

# Classification et typologie fonctionnelle des zones humides riveraines à l'échelle du bassin de la Seine : élimination et rétention des nitrates

Florence Curie<sup>1</sup>, Agnès Ducharme<sup>1</sup>, Hocine Bendjoudi<sup>1</sup>, Stéphan Gaillard<sup>2</sup>

<sup>1</sup> UMR *sisyphe* 7619, [florence.curie@ccr.jussieu.fr](mailto:florence.curie@ccr.jussieu.fr)

<sup>2</sup> LETG, UMR 6554

Classification et typologie fonctionnelle des zones humides riveraines à l'échelle du bassin de la Seine : élimination et rétention des nitrates .....	1
1. Introduction et objectifs .....	1
2. Récapitulatif des travaux réalisés sur le bassin de la Seine .....	2
2.1. La classification géomorphologique .....	2
2.2. La classification hydrologique .....	3
3. Les indices topographiques ou indices de saturation .....	3
3.1. Présentation des indices topographiques .....	3
3.1.1 L'indice de Kirkby .....	3
3.1.2 Les autres indices topographiques développés. ....	4
3.2. Application des indices topographiques sur le bassin de la Seine .....	4
4. Mise en relation des indices topographiques et de la classification géomorphologique.....	6
4.1. Les indices topographiques et l'inventaire des zones humides (niveau1) .....	6
4.2. Les indices topographiques et le niveau 2 de la classification.....	7
5. Conclusions.....	8
6. Perspectives.....	8
6.1. Lien entre les typologies et la fonction de dénitrification.....	8
6.2. Les indices empiriques fonctionnels .....	9
6.2.1 Facteurs influençant la dénitrification.....	9
6.2.2 Définition d'indices permettant d'appréhender la dénitrification .....	10
7. Bibliographie.....	11

## 1. Introduction et objectifs

Les zones humides ripariennes sont des milieux particuliers, situés à l'interface entre le milieu aquatique et le milieu terrestre, qui s'étendent de part et d'autre des rivières. Elles sont caractérisées par la présence d'eau à la surface ou à proximité de la surface du sol de façon temporaire ou permanente. Ces zones humides sont le siège de différentes fonctions telles que la régulation du régime des eaux (écrêtage des pics de crue, soutien des étiages) ou le maintien de la qualité des eaux (rétention et élimination des nutriments notamment phosphore et azote). Les conditions hydrogéomorphologiques qui règnent au sein de la zone humide sont particulièrement importantes pour la réalisation de ces différentes fonctions notamment celle de dénitrification. En effet, les conditions hydrologiques permettent à la fois l'apport des nitrates au niveau de la zone humide et l'instauration des conditions anoxiques nécessaire au processus de dénitrification.

Notre objectif consiste donc à mieux définir les conditions hydrologiques à travers l'amélioration de la typologie hydrologique en utilisant les indices topographiques. Les valeurs de ces indices (ne faisant intervenir que des données topographiques) augmentent avec le potentiel de saturation, ce qui signifie que plus l'indice est fort et plus le sol à des chances d'être saturé. L'application de cet indice sur des modèles numériques de terrains (MNT) permet donc une

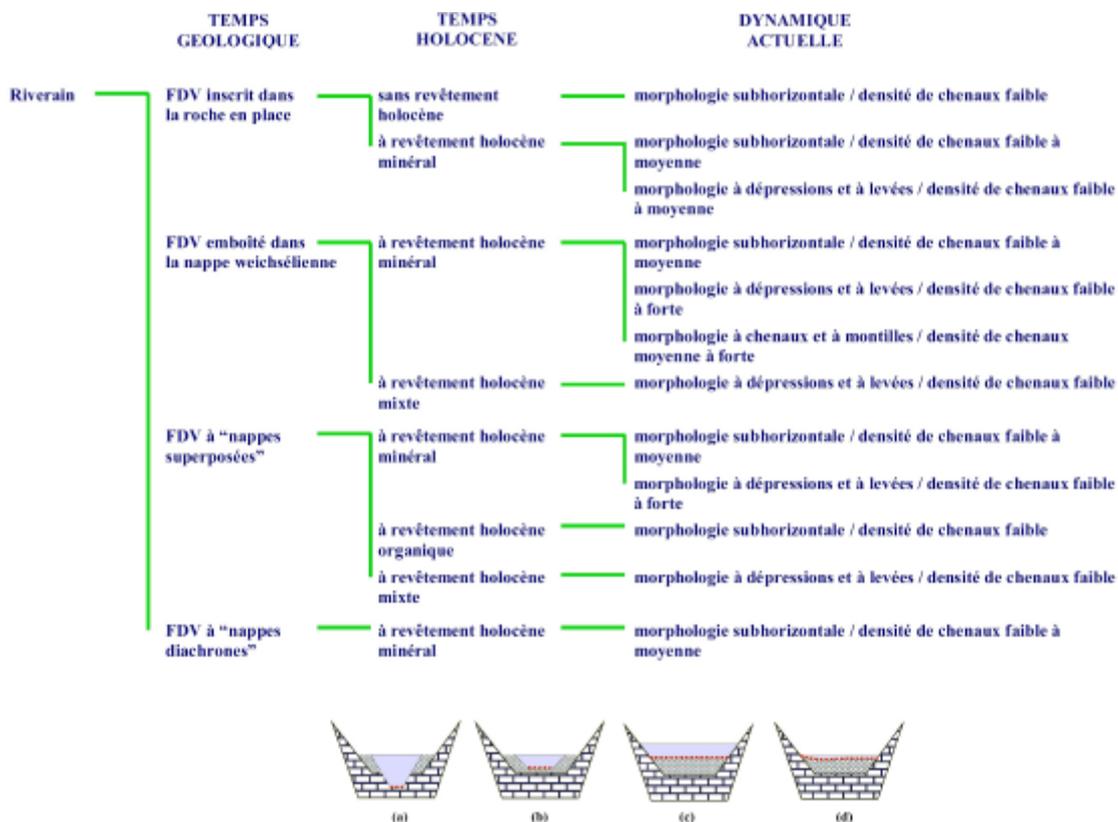
cartographie assez rapide des secteurs en situation d'être potentiellement des zones humides. Parallèlement à l'amélioration de la typologie hydrologique, des indices empiriques fonctionnels pour la dénitrification ont été développés sur le bassin versant de la Marne. Nous nous attacherons ensuite à établir le lien entre les différentes typologies, notamment la classification hydrologique une fois celle-ci améliorée, et la fonction de dénitrification. Cette étape nécessite l'obtention de données de taux de dénitrification que nous établirons par bilans de nitrate sur l'ensemble du bassin de la Seine. Ces données serviront également à valider les indices empiriques de dénitrification produits sur le bassin de la Marne.

## 2. Récapitulatif des travaux réalisés sur le bassin de la Seine

### 2.1. La classification géomorphologique

La classification géomorphologique (Gaillard et al., 2002) est basée sur le concept de système morphologique hiérarchisé et emboîté. Cette classification intègre une série de variables représentatives des différentes échelles de temps et d'espace auxquelles la mise en place et le fonctionnement actuel des hydrosystèmes fluviaux peuvent être appréhendés. Le niveau 1 est le niveau d'entrée de la classification correspondant aux zones humides riveraines telles qu'elles sont définies par Brinson (1993). Trois niveaux emboîtés sont ensuite proposés (*Figure 1*):

- Niveau 2 : évolution du profil en long des cours d'eau (pas de temps géologique);
- Niveau 3 : dépôts sédimentaires holocènes (pas de temps holocène) ;
- Niveau 4 : mosaïques hydrogéomorphologiques tels que les annexes hydrauliques et la topographie (pas de temps actuel).

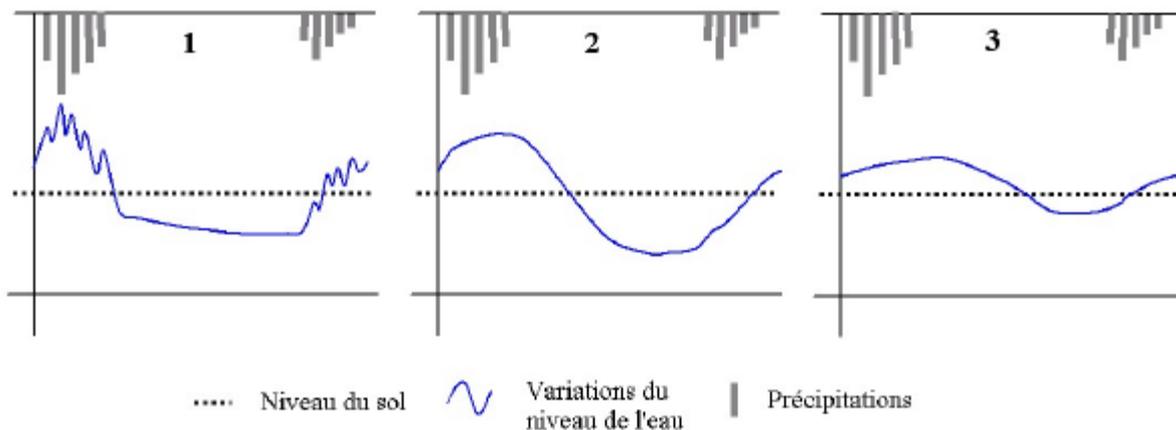


*Figure 1: Classification géomorphologique des zones humides riveraines*

## 2.2. La classification hydrologique

La classification hydrologique développée dans le cadre du PIREN-Seine (Gaillard et al., 2002) fait une distinction entre les flux de surface (transferts rapides) et les flux souterrains (transferts plus lents). Les flux souterrains sont pris en compte à travers la perméabilité de l'encaissant et les flux de surface à travers le temps de concentration. La formule utilisée pour le temps de concentration est celle de Kirpich (1940) ( $T_c = 0.1875 L^{0.77} S^{-0.385}$ ) qui fait intervenir la pente moyenne (S) et de la longueur du plus long thalweg (L) et qui a été établie pour les petits bassins versant agricoles. Sur cette base, trois types de régime hydrologique (**Figure 2**) peuvent être dégagés :

- Cas 1 : régime hydrologique dominé par les apports atmosphériques et de surface (caractéristique de l'amont des bassins) pour lequel il existe une grande variabilité fortement liée aux conditions climatiques;
- Cas 2 : régime hydrologique mixte ;
- Cas 3 : régime hydrologique dominé par les apports souterrains (caractéristique de l'aval des bassins) pour lequel la variabilité est atténuée par le stockage en période de crue et la décharge des nappes en période d'étiage.



**Figure 2:** les trois types de régimes hydrologiques

Cette classification a deux limitations principales. La première limitation concerne les temps de concentration calculés à partir de la formule de Kirpich. En effet, les temps de concentration calculés semblent particulièrement petits. La seconde limitation de cette classification vient du fait qu'elle ne fournit des informations sur le régime hydrologique qu'au niveau du linéaire de la rivière. L'introduction des indices topographiques va nous permettre d'appréhender le régime hydrologique en nous affranchissant de ces différentes limitations.

## 3. Les indices topographiques ou indices de saturation

### 3.1. Présentation des indices topographiques

#### 3.1.1 L'indice de Kirkby

L'indice de Kirkby est un indice géomorphologique dérivé du modèle hydrologique TOPMODEL (Beven & Kirkby, 1979). Cet indice développe le concept d'aires contributives variables selon lequel, les différentes zones d'un bassin versant ne contribuent pas de la même manière aux flux d'eau. La localisation de ces aires contributives dépend de la convergence des différents flux d'eau, de la pente et de la conductivité hydraulique. L'indice de Kirkby prend en compte la pente locale ( $\beta$ ), la surface spécifique ( $a$ ) ( $=$  l'aire contributive / la longueur du côté d'un pixel) et la transmissivité (T) :  $i = \ln(a/T \tan \beta)$ . Le potentiel de saturation augmente avec la valeur de cet indice. En effet, plus l'aire de drainage amont est importante et plus la pente locale est faible, plus

la quantité d'eau drainée sera grande et plus l'évacuation de celle-ci sera difficile. L'utilisation de ce concept permet de diviser le bassin versant en deux zones : une zone saturée (avec des valeurs d'indice élevées) et une zone non-saturée. La limite entre ces deux zones est variable dans le temps. Il est souvent possible de négliger les variations de la transmissivité T devant celles de la pente et de la surface spécifique. L'indice résultant, appelé indice topographique ou indice de saturation, devient alors :  $i = \ln (a / \tan \beta)$ .

Cet indice topographique a été récemment utilisé lors de l'étude des zones humides et se révèle être une voie de recherche intéressante notamment pour la délimitation des zones humides. Par exemple, Mérot (1995) l'utilise pour prédire la distribution des zones humides ou plus précisément l'extension des sols inondés dans deux petits bassins versants de Bretagne. Cette méthode de localisation des zones humides donne de bons résultats, néanmoins, il arrive que les forts contenus en eau ne correspondent pas toujours aux fortes valeurs d'indices topographiques (Crave & Gascuel-Odoux, 1997).

### 3.1.2 Les autres indices topographiques développés.

Deux autres indices ont été développés pour améliorer la prédiction de la localisation des zones humides. Gascuel-Odoux et al. (1998) proposent alors un indice modifié où la pente locale ( $\beta$ ) est remplacée par la pente aval suivant le chemin de l'eau à la surface du sol jusqu'à la rivière. La prise en compte de la pente aval à la place de la pente locale se justifie car elle permet d'introduire une référence à la rivière.

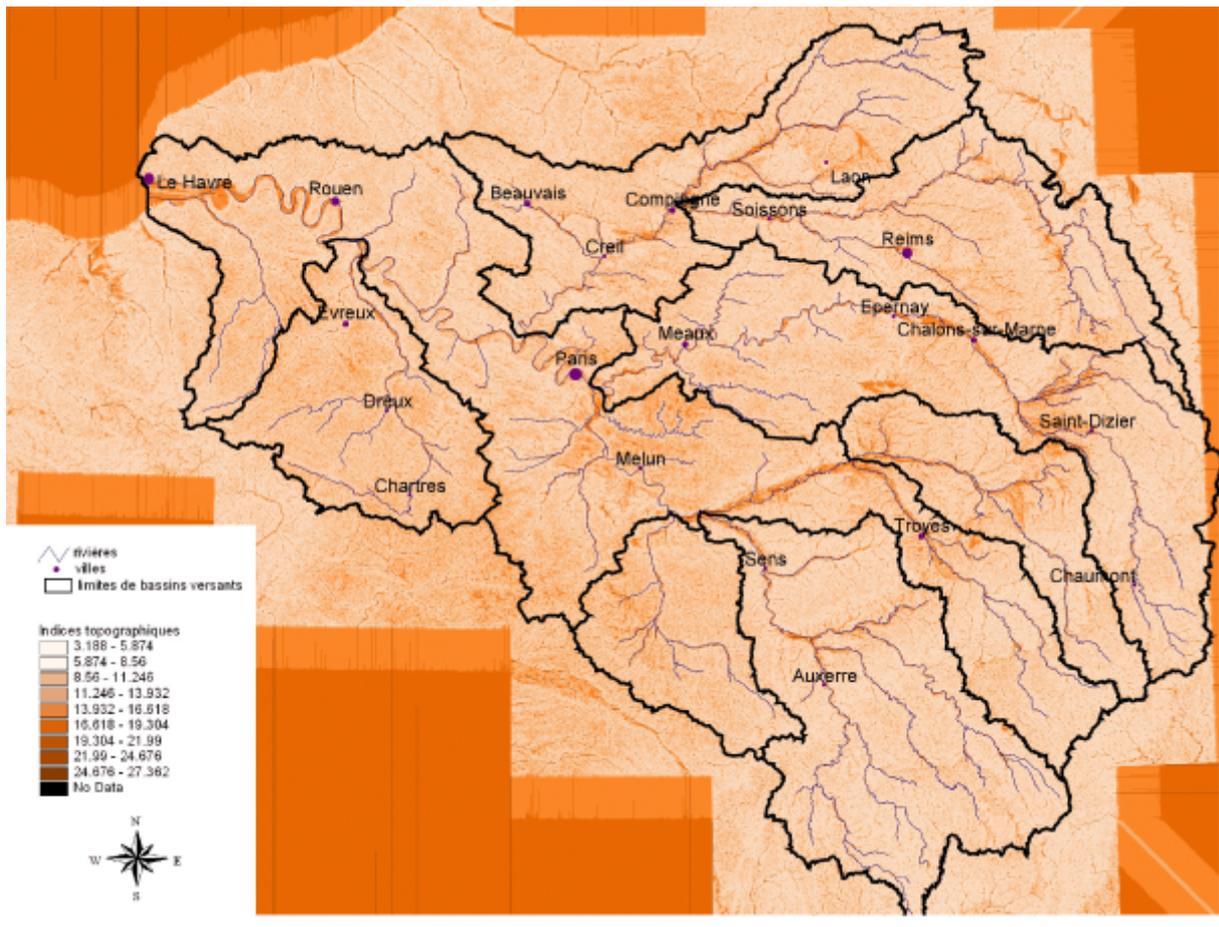
Le second indice modifié, proposé par Mérot et al. (2003), est un indice climato-topographique :  $i = \ln (Vr / \tan \beta)$  où Vr est égale à la surface spécifique multipliée par la hauteur moyenne des pluies efficaces annuelles (précipitation moins évapotranspiration). L'utilisation de ce nouvel indice permet de comparer plusieurs bassins qui n'ont pas les mêmes données climatologiques. En effet, la présence et la taille des zones humides dans un bassin versant est fortement dépendante de la pluie efficace annuelle : plus la pluie est importante et plus les zones humides seront grandes. Le **Tableau 1** résume l'ensemble des indices topographiques développés pour la prédiction des zones humides riveraines.

**Tableau 1:** les différents indices de saturation développés

Nom de l'indice	Formule
Indice topographique	$i = \ln (a / \tan \beta)$ a = surface spécifique $\beta$ = pente locale
Indice topo-sol	$i = \ln (a / T \tan \beta)$ a = surface spécifique $\beta$ = pente locale T = transmissivité
Indice topo pente aval	$i = \ln (a / \tan \beta)$ a = surface spécifique $\beta$ = pente aval
Indice climato-topographique	$i = \ln (Vr / \tan \beta)$ Vr = surface spécifique * précipitation effective annuelle moyenne $\beta$ = pente locale

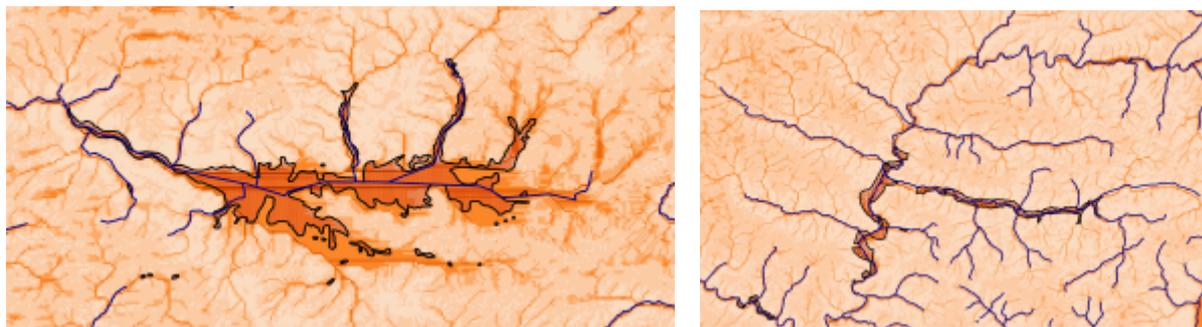
## 3.2. Application des indices topographiques sur le bassin de la Seine

Le calcul de l'indice topographique de Kirkby a été réalisé à partir d'un MNT à 100 m sur l'ensemble du bassin de la Seine. Les résultats obtenus sont présentés sur la **Figure 3**.



**Figure 3 :** carte des indices topographiques sur le bassin de la Marne

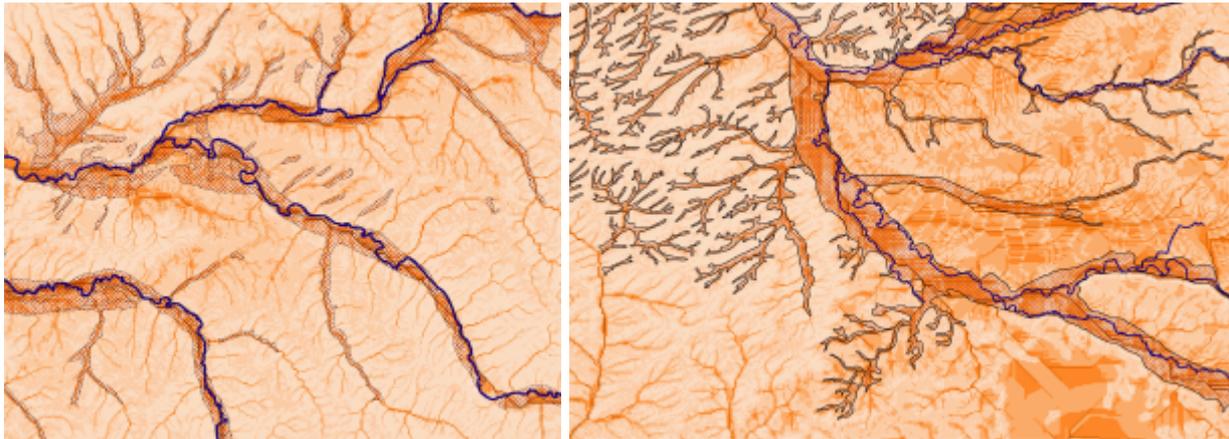
Les indices topographiques reproduisent assez correctement la localisation des grandes zones humides identifiées (la zone de la Bassée, le marais de Saint Gond, le corridor de la Marne...) ainsi que les zones humides situées en têtes de bassin. Afin de confirmer cette bonne adéquation entre les fortes valeurs des indices et la localisation des zones humides, nous avons superposé une carte de l'extension des zones humides réalisée à partir des cartes IGN à la carte des indices topographiques (**Figure 4**).



**Figure 4 :** comparaison des zones humides des cartes IGN et des indices topographiques (à gauche : les Marais de Saint Gond ; à droite : le corridor de l'Ourcq)

On constate que les valeurs d'indices topographiques les plus élevées (couleur orange foncé) coïncident bien avec les limites des zones humides sur les cartes IGN (ici représentées en noir).

Dans un second temps, nous avons comparé les indices topographiques avec les cartes pédologiques disponibles sur le bassin de la Seine (**Figure 5**).



**Figure 5:** Comparaison des zones humides des cartes pédologiques et des indices topographiques (à gauche : carte de Tonnerre ; à droite : carte de Saint Dizier)

Il existe une bonne adéquation entre les données des cartes pédologiques et les indices topographiques (**Figure 5** à gauche). La seule anomalie mise en évidence concerne l'auréole des argiles du Gault où se sont développés, pour les principaux cours d'eau, des cônes d'épandage périglaciaires (**Figure 5** à droite). En effet, les indices topographiques délimitent une zone potentiellement humide plus importante que celle existant dans la réalité. Ceci est dû au fait que cette zone est très plate et se situe juste après une cassure de pente.

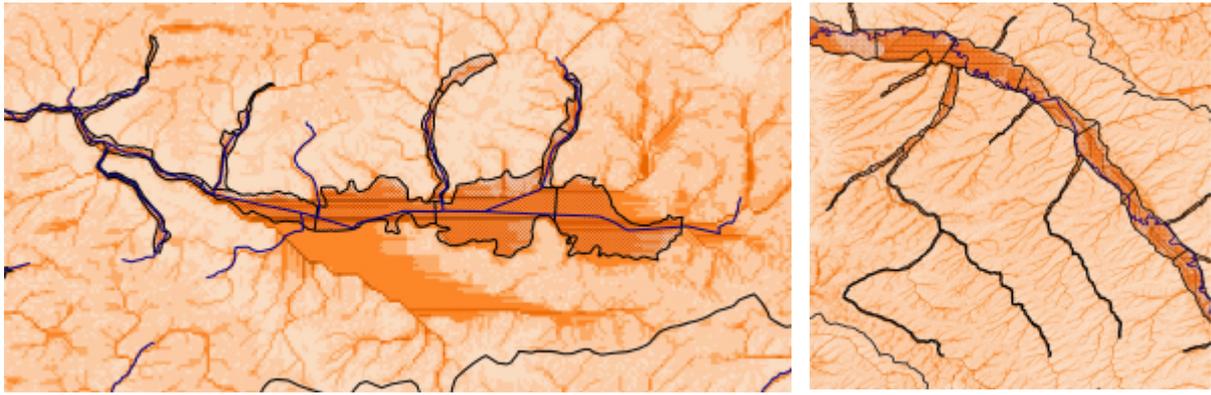
Les calculs ont également été réalisés pour les 3 autres indices développés (indice topo-sol, indice topo pente aval et indice climato-topographique). Les résultats obtenus sont sensiblement identiques à ceux de l'indice topographique de Kirkby. En effet, de manière générale, les fortes valeurs des indices correspondent à la localisation des zones humides riveraines (identifiées à partir des cartes IGN et des cartes pédologiques). On peut néanmoins souligner quelques différences :

- L'indice topo-sol fait ressortir d'avantage l'éventail de sédimentation des argiles de Gault,
- L'indice pente aval a tendance à écraser les zones humides de têtes de bassin,
- L'indice climato-topographique présente à première vue les mêmes répartitions de valeurs que l'indice topographique (des comparaisons statistiques sont en cours à ce sujet).

## **4. Mise en relation des indices topographiques et de la classification géomorphologique**

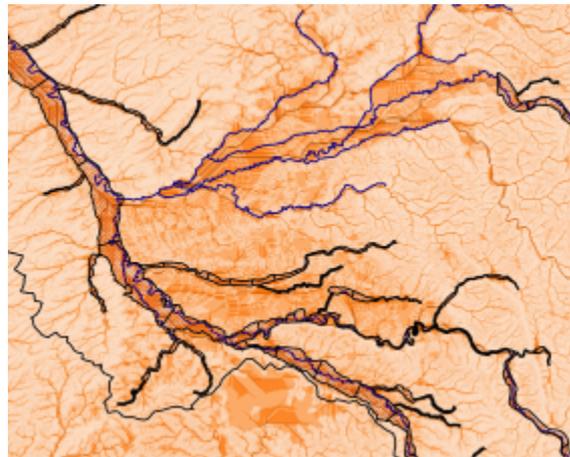
### **4.1. Les indices topographiques et l'inventaire des zones humides (niveau1)**

Les indices topographiques ont ensuite été comparés avec l'inventaire des corridors fluviaux correspondant au niveau 1 de la classification géomorphologique (**Figure 6**).



a – Les marais de Saint Gond

b – Le corridor de la Marne



c – L'éventail de sédimentation de la Marne au niveau des argiles de Gault

**Figure 6:** comparaison de l'inventaire des zones humides (niveau 1 de la classification) et des indices topographiques

La comparaison est tout à fait satisfaisante pour les Marais de Saint Gond ainsi que pour le corridor de la Marne. La seule anomalie mise en évidence concerne une nouvelle fois l'éventail de sédimentation au niveau des argiles de Gault.

#### 4.2. Les indices topographiques et le niveau 2 de la classification

Afin de mieux définir le lien existant entre la classification géomorphologique et les indices topographiques, nous avons calculé les moyennes des pixels appartenant à chacun des types du niveau 2 de la classification géomorphologique (incisé, superposé, stable et emboîté). Les résultats obtenus sont présentés dans le **Tableau 2**.

**Tableau 2 :** Statistiques des valeurs des indices topographiques pour les différents types du niveau 2 de la classification géomorphologique

Niveau 2 de la classification géomorphologique	Minimum	Maximum	Moyenne	Intervalle d'estimation de la moyenne <sup>1</sup>
Superposé	4.2	25.0	12.25	]12.20 ; 12.29[
Incisé	4.2	23.9	11.34	]11.25 ; 11.43[
Emboîté	6.1	25.5	13.83	]13.80 ; 13.87[
Stable	6.3	20.4	11.36	]11.23 ; 11.49[

<sup>1</sup> L'intervalle d'estimation de la moyenne : ]  $moyenne - \frac{2s}{\sqrt{n}}$  ;  $moyenne + \frac{2s}{\sqrt{n}}$  [

L'analyse de la répartition des valeurs des indices topographiques pour les différents types de la classification géomorphologique laisse apparaître des tendances conformes avec celles qui étaient attendues :

- Ce sont les systèmes emboîtés qui présentent la moyenne la plus forte d'indices topographiques avec une valeur de 13.8
- Les systèmes incisés et stables présentent les moyennes les plus faibles d'indices topographiques avec une valeur de 11.3

Les moyennes des différents types sont statistiquement différentes quand leurs intervalles d'estimation ne se recoupent pas. C'est ici le cas pour presque tout les types hormis les types incisé et stable qui présentent des moyennes statistiquement équivalentes.

## 5. Conclusions

Le calcul des indices topographiques présente l'avantage de ne nécessiter qu'un modèle numérique de terrain relativement bien défini sur la zone d'étude. Il permet également de fournir une information distribuée sur la totalité du bassin versant, contrairement aux temps de concentration utilisés précédemment dans la classification hydrologique dont l'information se limite au linéaire de la rivière.

Les fortes valeurs d'indices topographiques permettent d'identifier correctement les zones humides potentielles dans la plupart des cas. Ceci a été vérifié en comparant les indices topographiques aux informations concernant les zones humides des cartes IGN et aux données des cartes pédologiques.

Nous avons également montré qu'il existe une relation entre les indices topographiques et les deux premiers niveaux de la classification géomorphologique.

## 6. Perspectives

### 6.1. Lien entre les typologies et la fonction de dénitrification

Pour examiner le lien existant entre les différentes typologies (géomorphologique, hydrologique, indices topographiques) et la fonction de dénitrification, il est essentiel de disposer de données de taux de dénitrification à l'échelle du bassin de la Seine. La seule approche nous permettant de réaliser une mesure intégrative de la dénitrification à l'échelle de tronçon de corridors fluviaux consiste à réaliser des bilans de nitrate. Ce travail va être réalisé à l'échelle du bassin de la Seine dans la continuité de ceux initiés, sur la Marne, par M. Sebilo lors d'une précédente étape du PIREN-Seine (Gaillard et al., 2002).

#### *Principe des bilans de nitrates*

La dénitrification correspond à l'écart qui existe entre la concentration en nitrate mesurée en rivière et la concentration qu'il devrait y avoir théoriquement s'il n'y avait pas dénitrification. Le coefficient de dénitrification peut alors s'exprimer de la manière suivante :

$$\text{rétention riparienne} = 1 - (\text{NO}_3^- \text{ mesuré} / \text{NO}_3^- \text{ théorique})$$

Plus la dénitrification est importante, plus le coefficient de rétention riparienne sera grand. Pour calculer ce coefficient il est nécessaire d'estimer la concentration en nitrate théorique.

Cette concentration théorique correspond au mélange entre l'eau provenant du compartiment superficiel et l'eau souterraine :

$$\text{NO}_3^- \text{ théorique} = cs * es + cb * eb$$

Il faut donc estimer à la fois les concentrations de base (cb) et de surface (cs) ainsi que la répartition des écoulements entre l'écoulement de base (eb) et l'écoulement de surface (es). Pour la détermination des concentrations, une première possibilité consiste à déterminer la concentration de surface à partir de l'usage du sol et la concentration de base en fonction des valeurs mesurées lors des surveys phréatiques. Dans ce cas de figure les concentrations seront constantes tout au long de l'année. Une seconde possibilité consiste à utiliser les sorties du couplage STICS-MODCOU (Gomez et al., 2002). De la même manière, pour la séparation des écoulements, on pourra choisir soit d'utiliser les formations géologiques présentes à la surface du bassin, soit les données du modèle MODCOU.

### ***Objectifs de cette comparaison***

Un des résultats attendus lors de l'étape de comparaison des taux de dénitrification et des indices topographiques est de déterminer si le contrôle principal sur la dénitrification dans les zones humides est la longueur de l'interface avec la rivière ou la surface de la zone humide. Lors de cette étape, il faudra faire intervenir le drainage agricole qui court-circuite les flux d'eau et qui ne peuvent pas ainsi être dénitrifiés lors de leur passage dans la zone humide. La comparaison des taux de dénitrification avec les différents types de la classification géomorphologique nous permettra quant à elle de déterminer si certains types ont une plus grande capacité dénitrifiante que d'autres.

## **6.2. Les indices empiriques fonctionnels**

Nous cherchons ici à spatialiser les secteurs de zones humides ripariennes qui présentent un potentiel relativement à la dénitrification. Dans ce cadre, sur la base des travaux de M. Brinson et al.(1994), nous avons recensé les différentes variables qui interviennent dans le processus de dénitrification. Dans le paragraphe suivant, nous présentons les principaux facteurs de contrôle de la dénitrification et nous proposons un indice fonctionnel empirique permettant de spatialiser les zones humides ripariennes en fonction de leur capacité à éliminer les nitrates.

### ***6.2.1 Facteurs influençant la dénitrification***

La dénitrification peut se produire si plusieurs facteurs sont réunis :

- une source de nitrates et un temps de résidence de ces nitrates dans la zone humide suffisamment long pour permettre le processus de dénitrification ;
- un milieu anaérobie : la présence d'oxygène inhibe le processus ; cependant, la dénitrification est très compétitive sur le plan énergétique vis-à-vis de la respiration ; la dénitrification pourra donc avoir lieu même en présence d'un peu d'oxygène ;
- un substrat carboné : la présence de carbone organique facilement assimilable (débris + litière) est indispensable à l'activité de bactéries dénitrifiantes ;
- un pH compris entre 4 et 11 : pH optimum entre 7 et 7.5 ; le pH exerce un contrôle sur les produits de la dénitrification ( pH > 6 → N<sub>2</sub> ; pH < 6 → N<sub>2</sub>O) ;
- une température comprise entre 0 et 60°C (température optimale entre 28 et 37°C) ;
- un potentiel d'oxydoréduction vers 200 à 250 mV.

Le **Tableau 3** présente les principaux facteurs à l'origine de la dénitrification.

**Tableau 3: tableau récapitulatif des différents processus influençant la dénitrification**

	Facteur de la dénitrification								rétention temporaire	Court-circuit
	présence de matière org	présence de NO3-	absence d'O2	température	présence de bactéries	pH	potentiel oxydo-red	temps de réaction		
le ruissellement		X								
le flux d'eau de sub-surface		X								
la fréquence des débordement	X	X	X							
l'occupation des sols des plateaux	X	X								
le pourcentage d'argile			X						X	
la texture du sol			X						X	
macrotopographie de la plaine d'inondation			X							
% de litière (surface de l'activité microbienne)	X	X			X					
la saison	X	X		X						
l'occupation des sols de la ZH	X	X							X	
drainage agricole			X							X

### 6.2.2 Définition d'indices permettant d'appréhender la dénitrification

#### Indice de disparition des nutriments dans les zones humides (Brinson et al., 1995)

Cet indice est extrait d'un guide permettant grâce à une approche hydrogéomorphologique d'évaluer les fonctions des zones humides riveraines. Il n'est pas applicable directement, il faut d'abord définir des zones humides de référence lesquelles vont servir de base à l'identification des fonctions et à la détermination des variables et des indicateurs appropriés à une région particulière. La seconde étape consiste à définir des standards de référence représentant le plus haut niveau de fonctionnement. Ce sont les conditions de ce standard de référence qui sont utilisées pour calibrer les modèles, de façon à ce que variables et index de la fonction soient égales à 1.

Cette fonction fait intervenir des critères relatifs aux apports de nitrates dans la zone humide à travers trois variables ( $V_{freq}$  : fréquence des inondations ;  $V_{surfin}$  : ruissellement et  $V_{subin}$  : flux d'eau de subsurface), à la création des conditions nécessaires à la dénitrification ( $V_{micro}$  : complexité de la microtopographie ;  $V_{microb}$  : surface de l'activité microbienne ;  $V_{sorpt}$  : propriétés d'absorption des sols) et au processus de rétention à long terme dans les végétaux ( $V_{btree}$  : secteur occupé par des arbres). Ainsi Brinson propose l'indice suivant :

$$\text{Indice de la fonction} = \frac{\frac{V_{Freq} + V_{Surfin} + V_{Subin}}{3} + \frac{V_{Micro} + V_{Microb} + V_{sorpt}}{3} + V_{Btree}}{3}$$

Cet indice sera adapté au bassin de la Seine et des résultats concernant le potentiel épurateur des zones ripariennes seront présentés l'année prochaine.

## 7. Bibliographie

- Beven, K. & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model or basin hydrology. *hydrol. Sci. Bull.*, **24**, 43-69.
- Brinson, M. M. (1993). A hydrogeomorphic classification of wetlands. US Army Corps of Engineers.
- Brinson, M. M., Kruczynski, W., Lee, L. C., Nutter, W. L., Smith, R. D. & Whigham, D. F. (1994). Developing an approach for assessing the functions of wetlands. In *Global wetlands : old world and new*, ed. W. J. Mitsch, Elsevier sciences, pp. 615-709.
- Brinson, M. M., Rheinhardt, R. D., Hauer, F. R., Lee, L. C., Nutter, W. L., Smith, R. D. & Whigham, D. F. (1995). A guidebook for application of hydrogeomorphic assessments to riverine wetlands. US Army Corps of Engineers.
- Crave, A. & Gascuel-Oudou, C. (1997). The influence of topography on time and space distribution of soil surface water content. *hydrological processes*, **11**, 203-210.
- Gaillard, S., Sebilo, M., Brunstein, D., N'Guyen-The, D., Grably, M., Fustec, E., Bendjoudi, H., Bravard, J. P., Amezal, A., Billen, G. & Mariotti, A. (2002). Typologie et fonctions des zones humides riveraines. Programme Piren-seine 1998-2001, rapport de synthèse.
- Gascuel-Oudou, C., Mérot, P., Crave, A., Gineste, P., Taha, A. & Zhang, Z. (1998). Les zones contributives de fonds de vallées : localisation, structure et fonctionnement hydrodynamique. In *Agriculture intensive et qualité des eaux*, ed. C. Cheverry, coll. Sci. Update, INRA, pp. 129-142.
- Gomez, E., Mignolet, C., Mary, B., Schott, C., Brunstein, D., Bornerand, C., Ledoux, E. & Benoit, M. (2002). Dynamiques agricoles et pollution nitrique diffuse : modélisation intégrée du transfert des nitrates sur le bassin de la Seine. *Rapport technique UMR CNRS*.
- Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration in small agricultural watersheds. *Civil engineering*, **10**, 362-.
- Mérot, P., Ezzahar, B., Walter, C. & Arousseau, P. (1995). Mapping waterlogging of soils using digital terrain models. *Hydrological processes*, **9**, 27-34.
- Mérot, P., Squidant, H., Arousseau, P., Hefting, M., Burt, T., Maitre, V., Kruk, M., Butturini, A., Thenail, C. & Viaud, V. (2003). Testing a climato-topographic index for predicting wetlands distribution along an European climate gradient. *Ecological modelling*, **3221**, 1-21.