CONTRIBUTIONS RÉCENTES DE FERDINAND BONN À L'AMÉLIORATION DES PRATIQUES DE GESTION DE L'EAU PAR BASSIN VERSANT À L'AIDE DE L'OBSERVATION SPATIALE ET DE LA GÉOMATIQUE

André LAVOIE [1], Karine VÉZINA [1] et Olivier THOMAS [2]

[1] Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, J1K 2R1, Sherbrooke, Canada
Téléphone : (819) 821-8000 poste 62945 ou 62947 ; télécopieur : (819) 821-7944 ;
courriel : andre.lavoie@usherbrooke.ca ; karine.r.vezina@usherbrooke.ca
[2] Observatoire de l'environnement et du développement durable (OEDD), Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, J1K 2R1, Sherbrooke, Canada
Téléphone : (819) 821-8000 poste 62196 ; télécopieur : (819) 821-7089 ; courriel : olivier.thomas@usherbrooke.ca

Soumis le 21 décembre 2006 ; révisé le 22 février 2007 ; accepté le 29 mars 2007- © *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 175-183

Résumé

La gestion de l'eau par bassin versant requiert l'usage d'outils adaptés pour le diagnostic, la prévision et la prise de décision éclairée. C'est dans cet ordre d'idée que Ferdinand Bonn a dirigé, avec ses nombreux étudiants et partenaires, plusieurs projets de recherche portant sur l'application d'une approche intégrée de gestion basée sur l'utilisation des outils de la télédétection et de la géomatique. L'objectif de ces projets était de poser des diagnostics sur les états de surface des bassins (ex : occupation et utilisation des terres, humidité et rugosité des sols) afin de prévoir l'impact de pratiques agricoles, des risques d'inondation ainsi que de pollution et d'érosion des sols sur la qualité de l'eau des lacs et des rivières dans le but de proposer des actions correctrices. Sa vision intégrée de l'environnement lui permet de profiter de la synergie offerte par les outils de télédétection et de géomatique, le tout combiné à ses connaissances et son expérience sur le terrain.

Mots-clés : télédétection, gestion de l'eau, bassin versant, érosion des sols, inondations, pollution diffuse

RECENT CONTRIBUTIONS OF FERDINAND BONN TO THE IMPROVEMENT OF WATER MANAGEMENT PRACTICES BASED ON THE WATERSHED USING SPACE OBSERVATIONS AND GEOMATICS

Abstract

River basin management requires the use of adapted tools for the diagnosis, forecasting and decision making regarding water resources. In this context, Ferdinand Bonn, with the help of his graduate students and other partners, lead many research projects oriented toward the application of an integrated management approach based on the use of remote sensing tools and geomatics. The objective of his projects was to diagnose the surface state of watersheds (land use/cover, soil humidity and roughness) and to try to reduce the impact of agricultural practices, flood risk and pollution from soil erosion on water quality of lakes and rivers and propose corrective actions. His integrated vision of the environment enabled him to benefit from the synergies provided by the use of remote sensing and geomatics tools combined with his field knowledge and experience.

Keywords: Remote Sensing, Water management, Watershed, Soil erosion, Flood, Non-point source pollution

1. INTRODUCTION

La gestion des eaux par bassin versant est une réalité nouvelle au Québec, officialisée avec la Politique nationale de l'eau (www.mddep.gouv.qc.ca/eau/politique/index.htm) et mise en application depuis par les organismes de bassin versant. Basée sur la concertation entre toutes les parties prenantes, cette forme de gestion intégrée concerne évidemment tous les usages de l'eau dans un bassin versant donné. L'objectif des organismes de bassin est la proposition d'un plan directeur de l'eau (PDE) qui définit les actions prioritaires et les intervenants impliqués dans leur mise en place. Avant l'élaboration du PDE, une phase de diagnostic est nécessaire afin d'identifier les problématiques. Cette phase s'appuie sur l'analyse de données diverses telles que l'occupation des sols ou la qualité des eaux de surface.

C'est dans ce contexte, et bien avant la Politique nationale de l'eau, que Ferdinand Bonn a contribué fortement et depuis de nombreuses années, à l'amélioration des outils d'observation utiles pour la gestion par bassin versant, que ce soit pour l'analyse, la prévision ou l'évaluation de l'efficacité d'actions correctives. Par cette contribution, on vise à faire état de ses travaux les plus récents dans ce domaine en abordant successivement les problématiques importantes étudiées, les méthodes et outils de gestion intégrée utilisés ainsi que les principales thématiques d'application.

2. DES PROBLÉMATIQUES IMPORTANTES

Les conditions principales d'une bonne gestion de l'eau par bassin versant sont, d'une part, l'utilisation d'outils scientifiques adaptés pour la prise d'informations utiles et, d'autre part, la mise en place de procédures de concertation et d'action qui reposent plutôt sur des pratiques de sciences humaines. L'objectif principal d'une bonne gestion de l'eau par bassin versant est l'usage durable de cette ressource, qui passe par la limitation des causes de dégradation de sa qualité et des risques associés (érosion, inondations).

L'érosion hydrique et la pollution diffuse d'origine agricole sont des problématiques importantes, moins spectaculaires cependant que d'autres formes de dégradations plus brutales de l'environnement, mais elles sont plus insidieuses, plus difficiles à observer, à évaluer, à prédire et à corriger. En effet, les sols réagissent avec un certain délai aux changements de la couverture végétale, de l'utilisation des terres et des pratiques agricoles qui les affectent. À l'échelle locale, les conséquences de la dégradation des sols pour les populations se traduisent par des baisses de fertilité des sols ainsi qu'une augmentation de la charge solide et dissoute des eaux de ruissellement, menant parfois à des inondations en aval. L'érosion et la pollution diffuse ont d'importantes conséquences sur la qualité des eaux, avec le transport de matières en suspension, l'apport parfois excessif de phosphates et de pesticides dans les plans d'eau où parviennent les eaux de ruissellement, ainsi que sur le niveau de rendement des cultures. Les causes de la dégradation des sols sont variées en fonction du domaine géographique dans lequel on se situe.

Dans les régions développées à climat humide, comme le Québec et l'Europe du Nord-Ouest, elles sont le résultat de plus d'un demi-siècle de mécanisation et d'intensification de l'agriculture. Ces pratiques agricoles ont amené une augmentation de la taille des parcelles à la suite de remembrements successifs, une diminution de la matière organique (donc du stock de carbone du sol), de la biodiversité et de la stabilité structurale des agrégats ainsi qu'une diminution de la capacité de rétention en eau des sols résultant de la compaction des sols par la machinerie lourde. Ces modifications influent considérablement sur le comportement hydrologique des terres agricoles, en favorisant le ruissellement excessif au détriment de l'infiltration. Ce ruissellement vient par la suite augmenter le volume et la brutalité des crues, ce qui se traduit par une érosion importante du sol en amont et des inondations accrues en aval.

Dans des régions tropicales humides, comme le Viêt-nam, l'application de nouvelles politiques de développement agricole conjointement avec l'accroissement de la pression démographique qui ont conduit à la sédentarisation des paysans ainsi qu'à la diminution du couvert forestier pour l'établissement de nouvelles zones agraires, ont mené à l'érosion hydrique et à la dégradation subséquente des sols. Comme les hautes terres sont constituées à 80 % de collines, de montagnes et de hauts plateaux, et caractérisées par la présence d'un réseau hydrographique dense, leurs sols sont d'autant plus sensibles à l'action dévastatrice des fortes précipitations lors de la saison des pluies.

Dans des régions méditerranéennes de climat semi-aride, comme c'est le cas dans le sud-est de l'Espagne et le Maroc, l'érosion hydrique est la principale cause de dégradation des sols. Combinée à la destruction de la couverture végétale, l'érosion hydrique contribue à l'augmentation des risques de dégradation et de désertification.

Tous ces phénomènes physiques qui ont cours à la surface de la Terre ne se confinent pas aux frontières administratives, ce qui implique que les bassins versants sont devenus les unités spatiales de référence pour la gestion des terres et de la qualité de l'eau. Dans une perspective de gestion intégrée des terres et de la qualité de l'eau, il s'avère primordial de pouvoir estimer adéquatement l'érosion hydrique et le transport des sédiments en suspension. Cette estimation permet d'abord d'identifier les zones problématiques qui bénéficieraient le plus de la mise en place de mesures de conservation et pour lesquelles le gain environnemental serait maximal. Elle permet ensuite de pouvoir effectuer un contrôle et un suivi tant de l'aléa que des mesures de conservation mises en place. Or, compte tenu du nombre et de la variabilité spatiale et temporelle des facteurs naturels et anthropiques qui interagissent à l'échelle des bassins versants, l'étude de l'érosion hydrique représente un véritable défi.

3. UNE DÉMARCHE INTÉGRATRICE BASÉE SUR LA TÉLÉDÉTECTION, POUR UNE PRISE DE DÉCISION ÉCLAIRÉE

La vision de Ferdinand Bonn dans le domaine de la gestion de l'eau, comme dans d'autres domaines d'ailleurs, repose sur une approche intégrée basée sur le développement et l'utilisation d'outils adaptés (figure 1) pour observer (acquisition des données, mise en forme), diagnostiquer (traitement, analyse, compréhension) et gérer (suivi, scénarios, prévisions) l'environnement, notamment, à l'échelle des bassins versants.

L'association complémentaire d'outils d'observation de la Terre, tels que les images satellitaires, et d'instruments de télédétection au sol permet d'obtenir des informations de base pour des modèles de simulation hydrologique et d'érosion des sols. De plus, les systèmes d'information géographique sont utilisés afin d'intégrer les données recueillies et de les spatialiser dans le but d'en tirer des informations pertinentes à la gestion du milieu. Dans ce contexte, l'usage récent d'appareils et de sondes multiparamétriques, permettant l'enregistrement automatique de données (en continu, à fréquence variable ou sur demande) directement sur le terrain et de retransmettre en temps réel les données à l'aide d'Internet, augmente considérablement le potentiel des applications. Ces outils permettent d'améliorer la calibration des modèles et de compléter les périodes sans données spatiales.

L'aspect intégrateur de la démarche de Ferdinand Bonn repose également sur la prise en compte de l'environnement de la ressource « eau » avec, en particulier, l'utilisation et l'occupation des terres dans les régions sous de fortes pressions anthropiques. De façon prédominante, l'utilisation et l'occupation des terres déterminent la structure, le fonctionnement et la dynamique de la plupart des paysages à travers le monde (Wu and Hobbs, 2002). L'utilisation et l'occupation des terres affectent, notamment, la qualité de l'eau par l'altération des processus hydrologiques des paysages et, par conséquent, des charges en sédiments transportées dans les cours d'eau. Certaines catégories d'utilisation et d'occupation des terres peuvent contribuer au maintien de la qualité de l'eau en servant de zones de transformation ou de retenue des nutriments qui, dissous ou en suspension, se dirigent en aval. Les capteurs des satellites d'observation de la Terre, comme Landsat ou SPOT, permettent théoriquement de cartographier l'occupation des terres et les cultures dans les bassins agricoles. Mais la marge d'erreur est encore trop importante pour que les outils de télédétection spatiale puissent apporter des réponses satisfaisantes aux questions « où ? quand ? comment ? combien ? » en ce qui a trait aux sources de matières en suspension et de phosphates. Or, cette information est cruciale pour permettre d'établir des zones prioritaires d'intervention et pour aider les gouvernements impliqués à atteindre leurs objectifs de réduction de la pollution diffuse. Il leur faut donc des outils d'évaluation, de prévision et de suivi qui soient fiables et crédibles. Les capteurs des satellites optiques de nouvelle génération, avec de meilleures résolutions spatiale et spectrale, comme ASTER, et les capteurs radar comme RSO de RADARSAT, dotés de possibilités de dépointage programmé, apportent des informations nouvelles qui n'étaient pas accessibles auparavant. Les données optiques de nouvelle génération permettent d'observer les pratiques agricoles et d'identifier les secteurs où l'on utilise des mesures de conservation des sols et de réduction de l'érosion. Il faut cependant que les données satellitaires soient vérifiées, appuyées par de la réalité de terrain et que les résultats soient intégrés dans des modèles qui permettent de prévoir et de guider les interventions correctrices sur le terrain. Ces modèles permettent aussi de développer des scénarios pour optimiser les choix et prendre les meilleures décisions pour la gestion du territoire.

Le couplage des possibilités de modélisation des SIG aux images satellitaires constitue un bon outil intégré pour spatialiser les informations sur de plus grandes régions comme des bassins versants et des régions agricoles. Cette approche intégrée donne naissance à des modèles de pertes de sols répondant aux questions « comment ? » et « combien ? », puis à des solutions pour l'intégration des niveaux d'information et la cartographie des résultats répondant aux questions « où ? quand ? », et, enfin, à des scénarios alternatifs répondant à la question « que se passera-t-il si…? ». Les techniques de télédétection permettent l'acquisition d'information à une variété d'échelles spatiales et temporelles nécessaires pour l'évaluation de la dynamique des facteurs responsables des pertes de sols et de la qualité des eaux de surface. Bien que ces outils ne remplacent pas la réalité de terrain et les observations en laboratoire, ils permettent de poser un diagnostic approprié pour comprendre le niveau de dégradation des sols. Afin de pouvoir être utilisés pour la gestion, les résultats de modélisation spatiale obtenus doivent être préalablement validés, notamment à l'aide de la comparaison avec des données « ponctuelles » de qualité de l'eau (matière en suspension) *in situ* (Bonn, 1998).

L'observation spatiale, la modélisation géomatique et le développement de scénarios alternatifs sont des outils qui permettent de mieux comprendre l'ensemble des processus dans leur complexité. Ces outils permettent d'établir un diagnostic de la santé des bassins, à partir duquel il est possible de développer des solutions acceptables par tous, pour le court comme pour le long terme, et de transposer l'application dans un niveau de suivi et de prévision beaucoup plus pratique pour la gestion des risques et l'aménagement du territoire. Cependant, comme Ferdinand Bonn se plaisait à le rappeler (Bonn *et al.*, 2006), les données provenant de l'observation spatiale et de la modélisation géomatique ne sont que des composantes limitées du processus d'aide à la décision (figure 2). Elles ne remplacent pas la prise de décision, qui intègre également des facteurs économiques, politiques et humains.

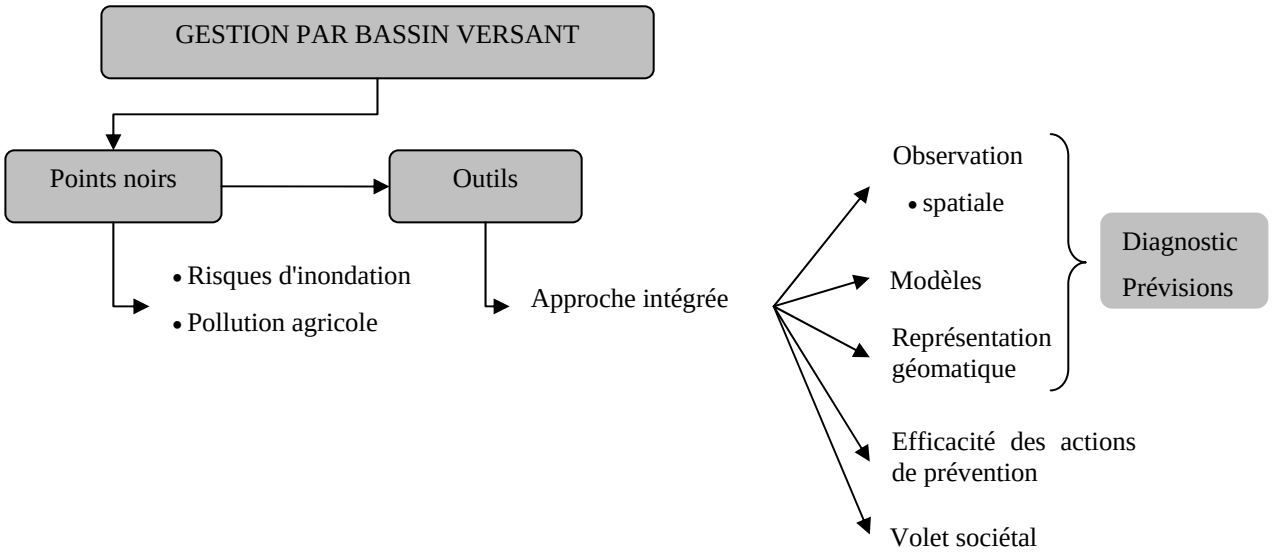


Figure 2 : Vision de Ferdinand Bonn sur la gestion par bassin versant. *Ferdinand Bonn's vision of watershed management*

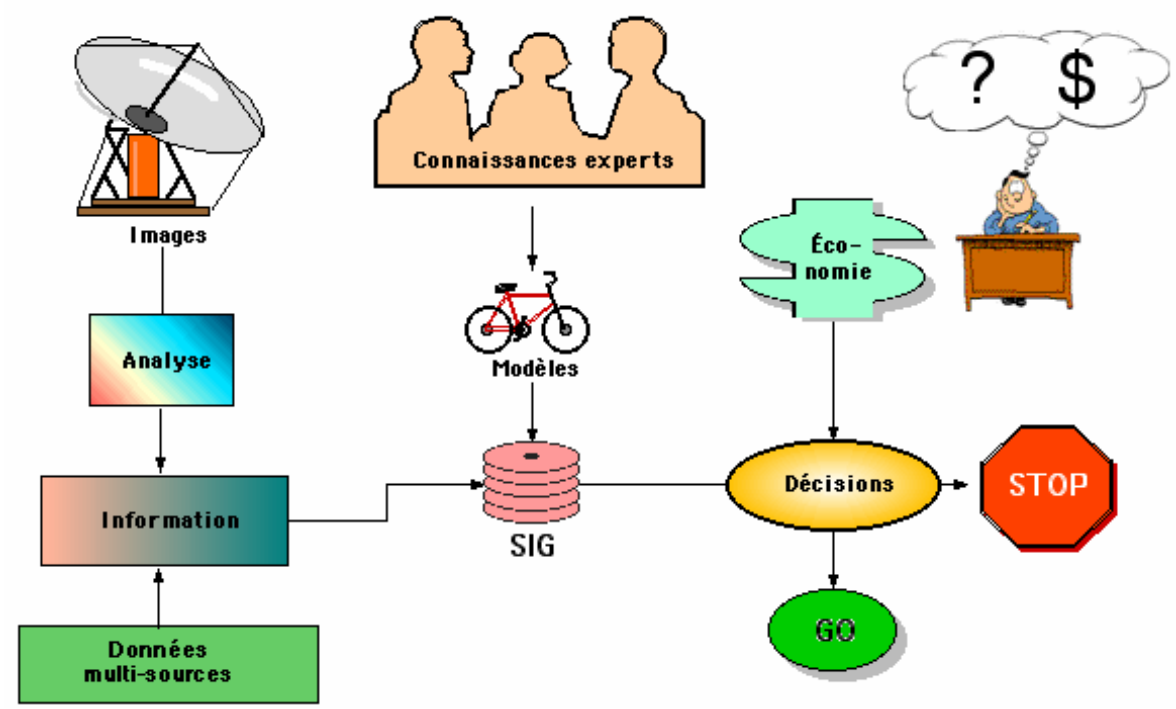


Figure 3 : Processus d'aide à la décision dans une démarche géomatique pour la gestion des terres et de la qualité de l'eau à l'échelle d'un bassin versant. *Decision making process in a geomatics approach for land and water quality management at the watershed scale*

4. LES APPLICATIONS À LA GESTION DE L'EAU PAR BASSIN VERSANT

Les principales recherches de Ferdinand Bonn ont été menées dans le cadre de projets, succinctement présentés sur le tableau 1. Les principales applications qui ont été entreprises par Ferdinand Bonn dans le domaine de la gestion de l'eau par bassin versant peuvent être classées dans les trois domaines : 1) érosion hydrique et pollution diffuse ; 2) risque d'inondation ; 3) volet sociétal et transdisciplinarité.

Tableau 1 : Projets récents dans le domaine de la gestion de l'eau par bassin versant, menés par Ferdinand Bonn (comme responsable ou partenaire). *Recent projects in water management by watershed led by Ferdinand Bonn (principal investigator or partner)*

Projet	***Date***	***Objet***	***Terrain***	***Financement***
Érosion et pollution diffuse				
Rivière aux Brochets	1999- 2002	Indicateurs de contrôle des charges de nutriments et de sédiments	Québec	FCAR (Univ. McGill)
OSMEDAL	2002-2006	Modélisation des sources d'érosion et de pollution diffuse	Québec	CRSNG
MALDEGRAD*	2006 (soumis)	Dégradation des sols et de l'eau liée aux changements climatiques et à la pression anthropique	Québec	CRSNG
Risque d'inondation				
AGRORIESQ	1999 -2000	Risques d'inondation et d'érosion	Québec	FCAR
FLOODGEN	1997 -2000	Analyse des facteurs de risques d'inondation	Europe	Union Européenne (4^{e} PCRDT), BRGM, VIASAT
GEOMENSA	1999-2006	Vulnérabilité à l'érosion des sols	Viêt-nam	AUCC et ACDI
Gouvernance				
ETHRANGE	2003-2006	Méthodes transdisciplinaires pour la gouvernance de l'eau	Québec	FQRSC (Recherche innovante)

* Dernier projet proposé

4.1. Érosion hydrique et pollution diffuse

Le premier domaine est le plus important. Il s'agit des problématiques de l'érosion hydrique et de la pollution diffuse, largement abordées dans la section précédente. Dans chacun des projets, des outils de modélisation spatiale de l'érosion et de la pollution diffuse ont été développés à l'aide de la télédétection et de la géomatique, à l'échelle du champ (quelques hectares) et du bassin versant (quelques centaines de kilomètres carrés).

Dans un premier projet dit « de la Rivière aux Brochets », piloté par l'Université McGill (professeur C. Madramootoo), l'objectif principal était de développer et de valider un système d'aide à la décision visant la réduction des charges de phosphore provenant des sources agricoles à l'échelle d'un bassin versant vulnérable du sud du Québec. Ce projet a permis l'installation de stations de mesure de débit et de qualité de l'eau ainsi que la mise en place d'une infrastructure géomatique servant à l'application de différents modèles informatiques dont AGNPS (*Agricultural non point source pollution model*), WEND (*Watershed ecosystem nutrient dynamics*) et SWAT (*Soil and water assessment tool*). Un des résultats obtenus porte sur la possibilité de faire des représentations spatiale et temporelle des charges en éléments

nutritifs (notamment P) dans le bassin ainsi que de déterminer les zones de vulnérabilité (Arsenault, 2002 ; Arsenault and Bonn, 2001 ; Cattaï, 2004 ; Choquette, 2005 ; Deslandes *et al.*, 2002 ; Deslandes, 2003 ; Michaud *et al.*, 2004).

Le projet OSMEDAL (Observation spatiale et modélisation des sources d'érosion et de pollution diffuse dans les bassins versants agricoles alimentant des lacs) a été piloté par Ferdinand Bonn avec la participation de partenaires des universités de Sherbrooke, McGill, de Montréal et Laval ainsi que de l'INRS-ETE et de l'Institut de recherche et développement en agro-environnement (IRDA). OSMEDAL vise à intégrer, dans une démarche interdisciplinaire, les différentes composantes des processus pouvant influencer la qualité de l'eau des rivières et des lacs et les outils de mesure correspondants. Quatre composantes ont principalement été abordées.

La première composante est l'observation et la mesure de paramètres de surface du sol (rugosité, humidité, labours, matière organique). Elle a permis la caractérisation de la rugosité de surface des sols nus, qui a une influence sur le ruissellement et l'érosion (Sahebi *et al*., 2003), ainsi qu'une première estimation rapide du contenu en matière organique des sols, paramètre qui aide à la cohésion des particules de sol (Richard *et al.*, 2004 ; Richard, 2007).

La deuxième composante est l'intégration de données de télédétection dans la modélisation de l'érosion et de la pollution diffuse (modèles hydrologiques, SIG). Elle a permis de confirmer l'intérêt d'utiliser des images des capteurs de Landsat et Terra (ASTER) comme intrants au modèle AGNPS (Dolbec, 2004) afin d'étudier l'évolution spatio-temporelle de la couverture des terres sur une période de 30 ans, en portant une attention particulière aux sols nus qui favorisent le ruissellement et l'érosion (Dehbi, 2006). Ces recherches ont également permis la calibration et la validation du modèle SWAT à l'échelle du bassin versant de la rivière aux Brochets afin d'élaborer des scénarios de ruissellement de l'eau, d'érosion ainsi que de transport de sédiments et de phosphore. Le but final était d'identifier les zones à risque et de vérifier l'efficacité de diverses solutions qui permettraient de réduire les apports de phosphore dans les rivières et les lacs (Desautels, 2004 ; Deslandes, 2003). Parallèlement au modèle SWAT, une étude de la dynamique fluviale de la rivière Tomifobia avait pour but de départager la charge en suspension provenant de la rivière elle-même de celle provenant des sols agricoles (Roberge, 2005). La provenance des sédiments a été déterminée à l'aide des boucles d'hystérésis à la suite du suivi hydrologique de la rivière.

La troisième composante est l'observation, l'identification et la cartographie de pratiques culturales anti-érosives. Ce travail a pu se faire par caractérisation spectrale et cartographie, à l'échelle du bassin de la rivière aux Brochets, des résidus de cultures à l'aide d'images satellitaires (Frère, 2005) ainsi qu'à l'aide de l'étude des bandes riveraines et enherbées en bordure de champs agricoles à titre de technique de conservation des sols (Martel, 2005 ; Vallières, 2004).

La quatrième composante est la validation des données et des modèles à l'aide de mesures sur le terrain et de traceurs. On y traite du transport du phosphore dans les sols en fonction des conditions variables de saturation pour des sols argileux et sableux en rapport avec le drainage agricole souterrain (Abou Nohra and Madramootoo, 2005). Cette composante comprend également l'utilisation de traceurs (notamment le ^{137}Cs) dans le but de déterminer les taux d'érosion dans trois champs du bassin du ruisseau au Castor, tributaire de la rivière aux Brochets, afin de valider les simulations de SWAT à l'échelle du même bassin.

Dans le cadre d'un projet plus ancien nommé MEDALUS (*Mediterranean desertification and land use*) (1995-1998) financé par la Commission Européenne (Programme Environnement), mais non répertorié dans le tableau 1, des techniques de télédétection ont été utilisées afin de caractériser la dégradation des sols en fonction de deux approches, soit la déconvolution spectrale linéaire et l'utilisation d'indices décrivant la forme des spectres (Haboudane *et al.*, 2002).

Dans le domaine, un dernier projet baptisé MALDEGRAD (*Multiscale assessment of climate change and human induced land degradation and links to water quality in the Pike River Basin, Québec-Vermont*) a été récemment présenté au Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (Programme stratégique), par Ferdinand Bonn, afin d'évaluer le niveau de dégradation des sols, responsable de la dégradation de la qualité de l'eau selon l'approche DPSIR (*Driving forces, pressures, impacts, state of the environment, response of the society*, voir http://www.ceroi.net/reports/arendal/dpsir.htm). Cette approche associe les informations provenant de la réalité de terrain, de l'observation de l'espace, de données cartographiques et de résultats d'une modélisation et d'une simulation avec l'analyse du contexte socio-économique. Le but est de comprendre l'attitude de la population locale par rapport aux solutions de remédiation possibles pour la conservation des sols et de l'eau.

4.2. Risque d'inondation

Le deuxième domaine couvert par les recherches de Ferdinand Bonn est le risque lié aux inondations. Le projet AGRORIESQ (Applications géomatiques de RADARSAT à l'observation des risques d'inondations et d'érosion dans le sud du Québec) a été réalisé en coopération avec l'INRS-ETE sur le bassin de la rivière Châteauguay (sud du Québec). Les objectifs du projet étaient :

- d'observer et de mesurer des paramètres de surface du sol qui affectent le ruissellement de l'eau et l'érosion des sols nus à l'aide d'images RSO de RADARSAT ;
- d'intégrer les données recueillies à la modélisation hydrologique ;
- de tenter une cartographie des pratiques anti-érosives à partir d'images RSO de RADARSAT.

Les paramètres importants à examiner étaient la rugosité et l'humidité du sol ainsi que la direction des labours et les résidus laissés au champ. Entre autres résultats, le projet a permis de mettre au point une approche pour séparer les effets de la rugosité de ceux de l'humidité sur la rétrodiffusion radar en utilisant les visées multiangulaires de RSO de RADARSAT-1 (Angles, 2001 ; Bonn *et al.*, 2001 ; Sahebi *et al.*, 2002).

Un projet européen nommé FLOODGEN (Flood r*isk reduction by spaceborne recognition of excess runoff generating areas*), auquel a participé Ferdinand Bonn, a porté sur la prévision des risques d'inondations en Europe à partir des satellites d'observation de la Terre dans les domaines de l'optique et des micro-ondes (King *et al.*, 1998). Dans ce projet, on a utilisé l'observation spatiale pour chercher à expliquer pourquoi les inondations catastrophiques avaient augmenté au cours des 20 dernières années dans le Nord-Ouest de l'Europe, alors que les précipitations étaient demeurées relativement constantes. Les agronomes soupçonnaient déjà le rôle des changements récents dans l'utilisation et l'occupation des terres. La télédétection optique (TM de Landsat, HRV de SPOT) a permis d'observer l'utilisation des terres et ses changements ainsi que de mesurer les surfaces agricoles contribuant au ruissellement excessif (Coulombe-Simoneau *et al.*, 2001). La télédétection radar (RSO de ERS-2 et de RADARSAT-1) a, pour sa part, servi à mesurer la rugosité et l'humidité de surface des parcelles de sols nus (Smyth *et al.*, 2001 ; Baghdadi *et al.* 2004 ; Sahebi *et al.*, 2003). Sur les sols nus, RSO de RADARSAT permet de mesurer la rugosité de la surface du sol et son humidité. Cette information est ensuite utilisée comme donnée d'entrée aux modèles de prévision des crues pour une meilleure prévision des inondations. Dans le cadre du projet FLOODGEN, il a été possible d'extraire des images RSO de RADARSAT trois classes de rugosité de surface des sols nus dans des conditions de sols très humides (Coulombe-Simoneau *et al.*, 2001 ; Smyth *et al.*, 2001). Par ailleurs, les données RSO de RADARSAT ont été utilisées afin d'observer l'orientation des labours, un paramètre important du ruissellement de surface (Smyth, 2001).

Dans le cadre du projet de renforcement institutionnel GEOMENSA (Géomatique de l'environnement et de la santé) entre l'Université des sciences de Hanoi et l'Université de Sherbrooke, deux projets pilotes ont été réalisés à l'échelle d'un bassin versant principal compris dans les limites du parc national de BaBê. Une approche intégrée utilisant les SIG et la modélisation, conjointement avec des mesures et des observations empiriques, a été développée afin de déterminer la dynamique spatio-temporelle de la vulnérabilité à l'érosion des sols en fonction des unités de paysage considérées homogènes (pédologie, topographie, occupation et utilisation des terres, etc.). L'impact de la diversité des systèmes agraires (hétérogénéité spatiale), particulièrement à l'échelle du bassin, ainsi que de la variabilité temporelle des facteurs saisonniers du paysage ont été considérés (Vézina *et al.*, 2006). Par ailleurs, un bilan hydrique a été calculé afin de caractériser le comportement hydrologique du bassin à partir de données climatologiques et de données physiographiques provenant de la télédétection (St-Onge *et al.*, 2007).

4.3. Volet sociétal et transdisciplinarité

Le dernier domaine concerne le volet sociétal et le défi de l'interdisciplinarité nécessaire à une bonne gestion de l'eau par bassin versant. Dans le cadre du projet ETHRANGE (Éthique et transdisciplinarité en gouvernance de l'eau, 2003-2006) piloté par M. Alain Létourneau (Faculté de théologie, d'éthique et de philosophie de l'Université de Sherbrooke) l'objectif visait à produire un savoir intégré et à développer des méthodes transdisciplinaires de travail concernant la gouvernance de l'eau. Jusqu'à maintenant, les projets de recherche sur l'eau sont plutôt orientés vers des aspects scientifiques, économiques et techniques. Le facteur humain, les aspects sociaux et les relations interpersonnelles ne sont pas souvent considérés, surtout lorsque du travail multidisciplinaire est impliqué. En conséquence, un des résultats de recherche du projet, terminé en 2006, est la production d'un document explicatif d'un processus transdisciplinaire, accompagné d'outils et de méthodes de travail que les équipes d'intervention, de recherche ou de gestion pourraient facilement utiliser afin d'éliminer les cloisons disciplinaires. Le rapport final du projet est présentement en cours de rédaction et devrait être disponible en 2007.

5. CONCLUSION

Cette contribution ne prétend pas être exhaustive sur l'apport de Ferdinand Bonn à l'amélioration des pratiques de gestion de l'eau par bassin versant. En particulier, elle ne prend pas en compte des idées ou suggestions transmises lors de discussions ou de rencontres avec des chercheurs ou utilisateurs, d'ici ou d'ailleurs. Les résultats publiés (articles et travaux d'étudiants principalement) proviennent des projets les plus récents et n'intègrent certainement pas la totalité des idées innovantes diffusées par cet homme généreux et disponible.

Espérons que la recherche continuera dans la voie de la sagesse et de l'innovation tracée par Ferdinand Bonn.

Remerciements

Cet article est rédigé à la mémoire de notre très cher collègue, ami et mentor, Ferdinand Bonn, qui a su transmettre sa passion et son ouverture d'esprit à ses collaborateurs, jeunes et moins jeunes. Nos remerciements s'adressent particulièrement à tous les étudiants qui l'ont accompagné et qui lui ont permis de donner vie à ses idées, et bien sûr aux organismes de financement des projets présentés.

Références

Abou Nohra, J. and Madramootoo, C.A. (2005) Modelling Phosphorus Dynamics in Tile Drained Fields. Water News, Newsletter of the Canadian Water Resources Association, vol. 24, n° 2, p. 13.

Angles, J. (2001) Utilisation d'une approche multi-incidence pour l'estimation de l'humidité du sol et de la rugosité de surface à partir d'images RSO. Mémoire de maîtrise, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 89 p.

Arsenault, É. (2002) Comparaison de plusieurs méthodes de télédétection multibandes et hyperspectrales pour la détermination du taux de recouvrement des résidus de cultures agricoles. Mémoire de maîtrise, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 91 p.

Arsenault, É. and Bonn, F. (2001) Evaluation of Soil Erosion Protective Cover by Crop Residues Using Indices and Spectral Mixture Analysis of Multispectral and Hyperspectral Analysis. P. 299-308, *in* Institut aéronautique et spatial du Canada (réd.) Compte rendu des 23e Symposium canadien sur la télédétection/10e Congrès de l'Association québécoise de télédétection. Sainte-Foy (Québec), 21-24 août 2001, 900 p.

Baghdadi, N., Gherboudj, I., Zribi, M., Sahebi, M., King, C. and Bonn, F. (2004) Semi-empirical calibration of the IEM backscattering model using radar images and moisture and roughness field measurements. International Journal of Remote Sensing, vol. 25, n° 18, p. 3593-3623.

Bonn, F. (1998) La spatialisation des modèles d'érosion avec la télédétection et les SIG : validation, erreurs et limites. Sécheresse, vol. 9, n° 3, p. 185-192.

Bonn, F., Angles, J., Sahebi, M., Smyth, J., Arsenault, É., Gaillard, C., Fortin, J.-P., Rousseau, A., Duchemin, M. et de Sloover, M. (2001) AGRORIESQ : application géomatique de RADARSAT à l'observation des risques d'inondation et d'érosion dans le sud du Québec. P. 503-508, *in* Institut aéronautique et spatial du Canada (réd.) 23e Symposium canadien sur la télédétection/10e Congrès de l'Association québécoise de télédétection, 21-24 août 2001, Sainte-Foy (Québec), 900 p.

Bonn, F., Lavoie, A., Desautels, M., Richard, P., Arsenault, E., Dehbi, Y., Frère, G.Y., Deslandes, J., Michaud, A., Madramootoo, C. et Enright, P. (2006) Observation spatiale et modélisation. De la vulnérabilité des bassins versants à l'érosion et à la pollution diffuse : Acquis, perspectives, limites. *In* Colloque « Gestion de l'eau par bassin versant : Mesure de qualité et qualité des données », 74e congrès de l'ACFAS, 18 mai 2006, Montréal, http://www.usherbrooke.ca/observatoire/docnouvelles/acfas/acfasbonn.pdf.

Cattaï, J. (2004) La détection de contours dans l'approche stratifiée par champs pour la classification d'un milieu agricole à l'aide de données Landsat TM. Cas du bassin versant de la rivière aux Brochets, sud du Québec. Mémoire de maîtrise, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 121 p.

Choquette, C. (2005) Evaluating management practices to limit phosphorus losses from agricultural fields in the Castor watershed using the WEND model. Mémoire de maîtrise, Department of Bioresource Engineering, Université McGill, Montréal, 126 p.

Coulombe-Simoneau, J., Hardy, S., Baghdadi, N., King, C., Bonn, F. and Le Bissonais, Y. (2001) RADARSAT based monitoring of soil roughness over an agricultural area affected by excessive runoff. P. 362-364, *in* M. Owe, K. Brubaker, J. Ritchie & A. Rango (réd.) Remote Sensing in Hydrology 2000. International Symposium on Remote Sensing and Hydrology 2000, Santa Fe (New Mexico), 2-7 avril 2000, AIHS Red Book publication n° 267, 610 p.

Dehbi, Y. (2006) Suivi spatio-temporel de l'évolution du recouvrement végétal moyen et des catégories de cultures dans le bassin versant de la rivière aux Brochets. Mémoire de maîtrise, Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 159 p.

Desautels, M. (2004) Cartographie des zones potentielles d'érosion dans le bassin versant de la rivière Tomifobia à l'aide de l'observation spatiale par le capteur ASTER et du modèle SWAT. Mémoire de maîtrise, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 56 p.

Deslandes, J. (2003) L'apport de la géomatique et de la télédétection au développement d'indicateurs agroenvironnementaux associés aux pertes diffuses de phosphore sur un grand bassin versant : le cas de la rivière aux Brochets. Mémoire de maîtrise, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 123 p.

Deslandes, J., Michaud, A. et Bonn, F. (2002) Développement et validation d'indicateurs agro-environnementaux associés aux pertes diffuses de phosphore dans le bassin-versant de la rivière aux Brochets. Agrosol, vol. 13, n° 2, p. 111-123.

Dolbec, J.-F. (2004) La télédétection comme source de données pour le modèle de simulation agroenvironnemental AnnAGNPS. Mémoire de maîtrise, Université du Québec, INRS-ETE, Québec, 193 p.

Frère, G.-Y. (2005) Observation spatiale et caractérisation des pratiques agricoles antiérosives du bassin versant de la rivière aux Brochets. Mémoire de maîtrise en environnement, Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 100 p.

Haboudane, D., Bonn, F. and Royer, A. (2002) Land degradation and erosion risk mapping by fusion of spectrally-based information and digital geomorphometric attributes. International Journal of Remote Sensing, vol. 23, n° 18, p. 3795-3820.

King, C., Ajmar, A., Boffet, A., Bonn, F., Bourguignon, A., Brenna, S., Caloz, R., Blummer, C., Clément, P., Desprats, J.F., Hill, J., Le Bissonnais, Y., Majérowiscz, J., Montier, C., Lenôtre, N., Pouliot, J., Rémond, A., Rasio, R., Udelhoven, T. and Vohland, M. (1998) Floodgen - Spaceborne recognition of indicators of excess runoff generating areas. 2nd Interim report to the CEO/CEE program, report n° ENV4 CT96 0368, Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), Orléans, report R40088, 24 p.

Martel, S. (2005) Projet des bandes riveraines de courtes dimensions à l'IRDA : résultats d'analyse des matières en suspension pour l'année d'échantillonnage 2004. Mémoire de maîtrise en sols et environnement, Université Laval, Québec, 40 p.

Michaud, A.R., Lauzier, R. and Laverdière, M.R. (2004) Temporal and spatial variability in non-point source phosphorus in relation to agricultural production and terrestrial indicators : the Beaver Brook case study, Pike River basin, Québec. P. 97-121, *in* T.O. Manley, P.L. Manley and T.B. Mihuc (réd.) Lake Champlain : partnership and research in the new millennium. Kluwer Academic, New York, 411 p.

Richard, P. (2007) Estimation de la matière organique des sols agricoles du sud du Québec par l'utilisation de données spectroradiométriques. Mémoire de maîtrise, Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.

Richard, P., Lavoie, A., Bonn, F. and Thomas, O. (2004) Hyperspectral organic matter estimation of agricultural soils in Québec, Canada : preliminary results. In eProceedings 24th EARSeL Symposium, 1st EARSeL Workshop on land use and land cover, Dubrovnik, Croatie, 28-29 mai 2004, 9 p.

Roberge, S. (2005) La dynamique du transport en suspension dans le bassin-versant de la Tomifobia. Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université de Montréal, Montréal, 167 p.

Sahebi, M.R., Anglès, J. and Bonn, F. (2002) A comparison of multi-polarization and multi-angular approaches for estimating bare soil surface roughness from spaceborne radar data. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 28, n° 5, p. 641-652.

Sahebi, M.R., Bonn, F. and Gwyn, Q.H.J. (2003) Estimation of the moisture content of bare soil from RADARSAT-1 SAR using simple empirical models. International Journal of Remote Sensing, vol. 24, n° 12, p. 2575-2582.

Smyth, J. (2001) Utilisation de données RADARSAT pour l'observation de l'orientation des labours comme paramètre du ruissellement en milieu agricole. Mémoire de maîtrise, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 91 p.

Smyth, J., Bonn, F., Hardy, S., Rémond, A. and Clément, P. (2001) Potential retrieval of tillage direction as a runoff indicator using RADARSAT data. P. 368-370, *in* M. Owe, K. Brubaker, J. Ritchie & A. Rango (réd.) International Symposium on Remote Sensing and Hydrology 2000, Santa Fe (New Mexico), 2-7 avril 2000, AIHS Red Book, Publication n° 267, 610 p.

St-Onge, L., Bonn, F., Rousseau, A.N., Pham, V.C. et Nguyen, Q.M. (2007) Élaboration du bilan hydrique du lac de Ba Bê au Viêt-nam. Journal des sciences hydrologiques (prévu pour publication en août 2007).

Vallières, D. (2004) Efficacité du mode de travail de sol et des bandes enherbées sur la diminution de la pollution diffuse. Maîtrise en sols et environnement, Université Laval, Québec, 93 p.

Vézina, K., Bonn, F. and Pham, V.C. (2006) Agricultural land-use patterns and soil erosion vulnerability of watershed units in Vietnam's northern highlands. Landscape Ecology, vol. 21, n° 8, p. 1311-1325.

Wu, J. and Hobbs, R. (2002) Key issues and research priorities in landscape ecology : An idiosyncratic synthesis. Landscape Ecology, vol. 17, p. 355-365.