

SENECAM : système intégré de modélisation du fonctionnement des cours d'eau de tête de bassin - faisabilité sur un bassin normand

Denis Ruelland¹ et Gilles Billen²

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

² CNRS, UMR7619 Sisyphe, Université Pierre et Marie Curie (Gilles.Billen@ccr.jussieu.fr)

1. Introduction	2
2. SENECAM, principes et fonctionnements	3
2.1. Principes généraux	3
2.2. Le moteur de calcul BRIVE	4
2.3. Structuration des bases de données pour SENECAM	5
2.4. Traitements et interfaces de pilotage	7
3. Etude de faisabilité sur un bassin normand	9
3.1. Objectifs	9
3.2. Bassin test et données mobilisées	10
3.3. Premiers résultats de simulation	11
4. Conclusion et perspectives	13
5. Bibliographie	13

RESUME. Le couplage du modèle RIVERSTRAHLER avec une interface SIG et une base de données spatio-temporelles au sein du logiciel SENEQUE a permis notamment d'en moduler la résolution spatiale en combinant décomposition kilométrique et ordination de Strahler. La modélisation des processus biogéochimiques dans les cours d'eau peut ainsi s'effectuer au besoin jusqu'au niveau des bassins versants élémentaires des cours d'eau permanents d'ordre 1. Il reste que cette maille est encore trop étendue pour répondre à certaines questions qui se posent dans les sites ateliers comme l'impact sur la qualité de l'eau de la localisation précise de certaines activités agricoles ou de mesures agro-paysagères pour lutter contre la pollution diffuse. Dans ce cadre, la résolution temporelle (décadaire) du modèle RIVERSTRAHLER est aussi inadaptée. Le logiciel SENECAM a été conçu pour répondre à ces problèmes. S'inspirant de l'expérience SENEQUE/RIVERSTRAHLER, il constitue un outil de modélisation plus fin, spécialement dédié à l'étude du lien entre la répartition spatiale fine des activités agricoles et les apports diffus aux eaux de surface. L'outil est adapté aux cours d'eau de tête de bassins (de l'ordre de 50-500 km²) et permet de simuler par tronçons kilométriques les apports diffus, en particulier ceux associés aux phénomènes d'érosion. L'échelle journalière est la résolution temporelle retenue, et un chaînage *off-line* est assuré avec le modèle STREAM, qui calcule les flux de ruissellement et d'érosion pour chaque événement pluvieux. Une étude de faisabilité nous a conduits à développer un prototype de l'outil sur un bassin de 215 km² en haute-normandie. Des premiers résultats de simulations sont présentés sur ce bassin. Conçu de façon générique, ce nouveau système intégré de modélisation pourra rapidement être transposé sur deux sites ateliers du PIREN-Seine (Vesle et Blaise). Il devrait notamment permettre de calculer l'impact de modifications spatiales des pratiques agricoles ou d'élevage et des aménagements paysagers sur la qualité des eaux de surface et sur les flux d'exportation de matières polluantes à l'échelle des têtes de bassin.

MOTS-CLES. Pollution diffuse, érosion, transferts de particules, SIG

1. Introduction

Parmi les modèles de la "boîte à outils" Piren-Seine, le modèle RIVERSTRAHLER (Billen *et al.*, 1994 ; Garnier *et al.*, 1995 ; Billen *et al.*, 1999 ; Garnier *et al.*, 2000 ; Billen *et al.*, 2001) a été développé afin d'orienter les choix en matière de gestion des eaux de surface par la prise en compte explicite des relations entre débits, rejets et niveaux de qualité. Il permet le calcul des variations géographiques et saisonnières (avec une résolution décadaire) du débit, de la qualité de l'eau et du fonctionnement écologique d'un réseau hydrographique, y compris ses annexes hydrauliques, en fonction des contraintes constituées par la morphologie des cours d'eau, les conditions météorologiques et climatiques, l'usage du sol du bassin versant et les rejets ponctuels d'eaux usées. Contrairement à beaucoup de modèles de tronçons de rivière, il couvre l'ensemble d'un réseau hydrographique et s'affranchit ainsi de la nécessité de renseigner des conditions-limites amont, autres que celles qui définissent les apports diffus du bassin versant. L'objectif de ce modèle n'est pas d'obtenir une description fine des évolutions temporelles à court terme mais bien de fournir une image globale de la qualité des eaux pour l'ensemble d'un bassin hydrographique.

Le couplage du modèle RIVERSTRAHLER avec un SIG et une base de données spatio-temporelles au sein du logiciel SENEQUE (Ruelland, 2004) a permis notamment d'en moduler la résolution spatiale en combinant décomposition kilométrique et ordination de Strahler (Strahler, 1957). La modélisation des processus biogéochimiques dans les cours d'eau peut ainsi s'effectuer au besoin jusqu'au niveau des bassins versants élémentaires des cours d'eau permanents d'ordre 1 (Ruelland *et al.*, 2004). Il reste que cette maille est encore trop étendue pour répondre à certaines questions qui se posent dans les sites-ateliers comme l'impact sur la qualité de l'eau de la localisation précise de certaines activités agricoles ou de mesures agro-paysagères pour lutter contre la pollution diffuse. Dans ce cadre, la résolution temporelle (décadaire) du dispositif SENEQUE est aussi inadaptée.

Face à ces limites, il a semblé nécessaire de concevoir un nouvel outil de modélisation inspiré de SENEQUE/RIVERSTRAHLER et spécialement dédié à l'étude du lien entre la répartition spatiale fine des activités agricoles et les apports diffus aux eaux de surface. Adapté à des petits bassins entre 50 et 500 km² de surface, l'outil doit intégrer une prise en compte des phénomènes à une échelle spatio-temporelle plus fine. Ainsi, l'ordination de Strahler utilisée avec SENEQUE doit être abandonnée pour une description kilométrique systématique du réseau et la résolution temporelle doit être étendue à l'échelle journalière. Cette adaptation vise une représentation plus fine des apports diffus, en particulier associés aux phénomènes d'érosion. Dans cette perspective, les sorties de modèles d'érosion pourraient aussi être utilisées comme entrées du nouvel outil afin de mieux prendre en compte la variabilité spatio-temporelle des flux de particules érodées entrant dans le réseau hydrographique au niveau des têtes de bassins. Comment envisager, par exemple, un couplage avec le modèle STREAM (Cerdan *et al.*, 2002 ; Cerdan *et al.*, 2003), qui simule, pour de petits bassins versants ruraux (1 à 10 km² env.) et pour chaque événement pluvieux, les flux de ruissellement superficiel et de particules érodées, en prenant en compte en particulier les aménagements ruraux et la dynamique des états de surface des parcelles agricoles qui jouent un rôle déterminant à cette échelle ? Comment, une fois renseignés correctement les flux de matériel érodés, les transférer correctement dans le réseau hydrographique, en tenant compte des processus de dépôt temporaire et de remise en suspension en fonction de l'hydrologie des cours d'eau ?

Dans cette contribution, nous présentons l'état actuel du développement de l'applicatif SENECAM conçu pour répondre aux nécessités évoquées. Dans un premier temps, nous décrivons les principes de l'applicatif et du nouveau modèle de processus (BRIVE) qui en constitue le moteur de calcul ; nous présentons les bases de données qu'il traite à partir de structures et d'interfaces adaptés. Dans un deuxième temps, une étude de faisabilité sur un bassin normand de 215 km² expose les modalités de mise en œuvre de l'outil, notamment dans le cadre de son couplage *off-line* avec le modèle STREAM ; des premiers résultats de simulations sont présentés pour tester l'intérêt de la démarche. La conclusion permet, enfin, de faire la synthèse du cas d'étude et d'envisager la transposabilité de l'applicatif sur les sites-ateliers du PIREN-Seine, en lien avec les spécificités de la problématique des apports diffus dans chacun de ces sites.

2. SENECAM, principes et fonctionnements

2.1. Principes généraux

Le développement du logiciel SENECAM/BRIVE vise à rassembler au sein d'une interface conviviale commune les diverses fonctions d'un système intégré d'information et d'aide à la décision sur le fonctionnement des cours d'eau de tête de bassin. S'inspirant largement de l'applicatif SENEQUE/RIVERSTRAHLER, ce système réalise l'interfaçage avec une base de donnée structurée sous SIG d'un nouveau modèle de calcul des processus écologiques caractérisant le fonctionnement biogéochimique des petits cours d'eau de tête de bassin (le modèle BRIVE, adapté de RIVE). L'ensemble permet de (Fig. 1) :

- Visualiser les Bases de Données renseignant les contraintes de la modélisation (Fig. 1a),
- Piloter la définition d'un projet et de scénarios de modélisation et créer les fichiers contraintes correspondants (Fig. 1b),
- Piloter le calcul par BRIVE du fonctionnement biogéochimique par brins en gérant l'ordre de calcul des brins (Fig. 1c),
- Visualiser et exporter les résultats sous forme graphique ou cartographique (Fig. 1d).

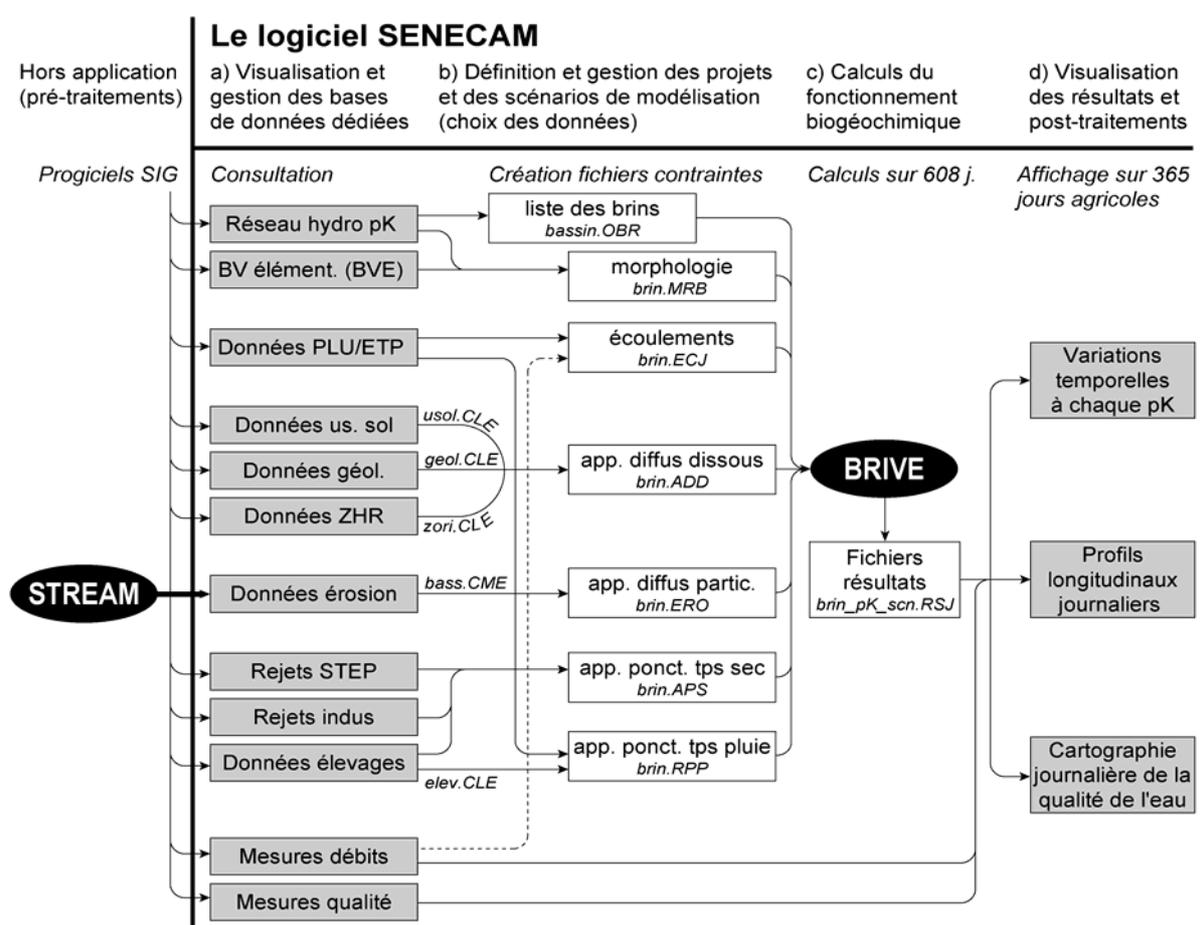


Figure 1: schéma général du fonctionnement de SENECAM

Le logiciel SENECAM/BRIVE a les caractéristiques suivantes qui le distinguent de l'ensemble SENEQUE/RIVERSTRAHLER :

- résolution temporelle explicitement journalière,
- découpage systématique du réseau hydrographique en tronçons kilométriques,
- ajout de certaines variables benthiques et prise en compte de leur transfert entre un stock benthique et un stock particulaire en suspension dans le moteur de calcul BRIVE,

- chaînage *off-line* avec un modèle de simulation des flux de ruissellement superficiel et de particules érodées (STREAM).

2.2. Le moteur de calcul BRIVE

Le moteur de calcul BRIVE reprend le schéma des processus biogéochimiques en milieu aquatique (RIVE) du modèle RIVERSTRAHLER (Billen *et al.*, 1994 ; Garnier *et al.*, 1995 ; Billen *et al.*, 1999 ; Garnier *et al.*, 2000 ; Billen *et al.*, 2001). Le calcul de l'évolution de la qualité de l'eau se fait également selon un schéma lagrangien, en suivant une masse d'eau dans son cheminement d'amont en aval de chaque brin, et en tenant compte des apports latéraux de débit et de matière (constituant les apports diffus). Il s'en différencie néanmoins par une résolution spatio-temporelle de calcul plus fine. D'une part, l'idéalisation de Strahler (Strahler, 1957), utilisée dans RIVERSTRAHLER pour le calcul rapide de la qualité de l'eau dans les bassins amont, est abandonnée au profit d'un calcul explicite de la qualité dans l'ensemble d'un réseau de brins découpés systématiquement en tronçons kilométriques. D'autre part, le pas de temps décadaire de calcul de RIVERSTRAHLER est ramené à une résolution temporelle explicitement journalière dans BRIVE (tout en considérant un écoulement permanent par période d'un jour).

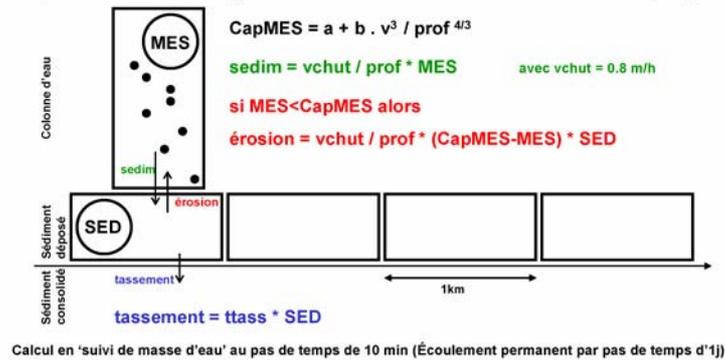
Le débit journalier en chaque tronçon kilométrique de brin, et son incrément qui définit la dilution hydraulique, sont calculés à partir d'une composante superficielle et d'une composante phréatique de l'écoulement spécifique du bassin versant, issues d'un traitement des données de pluviométrie et d'évapotranspiration ou dérivées (hors applicatif) des mesures de débits sur le bassin.

Le module biogéochimique représente de manière générique la cinétique des processus liés au cycle des éléments biogènes dans les milieux aquatiques. Toutes les variables d'état et les processus correspondant, intégrés dans le modèle RIVE sur lequel était basé RIVERSTRAHLER, sont prises en compte selon les mêmes formalismes et les mêmes paramétrisations dans BRIVE (O_2 , NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , SiO_2 , MES, Corg, 3 espèces d'algues, 2 organismes zooplanctoniques, bactéries hétérotrophes, nitrifiantes et fécales). Des variables d'état supplémentaires (sédiments, phosphore inorganique particulaire sédimenté, diatomées benthiques, silice biogénique sédimentée) ont été intégrées pour pouvoir suivre l'accumulation temporaire de stocks benthiques en certains endroits des cours d'eau et leurs échanges avec les stocks en suspension transportés dans la colonne d'eau. La figure 2 représente schématiquement les nouveaux processus pris en compte.

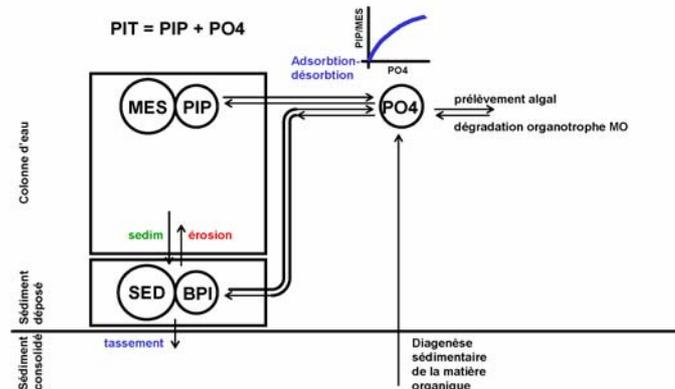
La formalisation des processus de dépôt/érosion de particules est basée sur les travaux de Celik *et al.* (1991) et Martin (2001) (Fig. 2a). On considère qu'en fonction de la vitesse du courant et de la profondeur, il existe une certaine capacité de transport de matériel en suspension, qui se caractérise par une concentration d'équilibre en MES. Par ailleurs les particules en suspension sont animées d'une certaine vitesse de chute qui tend à les faire sédimer. Un flux érosif remet les particules déposées en suspension, à une vitesse proportionnelle à l'écart entre la capacité de transport et la concentration effective en MES, si celle-ci est inférieure à la capacité de transport. D'autre part, un processus de tassement aboutit à soustraire une partie du matériel déposé pour le faire rejoindre définitivement une phase de sédiments consolidés. Le bilan de ces divers processus règle l'évolution spatiale et temporelle des stocks déposés et en suspension.

La représentation des équilibres entre ortho-phosphates dissous et adsorbé (sur les matières minérales en suspension (MES) ou sédimentées (SED)) est celle étudiée par Némery *et al.* (2003) et Garnier *et al.* (2005) (Fig. 2b). La représentation de la dynamique des diatomées benthiques et de la silice biogénique est due à Sferratore *et al.* (in prep) et Garnier *et al.* (2003, 2004) (Fig. 2c). En outre, la structure de BRIVE a été conçue de manière à pouvoir intégrer facilement le module de développement des macrophytes mis au point par Dufayt (2000, 2001). BRIVE rassemble ainsi les connaissances les plus récentes acquises dans le cadre du programme PIREN-Seine sur les processus biogéochimiques affectant les petits cours d'eau.

a) Représentation des processus d'échange colonne d'eau-sédiments : MES et SED (d'après Celik *et al.*, 1991)



b) Représentation des processus d'échange colonne d'eau-sédiments : Phosphore (d'après Némery *et al.*, 2003)



c) Représentation des processus d'échange colonne d'eau-sédiments : Silice (d'après Sferratore *et al.*, in prep)

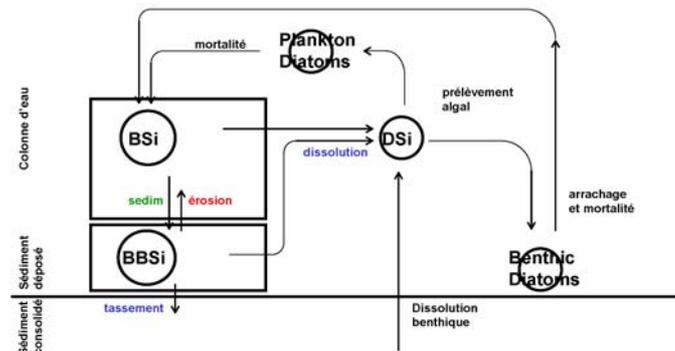


Figure2 : Les processus modélisés par BRIVE : a. matière en suspension et sédiments déposés remobilisables. b. phosphore inorganique. c. formes de la silice

2.3. Structuration des bases de données pour SENECAM

SENECAM s'appuie sur une base de données spatio-temporelles dérivée de la production de plusieurs organismes : réseau hydrographique issu de la @BD Carthage (IGN), données météorologiques (pluies et évapotranspiration journalières - Météo-France), occupation du sol issue de traitements d'images satellitaires, Modèle Numérique de Terrain (USGS), mesures de débits (DIREN), observations de la qualité de l'eau (RNB), fonds géologiques (BRGM), données socio-économiques (RGA)... D'autres données proviennent directement des gestionnaires (rejets de stations d'épurations, pollutions industrielles) ou des travaux de recherche (observations de qualité, données sur les élevages, particules érodées, caractérisation des zones humides ripariennes...).

Le recours au SIG permet d'intégrer de façon détaillée les éléments dans l'espace. Leur utilisation efficace est obtenue par une schématisation précise du réel à travers les notions d'objet et de liaison entre objets. La base de données manipulée par le logiciel est conçue selon une organisation rigoureuse s'inspirant du formalisme entité-relation (Laurini *et al.*, 1993 ; Pantazis *et al.*, 1996), déjà mise en place pour le logiciel SENEQUE (Ruelland, 2004). Cette organisation vise à adapter les structures de données au dispositif précis des traitements de la modélisation. Ainsi, le réseau hydrographique respecte une topologie de graphe connexe orienté compatible avec les requêtes de cheminement, où chaque confluence marque le début d'un nouvel objet « brin » de modélisation ; un brin étant donc une portion de cours d'eau située entre 2 confluences (ou entre une source et une confluence). Chaque brin est découpé en tronçons kilométriques, qui constituent des lignes primitives, appelées arcs en SIG. Les brins « source » (ordre 1 de Strahler) se distinguent des brins « confluence » par le fait qu'ils sont initiés par un arc de 100 mètres. Chaque arc est décrit par des informations attributaires telles que la longueur, la largeur et la pente... Une couverture de bassins (versants) dits élémentaires (BVE), obtenue par traitement d'un Modèle Numérique d'Altitude, est associée avec le réseau hydrographique. Les entités polygonales de cette couverture représentent la surface directement drainée par chacun des arcs du réseau. De fait, les entités bassins sont liées par une règle de propriété stricte aux entités arcs et le modèle entité-relation impose qu'à un arc corresponde un seul bassin et inversement (Fig. 3).

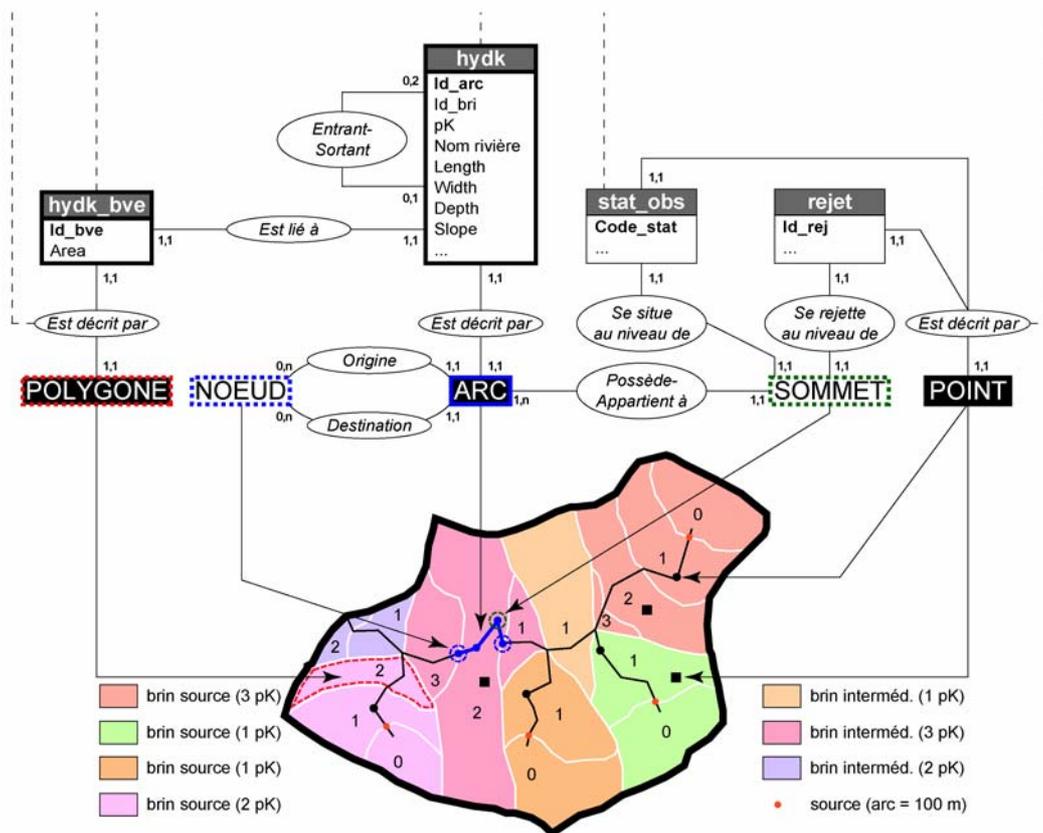


Figure 3 : Structure du réseau hydrographique pour SENECAM

Comme avec SENEQUE, cette structure de réseau hydrographique et de sa couverture associée de bassins représente le socle sur lequel s'articulent les autres objets spatiaux (Fig. 4). Les entités ponctuelles comme les stations d'observations (et leurs séries de mesures journalières) ou les rejets ponctuels (domestiques, industriels ou agricoles) se situent (ou se rejettent) aux sommets des arcs du réseau tandis que les entités surfaciques comme l'usage du sol ou la lithologie sont traitées par superposition selon les limites des entités bassin. Cette organisation au sein du logiciel constitue le composant central de la distribution et de la résolution spatiales du modèle.

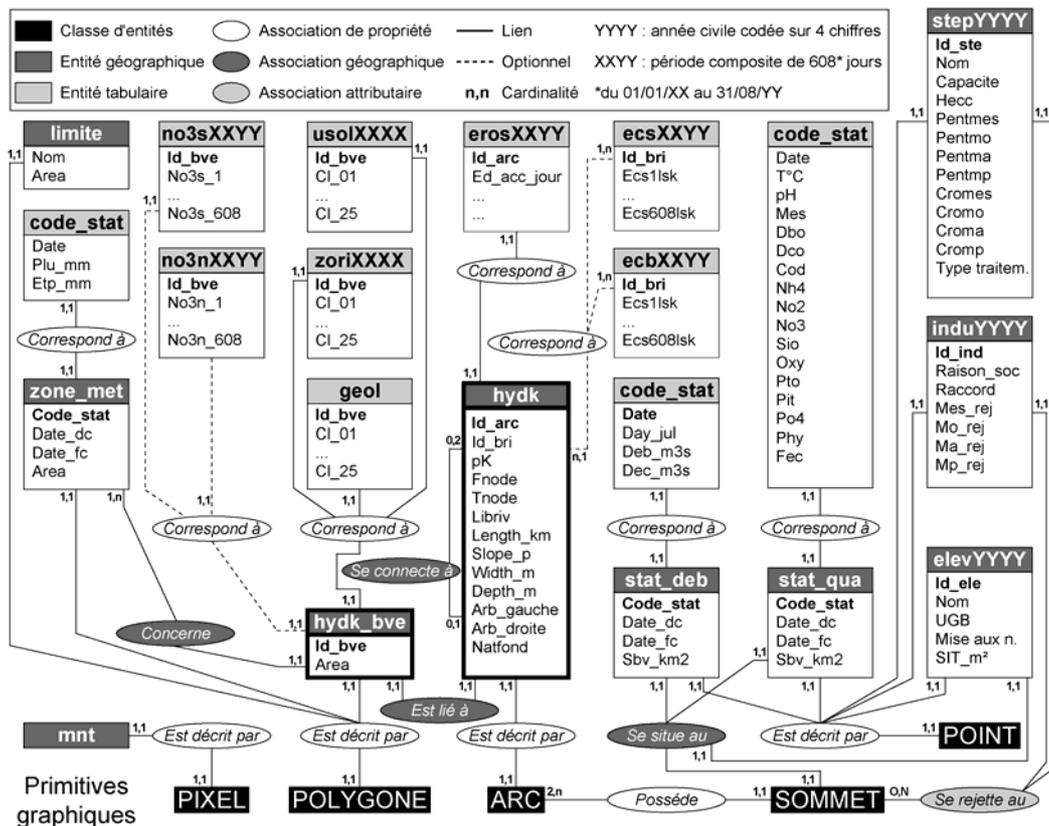


Figure 4 : Modèle entité-relation de la BD spatio-temporelles de SENECAM (d'après Ruelland, 2004)

Par rapport à SENEQUE, des données telles que les ouvrages hydrauliques, les prélèvements ou les barrages-réservoirs ne sont plus intégrées car elles n'ont pas lieu d'être traitées aux échelles et sur les bassins pour lesquels SENECAM a été conçu. En contrepartie, de nouvelles données sont prises en compte comme les exploitations d'élevage (localisation, charge animale, surface imperméable...), les quantités journalières de particules érodées en provenance de modèles d'érosion ou les informations d'orientation, de couverture arborescente de rive et de nature du fond pour le module « macrophytes » du modèle. Les dispositifs mis en place dans le logiciel SENEQUE pour accueillir de manière optionnelle des concentrations en nitrates¹ des eaux superficielles et/ou phréatiques par bassin élémentaire (Ruelland *et al.*, 2003) sont maintenus et permettent de forcer des concentrations nitriques comme entrées dans le modèle.

Par ailleurs, si certaines données conservent le format de SENEQUE (description de l'usage du sol, rejets domestiques et industriels en année civile moyenne ou stations d'observations et mesures journalières associées), l'échelle journalière retenue pour SENECAM conduit à construire des bases de données dédiées selon cette nouvelle temporalité. Ainsi, les informations relatives aux écoulements spécifiques (ecsXXYY, ecbXXYY), aux concentrations nitriques (no3sXXYY, no3nXXYY) et aux particules érodées (erosXXYY) sont représentées de manière journalière pour des périodes s'étendant du 1^{er} janvier de l'année n-1 au 31 août de l'année n, soit sur 608 jours (29 février exclu quand année bissextile). D'une manière générale, chaque simulation avec le logiciel est lancée sur une telle période. Néanmoins, c'est l'année agricole (1^{er} sept. de l'année n-1 au 31 août de l'année n) qui est affichée pour la représentation des résultats au niveau des interfaces du logiciel.

2.4. Traitements et interfaces de pilotage

La conception des interfaces de SENECAM est conforme aux standards de Windows : écrans de saisie, menus déroulants, sélection directe d'objets visualisés à l'écran par désignation avec la

¹ concentrations issues de données observées ou de sorties de modèles de transferts de nitrates

souris.... Des fonctionnalités SIG sont intégrées de manière à mieux gérer les données spatialisées aussi bien que pour automatiser et faciliter les opérations de *pre-* et *post-processing* de modélisation.

Comme avec SENEQUE, un projet de modélisation est un ensemble de scénarios simulés avec l'outil. Ici, cependant, les projets se réfèrent tous au même mode de représentation de la partie du bassin concerné par la modélisation : l'intégralité du réseau hydrographique de brins-pK de la base de données dédiée. La définition du champ géographique se limite donc ici à préciser le point en amont duquel se fera la simulation par SENECAM. Les projets restent définis par les contraintes de référence auxquelles ils s'appliquent. Le paramétrage des données de contraintes évolue selon les scénarios ; ce paramétrage est possible dès le premier scénario, appelé scénario de référence, qui mobilise des entrées qui constitueront les références du projet. Une fois le paramétrage précisé, l'utilisateur lance le calcul des fichiers de contraintes qui seront traités par BRIVE pour le calcul du fonctionnement biogéochimique des différents brins du réseau. Contrairement à SENEQUE, SENECAM permet notamment de paramétrer les données relatives aux particules érodées (Fig. 5), issues de simulations avec d'autres outils, et aux exploitations d'élevages en lien avec une période climatique (Fig. 6).

Paramètres d'apports diffus particuliers

Rejets en Kq de MES/BVE/j :

Fichier de référence :

Autres fichiers :

eros9697

Commentaires :

Erosion journalière (événement pluvieux) accumulée pour chaque BVE SENECAM - pour l'année composite 1996/1997 - source : sorties simulations STREAM (INRA-Orléans)

OK Annuler

Figure 5 : Spécification de fichiers d'érosion issus de STREAM

Paramètres d'apports ponctuels de temps de pluie

Localisation et caractéristiques des exploitations d'élevage :

Fichier de référence :

Autres fichiers :

elev1997

Commentaires :

Exploitations d'élevage de référence 1997 - Base test sans rapport avec la réalité

Période climatique composite :

Période de référence :

Autre période :

1997
1998
1999
2000

Commentaires :

Pluviométrie et évapotranspiration journalières de la période composite du 1er janv. 1996 au 31 août 1997

OK Annuler

Figure 6 : Paramétrisation des effluents d'élevage avec SENECAM

Les interfaces de visualisation des résultats de la modélisation proposent trois types de représentation : 1) un graphique des variations saisonnières correspondant à une représentation journalière des débits ou concentrations en un point kilométrique du réseau pour une année agricole donnée ; 2) un graphique des variations longitudinales correspondant à une description kilométrique des débits ou concentrations le long d'un objet brin pour un jour agricole donné ; 3) une cartographie des résultats relatifs à un jour pour chaque brin du réseau hydrographique. Pour les deux premières figurations, l'utilisateur peut changer de brin d'étude par simple sélection sur la carte et demander que les résultats estimés soient confrontés de manière automatique aux données mesurées des stations d'observations (Fig. 7).

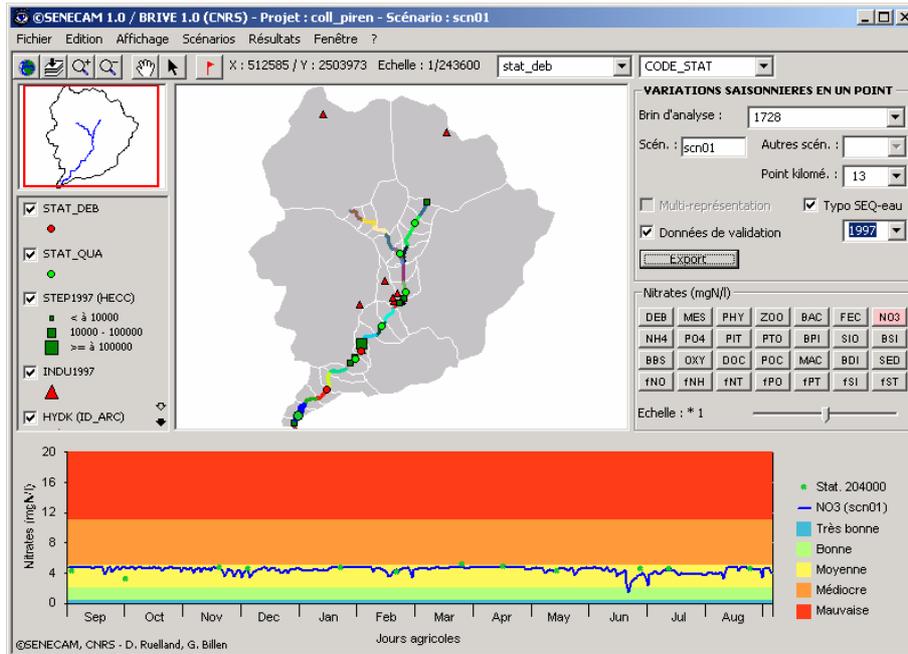


Figure 7 : Exemple d'interface de résultats dans SENECA M

Par ailleurs, l'appliquatif offre des dispositifs pour l'élaboration et la confrontation de divers scénarios au sein d'un même projet. Après avoir calculé les résultats pour un scénario de référence, l'utilisateur peut accéder au paramétrage du calcul des fichiers de contraintes pour la création d'un nouveau scénario. Il peut choisir par exemple un régime météorologique différent de celui relatif à l'année de modélisation qui a servi pour le scénario de référence ou encore changer les caractéristiques des exploitations d'élevage (mise aux normes, UGB...). Le système ne calcule alors de fichiers de contraintes que pour les variables qui diffèrent du scénario de référence : ce sont ces fichiers, associés à ceux du scénario de référence pour les variables inchangées, qui serviront au calcul des résultats du nouveau scénario, les interfaces de visualisation des résultats permettant ensuite la confrontation avec les scénarios antérieurs.

3. Etude de faisabilité sur un bassin normand

3.1. Objectifs

L'objectif fixé en 2004 dans le cadre du PIREN-Seine était non seulement de concevoir un nouvel outil adapté aux problématiques des cours d'eau de têtes de bassin mais aussi d'en développer un prototype.

Le logiciel SENEQUE/RIVERTRAHLER, qui tourne au pas de temps décadaire, a donc été adapté pour en faire un outil complémentaire (SENECAM) d'une résolution journalière et d'une précision géographique kilométrique. En parallèle, le modèle STREAM (Cerdan *et al.*, 2002 ; Cerdan *et al.*, 2003), conçu jusqu'alors pour fonctionner à l'échelle de l'événement pluvieux, a dû lui aussi être adapté pour fonctionner sur un ensemble de bassins versants élémentaires compatibles avec

SENECAM et pour une chronique pluviométrique correspondant à une année complète au pas de temps journalier (Souchère *et al.*, 2005).

Le niveau d'intégration des 2 outils avec un Système d'Information Géographique forme le pivot central d'une perspective de couplage *off-line*. En effet, SENECAM, à l'instar de SENEQUE, constitue une application autonome à laquelle correspondent des procédures informatisées, développées à partir des fonctionnalités des SIG et d'une base de données structurée. Bien qu'indépendant des progiciels SIG existants, il utilise ou produit néanmoins des fichiers au format ArcGis™. De son côté, STREAM est couplé avec le progiciel ArcGis™ et mobilise donc les mêmes formats de fichiers (raster ou vecteur) et référentiels géographiques que SENECAM. La similarité des concepts et des médias entre les outils rend possible les transferts de fichiers selon une distribution spatiale assurée par le SIG.

3.2. Bassin test et données mobilisées

Vus les délais très courts alloués à la réalisation du projet, la disponibilité de données complètes et prétraitées reste fondamentale. Les adaptations spatio-temporelles à apporter aux deux outils pour permettre leur dialogue nous ont donc conduits à mener une étude de faisabilité en s'appuyant sur des données disponibles pour un secteur-test de 215 km² situé en Haute-Normandie, le bassin de l'Austreberthe (Fig. 8). Ce bassin présente, en outre, l'intérêt de connaître des problèmes d'érosion pour lesquels les outils sont notamment conçus.

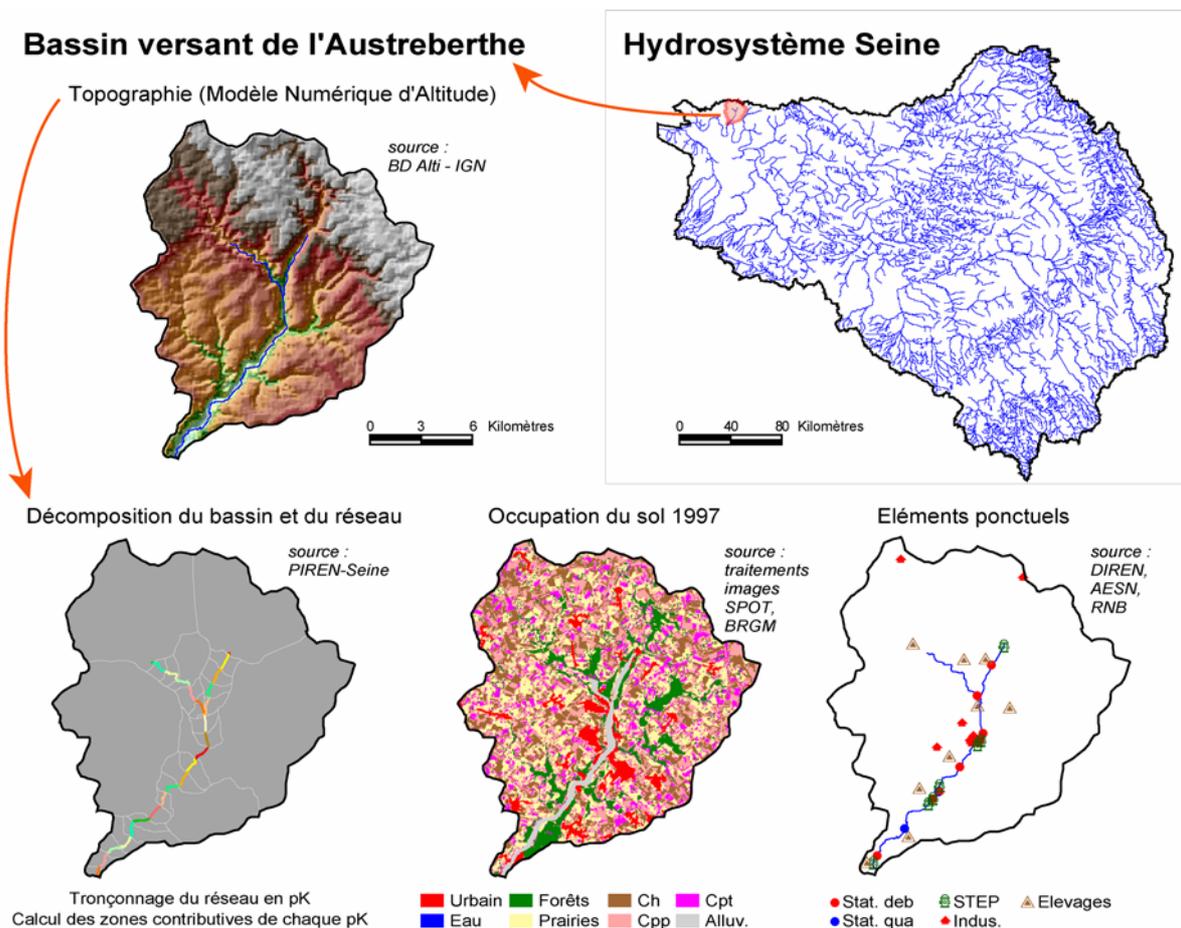


Figure 8 : Secteur test retenu pour l'étude de faisabilité

Sur le bassin, le réseau hydrographique utilisé dans le cadre du PIREN-Seine (extrait de la BD Carthage) a été décomposé en tronçons kilométriques (cf. 2.3.). La zone contributive (BVE) de chaque tronçon a été calculée à partir d'un Modèle Numérique d'Altitude de l'IGN (BD Alti, résolution 50 m). La description de l'occupation du sol se réfère à un traitement d'images SPOT de 1997 (réalisé par le BRGM d'Orléans), qui a permis d'identifier 8 classes : urbain, eau, forêts, cultures

d'hiver, cultures de printemps précoces, cultures de printemps tardives et zones d'alluvions. Cette description apporte une plus grande précision spatiale et typologique que la base Corine Land Cover usuellement mobilisée à l'échelle de la Seine. Les éléments ponctuels, mesures de débits, observations de la qualité de l'eau, rejets domestiques et industriels sont issues respectivement de la DIREN, du RNB et de l'AESN et conservent les structures physiques définies pour SENEQUE (Ruelland *et al.*, 2004). Une base de données sur les exploitations d'élevages a été définie sans lien avec la réalité pour tester les procédures d'implémentations relatives aux calculs des rejets ponctuels de temps de pluie.

Le modèle STREAM a permis de calculer les flux de ruissellement et d'érosion (Souchère *et al.*, 2005) à partir du relief (MNA sus-cité), du couvert végétal (couverture d'occupation des sols sus-citée), des chroniques pluviométriques observées, et de l'état de surface des sols (informations sur les faciès et les rugosités dérivées d'observations de parcelles agricoles lors d'études de terrain). Les calculs ont été effectués pour une chronique pluviométrique correspondant à une année agricole complète au pas de temps journalier (1996-1997) sur l'ensemble des BVE retenus.

Les résultats de ces calculs (érosion accumulée au point en Kg de MES/j) ont été structurés selon le format défini (Fig. 4) et intégrés comme données d'entrée de SENECAM pour paramétrer les flux de surfaces et mieux prendre en compte la variabilité spatiale et temporelle des masses de particules érodées entrant dans le réseau hydrographique. Des simulations à l'échelle journalière ont alors été opérées avec SENECAM/BRIVE pour une année composite s'étendant du 1^{er} janvier 1996 au 31 août 1997. Ces simulations ont permis de tester l'ensemble des procédures implémentées au sein du logiciel (en particulier la prise en charge dans le réseau des sorties de STREAM), et de procéder à un travail de calibration, visant à ajuster les premiers résultats obtenus.

3.3. Premiers résultats de simulation

La figure 9 présente les débits simulés par SENECAM à la station DIREN de l'Austreberthe à Duclair. Ces débits sont calculés à partir d'une composante superficielle et d'une composante phréatique de l'écoulement spécifique du bassin versant. L'écoulement spécifique total de chaque BVE est déduit des différentes mesures de débits du secteur. Sa distinction en écoulement de base ou écoulement superficiel se réfère à une pondération par les caractéristiques géologiques de chaque BVE. Par ailleurs, afin d'estimer une certaine inertie de la nappe, on calcule la part d'écoulement total moyen située au-dessus de l'écoulement minimum par moyenne mobile (on moyenne l'écoulement total des 14 jours précédents et du jour concerné). Sur l'Austreberthe, on constate peu de fluctuation, ce qui est typique d'une rivière sur la craie. Néanmoins, quelques épisodes de forts écoulements superficiels ont lieu et se marquent ici par des pics de débits superposés à un débit de base très stable.

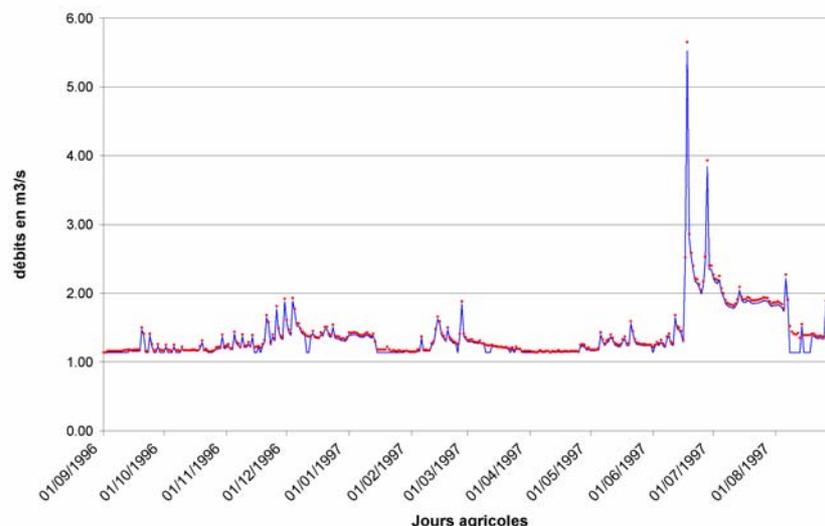


Figure 9 : Variations saisonnières en MES et stocks sédimentaires de l'amont à l'aval

A titre d'exemple des résultats obtenus à ce stade concernant la modélisation de la dynamique des particules, la figure 10 présente la simulation des concentrations en MES dans la colonne d'eau et du stock de sédiments accumulés sur le fond en 3 tronçons du réseau de l'Austreberthe, choisis d'amont en aval. Dans le tronçon le plus amont, on observe une très grande variabilité temporelle des MES, et un stockage important de sédiments (jusqu'à 30 000 g/m² ce qui représente environ 3 cm de sédiments accumulés) en période estivale (Fig. 10a). Ce stock est repris par l'érosion en période hivernale et printanière. Plus en aval, les pentes diminuant, les MES sont déjà considérablement tamponnées dans leurs variations temporelles, et les stocks sédimentaires sont nettement inférieurs (Fig. 10b). Au tronçon le plus aval, les variations de MES sont beaucoup plus faibles avec une chute bien marquée au printemps correspondant à un stock sédimentaire minimal, et des niveaux plus élevés et très constants en été, automne et hiver (Fig. 10c). Le niveau général est conforme aux rares observations disponibles, ces dernières suggérant cependant des pics que la modélisation ne reproduit pas.

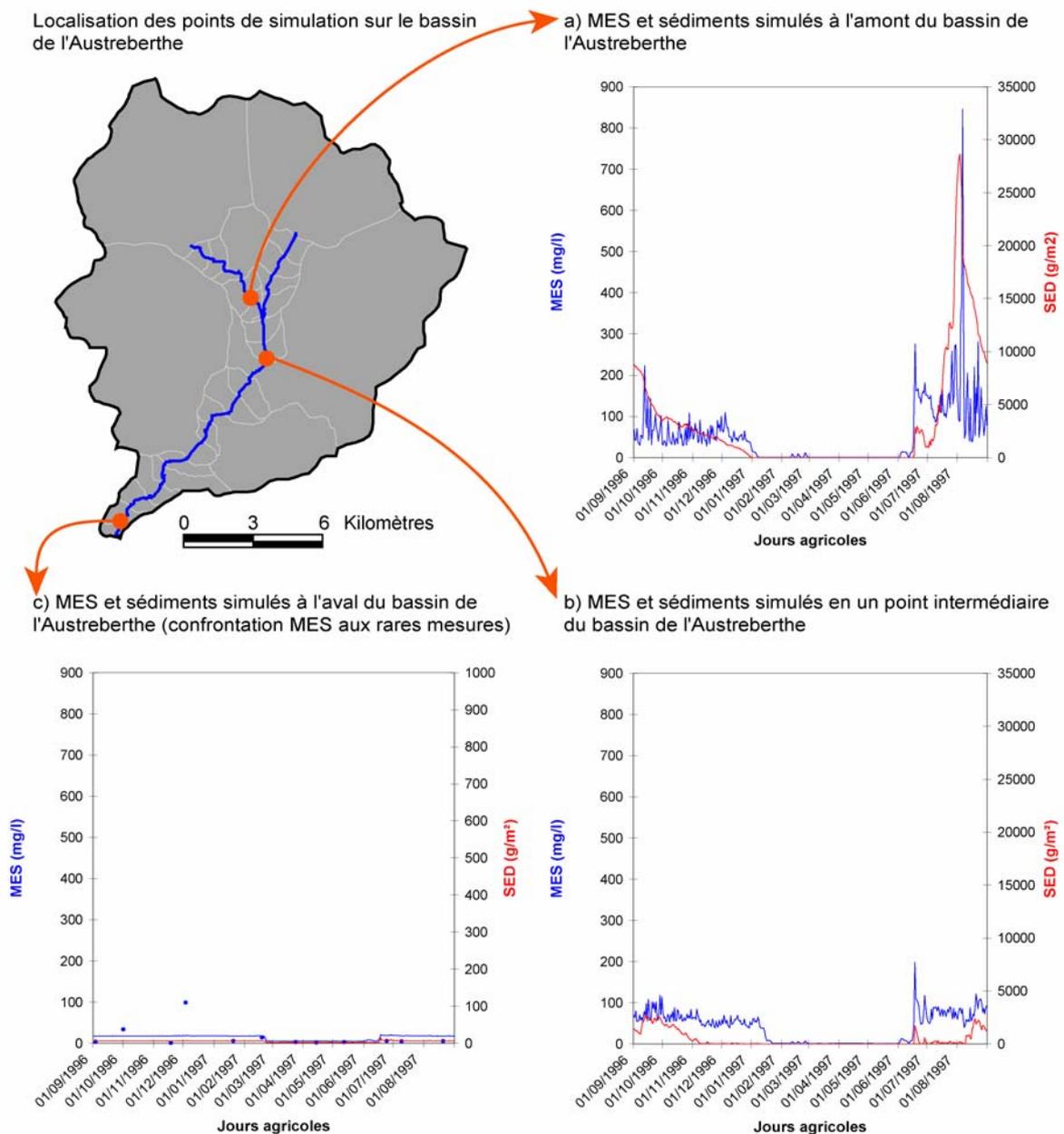


Figure 10 : Variations saisonnières en MES et stocks sédimentaires de l'amont à l'aval

Si une meilleure validation du modèle devra encore être réalisée, sur base de mesures plus fréquentes, la dynamique qu'illustrent ces premiers résultats est cependant assez encourageante.

4. Conclusion et perspectives

Le dispositif SENECA/BRIVE mis en place dans cette étude est opérationnel et permet d'apporter des nouveaux éléments de connaissance du fonctionnement biogéochimique à l'échelle des têtes de bassins. Ceci a été rendu possible notamment par l'intégration d'une résolution spatio-temporelle accrue pour répondre aux limites du logiciel SENEQUE/RIVERSTRAHLER.

Il convient d'insister cependant sur la complémentarité des 2 logiciels : SENECA ne rend pas SENEQUE caduque, ce dernier gardant tout son intérêt à l'échelle de grands bassins. Le détournement par un outil dédié aux cours d'eau de tête de bassins vise à mieux appréhender les processus liés aux apports diffus (érosion, apports de temps de pluie) qui ne sont pas encore simulés avec tout le détail requis par SENEQUE. L'objectif à plus long terme est de retransposer à l'échelle du bassin de la Seine (et donc dans l'outil SENEQUE) les connaissances qui pourront être acquises grâce aux études fines réalisées à l'aide de modèles tels que STREAM et SENECA.

Il reste que ce travail devra faire l'objet d'une validation plus poussée, qui n'a pu être faite ici faute de temps et de mesures disponibles. En ce sens, de nouvelles données de validation récentes devraient être acquises dans un avenir proche pour finaliser l'étude sur l'Austreberthe.

Conçu de façon générique, ce nouveau système intégré de modélisation pourra rapidement être transposé sur deux sites ateliers du PIREN-Seine (Vesle et Blaise). Grâce notamment à son couplage avec le modèle STREAM, il devrait permettre de simuler l'impact de modifications spatiales des pratiques agricoles ou d'élevage et des aménagements paysagers (ex : introduction de bandes enherbées) sur la qualité des eaux de surface et sur les flux d'exportation de matières polluantes à l'échelle des têtes de bassin.

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 transfers through the Seine drainage network : a budget based on the application of the RIVERSTRAHLER Model*. Hydrobiologia, n°410, pp. 139-150.
- Billen G., Garnier J., Ficht A., Cun C. (2001). *Modeling the response of water quality in the Seine river Estuary to human activity in its watershed over the last 50 years*. Estuaries, vol. 24, n°. 6B, pp. 977-993.
- Celik I., Rodi W. (1991). *Suspended sediment transport capacity for open channel flow*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 117: 191-204.
- Cerdan O., Souchère V., Lecomte V., Couturier A., Le Bissonnais Y. (2002). *Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management*. Catena 46, 189 – 205
- Cerdan O., Le Bissonnais Y., Couturier A., Saby N. (2003). *Modelling interrill erosion in small cultivated catchments*. Hydrological processes 16, 3215-3226
- Dufayt O. (2000). *Etude expérimentale et modélisation du développement de la Renoncule flottante dans la Semois*. Thèse. Fondation Universitaire Luxembourgeoise. Arlon (Belgique).
- Dufayt O., Garnier J., Billen G., Pinault S. (2001). *Les peuplements de macrophytes dans le bassin de la Marne*. Rapport AESN, Direction « Vallée de la Marne ».
- 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.
- Garnier J., Billen G., Palfner L. (2000). *Understanding the oxygen budget and related ecological processes in the river Mosel : the RIVERSTRAHLER approach*. London : Hydrobiologia n°410, pp. 151-166.
- Garnier J., d'Ayguésives A., Billen G., Conley D., Sferratore (2003). *Silica dynamics in the hydrographic network of the Seine River*. Oceanis, 29 : 139-160.
- Garnier J., Billen G., Cugier Ph. (2004). *Drainage basin use and nutrient supply by rivers to the coastal zone. A modelling approach to the Seine River*. p 60-87 In: *Drainage basin nutrient inputs and eutrophication:*

- an integrated approach*. P. Wassmann & K. Olli (Eds). E-book in press, 309 p. available at: www.ut.ee/~olli/eutr/
- Garnier J., Némery J., Billen G., Théry S. (2005). *Nutrient dynamics and control of eutrophication in the Marne River system: modelling the role of exchangeable phosphorus*. Journal of Hydrology, (in press)
- Garnier J, Sferratore A., Meybeck M., Billen G., Dürr H. (in press). *Modelling silica transfer processes in river catchments. Chapter in SCOPE book series*.
- Laurini R., Milleret-Raffort F. (1993). *Les bases de données en géomatique*. Paris : Hermès, 340 p.
- Martin L. (2001). *Fonctionnement écologique de la Seine à l'aval de la station d'épuration d'Achères : données expérimentales et modélisation bidimensionnelle*. Thèse Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 279 pp
- Némery J., Garnier J., Billen G. (2003). *Apports diffus et ponctuels de phosphore dans un bassin versant dominé par les activités agricoles : la Marne*. J. R. Océano. 28: 177-184
- Pantazis D., Donnay J-P. (1996). *La conception de SIG - méthode et formalisme*. Paris : Hermès, 338 p.
- Ruelland D., Billen G. (2003). *Couplage de la chaîne de modélisation Stics/modcou avec SENEQUE 3*. Paris : Rapport PIREN-Seine 2002, CNRS, p. 25-39.
- Ruelland D., Billen G. (2004). *Applicatif SENEQUE 3 : notice d'utilisation (2001-2004)*. Paris : Rapport PIREN-Seine 2003, CNRS, 30 p.
- Ruelland D. (2004). *SENEQUE, logiciel SIG de modélisation prospective de la qualité de l'eau*. Paris : Hermès, Revue Internationale de Géomatique, vol. 14, n° 1, p. 97-117.
- Souchère V., Sorel L., Couturier A., Le Bissonnais Y., Cerdan O. (2005). *Application du modèle STREAM à l'échelle d'un bassin versant au cours d'un cycle hydrologique*. Paris : Rapport PIREN-Seine 2004, CNRS, sp.
- Sferratore, A., Garnier, J. & Billen, G. (in prep). *A refined model of diffuse inputs and in-stream transformation of silica in river systems*.
- Strahler A-N. (1957). *Quantitative analysis of watershed geomorphology*. Washington : Geophys. Union Trans. 38, pp. 913-920.