

# SENEQUE and Co : Développements logiciels et améliorations des outils

Vincent Thieu, Gilles Billen, Marie Silvestre, Josette Garnier  
UMR Sisyphe 7619, UPMC-CNRS

[Vincent.Thieu@ccr.jussieu.fr](mailto:Vincent.Thieu@ccr.jussieu.fr)

[Gilles.Billen@ccr.jussieu.fr](mailto:Gilles.Billen@ccr.jussieu.fr)

[Marie.Silvestre@ccr.jussieu.fr](mailto:Marie.Silvestre@ccr.jussieu.fr)

[Josette.Garnier@ccr.jussieu.fr](mailto:Josette.Garnier@ccr.jussieu.fr)

1. Introduction – retour sur l’architecture du couplage Seneque-Riverstrahler .....	1
2. Le transport sédimentaire et le calcul des flux benthiques (modèle Rive).....	2
3. Gestion des réservoirs et de modélisation de leur fonctionnement biogéochimique (applicatif BarMan) .....	3
4. Préalcul d’écoulements spatialisés, ajustés sur des chroniques longues de débits observés (applicatif Hydrocal).....	5
5. Raffinements des bases de données Seneque.....	7
6. Bibliographie .....	10

## 1. Introduction

Au sein de ce qui est communément appelé la « boîte à outils » du PIREN-seine, le modèle du fonctionnement biogéochimique du réseau hydrographique Riverstrahler (Billen et al., 1994 , Billen & Garnier 1999) se subdivise en deux modèles complémentaires. Le modèle Hydrostrahler idéalisant le réseau hydrographique comme la combinaison de trois types d’objets (axes, bassins et milieux stagnants en connexion) et le modèle Rive représentant l’ensemble des processus microbiologiques. L’applicatif Seneque (Ruelland, 2004, Ruelland et al., 2007) s’attache à mettre en œuvre de manière spatialisé le modèle Riverstrahler en s’appuyant sur une bases de données géoréférencées et permet le calcul des variations géographiques et saisonnières du fonctionnement écologique du réseau hydrographique.

Cette note vise à expliciter les améliorations apportées au modèle Rive, notamment sur la prise en compte du transport sédimentaire et le calcul des flux benthiques. Seront également introduits, les outils complémentaires développés durant cette quatrième phase du PIREN, afin d’assumer le calcul d’une partie des contraintes d’entrée du modèle Riverstrahler. Un dernier point précisera les raffinements apportés à la base de données Seine.

## 2. Le transport sédimentaire et le calcul des flux benthiques (modèle Rive)

La précédente version du modèle Rive intégrait le transport sédimentaire en considérant une sédimentation nette, c'est-à-dire diminuée d’un terme d’érosion potentielle. Le benthos étant alors considéré comme une unique couche d’accumulation particulière où la dégradation du carbone organique entraînait la diminution de l’oxygène et la création d’une zone anaérobie. L’importance de cette couche conditionnait les flux de re-minéralisation des différents nutriments (NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>)

vers la colonne d'eau. La principale limite de cette approche était de ne pas introduire de variables strictement benthiques conservant la quantité et la qualité du dépôt sédimentaire. Le modèle ne rendait alors compte ni de l'accumulation occurrente durant la période estivale, ni de l'importante remise en suspension en début de période de crues.

L'objectif était donc de concevoir un modèle générique représentant et conservant la dynamique des variables benthiques en interaction avec les différentes variables de la colonne d'eau. Ce modèle établit une représentation du sédiment en deux couches (Thouvenot et al., en révision), la première (supérieure) correspond à un sédiment fluide remobilisable, où se déroulent les phénomènes de croissance algale, et la seconde (inférieure), résultant d'une compaction de la première, n'est pas érodable et ne peut accueillir de développements algaux (Figure 1). De nouvelles variables benthiques ont également été introduites afin de i/ décrire les différents processus benthiques (dégradation, nitrification, dénitrification), ii/ permettre le calcul des flux benthiques résultants, iii/ conserver les caractéristiques du dépôt sédimentaire tout au long de la modélisation.

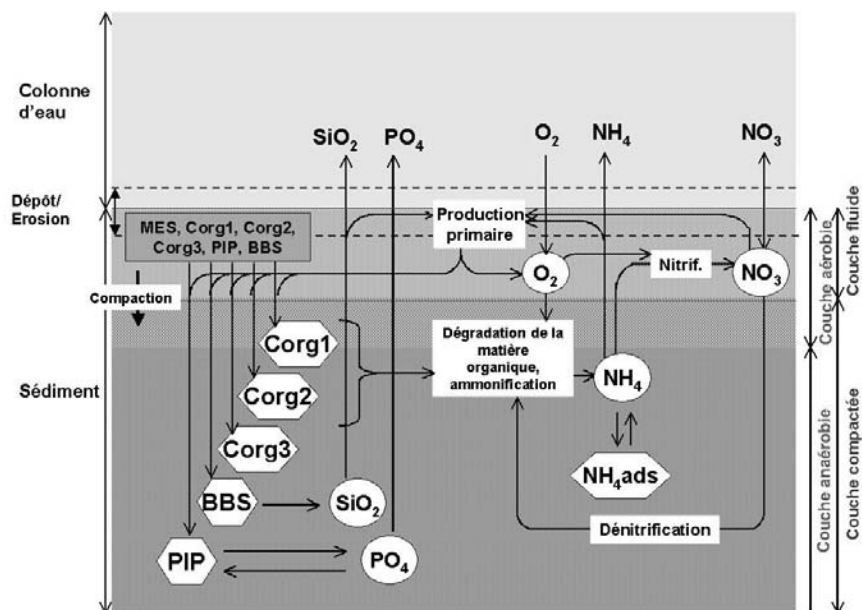


Figure 1: Processus pris en compte dans le modèle benthique;  $\text{Corg 1, 2 et 3}$  se rapportent aux 3 classes de biodégradabilité du carbone organique,  $\text{SDB}$ : Silice dissoute biogénique;  $\text{BBS}$ : Silice biogénique;  $\text{PIP}$ : Phosphore inorganique particulaire;  $\text{PO}_4$ : Phosphore inorganique dissout;  $\text{O}_2$ : Oxygène dissout;  $\text{NH}_4$ : Ammonium dissout;  $\text{NH}_{4\text{ads}}$ : Ammonium adsorbé sur le sédiment;  $\text{NO}_3$ : Nitrates;  $\text{nitrif.}$ : processus de nitrification;  $\text{Production primaire}$ .

L'implémentation de ce modèle benthique dans Rive assure la continuité des processus se déroulant à l'interface eau – sédiment. La validation est réalisée à partir de deux types de données expérimentales disponibles : des prélèvements dans le sédiment (Figure 2a) et des mesures effectuées à l'aide de cloches à sédiment (Figure 2b).

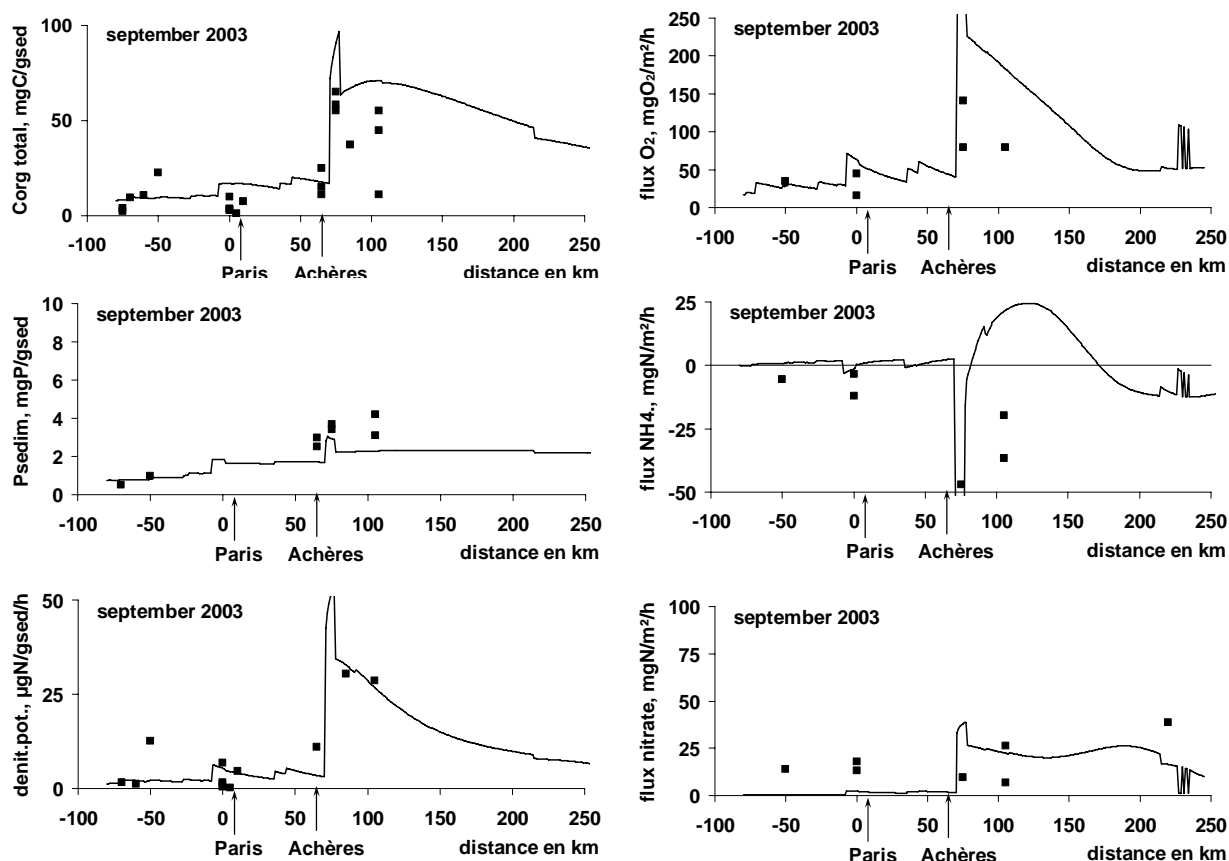


Figure 2: validation du modèle benthique implémenté dans Rive, à l'échelle de l'axe principal de la Seine (de 100 km en amont et jusqu'à 250 km en aval de Paris). a) mesures du carbone organique total, du phosphore et du potentiel de dénitrification présent dans le sédiment (à droite de haut en bas). b) mesures des flux d'oxygène, d'ammonium et de nitrate à partir de cloche à sédiments (à gauche de haut en bas). Par convention, les flux positifs sont orientés vers le sédiment et les négatifs vers la colonne d'eau.

La confrontation des profils estivaux calculés avec les mesures disponibles de composition des sédiments et de flux benthiques montre une bonne représentation du transport sédimentaire et des processus occurrents à l'interface eau-sédiment. La fonction de dénitrification bien restituée par le modèle, a également permis de mettre en évidence l'importance relative de la fonction du benthos dans les bilans d'azote réalisés à l'échelle du réseau hydrographique de la Seine.

### 3. Gestion des réservoirs et de modélisation de leur fonctionnement biogéochimique (applicatif BarMan)

L'idéalisation du réseau hydrographique par Seneque-Riverstrahler, permet de considérer les réservoirs comme un type d'objet particulier. Cette représentation distingue alors 2 zones d'influence, le point de prise (amont) où le réservoir dérive une certaine quantité d'eau et la restitution (aval) où il est nécessaire d'intégrer d'une part le volume restitué mais aussi la qualité de l'eau modifiée par un séjour plus ou moins long (Garnier et al 2000). L'intégration des processus se déroulant dans ces milieux stagnants passe notamment par le dimensionnement de deux variables, le taux de renouvellement et la variation de la profondeur moyenne qui conditionne les activités de photosynthèse et l'importance des flux benthiques. Pour ce faire, trois modèles spécifiques, BarMan, BarSe et BarAu, respectivement acronymes de Barrage Marne, Seine et Aube, permettaient de simuler la qualité de l'eau restitué en se basant d'une part, sur une relation « volume-cote » empirique, afin de calculer le niveau d'eau dans le réservoir, et d'autre part sur un bilan hydrique permettant d'obtenir le temps de séjour.

Le nouveau moteur de calcul BarMan, cette fois ci acronyme de « Barrage Manager » repose sur une philosophie similaire, notamment en ce qui concerne l'utilisation d'une relation entre le volume et le niveau d'eau dans le réservoir, l'établissement d'un bilan hydrique et l'hypothèse faite d'un réservoir considéré comme un mélangeur parfait (Guillon, 2006, Thieu et al. 2006). C'est en effet la généricité de l'applcatif qui est ici innovante, puisqu'il permet de prendre en compte différents types de configurations (Figure 3), connexions en série ou en dérivation, avec la possibilité d'individualiser des subdivisions au sein du réservoir.

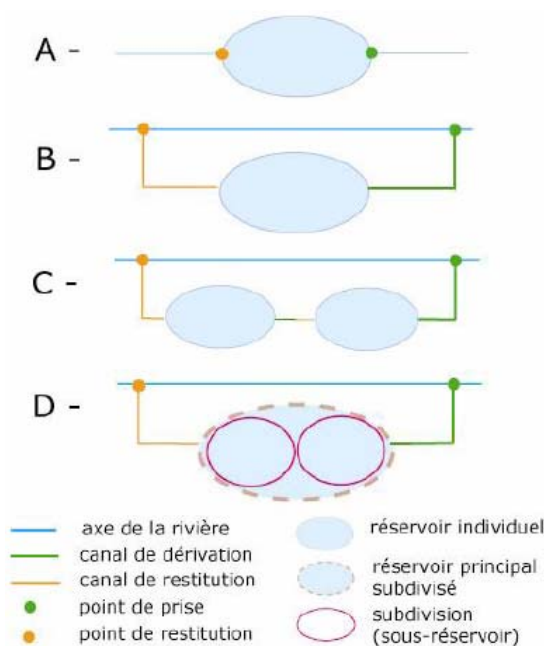


Figure 3: configurations des différentes connexions de l'objet réservoir pris en compte par le modèle BarMan. a) au fil de l'eau (ex : pannecière), b) en dérivation simple (ex : barrage de la seine), c) en dérivation combinée (ex : Amance et Auzon-Temple), d) en subdivisions morphologiques (ex : Der et Champaubert)

Suivant un itinéraire de modélisation défini, l'utilisateur ajuste en premier lieu la morphologie de son réservoir (Figure 4), qui permettra de créer une relation « volume-cote » spécifique.

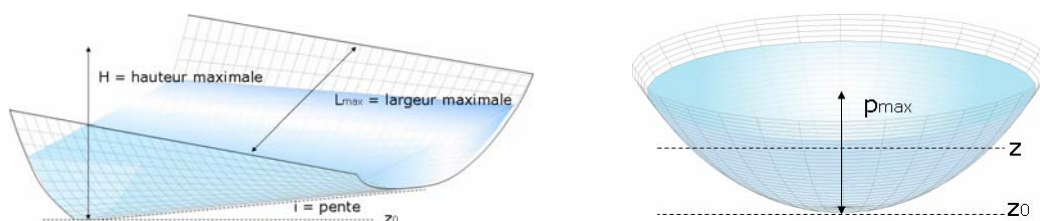


Figure 4: Morphologies définies dans le modèle Barman et variables de paramétrage associées. Morphologie en demi coupole à droite, et parabolique à gauche.

Les étapes suivantes permettent d'établir un bilan hydrique, d'intégrer à une résolution journalière la qualité de l'eau dérivée dans le réservoir et, en s'appuyant sur les derniers raffinements apportés au modèle Rive (cf. 2.), de calculer la qualité de l'eau restituée.

La validation du modèle BarMan a été réalisée sur le réservoir de la Marne (sans subdivision morphologique) sur la période 1993 – 2003 (Figure 5)

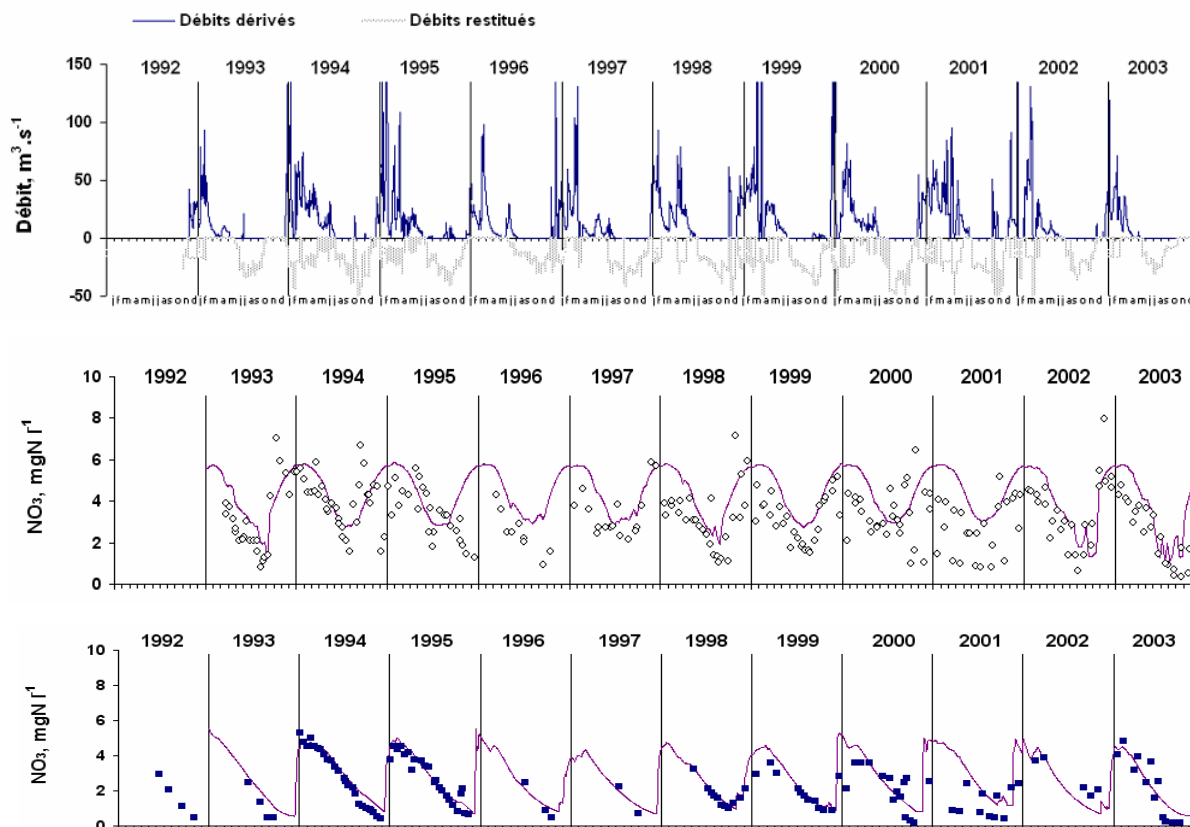


Figure 5: De haut en bas : simulations pour le réservoir de la Marne sur la période 1992-2003 des variations annuelles a) des débits dérivés (positifs) et restitués (négatifs), b) des concentrations en nitrates à la prise (simulation amont Seneque-Riverstrahler), c) des concentrations en nitrates à la restitution (simulation BarMan).

Les simulations présentées ci-dessus pour les nitrates (Garnier et al., 2007) soulignent, en conformité avec les données de validations, le rôle important des réservoirs notamment pour la dénitrification. L'état actuel des développements de l'appliquatif BarMan, permet de répondre aux objectifs initiaux de modélisation du fonctionnement biogéochimique et d'évaluation de l'impact potentiel de ces ouvrages sur les rivières aval. La diversité des travaux, menés de front sur plusieurs modules de l'appliquatif Seneque durant cette quatrième phase du PIREN, n'a pas permis de réaliser un couplage complet (direct) entre les deux applicatifs, mais cette évolution s'inscrit dans les perspectives de développement futures.

#### 4. Précalcul d'écoulements spatialisés, ajustés sur des chroniques longues de débits observés (appliquatif Hydrocal)

Dans son fonctionnement classique le modèle Riverstrahler intègre le calcul des écoulements via le module Hydrostrahler, assimilé à un modèle pluie-débit simple à deux réservoirs « sol » et « aquifère », alimenté par des données journalières de précipitation et d'évapotranspiration. Cinq paramètres hydrologiques, correspondants à la saturation du sol, l'infiltration vers la nappe, le niveau initial de cette dernière, et les écoulements respectivement superficiels et phréatiques sont alors fixés a priori en fonction de la lithologie. La validation systématique de ces écoulements a montré que à l'inertie importante des aquifères de la Seine, qui conditionnent pour plusieurs années la contribution des écoulements phréatiques, pénalise les simulations notamment durant la période d'étiage. Il était donc nécessaire de prendre en compte l'antériorité hydrologique du bassin et d'optimiser le calage de ces paramètres en fonction d'observations pluriannuelles.

Hydrocal (Christophe S. & Billen G., 2006) utilise une procédure itérative pour optimiser le calage des paramètres hydrologiques et calculer des écoulements superficiels et phréatiques spatialisés, à partir de séries pluriannuelles de débits journaliers en diverses stations, et des données météorologiques correspondantes (Figure 6).

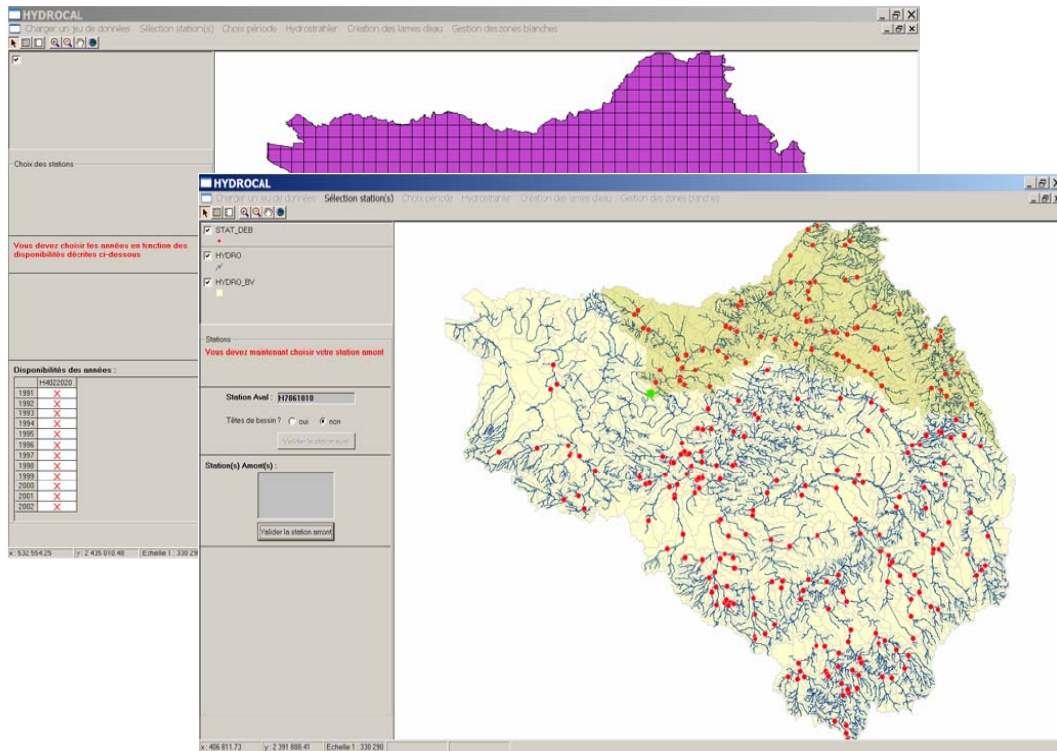


Figure 6: Interface graphique de l'appli Hydrocal appliquée au bassin de la Seine

L'espace à couvrir est tout d'abord divisé en zones, représentant des portions de bassins délimitées chacune par une station aval et un certain nombre de stations amont. Ces zones peuvent représenter des sous bassins de tête (définis seulement par une station aval), ou des portions aval de bassins (délimités en amont par une ou plusieurs stations). La résolution spatiale de la couverture finale d'écoulements dépendra donc du choix de l'utilisateur ou de la disponibilité des données fiables de débits. Pour chaque zone ainsi définie, on calcule la moyenne spatiale des pluviométries et ETP journalières à partir des bases météo de Senegal, pour toute la période pluriannuelle définie. Le modèle Hydrostrahler est alors mis en oeuvre avec ces données en entrée, en faisant systématiquement varier les paramètres hydrologiques dans une gamme raisonnable.

Les sorties du modèle, en termes d'écoulement spécifique total décadaire (en l/s/km<sup>2</sup>) sont comparées aux valeurs observées, déduites des mesures de débit à la station aval, éventuellement diminuées des valeurs mesurées dans les stations amont si la zone n'est pas un bassin de tête, et rapportées à la surface de la zone concernée. On ne tient donc pas compte dans cette comparaison d'un éventuel délai de propagation entre les stations amont et aval. Il convient donc que ce délai soit toujours inférieur à la décennie. A l'issue de ces « runs » systématiques, on retient le jeu de paramètres et la série d'écoulements calculés qui maximisent le critère de « Nash » relatif aux valeurs calculées et observées des débits spécifiques décadaires sur la période considérée (Billen G. & Christophe S., 2005).

A titre d'exemple, la figure 7 présente la simulation des écoulements spécifiques de l'inter-bassin de la Seine en amont de Paris et en aval de l'Yonne et des grands Lacs de Champagne.

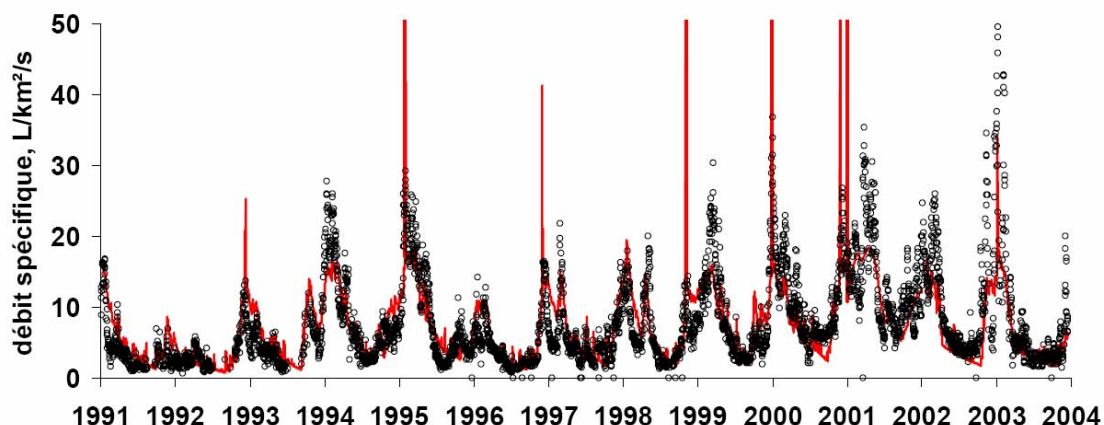


Figure 7 : validation des écoulements spécifiques calculés par Hydrocal en amont de Paris sur la période 1991 – 2004

Les simulations d'écoulements spécifiques spatialisés et ajustés sur des chroniques longues de débits mesurés, assurent une représentation plus fine des écoulements, notamment en période d'étiage, et permet d'assumer des successions d'années hydrologiquement très contrastées. La progression logique du calcul d'amont en aval et la résolution définie pour simuler ces écoulements, doit dans la mesure du possible, rester cohérente avec l'homogénéité hydrogéologique du bassin. Sur ce point la précision du calcul est assujettie à la disponibilité des mesures pluriannuelles de débits et leur répartition spatiale sur le réseau.

## 5. Raffinements des bases de données Seneque

En complément des développements logiciels nécessaires autour du modèle Seneque-Riverstrahler, un travail important a été réalisé sur les bases de données utilisées à l'échelle de la Seine.

Tout d'abord en ce qui concerne la représentation de l'usage du sol sur le bassin et la prise en compte des apports diffus qui en résultent. Les précédentes versions du jeu de données Seine discrétisaient l'occupation du sol en huit classes (Figure 8.a) où la classe « terres arables » représentaient à elle seule plus de 52% de la surface totale du bassin. Ce manque de finesse conduisait à considérer ces terres comme homogènes en terme de pollution diffuse.

En concertation avec les agronomes de l'INRA Mirecourt le découpage proposé lors du projet sur l'« influence du changement climatique – GICC Seine » (Ducharne et al., 2005) à été retenu pour individualiser 12 classes homogènes de terres arables en fonction des pratiques agricoles (Figure 8.b). Une segmentation similaire a été effectuée sur la classe « prairie » (environ 10 % de la superficie totale du bassin) en retenant trois types de conduites de prairies différentes (Figure 8.c).

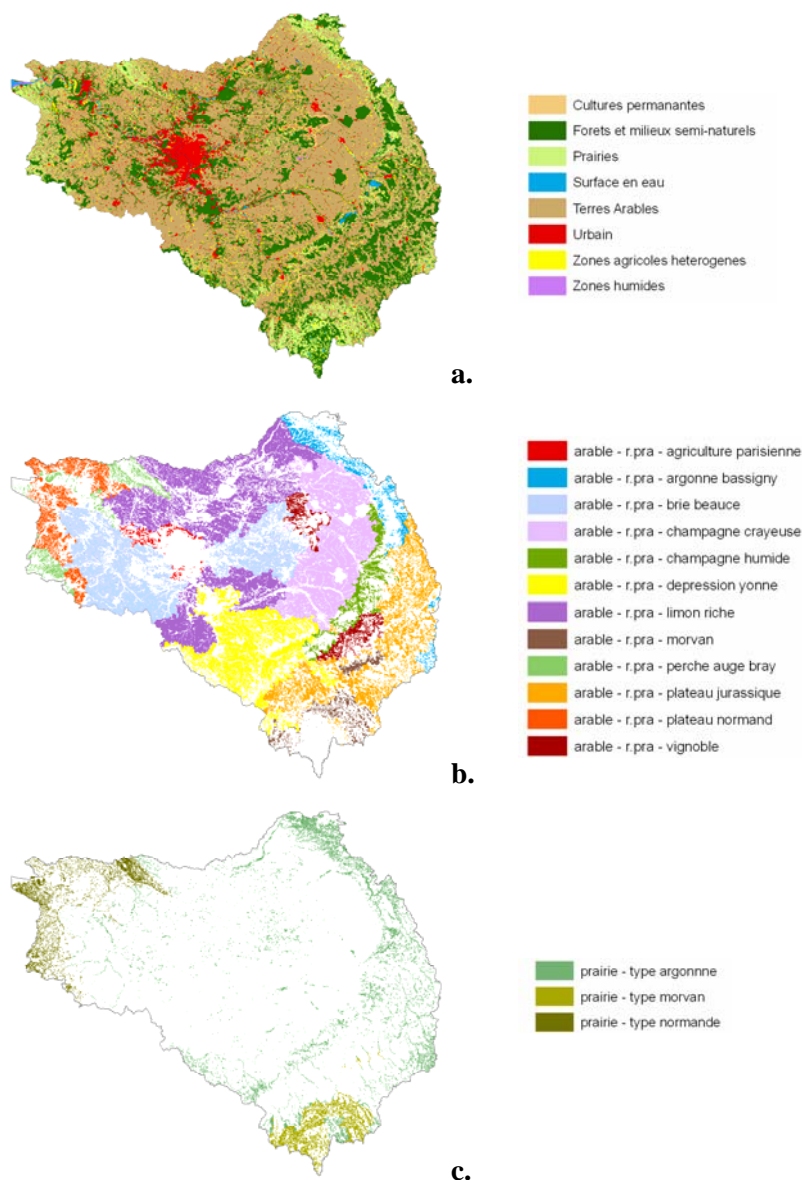


Figure 8 : a) CLC 2000 discrétisée en 8 classes d'occupation du sol, b) représentation des « terres arables » segmentées en 12 classes homogènes, c) représentation des « prairies » segmentées en 3 classes homogènes.

L'intérêt de restituer l'hétérogénéité de l'occupation du sol et la variabilité des pratiques agricoles sur l'ensemble du bassin est d'une part, d'assurer une représentation plus fine des apports diffus, mais aussi de pouvoir spatialiser l'application de mesures agro-environnementales dans le cadre de simulations prospectives

L'applicatif Seneque permet maintenant de considérer un nombre de classe d'usage du sol variable, et ce premier découpage pourra potentiellement être révisé. Il est cependant nécessaire de renseigner systématiquement, et pour chaque classe, les concentrations en MES, carbone et nutriments, conférées aux eaux de lessivage par l'interaction eau-sol. Ce travail a été réalisé à partir d'études locales, et extrapolé à l'ensemble des classes considérées homogènes. Un couplage avec les résultats de simulations STICS-MODCOU basées sur une segmentation de l'espace agricole similaire est également envisagé afin d'enrichir les concentrations superficielles et phréatiques déjà relevées.

La base de données Seneque bénéficie également des résultats des travaux menés dans la 4<sup>ème</sup> phase du PIREN sur la délimitation et la caractérisation des zones humides riveraine (ZHR). Associé à l'inventaire typologique des ZHR, un indice synthétique de rétention des nitrates et de régulation des

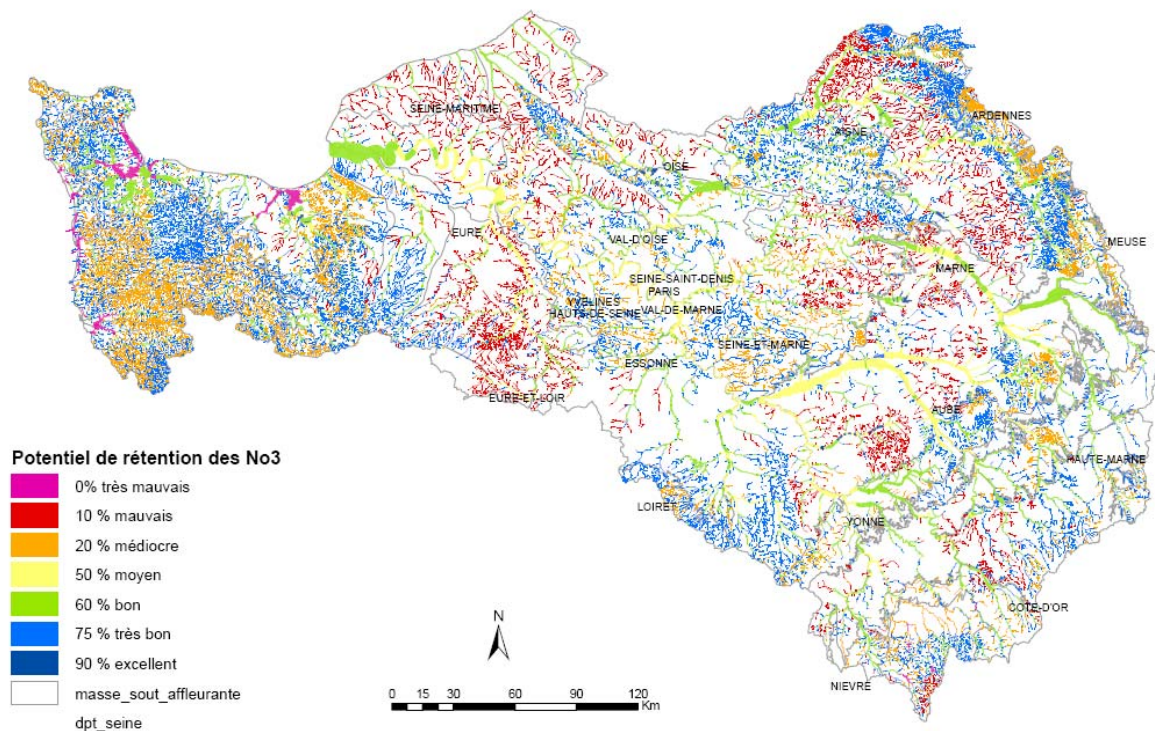


crues a été défini pour chaque classe typologique (Gaillard et al, 2005). L'estimation de cette rétention riparienne dans Seneque s'opère à l'échelle de chaque bassin versant élémentaire, où le potentiel de rétention est estimé au prorata des superficies et en fonction des capacités de rétention définies pour chacune des classes présentes (Tableau 1 et Figure 9).

Tableau 1 : Variation de l'indice crue et nitrate en fonction de la classification hydrogéomorphologique des zones humides riveraines dans le bassin de la seine

Emboîté à revêtement organ./mixte	0.9
Emboîté à revêtement minéral	0.5
Superposé à revêtement mixte/organ.	0.6
Superposé à revêtement minéral	0.6
Incisé à revêtement Holocène	0.75
Incisé sans revêtement	0.2
Stable	0.1

Figure 9 1 : distribution des ZHR selon leur potentiel de rétention



Le travail réalisé sur les ZHR étant encore en cours par les équipes du PIREN, un complément de précision sur les capacités de rétention associées aux différentes classes hydrogéomorphologiques de la typologie sera certainement apporté et viendra alimenter directement la base de données Seneque.

Concernant les apports ponctuels, un travail important à également été réalisé afin de standardiser les hypothèses faites sur les conversions nécessaires pour une intégration homogène des données de l'Agence de l'Eau dans les modèles Prose et Seneque. (cf. Note sur le calcul des apports ponctuels, P. Servais et G. Billen, rapport PIREN 2006).

## 6. Bibliographie

Billen G., Garnier J. & Hanset Ph. (1994). Modelling phytoplankton development in whole drainage networks: the RIVERSTRAHLER model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia*, 289:119-137.

Billen G. & Garnier J. (1999). Nitrogen transfers through the Seine drainage network: a budget based on the application of the Riverstrahler model. *Hydrobiologia*, 410: 139-150.

Billen G. & Christophe S. (2005) Une procédure pour le calcul systématique des écoulements spécifiques à partir des débits. *Rapport PIREN 6 p.*

Christophe S. & Billen G. (2006). Applicatif Hydrocal, Notice d'utilisation. *Rapport PIREN 14 p.*

Ducharne, Théry, Billen, Benoît, Brisson, Garnier, Kieken, Ledoux, Mary, Mignolet, Mermet, Poux, Sauboua, Schott, Viennot, Abu Alkhair, Baubion, Curie, Ducos, Gomez, Lebonvallet, Olive, Sicart (2004). Projet GICC-Seine, Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine. *Rapport Final 61 p.*

Gaillard S., Bendjoudi H., Brunstein D., Amezal A., Théry S., Bravard JP., Abou Dagga N., Joyeux E. (2005). Les zones humides riveraines dans le bassin de la Seine : délimitation, caractérisation hydrogéomorphologique et évaluations fonctionnelles. *Rapport PIREN 16 p.*

Guillon Th. (2006). Modélisation du fonctionnement biogéochimique des réservoirs. Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie. Parcours Hydrologie-Hydrogéologie. Univ. Paris 6. 51p.

Garnier, J., Leporcq, B., Sanchez, N. and Philippon, (1999). Biogeochemical mass-balances (C, N, P, Si) in three large reservoirs of the Seine Basin (France). *Biogeochemistry* 47 : 119-146.

Garnier, J., Billen, G., Sanchez, N. and Leporcq, B., 2000. Ecological functioning of the Marne dam (upper Seine basin, France). *Regulated rivers: Research & Management, Regul. Rivers: Res. Mgmt.* 16: 51-71.

Garnier J., Thieu V., Billen G., Thouvenot M., Guillon T. & Amont-Moreau D. (2007). Fonctionnement écologique du réservoir Marne (1993-2005). *Rapport IIBRBS 39 p.*

Ruelland, D., 2004. Seneque, logiciel SIG de modélisation prospective de la qualité de l'eau. *Revue Internationale de Géomatique*, 14: 97-117.

Ruelland D., Billen G., Brunstein D. & Garnier J. (2007). SENEQUE 3: a GIS interface to the RIVERSTRAHLER model of the biogeochemical functioning of river systems. *Ecological Modelling* (in press)

Servais P. & Billen G. (2006). Note sur le calcul des apports ponctuels à prendre en compte dans les modèles Prose et Sèneque à partir des données disponibles sur les rejets STEPs. *Rapport Piren 10 p.*

Thouvenot, M. (2005). Modélisation du flux de nutriments à l'interface eau-sédiment dans le continuum aquatique. Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie. *Parcours Hydrologie-Hydrogéologie. Univ. Paris 6. 48pp*

Thouvenot, M., Billen, G., Garnier, J. Modelling nutrient exchange at the sediment - water interface of River Systems. *Journal of Hydrology (under review)*.

Thieu V., Guillon Th. Billen G, Garnier J. (2006). Applicatif BARMAN. Notice d'utilisation. 32 p.