

Amélioration d'un système de modélisation intégrée et développement du protocole d'application pour l'analyse de scénarios d'assainissement agricoles à l'échelle du bassin versant

1. Amélioration du modèle de transport de nutriments et intégration d'un modèle de prélèvement par les plantes

Le travail a d'abord consisté à revoir le modèle de transport de nutriments de GIBSI et effectuer les modifications nécessaires afin d'obtenir des résultats plus vraisemblables sur la dynamique des stocks d'azote et de phosphore dans le sol. La deuxième étape fut de sélectionner, développer et intégrer un modèle de prélèvement par les plantes, à partir de travaux antérieurs de l'équipe. Selon les possibilités, nous avons testé deux approches, mettant ainsi en évidence leurs avantages et limites dans le contexte de GIBSI. De là un modèle simple et empirique de type logistique a été retenu, basé sur le rendement moyen des cultures et la notion de degrés-jours. Ici, le principal avantage est de ne pas nécessiter de données météorologiques souvent indisponibles (ex. : rayonnement solaire). De plus, compte tenu de la structure découplée des modèles de GIBSI (hydrologie simulée indépendamment du transport de nutriments), il est vain de vouloir simuler le prélèvement hydrique et de nutriments des plantes de manière dynamique. Ce modèle a été intégré au code du modèle de transport de nutriments (POPES). Nous considérons que cet objectif a été complété à 80%.¹ À noter que la réalisation de cet objectif a contribué à la formation d'un postdoctorant (R. Quilbé Ph.D., Dir. AN Rousseau & JP Villeneuve).

2. Développement d'un modèle de transport des pathogènes d'origine animale

Suite à une revue de la littérature sur l'excrétion, le transport et le devenir des agents pathogènes, nous avons choisi une approche de modélisation en fonction de la disponibilité des données et de l'importance des processus à l'échelle de GIBSI. Le modèle développé (TransPath) est un modèle conceptuel, simple, d'excrétion et de transport et devenir des agents pathogènes. Il simule l'excrétion, l'entreposage, l'épandage, la mortalité, le partitionnement, les transports particulaire, libre et hypodermique ainsi que l'excrétion directe du fumier/lisier au cours d'eau. Le calage s'est effectué avec les mesures de concentration en coliformes fécaux et le débit dans le Bras d'Henri fournies par le MDDEP (coll. M Patoine, DSEE; F Godin, CEHQ). Le calage s'est fait avec les mesures de l'année 2003 avant d'être vérifié sur les années 2000-02. Les concentrations simulées sont du même ordre de grandeur que celles mesurées. Toutefois, les concentrations élevées associées aux événements de précipitation, d'érosion et de transport sont difficilement reproduites. Ceci n'est cependant pas un problème dans l'optique où GIBSI est conçu pour comparer différents scénarios de gestion entre eux.

L'analyse de sensibilité et l'analyse sur les erreurs des données d'entrées ont été effectuées. Ces analyses ont permis de quantifier l'impact des variations des paramètres de TransPath et des données d'entrées sur les concentrations simulées. Les sensibilités absolue et relative très élevées du coefficient de partitionnement et de la proportion d'animaux ayant un accès direct au cours d'eau corroborent l'importance accordée à ces processus lors de la conception. Les travaux effectués ont permis de doter

¹ Travaux ayant servi d'assise au stage de 2e cycle de F. Lasbleis (2008, U. Pierre et Marie Curie, France). Lasbleis, F., Savary, S., A.N. Rousseau. 2008. Amélioration et calage du modèle de transport de polluants et pesticides (POPES) et application sur le bassin versant de la rivière Beaurivage. Rapport de recherche No R-1022. Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Québec, PQ.

GIBSI d'un modèle d'apport, de transport et du devenir des coliformes fécaux provenant des rejets diffus d'origine agricole. Avant la réalisation de ce projet, seuls les rejets ponctuels de coliformes étaient considérés. Cet objectif a été complètement réalisé et a fait l'objet d'un mémoire (G. Rogel, Dir. A.N. Rousseau; Co-Dir. A. Mailhot), contribuant à la formation de deux chercheurs (1^{er} cycle, M. Filion, P. Boucher) ainsi que la présentation de conférences et de rédaction de rapports.

3. Étude des relations entre les variables simulées et l'intégrité biologique des cours d'eau

La qualité biologique est déduite à partir de la structure des communautés de diatomées et de macroinvertébrés benthiques. Les résultats sont présentés ici selon l'ordre du travail accompli, c'est-à-dire, dans un premier temps la construction des bases de données (BD) et l'utilisation de celles-ci pour : (i) identifier les communautés de macroinvertébrés de référence , (ii) prédire les communautés de diatomées de référence des cours d'eau du Québec , (iii) redéfinir les limites des classes d'intégrité écologique de l'Indice Diatomée de l'Est du Canada (IDEC) en fonction de seuils écologiques significatifs et (iv) prédire la valeur d'IDEC des rivières altérées et de référence à partir des variables physico-chimiques.

Au niveau des diatomées, nous nous sommes basés sur des campagnes d'échantillonnage qui avaient eu lieu au printemps et à l'automne 2002-03 : aux 126 stations du Réseau-rivières situées dans 34 bassins et certains de leurs tributaires. Des échantillonnages supplémentaires ont été réalisés dans le bassin de la Chaudière, au printemps et à la fin des étés 2005-06, afin de bien représenter les communautés de ce bassin pour la modélisation dans GIBSI : 23 stations dans l'ensemble de ses sous-bassins. De plus, 10 nouveaux sites de référence (milieux peu dégradés), principalement localisés dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, ont été échantillonnés afin de pallier à un manque de représentativité de la BD de diatomées de l'UQTR, pour un total de 159 stations différentes. Les 410 échantillons de 2002-03 ont été traités et identifiés. Les 119 échantillons de 2005-06 ont été identifiés. La BD finale regroupe 529 échantillons.

Pour ce qui est des macroinvertébrés, les données de deux BD distinctes ont été utilisées. La première contient les données sur la faune aquatique de 1989-2001 recueillies à l'aide de substrats artificiels (*Hester-Dendy*) et la deuxième, les données recueillies par la méthode monohabitat dans les cours d'eau peu profonds à substrat grossier (Moisan et Pelletier, 2008).² Un total de 326 stations d'échantillonnage *Hester-Dendy* retenues pour les analyses se trouvent dans 15 grands bassins, dont le bassin de la Chaudière, et certains de leurs tributaires principaux. 31 sites ont été échantillonnés par la méthode monohabitat à la fin des étés et à l'automne 2003-05. Un nombre plus important de sites se trouvent dans cinq grands bassins, dont le bassin de la Chaudière, et certains de leurs tributaires principaux. Sur les 31 sites, ceux des rivières Boyer Nord, Boyer Sud, des Abénaquis et Etchemin ont été échantillonnés les trois années. Un total de 39 échantillons a fait l'objet de cette étude.

L'échantillonnage, le traitement et l'identification des macroinvertébrés ont été réalisés par la DSEE du MDDEP (coll. L. Pelletier; Y. Richard). Les données physico-chimiques et d'habitat ont été fournies par la DSEE du MDDEP pour les BD macroinvertébrés. Les données physico-chimiques disponibles pour l'ensemble des stations à l'étude sont : le phosphore total, l'azote total, le pH, la conductivité, la température, l'oxygène dissous, la turbidité et le carbone organique dissous. Les caractéristiques du

² Moisan, J. et L. Pelletier, 2008. Guide de surveillance biologique basée sur les macroinvertébrés benthiques d'eau douce du Québec – Cours d'eau peu profonds à substrat grossier, 2008. Direction du suivi de l'état de l'environnement, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, ISBN : 978-2-550-53591-1 (version imprimée), 86 p. (incluant 6 ann.); http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/macroiinvertebre/surveillance/benthiques.pdf.

tronçon (ex. largeur du cours d'eau, types de substrat, *etc.*), de l'habitat physique (ex. disponibilité des abris) et de la bande riveraine ont été évaluées pour chaque site. Un SIG a été créé pour établir les caractéristiques du bassin en amont de chaque site d'échantillonnage : l'aire du bassin, la géologie, les dépôts de surface, l'utilisation du sol, la région naturelle, et l'altitude des stations. À ce jour, les BD diatomées et macroinvertébrés sont complétées. À noter que les données physico-chimiques de la BD macroinvertébrés *Hester-Dendy* disponibles au MDDEP ont dû être complétées et le SIG a été développé pour les besoins de l'étude. Les données manquantes ont dû être complétées par des équivalences lorsque possible. Les données caractérisant les 390 bassins ont été produites pour les BD diatomées (2005-06) et macroinvertébrés, s'ajoutant aux 126 bassins de la BD de l'UQTR.

(i) L'identification des conditions de référence est essentielle afin de réduire l'effet des facteurs naturels dans l'évaluation de l'intégrité biologique. Une procédure permettant d'identifier les communautés de macroinvertébrés de référence *a posteriori* a été développée pour la BD monohabitat. Cette approche a permis d'identifier trois communautés de référence (biotypes), une communauté peu altérée et trois altérées. Les communautés de référence se différencient en fonction de la concentration naturelle en carbone organique dissous et l'ordre du cours d'eau, mais elles représentent davantage un continuum sur les gradients de variations naturelles que des entités discrètes. Considérant les résultats de cette étude, nous proposons le développement d'un indice multivarié basé sur des axes d'ordination pour évaluer l'intégrité écologique des sites (Grenier, 2007).³. Les conditions de référence des macroinvertébrés de la BD *Hester-Dendy* sont en développement. Cependant, les résultats obtenus avec les *Hester-Dendy* ne sont pas concluants et ne pourront sûrement pas être utilisés pour créer un indice. De plus, les échantillons monohabitat sont trop peu nombreux pour espérer faire un indice. .

(ii) Une étude préliminaire a permis de démontrer que le pH est le principal facteur qui explique les différences entre les communautés de diatomées de référence. Il en existe deux grands types, une pour les conditions circumneutres (pH ~ 6 à 7.65) et l'autre pour les conditions alcalines (pH ~ 7.65 à 8.8). Des modèles prédictifs (arbres de classification, *random forests* et réseaux neuronaux) ont été développés dans cette étude afin d'identifier les variables environnementales permettant de distinguer les deux communautés de diatomées de référence. Les trois modèles suggèrent que la géologie explique les différences entre les deux communautés de référence. Les roches argileuses (ex. : schistes), siliceuses (ex. : grès) et carbonatées (ex. : calcaire et marbre) expliquent la présence des communautés de référence alcalines. Les gneiss/paragneiss expliquent la présence des communautés de référence circumneutres. Les modèles *random forests* et réseaux neuronaux ont démontré la meilleure capacité prédictive. Le modèle *random forests* a été et pourra être utilisé pour identifier quel sous-indice de l'Indice des Diatomées de l'Est du Canada (IDEC) devrait être utilisé pour chaque site: l'IDEC-circumneutre ou l'IDEC-alcalin. L'IDEC permet d'évaluer le niveau d'intégrité biologique d'un site en fonction de la différence de sa communauté de diatomées avec la communauté de référence appropriée à celui-ci. (iii) La redéfinition des classes de l'IDEC en fonction de seuils écologique significatifs c'est faite en fonction des biotypes de diatomées, ce qui a mené à la définition de quatre classes d'intégrité écologique: les conditions de référence (A), légèrement altérées (B), altérées et sévèrement altérées (D). (iv) Finalement, les deux modèles *random forests* développés (un pour chaque sous-indice) ont démontré que les valeurs d'IDEC sont principalement prédites par les concentrations en phosphore total et en azote total des cours d'eau. Ces variables fournissent 83% et 72% de la capacité prédictive des modèles alcalin et circumneutre. Ces modèles sont calés à l'échelle québécoise

³ Grenier M., L. Pelletier, A.N. Rousseau, S. Campeau. 2007. Identification des communautés de référence de macroinvertébrés pour l'évaluation du niveau d'intégrité écologique des écosystèmes aquatiques: Comparaison des approches *a priori* et *a posteriori* et proposition d'un indice multivarié. Rapport de recherche No I-236. Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Québec, PQ.

et de la rivière Chaudière. L'intégration de ceux-ci à GIBSI permet de tester l'effet de pratiques de gestion bénéfique sur l'intégrité biologique des cours d'eau. Des simulations sont d'ailleurs en cours.

À noter que la réalisation de cet objectif, complété à 90%, contribue à la formation d'une doctorante (M Grenier 2005-09; Dir. AN Rousseau; Co-Dir. S Campeau) et d'étudiants stagiaires (1^{er} cycle Y. Boissonneault, UQTR; 3^e cycle, I. Lavoie, Trent University) ainsi que la présentation de conférences et la rédaction de publications.⁴

4. Calage des modèles de pollution diffuse

Les données de base utilisées sont les données de concentrations en sédiments et en polluants (nutriments et coliformes) déjà disponibles ainsi que celles obtenues dans le cadre de ce projet sur le sous-bassin du bras d'Henri (coll. M Patoine, DSEE). Toutefois, ces quelques données, qui sont au mieux hebdomadaires, ne sont pas suffisantes pour procéder au calage des modèles. Nous avons également besoin d'estimer les charges de polluants sur une base annuelle, saisonnière et si possible journalière. Pour cela un important travail a été réalisé pour définir une méthode d'estimation adaptée aux données. En particulier, une méthode statistique novatrice a été développée, basée sur l'utilisation de lois statistiques et de covariables pour décrire la relation entre les concentrations en sédiments (ou en polluants) et le débit journalier. La première étape du calage des modèles de GIBSI a porté sur le modèle érosion. Quelques corrections ont été apportées au modèle concernant le processus de sédimentation et de réentraînement des sédiments en rivière. Le calage du modèle a ensuite été réalisé sur le sous-bassin de la rivière Beaurivage à l'aide de données bi-mensuelles de concentrations en sédiments en 1989. Les résultats obtenus sont satisfaisants concernant la charge annuelle en sédiments, avec un écart de -7.7% par rapport à la charge moyenne estimée à l'aide de la méthode statistique développée. Les résultats sont moins bons pour la validation temporelle (+21% et -35% pour les années 1996 et 1997 respectivement). Les charges journalières estimées sont correctement simulées, excepté en période de crue printanière (surestimation des charges par le modèle) et en période d'étiage (sous estimation). Pour la validation spatiale à l'exutoire de la rivière Chaudière, les données étaient trop rares pour pouvoir estimer une charge annuelle, mais les concentrations et charges journalières étaient correctement simulées. Concernant le modèle de transport de nutriments, seule une comparaison des résultats de simulation avec les données mesurées de concentration a été réalisée, montrant que le modèle donnait les bons ordres de grandeur, mais que la dynamique journalière n'est pas correctement reproduite. Compte tenu du travail plus important que prévu qui a été nécessaire pour corriger et caler le modèle d'érosion, le calage du modèle de transport de nutriments n'a pu être réalisé complètement. La réalisation de cet objectif qui est complété à 80% a contribué à la formation d'un postdoctorant (R. Quilbé Ph.D., Dir. AN Rousseau & JP Villeneuve), deux étudiants stagiaires (2^e cycle, P. Gagnon, 1^{er}, G. Talbot). Il a également fait l'objet de quelques présentations et publications.⁵

⁴ Grenier, M., S. Campeau, I. Lavoie, Y.S. Park, S. Lek. 2006. Diatom reference communities in Quebec (Canada) stream based on Kohonen self-organizing maps and multivariate analyses. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **63**: 2087-2106. + Trois (3) publications en préparation (Predicting diatom reference biotypes in Québec (Canada) streams using classification trees, random forests, and neural networks. 2. Defining meaningful ecological thresholds to determine class boundaries in bioassessment tools. 3. Predicting the effect of best management practices on biological integrity in a small impacted watershed: an application of the Indice Diatomées de l'Est du Canada (IDEC) and random forests model.

⁵ Mailhot, A., A.N. Rousseau, G. Talbot, P. Gagnon, R. Quilbé. 2008. A framework to estimate sediment loads using distributions with covariates: application to the Beaurivage River watershed (Quebec, Canada). *Hydrological Processes*, **22**, 4971-4985. Quilbé, R., A. N. Rousseau, M. Duchemin, A. Poulin, G. Gangbazo, J.-P. Villeneuve. 2006. Selecting a calculation method to estimate sediment and nutrient loads in streams : application to the Beaurivage River (Québec, Canada). *Journal of Hydrology*, 326: 295-310

5. Définition du protocole d'application de GIBSI

Préalablement à la définition du protocole à proprement parler, un travail de mise à jour et de clarification de la BD de GIBSI a été réalisé. La BD Microsoft Access a d'abord été migrée vers le format MySQL afin de solutionner le problème de limitation de la quantité de données que peut contenir une BD Access. La structure de la BD a ensuite été modifiée au niveau des clés primaires : les champs composant ces clés ont été modifiés au type numérique «entier» au lieu du type alphanumérique «texte», ce qui améliore substantiellement la rapidité des requêtes tout en réduisant la taille de la BD. Une mise à jour a également été effectuée au niveau des données d'entrée hydrométéorologiques, les données de qualité d'eau et les données sur le cheptel animal.

Un protocole d'application a également été réalisé pour les premières étapes d'implantation de GIBSI, c'est-à-dire l'intégration des données spatiales et attributs dans la BD. Ce protocole se définit par les étapes suivantes : (i) collecte d'information auprès des divers organismes afin d'obtenir les données nécessaires; (ii) génération des matrices d'écoulement et du découpage spatial des UHRH (unités de calcul correspondant à des sous-bassins) à l'aide du logiciel PHYSITEL; (iii) intégration des données spatiales à la BD GRASSLAND; et (iv) intégration des données attributs nécessaires (en fonction des modèles que l'on désire utiliser) à la BD MySQL. Des utilitaires ont été développés afin de compléter les étapes précédentes. Ainsi, le logiciel PHYSITEL – outil de découpage d'un bassin en UHRH - a été modifié afin de permettre l'exportation des données spatiales dans le format d'importation ASCII de GRASSLAND. Également un nouvel outil permet maintenant d'importer dans GIBSI une nouvelle carte d'occupation du sol à partir d'une carte matricielle au format ASCII. Les tables de la BD influencées par l'occupation du sol sont ainsi initialisées automatiquement. Un autre outil a été développé afin d'importer un nouveau jeu de données de cheptel à partir d'un fichier texte (ASCII) contenant les cheptels pour chaque municipalité. L'initialisation des tables influencées par le cheptel est ainsi effectuée automatiquement. Un outil plus général permet d'importer dans une table toute donnée à partir d'un fichier texte. Les détails de l'importation sont spécifiés dans un fichier de paramètres. Enfin, des programmes servant à modifier le format des données de sortie de PHYSITEL et d'HYDROTEL (modèle hydrologique de GIBSI) ont été conçus afin de les importer dans la BD ainsi que générer les fichiers de données météorologiques servant d'entrée au modèle POPES. Des outils et documents explicatifs ont également été créés : (i) un dictionnaire de la BD indiquant pour chaque table les données essentielles à la mise en place et au fonctionnement de GIBSI ainsi que les données optionnelles; (ii) une description des données nécessaires aux modèles (paramètres); (iii) une description des fichiers d'entrée-sortie des modèles; (vi) un tableau démontrant toutes les données et variables utilisés par les modèles; et (v) des diagrammes de flux des données d'une simulation.

Plusieurs autres fonctionnalités ont été ajoutés par la suite à GIBSI. La flexibilité des scénarios a été améliorée en développant un outil permettant d'exporter et d'importer un scénario. Lors de l'exportation, les données du scénario sont sauvegardées dans un fichier. Le scénario peut par la suite être importé dans un répertoire de données à l'aide de ce fichier. Le module effectuant le pilotage des simulations a subi des améliorations majeures. Le pilote peut maintenant reprendre une simulation à n'importe quelle étape même si les fichiers d'entrées des modèles antérieurs à l'étape que l'on veut reprendre sont inexistantes. Il est aussi possible de se connecter à une base de données à l'aide d'une adresse IP (seulement pour le pilote) et une fonctionnalité permettant d'effectuer plusieurs simulations une à la suite des autres sans l'intervention de l'utilisateur a été ajoutée.

À noter que la réalisation de cet objectif, qui est complété à 66% a permis de maintenir le poste d'un technicien en informatique (50% du salaire) tout en contribuant à la formation de deux étudiants au premier cycle (1^{er} cycle, P. Boucher; 2^e cycle, B. Laberge). À noter que le technicien assurait le support à la programmation des travaux de tous les étudiants.

6. Conclusion

Un travail très important a ainsi été réalisé et ce pour tous les objectifs du projet. Outre les avancées pratiques concernant GIBSI, d'ailleurs communiqués par deux publications,⁶ nos travaux ont également permis un avancement des connaissances dans plusieurs domaines, comme la modélisation du transport des pathogènes, l'identification de la structure des communautés de diatomées et de macroinvertébrés benthiques, à partir de BD uniques, pour l'évaluation du niveau d'intégrité écologique des écosystèmes aquatiques. De plus, il est important de souligner que ce projet a permis la mise sur pied d'une véritable équipe de recherche composée de professionnels de recherche, universitaires et gouvernementaux, et d'étudiants de premier, deuxième et troisième cycles et d'un postdoctorant. L'approche pluridisciplinaire et concertée qui était envisagée dans le cadre de ce projet s'est facilement mise en place avec une participation active de la majorité des collaborateurs. Enfin, ce qui représente un atout majeur pour nous, c'est que le déroulement de ce projet a permis de développer des projets d'importance avec des partenaires fédéraux et internationaux et qui sont soit terminés ou toujours en cours totalisant cinq fois la contributions du FQRNT. Sans l'appui financier du FQRNT, nous n'aurions jamais été préparés au développement et à la réalisation de ces projets. De plus, la réalisation de ceux-ci nous permettra de compléter l'ensemble de nos objectifs de départ.

⁶ Rousseau, A. N., A. Mailhot, R. Quilbé, J.-P. Villeneuve. 2005. Information technologies in the wider perspective: integrating management functions across the urban-rural interface. *Environmental Modelling & Software* **20**: 443-455.
Quilbé, R., A. N. Rousseau. 2007. GIBSI : An integrated modelling system for watershed management - Sample applications and current developments. *Hydrology and Earth System Sciences*, **11**:1785-1795