

Seneque 3, logiciel SIG de modélisation prospective de la qualité des eaux de surface

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

1. Introduction	26
2. Modélisation de l'hydrosystème Seine et SIG	27
2.1. La stratégie de modélisation du Piren-Seine	27
2.2. Le modèle Riverstrahler	28
2.3. Des besoins de la modélisation au SIG	28
3. Seneque 3, couplage intégré d'un SIG au modèle Riverstrahler	29
3.1. Objectifs	29
3.2. Modélisation des bases de données	30
3.3. Traitements et interfaces de pilotage	31
4. Discussion	32
4.1. Apports de l'applicatif Seneque 3	32
4.2. Critique et mise en perspective méthodologique	33
5. Conclusion	34
6. Bibliographie	34

1. Introduction

L'attente des gestionnaires en terme d'outils d'aide à la décision se fait de plus en plus pressante face aux exigences de la législation sur la gestion des ressources en eau par bassin. La nouvelle Directive Cadre Européenne se montre même particulièrement ambitieuse en prônant la gestion des ressources en eau par bassin et le retour à un "bon état écologique" de nos rivières d'ici quinze ans.

Tout comme il faut réfléchir avant d'agir, il faut comprendre avant de gérer. Or, comprendre le fonctionnement des systèmes hydriques n'est pas chose facile, demande du temps, de nombreuses observations et des experts pour expliquer avec plus ou moins de succès les phénomènes. Ainsi, les équipes de recherche du Piren-Seine¹ tentent de formaliser les connaissances d'ensemble des processus physiques, biologiques et socio-économiques nécessaires à une gestion durable des ressources hydriques. Elles procèdent à la mise au point de modèles qui rassemblent les connaissances acquises et permettent les tests d'hypothèses. Ces modèles, conçus d'abord comme des outils de connaissances traduisant une certaine vision du système, ont aussi pour ambition de guider l'action des gestionnaires des ressources en eau. Les logiques spatiales qui sont au cœur de ces modèles ont ouvert la porte tout naturellement aux Systèmes d'Information Géographique. Néanmoins, l'association modèle-SIG n'est pas toujours aisée : la séparation entre traitements réalisés par le SIG et calculs des modèles qui s'impose de prime abord offre peu de souplesse, ralentit l'activité de modélisation et rend les outils difficilement transférables auprès des gestionnaires.

Le logiciel SIG Seneque 3 apporte une réponse à ces problèmes. Conçu comme un applicatif intégré indépendant, il offre une interface utilisateur permettant à la fois de visualiser et d'intégrer les bases de données spatio-temporelles, d'en extraire les données nécessaires pour un projet de

¹ Le Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement de la Seine est un Groupement de Recherche du CNRS rassemblant des équipes du CNRS, de l'INRA, du Cemagref, du CEREVE et de diverses Universités et Grandes Ecoles

modélisation défini, de piloter le déroulement de ce projet, de simuler des scénarios prospectifs et enfin de visualiser les résultats de la modélisation sous forme graphique ou cartographique.

Dans cet article², nous présentons donc l'expérience de développement du logiciel Seneque 3. Dans un premier temps, nous tenterons de comprendre comment le SIG s'est imposé dans les travaux de modélisation et quelles raisons ont conduit à la mise en œuvre d'un outil complètement intégré. Nous décrirons ensuite les caractéristiques du logiciel et nous examinerons les éléments qui fondent son intégration. La discussion permettra de faire la synthèse du cas d'étude, ainsi que sa critique et sa mise en perspective méthodologique. Cette expérience nous amènera à envisager de tels applicatifs SIG, non seulement comme la réponse à des besoins de gestion du territoire, mais aussi comme une véritable évolution de la place et du statut des SIG dans les démarches de recherche appliquée.

2. Modélisation de l'hydrosystème Seine et SIG

2.1. La stratégie de modélisation du Piren-Seine

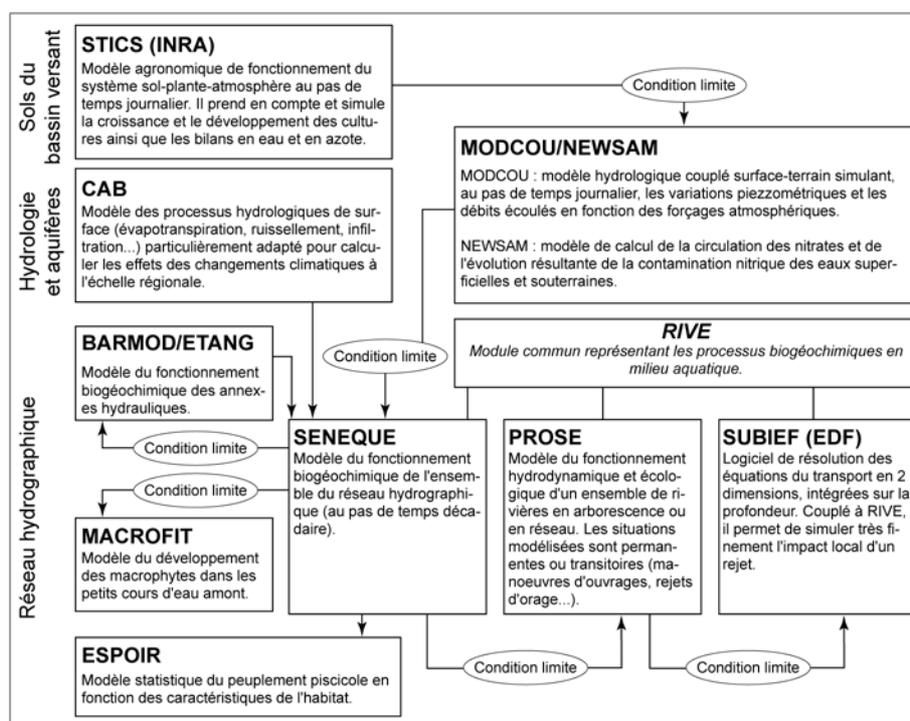


Figure 1: La boîte à outils de modélisation du Piren-Seine (d'après « La Seine en équations »)

Dans le cadre des recherches menées sur le réseau hydrographique de la Seine, ses aquifères et son bassin versant, le programme Piren-Seine développe une série d'outils de modélisation du fonctionnement biogéochimique de ce système complexe (Meybeck *et al.*, 1998). La démarche consiste d'abord à traduire dans des modèles les connaissances acquises à partir d'études détaillées menées sur le terrain ou en laboratoire, puis à valider ces modèles en confrontant leurs réponses à des mesures. Il s'agit ensuite de rendre ces modèles suffisamment opérationnels pour qu'ils puissent répondre aux questions posées par la gestion des ressources en eau.

Ces modèles ne sont pas proposés sous la forme d'un modèle unique assimilant tous les problèmes de qualité de l'eau et du milieu à toutes les échelles où ils se posent. Ils constituent plutôt une boîte à outils de modèles coordonnés ; selon la nature des problèmes auxquels ils s'adressent, et l'échelle de leur domaine géographique, divers outils de modélisation ont été mis au point, formant un

² L'article comporte de nombreux éléments de publications à paraître mentionnées dans la bibliographie (Ruelland, 2003a) et (Ruelland, 2003b). Merci de contacter les auteurs pour d'éventuelles citations.

ensemble de modèles de complexité variable capables de communiquer entre eux. Ainsi, les résultats d'un modèle général peuvent être utilisés comme données d'entrées (par exemple aux conditions limites) dans un modèle plus particulier. Le champ entier de la superficie d'un bassin et des problématiques qui se posent pour sa gestion est ainsi pris en compte à travers une diversité d'outils complémentaires. La figure 1 résume les modèles de cette boîte à outils et leurs liaisons possibles.

2.2. Le modèle Riverstrahler

Parmi les modèles de la "boîte à outils" Piren-Seine, le modèle Riverstrahler (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 de calculer au pas de temps décadaire les principales variables de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de surface à l'échelle d'un bassin versant, à partir des contraintes que constituent la morphologie du réseau hydrographique, la météorologie, la lithologie, l'usage du sol et les rejets ponctuels liés aux activités humaines et industrielles. Son application au bassin de la Seine est communément appelée Seneque ('La Seine en équations'). 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 modèle est composé d'un module hydrologique et d'un module des processus biogéochimiques en milieu aquatique. Le module hydrologique estime les flux d'eau à partir des données de pluviométrie et d'évapotranspiration sur le bassin versant. Une composante superficielle et une composante phréatique de l'écoulement spécifique du bassin versant sont calculées pour générer les débits. Le module biogéochimique, quant à lui, représente de manière générique la cinétique des processus liés au cycle du carbone et des nutriments dans les milieux aquatiques. La qualité de l'eau est décrite par la concentration en oxygène, en nutriments (NH₄⁺, NO₃⁻, PO₄³⁻, SiO₂...), en matières en suspension et en carbone organique dissous et particulaire. Les compartiments biologiques sont représentés par des espèces d'algues, des organismes zooplanctoniques, des bactéries hétérotrophes ainsi que des bactéries nitrifiantes. Les bactéries fécales et les macrophytes sont également prises en compte en temps que variables d'état.

2.3. Des besoins de la modélisation au SIG

La modélisation de la qualité de l'eau s'organise en plusieurs étapes. Tout d'abord, il s'agit de fournir au modèle un certain nombre de variables de forçage (ou contraintes) sous forme de fichiers de valeur numérique. Plus tard, après que les schémas conceptuels aient été choisis, que les équations mathématiques qui les traduisent aient été établies et résolues, le modèle doit être vérifié, calé et validé. Dans un premier temps, les résultats calculés par le modèle (variables d'état) sont comparés à un ensemble de mesures de terrain ; le calage visant à ajuster au mieux les estimations aux observations. Dans un second temps, la validation consiste à appliquer le modèle à une situation différente de celle qui a été utilisée pour le calage et à comparer les résultats du modèle et les mesures. Pour ce faire, le modèle doit notamment être testé sur le même site (voire sur un autre site) pour d'autres situations hydrologiques ou météorologiques. En conséquence, la modélisation, qui repose sur un découpage géographique de l'espace et une période de temps, doit intégrer les configurations spatiales et temporelles des objets.

Dans le cas du modèle Riverstrahler, la composition chimique et biologique de l'eau de surface est simulée pour deux types d'objets spatiaux différents (Figure 2). Les secteurs amont sont traités sous forme de bassins pour lesquels les variables de forçage ainsi que les résultats sont considérés comme homogènes pour chaque drain d'un même ordre de Strahler (Strahler, 1957). Plus en aval, le modèle calcule la composition de l'eau pour des objets dénommés axes. Ceux-ci sont traités sous la forme d'un drain principal le long duquel les objets et les résultats sont localisés suivant des points kilométriques.

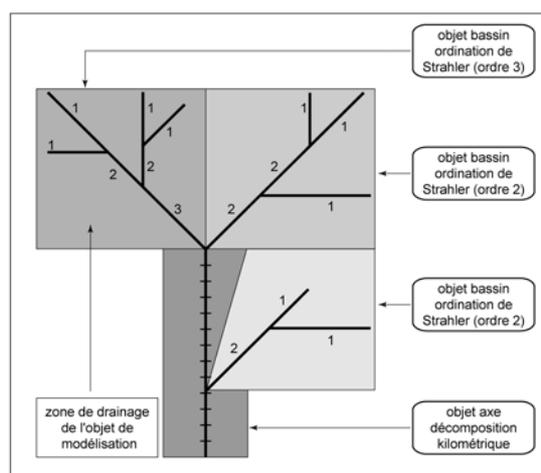


Figure 2: Discretisation spatiale du modèle Riverstrahler

Cette segmentation de l'espace en unités hydrologiques ainsi que la nécessité de normaliser et d'archiver les observations de toutes natures assemblées dans le cadre de la zone concernée ont ouvert la porte tout naturellement aux Systèmes d'Information Géographique. Ainsi, le géoréférencement et la structuration sous SIG des bases de données relatives aux cours d'eau, à la topographie, à la météorologie, à l'usage du sol, à la lithologie, aux rejets domestiques ou industriels, aux mesures de terrain... ont permis d'exploiter progressivement les capacités d'analyse spatiale du SIG pour répondre aux besoins de la modélisation. Par son aptitude à extraire, agréger et combiner l'ensemble des données spatio-temporelles, le SIG est devenu incontournable pour la préparation des fichiers d'entrée et pour la visualisation, notamment cartographique, des résultats du modèle.

Cependant, la simple association du SIG au modèle Riverstrahler montre ses limites. La séparation physique entre le SIG et les premières versions informatisées de Seneque (1.0 et 1.3 sous DOS, 2.0 sous Excel) révèle un manque de cohésion entre les outils et une parcellisation des données et des traitements, qui s'opposent à toute vision d'ensemble. L'enchaînement des nombreuses opérations à réaliser, qu'elles concernent l'extraction des bases de données, les calculs du modèle ou la représentation des résultats en confrontation avec les données observées est lourde et complexe. Les échanges entre les deux outils ne sont pas implémentés et reposent sur des procédures manuelles d'importation et de formatage de données. Il s'ensuit un ralentissement de l'activité de modélisation et une difficulté de transfert du dispositif auprès des gestionnaires, dès lors que les manipulations diverses requièrent des spécialistes. Ces limites nous ont conduit à envisager le pilotage du modèle Riverstrahler directement par une interface SIG et le développement d'un produit spécifique.

3. Seneque 3, couplage intégré d'un SIG au modèle Riverstrahler

3.1. Objectifs

L'objectif de développement de l'appliquatif Seneque 3 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 la qualité de l'eau. Ce système doit permettre à la fois de visualiser et d'intégrer les bases de données, d'en extraire les données pour un projet de modélisation défini, de piloter le déroulement de ce projet, de simuler des scénarios prospectifs et enfin de visualiser les résultats de la modélisation sous forme graphique ou cartographique (Figure 3).

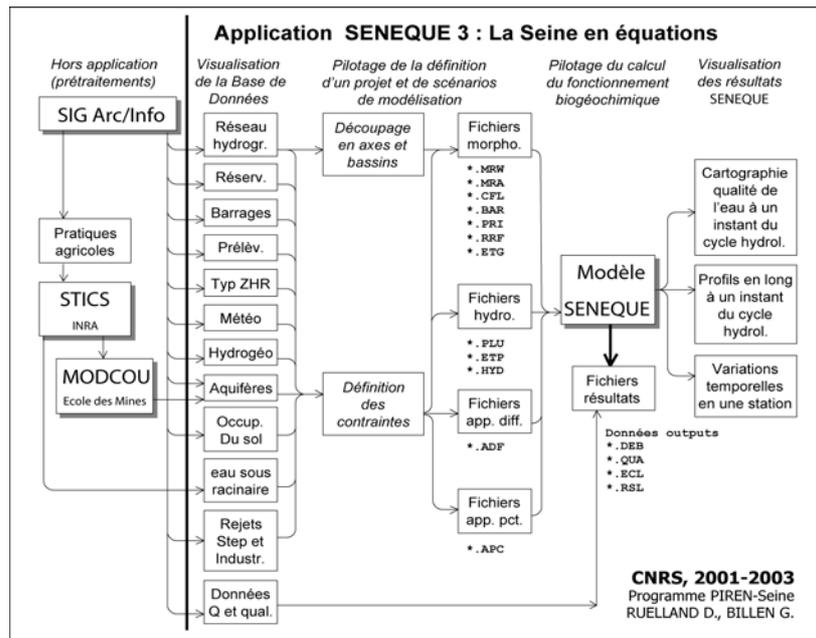


Figure 3: Organigramme général de l'applcatif Seneque 3

L'outil est conçu comme un applicatif, c'est à dire une application, à laquelle correspondent des procédures informatisées, développées à partir des fonctionnalités des SIG sur la base de besoins clairement identifiés et d'une base de données structurée (Denegre et Salge, 1996). Il est construit dans l'environnement de programmation de Visual Basic associé aux fonctionnalités SIG offertes par la bibliothèque de composants géographiques MapObjects de manière à constituer un logiciel inédit, complètement dédié et indépendant des progiciels existants. Il utilise ou produit néanmoins des fichiers au format des progiciels Arc/Info et ArcView. En dehors des fichiers SIG (graphiques et tabulaires), de simples fichiers texte sont utilisés et générés lors des différentes étapes de la modélisation, ce qui confère à l'outil une grande souplesse dans son dialogue avec d'autres modèles ou applications.

3.2. Modélisation des bases de données

L'applcatif Seneque 3 s'appuie sur une base de données spatio-temporelles dérivée de la production de certains organismes nationaux : réseau hydrographique issu de la BD Carthage (IGN), données météorologiques (pluies et évapotranspiration journalières - Météo-France), occupation du sol issue de Corine Land Cover (IFEN), 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, localisation des ouvrages hydrauliques, prélèvements) ou des travaux de recherche (observations de qualité, caractérisation des zones humides ripariennes...).

Le recours au SIG permet d'intégrer de façon détaillée les éléments dans l'espace. Leur utilisation efficace ne peut être obtenue que par une schématisation précise du réel à travers les notions d'objet et de liaison entre objets (Gayte *et al.*, 1997). La base de données de l'applcatif est conçue selon une organisation rigoureuse s'inspirant du formalisme entité-relation (Laurini *et al.*, 1993) (Pantazis *et al.*, 1996). Cette organisation vise à adapter les structures de données au dispositif précis des traitements de la modélisation. Ainsi, les spécificités du modèle Riverstrahler imposent de développer une structure de réseau hydrographique conciliant la décomposition strahlérienne des objets bassin et kilométrique des objets axe. Pour ce faire, le réseau hydrographique respecte une topologie de graphe connexe orienté compatible avec les requêtes de cheminement et où chaque confluence marque le début d'un nouvel arc. Chaque arc est décrit par des informations attributaires telles que l'ordre de Strahler, la longueur, la largeur et la pente et peut être décomposé en tronçons kilométriques par segmentation dynamique au moment des traitements. Tous les tronçons du réseau

sont renseignés par un code topologique inspiré des travaux de Pfastetter (1989) et de Verdin (2001). Ce système de codage basé sur la topologie du réseau de drainage et l'importance de la surface drainée permet l'indexation des entités du réseau de manière à optimiser les fonctionnalités de propagation amont-aval nécessaires aux requêtes de cheminement dans le réseau. Une couverture de bassins (versants) dits élémentaires, dérivée d'un traitement du Modèle Numérique de Terrain, est mise en place directement en association avec le réseau hydrographique. Les entités polygonales de cette couverture représentent la surface directement drainée par chacun des arcs du réseau hydrographique. 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 (Figure 4).

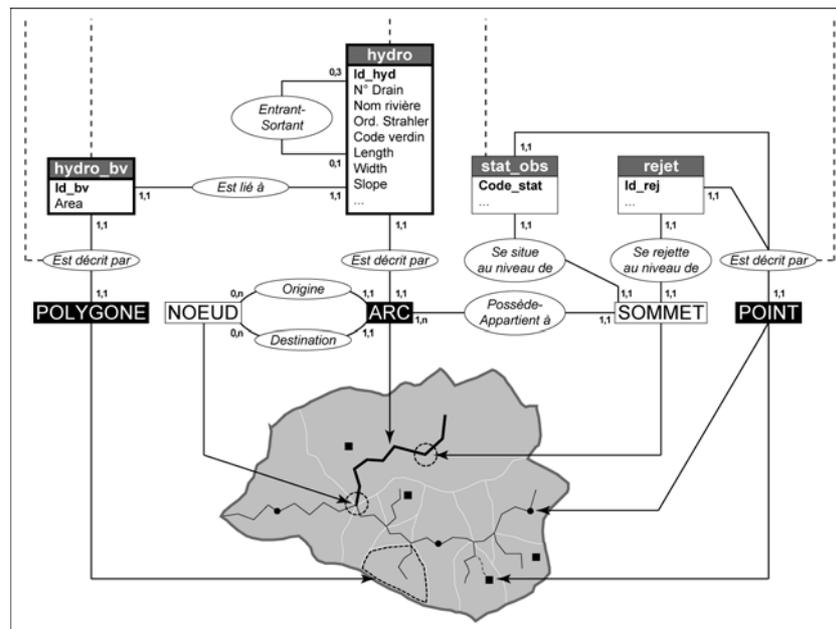


Figure 4 : Modèle entité-relation du réseau hydrographique dans Seneque 3.

Comme dans le monde réel, cette structure de réseau hydrographique et de sa couverture associée de bassins représente la base sur laquelle s'articule la quasi-totalité des autres objets spatiaux. Les entités ponctuelles comme les stations d'observations (et leurs séries de mesures journalières), les ouvrages d'extraction et de rejet d'eau, ou les rejets ponctuels sont « accrochées » (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.

3.3. Traitements et interfaces de pilotage

La conception des interfaces de l'appliquatif est conforme aux standards de Windows : écrans de saisie, menus déroulants, sélection directe d'objets visualisés à l'écran par désignation avec la souris.... Des fonctionnalités SIG sont intégrées de manière à mieux gérer les données spatialisées aussi bien que pour automatiser et faciliter la préparation des variables d'entrée. Un effort important a été mené pour développer des fonctions permettant une consultation orientée selon les besoins de la modélisation.

Dans Seneque 3, un projet de modélisation est un ensemble de scénarios simulés par le modèle (Ruelland et Billen, 2002a ; Ruelland et Billen, 2002b). Il est défini par la portion d'espace et les données de référence auxquelles il s'applique. Le paramétrage des données de contraintes évolue selon les scénarios ; il est possible dès le premier scénario, appelé scénario de référence, qui mobilise des entrées qui constitueront les références du projet. La délimitation spatiale du champ de modélisation, appelée aussi découpage, est basée sur le choix de segments de cours d'eau à considérer comme les constituants d'un bassin ou à individualiser comme un axe principal ou secondaire. L'appliquatif propose des outils de sélection semi-automatiques de sorte que l'utilisateur puisse réaliser un

découpage en fonction du problème posé et de la résolution spatiale recherchée dans le projet. Stocké au sein d'une bibliothèque, ce découpage pourra être utilisé pour d'autres projets. Une fois le découpage précisé, l'utilisateur paramètre l'ensemble des données d'entrée pour le nouveau projet. Il peut alors lancer le calcul des fichiers de contraintes qui seront traités par le modèle pour le calcul du fonctionnement biogéochimique des différents objets du découpage (axes et bassins).

Les interfaces de visualisation des résultats de la modélisation proposent trois types de représentation : 1) un graphique des variations saisonnières correspondant à une représentation décadaire des débits ou concentrations en un point du réseau (exutoire d'un ordre de Strahler d'un bassin ou point kilométrique d'un axe) pour une année donnée ; 2) un graphique des variations longitudinales correspondant à une description kilométrique des débits ou concentrations le long d'un axe pour une décennie donnée ; 3) une cartographie des résultats relatifs à une décennie pour chaque objet du découpage, qu'il soit axe ou bassin. Pour les deux premières figurations, l'utilisateur peut changer d'objet d'étude par simple sélection sur la carte et demander à ce que les résultats estimés soient confrontés de manière automatique aux données mesurées des stations d'observations (Figure 5).

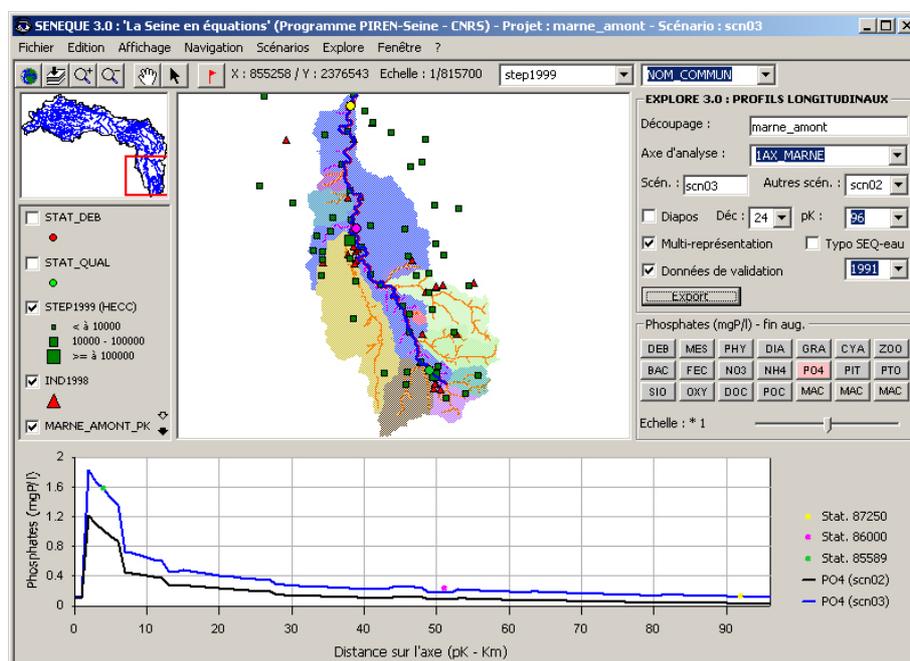


Figure 5: Exemple de visualisation des résultats dans Seneque 3

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 performances des stations d'épurations. 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.

4. Discussion

4.1. Apports de l'appliquatif Seneque 3

Le niveau d'intégration offert par Seneque 3 ouvre de nouvelles perspectives dans la recherche en modélisation. Au sein du même outil, la spatialisation des phénomènes est assurée par

l'enchaînement des traitements du SIG alors que la diffusion spatiale et temporelle de ces phénomènes est explicitement prise en compte par le modèle. La vitesse avec laquelle sont traitées les variables d'entrées et les sorties du modèle favorisent l'analyse et la visualisation des impacts de scénarios alternatifs sur la qualité des eaux de rivière. L'optimisation des traitements pilotés par une interface ergonomique facilite l'entrée des données, le lancement des simulations et la visualisation des résultats pour ajuster le modèle à des nouvelles conjectures sur le fonctionnement de l'hydrosystème. Ainsi, ce logiciel destiné à réaliser des tâches considérablement répétitives permet de dégager un temps précieux pour les expériences de formalisation des traitements, qu'ils concernent les tests d'hypothèses scientifiques sur le fonctionnement du milieu ou l'incorporation de nouvelles données. La base de données associée aux capacités de visualisation et d'analyse du SIG permet de chercher, d'identifier, et de gérer les erreurs et les incertitudes inhérentes à la modélisation.

Par ailleurs, la finalité de l'outil contraint le monde de la recherche à l'exercice difficile mais essentiel de l'intégration des besoins des gestionnaires. Le déploiement du logiciel dans certains services de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie depuis quelques mois montre que d'outil de recherche, le logiciel peut devenir outil de gestion. Face aux exigences de la nouvelle DCE qui impose que les gestionnaires disposent des outils opérationnels nécessaires à démontrer l'efficacité de leur plan d'action pour atteindre l'objectif de restaurer le "bon état écologique" des milieux aquatiques, Seneque 3 semble être un outil adapté pour tester le comportement des variables structurelles d'un système dynamique. Il s'oppose aux outils de modélisation traditionnels, qui restent souvent d'un maniement délicat et surtout sont de médiatisation difficile. Son utilisation est indépendante de la connaissance qu'il renferme le rendant accessible à des non-spécialistes du traitement de l'information géographique ou des techniques de modélisation. Cette transférabilité tend à rapprocher le monde de la recherche de celui de la gestion

4.2. Critique et mise en perspective méthodologique

L'application est déjà opérationnelle. Par rapport aux pratiques antérieures, on voit bien les avantages apportés par une telle intégration. Cependant, le caractère convivial de l'outil ne doit pas faire oublier le manque de souplesse associé à sa mise en œuvre.

La réussite de la mise en place d'un applicatif SIG de ce type dépend pour une bonne part de la disponibilité et de la qualité des bases de données spatiales qui lui sont liées. L'étude d'un système hydrologique de taille importante comme la Seine traitant de manière transversale l'ensemble des problématiques liées à la qualité de l'eau, implique une certaine simplification de la réalité. Malgré leur complexité, les modèles ne sont que des simplifications des processus réels ; la réalité est idéalisée. Il en va de même pour les données. Si le recours aux SIG permet de décrire de façon détaillée les éléments de l'espace, il n'en reste pas moins que les représentations reposent sur une schématisation parfois imprécise du terrain. Les hypothèses retenues pour la description du système reposent parfois sur des données qui ne sont pas renseignées ou qui contiennent des valeurs approximatives. Or, les modèles de simulation des systèmes sont très globaux et d'autant moins précis que les données ne le sont pas. Quand la quantification est peu poussée, les modèles doivent être utilisés avec discernement et ils ne sauraient être considérés comme des modèles prévisionnels.

Indépendamment des problèmes de disponibilité et de qualité des données, il faut s'assurer que l'ensemble des informations est en adéquation avec la structure de données exigée par l'applicatif. Vérifier la cohérence des bases de données spatiales est primordial si l'on désire obtenir des réponses fiables et faire des raisonnements valides. La vérification de la cohésion des données attributaires renvoie aux contraintes d'intégrité des bases de données conventionnelles : chaque entité a un identifiant unique, les champs respectent une structure strictement spécifiée... La particularité des bases de données spatiales impose aussi de certifier la cohérence topologique et sémantique des objets graphiques. Par exemple, le graphe connexe orienté représentant le réseau hydrographique doit répondre à des exigences élémentaires telles que l'écoulement se fait de l'amont à l'aval, à chaque confluence débute un nouvel arc, un sous-bassin élémentaire contributif est parcouru par un seul bief... Pour aborder ces problèmes, des programmes de test de cohérence peuvent être développés parallèlement à l'application de manière à garantir l'intégrité de volumes de données considérables.

Lors de la transposition à d'autres zones, la validité des requêtes attributaires et spatiales dépend largement de ce contrôle de l'homogénéité spatiale, descriptive et temporelle de l'information.

Enfin, la maintenance et la mise à jour d'un tel système ne sont pas figées. Elles se distinguent des applicatifs largement répandus dans les domaines des transports, de l'aménagement foncier ou encore des réseaux de distribution, par une évolution permanente liée aux progressions des modèles et des données. La prise en compte des besoins de gestion et le souci continu d'un plus grand réalisme obligent à adapter l'outil constamment par des changements profonds du système aussi bien au niveau de la structure des bases de données que des équations de calcul.

5. Conclusion

Les Systèmes d'Information Géographique représentent aujourd'hui l'outil le plus complet permettant de collecter, croiser et échanger les données spatio-temporelles. En l'état, ils ne constituent néanmoins que des outils qui ne peuvent livrer toutes leurs potentialités que s'ils disposent d'un ensemble d'informations numériques spatialisées pouvant être analysées, traitées et enfin visualisées en vue de besoins clairement identifiés.

En cela, les modèles développés par les équipes scientifiques peuvent constituer un excellent socle sur lequel ils s'épanouissent. A terme, la mise en place d'un dispositif pouvant délivrer en permanence une information géographique adaptée à un problème ou à une décision spécifique crée une valeur ajoutée qui finit par changer le statut du SIG vis à vis des modèles et débouche sur une véritable association ; la connaissance liée aux modèles amenant à la technique de gestion des données géographiques qui pousse elle-même à modifier la codification de la connaissance, alternativement.

Avec les applicatifs, les SIG occupent un rôle encore plus central dans les travaux de recherche ; ils ne sont plus seulement une technique mais un autre mode de pensée : bases de données, modèles et applications ne font plus qu'un. Ce rassemblement entraîne un changement des paradigmes car il en fait un support privilégié d'aide à la confection et à la décision. En rapprochant le traitement de l'information géographique des besoins des utilisateurs, des processus de décision et des pratiques de gestion, les applicatifs modifient sensiblement les relations entre le monde de la recherche et celui de la gestion.

6. Bibliographie

- 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.
- Denegre J. Salge F. (1996). *Les Systèmes d'Information Géographique*. Paris : Presses Universitaires de France, 127 p.
- 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.
- Gayte O., Libourel T., Cheylan J-P., Lardon S. (1997). *Conception des systèmes d'information sur l'environnement*. Paris : Hermès, 153 p.
- Laurini R., Milleret-Raffort F. (1993). *Les bases de données en géomatique*. Paris : Hermès, 340 p.
- Meybeck M., De Marsily G., Fustec E. (1995). *La Seine en son bassin : fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*. Paris : Elsevier, 759 p.
- Pantazis D., Donnay J-P. (1996). *La conception de SIG - méthode et formalisme*. Paris : Hermès, 338 p.

- Pfastetter O. (1989). *Classification of hydrographic basins: coding methodology*, unpublished manuscript, DNOS, August 18, 1989, Rio de Janeiro; translated by J.P. Verdin, U.S. Bureau of Reclamation, Brasilia, Brazil, September 5, 1991.
- Ruelland D., Billen G. (2002a). *Applicatif Seneque 3.0 - Notice de développement*. Paris : Programme PIREN-Seine, CNRS, 46 p.
- Ruelland D., Billen G. (2002b). *Applicatif Seneque 3.0 - Notice d'utilisation*. Paris : Programme PIREN-Seine, CNRS, 28 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.
- Strahler A-N. (1957). *Quantitative analysis of watershed geomorphology*. Washington : Geophys. Union Trans. 38, pp. 913-920.
- Verdin K. (2001). *A System for Topologically Coding Global Drainage Basins and Stream Networks* – unpublished manuscript, US Geological Survey. <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/hydro/P311.html>