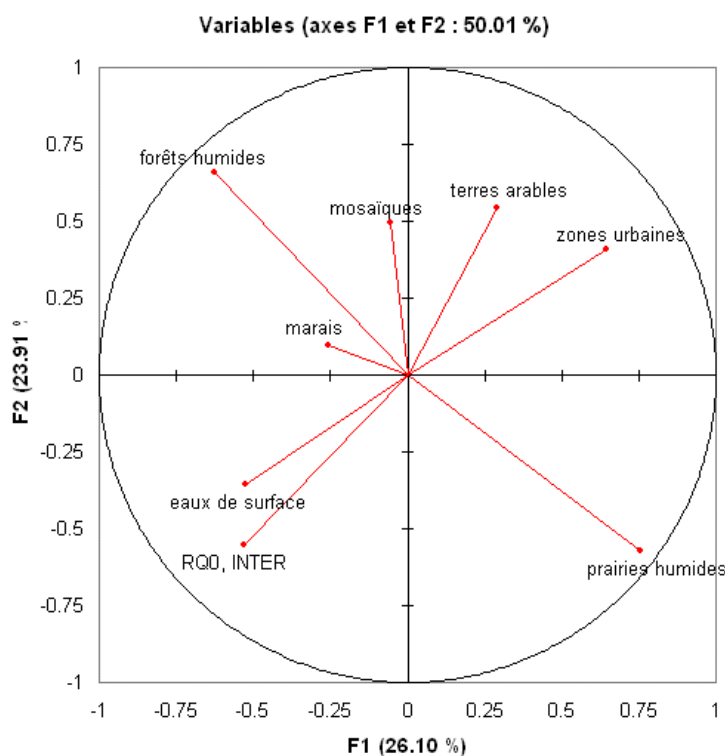


Figure 11 : (à gauche) Valeurs propres et pourcentages de variance obtenus lors de l'ACP effectuée entre $R_{Q0, INTER}$ et les 7 types de milieux définis dans la base de données sur les zones à composante humide (à droite) Représentation graphique des variables dans les plans factoriels F1 et F2.

Les croisements avec les taux $R_{QMOD, INTER}$ donnent des résultats très similaires à ceux obtenus avec $R_{Q0, INTER}$. Il apparaît au travers de ces croisements que certains types d'occupation du sol ont tendance à globalement favoriser la rétention des nitrates ce qui est le cas des zones en eau tandis que d'autres milieux tels que les zones urbaines, les terres arables ont tendance à la désavantager en relargant davantage de nitrates qu'en en retenant. Aucune relation particulière n'a été mise en évidence concernant les marais intérieurs qui sont pourtant des zones considérées comme actives vis-à-vis de la rétention des nitrates. Ce manque de relation entre les taux de rétention et les marais intérieurs est probablement lié au fait que le pourcentage de marais dans notre zone d'étude est très faible (**Tableau 7**). Nous arrivons cependant à établir une relation avec les zones urbaines et les terres arables alors que celles-ci ne représentent qu'un petit pourcentage de surface de zones humides. Ces milieux semblent donc être très fortement défavorables à la rétention des nitrates puisqu'ils restituent au milieu davantage de nitrates qu'ils n'en retiennent.

Tableau 7 : Pourcentages des différents types d'occupation du sol dans l'ensemble des bassins versants étudiés.

Types d'occupation du sol	Pourcentages de zone humides couverts par les différents types d'occupation du sol
Eaux de surface	14.7 %
Forêt	43.7 %
Prairie	31.6 %
Marais intérieur	0.9 %
Terre arable	5.1 %
Zone urbaine	2.2 %
Mosaïque humide	1.8%

4.3.3 Paramètres géomorphologiques

Influence de la surface de la plaine d'inondation et de la densité du réseau hydrographique

Dans un premier temps, l'influence de deux variables sur les taux de rétention $R_{Q0, INTER}$ et $R_{QMOD, INTER}$ ont été testées : la densité du réseau hydrographique et le pourcentage de surface du bassin versant couvert par les corridors alluviaux. Par cette analyse, nous avons voulu savoir si le principal contrôle sur la rétention des nitrates au niveau des zones humides ripariennes était lié à la longueur de l'interface avec la rivière ou à la surface des corridors alluviaux.

L'ACP réalisée entre le taux de rétention $R_{Q0, INTER}$ et ces deux paramètres montre que la densité du réseau hydrographique est à la fois corrélée avec la pourcentage du bassin contributif couvert par les corridors alluviaux et avec le taux de rétention $R_{Q0, INTER}$ (**Figure 12**). Cependant le taux de rétention et le pourcentage du bassin versant couvert par les corridors ne montrent pas une forte corrélation. Au vu de ces analyses, il semble bien que ce qui contrôle la rétention soit la longueur de l'interface entre la zone humide et la rivière et non pas le pourcentage de zones humides dans le bassin versant.

Valeurs propres	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé
1.78	59.44	59.44
0.81	27.09	86.53
0.40	13.47	100.00

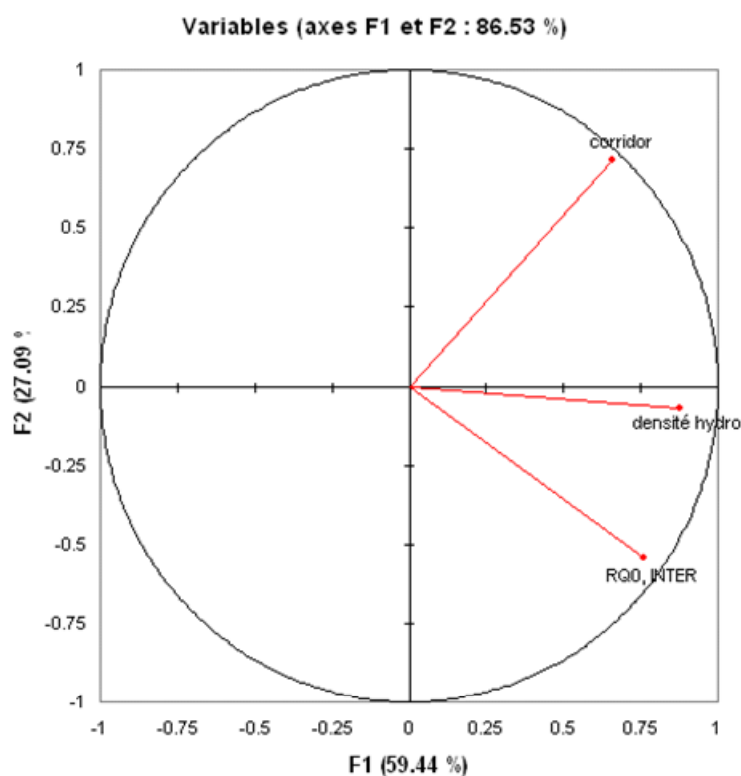


Figure 12 : (à gauche) Valeurs propres et pourcentages de variance obtenus lors de l'ACP effectuée entre $R_{Q0, INTER}$, la densité du réseau hydrographique et le pourcentage du bassin couvert par les corridors (à droite) Représentation graphique des variables dans les plans factoriels F1 et F2.

Influence des différents types de la classification géomorphologique

Les 4 sous-systèmes de la classification géomorphologique de Gaillard et al. (2001) au niveau 2 ne présentent pas les mêmes conditions d'accueil pour les zones humides : les types superposé et emboîté sont davantage susceptible de permettre le développement de zones humides, efficaces en terme de rétention des nitrates que les types incisé et stable. A priori, on s'attend donc à ce que les sous-systèmes emboîtés et superposés soient corrélés aux deux taux de rétention et à ce que les types incisés et stable montrent soit une indépendance, soit une anticorrélation vis-à-vis de la rétention. Pour

conduire cette analyse, nous avons déterminé le pourcentage de surface de chaque sous-système dans les corridors alluviaux présent dans les bassins versants contributifs aux stations RNB.

Les résultats obtenus lors de l'ACP réalisée entre les types du niveau 2 de la classification géomorphologique et le taux de rétention $R_{Q0, INTER}$ sont présentés sur la **Figure 13**. Les résultats obtenus avec le taux de rétention $R_{QMOD, INTER}$ étant quasiment identiques avec ceux de $R_{Q0, INTER}$, nous ne les présenteront pas. Les deux premiers axes expliquent plus de 67% de la variance.

Valeurs propres	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé
2.01	40.14	40.14
1.38	27.64	67.78
1.09	21.69	89.47
0.52	10.44	99.91
0.01	0.09	100.00

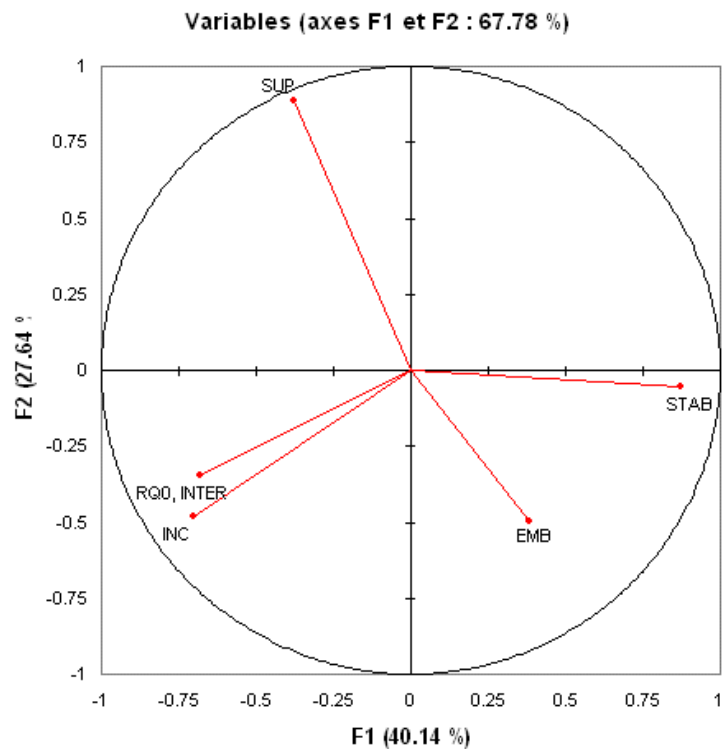


Figure 13 : (à gauche) Valeurs propres et pourcentages de variance obtenus lors de l'ACP effectuée entre $R_{Q0, INTER}$ et les 4 sous-systèmes de la classification géomorphologique (à droite) Représentation graphique des variables dans les plans factoriels F1 et F2.

Contrairement à ce qui était attendu, le taux de rétention est corrélé avec le type incisé et ne montre aucune corrélation avec les types emboîté et superposé. Le type stable quant à lui est anti-corrélé avec le taux de rétention comme nous l'avions prévu a priori.

Ce manque de corrélation avec les types emboîté et superposé est peut être à mettre en relation avec le positionnement dans le bassin versant de ces deux sous-systèmes. En effet ceux-ci ne se trouvent que très rarement en tête de bassin versant. Les bassins versants sur lesquels nous travaillons sont des bassins emboîtés les uns dans les autres qui prennent en considération l'ensemble de l'amont. Ces pourcentages de sous-systèmes sont donc systématiquement croisés avec des valeurs moyennes de taux de rétention. Il n'existe pas de cas où ces types soient seuls individualisés dans un bassin versant. Afin de pouvoir certifier que ces différents types ne jouent effectivement pas de rôle sur la rétention des nitrates, il faudrait pouvoir les individualiser ce qui serait possible en désagrégeant les bassins versants.

En ce qui concerne les deux autres types (stable et incisé), l'effet lié au travail sur des bassins contributifs emboîtés est moins important étant donné que ces 2 types sont majoritairement situés en tête de bassin versant.

Les types incisé sont considérés comme peu propice à la rétention des nitrates du fait de leurs fortes pentes qui favorisent des écoulements assez rapides et qui ne permettent pas l'établissement des

conditions nécessaires à la dénitrification. Ils ne présentent pas non plus d'annexes hydrauliques favorisant la dénitrification ni de larges plaines alluviales susceptibles d'accueillir des forêts ripariennes actives dans le prélèvement de nitrate par la végétation. Cependant, ce sous-système présente une importante densité de réseau hydrographique qui comme on l'a vu dans la partie précédente est un élément favorisant la rétention des nitrates. C'est probablement cette importante densité du réseau hydrographique qui rend le type incisé favorable à la rétention.

Le corridor stable quant à lui correspond aux vallées sèches. Ces environnements ne présentant pas des conditions d'humidité pérennes au cours de l'année sont effectivement très peu propices à la rétention des nitrates. Le fait que le type stable ne soit pas favorable à la rétention des nitrates est donc tout à fait cohérent.

4.3.4 Les indices topographiques

Les indices topographiques donnent une idée du pourcentage de saturation et de l'étendue des zones saturées dans le bassin versant. Nous avons testé différents paramètres extraits des indices topographiques susceptibles d'avoir une influence sur le taux de dénitrification :

- la moyenne des indices topographiques dans le bassin versant,
- la moyenne des indices topographiques dans les corridors alluviaux définis au niveau 1 de la classification géomorphologique
- la moyenne des indices topographiques sur le linéaire
- la moyenne des indices topographiques supérieur à 12 (cf chapitre 2) dans le bassin versant
- la moyenne des indices topographiques supérieur à 12 dans les corridors alluviaux
- le pourcentage d'indices topographiques supérieur à 12 dans le bassin versant
- le pourcentage d'indices topographiques supérieur à 12 dans les corridors alluviaux

Le croisement entre ces différents paramètres et les deux taux de rétention sélectionnés (R_{Q0} , $R_{Q0, INTER}$ et $R_{QMOD, INTER}$) n'a montré aucune relation significative. Ces résultats sont en accord avec le fait que ce soit davantage le linéaire qui influe sur la rétention des nitrates que le pourcentage de corridors alluviaux ou dans le cas présent de zones potentiellement humides.

4.4. Vers un indice fonctionnel

Les résultats obtenus lors de cette étude sont encore à un stade préliminaire cependant ils nous ont permis de faire un premier tri sur les facteurs de contrôle de la rétention des nitrates à l'échelle des sous-bassins de la Seine. Nous avons alors procédé à une dernière ACP entre les différents facteurs de contrôle individualisés lors de cette étude et le taux de rétention $R_{Q0, INTER}$ afin de déterminer le poids relatif de ces facteurs sur la rétention des nitrates (*Figure 14*).

Seul le premier axe possède un fort pourcentage explicatif de la variance totale. Cet axe correspond au taux de rétention $R_{Q0, INTER}$. Au regard des résultats de l'ACP ainsi que de ceux de la matrice de corrélation, c'est la densité du réseau hydrographique qui semble avoir le plus de poids sur le taux de rétention viennent ensuite la température, puis le pourcentage de corridors incisé et le pourcentage de surface en eau. Le pourcentage de surface couverte par les corridors alluviaux apparaît beaucoup moins bien corrélé. Parmi les facteurs influençant le plus négativement la rétention on trouve le pourcentage de corridors stables, puis la teneur en oxygène dissous et viennent ensuite les deux types d'occupation du sol (zones urbaines et terres arables).

Valeurs propres	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé
3.24	32.42	32.42
1.55	16.48	47.90
1.37	13.64	61.54
1.03	10.29	71.83
0.85	8.48	80.31
0.64	6.43	86.74
0.50	4.96	91.68
0.37	3.66	95.35
0.28	2.83	98.18
0.18	1.82	100.00

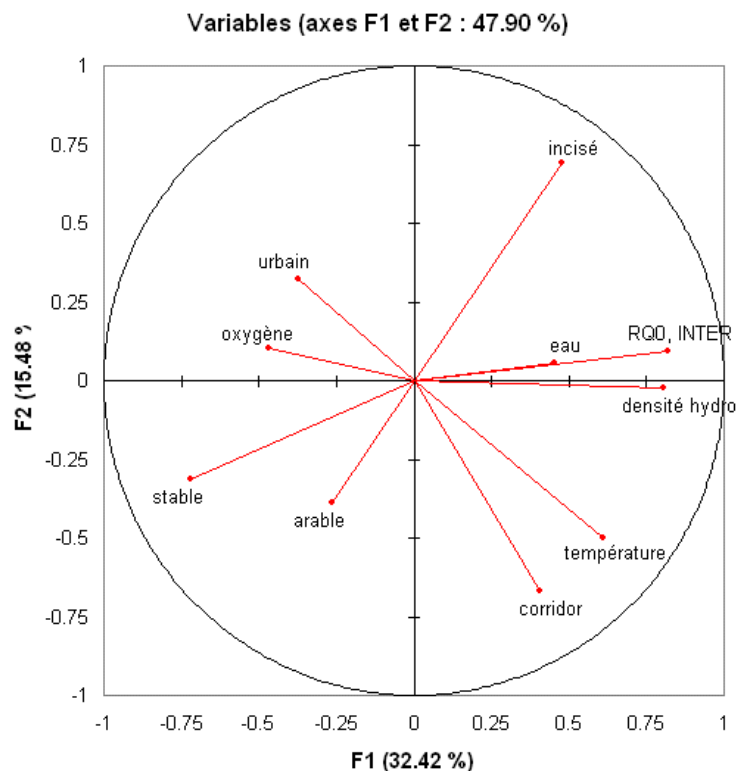


Figure 14 : (à gauche) Valeurs propres et pourcentages de variance obtenus lors de l'ACP effectuée entre $R_{Q0, INTER}$ et l'ensemble des facteurs identifiés comme influençant la rétention des nitrates pour ce facteur (à droite) Représentation graphique des variables dans les plans factoriels F1 et F2.

Afin de proposer un premier indice à partir des facteurs de contrôle déterminés nous avons ensuite réalisé une régression linéaire entre le taux de rétention en étiage ($R_{Q0, INTER}$) et les variables sélectionnés. Nous avons ajouté progressivement les variables explicatives du taux de rétention par ordre de corrélation décroissante avec $R_{Q0, INTER}$.

Variables	Unités	Equation	R ²
Densité du réseau hydrographique		$R_{Q0, INTER} = 0.07 + 0.1 * \text{densité hydro}$	0.29
Pourcentage de corridors stable	%	$R_{Q0, INTER} = 0.26 + 0.07 * \text{densité hydro} - 0.006 * \text{stable}$	0.39
Température de l'eau	°C	$R_{Q0, INTER} = -0.22 + 0.06 * \text{densité hydro} - 0.005 * \text{stable} + 0.03 * \text{température}$	0.43
Pourcentage de surface en eau	%	$R_{Q0, INTER} = -0.15 + 0.04 * \text{densité hydro} - 0.005 * \text{stable} + 0.03 * \text{température} + 0.02 * \text{eau}$	0.48
Pourcentage de corridors incisé	%	$R_{Q0, INTER} = -0.37 + 0.03 * \text{densité hydro} - 0.004 * \text{stable} + 0.04 * \text{température} + 0.02 * \text{eau} + 0.002 * \text{incisé}$	0.49
Teneur en oxygène dissous	mg/l	$R_{Q0, INTER} = -0.12 + 0.03 * \text{densité hydro} - 0.004 * \text{stable} + 0.03 * \text{température} + 0.02 * \text{eau} + 0.002 * \text{incisé} - 0.02 * \text{oxygène}$	0.50
Pourcentage de zones urbaines	%	$R_{Q0, INTER} = -0.06 + 0.02 * \text{densité hydro} - 0.004 * \text{stable} + 0.03 * \text{température} + 0.02 * \text{eau} + 0.002 * \text{incisé} - 0.02 * \text{oxygène} - 0.004 * \text{urbain}$	0.51
Pourcentage de terres arables	%	$R_{Q0, INTER} = 0.05 + 0.02 * \text{densité hydro} - 0.003 * \text{stable} + 0.03 * \text{température} + 0.02 * \text{eau} + 0.002 * \text{incisé} - 0.02 * \text{oxygène} - 0.004 * \text{urbain} - 0.002 * \text{arable}$	0.52

Les différents facteurs identifiés comme favorisant la rétention des nitrates présentent tous un signe positif (densité hydro, température...) tandis que ceux la défavorisant voient leur influence

soustraite (teneur en oxygène dissous, ...). On remarque que l'ajout des 4 dernières variables ne fait plus beaucoup augmenter le coefficient de corrélation de la relation. Ce sont la densité du réseau hydrographique, le pourcentage de corridors stables, la température de l'eau et le pourcentage de surface en eau qui explique la plus grande partie de la rétention. On retiendra donc l'équation suivante comme premier indice fonctionnel de la rétention :

$$R_{Q0, INTER} = -0.15 + 0.04 * \text{densité hydro} - 0.005 * \text{stable} + 0.03 * \text{température} + 0.02 * \text{eau} \quad (9)$$

Cet indice n'est pas définitif et est amené à évoluer après amélioration des taux de rétention.

5. Conclusions et perspectives

Les calculs de taux de rétention, nous ont permis dans un premier temps de mettre en évidence la variabilité saisonnière et interannuelle de la rétention des nitrates en zone humide riveraine. Lors du croisement des taux $R_{Q0, INTER}$ et $R_{QMOD, INTER}$ avec les facteurs de contrôle potentiels de la rétention, nous avons pu déterminer que même à l'échelle du bassin versant la température favorisait la rétention. Il apparaît également que l'occupation du sol dans le corridor alluvial influence la rétention des nitrates à l'échelle du bassin versant. En effet, certains types d'occupation du sol ont tendance à globalement favoriser la rétention des nitrates ce qui est le cas des forêts alluviales et des zones en eau tandis que d'autres milieux tels que les zones urbaines, les terres arables et les prairies ont tendance à la désavantager en relargant davantage de nitrates qu'en en retenant. Nous avons aussi pu mettre en évidence que la surface du corridor présent dans le bassin versant et la densité du réseau hydrographique augmentait les capacités de rétention en nitrates. D'autres analyses effectuées, notamment sur l'influence des sous-systèmes de la classification géomorphologique ont donné des résultats moins tranchés. En effet, pour les sous-systèmes situés majoritairement en tête de bassin nous avons pu déterminer le fait que le type de corridor stable défavorise la rétention des nitrates tandis que le sous-système incisé a tendance à la favoriser. Cependant, il n'a pas été possible de statuer sur l'influence des types emboîtés et superposés ceux-ci étant plutôt situés au niveau des grands cours d'eau (plus en aval) et donc rarement individualisé dans un bassin versant. Aucune relation n'a pu être mise en évidence entre les indices topographiques renseignant sur la saturation potentielle du sol et les taux de rétention calculés.

Une des principales difficultés de ce travail est liée aux marges d'erreur sur les données d'entrée ce qui génère de fortes incertitudes sur les taux de rétention calculés. Notre objectif dans la suite de ce travail va donc être de réduire ces incertitudes : (1) en déssembôitant les bassins versants pour travailler sur des tronçons de bassins versants ayant des caractéristiques homogènes et pour obtenir des taux de rétention indépendants et (2) en corrigeant des apports ponctuels et diffus. Ces améliorations devraient permettre de mieux pouvoir identifier et analyser les facteurs qui contrôlent les différences spatiales et temporelles de la rétention.

6. Références

- AESN, 2006. Cartographie des zones à dominante humide du bassin de la Seine.
- Bacq, N. and Billen, G., 2003. Modélisation de la qualité de l'eau des grands sous-bassins amont Eure / Oise / Marne / Seine-amont. Modèle SENEQUE 3.1 (Piren-Seine), Rapport PIREN-Seine.
- Billen, G. and Garnier, J., 2000. Nitrogen transfers through the Seine drainage network : a budget based on the application of the RIVERSTRAHLER Model. *Hydrobiologia*, 410: 139-150.
- Brisson, N. et al., 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18: 309-332.
- 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., Université Paris 6, Paris, 200 pp. pp.

- Gaillard, S. et al., 2001. Typologie et fonctions des zones humides riveraines, rapport d'activite 2001 (PIREN-Seine), theme 1 : Agriculture et qualite des eaux, 2001, pp. 32 pp.
- IFEN, 1994. Corine Landcover, CLC 1990.
- Ledoux, E., 1980. Modélisation intégrée des écoulements de surfac et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Ledoux, E., Girard, G. and De Marsily, G., 1989. Spatially distributed modeling : conceptual approach, coupling surface water and groundwater. In: H.J. MorelSeytoux (Editor), Unsaturated flow in hydrologic modeling - Theory and Practice. Kluwer Academic, pp. 435-454.