

Couplage de la chaîne Stics/Modcou avec Seneque 3

Denis Ruelland¹ et Gilles Billen²

¹ CNRS, UMR6590 ESO, Université du Maine (denis.ruelland@univ-lemans.fr)

² CNRS, UMR7619 Sisyphé, Université Pierre et Marie Curie (billen@ccr.jussieu.fr)

Avec la collaboration d'Eric Gomez (Ecole de Mines de Paris, CIG).

1. Introduction	19
2. Prise en compte des apports diffus dans Seneque 3	20
2.1. Présentation générale	20
2.2. Module Apports Diffus de Seneque 3	20
2.3. Interfaces de pilotage des contraintes d'apports diffus	21
3. Protocole de récupération des résultats de Stics/Modcou en vue de l'injection dans Seneque	21
3.1. Discrétisation spatiale	21
3.2. Agrégation de l'information	22
3.3. Discussion des résultats	23
4. Conclusion	24
5. Bibliographie	25

1. Introduction

Au cours du demi siècle écoulé, la principale cause de dégradation de la qualité des eaux de surface a tout d'abord résidé dans l'accroissement des apports ponctuels d'eaux usées urbaines et industrielles, lié davantage à la généralisation du tout à l'égout qu'à l'accroissement de la population. Les progrès réalisés ou en voie de réalisation dans l'épuration de ces eaux font que les émissions diffuses de polluants, liés aux pratiques agricoles ou à la dispersion atmosphérique de certaines substances, constituent maintenant et pour les décennies à venir la cause première de 'non atteinte d'un bon état écologique'.

Le perfectionnement des outils de connaissance et de gestion développés dans le programme PIREN-Seine pour relier la qualité de l'eau à l'activité humaine dans le bassin versant implique donc de mieux décrire les apports diffus et la manière dont ils dépendent de cette activité. Dans ce cadre, plusieurs modèles existants sont destinés à être associés pour permettre la modélisation du transfert des nitrates au regard de l'évolution des pratiques agricoles sur le bassin de la Seine. Les fonctionnalités de chacun des modèles sont intégrées dans une chaîne de modélisation. Ainsi, le modèle STICS développé à l'INRA (Brisson et al., 1998) simule le flux de nitrates à la base de la zone racinaire ; le modèle hydrologique MODCOU développé à l'Ecole des Mines de Paris (Ledoux, 1980 ; Ledoux et al., 1984) simule les écoulements superficiels et souterrains ; le modèle NEWSAM (Ecole des Mines) simule le transport de matière dissoute dans le domaine souterrain ; enfin, le modèle RIVERSTHALER (Billen et al., 1994 ; Garnier et al., 1995), dont l'application à la Seine est communément appelée SENEQUE, se charge de simuler le transfert d'azote dans le réseau hydrographique.

Si la chaîne de modélisation Stics/Modcou/Newsam a connu un développement important d'intégration ces dernières années (Gomez et al., 2001 ; Gomez et al., 2002), un effort logiciel restait nécessaire pour coupler les résultats de cette chaîne de transfert de nitrates au modèle Riverstrahler en vue de la simulation du transport en rivière.

Ce rapport présente quel dispositif a été mis en place dans le logiciel Seneque 3 (Ruelland et Billen, 2002 ; Ruelland, 2003a ; Ruelland, 2003b) pour accueillir les résultats de modèles comme Stics/modcou et pour simuler les concentrations en apports diffus, notamment nitriques, quand de tels résultats ne sont pas disponibles. Nous étudierons ensuite le protocole de couplage entre la chaîne

Stics/Modcou et le modèle Seneque. La discussion des premiers résultats nous conduira à envisager les améliorations à apporter au système mais aussi les nouvelles perspectives qu'il ouvre.

2. Prise en compte des apports diffus dans Seneque 3

2.1. Présentation générale

Le modèle SENEQUE est basé sur une représentation de l'hydrologie qui distingue une composante superficielle et une composante profonde du flux hydrique en provenance de chaque bassin versant élémentaire. La prise en compte des apports diffus est alors entièrement définie par le choix, pour chacune des variables de qualité du modèle, et pour chaque entité spatiale du modèle, d'une valeur de concentration correspondant à ces deux composantes du débit.

Plusieurs types d'approche peuvent être utilisées pour définir ces concentrations. La première consiste à les renseigner directement sur base d'observations; une telle approche ne possède aucun pouvoir prédictif propre. La seconde approche consiste dans l'utilisation d'une relation empirique permettant de relier ces concentrations à une propriété, définie sous forme d'une couverture spatiale, caractérisant les sols et leur usage. La troisième approche consiste à utiliser en entrée du modèle les sorties d'un autre modèle décrivant la phénoménologie fine des processus qui confèrent leur concentration aux eaux superficielles et phréatiques. Sous sa version 3.1, l'applicatif SENEQUE offre à l'utilisateur le choix entre ces trois approches.

2.2. Module Apports Diffus de Seneque 3

L'objectif général est de permettre à l'applicatif de construire le fichier d'apports diffus (*.ADF) requis par le moteur Sénèque à partir de diverses couvertures relatives à la géologie, à l'usage du sol et aux zones humides riveraines, quelle qu'en soit la nature ou l'origine.

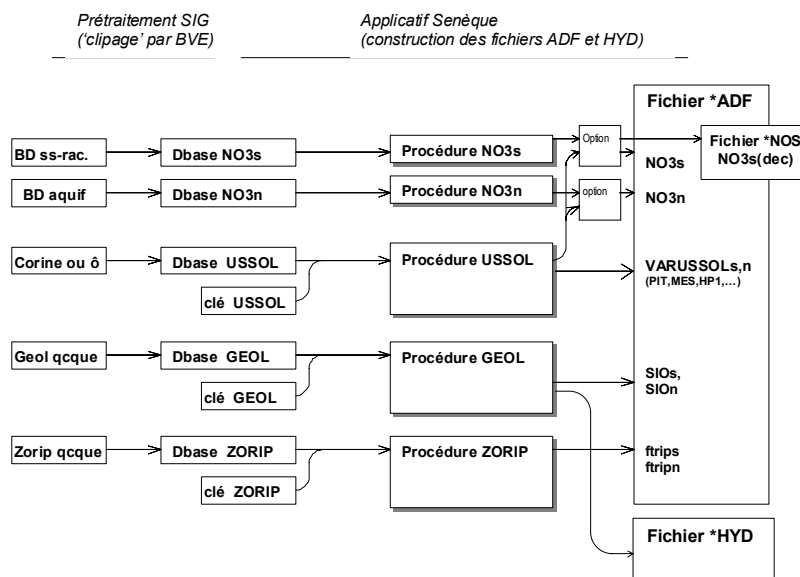


Figure 1 : Prise en compte des apports diffus dans Seneque 3

En prétraitement, on formate les trois couvertures spatiales requises sous forme de tables attributaires indiquant pour chaque bassin élémentaire du domaine modélisé la fraction de surface (ou de linéaire pour les zones humides riveraines) de chaque catégorie.

On joint à chacune de ces tables attributaires un fichier-clé qui explicite la traduction en terme d'apports diffus de chacune de ces catégories.

L'applicatif combine l'information de ces tables attributaires et de ces fichiers-clés pour construire les fichiers ADF requis par la structure spatiale du découpage choisi.

En outre, pour les nitrates, une option permet de rechercher les données relatives aux concentrations des eaux superficielles et/ou des eaux phréatiques dans une base prétraitée renseignant ces informations par bassin élémentaire, et issue soit de données observées, soit de résultats d'un autre modèle.

2.3. Interfaces de pilotage des contraintes d'apports diffus

Avec le logiciel Seneque 3, le paramétrage des contraintes d'apports diffus est effectué de deux manières au sein d'un projet de modélisation. Pour un scénario donné, l'utilisateur peut choisir une année de référence qui va permettre la sélection de l'ensemble des variables de contraintes pour la période considérée : les informations d'occupation du sol et de zones humides riveraines relatives à cette année sont donc automatiquement sélectionnées par le système (la géologie étant indépendante de l'année de considération). L'utilisateur peut aussi accéder au paramétrage des contraintes d'apports diffus via une interface dédiée (Figure 2). Cette interface rappelle les fichiers qui ont été mobilisés pour un éventuel scénario de référence du projet de modélisation (ou premier scénario) et propose l'ensemble des fichiers disponibles de la base qu'ils concernent l'occupation du sol ou les caractéristiques de zones humides. Enfin, si ce genre d'information existe dans la base, l'appliquatif propose une option pour sélectionner des fichiers relatifs aux concentrations superficielles phréatiques (pas de temps annuel) et/ou superficielles (pas de temps décadaire). Comme l'occupation du sol, les zones humides ripariennes ou la géologie, ces fichiers décrivent l'information pour chaque bassin versant élémentaire Seneque.

Paramètres de rejets diffus

Occupation du sol :

Fichier de référence : usol1991

Autres fichiers : usol1991, usol1992, usol1993, usol1994

Commentaires :
Occupation du sol 1993 - Source Corine Land Cover (IFEN)

Nitrates phréatiques donnés (optionnel) :

Fichier de référence :

Autres fichiers : no3n1991, no3n1992, no3n1993, no3n1994

Commentaires :
Concentrations annuelles en nitrates phréatiques par sous-bassin Seneque (μM) pour l'année 1993 - Sorties du modèle Modcou/Stics (PIREN Seine)

Zones Humides Ripariennes :

Fichier de référence : zori1991

Autres fichiers : zori1996, zori1997, zori1998, zori1999

Commentaires :
Zones humides ripariennes 1998 - Source PIREN-Seine

Nitrates sous-racinaires donnés (optionnel) :

Fichier de référence :

Autres fichiers : no3s1992, no3s1993, no3s1994, no3s1995

Commentaires :
Concentrations décadaires en nitrates sous-racinaires par sous-bassin Seneque (μM) pour l'année 1993 - Sorties du modèle Modcou/Stics (PIREN Seine)

OK Annuler

Figure 2 : Paramétrage des contraintes d'apports diffus avec Seneque 3

Ainsi, l'utilisateur peut paramétrer à loisir les informations pour utiliser le modèle et construire les scénarios qui l'intéressent.

3. Protocole de récupération des résultats de Stics/Modcou en vue de l'injection dans Seneque

3.1. Discrétisation spatiale

La base de données associée au logiciel Seneque 3 (Ruelland, 2003a ; Ruelland, 2003b) repose sur de nombreux objets spatiaux. Parmi ceux-ci, le réseau hydrographique constitue le socle sur lequel s'articule l'ensemble de l'information. Il est composé d'une couverture linéaire représentant les tronçons du réseau et d'une couverture surfacique associée représentant les surfaces directement drainées pour chaque tronçon du réseau. Les entités polygonales de cette couverture surfacique associée sont appelées bassins versants élémentaires (BVE) : à chaque bassin versant élémentaire correspond un tronçon du réseau et inversement.

Dans le cas de la chaîne Stics/Modcou, le mode de représentation spatiale est plus complexe du fait du couplage entre les différents modèles. La modélisation du transport des nitrates se décompose en plusieurs étapes (Gomez *et al.*, 2002) : 1) le modèle agronomique STICS a été adapté pour une utilisation spatialisée en unités de simulation pour lesquelles sont renseignées des informations géographiques et temporelles sur les types de sols, les successions culturales et les itinéraires techniques ; 2) les flux de nitrates, simulés avec STICS au cours du temps, et sur chaque unité de simulation, sont alors distribués sur les quelques 35000 mailles de la couche de surface du modèle hydrologique puis transférés dans la zone non-saturée avec le modèle MODCOU ; 3) enfin, les flux de nitrates produits à la base de la zone non-saturée servent d'entrée au modèle de transport en aquifère (NEWSAM). En conséquence, la structure en mailles carrées emboîtées utilisée pour simuler les écoulements permet de discrétiser les concentrations simulées en nitrates sous-racinaires et phréatiques. C'est ce maillage qui sera retenu pour le couplage de la chaîne Stics/Modcou avec le modèle Seneque. Des concentrations décennales en nitrates sous-racinaires (No3s(d)) et annuelles en nitrates phréatiques (No3n) ont donc été simulées pour chaque maille sur une période de 15 ans sur la Marne en vue de leur utilisation par Seneque 3.

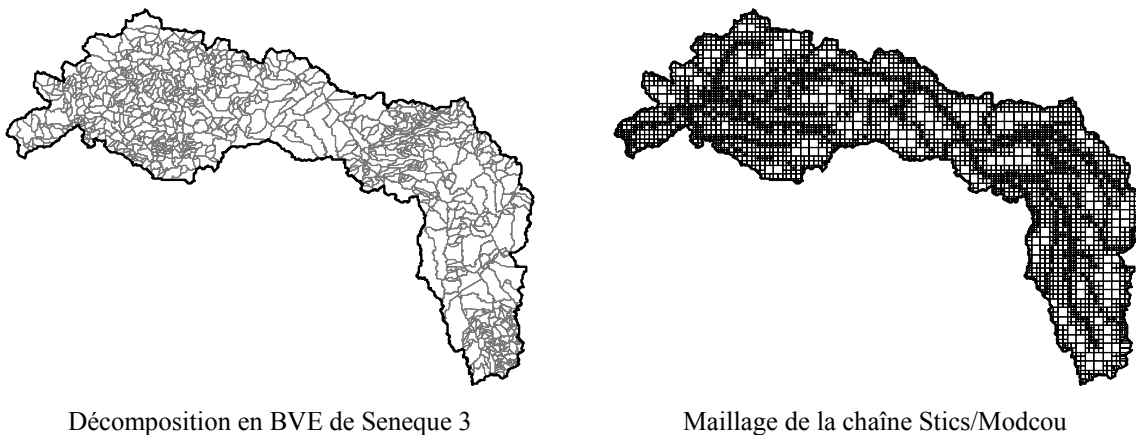


Figure 3 : Discretisation spatiale pour Seneque et la chaîne Stics/Modcou

L'étape suivante consiste alors à combiner les objets spatiaux des deux modèles de manière à agréger l'information pour chaque bassin versant élémentaire Seneque.

3.2. Agrégation de l'information

La compatibilité des représentations spatiales des deux modèles est possible pour deux raisons. D'une part, les deux représentations expriment les phénomènes de manière continue sur une zone commune. D'autre part, elles sont parfaitement superposables dans un Système d'Information Géographique du fait de leur géoréférencement.

La démarche consiste donc à « mêler » graphiquement les entités des deux représentations par le recours à un prétraitement SIG classique d'intersection (Figure 4) de manière à pouvoir agréger l'information par agrégation pondérée (pondération de surface) pour chaque BVE selon les formules suivantes :

$NO3n_{BVE} = \sum_{ts M \text{ du BVE}} \{S_M / S_{BVE} * NO3n_M\}$; pour les concentrations annuelles en nitrates phréatiques

$NO3s(d)_{BVE} = \sum_{ts M \text{ du BVE}} \{S_M / S_{BVE} * NO3s(d)_M\}$; pour les concentrations décennales en nitrates phréatiques

Où :

S représente la surface, BVE est un Bassin Versant Élémentaire, M représente la portion de maille Stics/Modcou concernée par un BVE, et d correspond à une décade.

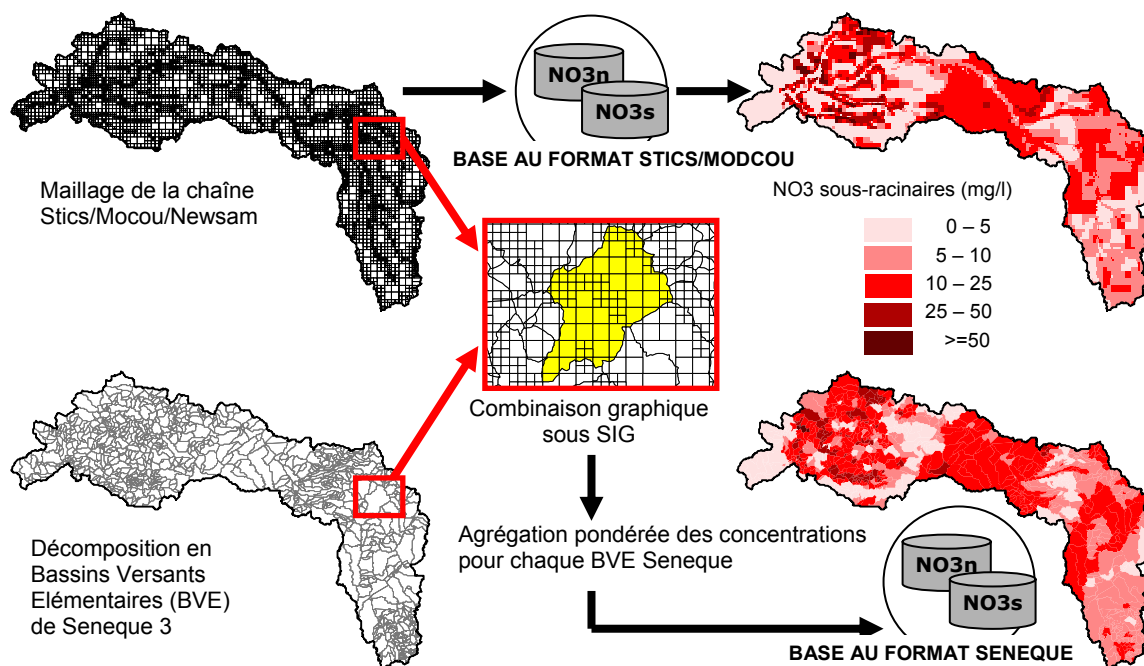


Figure 4 : Processus de combinaison de l'agrégation de l'information entre les deux modèles

Ces opérations conduisent à la construction d'une base de données de concentrations en nitrates phréatiques et sous-racinaires dans le format requis par Senèque 3 sous la forme de fichiers dBase NO3n et NO3s.

Au moment des traitements de l'appliquatif Senèque 3, les concentrations en nitrates pour chaque objet Senèque (et chaque ordre pour un bassin) sont obtenues par pondération de surface selon les formules suivantes :

$$NO3n = \sum_{ts \text{ BVE de l'objet}} \{S_{BVE} * NO3n_{BVE}\} / \sum_{ts \text{ BVE de l'objet}} (S_{BVE}) ; \text{ pour l'option "Nitrates aquifères donnés"}$$

$$NO3s(d) = \sum_{ts \text{ BVE de l'objet}} \{S_{BVE} * NO3s_{BVE}(d)\} / \sum_{ts \text{ BVE de l'objet}} (S_{BVE}) ; \text{ pour l'option "Nitrates sous-racinaires donnés"}$$

Où :

S_{BVE} représente la surface d'un Bassin Versant Elémentaire, $NO3n_{BVE}$ et $NO3s_{BVE}(d)$ sont des concentrations en nitrates issues des fichiers dBase NO3n et NO3s construits précédemment et d correspond à une décade.

3.3. Discussion des résultats

Le dispositif mis en place permet de tester le modèle Senèque selon les différents types d'approche pour définir les concentrations d'apports diffus, notamment en nitrates. Nous présentons ici, de manière tout à fait préliminaire, un premier résultat confrontant deux scénarios de calcul pour les concentrations en nitrates (Figure 5). Le premier (scn01) repose sur l'approche empirique issue des travaux antérieurs du PIREN-Seine (Billen et Garnier, 1999) et mobilisant les caractéristiques d'usage du sol. Le second scénario (scn02) fait appel aux sorties de concentrations phréatiques et sous-racinaires de la chaîne de modélisation Stics/modcou.

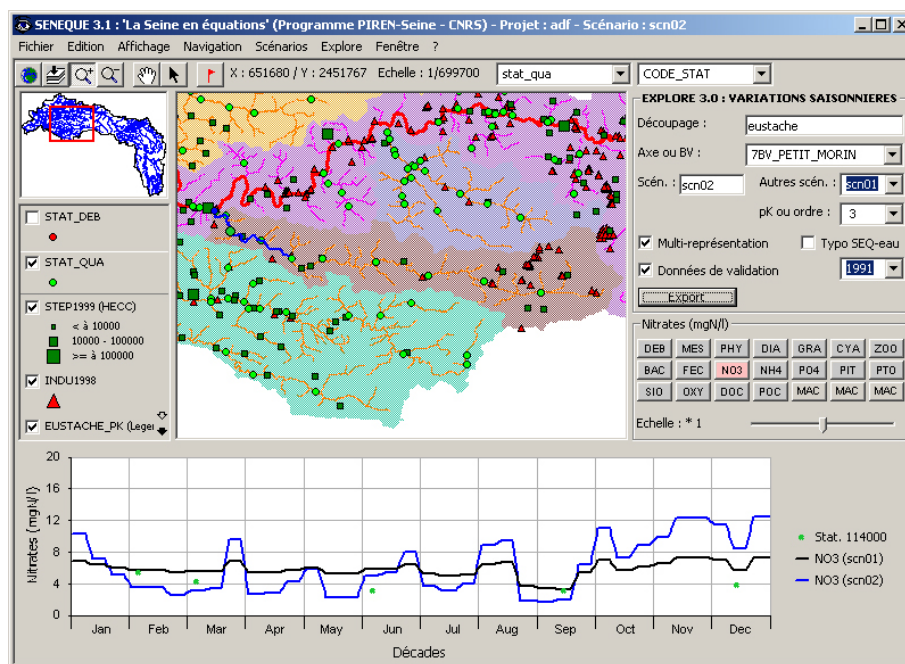


Figure 5 : Comparaison des résultats avec Seneque 3

Remarquons que la simulation avec les sorties du modèle Modcou/Stics présente une variabilité saisonnière plus importante, compréhensible dans la mesure où sont utilisées dans ce cas des valeurs par décennie des concentrations en nitrate dans les écoulements sous-racinaires, alors que ces variations saisonnières sont gommées dans la procédure classique par le choix d'une seule concentration moyenne annuelle pour les écoulements sous-racinaire et phréatique respectivement.

Il est prématuré à ce stade d'interpréter les différences observées entre les deux réponses du modèle en terme de comparaison avec les observations disponibles. En effet, la prise en compte de la rétention riparienne liée aux zones humides riveraines implique le calage des paramètres caractérisant l'efficacité des différents types de zones humides représentés dans le linéaire des cours d'eau concernés (Gaillard et al., 2002). Ce calage a été effectué pour l'ensemble du bassin de la Marne sur base de l'approche représentée ici par la simulation scn01, mais devrait être réajusté selon d'autres approches. C'est précisément le mérite des développements décrits ici : l'utilisation, désormais possible, des sorties d'un modèle décrivant la phénoménologie fine des processus conférant leur concentration aux eaux superficielles et phréatiques en entrée de Seneque nous conduira à envisager des relations empiriques différentes et à modifier les facteurs de rétention ripariens de manière à ajuster au mieux le modèle en fonction des différentes méthodes de calcul. Par sa capacité d'analyse et de visualisation de scénarios alternatifs, le logiciel Seneque 3 se montrera en cela un outil particulièrement efficace pour affiner les équations régissant les processus.

4. Conclusion

Le système développé pour la prise en compte des apports diffus avec le logiciel Seneque 3 offre volontairement une grande souplesse. Le souci constant de plus grand réalisme et de capacité de transposition à de vastes territoires, qui guide les travaux menés dans le cadre du Piren-Seine, incite à concevoir des dispositifs flexibles de modélisation. Ainsi, les approches empiriques de calcul des apports diffus du logiciel sont conservées et mobilisées dès lors qu'on ne dispose pas de données plus fines issues d'un modèle en conditions limites amont. Cette combinaison des approches permet de pallier le manque momentané de données sur certains territoires et de transférer l'outil auprès des gestionnaires sur d'autres bassins ; si sur le bassin de la Marne, des résultats de la chaîne de modélisation Stics/Modcou ont pu déjà être obtenus et proposés à la modélisation avec Seneque 3, il n'en va pas de même encore avec le bassin de l'Oise par exemple, ce qui n'empêche pas le logiciel d'y être d'ores et déjà déployé en attendant que ces résultats soient disponibles.

Par ailleurs, la structure physique de données destinée à représenter des concentrations en nitrates sous-racinaires et phréatiques en vue de leur utilisation dans Seneque 3 se veut suffisamment générique pour pouvoir accueillir des sorties en provenance d'autres modèles que Stics/Modcou. On voit bien à travers cette étude que la discrétisation spatiale et le format des données est relativement variable d'un modèle à l'autre mais que des prétraitements et le recours aux Systèmes d'Information Géographique offrent une solution puissante pour réaliser l'adaptation des données et le couplage entre modèles.

Enfin, le dispositif mis en place permet d'envisager l'intégration d'autres sorties de modèles. De la même manière que pour les nitrates, la technique utilisée pourrait être étendue facilement à d'autres nutriments tels que les pesticides par exemple.

5. Bibliographie

- Billen G., Garnier J., Hanset P. (1994). Modelling phytoplankton development in whole drainage network : the RIVERSTRAHLER Model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia*, n°289, pp. 119-137
- Billen, G., Garnier, J. (1999). Nitrogen transfer through the Seine drainage network: a budget based on the application of the RIVERSTRAHLER Model. *Hydrobiologia* 410: 139-150.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J., Meynard J., Delécolle R. (1998). STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. 1- theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomies* n°. 18, pp. 311-346.
- 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. Typologie et fonctions des zones humides riveraines. PIREN-Seine, rapport de synthèse 1998-2002. cdROM.
- Garnier J., Billen G., Coste M. (1995). Seasonal succession of diatoms and chlorophyceae in the drainage network of the Seine river : observations and modeling. *Limnology and Oceanography* n°40, pp. 750-765.
- Gomez E., Mignolet C., Schott C., Brunstein D., Bornerand C., Ledoux E., Benoît M., Tournebize J., De Louvigny N., Ponsardin G., Mary B. (2002). Dynamiques agricoles et pollution nitrique diffuse : modélisation intégrée du transfert des nitrates sur le bassin de la Seine. Rapport de synthèse du programme PIREN-Seine, UMR CNRS 7619 Sisyphe Paris Jussieu, 52 p.
- Gomez E., Ledoux E., Mary B, Ponsardin G., Brunstein D. (2001). Modélisation intégrée du transfert des nitrates sur le bassin de la Seine. Rapport d'activité du programme PIREN-Seine, UMR CNRS 7619 Sisyphe Paris Jussieu, 24 p.
- Ledoux E. (1980). Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris et de l'Université Pierre et Marie Curie – Paris VI.
- Ledoux E., Girard G., Villeneuve J-P. (1984). Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. *La Houille Blanche*, pp. 101-110.
- Ruelland D., Billen G. (2002). Applicatif Seneque 3.0 - Notice de développement. Paris : Programme PIREN-Seine, CNRS, 46 p.
- Ruelland D. (2003a). Seneque 3, un logiciel SIG de modélisation prospective de la qualité des eaux de surface. 20 p. A paraître.
- Ruelland D. (2003b). Intégration d'un Système d'Information Géographique et d'un modèle hydrologique. 12 p. A paraître.