

**Modélisation de l'hydrologie
et des dynamiques de pollution diffuse
dans le bassin-versant de la Rivière aux
Brochets à l'aide du modèle SWAT**

Rapport final



Auteurs principaux :

Aubert Michaud, chercheur, Ph. D.
Julie Deslandes, géographe, M. Sc.
Isabelle Beaudin, géographe, M. Sc.

Institut de recherche et de développement en
agroenvironnement

Comité scientifique avisé :

Chantal d'Auteuil, biologiste M. Sc. ⁽¹⁾
Pierre Beaudet, agronome, B. Sc. ⁽²⁾
Georges Gangbazo, ingénieur, Ph. D. ⁽³⁾
François Godin, ingénieur, M. Sc., ⁽⁴⁾
Alain Le Page, chimiste, Ph. D. ⁽³⁾
Richard Lauzier, agronome, B. Sc. ⁽⁵⁾
Martin Mimeault, agronome, B. Sc. ⁽⁶⁾
Charles Savoie, géographe, M. Sc. ⁽²⁾

⁽¹⁾ Corporation bassin versant de la Baie Missisquoi (CBVCM)

⁽²⁾ Direction de l'environnement et du développement durable,
Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du
Québec (DEDD-MAPAQ)

⁽³⁾ Direction des politiques de l'eau, Ministère du Développement
durable, Environnement et Parcs (MDDEP)

⁽⁴⁾ Centre d'expertise hydrique du Québec, Ministère du
Développement durable, Environnement et Parcs (CEH-MDDEP)

⁽⁵⁾ Centre de services de Bedford, Ministère de l'Agriculture, des
Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)

⁽⁶⁾ Direction régionale de l'analyse et de l'expertise de l'Estrie et de la
Montérégie, Ministère du Développement durable, Environnement
et Parcs (MDDEP)

**Collaboration
scientifique et
révision:**

Ferdinand Bonn, Prof. Ph. D., CARTEL, Géomatique appliquée, Université de
Sherbrooke

Denis Côté, agronome, M. Sc., Institut de recherche et de développement en
agroenvironnement

Jacques Desjardins, Technicien agricole, Institut de recherche et de développement en
agroenvironnement

Marcel Giroux, agronome, M. Sc., Institut de recherche et de développement en
agroenvironnement

Gérard Laflamme agronome, M. Sc., Institut de recherche et de développement en
agroenvironnement

Alain Lepage, chimiste, chimiste, Ph. D.

Gildas Lévesques, Étudiant DESS, Université Jean Monnet de Saint-Étienne, France

Table des matières

RÉSUMÉ	1
1. INTRODUCTION.....	3
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	6
2.1 DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE.....	6
2.2 DESCRIPTION DU MODÈLE.....	7
2.2.1 Hydrologie	9
2.2.2 Sédiments	10
2.2.3 Phosphore.....	11
2.3 PARAMÉTRAGE AGROCLIMATIQUE.....	12
2.4 PARAMÉTRAGE HYDRO-PÉDOLOGIQUE	14
2.5 PARAMÉTRAGE DE LA RICHESSES DES SOLS EN PHOSPHORE.....	15
2.6 ITINÉRAIRES DE GESTION DES SOLS ET DES CULTURES	16
2.7 SPATIALISATION DES APPORTS DES NUTRIMENTS.....	18
2.8 CALAGE DU MODÈLE ET VALIDATION	19
2.8.1 Hydrologie de surface	22
2.8.2 Érosion et exportation de sédiments.....	24
2.8.3 Critères d'évaluation	27
2.9 MODÉLISATION DES SCÉNARIOS AGROENVIRONNEMENTAUX	28
2.9.1 Approche conceptuelle.....	28
2.9.2 Modalités d'épandage des engrais de ferme.....	29
2.9.3 Cultures de couverture.....	29
2.9.4 Cultures sur résidus	30
2.9.5 Aménagements hydro-agricoles.....	31
2.9.6 Scénarios mixtes	33
3.0 RÉSULTATS ET DISCUSSION	35
3.1 CYCLE TERRESTRE DU PHOSPHORE	35
3.1.1 Richesse des sols en P.....	35
3.1.2 Apports de fertilisants.....	36
3.1.3 Prélèvements des plantes.....	38
3.1.4 Minéralisation et rétroversion	39
3.2 HYDROLOGIE	40
3.2.1 Ajustement du modèle.....	40
3.2.2 Variabilité de l'activité hydrologique.....	45

3.3 MOBILITÉ DES SÉDIMENTS ET DU PHOSPHORE.....	50
3.3.1 Ajustement du modèle	50
3.3.2 Variabilité des flux de sédiments simulés	52
3.3.3 Variabilité des flux de phosphore simulés.....	56
3.4 SCÉNARIOS AGROENVIRONNEMENTAUX	62
3.4.1 Modalités d'épandage des engrais de ferme	63
3.4.2 Cultures de couverture.....	65
3.4.3 Cultures sur résidus	70
3.4.4 Aménagements hydro-agricole	75
3.4.5 Scénarios mixtes.....	76
4. CONCLUSION	87
5. REFERENCES.....	93
ANNEXE A : DESCRIPTION DES UTILITAIRES PERL.....	100
ANNEXE B : MODIFICATIONS DU CODE DE SWAT	102
ANNEXE C : TABLEAU DES PARAMÈTRES UTILISÉS SUR LES 4 SOUS-BASSINS LORS DU CALAGE DU MODÈLE SWAT PUIS, SUR L'ENSEMBLE DES 99 SOUS-BASSINS DE LA RIVIÈRE AUX BROCHETS	106

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : REPARTITION DES PRODUCTIONS ANIMALES DANS LES PORTIONS AMONT ET AVAL DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE AUX BROCHETS.	6
TABLEAU 2 : PROFILS ANNUELS DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES POUR LA PERIODE D’ETUDE ET MOYENNES ANNUELLES A LONG TERME AUX TROIS STATIONS UTILISEES EN SUPPORT A LA MODELISATION HYDROLOGIQUE A L’ECHELLE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE AUX BROCHETS.....	13
TABLEAU 3 : ITINERAIRES DE GESTION DES SOLS ET DES CULTURES POUR LE SCENARIO DE REFERENCE PROPRES A CHAQUE CLASSE DE CULTURE POUR LES QUATRE SAISONS DE PRODUCTION DE LA PERIODE DE SIMULATION 2000 A 2003.....	18
TABLEAU 4 : CARACTERISTIQUES BIOPHYSIQUES, BILAN HYDROLOGIQUE ET EXPORTATIONS DE SEDIMENTS ET DE PHOSPHORE DES BASSINS VERSANTS EXPERIMENTAUX DU RUISSEAU WALBRIDGE UTILISES EN REFERENCE DANS LE CALAGE DU MODELE HYDROLOGIQUE SWAT A L’ECHELLE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE AUX BROCHETS... 	21
TABLEAU 5 : PARAMETRES AJUSTES LORS DU CALAGE HYDROLOGIQUE DE SWAT, ACCOMPAGNES D’UNE BREVE DESCRIPTION	24
TABLEAU 6 : PARAMETRES AJUSTES LORS DU CALAGE DES EXPORTATIONS DES SEDIMENTS ET DE PHOSPHORE, ACCOMPAGNES D’UNE BREVE DESCRIPTION.....	26
TABLEAU 7 : VALEURS MEDIANES, MOYENNES ET ECART-TYPES DE LA SATURATION EN P (P /AL MEHLICH-III) DES SOLS EN CULTURE DES MUNICIPALITES INCLUSES DANS LE BASSIN DE LA RIVIERE AUX BROCHETS.....	36
TABLEAU 8 : DISTRIBUTION DES MOYENNES ANNUELLES DE PREDICTIONS DU BILAN TERRESTRE DE MASSE DU PHOSPHORE PAR CLASSE DE CULTURE POUR L’ENSEMBLE DES URH A VOCATION AGRICOLE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE AUX BROCHETS POUR LA PERIODE D’ETUDE 2000-2003.	38
TABLEAU 9: MOYENNES ANNUELLES DES COMPOSANTES DU BILAN HYDRIQUE MODELISEES A L’EXUTOIRE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE AUX BROCHETS POUR LA PERIODE 2000 2003.	40
TABLEAU 10 : INDICATEURS DE L’AJUSTEMENT DU MODELE AUX DEBITS MENSUELS (A) ET JOURNALIERS (MESURES AUX QUATRE STATIONS HYDROMETRIQUES DE REFERENCE POUR LA PERIODE D’ETUDE (B).....	41
TABLEAU 11 : INDICATEURS DE L’AJUSTEMENT DU MODELE AUX EXPORTATIONS MENSUELLES DES MATIERES EN SUSPENSION ET DE PHOSPHORE MEASUREES AUX STATIONS SITUEES A L’EXUTOIRE DES SOUS-BASSINS EXPERIMENTAUX WALBRIDGE POUR LA PERIODE D’ETUDE 2001-2003	51
TABLEAU 12: EXPORTATIONS ANNUELLES MASSIQUES ET SPECIFIQUES DE PHOSPHORE PAR CLASSE D’OCCUPATION DU SOL MODELISEES POUR LA PERIODE 2000-2003 DANS LES PORTIONS AMONT/AVAL ET L’ENSEMBLE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE AUX BROCHETS	59
TABLEAU 13: MATRICE DE CORRELATIONS LINEAIRES SIMPLES ENTRE LES RESULTATS DE LA SIMULATION ET CERTAINS PARAMETRES D’ENTREE DU MODELE A L’ECHELLE DE L’UNITE DE REPOSE HYDROLOGIQUE EN CULTURE DE MAÏS ET DE PRAIRIE.	60
TABLEAU 14 : EXPORTATIONS DE PHOSPHORE PREDITES PAR LE MODELE HYDROLOGIQUE A L’ECHELLE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE AUX BROCHETS POUR LE SCENARIO D’OPTIMISATION DES DELAIS D’INCORPORATION DES ENGRAIS COMPARE AU SCENARIO DE REFERENCE.....	64

TABLEAU 15 : DELAIS D'INCORPORATION SIMULES DANS LE SCENARIO DE BASE EN FONCTION DES CONTRAINTES CLIMATIQUES ET PRECIPITATIONS MOYENNES TOMBEES SUR L'ENSEMBLE DU BASSIN PENDANT CE DELAIS POUR LES PERIODES PRINTANIERES ET AUTOMNALES DE 2000-2003.	65
TABLEAU 16 : CARACTERISTIQUES DU PARCELLAIRE EN CULTURE ANNUELLE AFFECTE PAR LES SCENARIOS CIBLES ET APPLIQUES A DES TAUX DE 10%, 50% ET 100%.....	66
TABLEAU 17 : EFFETS DE LA CONVERSION DES CULTURES ANNUELLES EN PRAIRIES (A), EN CEREALES A PAILLE AVEC UNE CULTURE DE COUVERTURE A LA DEROBEE (B), ET EN CEREALES A PAILLE AVEC UNE CULTURE DE COUVERTURE ASSOCIEE SUR L'EVAPOTRANSPIRATION, LE RUISSELLEMENT, LE DEBIT, LES EXPORTATIONS DE MATIERES EN SUSPENSION ET DE PHOSPHORE PREDITES PAR SWAT SELON DES SCENARIOS D'IMPLANTATION ALEATOIRE ET CIBLE DANS LE BASSIN VERSANT.	70
TABLEAU 18: REDUCTIONS MOYENNES PONDEREES POUR LA SUPERFICIE DES URH, POUR LA PERIODE 200-2003, DES EXPORTATIONS DE SEDIMENTS ET DE PHOSPHORE ASSOCIEES A L'IMPLANTATION DE LA CULTURE SUR RESIDUS SUR LE PARCELLAIRE EN CULTURES ANNUELLES DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE AUX BROCHETS SELON LA CLASSE DE CULTURE ET LE GROUPE HYDROLOGIQUE DES URH.	73
TABLEAU 19 : EFFETS DE TAUX CROISSANTS ET DU CIBLAGE SPATIAL DE L'IMPLANTATION DE LA CULTURE SUR RESIDUS SUR L'EVAPOTRANSPIRATION, LE RUISSELLEMENT, LE DEBIT, LES EXPORTATIONS GLOBALES DE SEDIMENTS ET DE PHOSPHORE SIMULEES A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE AUX BROCHETS.	73
TABLEAU 20 : RUISSELLEMENT ET EXPORTATIONS DE SEDIMENTS, PHOSPHORE SOLUBLE ET PHOSPHORE TOTAL POUR L'ENSEMBLE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE AUX BROCHETS RESULTANT DE LA MISE EN ŒUVRE DE SCENARIOS AGROENVIRONNEMENTAUX DE BASE ET DE SCENARIOS COMPORTANT LA CONVERSION AUX PRATIQUES CULTURALES DE CONSERVATION.	83
TABLEAU 21 : RUISSELLEMENT ET EXPORTATIONS DE SEDIMENTS, PHOSPHORE SOLUBLE ET PHOSPHORE TOTAL POUR L'ENSEMBLE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE AUX BROCHETS, RESULTANT DE LA MISE EN ŒUVRE DE SCENARIOS AGROENVIRONNEMENTAUX COMPORTANT LA SUBSTITUTION DE CULTURES.	85
TABLEAU 22 : DESCRIPTION DETAILLEE DES SUPERFICIES AGRICOLES IMPLIQUEES DANS LE SCENARIO AGROENVIRONNEMENTAL NO. 19 COMPORTANT LA SUBSTITUTION CIBLEE DE CULTURES ANNUELLES ET L'IMPLANTATION DE PRATIQUES CULTURALES DE CONSERVATION.....	86

Liste des figures

FIGURE 1 : MOYENNES ANNUELLES (1990-2004) DES CONCENTRATIONS EN PHOSPHORE TOTAL DANS LA BAIE MISSISQUOI COMPAREES AU CRITERE DE 0.025 MG L⁻¹ ET (B) PARTAGE DES EFFORTS DE REDUCTION DU PHOSPHORE DANS LA BAIE MISSISQUOI ENTRE LE QUEBEC ET LE VERMONT (T METRIQUE AN⁻¹).....	4
FIGURE 2 : LOCALISATION DE LA BAIE MISSISQUOI ET DE SES PRINCIPAUX TRIBUTAIRES	7
FIGURE 3 : LA REPRESENTATION SPATIALE DES UNITES DE REPONSE HYDROLOGIQUES (URH).....	9
FIGURE 4 : COMPOSANTES HYDROLOGIQUES DU MODELE SWAT.....	10
FIGURE 5 : COMPOSANTES DU CYCLE TERRESTRE DU PHOSPHORE MODELISE PAR SWAT.....	12

FIGURE 6 : LOCALISATION DES BASSINS VERSANTS EXPERIMENTAUX WALBRIDGE ET DES STATIONS HYDROMETRIQUES DE LA RIVIERE AUX BROCHETS, A LA BASE DU CALAGE ET DE LA VALIDATION DU MODELE SWAT A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT.....	20
FIGURE 7 : DISTRIBUTION SPATIALE DES APPORTS ANNUELS MOYENS D'AZOTE (A) ET DE PHOSPHORE (B) A L'ECHELLE DES 99 SOUS-BASSINS VERSANTS DE LA RIVIERE AUX BROCHETS POUR LA PERIODE D'ETUDE 2000-2003.....	37
FIGURE 8 : PRELEVEMENTS ANNUELS MOYENS EN P SIMULES A L'ECHELLE DE L'URH POUR LA PERIODE 2000-2002 EN FONCTION DES APPORTS TOTAUX DE P EN ENGRAIS DE FERME ET EN ENGRAIS MINERAL.....	39
FIGURE 9 : SERIE CHRONOLOGIQUE JOURNALIERE DES TEMPERATURES MOYENNES, DES LAMES D'EAU MESUREES ET DES LAMES D'EAU PREDITES PAR LE MODELE A LA STATION HYDROMETRIQUE 030424. RIVIERE AUX BROCHETS EN AVAL DE BEDFORD POUR LA PERIODE D'ETUDE 2002 2003.....	42
FIGURE 10 : SERIE CHRONOLOGIQUE JOURNALIERE DES TEMPERATURES MOYENNES, DES LAMES D'EAU MESUREES ET DES LAMES D'EAU PREDITES PAR LE MODELE A LA STATION HYDROMETRIQUE 030420. RIVIERE AUX BROCHETS AMONT DE BEDFORD POUR LA PERIODE D'ETUDE 1998 2003.	43
FIGURE 11 : SERIE CHRONOLOGIQUE JOURNALIERE DES TEMPERATURES MOYENNES, DES LAMES D'EAU MESUREES ET DES LAMES D'EAU PREDITES PAR LE MODELE A LA STATION HYDROMETRIQUE 030427 RUISSEAU WALBRIDGE INTERVENTION . POUR LA PERIODE D'ETUDE 2001 2003.	44
FIGURE 12 : SERIE CHRONOLOGIQUE JOURNALIERE DES TEMPERATURES MOYENNES, DES LAMES D'EAU MESUREES ET DES LAMES D'EAU PREDITES PAR LE MODELE A LA STATION HYDROMETRIQUE 030428. RUISSEAU WALBRIDGE TEMOIN POUR LA PERIODE D'ETUDE 2001 2003.....	45
FIGURE 13: SERIE CHRONOLOGIQUE JOURNALIERE DES COMPOSANTS DU BILAN HYDRIQUE MODELISEES POUR LES UNITES DE REPOSE HYDROLOGIQUE DE REFERENCE MILTON (MAÏS SUR LOAM SABLEUX MILTON MAL DRAINE, EN PENTE DE 0.8%)(A), ROUGEMENT (MAÏS SUR LOAM SABLEUX GRAVELEUX ROUGEMONT BIEN DRAINE EN PENTE DE 0.7%) (B).....	46
FIGURE 14 : SERIE CHRONOLOGIQUE JOURNALIERE DES COMPOSANTS DU BILAN HYDRIQUE MODELISEES POUR L'UNITE DE REPOSE HYDROLOGIQUE DE REFERENCE MILTON (PRAIRIE LOAM SABLEUX MILTON MAL DRAINE, EN PENTE DE 0.8%).	48
FIGURE 15 : DISTRIBUTION SPATIALE DE LA LAME DE RUISSELLEMENT ANNUELLE MOYENNE (A), DU POURCENTAGE D'OCCUPATION AGRICOLE DU TERRITOIRE (B) ET DES PRECIPITATIONS ANNUELLES MOYENNES MODELISEES POUR LA PERIODE D'ETUDE 2001-2003 A L'ECHELLE DES 99 SOUS-BASSINS VERSANTS DE LA RIVIERE AUX BROCHETS (C).	49
FIGURE 16 : DISTRIBUTION DES MOYENNES ANNUELLES D'ECOULEMENT DE SURFACE ET SOUTERRAIN A L'ECHELLE DE L'UNITE DE REPOSE HYDROLOGIQUE MODELISEE POUR LA PERIODE 2000-2003 PAR CLASSE DE CULTURE POUR L'ENSEMBLE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE AUX BROCHETS. LES MOYENNES ET ECARTS-TYPES (E-T) RAPPORTES SE REFERENT AUX HAUTEURS SIMULEES D'ECOULEMENT DE SURFACE.	50
FIGURE 17 : LAMES D'EAU ET EXPORTATIONS MENSUELLES DE PHOSPHORE ET DE MATIERES EN SUSPENSION OBSERVEES ET MODELISEES PREDITES A L'EXUTOIRE DU SOUS-BASSIN WALBRIDGE INTERVENTION ENTRE NOVEMBRE 2001 ET MAI 2003.....	51
FIGURE 18 : LAMES D'EAU ET EXPORTATIONS MENSUELLES DE PHOSPHORE ET DE MATIERES EN SUSPENSION OBSERVEES ET MODELISEES A L'EXUTOIRE DU SOUS-BASSIN WALBRIDGE TEMOIN ENTRE NOVEMBRE 2001 ET MAI 2003.	52

FIGURE 19 :	EXPORTATIONS ANNUELLES MOYENNES POUR LA PERIODE D'ETUDE 2000-2003 DE MATIERES EN SUSPENSION ET DE PHOSPHORE A L'EXUTOIRE DU BASSIN ET A BEDFORD (A), ÉROSION PREDITE PAR SWAT (MUSLE) EN FONCTION DU TYPE DE CULTURE ET DE LA PENTE DU URH POUR LA SERIE DE SOL MILTON SHEFFORD (B), EXPORTATIONS PREDITES DE SEDIMENTS DES PORTIONS AVAL/AMONT DU BASSIN (C), DISTRIBUTION DES CONCENTRATIONS MOYENNES DE SEDIMENTS (MG L⁻¹) REPRESENTEE A L'ECHELLE DU URH PAR CLASSE DE CULTURE POUR L'ENSEMBLE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE AUX BROCHETS (D).	53
FIGURE 20 :	DISTRIBUTION SPATIALE DES EXPORTATIONS ANNUELLES MOYENNES DE SEDIMENTS PREDITES A L'ECHELLE DES 99 SOUS-BASSINS VERSANTS DE LA RIVIERE AUX BROCHETS POUR LA PERIODE 2000 A 2003 (A), POURCENTAGE D'UTILISATION DU TERRITOIRE DU BASSIN (B), ET DES EXPORTATIONS ANNUELLES MOYENNES DE P EVALUEES SUR L'ENSEMBLE DU TERRITOIRE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE AUX BROCHETS (C).	55
FIGURE 21 :	EXPORTATIONS MOYENNES ANNUELLES DE P TOTAL PONDEREES POUR LA SUPERFICIE EN CULTURE, A L'ECHELLE DES SOUS-BASSINS DE LA RIVIERE AUX BROCHETS POUR LA PERIODE D'ETUDE 2001-2003.	57
FIGURE 22 :	SERIE CHRONOLOGIQUE JOURNALIERE DES EXPORTATIONS DE MATIERES EN SUSPENSION ET DE PHOSPHORE TOTAL PREDITES POUR LES UNITES DE REPOSE HYDROLOGIQUE DE REFERENCE MILTON (MAÏS SUR LOAM SABLEUX MILTON MAL DRAINE EN PENTE DE 0.8%) (A); ET ROUEMENT (MAÏS SUR LOAM SABLEUX GRAVELEUX ROUEMONT BIEN DRAINE EN PENTE DE 0.7%) (B).	58
FIGURE 23 :	DISTRIBUTION DES RICHESSES ET FORMES DE PHOSPHORE POUR LES LAMES D'EAU SIMULEES PAR LE MODELE HYDROLOGIQUE ET REPRESENTEE EN FONCTION DES CLASSES DE CULTURE.	61
FIGURE 24 :	TAUX D'EXPORTATION DE PHOSPHORE PARTICULAIRE SIMULE EN FONCTION DU TAUX D'ÉROSION (A) ET TAUX SIMULE D'EXPORTATION DU PHOSPHORE SOLUBLE EN FONCTION DE L'APPORT DE P (B) A L'ECHELLE DE L'UNITE DE REPOSE HYDROLOGIQUE PAR CLASSE DE CULTURE.	62
FIGURE 25 :	REPRESENTATION DE LA DISTRIBUTION SPATIALE DES URH EN CULTURES ANNUELLES CIBLEES PAR L'APPLICATION DES PAAC A DES TAUX DE 10% (A); 50% (B) ET 100% (C).	66
FIGURE 26 :	SERIES CHRONOLOGIQUES JOURNALIERES DU BILAN HYDROLOGIQUE, DES EXPORTATIONS DE MATIERES EN SUSPENSION ET DE PHOSPHORE POUR L'UNITE DE REFERENCE HYDRO-PEDOLOGIQUES MILTON (MAÏS SUR LOAM SABLEUX MAL DRAINE EN PENTE DE 0.7%) ASSOCIEES AU SCENARIO DE REFERENCE (A) ET AUX DIFFERENTS SCENARIOS AGROENVIRONNEMENTAUX DE CULTURE DE COUVERTURE ET CULTURE SUR RESIDUS (B-E).	74
FIGURE 27 :	CHAMPS SITUES DANS LA ZONE INONDABLE DE GRAND COURANT DE RECURRENCE 0-20 ANS DE LA RIVIERE AUX BROCHETS	79
FIGURE 28 :	REDUCTIONS DES EXPORTATIONS DE PHOSPHORE (A) ET DE SEDIMENTS (B) ASSOCIEES A UN TAUX CROISSANT D'ADOPTION DES DIFFERENTS PAAC APPLIQUEES EN PRIORISANT LES URH LES PLUS VULNERABLES AUX EXPORTATIONS DE P.	84

La connaissance est un îlot de certitude dans un océan d'incertitudes.

Edgar Morin.

Résumé

Une modélisation du fonctionnement hydrologique, des processus d'érosion et de la mobilité du phosphore a été supportée à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets (630 km²), important tributaire québécois de la Baie Missisquoi. Compte tenu de la problématique récurrente de prolifération de cyanobactéries dans ce plan d'eau, la réduction des flux de phosphore à la baie constitue une priorité d'intervention et a fait l'objet d'une entente entre les gouvernements de la province de Québec et de l'état du Vermont. Une réduction de 41% des apports de phosphore à la Baie, établie sur la base des flux de P estimés pour l'année de référence 1991, a ainsi été convenue entre les deux gouvernements. La problématique de la mobilité du phosphore interpelle particulièrement le secteur agricole, dans la mesure où il est estimé que 80% des apports diffus de P proviennent du parcellaire en culture du bassin versant. La modélisation supportée par le logiciel SWAT (*Soil and water assesment tool*) est destinée à soutenir la planification et la mise en œuvre d'actions concertées des intervenants de la région impliqués dans la mise en valeur du bassin versant et de la Baie Missisquoi.

Le paramétrage du modèle s'est d'abord appuyé sur la caractérisation et la représentation spatiale des paysages et des systèmes de production agricole du bassin versant. Le parcellaire agricole a ainsi fait l'objet d'un découpage en plus de 2 400 unités de réponse hydrologique, chacune présentant des propriétés distinctes en termes de type de sol, de relief, de pratiques culturales, d'apports de nutriments et d'appartenance à l'un des 99 sous-bassins versants du territoire à l'étude. Le calibrage et la validation de la modélisation journalière du cheminements de surface et souterrain des eaux, de l'érosion, du transport de sédiments, de même que de la mobilisation des formes solubles et particulaire de phosphore s'est appuyé sur les suivis hydrométrique et de la qualité d'eau de deux bassins versants expérimentaux (6-8 km²) présentant des propriétés physiques contrastées. La différenciation des paramètres de calage du modèle pour les portions amont et aval du bassin a ainsi permis un bon ajustement du modèle hydrologique aux débits observés sur les différents tronçons de la Rivière aux Brochets, de même qu'une bonne reproduction des flux de sédiments et de phosphore mesurés aux embouchures des deux bassins de référence.

La modélisation des flux de sédiments et de phosphore à l'échelle du bassin versant met en relief une forte discrimination spatiale dans la distribution spatiale des exportations. Sur la base des conditions actuelles de régie des sols et des cultures (scénario de référence), plus de 50% du flux de phosphore modélisé provient d'environ 10% du bassin. Typiquement, ces secteurs sont associés à d'importantes hauteurs d'eau ruisselée, des taux d'érosion élevés ou un enrichissement important de la couche arable

en phosphore. Cette importante variabilité dans la vulnérabilité du parcellaire fait en sorte que l'implantation de pratiques ou ouvrages de conservation des sols a des retombées tout aussi variables sur les hauteurs d'eau ruisselée, l'érosion et les flux de P exportés. À titre d'exemple, l'implantation ciblée de cultures de couverture sur 10% du parcellaire en cultures annuelles, présentant la plus grande vulnérabilité à la mobilité du phosphore, se traduit en une réduction de l'ordre de 21% des exportations globales de phosphore à l'exutoire du bassin versant. Une application aléatoire des mêmes pratiques, sur une superficie équivalente, ne serait pour sa part associée qu'à une réduction de l'ordre 6% du flux global de phosphore. L'étude de différents scénarios de gestion du parcellaire indique que la rencontre de l'objectif de 41% de réduction des exportations de P serait tributaire d'une implantation généralisée (50% du parcellaire en cultures annuelles) de pratiques culturales de conservation, de même que de la conversion ciblée de 10% du parcellaire le plus vulnérable en culture de couverture ou en prairie permanente. La rencontre des charges-cibles de phosphore établies dans l'entente Québec-Vermont ferait par ailleurs appel à des investissements, de façon complémentaire, dans la protection systématique des plaines inondables et des bandes riveraines, l'implantation ciblée de structures de contrôle du ruissellement et à l'incorporation hâtive des engrais de ferme sur le parcellaire en cultures annuelles.

Le premier volet de réalisation du programme de modélisation hydrologique à l'échelle de la Rivière aux Brochets (Caractérisation et paramétrage) a fait l'objet d'un soutien financier de la part du Fonds de recherche en agroenvironnement de l'initiative FCAR/IRDA (Madramootoo et al., 2003). Le calibrage et la validation du modèle hydrologique SWAT a fait l'objet d'un soutien financier du CNRSG dans le cadre du projet OSMEDAL (Bonn et al., 2001). Le troisième volet pertinent à la scénarisation agroenvironnementale a fait l'objet d'un soutien financier du MDDEP.

1. Introduction

La prolifération de cyanobactéries (algues bleu-vert) dans la Baie Missisquoi, portion septentrionale du Lac Champlain, est de loin le cas le plus sévère au Québec (Blais, 2002). Elle y entraîne depuis plusieurs années une perturbation sévère des activités récréatives et touristiques, de même que des problèmes d'approvisionnement pour la station de traitement d'eau potable locale. En raison des toxines produites par ce plancton, mi-végétal, mi-bactérien, le développement de fleurs d'eau demeure une sérieuse préoccupation de santé publique. Les proliférations de cyanobactéries découlent d'interactions complexes entre plusieurs facteurs, incluant la température de l'eau, l'ensoleillement, le pH, la disponibilité des nutriments et les courants dans le plan d'eau (Duy et *al.*, 2000). L'apport de phosphore demeure cependant un facteur prépondérant dans les successions algales qui favorisent éventuellement la colonisation par les cyanobactéries. Reconnaisant le rôle déterminant des apports de P sur la dégradation de l'écosystème de la Baie Missisquoi, une entente spécifique sur la réduction des charges de P dans la Baie Missisquoi est intervenue entre les gouvernements du Québec et du Vermont en août 2002. L'entente cible le critère de concentration de $25 \mu\text{g P L}^{-1}$ dans les eaux de la Baie (Figure 1a) et définit un partage des responsabilités pour l'atteinte d'une charge cible totale de phosphore dans la Baie Missisquoi de 97.2 T P an^{-1} (Mimeault, 2002). L'effort de réduction de la charge de phosphore pour le Québec (40%) représente 27.3 T P an^{-1} , alors qu'il se situe à 42.8 T P an^{-1} au Vermont (60%). Dans les deux cas, il s'agit d'une réduction d'environ 41% de la charge annuelle totale de référence établie pour l'année 1991, soit $167.3 \text{ T P an}^{-1}$ (Figure 1b). Cette réduction des flux de P dans la Baie Missisquoi interpelle particulièrement le monde agricole. En effet, environ 79% de la charge annuelle de P vers la baie (167 T P) est attribuée à l'agriculture, qui occupe 26% du bassin versant (Hegman et *al.*, 1999). En territoire québécois, environ 60% de la charge de P origine du bassin versant de la Rivière aux Brochets, même si celui-ci ne représente que le cinquième du territoire drainé par la Baie Missisquoi (Figure 2).

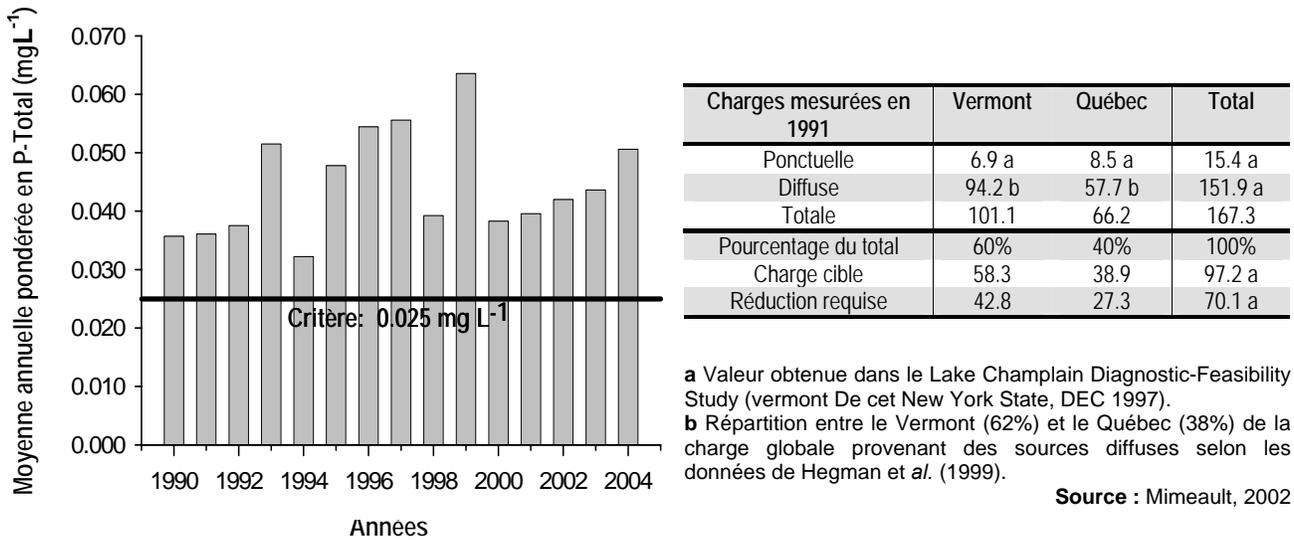


Figure 1 : Moyennes annuelles (1990-2004) des concentrations en phosphore total dans la Baie Missisquoi comparées au critère de 0.025 mg L^{-1} et (b) partage des efforts de réduction du phosphore dans la baie Missisquoi entre le Québec et le Vermont ($\text{T métrique an}^{-1}$)

Plusieurs études pertinentes à la mobilité du phosphore ont été réalisées dans la région de la Baie Missisquoi, au Québec comme au Vermont. La nature multidisciplinaire des travaux et la diversité des échelles d'étude ont permis de développer une meilleure compréhension de la dynamique globale du phosphore dans les systèmes de production agricole, les sols et les écosystèmes aquatiques de la région.

Dans le cadre d'études en parcelles expérimentales sous pluie simulée, Michaud et al. (2004) ont lié l'érodabilité du sol, son enrichissement en P et l'apport récent d'engrais de ferme, aux concentrations et à la biodisponibilité du P dans le ruissellement. À l'échelle du champ, Enright et Madramootoo (2004) ont caractérisé la mobilité du P du ruissellement et dans les drains souterrains de deux parcelles de la région. À l'échelle du bassin versant expérimental du Ruisseau au Castor (10 km^2), Michaud et al. (2002, 2005) ont décrit la variabilité spatiale et temporelle de la mobilité du phosphore (P) en réponse aux particularités du paysage, de même qu'à la gestion et à l'aménagement du parcellaire. À une échelle d'étude similaire, Duguet et al. (2002) et Michaud et al. (2004) ont démontré la répartition hétérogène des zones hydrologiquement actives à l'échelle du parcellaire ainsi que l'influence des particularités du paysage sur les régimes d'exportation du P aux exutoires des bassins jumeaux du Ruisseau Walbridge.

À l'échelle du territoire, les études entreprises dans la région sur la mobilité du phosphore se sont centrées sur le bassin versant de la Rivière aux Brochets (630 km^2), principal contributeur en P à la Baie Missisquoi en territoire québécois. Les travaux ont progressé en trois étapes successives, mettant à profit les dispositifs d'étude mis en place aux échelles inférieures dans le bassin versant. En première étape, suivant une approche typologique de représentation des risques de mobilité du phosphore, Deslandes et

al. (2002) ont effectué la caractérisation et la représentation spatiale des systèmes de production agricole et de l'environnement physiographique du bassin versant de la Rivière aux Brochets. La variabilité spatiale de la mobilité du phosphore à l'échelle de 18 sous-bassins était alors expliquée par différents indicateurs agroenvironnementaux, incluant la vocation agricole du territoire, la position des sous-bassins dans le relief, le bilan des apports et l'enrichissement des sols en P. En deuxième étape, suivant une approche de modélisation déterministe, les capacités prédictives du modèle hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et *al.*, 1998) ont été évaluées à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets. Le recours au système d'information à référence spatiale développé dans le cadre du premier volet de recherche, de même qu'aux suivis des écosystèmes aquatiques des bassins expérimentaux du Ruisseau Walbridge (Michaud et *al.*, 2004), ont conduit au calage et à la validation des routines du modèle hydrologique SWAT pertinentes à l'hydrologie, de même qu'aux flux de sédiments et de phosphore à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets (Beaudin et *al.*, 2004).

Dans une perspective d'appui à la planification et à la mise en œuvre d'actions agroenvironnementales concertées dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets, la présente étude constitue la troisième étape du programme de recherche en modélisation hydrologique et vise à identifier les scénarios de gestion du parcellaire agricole susceptibles de rencontrer l'objectif de réduction de flux de phosphore de sources diffuses établis dans l'entente Québec-Vermont. Le potentiel de réduction des flux de P associé à différents types de pratiques agricoles et aménagements de conservation (PAAC) est estimé grâce aux prédictions du modèle hydrologique associées au scénario de référence, représentatif des systèmes de production actuels, comparées aux prédictions associées à l'implantation des PAAC. Compte tenu de la structure du système d'information géographique (SIG) et des modalités d'opération de SWAT, l'approche retenue permet de tenir compte de l'effet du ciblage spatial des interventions agroenvironnementales, de même que de leur interaction et leur application à des taux variables d'acceptabilité sur les dynamiques d'exportation du phosphore.

Suivant une brève présentation du site d'étude et du modèle hydrologique retenu pour les simulations, la présente communication présente d'abord les résultats de la simulation hydrologique pour le scénario de référence. Une analyse détaillée des prédictions, à l'échelle des unités de modélisation les plus fines, met alors en relief la sensibilité du modèle aux particularités physiques du parcellaire et des systèmes culturaux. L'influence des scénarios agroenvironnementaux sur l'hydrologie et la mobilité des sédiments et du phosphore à l'échelle du bassin versant est par la suite présentée en deux étapes. Les influences relatives de chaque type de PAAC sont d'abord présentées séparément, puis font l'objet d'une agrégation selon des scénarios mixtes, faisant intervenir différents niveaux d'implantation des PAAC.

2. Matériel et méthodes

2.1 Description du site d'étude

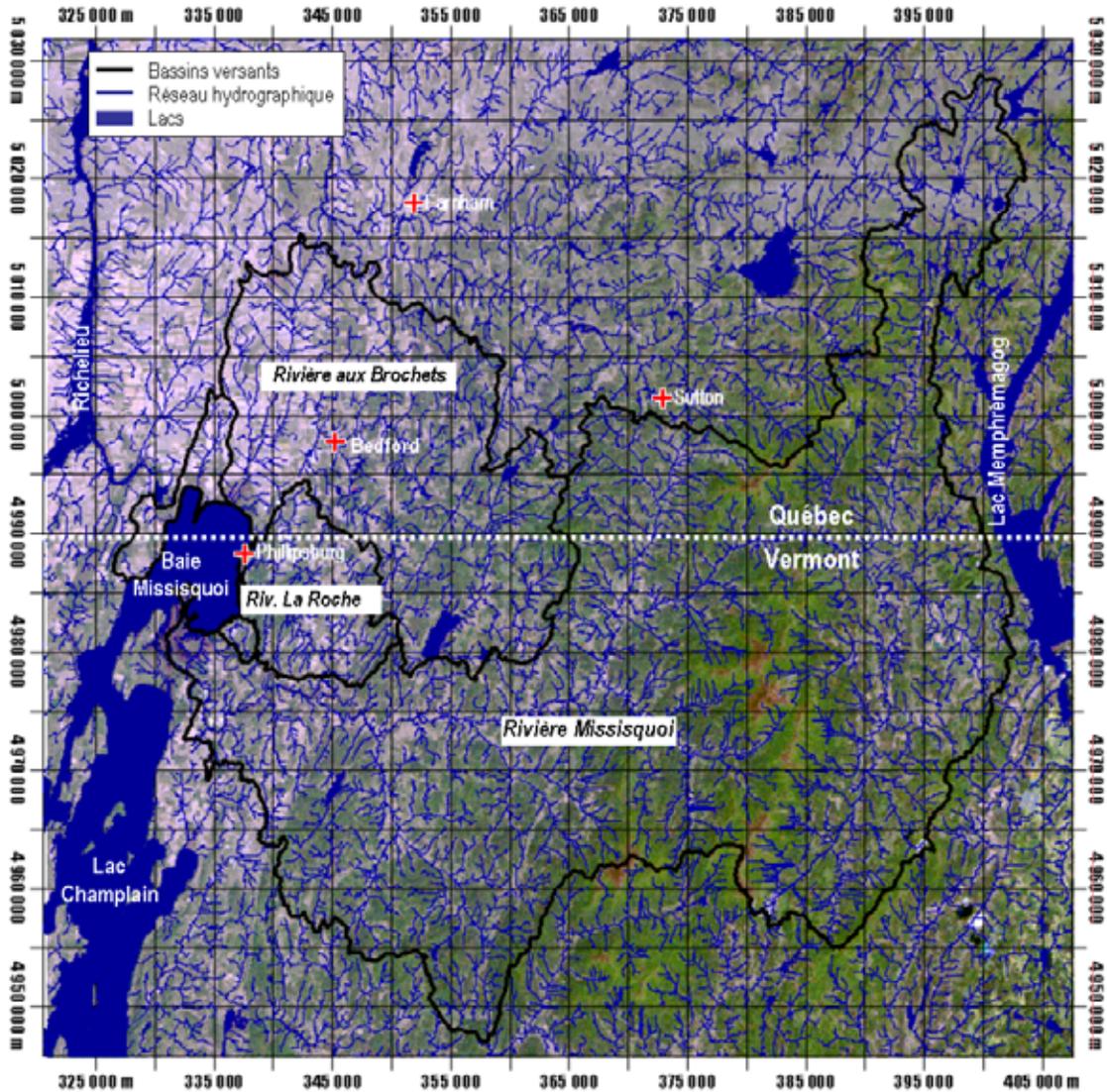
La Rivière aux Brochets prend sa source aux Vermont, près du Lac Carmy, situé à environ 8 km au sud de la frontière québécoise. Son bassin draine un territoire de 630 km², dont 99 km² (15.7%) se situent dans l'état américain du Vermont. Le bassin est caractérisé par un gradient spatial bien démarqué dans l'utilisation du territoire et son environnement géophysique. Les sols de la région à l'étude ont été décrits et cartographiés par Cann et *al.* (1946). La tête du bassin (390 km²), en amont de la ville de Bedford, traverse le piedmont appalachien, dominé en sol québécois par les séries de sol Milton (loam sableux) et Shefford (loam schisteux). Les élévations y varient de 50 à 710 mètres, avec des pentes allant jusqu'à 38 degrés (78%). Cette portion du bassin se prête peu à l'agriculture intensive en raison de la nature des sols et du relief accidenté. Au total, 13 265 ha sont réservés à des fins agricoles, ce qui représente 35% de la superficie de cette portion du bassin (Deslandes et *al.*, 2002). La production porcine et laitière se partagent équitablement plus de 75% des unités animales pour cette portion du bassin (5 877 UA), présentant une densité d'élevage globale de 0.44 UA ha⁻¹. La forêt y occupe 54% du territoire. Alors que la production fourragère domine la portion agricole de cette partie du territoire, on y retrouve également des cultures à grandes interlignes sur près de 4 000 ha (soit 11% cette portion du bassin).

Tableau 1 : Répartition des productions animales dans les portions amont et aval du bassin versant de la Rivière aux Brochets.

Parties du bassin	Productions animales (UA)				Sup. agricole (ha)	Unité animales Totales	Densité animale (UA ha ⁻¹)
	Lait	Boucherie	Porc	Volaille			
Amont de Bedford	2 136	1 005	2 239	497	13 265	5 877	0.44
Aval de Bedford	6 673	1 029	6 658	4 468	18 640	18 828	1.01

Source : Deslandes et *al.*, 2002

La région aval du bassin (247 km²), qui s'étend de Bedford à l'embouchure de la rivière, emprunte aux paysages de la plaine des basses-terres du Saint-Laurent et des Appalaches. Les argiles d'origines marine et lacustre occupent les positions basses du relief, alors que les tills calcaires ou schisteux occupent les positions surélevées et ondulées du paysage. L'élévation de cette partie du bassin oscille entre 20 et 130 m avec des pentes faibles (moyenne de 0.6 degré ou 1%). Les trois quarts de la superficie de cette portion aval du bassin est cultivée. La production de maïs et de soja occupent la moitié des superficies en culture, alors que les fourrages pérennes et les céréales à paille occupent respectivement 30 et 20% du territoire agricole. Le profil de la production animale est semblable à la portion amont du bassin versant, bien que plus intensive (Tableau 1), avec 18 828 unités animales pour une densité de 1.01 UA ha⁻¹. Cette portion du bassin versant abrite aussi le cœur industriel et la majorité de la population de la région, évaluée à environ 9 000 habitants (Caumartin et Vincent, 1994).



Fond de carte : Ortho-image satellite produite par le Centre d'information topographique, 2001, MTM Nad 1983

Figure 2 : Localisation de la Baie Missisquoi et de ses principaux tributaires

2.2 Description du modèle

Alors que la pollution agricole de sources diffuses était reconnue dans les années 1970 comme principale source d'eutrophisation des eaux de surface, notamment dans le bassin des Grands Lacs (PLUARG, 1980), le besoin d'appuis stratégiques aux initiatives de réduction des sources diffuses de P a amené les milieux de la recherche nord-américains à développer différents modèles de prédiction de la mobilité des sédiments, nutriments et pesticides.

Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool; Arnold *et al.*, 2005) constitue aujourd'hui un outil bien intégré au plan agronomique et hydrologique. Il est d'ailleurs largement utilisé en Amérique du Nord et en

Europe (Arnold *et al.*, 2005; Neitsch *et al.*, 2002; Srinivasan, 2000; Santhi *et al.*, 2001) pour prédire les transferts diffus de sédiments, de nutriments et de pesticides.

SWAT est un modèle déterministe semi-distribué destiné à simuler les effets de différents scénarios de gestion du territoire sur les transferts hydriques et la mobilité des sédiments et des éléments nutritifs à l'échelle de grands bassins versants hétérogènes et sur de longues périodes. Le modèle SWAT emprunte les bases conceptuelles de différents outils de modélisation agroenvironnementale développés antérieurement, notamment les modèles :

- SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Bassins) conçu par Williams *et al.* (1985);
- EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) développé par Williams *et al.*, (1984) ;
- CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems), développé par Knisel (1980);
- GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems), créé par Leonard *et al.* (1987).

Dans sa **phase terrestre**, SWAT simule de façon continue l'évolution des stocks terrestres de nutriments, la croissance et les prélèvements des plantes, de même que les transferts d'eau, de sédiments et nutriments vers le réseau hydrographique. La simulation des cycles terrestres des nutriments et du bilan hydrique est tributaire des conditions climatiques, des particularités physiques du territoire et de la gestion du parcellaire. L'ensemble des processus sont simulés de façon journalière à l'échelle de petites unités de territoire, soit les *unités de réponse hydrologique* (URH) (Figure 3). Celles-ci présentent une combinaison unique de propriétés géophysiques et d'utilisation du sol à l'intérieur d'un sous-bassin. L'activité hydrologique modélisée au sein de chacune des URH est cumulée à l'échelle du sous-bassin versant. Dans la **phase aquatique** du modèle, les exportations d'eau, de sédiments et de nutriments en provenance des sous-bassins sont prises en charge par diverses routines qui simulent les processus de transport, de déposition et de re-suspension des sédiments, de transformation des nutriments ainsi que l'érosion des berges. D'autres routines simulent aussi la transformation des nutriments et la dégradation des pesticides.

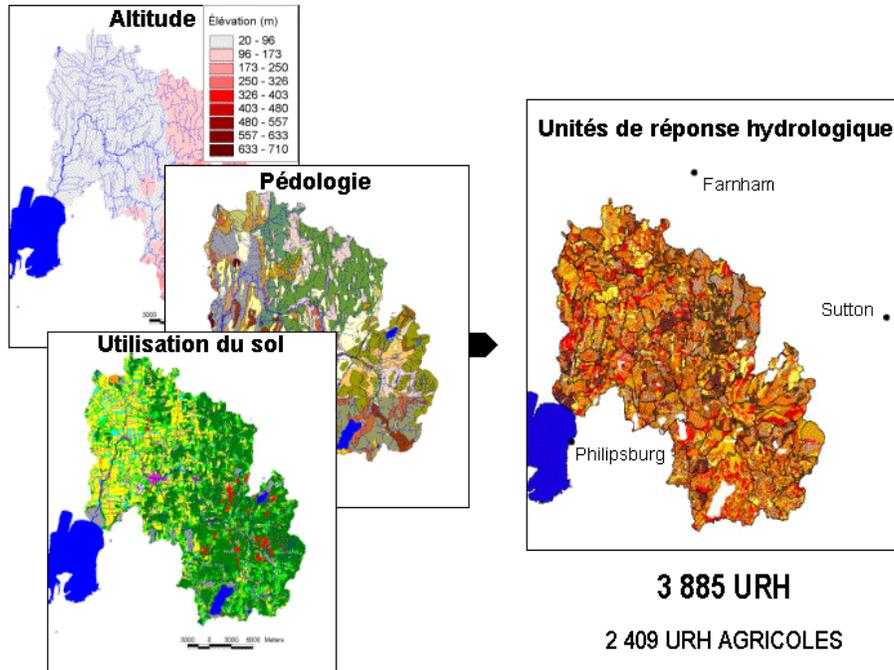
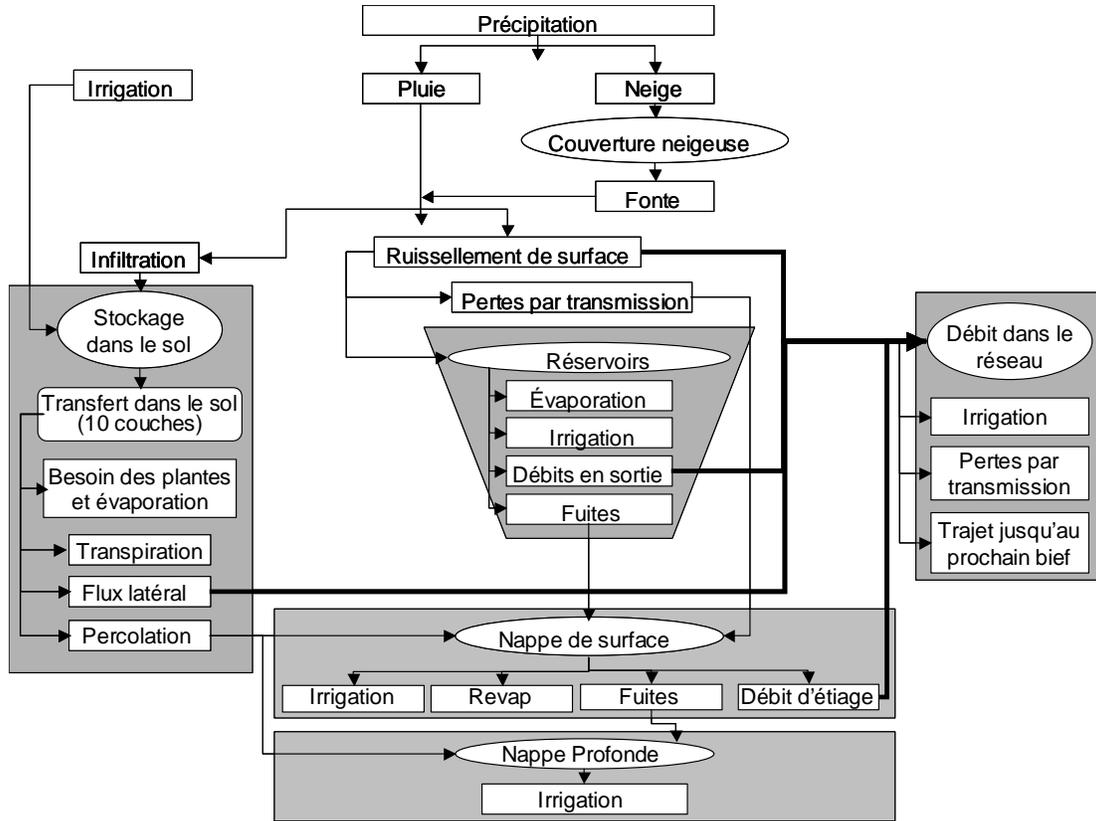


Figure 3 : La représentation spatiale des unités de réponse hydrologiques (URH)

2.2.1 Hydrologie

Dans SWAT, les précipitations fournissent l'énergie nécessaire aux mouvements de l'eau en surface et dans le sol ainsi qu'au transport des sédiments et nutriments (Figure 4). Les précipitations sous forme liquide et la fonte de neige sont d'abord séparées entre ruissellement et infiltration à l'aide de la méthode du numéro de courbe du Soil Conservation Service (USDA-SCS, 1972). Cette méthode attribue un numéro de courbe (CN) à chacune des URH selon le groupe hydrologique du sol, l'utilisation du sol ainsi que les pratiques agricoles. Les numéros de courbe sont ensuite ajustés journalièrement en fonction du CN de la journée précédente et du contenu en eau du sol.

Le cycle de l'eau est reproduit journalièrement de manière simplifiée pour chacune des URH selon l'équation 1. L'eau qui s'infiltre dans le sol percole d'une couche à l'autre lorsque la capacité au champ de la couche est atteinte, pour atteindre l'aquifère peu profond et possiblement, l'aquifère profond. Les cours d'eau sont ensuite alimentés par la l'aquifère peu profond et les sols. Seul l'eau dans le sol est disponible pour répondre aux besoins des plantes. L'accumulation d'unités de chaleur ainsi que les besoins/prélèvements en eau, en azote et en phosphore régissent la croissance de ces dernières. SWAT modélise également l'évapotranspiration du sol et des plantes.



Adapté de Eckhardt et Arnold, 2001

Figure 4 : Composantes hydrologiques du modèle SWAT.

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - Qr_i) \quad (\text{mm}) [1]$$

où: SW_t est le contenu final en eau disponible pour les plantes dans le sol (mm);

SW est le contenu en eau disponible pour les plantes (mm);

R_i est la pluviométrie (mm);

Q_i est le ruissellement (mm);

ET_i est l'évapotranspiration (mm);

P_i est la percolation (mm);

Qr_i est l'écoulement restitué du sol ou de l'aquifère peu profond (mm);

t est la durée en jours.

2.2.2 Sédiments

Le transport des sédiments est estimé avec l'équation universelle de perte de sol modifiée (MUSLE; Williams, 1975) (équation 2). Celle-ci estime la perte de sol en fonction du ruissellement et du débit de pointe plutôt que sur la base de coefficients de déposition des sédiments.

$$MUSLE = 11.8(Q_{surf} * q_{max} * SUP_{URH})^{0.56} * K_{usle} * C_{usle} * LS_{usle} * CFRG \quad [T] [2]$$

où: Q_{surf} est le ruissellement ($mm\ ha^{-1}$);

q_{max} est le débit de pointe ($m^3\ s^{-1}$);

SUP_{URH} est l'aire de l'URH modélisée (ha);

K_{USLE} est le facteur d'érodabilité du sol ($0.013\ tonne\ m^2\ h\ (m^3\ tonne\ cm)^{-1}$);

C_{USLE} est le facteur de couverture végétale du sol (--);

LS_{USLE} est le facteur topographique (--);

$CFRG$ est le facteur de teneur en fragments rocheux (--).

Le débit de pointe est calculé à partir de la formule rationnelle (Akan, 2002) et le ruissellement, avec l'équation du numéro de courbe SCS (USDA-SCS, 1972). MUSLE fait aussi intervenir des facteurs reliés à l'érodabilité du sol (K_{USLE}), à la couverture végétale (C_{USLE}), à la pente (LS_{USLE}) ainsi qu'aux fragments rocheux de la première couche du sol ($CFRG$).

Le facteur d'érodabilité du sol est estimé à partir d'une équation qui tient compte de la granulométrie, de la perméabilité et de la structure du sol, ainsi que de sa teneur en matières organiques (Wischmeier et al., 1971). Le facteur de couverture végétale fait quant à lui l'objet d'une mise à jour quotidienne basée sur la croissance des plantes et les résidus laissés à la surface du sol. Le facteur LS_{USLE} est calculé à partir de la pente de l'URH et le facteur de fragments rocheux à partir des caractéristiques du sol.

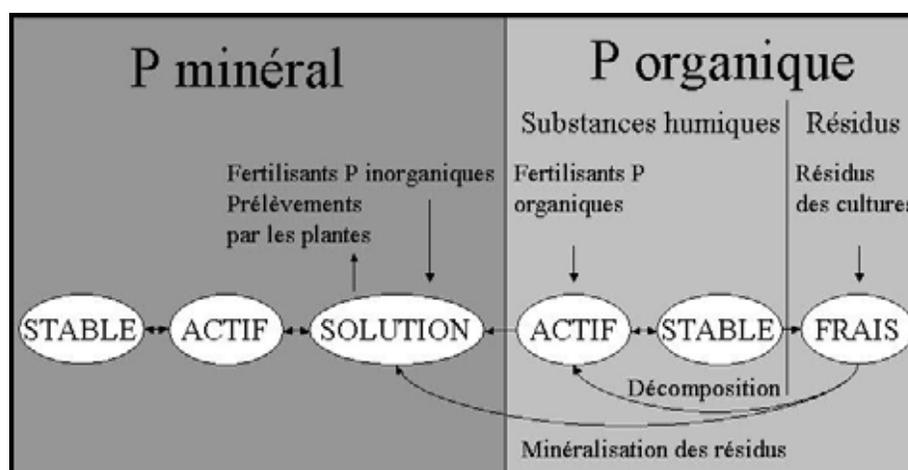
2.2.3 Phosphore

Au niveau terrestre, SWAT simule les transferts journaliers entre six différents pools de phosphore dans le sol (Figure 5). Trois pools correspondent aux formes organiques du phosphore. Le phosphore organique *frais* est associé aux résidus de culture et à la biomasse microbienne, alors que le phosphore associé à l'humus du sol est réparti entre le pool actif et le pool stable. La minéralisation du phosphore organique ne s'effectue qu'à partir du pool actif des substances humiques et du pool des résidus (Jones et al., 1984). La décomposition des résidus de cultures contribue aussi au pool organique actif. Les formes minérales de phosphore sont pour leur part subdivisées en trois pools : solution, actif et stable. L'équilibre entre le phosphore en solution et le phosphore minéral actif s'établit rapidement, de quelques jours à quelques semaines, alors que la dynamique entre les pools actif et stable évolue beaucoup plus lentement.

Lors d'une application d'engrais de ferme ou d'engrais minéraux, le modèle redistribue les quantités de P appliquées dans les pools appropriés, en tenant compte de la profondeur d'incorporation et de la nature du fertilisant. Lorsque le fertilisant comprend une fraction organique, les quantités de P sont équitablement partagées entre les pools organiques *frais* et humiques actifs. La redistribution du P dans

le profil du sol, sous l'action biologique ou du travail du sol, est également simulée. Cette redistribution est déterminante pour les exportations de P puisque les routines hydrologiques de SWAT considèrent que le ruissellement n'interagit qu'avec les 10 premiers millimètres de la couche arable du sol. De façon journalière, le modèle estime l'exportation de P particulaire et en solution pour chaque URH. Un facteur d'enrichissement des sédiments et du ruissellement en P (Menzel, 1980) permet d'ajuster les formes de P exportées vers le réseau hydrographique.

Dans le cadre de la présente étude, la version du modèle SWAT modifiée par White et *al.* (2002) a été utilisée afin de permettre la croissance et la survie des cultures pérennes durant la période hivernale. Une synthèse des modifications apportées au code et aux bases de données de la version originale de SWAT apparaît à l'annexe B.



Source : Neitsch et *al.*, 2000

Figure 5 : Composantes du cycle terrestre du phosphore modélisé par SWAT.

2.3 Paramétrage agroclimatique

SWAT est un modèle complexe qui requiert la mise en forme et l'intégration d'une multitude de paramètres biophysiques, climatiques et de gestion des cultures. La présente section décrit brièvement le paramétrage des différentes composantes du modèle.

Les données journalières de précipitation et température utilisées en support à la modélisation hydrologique pour la période d'étude 1998-2003 proviennent des stations climatiques du Service de l'information sur le milieu atmosphérique (MDDEP, 2003), localisées à Philipsburg (45°01'48"N et 73°04'48"O), Farnham (45°18'N et 72°54'O) et Sutton (45°09' Nord et 72°37'48" Ouest) (voir Figure 2). Les données relatives à l'éclairement solaire, à la vitesse du vent et à l'humidité relative, proviennent des bases de données du simulateur de climat de SWAT pour la station météorologique de Plattsburg, située à environ 50 km au sud ouest de l'embouchure du bassin (<http://www.brc.tamus.edu/swat/index.html>).

Les précipitations annuelles normales (1971 à 2000) des stations de Farnham, Philipsburg et Sutton sont respectivement de l'ordre de 1 156 mm, 1 095 mm et 1 272 mm. Les différences dans les profils des précipitations observés aux trois stations reflètent le gradient orographique du bassin versant. L'élévation des stations météorologiques passe de 65 mètres à Philipsburg, pour atteindre 210 mètres à Sutton. Les précipitations de neige suivent le même gradient, passant de 247 mm à 390 mm. Globalement, les précipitations reçues au cours de la période à l'étude correspondent aux normales des précipitations, avec des écarts variant jusqu'à 7%.

Tableau 2 : Profils annuels des conditions météorologiques pour la période d'étude et moyennes annuelles à long terme aux trois stations utilisées en support à la modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets.

	FARNHAM		Données des stations de PHILIPSBURG		SUTTON	
	Moyenne 20 ans	Moyenne 2000-2003	Moyenne 20 ans	Moyenne 2000-2003	Moyenne 20 ans	Moyenne 2000-2003
Température moyennes (°C)	6	6.5	6.8	7.5	5.8	6.4
Pluie (mm)	931.7	837.35	891.7	865	990.5	919
Neige (cm)	224.5	247.05	203.9	267	281.4	391
Précipitation totale (mm)	1 156.2	1 081.65	1 095.6	1 132	1 272	1 310

Source : CRIACC, 2005

Dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets, à l'instar de l'ensemble du territoire québécois, les périodes hivernales et printanières occupent une place importante dans les dynamiques hydrologiques. Les précipitations liquides sur sol gelé et la fonte de la neige contribuent de façon importante au bilan des exportations de sédiments et de nutriments. La modélisation de ces épisodes hydrologiques demeure cependant fort complexe. Conceptuellement, le modèle SWAT classe le type de précipitation sur une base journalière, soit à titre de pluie ou neige, en utilisant la température moyenne journalière et un seuil fixé par l'utilisateur. La couverture de neige au sol et la fonte sont alors modélisées à partir de différents paramètres de calage, incluant :

- La température à partir de laquelle les précipitations sont neigeuses;
- La température minimale de fonte de neige;
- Le taux maximum de fonte de neige;
- Le taux minimum de fonte de neige;
- Le facteur de délais associé à la température antécédente du couvert nival;
- La teneur en eau minimale contenue dans la totalité du couvert nival;
- La fraction du volume de neige correspondant à 50% du couvert nival.

Dans le cadre de la présente modélisation, les routines hydrologiques ont été optimisées pour les périodes hivernales et printanières en procédant par itérations de diverses combinaisons de valeurs des paramètres physiques de précipitation et de fonte de neige. Notons ici que la qualité des simulations des précipitations hivernales et printanières pourrait être nettement améliorée en modifiant le code source de SWAT afin de permettre l'entrée de données de précipitations pluvieuses et neigeuses quotidiennes, telles que disponibles auprès des services nationaux de météorologie.

La modélisation de la croissance des cultures a pour sa part été ajustée aux unités thermiques de croissance (UTC) requises pour chacune des cultures modélisées. Ces UTC ont été calculées à partir des données de températures de la période à l'étude ainsi qu'à l'aide des dates de semence et de récolte de chacune des cultures. Avec ses 2 500 à 2 900 unités thermiques maïs (UTM) (Bootsma *et al.*, 1999), cette région est parmi les plus productives au Québec. Globalement, les températures moyennes mensuelles observées pour la période d'étude aux trois stations correspondent aux normales climatiques à long terme. La température annuelle moyenne oscille autour de 6°C. En plus des données climatiques journalières, la simulation de la croissance des cultures s'appuie sur plusieurs paramètres propres aux différents végétaux, dont la température minimale de croissance, la courbe de croissance et l'indice foliaire (LAI - *Leaf Area Index*) maximum potentiel. Dans le cadre de la présente étude, les paramètres de croissance des cultures ont été ajustés par itérations de façon à reproduire les biomasses et les rendements généralement observés dans la région. Les données régionales colligées par La Financière Agricole (2000-2003) ont servi de base de référence pour ajuster la croissance des cultures.

2.4 Paramétrage hydro-pédologique

Les simulations hydrologiques et hydrodynamiques supportées par le modèle SWAT s'appuient sur les propriétés biophysiques du milieu terrestre et du réseau hydrographique. La délimitation **du bassin versant et de ses sous-bassins** s'est d'abord appuyée sur une intégration des données hydrographiques et topographiques relatives aux portions québécoises et américaines du bassin versant de la Rivière aux Brochets. Le modèle numérique d'altitude a été développé par une intégration des données du réseau géodésique du Québec (MRNF, 2000), des cartes topographiques numériques du Québec (MRNF, 1999), des plans d'aménagement de cours d'eau réalisés par les ingénieurs du MAPAQ (Deslandes *et al.*, 2002), ainsi que du National Elevation Data Base (USDA-NRCS, 1999). La précision moyenne du MNA, comportant des pixels de 30 m, a été estimée à 1.3 m en le comparant avec des relevés fins acquis sur le bassin expérimental du Ruisseau Walbridge (Michaud *et al.*, 2004).

La délimitation des unités de réponse hydrologique (URH) a été obtenue au moyen d'intersections spatiales entre les limites des sous-bassins, de la carte d'utilisation du sol et de la couverture pédologique. La représentation spatiale de l'utilisation du sol, pour l'ensemble du territoire à l'étude, a été supportée par la classification d'une image Landsat 7 ETM+ du 5 juillet 1999 (Cattai, 2004). La cartographie de la couverture pédologique en territoire québécois provient des rapports des comtés

d'Iberville (Thériault et *al.*, 1943) et de Shefford, Brome et Missisquoi (Cann et *al.*, 1946). Les propriétés physico-chimiques des sols relatives à la granulométrie, la conductivité hydraulique, la densité apparente et le pourcentage de matière organique ont été extraites de l'inventaire des problèmes de dégradation des sols du Québec (Tabi, et *al.*, 1990) et intégrées au SIG selon un découpage en trois couches des profils culturaux. Les teneurs en eau utile ont été dérivées des données de texture et de matière organique du sol selon la méthodologie prescrite dans le *National Soil Survey Handbook* (USDA-NCRS, 2001). Les facteurs d'érodabilité du sol proviennent de Bernard (1996), qui a basé ses estimations sur l'inventaire des problèmes de dégradation des sols du Québec. L'érodabilité du sol, pour les séries de sol non répertoriées, a été estimée à l'aide nomographe de Wischmeier (Wischmeier, 1971). Pour la portion américaine du territoire à l'étude, la couverture pédologique de même que les propriétés physico-chimiques des sols proviennent du *Soil Survey Geographic Database* (USDA-NCRS, 1999).

En absence de données relatives à la distribution spatiale du drainage souterrain pour l'ensemble du bassin versant, les superficies en cultures annuelles ont été considérées comme étant drainées pour les fins de la modélisation hydrologique. Cette distribution spatiale arbitraire associe le drainage souterrain à près de 60% du parcellaire en culture, ce qui s'avère représentatif des bassins versants expérimentaux pour lesquels cette information est disponible, soit les bassins du Ruisseau Walbridge (Michaud et *al.*, 2004) et du Ruisseau au Castor (Michaud et *al.*, 2002). Pour les besoins du modèle, la profondeur moyenne des drains a été fixée à 900 mm; le temps requis pour atteindre la capacité au champ à 48 heures et la durée du délai d'évacuation au cours d'eau à 10 heures.

2.5 Paramétrage de la richesses des sols en phosphore

Les processus de minéralisation et de rétroversion du phosphore, modélisés de façon journalière par SWAT à l'échelle de l'URH, ont été initialisés en entrant une concentration du sol en P labile (mg/kg) et en P organique (mg/kg). Les laboratoires et les services-conseils agronomiques du Québec et du Vermont ne procèdent pas de façon courante aux dosages de ces fractions du P. Dans le cadre de la présente étude, la spatialisation de la richesse initiale des sols en P à l'échelle des sous-bassins hydrographiques de la portion québécoise du bassin versant est basée sur 1328 analyses Mehlich-III de sols, rassemblées par Deslandes et *al.* (2002) pour la période 1995 à 2001. La méthode Mehlich-III (Mehlich, *al.* 1984) a été validée pour les conditions édaphiques québécoises (Tran et Giroux, 1987) et est couramment utilisée dans la mise à jour des programmes de fertilisation phosphatée. Afin d'évaluer les paramètres nécessaires au modèle SWAT, les données de richesse du sol Mehlich-III ont été converties en dosages équivalents selon la méthode Olsen (Olsen et *al.*, 1954), en appliquant la courbe de calage de Tran et *al.* (1990), développée à partir de séries de sol québécoises :

$$P\text{-Olsen} = (P \text{ Mehlich-III}-6)/3.61 \quad (\text{mg kg}^{-1}) [3]$$

Les estimations de biodisponibilité du P selon la méthode Olsen ont à leur tour été converties en teneurs de P labile selon l'équation proposée par Sharpley et *al.* (1984) et intégrées à la base de données du modèle:

$$P \text{ labile} = 1.07 \times P\text{-Olsen} + 4.1 \quad (\text{mg kg}^{-1}) \text{ [4]}$$

Les teneurs initiales de P organique ont pour leur part été estimées à l'aide des taux de matière organique du sol, disponibles à l'échelle de la série de sol, et de ratios C : N et N : P de la matière organique du sol (MO), respectivement de 12,4 : 1 et 8 : 1 (Neitsch, 2002) :

$$\%C = \%MO / 1.724 \quad (\%) \text{ [5]}$$

$$\%N \text{ Total} = \%C / 12.4 \quad (\%) \text{ [6]}$$

$$\%P \text{ organique} = \%N \text{ Total} / 8 \quad (\%) \text{ [7]}$$

La représentation spatiale des teneurs de P labile à l'échelle du sous-bassin hydrographique a été supportée par une pondération des valeurs moyennes associées aux différentes municipalités québécoises en fonction de leurs superficies en culture respectives dans les différents sous-bassins. Par ailleurs, les teneurs en phosphore des URH en culture de maïs-grain ont été majorées de 50%, de façon à refléter les moyennes et les écarts-types des richesses en P généralement plus élevées dans les sols dédiés à cette culture, tel que rapporté par Tabi *et al.* (1990) dans le cadre de l'inventaire des problèmes de dégradation des sols du Québec. Pour la partie du bassin versant de la Rivière aux Brochets se situant aux États-Unis, aucune donnée relative aux pratiques agricoles n'est disponible. La richesse des sols en P labile pour ces sous-bassins a été fixée, par défaut, à 25 mg de P soluble kg^{-1} de sol pour les terres en culture (Cope et *al.*, 1981).

2.6 Itinéraires de gestion des sols et des cultures

La modélisation du cycle de l'eau et de la mobilité des sédiments et nutriments à l'échelle du parcellaire agricole requiert la description ainsi que la représentation spatiale et temporelle des itinéraires techniques de gestion des sols et des cultures, incluant le semis, la fertilisation, la récolte et le travail du sol. Ces itinéraires techniques comprennent également les pratiques, les dates, les quantités et le fractionnement des fertilisants appliqués. Un scénario de référence, regroupant les itinéraires de gestion constitués pour chacune des 2 409 URH agricoles du bassin versant, a été développé et utilisé pour le calage du modèle hydrologique. Les itinéraires du scénario de référence servent par la suite de balise pour évaluer l'influence des scénarios alternatifs de gestion du parcellaire sur le cycle de l'eau, la mobilité des sédiments et nutriments dans le bassin versant. Le choix de l'itinéraire concilie la volonté de représenter le plus fidèlement possible la réalité, les limitations du modèle, la finesse des données disponibles ainsi que le temps nécessaire à l'intégration de celles-ci sur un grand territoire. Les principes suivants ont été retenus dans la génération des itinéraires du scénario de référence sur les URH à vocation agricole du site d'étude:

- La distribution spatiale des cultures, dérivée de la classification de l'image satellite pour l'année 1999 (Cattaï, 2004) a été maintenue pour l'ensemble de la période de modélisation;
- La distribution spatiale des apports d'engrais de ferme et d'engrais minéraux, dérivés de la fiche d'enregistrement des exploitations agricoles (MAPAQ, 2000), a été générée à l'échelle des 99 sous-bassins hydrographiques et maintenue pour l'ensemble de la période de modélisation 2000-2003;
- Un scénario unique de travail du sol, basé sur la pratique conventionnelle de labour automnal et hersages printaniers, a été retenu pour l'ensemble des cultures annuelles;
- Les dates de semis, le travail du sol et les apports de fertilisants ont été modulés annuellement en fonction du type de culture, du calendrier probable de gestion du parcellaire et des précipitations observées pour la période 2000-2003. L'historique dressé dans les rapports de l'état des cultures du Québec (Financière agricole, 2000-2003) a permis, dans une certaine mesure, de valider les dates des semis et des récoltes. Compte tenu des pratiques généralement observées dans la région, la date la plus hâtive des épandages a été fixée à la dernière semaine d'avril. La date effective d'épandage modélisée est alors la première journée sans précipitation, elle-même précédée d'une période de 48 heures sans précipitation. De la même façon, une période de 48 heures sans précipitation a été fixée comme préalable à l'enfouissement de l'engrais de ferme par les hersages printaniers du sol. Le même critère de 48 heures sans précipitation a été appliqué aux itinéraires d'épandages estivaux et automnaux, de même que pour les délais d'incorporation à l'automne.

Le tableau 3 décrit les itinéraires techniques du scénario de référence propres à chaque classe de culture pour les quatre saisons de production de la période de simulation 2000-2003. La distribution inter-annuelle des précipitations occasionne une variabilité dans le calendrier des opérations culturales. Les conditions printanières humides de 2000 causent par exemple un délai de 16 jours entre l'épandage des engrais de ferme et l'incorporation par les travaux du sol, reportant les semis au-delà du 21 mai.

par le CRAAQ, les fractions minérales pour l'azote et le phosphore ont été respectivement fixées à 52% et 75%.

En ce qui a trait à la distribution temporelle des apports en engrais de ferme, un fractionnement des épandages en trois périodes a été appliqué à l'ensemble du parcellaire pour l'itinéraire technique de référence, soit : 45% des volumes épandus en pré semis, 36% en post levée et 19%, à l'automne. Ce fractionnement reflète les déclarations de la fiche d'enregistrement des exploitations agricoles (MAPAQ, 2003). Les apports d'automne sur le maïs ont été appliqués sur les sols ayant des conditions hydrologiques généralement favorables (groupes hydrologiques A, B et C). Tel que prescrit par les recommandations techniques de l'Ordre des agronomes du Québec (OAQ), seuls de faibles apports, représentant moins de 20% des apports totaux annuels, sont réalisés à l'automne. Pour les sols lourds, ces apports automnaux n'étant pas permis, ils ont plutôt été redistribués équitablement (moitié-moitié) entre les épandages pré et post semis. Les apports d'engrais minéraux azotés ont pour leur part été fractionnés en parts égales entre le pré-semis et la post-levée. L'engrais minéral phosphaté a été appliquée en une seule opération au semis. En absence de données pertinentes aux apports de nutriments sur le territoire américain du bassin versant, les valeurs moyennes des apports, estimés pour la portion amont du bassin territoire québécois, ont été appliquées à la portion du bassin se situant aux États Unis. Compte tenu des similitudes dans la vocation du territoire et les particularités du paysage, les taux d'apports relativement faibles associés à la portion amont du bassin en territoire québécois apparaissent réalistes pour la portion américaine du bassin.

2.8 Calage du modèle et validation

Le calage du modèle hydrologique vise l'optimisation de sa capacité prédictive en confrontant ses prédictions avec des mesures réelles acquises à l'exutoire de bassins versants de référence. Concrètement, la procédure consiste à exécuter des itérations du modèle en faisant varier les valeurs des paramètres de calage, de façon à ce que les résultats de la simulation représentent le plus fidèlement possible les observations colligées sur le terrain. Mis à part les données d'entrée pertinentes aux propriétés bio-physiques et aux itinéraires techniques de gestion du parcellaire, le modèle SWAT comprend une multitude de paramètres dont les valeurs peuvent être ajustées lors du processus de calage du modèle. Compte tenu de la complexité d'une telle opération, l'optimisation des paramètres de calage a été supportée par quatre utilitaires PERL (*Practical Extraction and Report Language*) développés par l'Université de Cranfield à Silsoe en Grande-Bretagne (White et al., 2002). Une interprétation critique des résultats de la modélisation, basée sur les observations rapportées dans la littérature scientifique québécoise et nord-américaine, a également été réalisée. Une attention particulière a été portée aux paramètres ayant été identifiés, dans la littérature, comme étant particulièrement sensibles. L'approche de calage du modèle a été réalisée en trois étapes : 1) l'hydrologie, 2) les processus d'érosion et de transport des sédiments, puis 3) la mobilité du phosphore.

Compte tenu du fort gradient dans la nature des paysages qui caractérisent le bassin versant de la Rivière aux Brochets de l'amont vers l'aval, le calage du modèle s'est appuyé sur un fractionnement du bassin en deux portions distinctes. La portion amont du bassin, associée au piedmont appalachien sur le plan géomorphologique, rassemble les sous-bassins localisés en amont de la ville de Bedford. La portion aval du bassin intègre les paysages des basses terres du Saint-Laurent, et inclut l'ensemble des sous-bassins tributaires de la Rivière aux Brochets en aval de Bedford. Les stations hydrométriques localisées sur la Rivière aux Brochets à la hauteur de Bedford (030420) et du pont couvert de Pike River (030424) ont successivement supporté le calage de l'hydrologie pour les portions amont et aval du bassin versant.

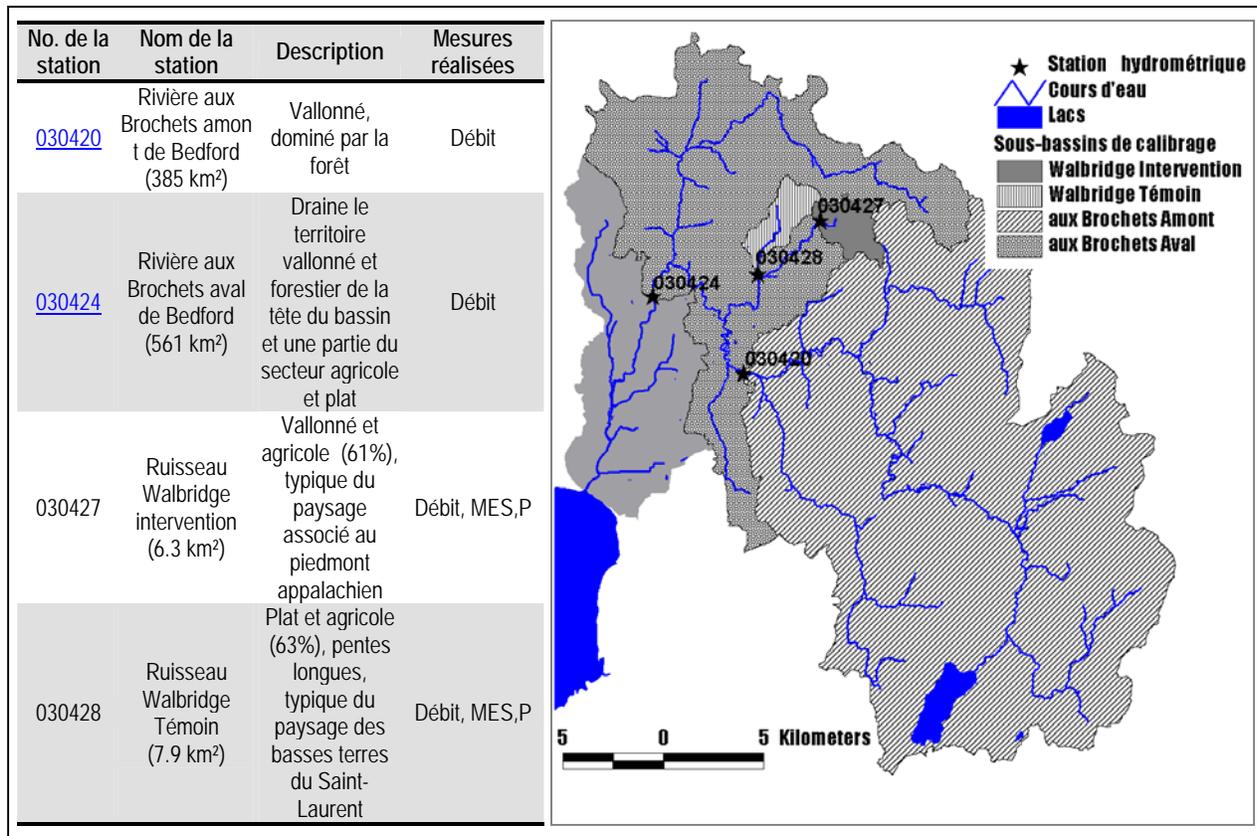


Figure 6 : Localisation des bassins versants expérimentaux Walbridge et des stations hydrométriques de la Rivière aux Brochets, à la base du calage et de la validation du modèle SWAT à l'échelle du bassin versant

Les bassins expérimentaux jumeaux *Intervention* et *Témoin* du Ruisseau Walbridge (Michaud et al., 2004a) ont pour leur part supporté le calage des composantes du modèle pertinentes à l'érosion et au transport du P. Malgré leur proximité, ces bassins se distinguent par leur activité hydrologique et leurs dynamiques d'exportation des sédiments et de phosphore. Ces distinctions ont servi de balises dans la différenciation des paramètres de calage du modèle hydrologique SWAT pour les portions amont et aval du bassin versant de la Rivière aux Brochets (Figure 6). Les suivis hydrométriques et de la qualité de l'eau aux exutoires des bassins témoignent en effet de volumes d'eau exportés et de flux (MES et P)

supérieurs en provenance du bassin versant *Témoin*. L'occupation du territoire et la gestion du parcellaire n'expliquent pas les différences observées dans les régimes d'exportation de sédiments et de phosphore des bassins jumeaux. Ces différences sont plutôt associées à la nature des sols et aux positions relatives des sous-bassins expérimentaux dans le paysage du bassin versant (Michaud et *al.*, 2004a). Le relief plat, la dominance de sols présentant un mauvais drainage de même qu'une position relativement plus basse du bassin *Témoin*, dont l'exutoire est localisé 13 m plus bas que le bassin *Intervention*, favorisent le maintien de la nappe d'eau plus près de la surface du sol. Ces propriétés rendent le parcellaire du bassin *Témoin* relativement plus sensible à la production de ruissellement et au transport de sédiments vers le ruisseau. Par contre, le relief ondulé du bassin *Intervention*, en position surélevée dans le paysage, favorise le développement de concentrations de pointe en MES et de P relativement plus élevées lors d'évènements hydrologiques comportant une forte composante de ruissellement.

Tableau 4 : Caractéristiques biophysiques, bilan hydrologique et exportations de sédiments et de phosphore des bassins versants expérimentaux du Ruisseau Walbridge utilisés en référence dans le calage du modèle hydrologique SWAT à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets.

	Ruisseau Walbridge	
	Témoin	Intervention
Utilisation du sol		
Superficie totale du bassin (ha)	794	631
Cultures annuelles (%)	49%	53%
Cultures pérennes (%)	14%	8%
Boisés (%)	28%	32%
Autre (%)	9%	7%
Bilan agronomique		
Bilan annuel d'apport de phosphore à la surface du sol (kg P ha ⁻¹ en culture) ¹	15	29
Bilan hydrique²		
Précipitations pluvieuse et neigeuse (mm)	1 520	1 520
Ruissellement (mm)	841	771
Flux exporté / superficie du bassin		
Matières en suspension (kg ha ⁻¹)	530	224
Phosphore total (kg ha ⁻¹)	1.33	1.06
Phosphore biodisponible (kg ha ⁻¹)	0.67	0.59
Ortho-phosphates (kg ha ⁻¹)	0.3	0.39
Phosphore total en solution (kg ha ⁻¹)	0.33	0.44

(1) Apports (Engrais de ferme + Engrais minéraux) – Prélèvements des cultures (saison 2002).

(2) Cumulatif pour la période de novembre 2001 à mai 2003 (567 jours)

Source : Michaud et *al.*, 2004a.

2.8.1 Hydrologie de surface

Dans une démarche de modélisation des transferts diffus de sédiments et de nutriments, l'ajustement des prédictions repose largement sur la reproduction de l'hydrologie du bassin. La reproduction des épisodes de ruissellement est particulièrement importante, puisque ces derniers contribuent à la plus grande portion des flux de sédiments et de phosphore exportés vers l'écosystème aquatique sous nos conditions climatiques (Michaud et *al.*, 2004b). Afin d'évaluer la performance de SWAT, les débits simulés par le modèle ont été comparés aux mesures enregistrées à quatre stations hydrométriques exploitées par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) sur les tronçons et tributaires de la Rivière aux Brochets (Figure 6). L'ensemble des stations hydrométriques sont équipées d'un limnimètre du type bulleur. Celui-ci traduit la pression mesurée par une sonde fixée dans le lit du cours d'eau en élévation du niveau de l'eau, à un intervalle de 15 minutes. Le débit, correspondant à la hauteur d'eau enregistrée, est obtenu par une relation hauteur-débit dérivée d'une courbe de tarage dressée à l'aide d'au moins 6 jaugeages annuels. Les débits journaliers sont calculés à l'aide de la moyenne des observations compilées aux quinze minutes, pour une journée commençant à minuit. Des corrections ont été appliquées aux données de débit afin de tenir compte des refoulements occasionnés par la présence de glace ou de macrophytes dans le lit du ruisseau ou de la rivière.

La calage hydrologique du modèle a été réalisé de l'amont vers l'aval en tenant compte du fort gradient dans la nature des paysages qui caractérisent le bassin versant de la Rivière aux Brochets. Dans un premier temps, afin d'assurer une correspondance entre les données de précipitations et de débits, les données journalières de débits des stations hydrométriques ont été recalculées à partir des mesures enregistrées aux 15 minutes. De cette façon, les débits correspondent aux plages journalières des données météorologiques, c'est-à-dire pour une journée commençant à 8h00 am. Les corrections pour les effets de glace ont été prises en compte lors de la reconstitution des débits journaliers. Outre l'ajustement des précipitations hivernales, discuté précédemment, plusieurs paramètres de calage ont été ajustés afin de reproduire le plus fidèlement possible les débits de la Rivière aux Brochets (Tableau 5). La surestimation des hauteurs de ruissellement engendrée par la méthode du numéro de courbe (SCS Engineering Division, 1986) a requis une réduction systématique des numéros de courbes de l'ordre de 20% par rapport aux valeurs recommandées dans la littérature (Neitsch et *al.*, 2002). De telles surestimations, attribuables à la méthode SCS, ont aussi été décrites par Perone et *al.* (1998) dans les basses terres du Saint-Laurent. Tolson et *al.* (2004) et Saleh et *al.* (2000) ont par ailleurs apportés des ajustements similaires aux numéros de courbe (CN2) dans leurs simulations à l'aide de SWAT.

Les caractéristiques de pente (longueur : SLSUBBSN et inclinaison : SLOPE) ainsi que les facteurs de compensation pour l'évapotranspiration (EPCO et ESCO) se sont avérés des paramètres sensibles dans l'ajustement des lames d'eau ruisselées prédites par le modèle SWAT pour le bassin versant de la Rivière aux Brochets. La répartition des écoulements de surface et souterrains s'est aussi montrée fort sensible

aux caractéristiques pédologiques des URH, notamment la profondeur des profils, la densité apparente et la conductivité hydraulique. Lenhart (2002) a d'ailleurs mis en relief la sensibilité du modèle SWAT à ces paramètres édaphiques. Dans le cadre de la présente modélisation, ces caractéristiques ont été ajustées lors du paramétrage des propriétés physiques du sol. La disponibilité de mesures réalisées selon un protocole unique dans le cadre de l'inventaire sur la dégradation des sols du Québec (Tabi et *al.*, 1990) a facilité l'ajustement du modèle hydrologique. Au niveau des écoulements souterrains, les paramètres influents sur le transfert d'eau entre les horizons du sol, l'aquifère peu profond et l'aquifère profond (ALPHA_BF, RCHRG DP, GW_DELAY, GWQMN et REVAPMN) se sont avérés déterminants pour l'ajustement du modèle aux débits observés en rivière. Lenhart et *al.* (2002), Tolson et *al.* (2004) et Spruill et *al.* (2000) ont aussi souligné la sensibilité des prédictions hydrologiques du modèle SWAT à ces paramètres de calage.

Tableau 5 : Paramètres ajustés lors du calage hydrologique de SWAT, accompagnés d'une brève description

Paramètre	Description	Échelle (fichier)	Valeur par défaut	Modification
CN 2	Numéro de courbe du SCS	URH (HRU)	SCS Engineering Division, 1986	Diminution de l'ordre de 20%
EPCO	Facteur de compensation de l'évapotranspiration pour le prélèvement des plantes	URH (HRU) ou Bassin (BSN)	1	0.3
ESCO	Facteur de compensation pour l'évaporation au sol	URH (HRU) ou Bassin (BSN)	0.95	0.9
SLSOIL	Longueur de pente pour l'écoulement souterrain (m)	URH (HRU)	SLSOIL= SLSUBBSN	30
SLSUBBSN	Longueur de pente moyenne (m)	URH (HRU)	90 m	50
SLOPE	Pente moyenne (m/m)	URH (HRU)	SLOPE du sous-bassin	Ajustée par requête spatiale à l'échelle du URH.
GW REVAP	Coefficient permettant le transfert d'eau de l'aquifère vers les horizons sus-jacents et non-saturés du sol	URH (GW)	De 0.02 à 0.20	0.02 (certaines restrictions)
REVAPMN	Hauteur d'eau minimale dans l'aquifère peu profond pour qu'il y ait un mouvement d'eau vers le sol (REVAP) ou l'aquifère profond	URH (GW)	—	125
RCHRG DP	Fraction de l'eau qui percole de la zone racinaire et qui atteint l'aquifère profond		0 à 1	0.25
GWQMN	Hauteur d'eau minimale pour qu'il y ait un transfert d'eau de l'aquifère peu profond vers le cours d'eau	URH (GW)	—	150
GW DELAY	Délai pour que l'eau souterraine qui transite par l'aquifère peu profond atteigne le cours d'eau (jours)	URH (GW)	—	30
ALPHA BF	Constante de récession de l'écoulement de base souterrain	URH (GW)	Lent: 0.1 - 0.3 Rapide : 0.9 - 1.0	0.3
CH K et CH K2	Conductivité hydraulique effective du cours d'eau principal (CH K2) et des tributaires (CH K)	Sous-bassins (RTE et SUB)	De 0.025 mm hr ⁻¹ (taux de pertes non-significatifs) à plus de 127 mm hr ⁻¹ (taux de pertes très élevés)	15 mm hr ⁻¹ (taux modéré)
CH N et CH N2	Coefficient de rugosité de Manning pour l'écoulement dans le cours d'eau principal (CH N2) et ses tributaires (CH N)	Sous-bassins (RTE)	De 0.025 (excavé, droit et uniforme) à 0.150 (naturel, encombré)	Cours d'eau agricoles excavés, non-entretenus = 0.055 ; Cours d'eau en forêt, naturels et avec quelques arbres, arbustes et roches = 0.060

2.8.2 Érosion et exportation de sédiments

Le calage des routines du modèle SWAT pertinentes à la mobilité des MES et du P a été supporté par les observations de qualité d'eau aux exutoires des bassins versants du Ruisseau Walbridge (Michaud et al., 2004). Entre 2000 et 2003, 166 échantillons ont été prélevés à l'exutoire des bassins versants expérimentaux du Ruisseau Walbridge. Les échantillons d'eau ont été conservés à une température de 4 degrés Celsius jusqu'à ce qu'ils soient analysés en laboratoire. Les matières en suspension ont été quantifiées par filtration (<0.45 µm). Les concentrations de P réactif soluble (RS), biodisponible et total ont été déterminées par colorimétrie automatique avec la formation d'un complexe jaune de phosphomolybdate réduit par l'acide ascorbique (Murphy et Riley, 1962), après avoir respectivement subit

une filtration ($<0.45 \mu\text{m}$), une extraction à 0.1 N NaOH (Sharpley et *al.*, 1991) et une minéralisation au persulfate. Les données ponctuelles de qualité de l'eau et les mesures continues du débit du Ruisseau ont permis la modélisation des charges de sédiments et de phosphore avec le support du logiciel Flux 5.0 (Walker, 1998). Ce logiciel traduit avec des équations de régression, pour trois strates de débit, la relation qui existe entre les concentrations ponctuelles observées dans le ruisseau et le débit du cours d'eau (C/Q). Les coefficients de variation des estimations de charges étaient compris à l'intérieur des limites acceptables pour les besoins de modélisation de petits tributaires (Walker, 1998). L'examen des résidus des régressions concentration/débit et charge/débit a démontré l'indépendance des résidus par rapport au débit, la date, la saison, la concentration et la charge. Aucune donnée aberrante n'a été détectée au niveau de probabilité de 5%.

De par leurs comportements hydrologiques contrastés, associés à leurs propriétés géomorphologies distinctes, les bassins expérimentaux Walbridge ont servi de balises dans la différenciation des paramètres de calage de SWAT associés aux exportations de P et MES, pour les portions amont et aval du bassin versant de la Rivière aux Brochets (Figure 6). Les phases terrestres et aquatiques du transport de sédiments et de nutriments ont été ajustées séparément. Les paramètres qui se sont avérés les plus sensibles dans le calage de ces deux phases de modélisation sont regroupés au tableau 6. Une fois l'assise hydrologique calibrée, les prédictions de MES et P exportés ont démontré une grande sensibilité aux paramètres de l'équation universelle modifiée de perte de sol (MUSLE), notamment les caractéristiques texturales et l'indice d'érodabilité du sol. Enfin, le coefficient de rugosité de Manning ainsi que le facteur d'ajustement des pointes d'exportation associées à l'intensité des pluies (APM) ont été ajustés afin de reproduire le plus fidèlement possible les dynamiques d'exportation des sédiments et des nutriments aux exutoires des bassins expérimentaux du Ruisseau Walbridge.

Au niveau de l'érosion du chenal, la méthode de Muskingum a été retenue pour évaluer la variation spatiale du débit dans le réseau hydrographique qui régit le transport des sédiments et des éléments nutritifs. Cette méthode permet de calculer l'amortissement d'une onde de crue, basée sur la résolution de l'équation de continuité pour un tronçon du cours d'eau, et sur l'hypothèse de la dépendance linéaire du volume d'eau dans le tronçon aux débits entrant et sortant pondérés. La méthode Muskingum fait appel aux caractéristiques physiques du lit de la rivière, dont : la section (considérée trapézoïdale avec des pentes de berges de 0.5%), la longueur et largeur du bief, et la pente de la ligne d'énergie. Les paramètres de calage associés à cette méthode ont été fixés par le biais de simulations successives. Tel que soulevé par la littérature (Neitsch et *al.*, 2002; Tolson et *al.*, 2004), les facteurs d'érodabilité et de couverture végétale du réseau hydrographique se sont avérés forts sensibles lors du calage des exportations de la phase aquatique du modèle. Cependant, nous ne disposons que de très peu de données sur les dynamiques de déposition/resuspension en conditions climatiques applicables au secteur d'étude. Wang et *al.* (1999) ont cependant quantifié les processus de rétention à l'œuvre dans un tributaire du Lac Champlain, pour établir que ces derniers équivalaient aux charges annuelles exportées.

Un bilan hydro-dynamique relativement équilibré milite pour une contribution nette marginale de sédiments en provenance du réseau hydrographique. Hypothétiquement, il a ainsi été estimé que l'érosion du réseau hydrographique comptait pour moins de 20% de la charge sédimentaire exportée. L'ajustement final des dynamiques d'exportation a été complété par le biais de facteurs régissant la capacité de prise en charge des sédiments par le cours d'eau (SPCON, SPEXP et PRF).

Tableau 6 : Paramètres ajustés lors du calage des exportations des sédiments et de phosphore, accompagnés d'une brève description.

Paramètre	Description	Échelle (fichier)	Valeur par défaut	Modification
USLE K	Facteur d'érodabilité des sols	URH (HRU)	Variable	Tiré de Bernard (1996) ou évalué à l'aide nomographe de Wischmeier (Wischmeier, 1971) puis convertis en unités américaines (Foster et al., 1981).
USLE C	Facteur de couverture des sols	URH (HRU)	Variable	Valeurs par défaut
CFRG	Facteur de fragment rocheux	URH (sol)	Variable	0
OV N	Coefficient de rugosité de Manning des champs	URH (HRU)	Engman, 1983	Céréales, Maïs et soja en travail conventionnel =0.12 ; Prairies =0.35; Forêt=0.70
FILTERW	Largeur de la bande riveraine (m)	URH (HRU)	0 m	1 m
CH EROD	Facteur d'érodabilité du cours d'eau	Sous-bassins (RTE)	0 (aucune érosion) à 1 (peu résistant à l'érosion)	0.01
CH COV	Facteur de couverture végétative	Sous-bassins (RTE)	0 (protection végétale complète) à 1 (aucune couverture)	0.05
SPCON	Paramètre linéaire ayant un effet multiplicatif sur la quantité max. de sédiments pouvant être transportés dans le cours d'eau	Bassin (BSN)	0.001	0.010
SPEXP	Paramètre ayant un effet exponentiel sur la quantité max. de sédiments pouvant être transportés dans le cours d'eau	Bassin (BSN)	1.0	1.5
APM	Facteur d'ajustement associé à l'intensité des pluies et affectant les pics d'exportation	Bassin (BSN)	1.0	0.9
PRF	Facteur d'ajustement des pics d'exportation dans le cours d'eau	Bassin (BSN)	1.0	2
ERORGP	Coefficient d'enrichissement des sédiments en P	URH (HRU)	Calculé pour chaque événement (Menzel, 1980)	1.7
PSP	Facteur de disponibilité du P	Bassin (BSN)	0.4	0.4
PHOSKD	Coefficient ajustant la fraction de P soluble transporté par le ruissellement.	Bassin (BSN)	175	200

Au niveau de la réactivité et des formes de P simulées, plusieurs paramètres se sont avérés déterminants lors du calage du modèle, soit le facteur d'enrichissement des sédiments en P (*ERORGP*), le facteur de disponibilité du P (*PSP*) et le facteur de fractionnement du phosphore contenu dans la première couche de sol qui contribue à l'enrichissement du ruissellement en P soluble (*PHOSKD*). Une attention particulière a aussi été portée à l'ajustement de la richesse des sols et aux opérations de travail du sol, notamment l'efficacité de mixage et la profondeur du travail, de même qu'à la fraction des nutriments

appliqués dans la couche superficielle du sol (10 mm) lors des opérations de fertilisation. En contrôlant la distribution du phosphore dans la couche arable du sol, les paramètres de régie déterminent en grande partie le stock de P disponible à l'exportation via le ruissellement. Les valeurs retenues pour les différents paramètres de calage hydrologique pour les portions aval et amont du bassin versant de la Rivière aux Brochets sont présentées à l'annexe C.

2.8.3 Critères d'évaluation

La performance du modèle a été évaluée à l'aide de trois indices statistiques et de l'appréciation visuelle des hydrogrammes journaliers et des séries mensuelles de MES et de P prédits et mesurés. Le coefficient de corrélation de Pearson (r) témoigne de la corrélation linéaire simple entre les valeurs mesurées et prédites et est défini par l'équation suivante :

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \mu_{Q_i}) - (Q'_i - \mu_{Q'_i})}{\sigma_x * \sigma_y} \quad (--) [8]$$

où Q_i est la valeur journalière mesurée, Q'_i correspond à la prédiction simulée par SWAT, μ représente la valeur moyenne mesurée ou simulée, σ est l'écart-type des valeurs mesurées ou simulées et n symbolise le nombre d'observations journalières. Les valeurs de r varient entre -1 et 1. Une valeur de -1 indique une relation inverse forte alors qu'une valeur de 1 signale une forte relation dans le même sens.

Le coefficient de Nash Sutcliffe (NS) témoigne de l'ajustement des pics des séries chronologiques mesurées et prédites selon l'équation suivante :

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (--) [9]$$

où Q_i est la valeur journalière mesurée, Q'_i correspond à la valeur journalière simulée par SWAT, \bar{Q} représente la moyenne mesurée pour la période de simulation et n symbolise le nombre d'observations comparées. Les valeurs de NS varient entre l'infini négatif et 1, où 1 témoigne d'un ajustement parfait du modèle.

Le troisième critère retenu pour apprécier la qualité des résultats de simulation est la déviation des valeurs prédites (D_v). Cet indicateur témoigne de la capacité du modèle à reproduire les volumes d'eau, de MES ou de P qui ont transité dans le réseau hydrographique pendant la période de référence selon l'équation suivante :

$$D_v = \frac{V^* - V}{V} * 100 \quad (\text{mm}) [10]$$

où V correspond au flux mesuré et s'écoulant à un point défini du réseau hydrographique alors que V^* représente le flux simulé par le modèle au cours pendant la même période.

La performance du modèle SWAT a été évaluée sur des périodes distinctes de calage et de validation. Lors du calage du modèle, les écarts entre les flux observés et simulés sont alors minimisés au moyen d'un ajustement des paramètres du modèle. Au cours de la période subséquente, dédiée à la validation, l'ajustement du modèle calibré est évalué à l'aide de nouvelles conditions climatiques.

2.9 Modélisation des scénarios agroenvironnementaux

La modélisation de l'influence de différents scénarios de pratiques et d'aménagements de conservation (PAAC) sur le bilan hydrique et l'exportation de sédiments et de phosphore a été réalisée à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets pour la période d'étude 2000-2003. L'approche retenue dans la modélisation des scénarios agroenvironnementaux a consisté à substituer les itinéraires techniques de gestion des sols et des cultures du scénario de référence par de nouveaux itinéraires propres à l'implantation des PAAC. Les mêmes périodes, variables climatiques, descripteurs physiographiques et paramètres de calage utilisés pour le scénario de référence ont donc été utilisés pour modéliser l'influence des différents scénarios agroenvironnementaux. Une période commune de modélisation pour les scénarios de référence et d'intervention permet ainsi de comparer l'influence relative des PAAC sur les exportations diffuses de sédiments et de nutriments selon différentes échelles spatiales, de l'URH individuelle à l'ensemble du bassin versant, de même qu'à différentes échelles temporelles, du pas de temps journalier à pluriannuel.

2.9.1 Approche conceptuelle

Le principal critère ayant servi au choix des PAAC intégrés aux différents scénarios agroenvironnementaux modélisés est leur faisabilité technico-économique. Quatre types de PAAC ont fait l'objet de simulations hydrologiques touchant à différents aspects du système de production, soit : 1) à la rotation des cultures, 2) au travail du sol, 3) au mode de gestion des engrais de ferme et 4) à l'aménagement hydro-agricole. De façon générale, la faisabilité de ces PAAC a été documentée au Québec dans le cadre de recherches en parcelles ou en réseaux d'essais à la ferme. Leurs influences sur le cycle de l'eau et la mobilité des sédiments et du phosphore ont d'abord été modélisées sur une base individuelle. Pour chaque type d'intervention, l'effet sur le bilan des exportations a été modélisé selon des niveaux croissants d'implantation des PAAC, soit 10%, 50% et 100% des superficies en cultures annuelles. Dans le but d'évaluer l'effet d'un ciblage des zones du parcellaire les plus vulnérables, la modélisation associée à une attribution aléatoire des PAAC aux différentes URH du bassin

a été comparée à une attribution ciblée sur les URH démontrant les taux d'exportation de P les plus élevés dans le scénario de référence. Cette approche permet ainsi de comparer les influences relatives des différentes PAAC sur l'hydrologie et les flux de sédiments et de P, dans un contexte opérationnel où leur implantation est ciblée ou aléatoire.

À partir des résultats associés à la simulation des PAAC individuelles, des scénarios mixtes, cumulant l'implantation de différents types de PAAC, ont été modélisés. Différentes combinaisons de sélection et de ciblage spatial des PAAC ont ainsi été appliquées afin d'atteindre une réduction des exportations diffuses de P de l'ordre de 41%.

2.9.2 Modalités d'épandage des engrais de ferme

Les capacités de modélisation journalière de SWAT ont d'abord été mises à profit pour quantifier l'effet de différentes périodes d'épandage et de délais d'incorporation des engrais de ferme sur le bilan des exportations de P. Les quantités des apports organiques et minéraux ont été maintenues dans l'ensemble des scénarios. Celles-ci sont extraites de la fiche d'enregistrement du MAPAQ et reflètent les pratiques et les pressions inhérentes aux systèmes de productions actuels dans le bassin. La modélisation de scénarios alternatifs de gestion des engrais de ferme s'est d'abord centrée sur l'influence des délais d'incorporation à l'épandage. Un premier scénario agroenvironnemental de gestion des engrais de ferme a ramené les délais d'incorporation du scénario de référence à moins de 24 heures pour l'ensemble des apports sur les cultures annuelles. La comparaison des résultats de cette modélisation avec celle du scénario de base, comportant des délais variables d'incorporation ajustés au calendrier des précipitations, permet alors de déduire l'effet net d'une optimisation des délais d'incorporation des engrais de ferme.

Des ajustements subséquents aux périodes d'épandage des engrais de ferme ont cependant été requis dans la formulation des itinéraires techniques liés aux cultures de couverture et aux façons culturales réduites. L'optimisation des délais d'incorporation (<24 h) a été systématiquement maintenue dans les itinéraires techniques propres à ces PAAC.

2.9.3 Cultures de couverture

Les scénarios de systèmes culturaux alternatifs sont basés sur une conversion des cultures annuelles en cultures de fourrages pérennes ou en céréales à paille comportant une culture de couverture associée ou à la dérobée. Typiquement, pour le scénario de couverture associée, le modèle simule la croissance d'une légumineuse fourragère intercalaire (trèfle rouge ou luzerne) implantée dans une culture de céréale à paille. Pour le scénario de culture de couverture à la dérobée, le modèle simule la croissance d'une crucifère implantée suite à la récolte d'une céréale à paille. Parallèlement à l'ajustement des paramètres

de croissance des plantes, les itinéraires techniques introduits dans SWAT ont été ajustés pour tenir compte d'une nouvelle régie des épandages d'engrais de ferme. Alors que le scénario de référence épand 45% des volumes d'engrais de ferme au printemps, 36% en post-levée et 19% à l'automne, l'épandage du scénario de culture de couverture à la dérobée est plutôt centré sur une application estivale, précédant l'implantation de la crucifère. Pour le scénario de culture associée, l'épandage est réalisé au printemps, précédant l'enfouissement de la culture de couverture. Pour la prairie, la pratique d'épandage du scénario de référence est maintenue, soit une répartition en trois périodes, suivant les coupes de foin.

Pour les fins de la modélisation hydrologique, le remplacement d'une culture annuelle par une prairie implique la substitution des itinéraires techniques et des paramètres de calage du modèle associés à la culture pérenne. En ce qui a trait à l'implantation d'une céréale avec culture de couverture associée ou à la dérobée, la modélisation implique la prise en compte de la croissance de la légumineuse fourragère ou de la crucifère. Les itinéraires techniques ont donc été ajustés de façon à simuler les opérations culturales propres à chaque culture. Les paramètres de croissance des cultures de couverture ont par ailleurs été ajustés de façon à refléter les biomasses documentées pour le Québec (Institut de la statistique du Québec, 2002; Côté et al., 1994). Le modèle simule ainsi le prélèvement des nutriments et de l'eau du sol par la culture de couverture, la protection du sol au fil de sa croissance, de même que la décomposition des résidus après la mortalité automnale de la crucifère. Globalement, la modélisation des effets de la conversion des cultures annuelles sur le bilan hydrique et la mobilité des sédiments et du P est la résultante de plusieurs modifications de l'état du sol, incluant sa rugosité, sa protection par la couverture végétale ou de résidus, son humidité et son cyclage des nutriments.

2.9.4 Cultures sur résidus

Trois pratiques de culture sur résidus ont été retenues et appliquées aux différentes cultures annuelles, en tenant compte du type de sol, soit :

- Le travail réduit du sol comportant un déchaumage primaire à l'automne (DA);
- Le travail réduit du sol comportant un déchaumage printanier (DP);
- Le semis direct, comportant aucun travail du sol autre que l'enfouissement de l'engrais de ferme en post-levée (SD).

Afin de tenir compte de la faisabilité réduite de la culture sur résidus dans les sols présentant un mauvais drainage, les pratiques culturales ont été attribuées en fonction des classes de culture et des groupes hydrologiques. Pour les céréales à paille et le maïs, le semis direct a été attribué aux sols des groupes hydrologiques A et B, alors que le déchaumage de printemps et d'automne ont été respectivement attribués aux groupes C et D. Pour le soja, la faisabilité du semis direct a d'abord été admise pour

l'ensemble de la superficie en culture. Les modélisations préliminaires ont cependant démontré une efficacité marginale d'une transition au semis direct du soja à réduire les flux de P totaux sur les sols des groupes hydrologiques C et D. Le déchaumage printanier ou automnal, similaire aux itinéraires techniques en culture de maïs ou de céréales, a donc été retenu pour le scénario de culture sur résidus pour le soja.

Compte tenu de la mobilité accrue des sources de phosphore laissées en surface du sol, la régie des épandages des engrais de ferme a été adaptée aux différentes pratiques culturales de conservation. Pour l'ensemble des scénarios de cultures sur résidus, le délai d'incorporation des engrais de ferme est optimisé (<24 h). En semis direct du maïs, l'ensemble des épandages a été déplacé en post-levée des cultures et comporte un enfouissement superficiel, simulant l'effet des jeux de coutres et de disques associés aux rampes d'épandage basse pression. En pratique de déchaumage automnal, la régie des épandages associée au scénario de référence est maintenue. En pratique de déchaumage printanier, les applications automnales associées au scénario de référence sont rapportées au printemps, précédant le déchaumage, et à l'été, en post-levée de la culture. Pour les céréales à paille en semis direct, l'épandage se limite aux applications printanières, en simulant un enfouissement superficiel par rampe basse pression.

La simulation de différentes pratiques culturales a impliqué l'ajustement de différents paramètres de SWAT. Sur le plan des itinéraires techniques, le choix de nouveaux outils de travail du sol impliquent des changements dans la profondeur et le coefficient de mixage de la couche de sol travaillée, ce qui affecte la distribution du P dans la couche arable. Les coefficients de rugosité du sol ont aussi été ajustés, reflétant l'état des surfaces non labourées et la présence de résidus. Enfin, le modèle actualise les indices de ruissellement (no. courbe CN) et le facteur de couverture (facteur C de MUSLE) en fonction de la croissance des plantes, à partir d'indices initiaux représentatifs des états de surface. Globalement, les résultats de la modélisation des scénarios de pratiques culturales de conservation reflètent l'influence mécanique de la rugosité de surface sur l'interception, l'infiltration et le ruissellement, de même que l'effet d'une redistribution du P dans la couche arable et de son influence sur le bilan terrestre du P.

2.9.5 Aménagements hydro-agricoles

La simulation de l'effet des aménagements hydro-agricoles à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets a été supportée de façon totalement empirique par l'utilisation de coefficients d'efficacité de piégeage (CEP) sur les exportations en provenance des différentes URH du bassin ciblées par l'intervention. L'attribution d'une efficacité de piégeage à une URH donnée a pour effet d'atténuer la proportion de l'exportation journalière de sédiments ou de phosphore modélisée à l'échelle de l'URH et qui sera transmise à la composante hydrodynamique du modèle, dans le réseau hydrographique. Compte tenu de l'architecture spatiale du modèle, l'efficacité de piégeage peut être modulée en fonction

d'un type d'aménagement hydro-agricole, d'une classe de culture, d'un sous-bassin ciblé ou de la nature des sols. La principale difficulté associée à cette approche est de documenter l'efficacité de piégeage des aménagements dans le contexte agroclimatique propre au bassin versant.

À défaut de références techniques pertinentes aux CEP adaptés aux conditions très particulières de l'aménagement des terres et du climat québécois, les efficacités de piégeage retenues reflètent essentiellement les tendances documentées pour la qualité de l'eau à l'exutoire du bassin versant expérimental du Ruisseau au Castor (Michaud et *al.*, 2005) et correspondent à l'efficacité des bandes riveraines arbustives et des *fossés-avaloirs* implantés dans ce bassin. Dans le cadre de cette étude, le suivi de qualité de l'eau du bassin versant, localisé dans la portion aval de la Rivière aux Brochets, a démontré une réduction moyenne de 25% de la concentration en phosphore total lors des crues du ruisseau. Cette réduction a été attribuée à l'aménagement de la portion du parcellaire la plus active au plan hydrologique, en position basse du relief. Conceptuellement, le piégeage des sédiments et du phosphore attribué à l'aménagement du bassin versant du Ruisseau au Castor est tributaire de la bande riveraine arbustive aménagée le long du tronçon principal et des fossés-avaloirs qui interceptent le ruissellement avant son entrée dans le cours d'eau. Dans une perspective opérationnelle, il est pertinent de distinguer les efficacités de piégeage respectives de la bande riveraine et du fossé-avaloir. Ces contributions sont non seulement tributaires de leur effet respectif sur la lame d'eau ruissellée, mais aussi des proportions relatives du parcellaire en culture qui s'égouttent vers la bande ou vers le fossé-avaloir. La modélisation haute précision des cheminements hydrologiques de surface réalisée dans le bassin versant expérimental du Ruisseau Walbridge (6 km²) (Duguet et *al.*, 2002; Michaud et *al.*, 2004), a permis d'établir que 33% du parcellaire en culture de ce petit bassin se draine vers les talus du cours d'eau, alors que la majeure partie (67%) s'égoutte vers les fossés de drainage. Sur cette base, le coefficient d'efficacité de piégeage global, estimé à 25% à l'échelle du bassin versant, peut être fractionné en deux composantes, soit des CEP de 9% et 16% pour les bandes riveraines aménagées en bordure du cours d'eau et les fossés-avaloirs respectivement. Une telle répartition implique un CEP de 30% pour la bande riveraine aménagée, en considérant une superficie contributive correspondant à 33% du parcellaire. Compte tenu d'un ratio moyen, de l'ordre de 28:1 des superficies contributives par rapport aux superficies en bande riveraine de (largeur de 3 m), estimé pour la portion drainée au cours d'eau (Michaud et *al.*, 2004), une efficacité de piégeage de 30% est dans l'ordre des performances généralement admises dans la littérature pour un ratio similaire des superficies contributives (Lawrance et *al.*, 2002). En ce qui a trait à l'efficacité de piégeage des fossés-avaloirs, de l'ordre de 16%, très peu d'observations rapportées dans la littérature permettent de valider cette hypothèse. Dans des conditions expérimentales présentant certaines similitudes avec les dispositifs mis en place dans le bassin du Ruisseau au Castor, Jarrett (2001) attribue une efficacité de piégeage des sédiments de l'ordre de 68% en période de crue à un avaloir surélevé présentant une hauteur de retenue d'eau permanente de 15 cm et une durée de rétention de six heures. Dans des conditions expérimentales, Edwards et *al.* (1999) ont évalué l'efficacité moyenne d'un bassin de sédimentation de 50 m³, avec des temps de rétention variant entre 24 et 60 heures, à 94%

de réduction des sédiments, 76% d'azote et 52% du phosphore. Compte tenu que l'aménagement de fossés-avaloirs dans le bassin versant du Ruisseau au Castor a été réservé à la portion non-drainée du parcellaire en position basse du relief, soit un peu plus du tiers de la superficie en culture, une efficacité globale de piégeage de 16% pour l'ensemble du parcellaire apparaît conservatrice.

Dans le cadre de la présente modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets, la simulation de l'effet d'aménagements hydro-agricoles sur la mobilité des sédiments et du phosphore a été modulée en fonction du type d'aménagement (bande riveraine avec/sans structures de captage) et d'un ciblage spatial établi en fonction de la vulnérabilité des URH aux exportations de P simulées dans le scénario de référence. L'efficacité de piégeage n'a été attribuée qu'à la fraction particulaire du phosphore exporté des superficies en cultures annuelles, à un taux de 9% pour la seule implantation d'une bande riveraine de 3 m aux abords des cours d'eau réglementés et à un taux de 25% pour un aménagement combinant les bandes riveraines et l'aménagement de structures de captage pour la portion non drainée du parcellaire. Lors de leur intégration aux scénarios agroenvironnementaux, les coefficients de piégeage ont été appliqués à posteriori aux charges modélisées pour chaque URH, peu importe l'itinéraire technique considéré. Cette approche permet ainsi de tenir compte de l'effet cumulatif de l'aménagement hydro-agricole et des pratiques agricoles de conservation sur le bilan des exportations de l'URH.

2.9.6 Scénarios mixtes

La modélisation hydrologique de scénarios agroenvironnementaux mixtes implique l'intégration de différents types de PAAC et de leur application à des portions variables et ciblées du parcellaire en culture. La procédure utilisée met à profit la structure spatiale du modèle SWAT qui permet de combiner différents itinéraires techniques de gestion du parcellaire et de les associer aux URH désirées. La stratégie à la base de la sélection et de la distribution spatiale des PAAC des scénarios mixtes modélisés dans le cadre de la présente a été guidée par trois critères :

- Globalement, une réduction annuelle moyenne de 41% du flux de phosphore total est ciblée à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets, telle qu'établie dans l'entente Québec/Vermont sur la réduction des flux de P vers la Baie Missisquoi (Gouvernements du Québec et de l'état du Vermont, 2002).
- Une priorité est accordée à la simulation de PAAC dans les portions du parcellaire les plus vulnérables aux exportations. La conception des scénarios agroenvironnementaux mixtes met ainsi à profit la représentation spatiale du cycle de l'eau et des flux des nutriments à l'échelle de l'URH. Le flux annuel moyen en P total, établi à l'échelle de l'URH dans le scénario de référence, est alors utilisé comme critère de ciblage pour l'application des PAAC. Un statut prioritaire a aussi été assigné aux plaines inondables bordant le tronçon principal de la Rivière aux Brochets.

Compte tenu des limitations du modèle SWAT à simuler la représentation spatiale de ce phénomène, la cartographie des plaines inondables réalisées par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ, 2005) a été utilisée pour identifier les URH incluses dans la zone inondable de grands courants à récurrence 0-20 ans.

- La distribution spatiale des PAAC ciblées dans les scénarios mixtes tient aussi compte des contraintes technico-économiques associées à l'implantation des pratiques et ouvrages de conservation des sols et de l'eau. Conceptuellement, les PAAC présentant le moins de contraintes voient leur implantation généralisée à l'échelle du bassin versant, alors que les PAAC présentant le plus de contraintes sont réservées aux URH ou aux sous-bassins qui présentent un degré de vulnérabilité élevé face aux exportations de P. Le classement suivant des PAAC, en ordre croissant de leurs contraintes technico-économiques, a servi de balise dans la conception des scénarios mixtes de simulation:

1. Optimisation des délais d'incorporation des engrais de ferme;
2. Implantation de bandes riveraines;
3. Transition à la culture sur résidus;
4. Conversion de superficies en cultures annuelles en cultures de couverture (associée, dérobée ou prairie);
5. Implantation d'ouvrages de contrôle du ruissellement.

Le ciblage spatial des URH les plus vulnérables et la sélection de PAAC selon leur niveau de contraintes technico-économiques permet de produire une infinité de combinaisons URH/PAAC à l'échelle du bassin versant. De façon à générer des scénarios réalistes qui minimisent les contraintes et optimisent les retombées environnementales, une approche progressive a été retenue dans la sélection et le ciblage des PAAC.

- Le premier type de scénarios implique la protection des plaines inondables et l'application généralisée des PAAC qui présentent le moins de contraintes technico-économiques, soit l'implantation des bandes riveraines et l'optimisation des délais d'incorporation des engrais de ferme.
- Le deuxième type de scénarios fait intervenir l'implantation de pratiques culturales de conservation, incluant la culture sur résidus et les cultures de couverture, sans toutefois affecter la rotation des cultures principales.

- Le troisième type de scénarios implique la conversion des superficies en cultures annuelles les plus vulnérables en céréales à paille comportant une culture de couverture associée ou à la dérobée.

Enfin, l'aménagement de structures de contrôle du ruissellement est simulé, pour les trois types de scénarios, pour les sous-bassins aval de la rivière présentant un degré relativement élevé d'activité hydrologique de surface en raison de la nature des sols et de la dominance des cultures annuelles.

Bien que la présente étude ne supporte pas une analyse des implications économiques des scénarios agroenvironnementaux simulés, il est estimé qu'une approche progressive dans l'élaboration des scénarios agroenvironnementaux, qui prend en compte la vulnérabilité du parcellaire et les contraintes liées à l'implantation des PAAC, permet d'optimiser le rapport coût/bénéfice des interventions agroenvironnementales destinées à rencontrer les objectifs de réduction de flux diffus de P vers la Baie Missisquoi.

3.0 Résultats et discussion

La présentation et la discussion des résultats de la modélisation hydrologique sont abordées en deux étapes. Dans un premier temps, les résultats de la modélisation pour le scénario de référence fait l'objet d'une présentation détaillée. Suivant la présentation de la simulation du cycle terrestre du phosphore, les résultats de la modélisation relative au bilan hydrique, à l'érosion et aux flux de P vers l'écosystème aquatique sont présentés séparément. En deuxième étape, l'influence des scénarios agroenvironnementaux sur l'ensemble des processus de mobilisation et de transport des sédiments et du phosphore est discutée.

3.1 Cycle terrestre du phosphore

Conceptuellement, le modèle hydrologique SWAT actualise de façon journalière le bilan de masse du phosphore à l'échelle de chacune des URH du bassin versant. Les teneurs des différents pools organiques et minéraux du phosphore servent alors de base aux calculs de l'enrichissement en P du ruissellement et des sédiments lors des précipitations ou de la fonte de neige qui entraînent une réponse hydrologique du parcellaire. Les processus inhérents aux cycles terrestres du P modélisés par SWAT incluent le prélèvement par les plantes, la minéralisation des apports organiques, des résidus de culture et de l'humus, de même que les échanges entre les pools de P labile, modérément labile (actif) et peu labile du sol (stable).

3.1.1 Richesse des sols en P

Au départ, les routines simulant les cycles terrestres du P sont initialisées à partir des teneurs en P labile du sol et du taux de matière organique. Le tableau 7 exprime la variabilité des teneurs en P des sols du

bassin versant à l'échelle de la municipalité, soit la référence spatiale utilisée pour représenter les taux originaux de P du sol. La distribution des observations met en relief un gradient spatial du stock terrestre de P favorisant les secteurs amont du bassin, alors que les municipalités de Rainville et de Sainte-Ignace-de-Stanbridge se distinguent, avec des pourcentages moyens de saturation des sols (P /Al Mehlich-III) s'approchant de 15%. Globalement, la distribution des teneurs en P indiquent qu'environ 33% du parcellaire qui a fait l'objet d'un dosage en P au cours de la période 1995-2000 a atteint le seuil de vulnérabilité 10% de saturation en P, alors que 8% du parcellaire aurait atteint le seuil critique de 20% de saturation en P. Cette distribution s'apparente aux taux de saturation des sols en P rapportés pour la région de la Montérégie (Beaudet et *al.*, 2003).

Tableau 7 : Valeurs médianes, moyennes et écart-types de la saturation en P (P /Al Mehlich-III) des sols en culture des municipalités incluses dans le bassin de la Rivière aux Brochets

Municipalités	Saturation des sols en P %			
	N ¹	Médiane	Moyenne	ET ²
Bedford/Canton de Bedford	83	8.8	11.9	21.0
Dunham	212	4.2	6.3	6.2
Frelighsburg	57	4.0	6.0	5.4
Paroisse de Notre-Dame-de-Stanbridge	88	7.4	10.5	9.0
Rainville	68	14.2	14.5	8.1
Saint-Alexandre	214	9.0	10.2	6.2
Saint-Amrand	134	6.2	7.0	5.7
Sainte-Brigide-d'Iberville	86	7.0	8.7	6.3
Sainte-Ignace-de-Stanbridge	131	11.8	14.1	10.8
Sainte-Sabine	55	6.8	8.3	6.2
Saint-Pierre-de-Véronne-à-Pike-River	103	7.3	8.5	5.6
Saint-Sébastien	45	9.5	10.6	6.7
Stanbridge East	27	7.7	8.3	5.6
Stanbridge Station	25	6.7	7.8	7.5

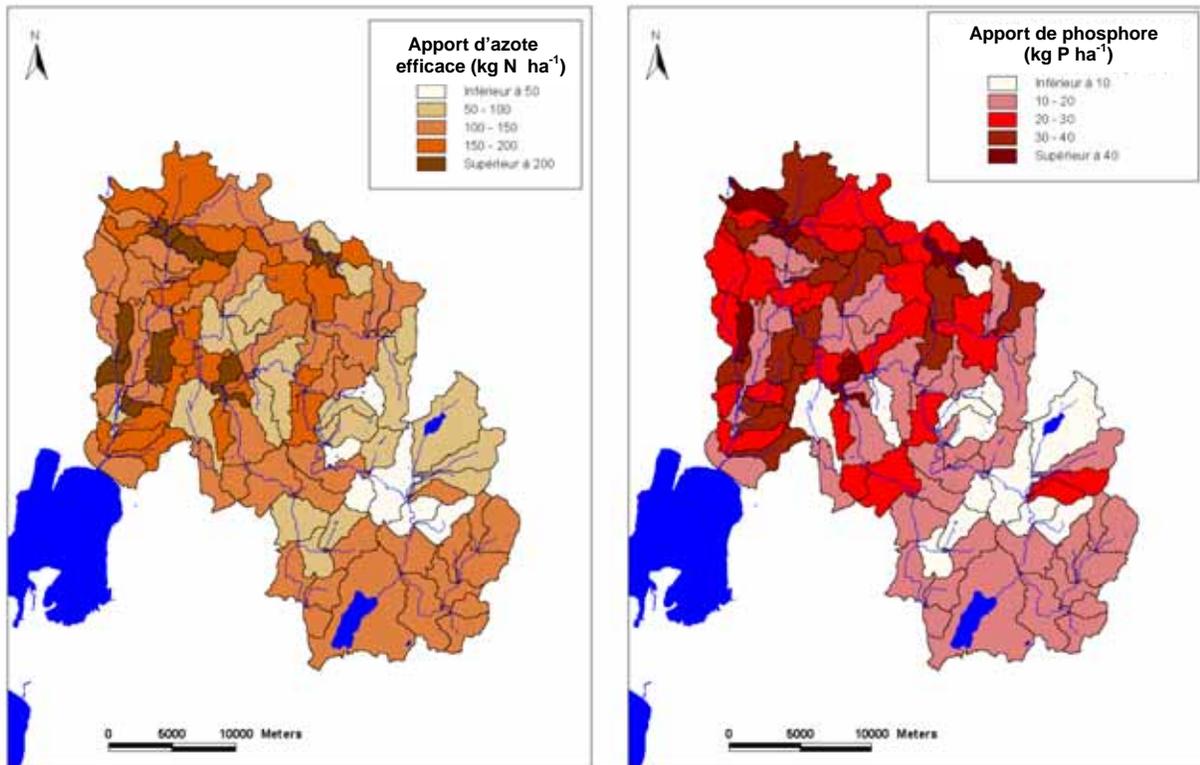
¹ Nombre d'échantillon de sol; ² Écart-type

3.1.2 Apports de fertilisants

Bien que la présente étude cible la modélisation des flux de P des terres et des eaux de surface du bassin versant, la modélisation du cycle terrestre de l'azote est requise dans le calcul des taux de minéralisation des formes organiques du P. Le modèle intègre en effet le rapport des teneurs C :N :P du sol dans ses routines de minéralisation du P contenu dans les résidus de culture et l'humus du sol. De plus, les apports d'azote sont rapportés à titre indicatif. Globalement, près de 65% des apports de P proviennent de l'épandage d'engrais de ferme et correspondent, sur une base massique, aux exportations théoriques des cultures. Le bassin présente cependant un fort gradient dans les apports spécifiques (kg ha⁻¹) de nutriments qui reflètent en grande partie le patron spatial de la densité des élevages. Deslandes et *al.* (2002) ont démontré que la distribution spatiale des apports de P était corrélée avec le taux de saturation

des sols en P. Conceptuellement, cette corrélation indique que le patron spatial actuel de la richesse du sol en P reflète les apports historiques de phosphore sur le parcellaire agricole. Comme nous le verrons plus tard, ce gradient spatial dans les apports et l'enrichissement du sol en P aura une influence sur les concentrations de P dans le ruissellement, particulièrement sur la fraction soluble, telles que modélisées par les routines hydrologiques de SWAT.

Figure 7 : Distribution spatiale des apports annuels moyens d'azote (a) et de phosphore (b) à l'échelle des 99 sous-bassins versants de la Rivière aux Brochets pour la période d'étude 2000-2003.



Le tableau 8 exprime le bilan de masse global du phosphore modélisé pour l'ensemble du parcellaire agricole du bassin versant de la Rivière aux Brochets. Pour chaque classe de culture, les composantes du bilan du phosphore sont exprimées sur une base massique. Ceci met en relief le poids relatif de chaque culture par rapport au bilan global du bassin. Sur une base spécifique, le tableau 8 met en relief les particularités des cycles terrestres modélisés par SWAT pour chaque culture. Globalement, l'apport moyen de P sur le parcellaire agricole du bassin versant de la Rivière aux Brochets est estimé à 60 kg P ha⁻¹. La redistribution spatiale des apports de P à l'échelle des sous-bassins a cependant donné lieu à une forte variabilité dans les apports pour une classe de culture donnée. Les écarts-types se situent respectivement à 50, 44 et 30 kg P ha⁻¹ pour les URH en culture de maïs, de céréales à paille ou de prairie (Tableau 8). En ce qui concerne le soja, rappelons qu'aucun apport de P n'a été appliqué. Cette importante variabilité reflète la disparité dans les données agronomiques colligées à l'échelle du

parcellaire dans les bassins versants expérimentaux du Ruisseau au Castor (Michaud et *al.*, 2004) et des Ruisseaux Walbridge (Michaud et *al.*, 2004a).

Tableau 8 : Distribution des moyennes annuelles de prédictions du bilan terrestre de masse du phosphore par classe de culture pour l'ensemble des URH à vocation agricole du bassin versant de la Rivière aux Brochets pour la période d'étude 2000-2003.

	Maïs		Soja		Céréales		Prairie		Total	
	Total (kg)	Moy.pond. (Écart-type) (kg P ha ⁻¹)	Total (kg)	Moy.pond. (Écart-type) (kg P ha ⁻¹)	Total (kg)	Moy.pond. (Écart-type) (kg P ha ⁻¹)	Total (kg)	Moy.pond. (Écart-type) (kg P ha ⁻¹)	Total (kg)	Moy.pond. (kg P ha ⁻¹)
Apports en engrais de ferme et minéraux	845 143	68 (50)	0	0	227 031	51 (30)	851 939	62 (44)	1 924 113	60
Prélèvements totaux des cultures	553 945	45 (10)	87 826	56 (9)	136 223	31 (6)	428 751	31 (2)	1 206 745	38
Minéralisation, résidus et matière organique	374 008	30 (18)	14 156	9 (6)	53 773	12 (9)	337 981	25 (7)	779 919	24
Rétroversion										
Adsorption	364 832	29 (39)	-51 416	-33 (6)	88 054	20 (24)	450 754	33 (33)	852 224	26
Fixation	293 710	24 (30)	-16 388	-11 (2)	73 922	17 (18)	358 175	26 (26)	709 418	22
Exportation au cours d'eau										
Particulaire	25 975	2.09 (4.31)	1 697	1.09 (1.40)	2 344	0.53 (0.80)	405	0.03 (0.04)	30 421	0.95
Soluble	4 644	0.37 (0.20)	41	0.03 (0.03)	924	0.21 (0.10)	4 041	0.29 (0.18)	9 650	0.30
Total	30 620	2.47	1 738	1.12	3 268	0.74	4 445	0.32	40 071	1.25

3.1.3 Prélèvements des plantes

Le modèle SWAT simule de façon journalière le prélèvement des éléments nutritifs dans le sol par les plantes. Les prélèvements de P par les plantes et l'éventuel retour du phosphore au sol par le biais des résidus de culture est déterminé en large partie par la modélisation de la croissance des cultures. Cette dernière est en retour conditionnée par quatre facteurs limitants, soit les stress hydrique et thermique, le déficit en azote ou le déficit en phosphore. La figure 8 met en relation les prélèvements annuels moyens en P modélisés à l'échelle des URH, suivant l'ajustement des paramètres de croissance des plantes, par rapport aux apports de P. Prenons note que les prélèvements rapportés incluent les biomasses, aériennes et racinaires, récoltées et retournées au sol. Globalement, les résultats de la simulation des prélèvements à l'échelle des URH sont corrélés avec les apports de P utilisés en intrants au modèle. Ces corrélations apports/prélèvements sont respectivement de 39, 42 et 47% ($p < 0.001$) pour la prairie, le maïs et les céréales à paille. Rappelons cependant que l'importante variabilité modélisée pour les prélèvements de P et les biomasses ne traduit pas nécessairement l'apport de P, mais l'ensemble des quatre facteurs de stress (eau, température, N et P). L'analyse des résultats de modélisation de la

croissance des plantes démontre que les stress hydriques, de température et en azote se sont avérés les facteurs limitants pendant des périodes variant de 10 à 22 jours pour l'ensemble des cultures, hormis la prairie et le soja en raison de leurs apports symbiotiques d'azote. Seul le soja a vu sa croissance limitée par le phosphore, pour une durée moyenne de quatre jours. Le maïs présente la plus importante variabilité dans le P prélevé, avec un écart-type de 10 kg P ha^{-1} , qui traduit la forte variabilité des biomasses modélisées par les routines de croissance du modèle SWAT.

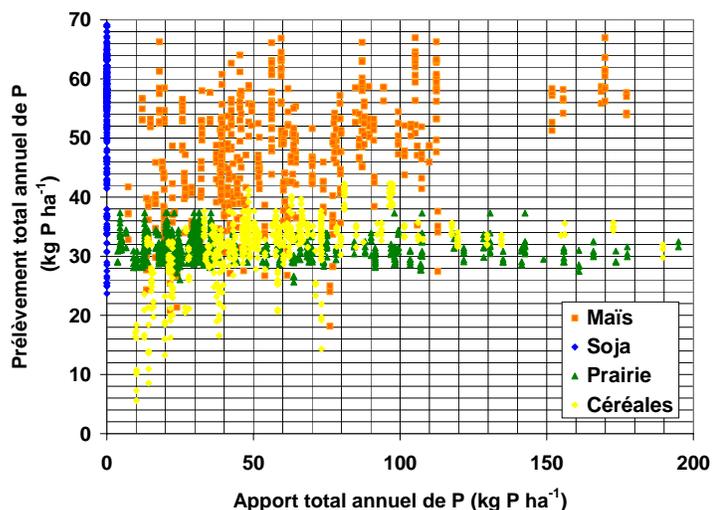


Figure 8 : Prélèvements annuels moyens en P simulés à l'échelle de l'URH pour la période 2000-2002 en fonction des apports totaux de P en engrais de ferme et en engrais minéral.

3.1.4 Minéralisation et rétroversion

Globalement, la contribution annuelle moyenne, pondérée pour la superficie en culture, de la minéralisation des résidus de culture et de l'humus modélisée est de l'ordre de 24 kg P ha^{-1} (Tableau 8). Cet apport, dû à la minéralisation des composantes organiques de P du sol, s'ajoute aux apports en engrais de ferme et minéraux (60 kg P ha^{-1}) pour une contribution annuelle moyenne pondérée pour la superficie en culture du bassin de 84 kg P ha^{-1} . Parallèlement au prélèvement en P des cultures, le modèle simule les processus de rétroversion et redistribue dans le temps les formes labiles de P excédentaires vers les pools modérément labile ou peu labile. Tel qu'en fait foi le bilan de masse en P du soja, les conversions d'un pool à l'autre s'exercent dans les deux sens, alors que le modèle « puise » en moyenne 33 et 11 kg P ha^{-1} , respectivement dans les pools modérément labile et stable, pour simuler la croissance annuelle du soja (Tableau 8). Globalement, le cumul annuel des transferts journaliers de P d'un pool à l'autre résulte en une répartition presque équitable du P excédentaire vers les pools modérément labile et stable, totalisant des stocks annuels respectifs de 26 et 22 kg P ha^{-1} . À titre indicatif, l'exportation annuelle moyenne de P modélisée pour le parcellaire en culture du bassin versant est de l'ordre $1.25 \text{ kg P ha}^{-1}$, ce qui représente environ 2.7% du bilan de masse global du P, ou du P stocké annuellement.

3.2 Hydrologie

3.2.1 Ajustement du modèle

Le tableau 9 présente la répartition du bilan hydrique annuel moyen simulé entre 2000 et 2003. Considérant les 1 154 mm précipités sur l'ensemble du bassin de la Rivière aux Brochets annuellement, environ la moitié (566 mm) a été perdue par évapotranspiration. Le ruissellement annuel moyen a été estimé à 218 mm, alors que les flux latéraux dans le sol et l'écoulement dans les drains souterrains se chiffrent respectivement à 39 mm et 46 mm. Enfin, environ 211 mm ont transité dans l'aquifère peu profond pour atteindre le cours d'eau alors que 60 mm ont été perdus dans l'aquifère profond.

Tableau 9: Moyennes annuelles des composantes du bilan hydrique modélisées à l'exutoire du bassin versant de la Rivière aux Brochets pour la période 2000-2003.

Fractionnement du bilan hydrique	Quantités
Précipitations totales	1 154 mm
Précipitations neigeuses	326 mm
Fonte de neige	296 mm
Ruissellement	218 mm
Mouvements latéraux d'eau dans le sol qui contribuent au débit du cours d'eau	39 mm
Contribution des drains souterrains*	46 mm
Contribution de l'eau souterraine (aquifère peu profond) au débit du cours d'eau	211 mm
Transfert d'eau entre l'aquifère peu profond et les plantes (en période de stress hydrique)	16 mm
Recharge de l'aquifère profond par percolation	60 mm
Recharge totale des aquifères (profond et peu profond)	254 mm
Débit en rivière	476 mm
Eau qui percole et atteint l'aquifère peu profond	254 mm
Évapotranspiration réelle	566 mm
Évapotranspiration potentielle	805 mm
Pertes par transmission	37 mm

* attention, cette valeur est ramenée à la superficie totale du bassin, alors qu'environ 30% de son territoire est drainé par des drains souterrains.

Dans l'ensemble, la répartition des composantes du bilan hydrique semble représentative des conditions agroclimatiques locales. Ce bilan donne toutefois l'impression que l'eau évacuée par les drains souterrains est sous-estimée. Rappelons que ces statistiques reflètent le bilan hydrique global de l'ensemble du bassin versant, alors que seulement 30% de sa superficie est drainée souterrainement. En ne considérant que les champs drainés souterrainement, la hauteur d'eau moyenne exportée par les drains souterrains s'élève en moyenne à 180 mm, contre 170 mm qui transite par le ruissellement de surface. La comparaison des prédictions du modèle hydrologique aux mesures réalisées au champ dans la portion aval du bassin versant de la Rivière aux Brochets par Enright et al. (2004), durant la même période d'étude, laisse cependant croire que la simulation des hauteurs d'eau évacuées par le drainage souterrain serait sous-estimée au bénéfice des flux provenant de l'aquifère peu profond ou du ruissellement. Les récessions des débits simulés pour la rivière et les ruisseaux ont tout de même été bien reproduites dans la majorité des cas. L'ajustement des débits simulés pendant les périodes de récession témoigne d'une reproduction satisfaisante des flux souterrains globaux, combinant les

contributions des drains, des migrations latérales et de la résurgence de l'aquifère peu profond, malgré un certain degré d'incertitude sur les contributions relatives de ces différents compartiments.

Tableau 10 : Indicateurs de l'ajustement du modèle aux débits mensuels (a) et journaliers (mesurés aux quatre stations hydrométriques de référence pour la période d'étude (b).

(a)

	Période	R	NS	D _v %
030420 - Rivière aux Brochets amont de Bedford	avril 1998 à déc. 2000- janvier 2001 à déc 2003	0.94	0.87	- 5%
030424 - Rivière aux Brochets aval de Bedford	nov. 2001 à déc. 2003	0.86	0.58	- 27%
030427 - Ruisseau Walbridge Intervention	nov. 2001 à mai 2003	0.87	0.69	- 5%
030428 - Ruisseau Walbridge Témoin	nov. 2001 à mai 2003	0.87	0.71	+ 5%

(b)

	Calage			Validation		
	R	NS	D _v %	R	NS	D _v %
030420 - Rivière aux Brochets amont de Bedford	0.74	0.55	- 3%	0.84	0.70	- 7%
	(avril 1998 à décembre 2000)			(mai 2001 à décembre 2003)		
030424 - Rivière aux Brochets aval de Bedford*	0.81	0.60	-27%	-	-	-
	(nov. 2001 à déc. 2003)					
030427 - Ruisseau Walbridge Intervention	0.79	0.60	-5%	-	-	-
	(novembre 2001 à mai 2003)					
030428 - Ruisseau Walbridge Témoin	0.76	0.55	+ 5%	-	-	-
	(novembre 2001 à mai 2003)					

*À la station 030424, les statistiques sont calculées avec les données de novembre 2001 à décembre 2003, en excluant les mois de juillet à octobre 2003 puisque les données réelles de débit sont inexistantes

Le tableau 10 présente les indicateurs d'ajustement du modèle hydrologique pour le bassin versant de la Rivière aux Brochets par rapport aux débits mesurés aux quatre stations hydrométriques de référence. Dans l'ensemble, après calage, les débits prédits par le modèle SWAT s'ajustent de façon satisfaisante aux débits mesurés aux stations hydrométriques localisées sur le tronçon principal de la Rivière aux Brochets, de même que sur les deux branches du Ruisseau Walbridge. Les coefficients statistiques témoignent d'un bon ajustement du modèle sur une base mensuelle, pour les périodes de calage et de validation confondues. Les corrélations linéaires (r) varient entre 0.76 et 0.94, alors que les coefficients de Nash Sutcliffe (NS) s'échelonnent entre 0.58 à 0.87. Les volumes d'eau écoulés varient pour leur part d'une surestimation de 5% à une sous-estimation de 27%.

Considérant l'ajustement du modèle sur une base journalière, les critères statistiques indiquent aussi une reproduction satisfaisante des débits mesurés dans l'ensemble des stations hydrométriques (Tableau 10b). La station 030424, située le plus près de l'exutoire du bassin de la Rivière aux Brochets, présente une corrélation (r) de 0.81, un NS de 0.60 et une sous estimation de 27% des volumes écoulés pendant la période de simulation. Cette sous-évaluation est essentiellement associée aux périodes hivernales de janvier-février 2002, de mars et de décembre 2003. Pendant ces périodes, des températures exceptionnellement clémentes qui oscillaient au-dessus de zéro ont été enregistrées, atteignant des

maxima de 10°C. Dans de telles conditions, le modèle SWAT éprouve des difficultés à différencier la pluie de la neige, en raison de son module de génération de climat basé sur la température moyenne journalière. Compte tenu de l'importance des crues associés aux redoux hivernaux, la prédiction des hauteurs d'eau s'en trouve grandement affectée. Il est aussi fort probable que des effets de glace sur la rivière aient causé une sur-évaluation des débits de référence, en raison d'élévations du niveau de l'eau enregistrés par le limnimètre pendant ces périodes. Mis à part ces débits de pointe associés aux redoux hivernaux, l'hydrogramme journalier simulé (Figure 9) révèle, dans son ensemble, la capacité du modèle à reproduire le comportement hydrologique du bassin.

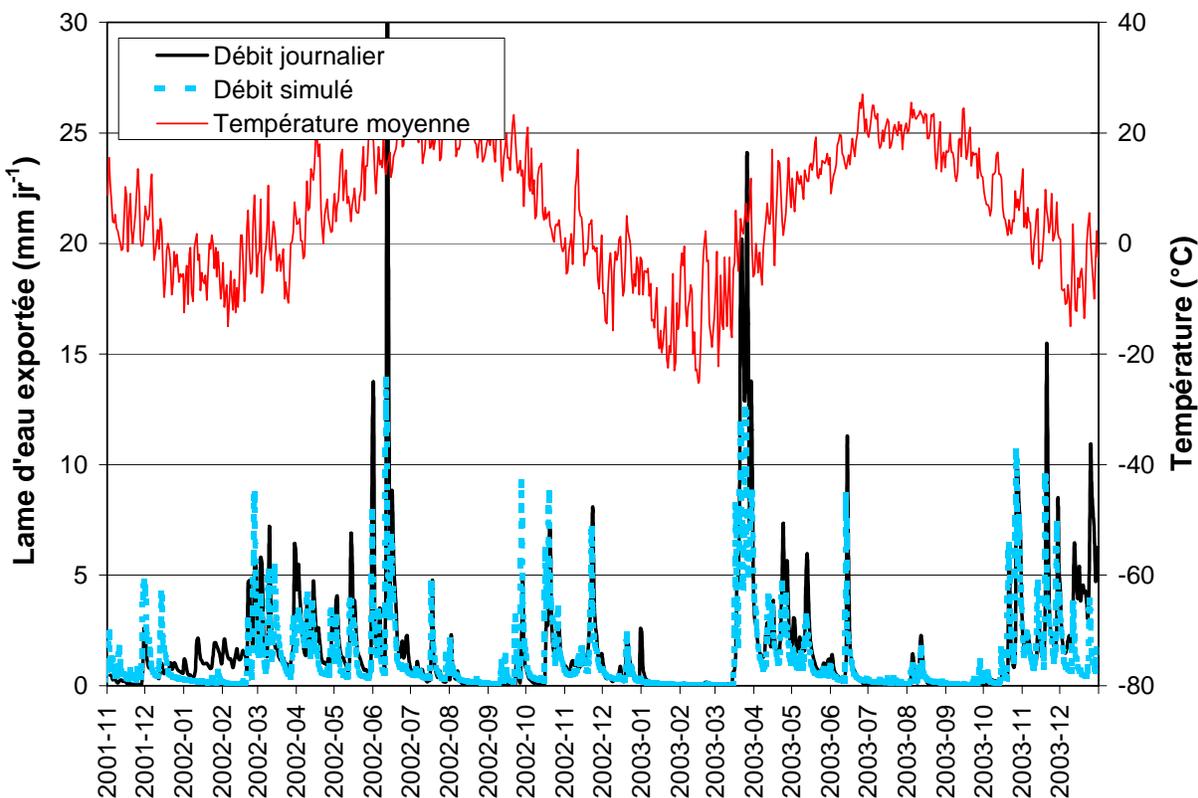


Figure 9 : Série chronologique journalière des températures moyennes, des lames d'eau mesurées et des lames d'eau prédites par le modèle à la station hydrométrique 030424. Rivière aux Brochets en aval de Bedford pour la période d'étude 2002-2003.

Quant à la station 030420 (amont), l'ajustement des débits pendant la période de calage, s'échelonnant entre avril 1998 et décembre 2000, témoigne d'une corrélation de 0.74, d'un NS de 0.55 et d'une déviation de -3%. Pendant la période de validation, allant de mai 2001 à décembre 2003, le modèle reproduit mieux l'hydrologie du bassin, tel qu'en témoigne une corrélation de 0.84, un NS de 0.70 et une déviation de -7%. Notons que les mois de janvier à avril 2001 ont été exclus de la période de validation à cause de l'incertitude concernant l'effet de glace sur les débits mesurés (Figure 10). À l'instar des autres bassins, mais de façon plus évidente, SWAT a éprouvé des difficultés à reproduire le temps de concentration pendant la période estivale (Figure 10). Ceci est perceptible par les petits pics de ruissellement simulés pendant l'été. Ces écarts du modèle par rapport aux débits mesurés sont possiblement associés aux difficultés qu'éprouve le modèle à reproduire les fluctuations du taux de saturation en eau du sol, largement tributaire de la capacité au champ. Cette propriété des URH est

estimée dans le modèle SWAT sur la base de caractéristiques physiques du sol, définies de façon trop macroscopique (échelle 1 : 63360 pour la portion québécoise du bassin) par rapport à la variabilité spatiale réelle appréhendée à l'échelle du parcellaire. Par ailleurs, le modèle échoue dans la reproduction de certaines pluies intenses qui surviennent pendant les orages estivaux. Les événements de pluies du 8 juillet 1998 (39 mm) et du 11 juin 2002 (52 mm) témoignent bien de cette problématique (voir les figures 9 à 12).

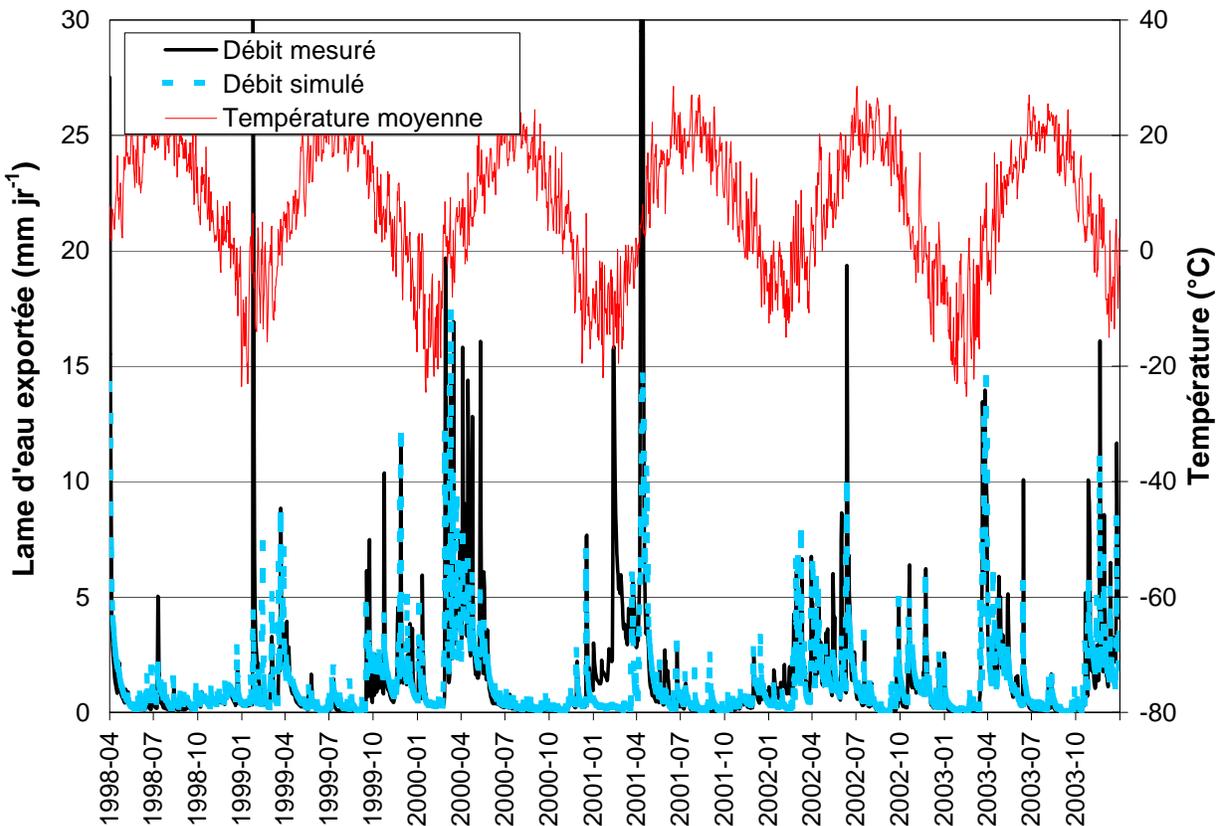


Figure 10 : Série chronologique journalière des températures moyennes, des lames d'eau mesurées et des lames d'eau prédites par le modèle à la station hydrométrique 030420. Rivière aux Brochets amont de Bedford pour la période d'étude 1998-2003.

En ce qui concerne le calage du modèle hydrologique à la station 030427 du Ruisseau Walbridge, les indicateurs de l'ajustement du modèle ne sont pas tous satisfaisants ($r=0.73$; $NS=0.23$ et $Dv=-4\%$) lorsque les paramètres de fonte et les caractéristiques du couvert nival issues de la calage hydrologique de la portion aval du bassin de la Rivière aux Brochets aval (030424) sont utilisées. L'appréciation visuelle de l'hydrogramme journalier (Figure 11) révèle la difficulté du modèle à reproduire les pics hivernaux. Néanmoins, un léger ajustement des paramètres de fonte des neiges (SFTMP, SMTMP, SMFMX, SMFMN, TIMP, SNOCOVMX, SNO5OCOV) permet d'atteindre des seuils statistiques satisfaisants ($r=0.79$; $NS=0.60$ et $Dv=-5\%$). Notons que les paramètres caractérisant le couvert nival et les périodes de fonte sont définis à l'échelle du bassin dans le modèle SWAT et ne peuvent donc être ajustés aux caractéristiques propres aux sous-bassins, telles que la présence de forêt ou l'orientation du

versant. Rappelons que dans le calage de l'hydrologie sur les deux bassins expérimentaux du Ruisseau Walbridge, les paramètres de fonte ont été ajustés aux caractéristiques physiographiques du bassin, d'où l'obtention de meilleurs ajustements des débits simulés. Afin de minimiser l'effet d'un mauvais paramétrage des débits, les modélisations subséquentes des exportations de sédiments (MES) et de phosphore (P) sont basées sur les paramètres de calage hydrologique propres à chacun des bassins versants expérimentaux.

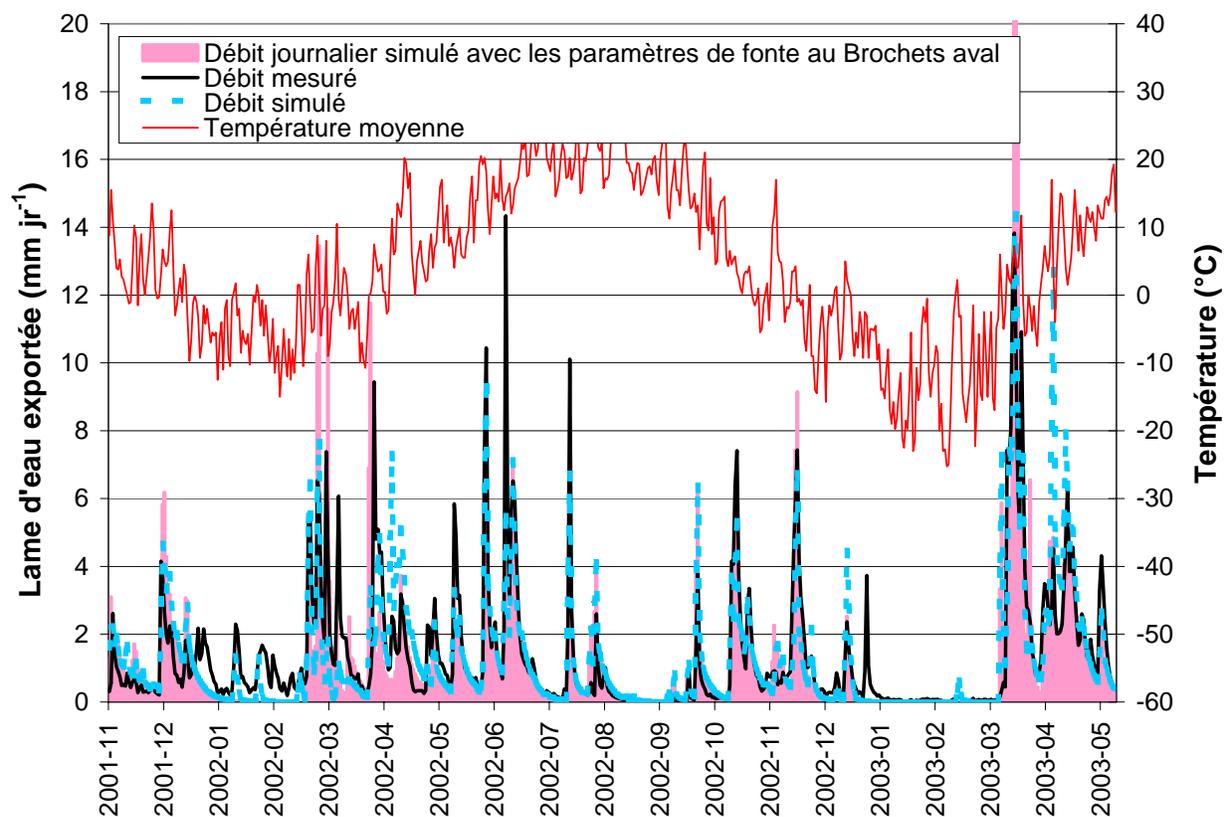


Figure 11 : Série chronologique journalière des températures moyennes, des lames d'eau mesurées et des lames d'eau prédites par le modèle à la station hydrométrique 030427 Ruisseau Walbridge Intervention pour la période d'étude 2001-2003.

Enfin, en ce qui a trait au calage du modèle à la station 030428 du Ruisseau Walbridge (Figure 12), le recours aux propriétés de fonte et du couvert nival propres aux caractéristiques des sous-bassins du ruisseau Walbridge ont permis d'atteindre des critères statistiques satisfaisants ($r=0.76$; $NS=0.55$ et $Dv=5\%$). Néanmoins, les événements estivaux extrêmes de ruissellement, associés à des précipitations intenses, manquent d'amplitude. La méthode SCS de prédiction des hauteurs de ruissellement ne permet pas de corriger cette lacune, sans causer une surévaluation des pics de ruissellement pendant le reste de l'année. Les écarts dans la reproduction des événements estivaux, combinés aux difficultés du modèle à reproduire fidèlement les précipitations hivernales expliquent l'obtention d'un coefficient de Nash Sutcliffe inférieur au taux de 0.60, généralement considéré comme balise dans l'interprétation de l'ajustement des débits simulés.

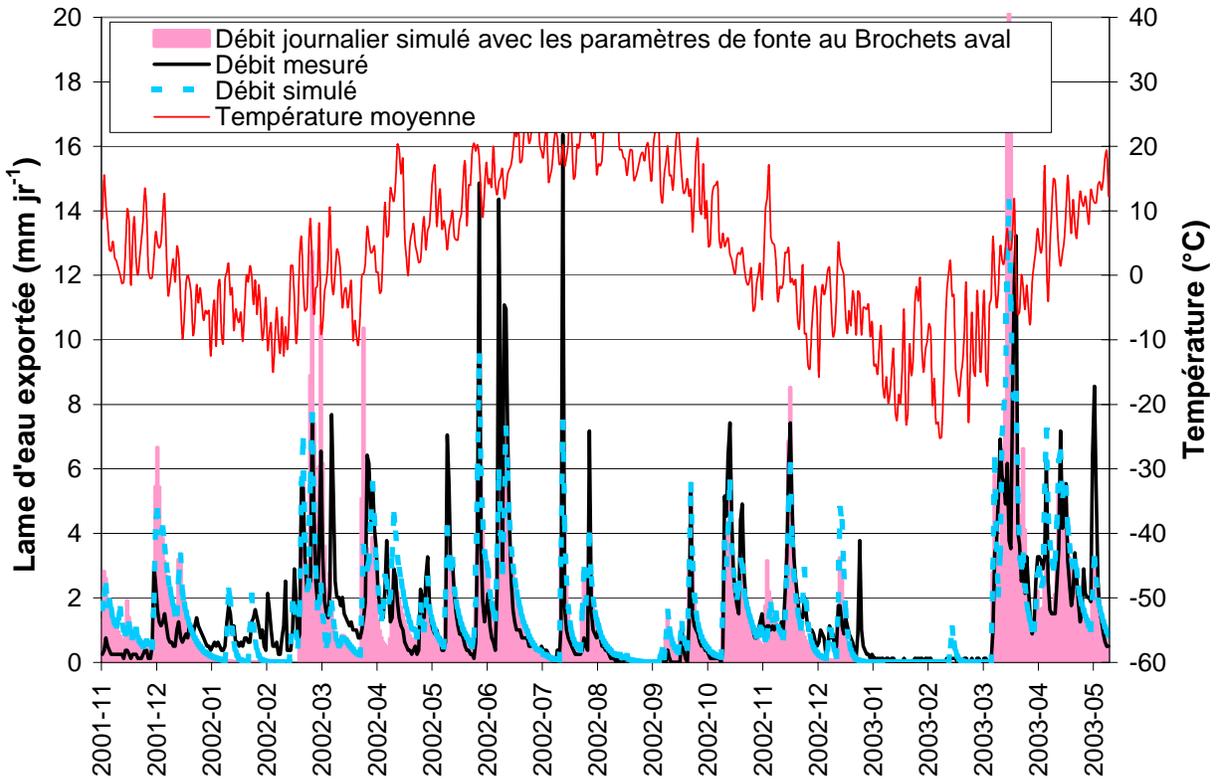


Figure 12 : Série chronologique journalière des températures moyennes, des lames d'eau mesurées et des lames d'eau prédites par le modèle à la station hydrométrique 030428. Ruisseau Walbridge Témoin pour la période d'étude 2001 2003.

3.2.2 Variabilité de l'activité hydrologique

Le bilan hydrique simulé à l'échelle de l'URH a une influence déterminante sur les pertes de sol et la mobilité du phosphore. La hauteur de ruissellement simulée est en effet utilisée en intrant dans la prédiction des pertes de sol par l'équation MUSLE. À son tour, la modélisation des pertes de sol est déterminante pour l'exportation de phosphore particulaire. Dans une perspective opérationnelle, la vulnérabilité du parcellaire au ruissellement demeure le premier critère à évaluer dans la planification de la région agroenvironnementale des sols et des cultures. La figure 13 met en relief la capacité du modèle à discriminer la répartition des lames d'eau s'écoulant de deux URH, toutes deux en culture de maïs, mais présentant des propriétés physiques du sol fort contrastées, soit un loam sableux mal drainé de la série Milton, ainsi qu'un loam sableux graveleux bien drainé de la série Rougemont. Afin de mettre en relief la composition des hauteurs d'eau journalières exportées, les résultats de la simulation sont représentés sous la forme d'histogrammes empilés représentant respectivement le ruissellement, les contributions latérales transitant dans le profil du sol, les contributions de l'aquifère peu profond, les contributions provenant des drains souterrains et les pertes par transmission dans le cours d'eau.

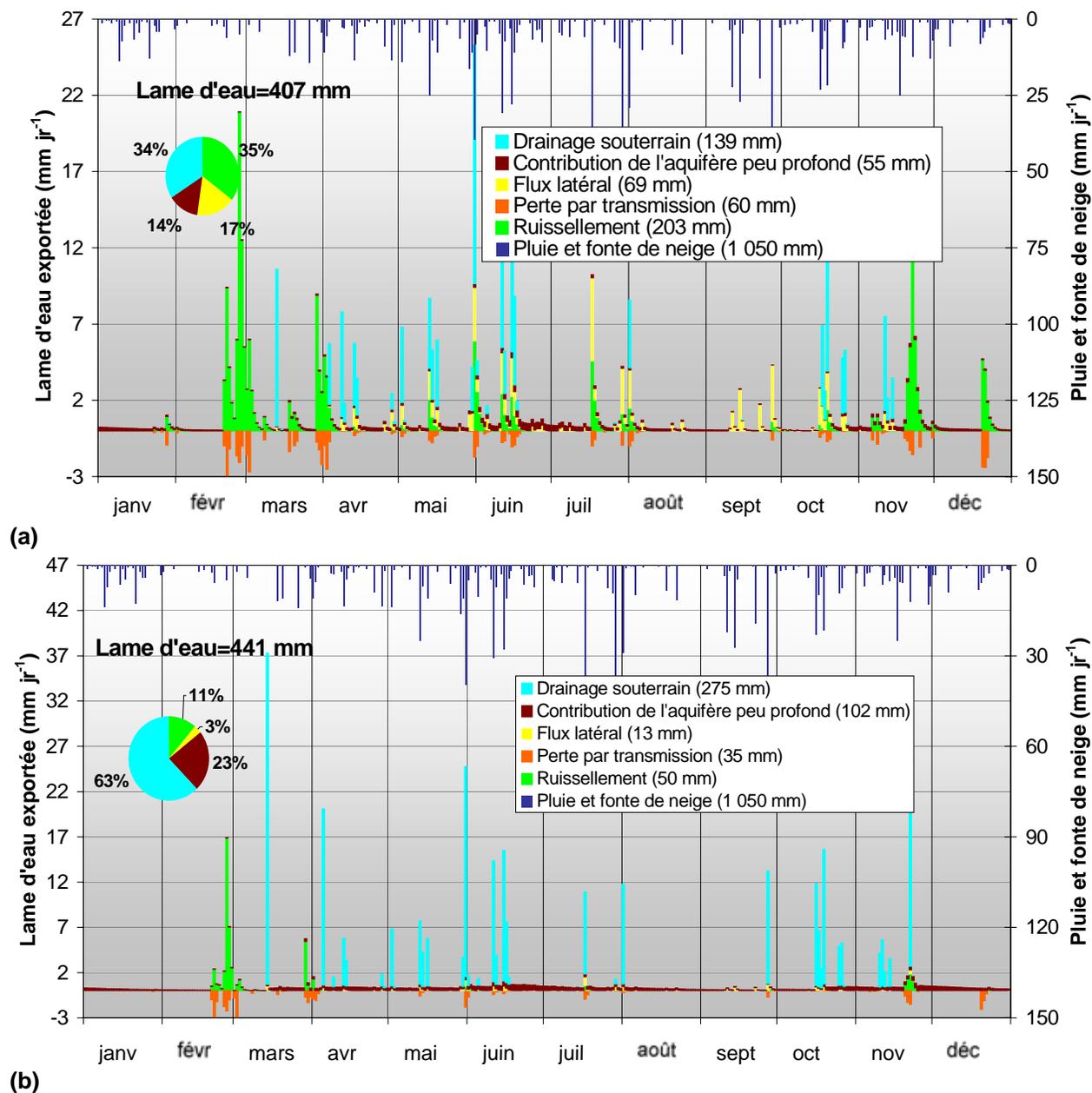


Figure 13: Série chronologique journalière des composants du bilan hydrique modélisées pour les unités de réponse hydrologique de référence Milton (maïs sur loam sableux Milton mal drainé, en pente de 0.8%)(a), Rougemont (maïs sur loam sableux graveleux Rougemont bien drainé en pente de 0.7%) (b).

En premier lieu, on constate la vulnérabilité relativement plus élevée du URH en maïs de la série de sol Milton à générer un ruissellement, totalisant 203 mm, soit près du double de celui simulé sur l'URH de la série de sol Rougemont. Les pertes par transmission dans le réseau hydrographique demeurent aussi plus importantes sur l'URH Milton (60 mm) en raison du volume ruisselé plus abondant. Sur les deux sites, les événements de ruissellement sont principalement observés en période printanière ou automnale, alors que le sol est gelé ou saturé, de même qu'à l'occasion de la fonte des neiges. Une telle importance de la fonte des neiges dans le bilan annuel du ruissellement reflète les observations colligées

par Jamieson et *al.* (2003) sur deux dispositifs d'étude au champs de la région. En fait, sur l'URH Milton, 60% du ruissellement modélisé est associé aux évènements de fonte des neiges, alors que la proportion nivale du ruissellement atteint 80% dans le cas de l'URH Rougemont. Ce contraste dans la saisonnalité du ruissellement simulé aux deux sites démontre l'influence de la perméabilité relativement plus faible de la série de Milton, qui se traduit par une plus grande vulnérabilité à produire du ruissellement tout au long de l'année.

Au niveau des dynamiques d'écoulement souterrain, peu de données permettent de valider la répartition des contributions latérales, de l'aquière peu profond et des drains souterrains simulée par le modèle. Globalement, les composantes souterraines de l'écoulement vers les cours d'eau sont de l'ordre de 65% et 89%, respectivement, pour les URH Milton et Rougemont en culture de maïs. Annuellement, le modèle attribue presque deux fois plus d'eau qui transite par les voies souterraines pour la série Rougemont que pour la série Milton. Si l'on considère uniquement les drains, ceux-ci exportent respectivement 34% et 63% des volumes d'eau atteignant le cours d'eau pour les séries Milton et Rougemont. La sommation de l'ensemble des flux surface/souterrain suggère que l'URH Milton génère une contribution au cours d'eau de 407 mm, qui est inférieure de 10% à l'URH Rougemont, pour une même culture de maïs.

La figure 14 illustre l'évolution journalière du bilan hydrique pour une UHR de la série de sol Milton en prairie, non drainée souterrainement. Globalement, le modèle attribue à la prairie établie sur ce loam sableux mal drainé une lame d'eau ruisselée annuelle de 87 mm, essentiellement attribuable à la fonte de neige. En période estivale, le ruissellement est pratiquement nul en raison de l'influence simulée de la couverture végétale (Figure 14). Les flux souterrains sont dominant sur ce URH. L'eau transite majoritairement par le biais des drains souterrains (46% de la lame d'eau).

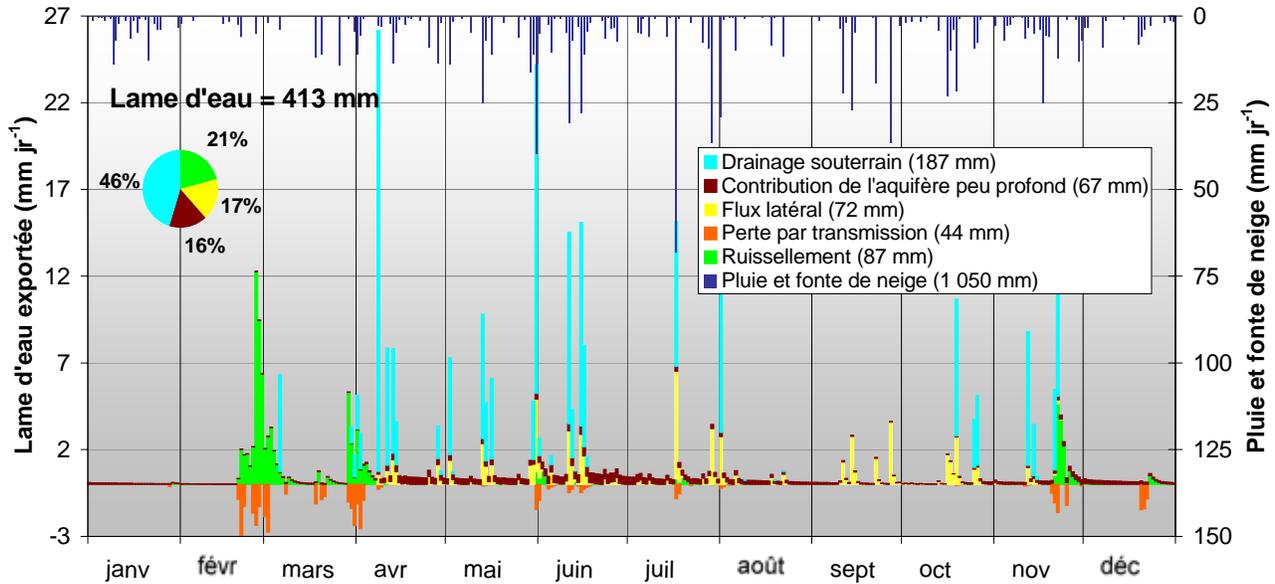


Figure 14 : Série chronologique journalière des composants du bilan hydrique modélisés pour l'unité de réponse hydrologique de référence Milton (prairie loam sableux Milton mal drainé, en pente de 0.8%).

Dans une perspective plus globale, la figure 15 (a) présente la cartographie du ruissellement moyen modélisé par SWAT sur les sous-bassins de la Rivière aux Brochets entre 2001 et 2003. Selon la méthode du numéro de courbe (USDA-SCS, 1972), le ruissellement est tributaire des propriétés pédologiques (groupe hydrologique, drainage) et de l'utilisation du sol. Plus l'usage agricole d'un territoire donné est important, plus la lame d'eau ruisselée y est considérable. L'appréciation des figures 15 (a) et (b) soulignent bien cette tendance. En fait, le ruissellement modélisé sur les 99 sous-bassins de la Rivière aux Brochets est significativement corrélée avec le pourcentage d'utilisation agricole de ceux-ci ($r=0.64$; $p<0.001$).

Néanmoins, dans la portion sud-ouest du bassin où l'occupation agricole du territoire demeure relativement marginale, les hauteurs d'eau ruisselées apparaissent relativement élevées. Cette distribution spatiale de l'activité hydrologique de surface est partiellement attribuée au gradient orographique qui affecte les précipitations. Celles-ci sont plus importantes dans les parties surélevées du bassin versant. La distribution spatiale des précipitations imposée au modèle, sur la base des profils climatiques contrastés des trois stations météorologiques de référence, reflète ce gradient. À titre indicatif, les résultats de la simulation hydrologique témoignent d'une corrélation linéaire significative ($r=0.72$; $p<0.001$) entre l'élévation et les précipitations à l'échelle du sous-bassin. De la même façon, le recoupage dans les gradients spatiaux d'occupation du sol et de précipitations révèle une corrélation négative ($r= -0.47$; $p<0.001$). L'interprétation des hauteurs d'eau ruisselées à l'échelle du bassin versant doit ainsi prendre en compte le fait que les secteurs présentant une agriculture plus marginale sont associés au secteurs les plus élevés du bassin, qui reçoivent annuellement le plus grand volume de précipitations.

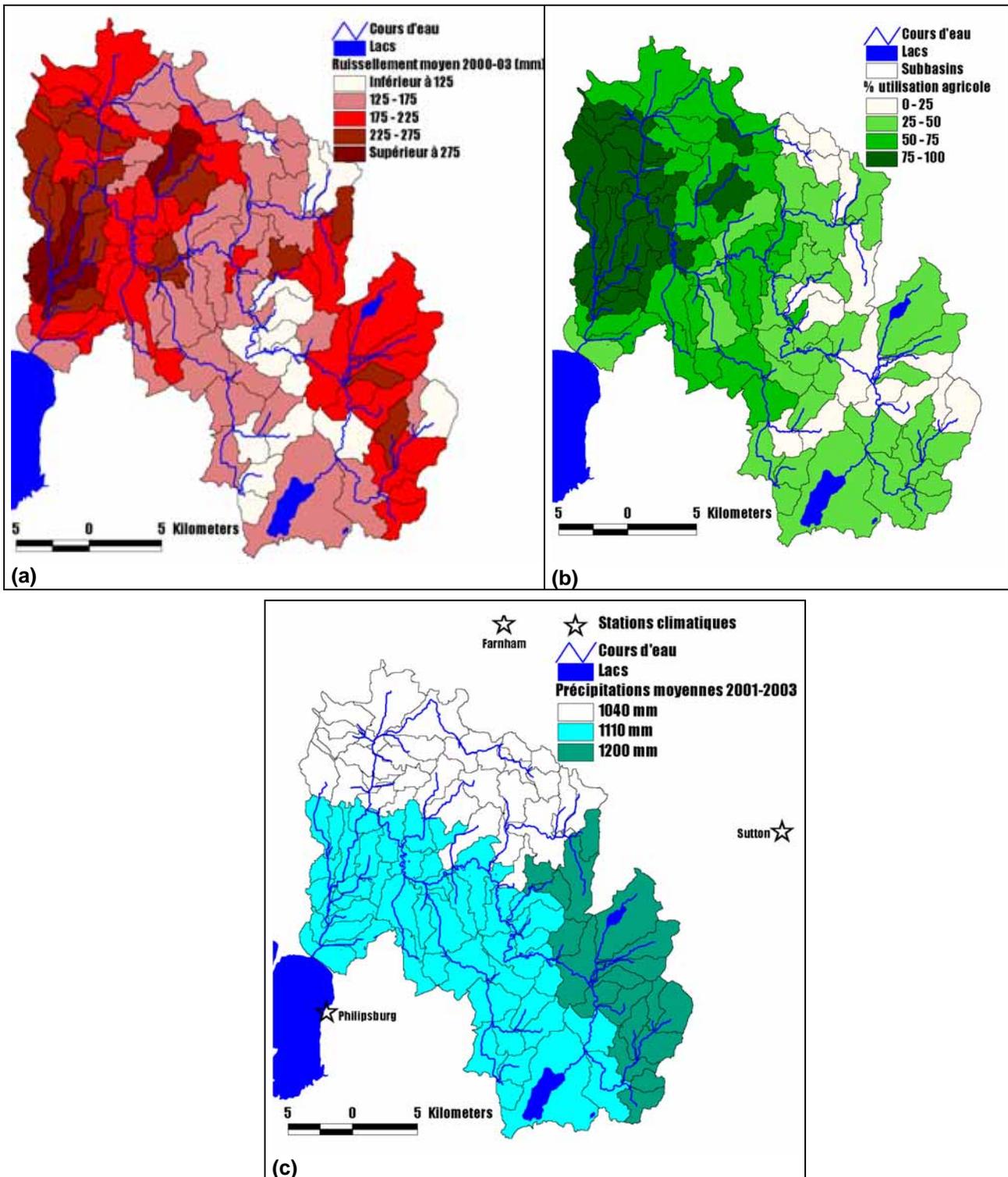


Figure 15 : Distribution spatiale de la lame de ruissellement annuelle moyenne (a), du pourcentage d'occupation agricole du territoire (b) et des précipitations annuelles moyennes modélisées pour la période d'étude 2001-2003 à l'échelle des 99 sous-bassins versants de la Rivière aux Brochets (c).

La figure 16 illustre le fractionnement du bilan hydrique en écoulements de surface et souterrain modélisé pour l'ensemble des URH du parcellaire agricole. Une importante variabilité du comportement hydrologique est observée pour une même culture. Par exemple, le ruissellement moyen modélisé sur les champs de maïs est de 187 mm avec un écart-type de 91 mm. Alors que la hauteur annuelle d'eau atteignant le réseau hydrographique varie entre 210 et 745 mm sur les champs de maïs, la proportion de cette eau transitant en surface varie entre 10 mm et 430 mm.

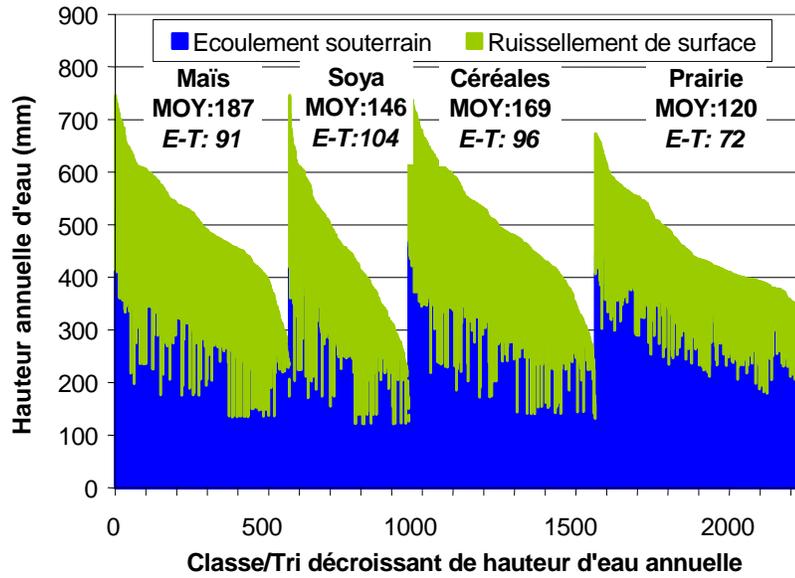


Figure 16 : Distribution des moyennes annuelles d'écoulement de surface et souterrain à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique modélisée pour la période 2000-2003 par classe de culture pour l'ensemble du bassin versant de la Rivière aux Brochets. Les moyennes et écarts-types (E-T) rapportés se réfèrent aux hauteurs simulées d'écoulement de surface.

3.3 Mobilité des sédiments et du phosphore

3.3.1 Ajustement du modèle

Malgré le fait que SWAT ait été développé pour des applications à l'échelle de grands bassins versants, le modèle a reproduit de façon satisfaisante, après calage, les flux de sédiments et de phosphore pour les bassins expérimentaux Walbridge (6-8 km²). Le tableau 11 compare les flux de sédiments modélisés par SWAT aux exportations mesurées aux exutoires des bassins expérimentaux. Les coefficients statistiques évalués mensuellement sur les périodes de calage témoignent d'un bon ajustement du modèle. Les corrélations linéaires varient entre 0.81 et 0.89, les coefficients de Nash Sutcliffe s'échelonnent de 0.61 à 0.78 et l'erreur d'estimation des exportations totales varie de 9%.

Tableau 11 : Indicateurs de l'ajustement du modèle aux exportations mensuelles des matières en suspension et de phosphore mesurées aux stations situées à l'exutoire des sous-bassins expérimentaux Walbridge pour la période d'étude 2001-2003

	Calibration MES			Calibration P		
	R	NS	Dv %	R	NS	Dv %
030427 Ruisseau Walbridge intervention (novembre 2001 à mai 2003)	0.84	0.66	9%	0.89	0.78	-9%
030428 Ruisseau Walbridge Témoin (novembre 2001 à mai 2003)	0.84	0.61	-5%	0.88	0.76	2%

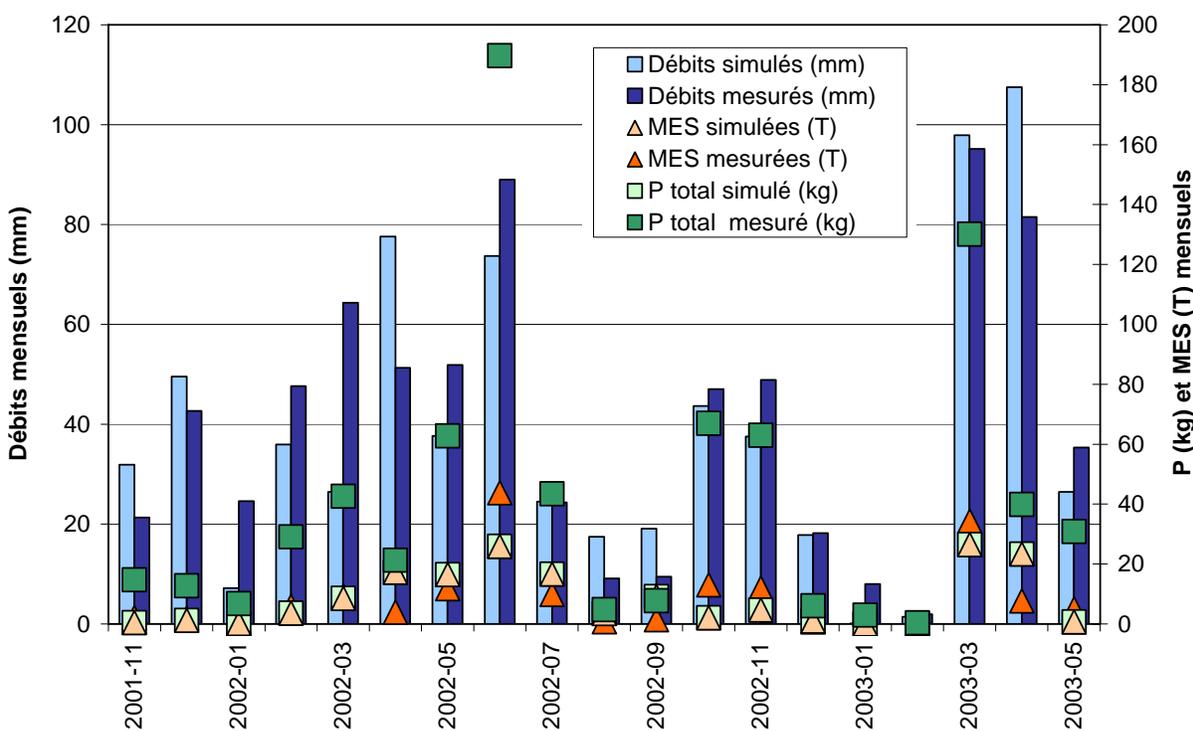


Figure 17 : Lames d'eau et exportations mensuelles de phosphore et de matières en suspension observées et modélisées prédites à l'exutoire du sous-bassin Walbridge Intervention entre novembre 2001 et mai 2003.

L'ajustement des prédictions de flux de sédiments reflète en grande partie la capacité du modèle à reproduire l'hydrologie du bassin. Entre novembre 2001 et mai 2003, les exportations mesurées sur le bassin du Ruisseau Walbridge Intervention (030427) se chiffrent respectivement à 164 tonnes de sédiments (0.26 T ha^{-1}) et 775 kg de P (1.23 kg ha^{-1}) alors que le modèle les évalue respectivement à 178 tonnes (0.28 T ha^{-1}) et 706 kg (1.12 kg ha^{-1}). Les exportations simulées à l'exutoire du bassin du Ruisseau Walbridge Témoin (030428) se chiffrent pour leur part à 375 tonnes de sédiments ($0.48 \text{ T MES ha}^{-1}$) et 1014 kg de P ($1.28 \text{ kg P ha}^{-1}$), alors que les mesures relevées en ruisseau situent ces exportations à 398 tonnes de sédiments (0.53 T ha^{-1}) et 997 kg de P ($1.33 \text{ kg P ha}^{-1}$). Globalement, le modèle tend à sous-évaluer les exportations de MES et P pendant les périodes hivernales, alors que la tendance contraire est observée pendant les périodes estivales (Figures 17 et 18). En période estivale, la

difficulté éprouvée dans la reproduction des hauteurs d'eau ruisselées associées aux précipitations intenses se répercutent fortement sur l'ajustement des flux prédits de MES et de P aux flux mesurés. Alors que la pluie du 12 juin 2002 (52 mm) était responsable de 10% des exportations annuelles totales mesurées en 2001, SWAT n'y a accordée qu'une faible capacité de transport du P. Ces écarts entre les flux prédits et observés de MES et de P aux exutoires des bassins instrumentés sur le Ruisseau Walbridge témoignent des limites du modèle opérant à un pas de temps journalier et réitère l'importance d'une bonne reproduction du cycle hydrologique pour bien simuler la variabilité spatiale du parcellaire aux processus d'érosion et de mobilisation du phosphore.

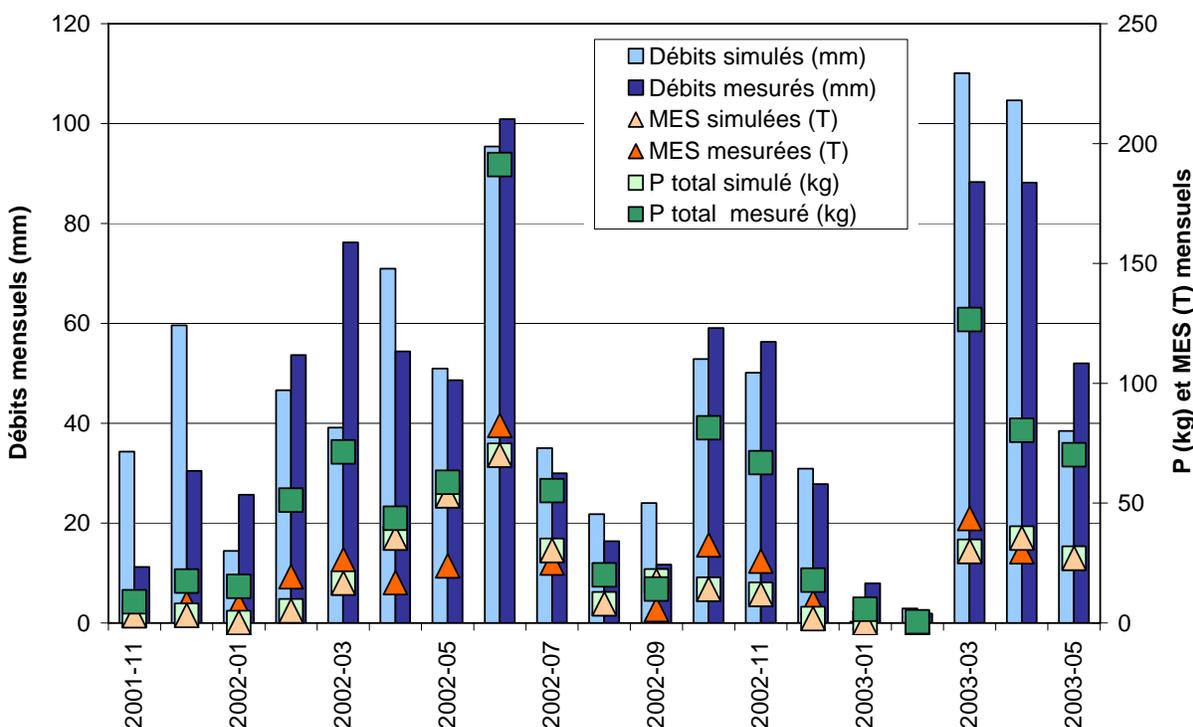


Figure 18 : Lames d'eau et exportations mensuelles de phosphore et de matières en suspension observées et modélisées à l'exutoire du sous-bassin Walbridge Témoin entre novembre 2001 et mai 2003.

3.3.2 Variabilité des flux de sédiments simulés

Au plan agronomique, les résultats des simulations du modèle hydrologique pour la période d'étude 2001-2003 témoignent de taux de pertes de sol relativement faibles sur l'ensemble du territoire (Figure 19c). Les exportations annuelles moyennes pondérées pour la superficie en culture et exprimées à l'échelle du sous-bassin (Figure 20a) reflètent des niveaux bien en deçà du taux de tolérance agronomique de 6 T ha⁻¹ généralement admis pour le Québec. Au plan environnemental cependant, le cumul des pertes de sol à l'échelle du bassin versant, annuellement estimé à 31 267 tonnes de sédiments pour la période 2000-2003, constitue un sérieux enjeu. L'analyse temporelle des bilans journaliers d'exportation aux exutoires des bassins expérimentaux du Ruisseau Walbridge met en relief le caractère très épisodique des événements hydrologiques conduisant à l'érosion. Par exemple, 80% de la charge de sédiments,

modélisée en 2002, atteint le réseau hydrographique pendant de brèves périodes totalisant 28 jours, correspondant à 8% de l'année. Cette distribution reflète essentiellement celle des hauteurs d'eau ruisselées et se concentre pendant les périodes *hydrologiquement* actives du printemps et de l'automne.

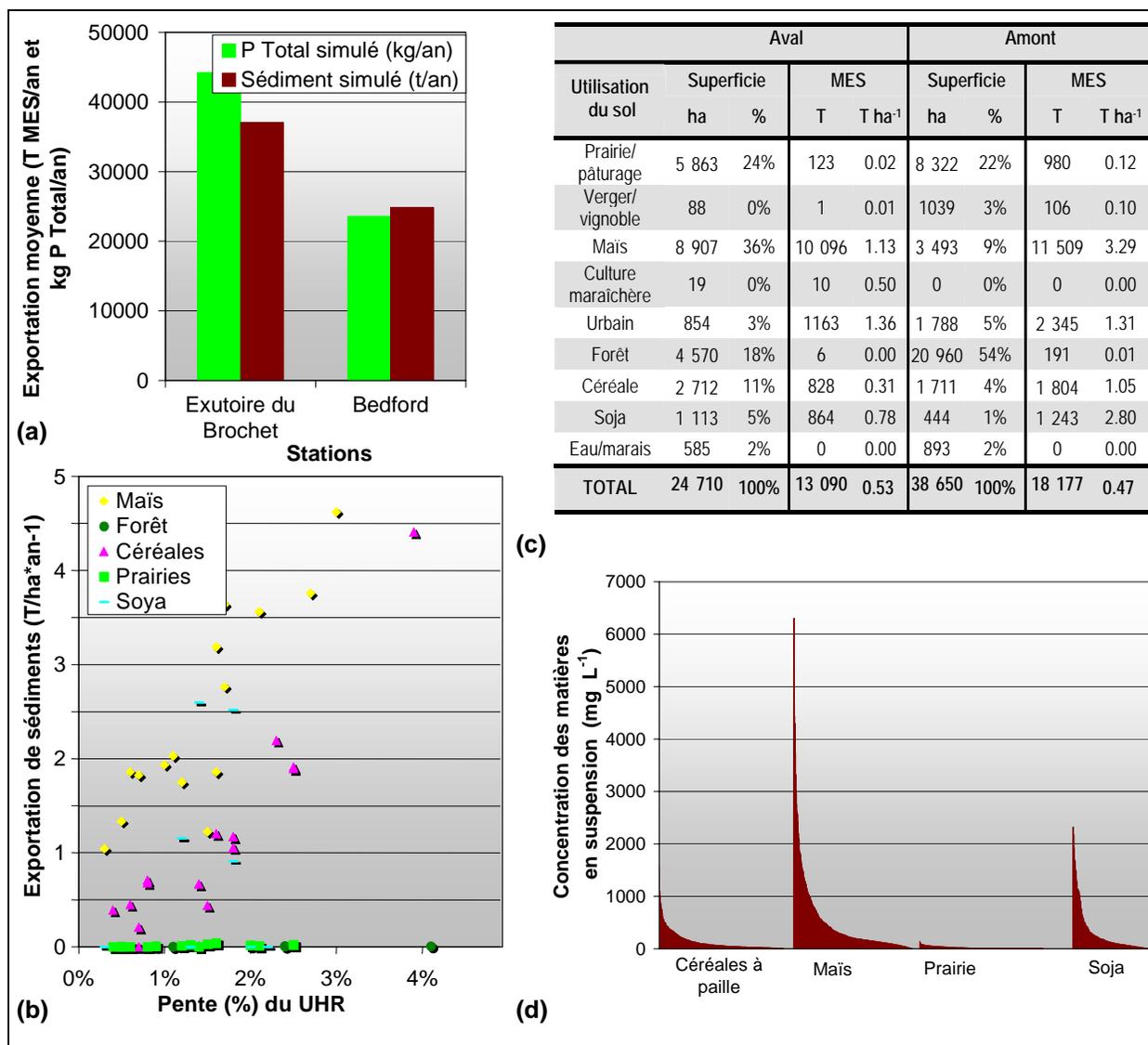


Figure 19 : Exportations annuelles moyennes pour la période d'étude 2000-2003 de matières en suspension et de phosphore à l'exutoire du bassin et à Bedford (a), Érosion prédite par SWAT (MUSLE) en fonction du type de culture et de la pente du URH pour la série de sol Milton Shefford (b), Exportations prédites de sédiments des portions aval/amont du bassin (c), Distribution des concentrations moyennes de sédiments (mg L^{-1}) représentée à l'échelle du URH par classe de culture pour l'ensemble du bassin versant de la Rivière aux Brochets (d).

Pour ce qui est de la phase aquatique de la modélisation, les bilans hydrodynamiques, simulant les processus de sédimentation, d'érosion et de re-suspension dans les différentes branches et tronçons de la Rivière aux Brochets, sont très variables. Les bilans annuels moyens (2000-2003) se situent entre un taux de déposition net de 25% à une contribution de l'érosion des berges correspondante à plus du

double des pertes de sol provenant du parcellaire en amont. Globalement, l'ajustement des paramètres de calibrage de la phase hydrodynamique du modèle fait en sorte que la masse de sédiments stockée dans l'ensemble du réseau hydrographique du bassin de la Rivière aux Brochets est inférieure de 15% au taux d'érosion des chenaux combiné à la remise en suspension des sédiments. Le bilan net modélisé à l'exutoire de la rivière témoigne ainsi d'une contribution d'environ 5 775 tonnes du réseau de cours d'eau. Cette charge s'ajoute aux 31 267 tonnes de sédiments érodés annuellement sur l'ensemble du territoire du bassin. Quelques 37 042 tonnes de sédiments sont donc annuellement exportés dans les eaux de la Baie Missisquoi.

Dans l'ensemble, une importante gradation des taux d'exportation de sédiment est perceptible à l'échelle des URH (Figures 18 et 19). Les algorithmes du modèle hydrologique intègrent les influences d'une multitude de paramètres, dont certains relèvent des propriétés des sols et du relief, alors que d'autres relèvent de la gestion du parcellaire, tels que la présence de drains souterrains, le type de culture et les pratiques agricoles qui leurs sont associées. La figure 20 illustre la distribution spatiale des exportations de sédiments à l'échelle des 99 sous-bassins de la Rivière aux Brochets et met en relief l'influence des propriétés du paysage sur l'érosion. Malgré la vocation agricole relativement moins importante dans la portion amont du bassin versant, 60% des exportations annuelles de sédiments y originent. Bien que les exportations moyennes spécifiques pour les portions amont et aval soient semblables, avec des taux respectifs de 0.47 et 0.53 T ha⁻¹, les superficies responsables pour la majorité des exportations dans l'amont du bassin sont beaucoup plus restreintes qu'en aval (Figure 19c). Alors que la proportion des superficies en cultures annuelles est moins importante en amont du bassin, les taux d'érosion des cultures de maïs, de soja ou de céréales à paille modélisés y demeurent approximativement 3 fois plus élevés qu'en aval du bassin. Cette différence dans les distributions de pertes de sol entre les secteurs amont et aval du bassin est en grande partie attribuable au gradient spatial de l'érosivité du relief. Rappelons que le bassin de la Rivière aux Brochets repose sur la confluence, au plan géomorphologique, des paysages relativement plats des basses terres du Saint-Laurent, avec les paysages vallonnés et montagneux du massif appalachien. Dans la portion amont du bassin, les terres agricoles sont cultivées sur une pente moyenne de 3.2% (avec un écart type de 3.5%), ce qui se traduit par des pertes de sol relativement plus élevées qu'en aval, où la pente moyenne des champs cultivés est de l'ordre de 1%. La figure 19 b met en relief l'effet multiplicatif qu'a l'inclinaison de la pente sur les taux d'érosion simulés sur l'ensemble des URH caractérisés par un loam sableux de la série de Milon. En passant d'une pente de URH moyenne de 1% à 3%, la perte de sol modélisée triple pour atteindre plus de 4.5 T ha⁻¹.

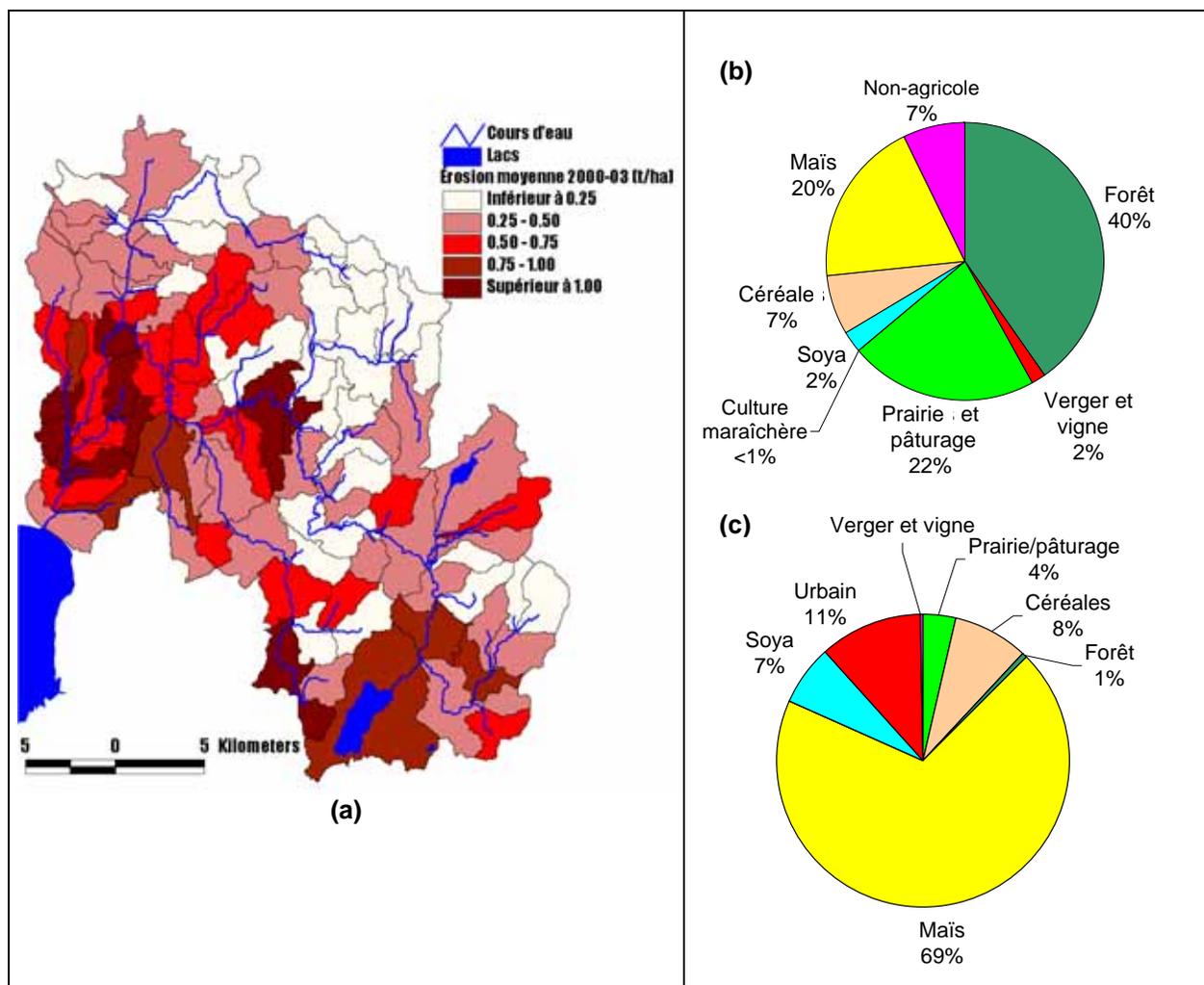


Figure 20 : Distribution spatiale des exportations annuelles moyennes de sédiments prédites à l'échelle des 99 sous-bassins versants de la Rivière aux Brochets pour la période 2000 à 2003 (a), Pourcentage d'utilisation du territoire du bassin (b), et des exportations annuelles moyennes de P évaluées sur l'ensemble du territoire du bassin versant de la rivière aux Brochets (c).

Parallèlement aux propriétés du relief, l'occupation des sols est à la source d'un important gradient dans les taux d'érosion modélisés sur le parcellaire en culture. En fait, environ 50% de l'érosion modélisée est associée à moins de 10% de la superficie totale du bassin. La culture du maïs est associée aux pertes de sol simulées les plus élevées, suivie du soja et des zones urbaines/routes (Figure 19b). La vulnérabilité plus élevée associée au maïs tient à une couverture plus faible que la céréale à paille ou le soja qui se traduit par un facteur de couverture du sol (USLE C) relativement plus élevé dans l'équation MUSLE.

Alors que la culture du maïs couvre 20% de la superficie totale du bassin, elle demeure associée à 69% des exportations totales de sédiments simulées pour l'ensemble du territoire (Figure 20). Les moyennes pondérées pour la superficie en culture de maïs se situent respectivement à 1.13 et 3.29 T ha⁻¹ pour les portions aval et amont du bassin. Les valeurs extrêmes de pertes de sol simulées, associées à des concentrations de MES supérieures à 1 000 mg L⁻¹, contribuent cependant à hausser le bilan massique des

exportations de sédiments à l'échelle du bassin. La forte dispersion dans les taux d'érosion modélisés tient en grande partie aux poids des facteurs de pente et d'érodabilité du sol accordés par les algorithmes de l'équation MUSLE. À titre indicatif, les taux de perte de sol modélisés sur les champs de maïs sont respectivement corrélés à 54% et 42% avec l'inclinaison de la pente et l'indice d'érodabilité du sol (Tableau 13).

3.3.3 Variabilité des flux de phosphore simulés

Pour l'ensemble de la période d'étude 2000-2003, le modèle hydrologique estime le flux annuel moyen de P exporté vers le réseau hydrographique à 47 tonnes de phosphore ($0.74 \text{ kg P ha}^{-1}$). Suivant la prise en charge des composantes hydrodynamique du modèle, la charge annuelle modélisée qui atteint l'exutoire du bassin est de l'ordre de 44.2 tonnes. La différence, soit environ 3 tonnes de P, correspond au bilan net de stockage et de re-largage du P dans le réseau hydrographique, et demeure tributaire du bilan sédimentaire relativement équilibré défini dans la composante hydrodynamique du modèle. Le flux net de P total vers la Baie Missisquoi modélisé dans le cadre de la présente étude est du même ordre que celle rapportée par Hegman *et al.* (1999) qui a servi de balise au *Groupe de travail Vermont Québec sur la réduction du phosphore* (2000) dans la détermination des charges-cibles à la base de l'entente Vermont-Québec sur la réduction des apports de phosphore à la baie. Hegman *et al.* (1999) évaluent effectivement les charges de P à 41.1 tonnes soit 0.64 T ha^{-1} pour l'ensemble du bassin de la Rivière aux Brochets. Sur la portion cultivée du bassin, Hegman *et al.* (1999) ont basé leur estimation sur un coefficient de transport moyen du P d'origine agricole fixé à 1.2 kg ha^{-1} . À titre indicatif, le coefficient moyen de transport du P modélisé dans le cadre de la présente étude pour l'ensemble du parcellaire en culture est de l'ordre de 1.27 kg ha^{-1} . Dans une perspective d'appui au processus décisionnel dans la réduction des apports de P à la Baie Missisquoi, les projections spatiales des flux de phosphore supportées par la présente modélisation hydrologique sont donc compatibles avec le cadre de référence établi par le Vermont et le Québec.

À l'instar des dynamiques d'exportation de sédiments, les exportations de phosphore modélisées dans SWAT sont très épisodiques. Les événements hydrologiques qui génèrent du ruissellement (Figure 13) sont aussi associés aux épisodes d'exportations massives de sédiments et de phosphore (Figure 22). À l'exutoire du bassin Intervention du Ruisseau Walbridge par exemple, la modélisation des exportations journalières de 2002 révèle que 80% du phosphore a été exporté en 67 jours (17% de l'année), principalement lors d'événements de ruissellement printaniers et automnaux hydrologiques importants. La nature épisodique des flux de P modélisés reflètent les observations en bassins versants agricoles expérimentaux généralement rapportés dans la région (Michaud *et al.*, 2005; Michaud *et al.*, 2004; Meals, 2004).

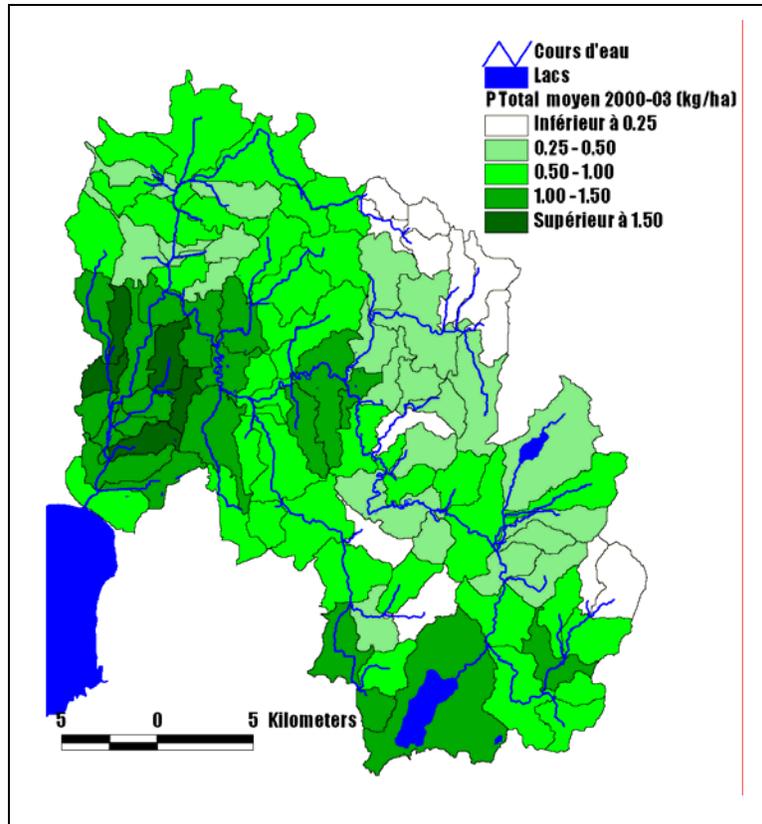


Figure 21 : Exportations moyennes annuelles de P total pondérées pour la superficie en culture, à l'échelle des sous-bassins de la rivière aux Brochets pour la période d'étude 2001-2003.

La figure 22 illustre la distribution temporelle des exportations de MES et de P pour les URH de référence Milton et Rougemont en culture de maïs. La distribution temporelle contrastée des exportations met en relief les différences dans les réponses hydrologiques aux précipitations pour ces séries de sol (Figure 13). La perméabilité relativement moins élevée de la série Milton se traduit en un ruissellement plus fréquent et plus abondant, ce qui lui confère une capacité accrue de mobilisation de sédiments et de phosphore particulaire. Globalement, malgré des itinéraires techniques identiques, l'exportation de P simulée pour la série de Milton (0.95 kg ha^{-1}) est quatre fois plus élevée que pour celle de Rougemont. En plus de l'importante vulnérabilité du loam sableux Milton mal drainé à développer un état de saturation, un indice d'érodabilité du sol plus élevé contribue à hausser le taux d'exportation de sédiments et de P particulaire par rapport au loam sableux et graveleux Rougemont.

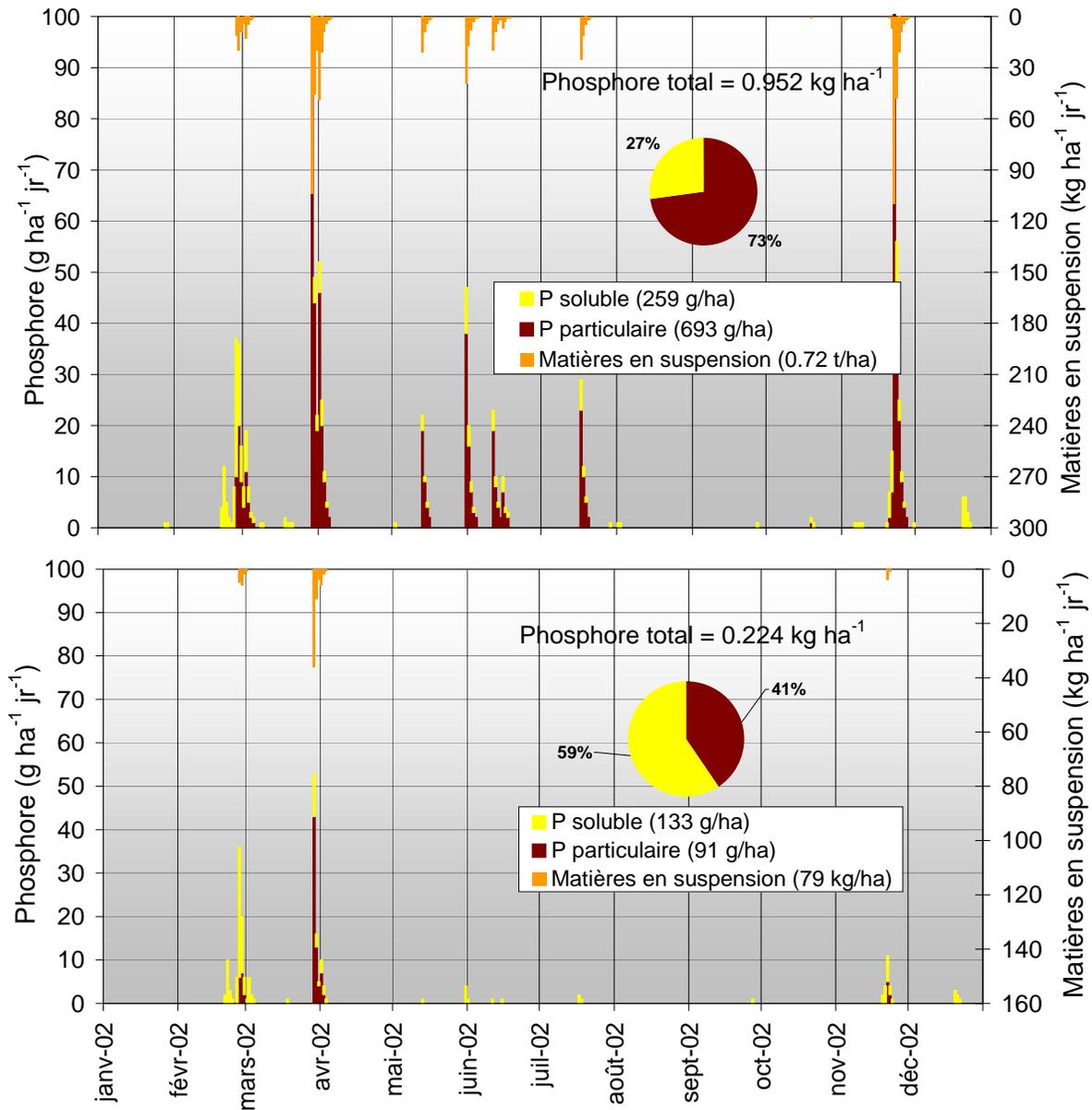


Figure 22 : Série chronologique journalière des exportations de matières en suspension et de phosphore total prédites pour les unités de réponse hydrologique de référence Milton (maïs sur loam sableux Milton mal drainé en pente de 0.8%) (a); et Rougemont (maïs sur loam sableux graveleux Rougemont bien drainé en pente de 0.7%) (b).

Au plan de la distribution spatiale des exportations de P, les simulations produites par le modèle révèlent que moins du dixième de la superficie du bassin est responsable de plus de 50% de la migration du P vers le réseau hydrographique. Cette distribution reflète les observations généralement rapportées dans la littérature, à l'effet que des proportions relativement faibles des bassins versants en culture sont responsables de la plus grande part des exportations de P dans les eaux de ruissellement (Sharpley et al., 1994 ; Daniel et al., 1994).

Globalement, les résultats de modélisation révèlent une prédominance de la forme particulaire (75% du P total) du phosphore mobilisé sur l'ensemble du territoire du bassin de la Rivière aux Brochets. Cette spéciation concorde avec les observations en bassins versants expérimentaux de la région à l'étude (Michaud *et al.*; 2004b; 2005) et ailleurs dans le Nord-Est américain de Sharpley *et al.* (1992) qui témoignent d'une dominance des formes particulières de l'ordre de 60% à 90% du P transporté par le ruissellement en milieu agricole. Un gradient des formes de phosphore est cependant modélisé en fonction des usages du territoire (Tableau 12), alors que les exportations provenant des zones peu sensibles à l'érosion (verger/vigne, forêt, prairie/pâturage) sont dominées par des formes solubles de P.

Tableau 12: Exportations annuelles massiques et spécifiques de phosphore par classe d'occupation du sol modélisées pour la période 2000-2003 dans les portions amont/aval et l'ensemble du bassin versant de la Rivière aux Brochets

Utilisation du sol	Aval				Amont				Ensemble du bassin			
	Superficie		P total		Superficie		P total		P total			
	ha	%	kg	kg ha ⁻¹	ha	%	kg	kg ha ⁻¹	kg	kg ha ⁻¹	ET ^(a)	% soluble
Prairie/pâturage	5 863	24%	2 512	0.43	8 322	22%	3 016	0.36	5 528	0.39	0.22	76%
Verger/vignoble	88	0%	4	0.04	1 039	3%	97	0.09	100	0.09	0.05	52%
Maïs	8 907	36%	16 556	1.86	3 493	9%	14 144	4.05	30 700	2.47	4.36	11%
Culture maraîchère	19	0%	20	1.02	0	0%			20	1.02	0.20	16%
Urbain	854	3%	1 643	1.92	1 788	5%	3 521	1.97	5 164	1.95	1.86	28%
Forêt	4 570	18%	43	0.01	20 960	54%	371	0.02	414	0.02	0.01	65%
Céréales	2 712	11%	1 492	0.55	1 711	4%	1 807	1.06	3 300	0.74	0.82	28%
Soja	1 113	5%	831	0.75	444	1%	917	2.07	1 748	1.12	1.40	2%
Milieu humide	585	2%			891	2%						
Eau	0	0%			2	0%						
TOTAL	24 710	100%	23 102	0.93	38 650	100%	23 872	0.62	46 974	0.74	2.30	33%

(a) Écart-type des exportations de P en kg ha⁻¹

À l'échelle des URH en culture, le modèle associe des flux spécifiques moyens de P relativement plus importants aux URH de maïs (2.47 kg P ha⁻¹), suivi de la culture de soja (1.12 kg P ha⁻¹), de la céréale à paille (0.74 kg P ha⁻¹) et de la prairie (0.39 kg P ha⁻¹). Les exportations de P simulées pour une classe de culture donnée demeurent cependant très variables. Similairement aux dynamiques d'érosion des sols, l'effet des caractéristiques physiques des paysages, notamment la pente des URH et la perméabilité des sols, (pédologie et pente) est à la source de ces gradients importants dans les exportations de P simulées pour une classe de culture donnée, en secteur amont comme à l'aval du bassin versant de la Rivière aux Brochets (Figure 21).

Conceptuellement, les flux de P modélisés résultent principalement de trois processus reproduits par les algorithmes du modèle hydrologique, soit les hauteurs de ruissellement, le taux d'érosion et l'enrichissement du ruissellement en P soluble et en P particulaire.

Un aperçu des poids relatifs accordés par le modèle SWAT aux différents paramètres d'entrée du modèle dans l'expression de la variabilité des flux de P est présenté au tableau 13. Ce dernier présente les corrélations linéaires entre certains paramètres d'entrée du modèle et le ruissellement ainsi que les flux modélisés de sédiments, de P soluble et particulaire pour les champs de maïs et de prairie. Globalement, les portions soluble et particulaire des flux modélisés par le modèle apparaissent faiblement corrélés, en culture de maïs comme en prairie (Tableau 13). Ces prédictions contrastées, dans la spéciation du P, exporté témoignent de la capacité du modèle hydrologique à dissocier les processus d'enrichissement du ruissellement et de distinguer les influences respectives des facteurs liés au transport et aux sources terrestres de P biodisponibles. En culture de maïs, l'exportation de P total modélisée demeure fortement corrélée avec le taux d'érosion simulé ($r = 0.94$; $p < 0.001$). La pente de l'URH ($r = 0.54$; $p < 0.001$) et l'érodabilité du sol ($r = 0.36$; $p < 0.001$) contribuent à la plus large part de la variabilité modélisée pour les exportations de P en culture du maïs. En prairie, la spéciation du P s'inverse, alors que la fraction soluble compte pour 76% du flux de P exporté. Les paramètres du modèle hydrologique pertinents aux sources de P, notamment l'apport de P, la richesse initiale du sol en P labile et le stock de P minéralisé dans la couche arable, contribuent alors à la plus grande part de la variabilité des exportations de P soluble simulées par le modèle hydrologique (Tableau 13).

Tableau 13: Matrice de corrélations linéaires simples entre les résultats de la simulation et certains paramètres d'entrée du modèle à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique en culture de maïs et de prairie.

Paramètre ⁽²⁾	Résultats de la simulation hydrologique (flux exportés) ⁽¹⁾					Paramètres de modélisation				
	Fraction de phosphore					Apport de P	Richesse du sol en P	P minéralisé	Pente du URH	Erodabilité du sol
	Soluble	Particulaire	Total	Sédiments	Ruissellement					
P soluble		0.22***	0.27***	0.12**	0.56***	0.76***	0.26***	0.60***	N.S.	0.19***
P particulaire	0.08*		0.99***	0.94***	0.33***	0.12***	N.S.	0.17***	0.55***	0.35***
P total	0.98***	0.27***		0.94***	0.35***	0.15***	N.S.	0.19***	0.54***	0.36***
Sédiments	N.S.	0.95***	0.20***		0.30***	N.S.	N.S.	0.12*	0.57***	0.42***
Ruissellement	0.64***	0.38***	0.69***	0.37***		0.15**	N.S.	N.S.	N.S.	0.36***
Apport de P	0.64***	-0.25***	0.57***	-0.31***	N.S.		0.10*	0.74***	0.10*	N.S.
Richesse du sol	0.31***	-0.20***	0.26***	-0.25***	N.S.	0.39***		N.S.	-0.15***	N.S.
P minéralisé	0.61***	-0.22***	0.54***	-0.30***	N.S.	0.97***	0.37***		0.16***	N.S.
Pente du URH	-0.38***	0.51***	-0.26***	0.57***	-0.12**	-0.46***	-0.46***	-0.42***		0.09*
Erodabilité du sol	0.21***	0.42***	0.28***	0.48***	0.41***	-0.13***	N.S.	N.S.	N.S.	

⁽¹⁾ Unités de réponse hydrologique en culture de maïs (N=567)

Unités de réponse hydrologique en prairie (N=690)

⁽²⁾ ***, **, *: respectivement significatifs au niveau de probabilité de .001, .01 et .05.

La figure 23 illustre les concentrations moyennes en P soluble et particulaire simulées pour l'ensemble des URH en culture du bassin versant pour la période 2000-2003. Bien que chaque classe de culture présente une forte variabilité dans les concentrations globales de P simulées, un gradient dans la spéciation des formes de P se détache de l'ensemble des observations à l'échelle de l'URH. Le modèle attribue ainsi l'essentiel des exportations de la culture de soja aux formes particulaires. Rappelons qu'aucun apport de P n'a attribué à cette culture dans l'itinéraire technique de référence. Tel qu'en fait foi le bilan terrestre du P présenté à la section 3.1, les routines terrestres du modèle puisent dans les stocks de P modérément et peu labile du sol pour supporter les besoins de la plante au cours de sa croissance. Peu de phosphore labile est alors disponible en surface du sol pour enrichir le ruissellement. La situation inverse se présente pour la prairie, où la forme soluble domine en raison de la stratification du phosphore dans le profil de sol suite aux apports de P, et la couverture végétale minimise la mobilisation des sédiments et du P particulaire. Les cultures de céréales à paille et de maïs présentent pour leur part des spéciations variables du P exporté, reflétant les capacités du modèle à simuler l'interaction des facteurs source et transport dans la mobilité du phosphore. L'influence relative de ces facteurs, tel que simulé par le modèle hydrologique, est aussi mise en relief en figure 24. Pour l'ensemble des classes de culture, l'exportation de P particulaire est corrélée avec le taux d'érosion. L'exportation de P soluble modélisée au moment des événements de ruissellement est pour sa part fortement corrélée aux apports de P. Cette corrélation reflète l'interaction des routines terrestres et hydrologiques du modèle, alors que les apports de P enrichissent le stock de P labile en surface du sol, à son tour déterminant de la richesse du ruissellement en P soluble.

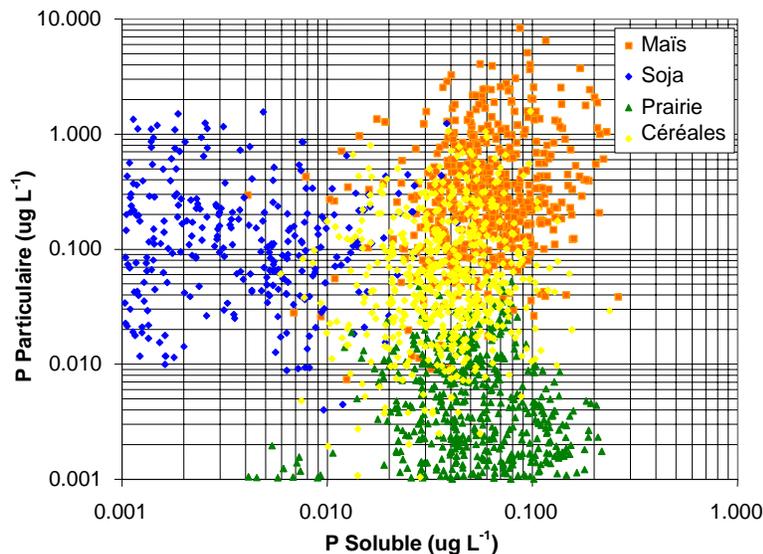


Figure 23 : Distribution des richesses et formes de phosphore pour les lames d'eau simulées par le modèle hydrologique et représentée en fonction des classes de culture.

Ces tendances dans la spéciation soluble/particulaire des flux de P simulés sont cohérentes avec ce qui est généralement rapporté dans la littérature dans le cadre de dispositifs d'étude en parcelle naturelle ou

en sol nu. Dans le cadre d'une étude sous simulation de pluie réalisée sur des sols du bassin versant de la Rivière aux Brochets, Michaud et Laverdière (2004) ont mesuré des concentrations de P soluble dans le ruissellement qui étaient pratiquement trois fois plus élevées sur une prairie par rapport à un sol labouré.

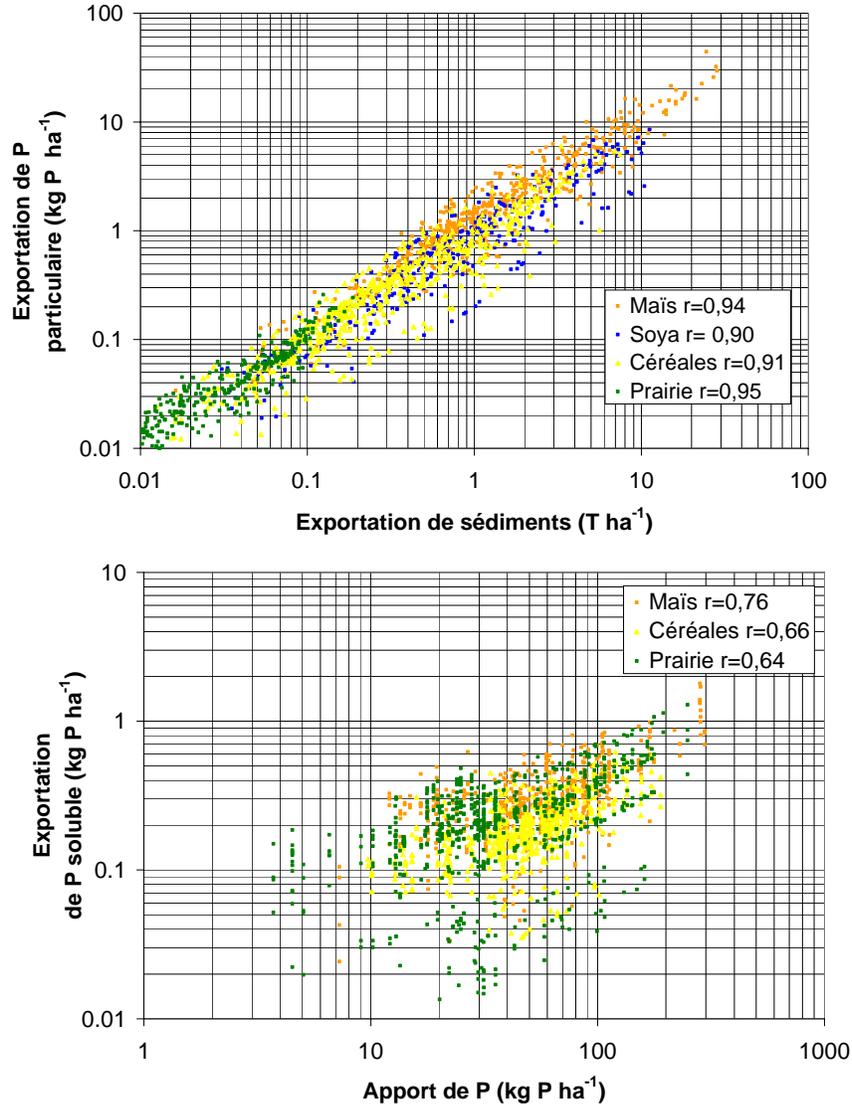


Figure 24 : Taux d'exportation de phosphore particulaire simulé en fonction du taux d'érosion (a) et taux simulé d'exportation du phosphore soluble en fonction de l'apport de P (b) à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique par classe de culture.

3.4 Scénarios agroenvironnementaux

Les résultats des différents PAAC sur le bilan hydrique de même que sur les exportations de sédiments et de phosphore sont présentés en deux étapes. Les résultats des simulations associés aux quatre types de

PAAC, soient le mode de gestion des engrais de ferme, les cultures de couverture, la culture sur résidus et l'aménagement hydro-agricole, sont d'abord présentés séparément. Pour chaque type d'intervention, l'effet du ciblage et du taux d'implantation de la PAAC sur le bilan modélisé des exportations diffuses est présenté selon des niveaux croissants d'implantation, soit 10%, 50% et 100% des superficies en culture annuelles potentiellement ciblées. En deuxième étape, la présentation des scénarios agroenvironnementaux mixtes fait intervenir différentes combinaisons de PAAC, appliquées de façon aléatoire ou ciblée au parcellaire du bassin versant de la Rivière aux Brochets.

3.4.1 Modalités d'épandage des engrais de ferme

Différentes combinaisons de périodes d'épandage et de délais d'incorporation des engrais de ferme ont été simulées à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets. Une analyse préliminaire de la sensibilité du modèle hydrologique a démontré que le délai d'incorporation s'avérait un facteur de risque de mobilité du phosphore beaucoup plus important que la saisonnalité de l'épandage. Considérant une incorporation sans délai des engrais de ferme (< 24 h), les exportations prédites de P pour la portion amendée du parcellaire se sont en effet montrées peu sensibles au transfert des volumes épandus entre les périodes printanière, estivale et automnale. La simulation d'un passage de 45% (itinéraire de référence) à 20% du volume annuel des engrais de ferme épandu au printemps résultait par exemple en une réduction négligeable des flux de P exportés. Cette influence relativement faible de la période d'épandage simulée par le modèle hydrologique traduit l'influence des pratiques culturales à redistribuer le P dans la couche arable du sol. Le pool de P labile présent dans les premiers 10 mm du sol, à partir duquel le modèle SWAT simule l'enrichissement du ruissellement, est alors considérablement réduit.

Globalement, l'élimination des délais à l'incorporation des engrais de ferme associés aux itinéraires techniques du scénario de référence s'est traduit en une réduction marginale des exportations de P simulées à l'échelle du bassin versant. Sur le plan hydrologique, l'incorporation en moins de 24 heures des engrais de ferme n'a aucun effet sur le bilan simulé à l'échelle des URH. Ceci découle du fait que le calendrier des travaux aratoires a été intégralement conservé dans le scénario agroenvironnemental. Seules les dates des apports organiques ont été modifiées, de façon à précéder d'une journée le travail du sol. Sur le plan de la mobilité du phosphore, l'élimination des délais à l'incorporation a amené une réduction globale de 3% des exportations de P à l'échelle du bassin versant par rapport au scénario de référence. La réduction est cependant très variable et dépend des précipitations reçues entre l'épandage des matières fertilisantes et le travail du sol, la perméabilité du sol propre à l'URH et la quantité des engrais de ferme appliquée. Pour la période d'étude 2000-2003, les réductions moyennes des exportations modélisées sur les champs de maïs et de céréales à paille se chiffrent respectivement à 0.1 et 0.4 kg P ha⁻¹. À l'échelle de l'URH, les réductions sensibles des exportations de P modélisées ne touchent qu'une portion limitée du parcellaire, mais atteignent jusqu'à 2.5 kg P ha⁻¹ ou 70% de réduction

par rapport aux exportations simulées dans le scénario de référence pour certaines URH associés à une faible perméabilité du sol et des taux élevés d'apport de P provenant d'engrais de ferme.

Tableau 14 : Exportations de phosphore prédites par le modèle hydrologique à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets pour le scénario d'optimisation des délais d'incorporation des engrais comparé au scénario de référence.

	Scénario de référence (avec délais d'incorporation)	Scénario sur les modalités d'épandage (incorporé en moins de 24 heures)
Exportation P total (kg)	46 974	44 910
% P soluble	25%	25%
Réduction des exportations de P total (%)		3%

L'influence marginale du délai d'incorporation simulée par le modèle hydrologique est surprenante à priori, compte tenu des observations sous pluie simulée dans la région à l'étude (Michaud et Laverdière, 2004) et ailleurs au Québec (Grando et *al.*, 1996; Gangbazo et *al.*, 1993) qui témoignent d'importantes exportations de P en présence d'engrais de ferme non enfouis et soumis à l'action du ruissellement. La période et le mode d'apport des engrais de ferme ont dès lors un effet sur l'entraînement évènementiel des apports récents de P dans les eaux de ruissellement (Heatwhite et *al.*, 2000; Haygarth et Jarvis, 1999; Gaynor et Findlay, 1995). La solubilité élevée du P contenu dans les fumiers présents en surface du sol et la faible densité des particules organiques contribuent à l'accroissement des charges de P biodisponibles, indépendamment de la richesse du sol en P. L'échelle de travail associée à la présente étude demeure cependant peu adaptée à la représentation du caractère évènementiel des mobilisations de P consécutifs aux épandages d'engrais de ferme.

Plusieurs facteurs inhérents à la présente modélisation contribuent à minimiser l'expression du risque de transport évènementiel. D'une part, les périodes du scénario de référence comprises entre l'épandage et le travail du sol demeurent relativement courtes et comptent pour une portion limitée de la hauteur d'eau ruisselée annuellement (Tableau 15). En appliquant la règle du 48 heures sans précipitations précédent le travail du sol, les délais à l'incorporation varient entre 6 et 16 jours annuellement pour la période 2000-2003 et affectent environ 25% de la superficie du bassin versant. Les précipitations tombées pendant ces délais varient entre 4 et 87 mm.

Compte tenu des algorithmes du modèle, un taux d'incorporation à l'épandage plus faible des engrais de ferme, imposé au scénario de référence, aurait généré une réponse plus importante des flux de P exportés. En conséquence, l'effet de du scénario d'incorporation immédiate des fertilisants aurait été plus important. Peu de données expérimentales permettent cependant de valider une modulation du taux d'incorporation à l'épandage en fonction des propriétés du parcellaire. Une réduction de 3% des exportations globales de P à l'échelle du bassin versant, associée à l'optimisation des délais d'incorporation des engrais de ferme, demeure une estimation théorique conservatrice. Elle n'exclue pas

que des réductions plus considérables puissent être atteintes à l'échelle du parcellaire, notamment sur des parcelles non drainées, en pente ou profilées en planches rondes. La mobilisation événementielle des engrais de ferme demeure un phénomène qui répond à un croisement, au plan spatial et temporel, de conditions spécifiques d'état des surfaces et de distribution des précipitations. Ces processus ne se prêtent pas à une modélisation hydrologique à l'échelle de travail considérée dans la présente étude.

Tableau 15 : Délais d'incorporation simulés dans le scénario de base en fonction des contraintes climatiques et précipitations moyennes tombées sur l'ensemble du bassin pendant ce délais pour les périodes printanières et automnales de 2000-2003.

Année	Printemps		Automne	
	Précipitation (mm)	Délais d'incorporation (jours)	Précipitation (mm)	Délais d'incorporation (jours)
2000	94	16	11.8	8
2001	4.2	6	24.2	10
2002	51.4	12	87.1	11
2003	18.9	6	79.5	12

3.4.2 Cultures de couverture

Trois scénarios impliquant des changements apportés à la rotation des cultures ont été modélisés sur l'ensemble des URH en cultures annuelles du bassin versant de la Rivière aux Brochets, soit :

- Une conversion aux fourrages de graminées et légumineuses fourragères pérennes (prairie);
- Une conversion aux céréales à paille avec implantation intercalaire d'une légumineuse pérenne en culture de couverture (culture de couverture associée);
- Une conversion aux céréales à paille avec implantation à la dérobée d'une culture de couverture de crucifère (culture de couverture dérobée),

Tel que mentionné précédemment en section méthodologie, l'effet des scénarios est évalué en fonction de différents taux d'implantation, aléatoire ou ciblée, des PAAC. Le tableau 16 présente les caractéristiques des superficies ciblées en culture annuelle selon leur degré de vulnérabilité aux exportations de P. À titre indicatif, les proportions de 10% et 50% de la superficie en culture annuelle correspondent respectivement à 5% et 27% de la superficie agricole totale du bassin. Comme en témoigne le tableau 16, la culture de maïs est particulièrement ciblée en raison de sa sensibilité au ruissellement, à l'érosion et de ses importants apports de P. La distribution spatiale des URH ciblés par l'adoption des PAAC à des taux de 10%, 50% et 100% des cultures annuelles correspondant aux URH les plus vulnérables aux exportations de P, est présentée à la figure 25.

Tableau 16 : Caractéristiques du parcellaire en culture annuelle affecté par les scénarios ciblés et appliqués à des taux de 10%, 50% et 100%

	Pourcentage du parcellaire ciblé par ordre décroissant de vulnérabilité aux exportations de P					
	10% ciblé		50% ciblé		100% ciblé	
Superficie (ha)	1 726		9 115		18 379	
Occupation :	- Maïs	91%	- Maïs	92%	- Maïs	67%
	- Soja	4%	- Soja	4%	- Soja	8%
	- Céréales	4%	- Céréales	5%	- Céréales	24%
	- Prairie	0%	- Prairie	0%	- Prairie	0%
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
Ruisellement (mm)	256	72	255	79	238	98
Exportation de matières en suspension (T ha ⁻¹)	5.7	5.1	2.3	4.0	1.4	2.7
Exportation de phosphore soluble (kg ha ⁻¹)	0.38	0.28	0.38	0.23	0.31	0.19
Exportation de phosphore total (kg ha ⁻¹)	7.1	5.8	3.2	4.4	1.9	3.0
Apport en engrais de ferme et minéraux (kg ha ⁻¹)	53	60	67	51	58	44
Pente (m/m)	0.041	0.023	0.021	0.029	0.017	0.028
Facteur d'érodabilité (0.013 tonne m ² h (m ³ tonne cm) ⁻¹)	0.24	0.11	0.22	0.10	0.21	0.09
Teneur initiale de phosphore labile dans le sol (kg P ha ⁻¹)	42	12	44	13	38	12

* Les moyennes présentées dans le tableau sont pondérées en fonction des superficies des URH

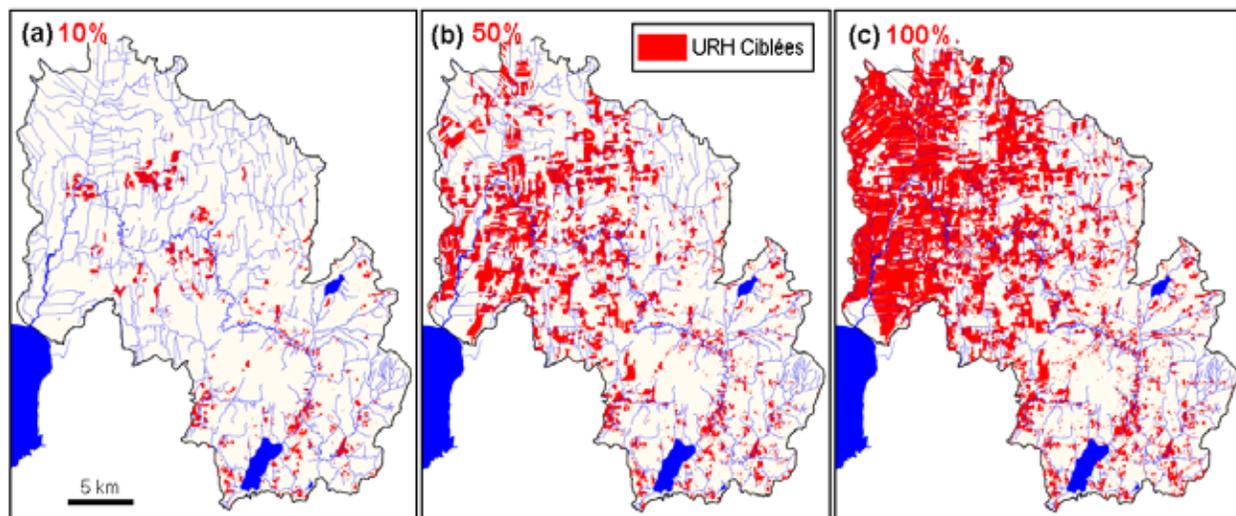


Figure 25 : Représentation de la distribution spatiale des URH en cultures annuelles ciblées par l'application des PAAC à des taux de 10% (a); 50% (b) et 100% (c).

Les résultats de la modélisation des scénarios de culture de couverture intègrent l'effet des pratiques culturales sur le bilan hydrique, le taux d'érosion, de même que sur le devenir des nutriments reproduit dans les routines terrestres du modèle. La modélisation des scénarios tient ainsi compte de la croissance de la culture de couverture et simule à la fois son prélèvement de nutriments et d'eau dans le sol, la protection du sol pendant sa croissance, de même que la décomposition des résidus après la mortalité automnale du crucifère ou l'enfouissement de la légumineuse. Globalement, la modélisation de

l'influence des cultures de couverture est associée à plusieurs modifications de l'état du sol, incluant sa rugosité, sa protection par une couverture végétale ou de résidus, son humidité et le cycle terrestre des nutriments. Plusieurs études réalisées au Québec démontrent les bénéfices sur la qualité du sol ainsi que la valeur économique de systèmes de rotations courtes. Côté et *al.* (1994) ont notamment démontré les bénéfices sur la structure du sol et les rendements d'une rotation courte de deux ans impliquant l'ensemencement de plantes fourragères, comme la luzerne ou le brome, entre les rangs du maïs ensilage, qui sont utilisées comme une prairie neuve soumise à trois récoltes de foin ensilé lors de la deuxième année.

Les tableaux 17 (a-c), détaillent les bilans hydriques et les exportations de P et MES annuels moyens simulés pour la période 2000-2003 sur l'ensemble du bassin versant de la Rivière aux Brochets suivant l'implantation ciblée ou aléatoire des scénarios de cultures de couverture. Prenons note que ces résultats traduisent l'influence des scénarios sur les bilans globaux du cycle de l'eau, des sédiments et du phosphore à l'échelle du bassin versant. Les contributions en eau, sédiments et phosphore des superficies en culture non ciblées par les PAAC de même que les URH sous couvert forestier ou en occupation urbaine sont intégrées aux résultats présentés.

À l'échelle du bassin versant, la simulation du scénario de culture de couverture affecte l'hydrologie de façon marginale. Le bilan hydrique global du bassin témoigne d'une faible augmentation de l'évapotranspiration et d'une légère diminution du ruissellement, attribuable à une présence prolongée d'une couverture végétale, comparativement au scénario de référence. Cependant, à l'échelle de l'URH, l'analyse des bilans hydriques révèle l'effet spécifique des cultures de couverture sur le parcellaire agricole. Une réduction moyenne de 100 mm de la hauteur de ruissellement, par exemple, est associée à la conversion des URH en culture annuelle en prairie permanente. Une augmentation moyenne de l'évapotranspiration annuelle d'environ 30 mm est par ailleurs simulée pour la période 2000-2003. L'appréciation visuelle des bilans hydriques journaliers de l'URH de référence de la série de sol Milton met nettement en relief l'effet d'une conversion de la culture de maïs à la prairie ou à la céréale avec couverture sur l'évolution journalière du bilan hydrique pour la période de référence 2002 (Figure 26). Les diminutions du ruissellement, associées à la substitution des cultures annuelles par des cultures pérennes et de couverture, varient entre 9% et 35%. Ces réductions de la lame d'eau ruissellée se manifestent principalement au cours des périodes printanière et automnale.

Au niveau des flux modélisés de sédiments, une réduction d'environ 80% est modélisée lors de la conversion des cultures annuelles en prairie ou céréale à paille accompagnée d'une culture associée alors qu'une diminution légèrement inférieure est notée pour le scénario impliquant des céréales à paille avec culture à la dérobée (68%). Cette différence découle de l'absence d'une culture couvrant le sol pendant la période printanière. À titre indicatif, Michaud et Laverdière (2004) ont mesuré sous conditions de pluie simulée, des réductions de charges sédimentaires moyennes de 78% pour une prairie par

rapport à un sol nu sur trois séries de sol typiques de la région. Le département de l'agriculture américain a mesuré une diminution des exportations de sédiments et de P d'environ 75% sur des parcelles de maïs avec une culture associée de trèfle rouge, soumises à des pluies simulées, comparativement à une parcelle de contrôle en maïs (Kleinman et *al.* 2005).

L'influence des cultures de couverture sur le bilan hydrique et l'érosion du parcellaire se répercute aussi de façon marquée sur les exportations du P. À titre indicatif, le scénario impliquant la substitution de la totalité des cultures annuelles du bassin par des cultures pérennes ou des céréales à pailles avec cultures de couverture engendre une réduction globale des exportations de P de l'ordre 60%. La comparaison de l'influence des scénarios sur les exportations simulées du P met en relief qu'une conversion à la céréale avec culture associée induit une réduction plus importante des flux de P qu'une conversion à la prairie permanente. À priori, cette projection simulée des effets des deux scénarios sur la mobilité du P surprend. Rappelons que la culture de couverture de légumineuse ou la chaume de crucifère sont maintenues jusqu'au printemps, et sont prises en compte par les algorithmes du modèle dans la simulation du ruissellement et des pertes de sol. Bien que la culture de couverture associée ou à la dérobée offre une fenêtre de temps relativement courte de sol à nu au printemps, le modèle hydrologique leur attribue néanmoins des taux annuels de ruissellement et d'érosion relativement plus élevés qu'en prairie permanente.

Cependant, les itinéraires de gestion des amendements dans les scénarios de culture de couverture sont différents de celui de la prairie. Les engrais de ferme épandus sur les URH de céréale à paille avec crucifère à la dérobée sont immédiatement incorporées au sol à la mi-août, alors que l'engrais de ferme est enfoui lors du labour de la légumineuse fourragère dans le scénario de culture associée. Les routines terrestres du modèle redistribuent alors le P dans le profil du sol, ce qui atténue l'enrichissement du ruissellement lors des précipitations subséquentes.

Contrairement aux cultures de couverture, la prairie permanente est sujette à la stratification du P dans la couche superficielle du sol qui interagit avec la lame d'eau ruisselée. Aussi, le scénario des cultures de couverture implique l'abandon de l'épandage automnal d'engrais de ferme, une période relativement active au plan hydrologique. En prairie, l'épandage après la troisième coupe se traduit ainsi par une vulnérabilité plus élevée aux exportations de P à cette période de l'année. Les modes et périodes d'apport des engrais de ferme associés aux scénarios de culture de couverture contribuent ainsi à leur efficacité à contenir les exportations de P à un niveau similaire, voir supérieur au scénario de prairie permanente. Ces influences simulées du système de culture sur la mobilité du P témoignent de la sensibilité du modèle SWAT à distinguer et intégrer l'influence de scénarios alternatifs de gestion des sols et des cultures sur les facteurs de transport (ruissellement et érosion) et du potentiel de mobilisation des sources de P.

Parallèlement aux réductions globales des flux de P exportés, la conversion des cultures annuelles dans les scénarios de cultures de couverture implique un accroissement de la fraction soluble du P mobilisé. La conversion théorique de 100% du parcellaire en cultures annuelles en prairies implique par exemple un accroissement de la fraction de phosphore soluble d'un niveau de 25 à 73%. Ce gradient dans la spéciation des formes de P est conforme aux observations citées dans la littérature en dispositifs d'étude en parcelles expérimentales sous pluie simulée et sous précipitations naturelles (Michaud et Laverdière, 2004; Sharpley et Halvorson, 1994; Kleinman et al. 2005).

La comparaison des réductions de charges de P et de MES associées à des taux croissants de conversion aux cultures de couverture (Tableau 17), de façon ciblée ou aléatoire, met en relief l'effet du ciblage spatial des PAAC sur le bilan global des exportations. Lorsque la vulnérabilité du parcellaire est considérée, la conversion de 10% des superficies sensibles en cultures annuelles au bénéfice de cultures plus couvrantes se traduit en des réductions atteignant 24% de P exporté et 31% des matières en suspensions. Un retrait aléatoire du même ordre n'entraîne que le tiers de ces gains. Ce résultat souligne la présence d'un gradient spatial bien démarqué au plan de la vulnérabilité du parcellaire du bassin versant de la Rivière aux Brochets et rapporté dans le cadre d'autres études en bassins versants en Amérique du Nord (Sharpley et al., 1994 ; Daniel et al., 1994). De la même façon, la comparaison des scénarios faisant intervenir une conversion ciblée de 50% des cultures annuelles indiquent des gains inférieurs d'environ 10% par rapport au scénario 100%. Cette réponse du modèle témoigne de contributions marginales de la moitié du territoire à la problématique environnementale du phosphore dans le bassin.

Tableau 17 : Effets de la conversion des cultures annuelles en prairies (a), en céréales à paille avec une culture de couverture à la dérobée (b), et en céréales à paille avec une culture de couverture associée sur l'évapotranspiration, le ruissellement, le débit, les exportations de matières en suspension et de phosphore prédites par SWAT selon des scénarios d'implantation aléatoire et ciblé dans le bassin versant.

(a) Scénario de conversion à la prairie	Taux et ciblage spatial de conversion des cultures annuelles en prairies					
	Base	100%	10% Ciblé	50% Ciblé	10% Aléatoire	50% Aléatoire
Évapotranspiration (mm)	566	575	567	570	567	571
Ruissellement (mm)	218	191	215	204	215	204
Débit (mm)	476	469	476	473	476	472
Exportation P total (kg)	46974	17363	35624	22377	43568	32725
% P soluble	25%	73%	33%	55%	27%	37%
Exportation MES (T)	31267	4417	21500	10031	28436	18615
Réduction des exportations de P total (%)		63%	24%	52%	7%	30%
Réduction des exportations de sédiments (%)		86%	31%	68%	9%	40%

(b) Scénario de conversion à la céréale avec culture de couverture à la dérobée	Taux et ciblage spatial de conversion des cultures annuelles en céréales avec une culture de couverture à la dérobée					
	Base	100%	10% Ciblé	50% Ciblé	10% Aléatoire	50% Aléatoire
Évapotranspiration (mm)	566	567	566	567	566	567
Ruissellement (mm)	218	202	216	210	216	210
Débit (mm)	476	476	476	476	476	476
Exportation P total (kg)	46974	21085	37161	25016	43922	34138
% P soluble	25%	50%	31%	44%	26%	32%
Exportation MES (T)	31267	9963	22958	13376	28889	20955
Réduction des exportations de P total (%)		55%	21%	47%	6%	27%
Réduction des exportations de sédiments (%)		68%	27%	57%	8%	33%

(c) Scénario de conversion à la céréale avec culture de couverture associée	Taux et ciblage spatial de conversion des cultures annuelles en céréales avec une culture de couverture associée					
	Base	100%	10% Ciblé	50% Ciblé	10% Aléatoire	50% Aléatoire
Évapotranspiration (mm)	566	567	566	567	566	567
Ruissellement (mm)	218	204	217	211	217	211
Débit (mm)	476	476	476	476	476	476
Exportation P total (kg)	46974	15017	35495	20708	43326	31144
% P soluble	25%	59%	32%	48%	26%	33%
Exportation MES (T)	31267	5885	21759	10558	28500	18960
Réduction des exportations de P total (%)		68%	24%	56%	8%	34%
Réduction des exportations de sédiments (%)		81%	30%	66%	9%	39%

3.4.3 Cultures sur résidus

Le tableau 18 présente les réductions des exportations de phosphore et de sédiments modélisées pour le parcellaire en culture annuelles du bassin versant de la Rivière aux Brochets en réponse à l'implantation de la culture sur résidus. Les résultats sont modulés en fonction des classes de culture et des groupes hydrologiques de façon à mettre en relief les différentes pratiques culturales simulées. Rappelons que les scénarios de semis direct ont été retenus pour les cultures de maïs et de soja pour les groupes

hydrologiques A et B, alors qu'un déchaumage primaire printanier (chisel ou pulvérisateur lourd) a été appliqué aux sols du groupe hydrologique C et un déchaumage primaire automnal a été retenu pour le groupe D. Le semis direct des céréales à paille a pour sa part été appliqué à tous les groupes hydrologiques.

Pour l'ensemble de ces scénarios, le délai d'incorporation des engrais de ferme a été optimisé (<24 h). En semis direct du maïs, l'ensemble des épandages ont été appliqués en post-levée des cultures et comportent un enfouissement superficiel, simulant l'effet des jeux de coutres et de disques associés aux rampes d'épandage basse pression. En pratique de déchaumage automnal, la régie des épandages associée au scénario de référence est maintenue. En pratique de déchaumage printanier, les applications automnales associées au scénario de référence sont rapportées au printemps, précédant le déchaumage, et à l'été en post-levée de la culture. Pour les céréales à paille en semis direct, l'épandage se limite aux applications printanières, en simulant un enfouissement superficiel par rampe basse pression.

Au sein du modèle, la sélection de nouveaux outils de travail du sol dans les itinéraires techniques a induit des changements dans la profondeur et le coefficient de mixage de la couche de sol travaillée, ce qui a affecté la distribution du P dans la couche arable. Les coefficients de rugosité du sol ont aussi été ajustés à la hausse de façon à refléter l'état des surfaces non labourées et la présence de résidus. Enfin, les indices de ruissellement (no. courbe CN) et les facteurs de couverture (facteur C de MUSLE) ont été actualisés par SWAT en fonction de la croissance des plantes, à partir et d'indices initiaux représentatifs des états de surface. Globalement, les résultats de la modélisation décrits au tableau 19 reflètent l'influence de la nouvelle régie de culture sur les propriétés physiques du parcellaire (rugosité de surface, interception, infiltration et ruissellement) de même que l'effet d'une redistribution du P dans la couche arable.

Dans l'ensemble, la simulation des scénarios de culture sur résidus selon le groupe hydrologique du sol s'est traduit en une réduction de 35 mm de la hauteur d'eau moyenne ruisselée, de même que des réductions de flux moyens de sédiments et de phosphore de l'ordre de 53% et 43%, respectivement, par rapport au scénario de référence en pratique conventionnelle comportant un labour automnal (Tableau 19). Ces résultats simulés sont cohérents avec les observations généralement rapportées en Amérique du Nord dans le cadre d'étude en parcelles sous pluie naturelle et simulée (McGregor et al., 1999; Meyer et al., 1999; Franti et al. 1999; Dabney et al., 2000; Gilley et al., 1986). Par exemple, sous des conditions de pluies naturelles, le recours au travail réduit sur des parcelles instrumentales de maïs-grain (pentes de 5% sur un loam limoneux) a diminué l'érosion de plus de 92%, engendrant une réduction des exportations de N et P total de 70% et 80% respectivement (McDowell et al., 1984). Néanmoins, les auteurs ont rapporté une augmentation des flux de N et P solubles dans le ruissellement.

De façon générale, les résultats de la modélisation soulignent un changement des formes de P simulées en réponse aux scénarios de culture sur résidus. Globalement, la fraction soluble du P augmente de 5% lors de la modélisation du scénario impliquant la conversion de la totalité des cultures annuelles en culture sur résidus. Une telle augmentation, associée à une réduction globale des exportations, reflète les observations rapportées dans la littérature (Romkens et *al.*, 1974; Gaynor and Findlay, 1995). Cette augmentation des pertes solubles est attribuée à l'effet combiné de l'accroissement de la couverture de résidus, la diminution de l'incorporation des fertilisants et des pertes de sol (McDowell et McGregor, 1980; Kronvang et *al.*, 2005; Carter, 1998; Withers et *al.*, 1998). Aussi, il est généralement rapporté que sur des sols ayant des risques d'érosion faible, les techniques de travail réduit du sol ont un effet significativement moins important que sur les sols présentant des risques élevés d'érosion (Kronvang et *al.*, 2005).

Les prédictions compilées au tableau 19 mettent par ailleurs en relief un gradient dans l'efficacité des systèmes de culture sur résidus à contenir les exportations diffuses de MES et de P en fonction du groupe hydrologique du sol. Bien que le pourcentage de réduction des exportations de sédiments et de P associé à la culture sur résidus tend à être plus élevé sur les sols présentant une bonne capacité d'infiltration (groupes hydrologiques A et B), les réductions exprimées sur une base massique ne suivent pas nécessairement la même tendance. Les simulations indiquent par exemple qu'un déchaumage primaire du sol d'une parcelle présentant un mauvais drainage interne, peut conduire à une réduction des exportations de P plus importante, sur une base massique, que celle associée à l'implantation du semis direct sur une parcelle bien drainée de même superficie. Cette prédiction de l'efficacité environnementale de la PAAC, qui prend en compte les particularités hydrologiques du parcellaire, est désirable au plan du processus décisionnel. Elle est redevable, en fait, à la structure du modèle hydrologique, alors que les algorithmes du module de prédiction des taux d'érosion (MUSLE) utilise en intrant la prédiction journalière de ruissellement de l'unité de référence hydrologique.

Le tableau 19 présente l'impact de différents niveaux de ciblage spatial d'implantation de la culture sur résidus sur le bilan global des exportations de sédiments et de phosphore à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets. Similairement aux projections des effets des cultures de couverture, une implantation ciblée de la culture sur résidus sur une portion relativement faible du territoire conduit à des gains environnementaux tangibles à l'exutoire du bassin versant en raison de la forte variabilité de la vulnérabilité du parcellaire aux processus de mobilisation des sédiments et du phosphore. La conversion des 1726 ha en cultures annuelles les plus vulnérables du bassin versant, en système de cultures sur résidus se traduit, par exemple, en des réductions simulées d'environ 5 000 T de MES et de 4 600 kg de P annuellement, correspondant à 10 et 16% des charges globales respectives de phosphore et de sédiments exportées à l'exutoire du bassin versant.

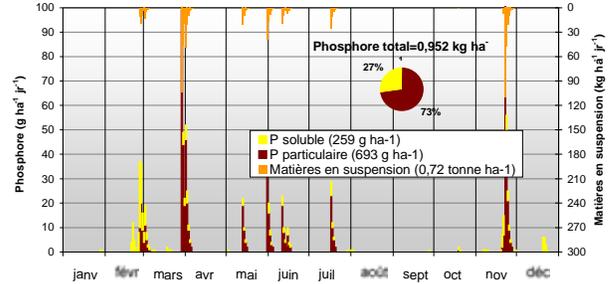
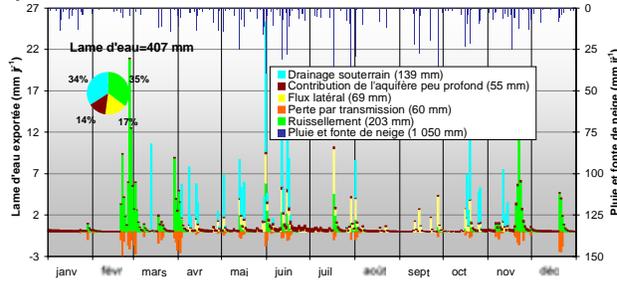
Tableau 18: Réductions moyennes pondérées pour la superficie des URH, pour la période 200-2003, des exportations de sédiments et de phosphore associées à l'implantation de la culture sur résidus sur le parcellaire en cultures annuelles du bassin versant de la Rivière aux Brochets selon la classe de culture et le groupe hydrologique des URH.

Culture	Groupe hydrologique des sols	Diminution du Ruissellement (mm)	P total			MES		
			Exportation du scénario de référence (kg ha ⁻¹)	Réduction (kg ha ⁻¹)	% de réduction	Exportation du scénario de référence (T ha ⁻¹)	Réduction (T ha ⁻¹)	% de réduction
Maïs	A	32	1.08	0.45	41%	0.75	0.46	61%
	B	32	2.77	1.12	40%	1.99	1.11	56%
	C	29	2.13	0.94	44%	1.68	0.90	53%
	D	30	3.18	1.23	39%	1.82	0.81	45%
	Total	30	2.47	1.03	42%	1.74	0.90	51%
Céréales à paille	A	53	0.39	0.28	71%	0.36	0.28	77%
	B	47	0.87	0.59	68%	0.75	0.54	72%
	C	42	0.59	0.35	58%	0.50	0.34	67%
	D	29	1.10	0.51	46%	0.74	0.43	58%
	Total	41	0.74	0.43	58%	0.59	0.40	67%
Soja	A	52	0.56	0.13	24%	0.64	0.38	59%
	B	53	1.39	0.33	23%	1.43	0.66	46%
	C	39	1.07	0.35	33%	1.54	0.66	43%
	D	87	1.07	0.53	50%	1.06	0.57	54%
	Total	57	1.12	0.40	36%	1.35	0.63	46%
Toutes		35	1.94	0.83	43%	1.43	0.75	53%

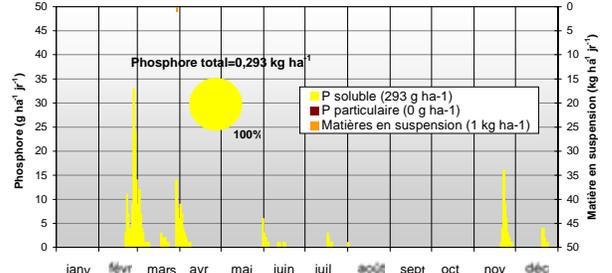
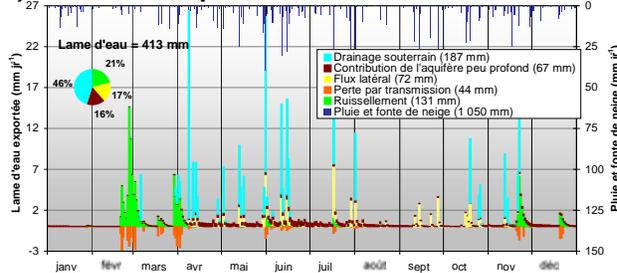
Tableau 19 : Effets de taux croissants et du ciblage spatial de l'implantation de la culture sur résidus sur l'évapotranspiration, le ruissellement, le débit, les exportations globales de sédiments et de phosphore simulées à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets.

	Taux et ciblage spatial de l'implantation des scénarios de culture sur résidus					
	Base	100%	10% Ciblé	50% Ciblé	10% Aléatoire	50% Aléatoire
Évapotranspiration (mm)	566	561	566	565	567	564
Ruissellement (mm)	218	208	217	213	217	213
Débit (mm)	476	481	477	478	477	479
Exportation P total (kg)	46 974	31 708	42 356	35 199	45 158	39 333
% P soluble	25%	30%	27%	30%	25%	27%
Exportation MES (T)	31 267	17 433	26 331	20 295	29 717	24 500
Réduction des exportations de P total (%)		32%	10%	25%	4%	16%
Réduction des exportations de sédiments (%)		44%	16%	35%	5%	22%

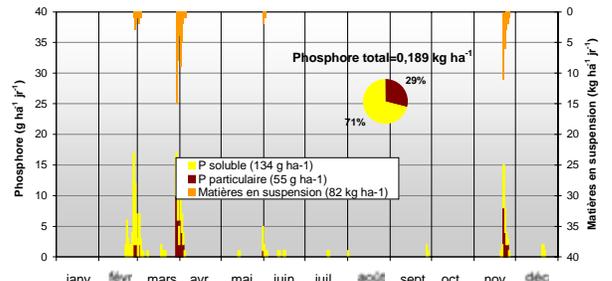
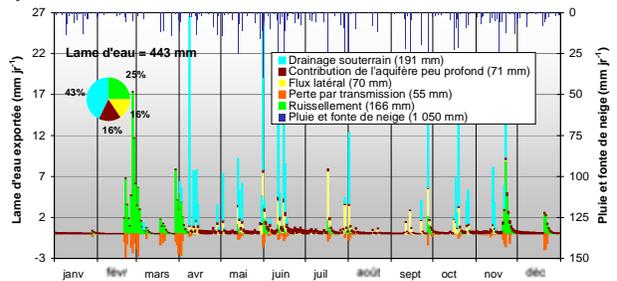
a) Scénario de référence



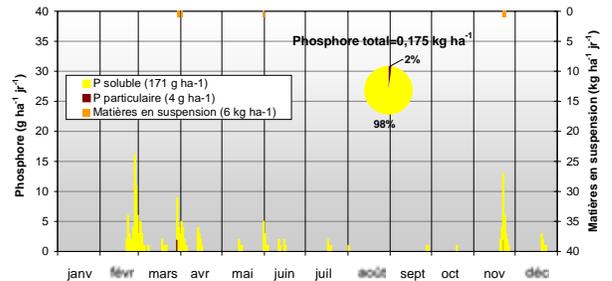
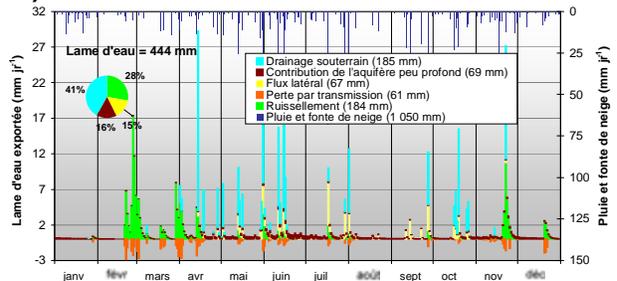
b) Scénario de prairie



c) Scénario de céréales avec culture de couverture à la dérobée



d) Scénario de céréales avec culture de couverture associée



e) Scénario de culture sur résidus

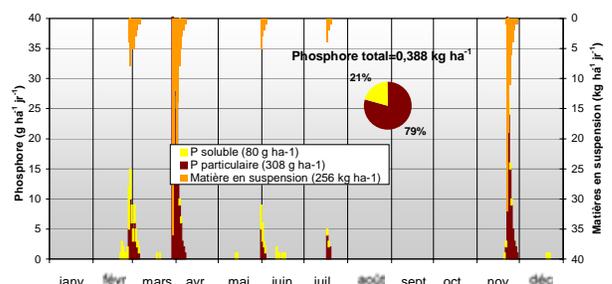
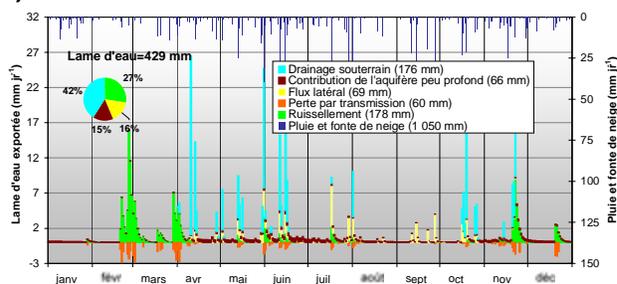


Figure 26 : Séries chronologiques journalières du bilan hydrologique, des exportations de matières en suspension et de phosphore pour l'unité de référence hydro-pédologiques Milton (maïs sur loam sableux mal drainé en pente de 0.7%) associées au scénario de référence (a) et aux différents scénarios agroenvironnementaux de culture de couverture et culture sur résidus (b-e).

3.4.4 Aménagements hydro-agricole

Dans une perspective de gestion intégrée du système de production végétale visant à réduire les exportations diffuses de sédiments et de nutriments, l'aménagement hydro-agricole du parcellaire joue un rôle complémentaire aux pratiques culturales de conservation. La culture sur résidus ou les cultures de couverture demeurent la première ligne de défense agroenvironnementale par leurs effets sur les zones d'émission au champ, limitent à la source le volume et la capacité de transport du ruissellement au champ. Les bandes riveraines interviennent plus en aval, en brisant la connectivité hydrologique entre le champ et le cours d'eau et en piégeant une partie des nutriments et des sédiments transportés dans le ruissellement. Les ouvrages de contrôle du ruissellement interviennent dans les zones où se concentre le ruissellement et provoquent un laminage de la crue et la sédimentation.

Dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets, l'aménagement de bandes riveraines pérennes et de fossés-avaloirs constituent les principaux investissements au chapitre hydro-agricole réalisés par les entreprises agricoles, avec le soutien technique et financier de la Coopérative de solidarité de la Rivière aux Brochets et du Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'alimentation. Compte tenu du degré élevé d'acceptabilité de ce type d'aménagement hydro-agricole dans la région, l'implantation de bandes riveraines et de fossés-avaloirs a été retenue comme scénario agroenvironnemental dans le cadre de la présente modélisation hydrologique. Tel que présenté précédemment en section méthodologique, la simulation de l'effet des aménagements hydro-agricoles à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets a été supportée de façon totalement empirique sur la base de coefficients d'efficacité de piégeage (CEP).

L'efficacité attribuée à l'implantation de bandes riveraines le long des cours d'eau réglementés du bassin est de l'ordre de 7% de la charge annuelle de P exportée du parcellaire agricole. La réduction attribuée grimpe à 19% lorsque la bande riveraine est complétée par des ouvrages de contrôle du ruissellement. Ces estimations reflètent globalement la réduction de l'ordre de 25% de la concentration moyenne en en phosphore total, pondérée pour le débit du ruisseau, en réponse aux aménagements hydro-agricoles implantés dans le bassin versant du Ruisseau au Castor (Michaud et *al.*, 2005). Une estimation de l'ordre de 7%, attribuée à l'efficacité des bandes riveraines, est conservatrice lorsqu'on la compare aux observations rapportées en dispositifs d'étude en parcelles expérimentales (Duchemin et *al.*, 2004; Lawrence et *al.*, 2002). Rappelons que les efficacités de piégeage attribuées aux bandes et aux fossés-avaloirs ont été départagées sur la base des répartitions des cheminements hydrologiques de surface modélisés à l'échelle du bassin versant expérimental du Ruisseau Walbridge (6 km²) où Michaud et *al.* (2004) y ont établi que 33% du parcellaire en culture de ce petit bassin, tributaire de la Rivière aux Brochets, se drainait vers les talus de cours d'eau, alors que la majeure partie (67%) s'égouttait vers les fossés de surface. Considérant une efficacité de l'ordre de 30% associée à une bande riveraine de 3 m, généralement admise dans la littérature pour des ratios de superficie contributive inférieur à 30 : 1, et une

contribution du tiers de la superficie du parcellaire, il en résulte une efficacité globale de 9%. Le partage des contributions bande riveraine/fossés-avaloirs, sur la base du 25% d'efficacité globale, attribue ainsi 16% de réduction aux ouvrages de contrôle du ruissellement. Dans le cadre de la présente modélisation à l'échelle du bassin versant, ces efficacités de piégeage n'ont été attribuées qu'aux fractions particulières de P, de façon à ne pas dupliquer l'influence des scénarios de gestion de la fertilisation. L'effet net sur l'exportation de P total est de 9 et 16%, respectivement, pour la bande riveraine et les ouvrages de contrôle du ruissellement.

Dans une perspective opérationnelle, l'interprétation à donner aux efficacités des aménagements hydro-agricoles intégrés aux scénarios agroenvironnementaux doit tenir compte du contexte spécifique de l'intervention réalisée sur le bassin du Ruisseau au Castor. Concrètement, les efficacités attribuées aux bandes riveraines ou aux fossés-avaloirs ailleurs dans le bassin sont conceptuellement liées aux particularités de l'aménagement du bassin expérimental, incluant :

- Un aménagement de la portion du parcellaire la plus active au plan hydrologique, en position basse du relief. Pour le Ruisseau au Castor, la portion aménagée contribue à environ 42% de la superficie totale du bassin;
- La portion non-drainée souterrainement a profité d'implantation systématique de fossés-avaloirs (50 sur 10 km²);
- L'implantation d'une bande riveraine permanente, d'une largeur de un à trois mètres en haut des talus, de façon à accommoder la croissance d'une haie arbustive. Dans le projet pilote, la bande riveraine arbustive a été systématiquement implantée le long du tronçon principal du ruisseau.

3.4.5 Scénarios mixtes

La modélisation de scénarios agroenvironnementaux mixtes implique l'attribution de différentes pratiques agricoles et d'aménagement hydro-agricole de conservation (PAAC) à des portions variables et ciblées du parcellaire en culture. La procédure utilisée met à profit la structure spatiale du modèle SWAT, qui permet de combiner différents itinéraires techniques de gestion du parcellaire et de les associer aux URH désirés. Tel que décrit précédemment en section méthodologique, l'approche retenue dans la conception des scénarios mixtes repose sur les principes suivants :

- Ultiment, les scénarios ciblent une réduction annuelle moyenne de 41% du flux total de phosphore total à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets, telle qu'établie dans l'entente Québec/Vermont sur la réduction des flux de P vers la Baie Missisquoi (Gouvernements du Québec et de l'état du Vermont, 2002). Le pourcentage de réduction associé aux scénarios mixtes est établi sur la base des flux modélisés dans le scénario de référence pour la période d'étude 2000-2003.

- Les scénarios mettent à profit la représentation spatiale de la vulnérabilité du parcellaire aux exportations de phosphore pour cibler l'attribution des PAAC. Le flux annuel moyen de P total établi à l'échelle de l'URH dans le scénario de référence est utilisé comme critère de ciblage pour l'application des PAAC.
- Les scénarios sont conçus et analysés de façon ordonnée, en faisant intervenir d'abord les PAAC présentant le moins de contraintes au plan technico-économique, et en considérant des taux croissant d'implantation de 10%, 50% ou 100% des superficies applicables.

Le ciblage spatial des URH les plus vulnérables et la sélection de PAAC selon leur niveau de contraintes technico-économiques permettent de générer une infinité de combinaisons URH/PAAC à l'échelle du bassin versant. De façon à générer des scénarios réalistes qui minimisent les contraintes et optimisent les retombées environnementales, une approche progressive a été retenue dans la sélection et le ciblage des PAAC:

Les scénarios agroenvironnementaux de base impliquent la protection des plaines inondables (290 ha), l'implantation généralisée de bandes riveraines et de fossés-avaloirs et l'optimisation des délais d'incorporation des engrais de ferme (Tableau 20, scénarios 1 à 8).

Les scénarios de conversion aux pratiques culturales de conservation font intervenir l'implantation de cultures sur résidus et de cultures de couverture, sans toutefois affecter la rotation des cultures principales (Tableau 20, scénarios 9 à 16).

Les scénarios de substitution des cultures impliquent la conversion des superficies en cultures annuelles les plus vulnérables, en céréales à paille comportant une culture de couverture associée ou à la dérobée (Tableau 21, scénarios 17 à 25).

Pour l'ensemble des scénarios agroenvironnementaux, les contributions des bandes riveraines et des ouvrages de contrôle du ruissellement à la réduction des exportations sont simulées à posteriori. Quel que soit le type ou le taux d'implantation des PAAC considérées, des coefficients d'atténuation respectifs de 9 et de 16% pour la bande riveraine et les ouvrages de contrôle du ruissellement sont appliqués aux exportations modélisées de P particulière.

3.4.5.1 Scénario agroenvironnemental de base

Le scénario d'intervention agroenvironnemental de base implique la protection des plaines inondables (Tableau 20, scénario 1), l'optimisation des délais d'incorporation des engrais de ferme (Tableau 20,

scénario 2), de même que l'aménagement hydro-agricole du parcellaire au moyen de bandes riveraines (Tableau 20, scénario 3), complétés ou non par des ouvrages de contrôle du ruissellement (Tableau 20, scénario 4). Globalement, la réduction des exportations de phosphore associée à une généralisation de l'application de ces mesures à l'échelle du bassin versant est estimée entre 10 et 21% de l'exportation globale de P (Tableau 20, scénarios 7 et 8), si on considère ou non l'implantation d'ouvrages hydro-agricoles.

Protection des plaines inondables

Une portion significative du parcellaire en culture de la portion aval du bassin versant de la Rivière aux Brochets est soumise de façon épisodique aux inondations en raison de refoulements liés à la montée des eaux dans la Baie Missisquoi ou aux embâcles hivernales et printanières (Figure 27). Une attention particulière doit être portée à ces secteurs en raison de leur vulnérabilité élevée aux exportations diffuses. Celle-ci tient à l'importance des lames d'eau ruisselées, associées à des capacités d'arrachement et de transport de sédiments très élevées. Le parcellaire inondé est d'autant plus vulnérable si les champs ont été labourés et/ou amendés à l'automne.

Il demeure cependant difficile de quantifier l'importance de la mobilisation/rétention des zones inondables. Compte tenu des limitations du modèle SWAT à situer et à simuler le phénomène des inondations, la cartographie des plaines inondables réalisées par le Centre d'expertise hydrique du Québec (MDDEP, 2005) a été utilisée pour identifier les URH inclus dans la zone inondable de grand courant de récurrence 0-20 ans. Celle-ci couvre approximativement 290 ha longeant la portion aval de la Rivière aux Brochets (0.5% du bassin).

La substitution des superficies en cultures annuelles périodiquement inondées, par des prairies permanentes, sans apport d'engrais de ferme, a d'abord été considérée dans le scénario agroenvironnemental de base. L'effet de ces conversions sur le bilan des exportations de sédiments et de phosphore a été estimé dans le modèle hydrologique en procédant à la substitution d'itinéraires techniques de prairie permanente non-amendée, aux itinéraires originaux du scénario de référence des URH localisés en plaine inondable. Compte tenu de la méthodologie utilisée, une diminution de l'ordre de 0.7% des flux totaux de P du bassin est attribuée à la substitution des cultures annuelles dans la plaine inondable. Cette estimation conservatrice est basée sur la seule influence des nouvelles pratiques culturales sur l'hydrologie des parcelles, et fait abstraction des hauteurs d'eau attribuables au refoulement du réseau hydrographique, non modélisées dans le cadre de la présente étude. Une réduction de 0.7% des apports annuels simulée pour une substitution des cultures annuelles de la plaine inondable constitue donc une projection minimale de l'efficacité associée à cette mesure et ne considère pas le potentiel de captage des sédiments et des éléments nutritifs que peuvent présenter ces zones périodiquement inondées.



Source : R. Lauzier, 2005

Figure 27: Champs situés dans la zone inondable de grand courant de récurrence 0-20 ans de la Rivière aux Brochets

Dans des systèmes de rivières et de plaines inondables temporairement submergées, plusieurs études soulignent l'important potentiel de captage des sédiments et nutriments des zones riveraines végétalisées (Walling et *al.*, 1994, Krovang et *al.*, 2002). Par exemple, la caractérisation de trois inondations de la Rivière Gjern au Danemark a estimé une *efficacité de rétention*¹ des sédiments et du P particulaire variant respectivement de 6% à 24% et de 3% à 5%. Alors que le suivi des plaines inondables restaurées de la Rivière Brede (Danemark) a révélé une efficacité de rétention de 47% des sédiments et de 7% du phosphore particulaire pendant l'hiver 1994-1995 (Kronvang et *al.* 2005). Annuellement, Brunet et *al.* (2000) ont observé des phases cycliques de mobilisation et de rétention de l'azote, du phosphore et des matières en suspension dans la Rivière Adour, située au sud-ouest de la France.

L'optimisation des délais d'incorporation des engrais de ferme

La réduction des exportations diffuses de phosphore simulée pour l'optimisation des délais d'incorporation à l'épandage est de l'ordre de 3%. Tel que discuté en section 3.4.1, il s'agit d'une estimation conservatrice qui met en relief les limites de la présente échelle d'étude à rendre compte de la mobilisation événementielle des engrais de ferme. Au plan opérationnel, l'incorporation des engrais de ferme est cependant à garder en tête de liste parmi les stratégies de prévention à la source des exportations diffuses de sédiments et autres sources de contamination des eaux de surface. Rappelons ici que tous les itinéraires techniques des scénarios de pratiques culturales de conservation intègrent une telle incorporation des engrais de ferme en moins de 24 heures.

¹ L'efficacité de rétention correspond ici à la quantité de sédiment et de P particulaire déposé dans la zone inondable divisé par le transport dans la rivière pendant ces événements d'inondation.

Aménagement de bandes riveraines et de fossés-avaloirs

L'efficacité attribuée à l'implantation de bandes riveraines le long des cours d'eau réglementés du bassin est de l'ordre de 7% de la charge annuelle de P exportée du parcellaire agricole. La réduction attribuée grimpe à 19% lorsque la bande riveraine est complétée par des ouvrages de contrôle du ruissellement. Tel que discuté en section 2.9.5, cette estimation de l'influence de l'aménagement hydro-agricole à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets est totalement empirique et reproduit l'influence sur la qualité de l'eau de bandes riveraines arbustives et de fossés-avaloirs documentée dans l'étude du bassin versant du Ruisseau au Castor (Michaud et *al.*, 2005). Le scénario-type d'aménagements hydro-agricoles associe une efficacité de piégeage de 19%, simulé pour l'ensemble du bassin, comprendrait ainsi 1) l'aménagement de *fossés-avaloirs* sur les parcelles les plus *hydro-actives* du parcellaire, en position basse du relief, tributaires des tronçons principaux du réseau hydrographique et non-drainées souterrainement, de même que 2) l'implantation systématique de bandes riveraines permanentes de 1 à 3 mètres en haut des talus de façon à accommoder la croissance d'une haie arbustive.

L'efficacité limitée des bandes riveraines, tient à la haute densité des cours d'eau aménagés à des fins agricoles, à l'instar des autres régions agricoles québécoises, ainsi qu'au cadastre des terres typiquement allongée, généralement orientée dans le sens du gradient topographique, qui favorise l'égouttement par l'entremise des raies de curage et des fossés. Les fossés-avaloirs ou autres ouvrages de contrôle du ruissellement offrent pour leur part la possibilité d'influencer la plus large part de la superficie du parcellaire contributive au ruissellement. Rappelons cependant que la préservation des bandes riveraines contribue à la stabilisation des talus de cours d'eau, qui se traduit à long terme par la préservation de l'égouttement souterrain du parcellaire. Le modèle hydrologique ne met pas en perspective les implications environnementales et économiques globales associées à cet important enjeu. L'égouttement des terres constitue en effet le principal facteur limitant de la productivité des cultures au Québec. Il constitue aussi un des principaux facteurs de risque de contamination diffuse des eaux de surface, tel que démontré dans le cadre de la présente simulation hydrologique. Dans une perspective opérationnelle, la prévention de l'érosion des cours d'eau et de l'accumulation de sédiments est donc un investissement *gagnant-gagnant* pour l'entreprise agricole et l'ensemble de la communauté rurale. La préservation des bandes riveraines et les ouvrages de contrôle du ruissellement s'inscrit dès lors dans une approche intégrée de gestion de l'eau à l'échelle de la ferme et du réseau hydrographique qui comprend plusieurs aspects :

- À commencer par une pratique culturale qui favorise la rugosité de surface de la parcelle et l'infiltration de l'eau, surtout à la fin de l'automne, en prévision du grand « flush » printanier;
- Un rabattement rapide de la nappe phréatique par un drainage souterrain efficace;

- Un drainage de surface qui favorise le morcellement de la lame de ruissellement;
- Une évacuation en douceur des pointes de crue printanière par des structures de captage aménagées aux endroits stratégiques;
- Et enfin, l'aménagement de zones riveraines qui brisent la connectivité de l'écoulement de l'eau entre le champ et le ruisseau et piègent une partie des sédiments et des autres sources de contamination de nature particulière.

3.4.5.2 Scénarios avec conversion aux pratiques agricoles de conservation

Les scénarios agroenvironnementaux no. 9 à 16 présentés au tableau 20 considèrent l'implantation de pratiques culturales de conservation sur des portions variables du parcellaire agricole, selon un ciblage spatial aléatoire ou ciblé. Rappelons que les scénarios de cultures sur résidus et les cultures de couverture n'influencent pas les rotations des cultures principales considérées dans le scénario de référence, autres que la préservation des 290 ha en culture dans les plaines inondables. Les scénarios de conversion aux pratiques culturales intègrent aussi systématiquement l'optimisation des modes d'épandage d'engrais de ferme et la préservation des bandes riveraines incluses au scénario de base.

Rappelons enfin que les coefficients de piégeage utilisés afin de modéliser l'effet des structures de captage s'appliquent à posteriori aux charges modélisées propres à chaque URH, quel que soit l'itinéraire technique considéré. Cette approche permet ainsi de tenir compte de l'effet cumulatif de l'aménagement hydro-agricole et des pratiques agricoles de conservation sur le bilan des exportations de l'URH. Compte tenu que les coefficients de piégeage n'ont été appliqués qu'à la fraction particulaire du phosphore, les réductions des exportations de P total tendent à être moins importantes sur le parcellaire où les pratiques agricoles de conservation sont appliquées. Cette efficacité moindre de la bande riveraine et des fossés-avaloirs tient au fait que la proportion du P exporté sous forme soluble augmente sur les URH où ces PAAC sont implantées.

À titre indicatif, l'adoption de la culture sur résidus sur l'ensemble du parcellaire en culture de maïs et de soja, combinée à l'implantation de légumineuses fourragères en association aux céréales à paille cultivées dans le bassin versant, résultent en une réduction de 47% des sédiments et 35% du phosphore total exporté dans le bassin (scénario no. 9). En combinant les réductions associées à la protection des plaines inondables aux modes d'épandage optimisés et aux bandes riveraines, les diminutions des charges prédites de sédiments et de phosphore atteignent 53% et 40%, respectivement (scénario no. 10). Globalement, ces simulations mettent en relief un rapport/coût bénéfique relativement élevé des pratiques culturales dans l'atténuation des exportations de P prédites, comparativement aux ouvrages de contrôle de ruissellement. Sur la base du scénario de no. 7, l'implantation systématique de pratiques culturales de conservation (scénario no. 10) induit des réductions d'exportations diffuses de P qui sont près de trois fois celles associées à l'aménagement de structures de captage (scénario no. 8). Ces efficacités contrastées

suggèrent que les pratiques culturales doivent être considérées comme étant la première ligne de défense en matière de contrôle du ruissellement. La culture sur résidus et les cultures de couverture interviennent sur les zones d'émission au champ, et limitent à la source le volume et la capacité de transport du ruissellement. Dans une perspective de gestion intégrée du système cultural, les aménagements hydro-agricoles sont appelés à jouer un rôle complémentaire aux pratiques culturales de conservation. Les bandes riveraines interviennent ainsi plus en aval, en brisant la connectivité hydrologique entre le champ et le cours d'eau et en piégeant une partie des nutriments et des sédiments transportés dans le ruissellement. Les ouvrages de contrôle du ruissellement interviennent pour leur part dans les zones où se concentrent le ruissellement et provoquent un laminage de la crue et la sédimentation.

Une adoption généralisée des techniques de culture sur résidus et de culture de couverture sur l'ensemble du parcellaire agricole du bassin versant de la Rivière aux Brochets n'apparaît cependant pas comme un scénario réaliste. D'une part, l'adoption de nouvelles pratiques culturales par les gestionnaires d'entreprises agricoles résulte généralement d'un processus décisionnel volontaire, qui peut être encouragée par un soutien technique et financier. D'autre part, les particularités du système cultural et du parcellaire, notamment son égouttement, peuvent limiter la faisabilité de la culture sur résidus ou de couverture. Les scénarios de conversion de 50% des superficies en cultures annuelles (scénarios no. 13 à 16) apparaissent donc plus réalistes. Lorsque les efficacités relatives de ces scénarios sont comparées, la pertinence de cibler les portions du parcellaire les plus vulnérables dans l'implantation des pratiques culturales de conservation est particulièrement mise en relief. La simulation aléatoire des pratiques culturales de conservation sur 50% du parcellaire en culture, par exemple, se traduit en une réduction de 25% des exportations totales de P à l'exutoire du bassin (scénario no. 13). Le ciblage spatial des mêmes PAAC sur une superficie équivalente, mais présentant les vulnérabilités les plus élevées du bassin, augmente l'efficacité globale du scénario « 50%-PAAC » (scénario no. 15) à 32% de réduction des flux totaux de P.

Tableau 20 : Ruissellement et exportations de sédiments, phosphore soluble et phosphore total pour l'ensemble du bassin versant de la Rivière aux Brochets résultant de la mise en œuvre de scénarios agroenvironnementaux de base et de scénarios comportant la conversion aux pratiques culturales de conservation.

Numéro du scénario	Céréales et couverture dérobée	Culture sur résidus et céréales en culture associées	Incorporation à l'épandage	Conversion en prairie	Bande riveraine	Ouvrage de contrôle du ruissellement		Ruissellement (mm)	Matière en suspension (tonne)	Phosphore total (tonne)	Phosphore soluble (tonne)
Scénarios agroenvironnementaux de base											
1				PI			Moyenne	181	30 178	45.8	11.8
							% diminution	0.2%	1.2%	0.7%	-0.2%
2			T				Moyenne	182	30 531	44.9	11.2
							% diminution	-0.3%	0.0%	2.6%	4.2%
3					T		Moyenne	181	27 783	43.0	11.7
							% diminution	0.0%	9.0%	6.7%	0.0%
4						T	Moyenne	181	25 646	40.6	11.7
							% diminution	0.0%	16.0%	11.9%	0.0%
5			T	PI			Moyenne	182	30 178	44.6	11.3
							% diminution	-0.1%	1.2%	3.3%	4.0%
6					T	T	Moyenne	181	22 898	37.5	11.7
							% diminution	0.0%	25.0%	18.6%	0.0%
7			T	PI	T		Moyenne	182	27 426	41.6	11.3
							% diminution	-0.1%	10.2%	9.8%	4.0%
8			T	PI	T	T	Moyenne	182	22 533	36.3	11.3
							% diminution	-0.1%	26.2%	21.4%	4.0%
Scénarios avec conversions aux pratiques agricoles de conservation											
9		T					Moyenne	171	16 089	30.1	9.2
							% diminution	5.7%	47%	35%	22%
10		T	T	PI	T		Moyenne	171	14 320	27.9	9.2
							% diminution	5.9%	53%	40%	21%
11		C 10%	T	PI	T		Moyenne	180	22 892	37.6	11.1
							% diminution	0.5%	25%	19%	5%
12		C 10%	T	PI	T	T	Moyenne	180	18 867	32.9	11.1
							% diminution	0.5%	38%	29%	5%
13		A 50%	T	PI	T		Moyenne	176	21 021	34.8	10.3
							% diminution	2.9%	31%	25%	12%
14		A 50%	T	PI	T	T	Moyenne	176	17 325	30.5	10.3
							% diminution	2.9%	43%	34%	12%
15		C 50%	T	PI	T		Moyenne	176	17 242	31.4	10.4
							% diminution	2.7%	44%	32%	12%
16		C 50%	T	PI	T	T	Moyenne	180	14 210	27.7	11.3
							% diminution	0.6%	53%	40%	4%

où **C** = application ciblée du PAAC sur un % des cultures annuelles; **A** = application aléatoire du PAAC sur un % des cultures annuelles; **PI** = Plaines inondables; **T** = PAAC appliqué sur la totalité de la superficie agricole; **+ 50%** indique que la PAAC est appliquée à la superficie agricole restante qui représente 50% des terres agricoles du bassin.

La figure 28 illustre les réductions cumulées des exportations prédites de sédiments et de phosphore associées à une application ciblée et progressive des différentes pratiques culturales de conservation sur le parcellaire en culture annuelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets. L'important gradient de vulnérabilité à l'érosion et aux exportations de P du parcellaire en culture annuelle entraîne une diminution de l'efficacité des PAAC avec une application croissantes de ceux-ci. Suivant l'application des PAAC sur 50% du parcellaire associé aux exportations de P les plus élevées, les gains associés à l'implantation des pratiques culturales de conservation s'amenuisent sur la portion restante des superficies en cultures annuelles. La comparaison des courbes témoigne par ailleurs du potentiel relativement plus élevé des cultures de couverture, associées ou à la dérobée, à atténuer les exportations diffuses de phosphore. Tel que discuté en section 3.4.2, l'efficacité de la culture couverture tient à sa protection anti-érosive, mais aussi aux avantages que la pratique comporte au plan de l'incorporation des engrais de ferme.

En ce qui a trait aux objectifs de réduction des exportations de P fixés entre l'État du Vermont et la Province de Québec, les différents scénarios agroenvironnementaux misant sur les pratiques culturales de conservation, même complémentés par l'aménagement hydro-agricole des zones les plus *hydro-actives* ne suffisent pas à rencontrer la cible de 41% de réduction des charges.

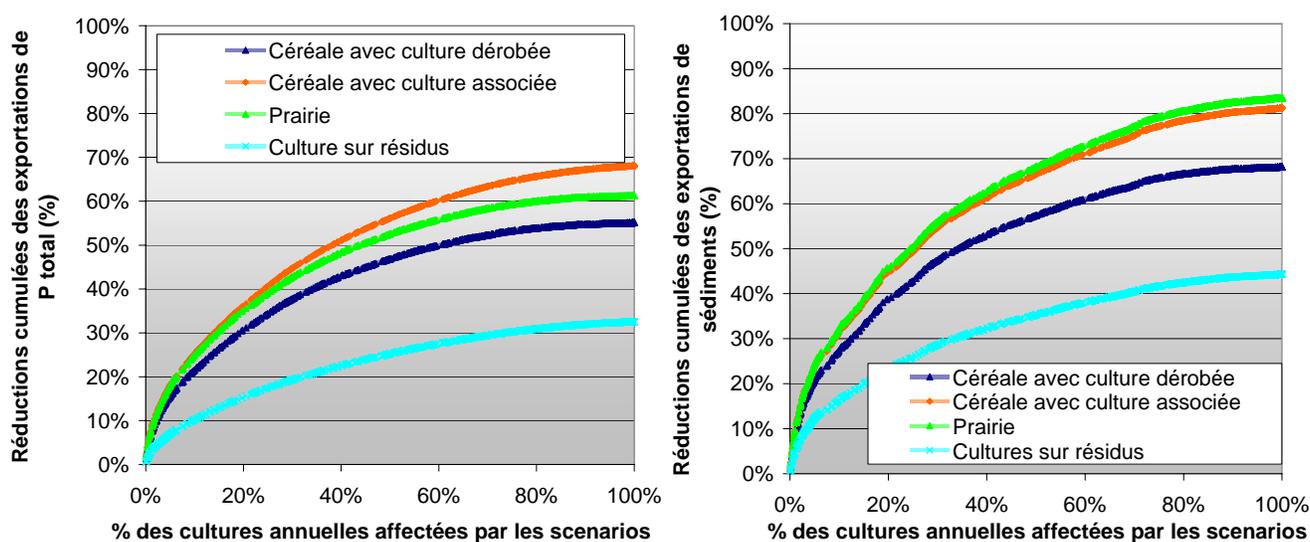


Figure 28 : Réductions des exportations de phosphore (a) et de sédiments (b) associées à un taux croissant d'adoption des différents PAAC appliquées en priorisant les URH les plus vulnérables aux exportations de P.

3.4.5.3 Scénarios avec substitution de cultures

Les scénarios agroenvironnementaux no. 17 à 25, décrits au tableau 21, considèrent la substitution des superficies en cultures annuelles, les plus vulnérables du bassin versant, par des cultures de couverture. Compte tenu de l'efficacité élevée associée aux cultures de couverture à réduire les exportations simulées de P, une conversion ciblée de 10% des superficies en cultures annuelles les plus vulnérables

se traduit, à elle seule, en une réduction prédite de 21% des exportations diffuses de phosphore (scénario 17). Combinée à la conversion en pratiques culturales de conservation sur un 45% additionnel des superficies en cultures (scénarios no. 19 à 23), la substitution de 10% des superficies les plus sensibles en cultures de couverture permet de rencontrer les objectifs de réduction des exportations de P ciblés dans l'entente Québec/Vermont dans presque tous les cas. À cet égard, le scénario no. 21, apparaît comme le scénario le plus réaliste. Le recours aléatoire à des pratiques culturales de conservation est en effet représentatif d'une réponse volontaire des gestionnaires agricoles, alors qu'une conversion de 10% des superficies vulnérables, serait représentative d'interventions ciblées et appuyées par un programme adéquat de compensation à caractère écologique. Afin d'atteindre les objectifs de réduction des charges de 41%, ce scénario devrait cependant être complété par l'aménagement ciblé de structures de contrôle du ruissellement sur approximativement 2 500 (10%) hectares en cultures annuelles en pratique culturelle conventionnelle. Ces quelques 250 fossés-avaloirs seraient aménagés aux exutoires des champs les plus érodables et particulièrement vulnérables aux exportations particulières de P.

Tableau 21 : Ruissellement et exportations de sédiments, phosphore soluble et phosphore total pour l'ensemble du bassin versant de la Rivière aux Brochets, résultant de la mise en œuvre de scénarios agroenvironnementaux comportant la substitution de cultures.

Numéro du scénario	Céréales et couverture dérobée	Culture sur résidus et céréales en culture associées	Incorporation à l'épandage	Conversion en prairie	Bande riveraine	Ouvrage de contrôle du ruissellement		Ruissellement (mm)	Matière en suspension (tonne)	Phosphore total (tonne)	Phosphore soluble (tonne)
Scénario avec substitutions de cultures											
17	C 10%						Moyenne % diminution	180 0.8%	22 222 27%	36.3 21%	11.6 1%
18	C 10%		T	PI	T		Moyenne % diminution	180 0.8%	19 901 35%	32.9 29%	11.2 5%
19	C 10%	A+ 40%	T	PI	T		Moyenne % diminution	175 3.5%	15 639 49%	28.0 39%	10.3 12%
20	C 10%	C+ 40%	T	PI	T		Moyenne % diminution	176 3.0%	14 252 53%	26.7 42%	10.4 11%
21	C 10%	A+ 40%	T	PI	T	C 10%	Moyenne % diminution	175 3.5%	14 968 51%	27.2 41%	10.3 12%
22	C 10%	A+ 40%	T	PI	T	T	Moyenne % diminution	175 3.5%	12 889 58%	24.9 46%	10.3 12%
23	C 10%	C+ 40%	T	PI	T	T	Moyenne % diminution	176 3.0%	11 746 62%	23.9 48%	10.4 11%
24	C 50%		T	PI	T		Moyenne % diminution	173 4.3%	11 181 63%	22.4 51%	10.9 7%
25	C 50%	+ 50%	T	PI	T		Moyenne % diminution	168 7.5%	8 259 73%	18.9 59%	9.7 17%
26	C 50%	+ 50%	T	PI	T	T	Moyenne % diminution	168 7.5%	6 807 78%	17.3 63%	9.7 17%

Le tableau 22 présente les superficies agricoles affectées par l'application du scénario no. 21. Pour l'ensemble des champs agricoles, l'implantation systématique d'une bande riveraine totalise près de 700 km linéaires. Ce scénario implique également une régie des sols qui favorise une incorporation hâtive des engrais de ferme. Globalement, environ 2 015 ha en cultures annuelles seraient ciblés par une rotation alternative, ce qui représente 6% des superficies agricoles totales du bassin. Ces superficies correspondent aux zones les plus sensibles aux exportations de P et leur substitution par des cultures de couverture réduit d'environ 27% les flux de P. Enfin, ce scénario prévoit le recours à des techniques de travail réduit du sol sur 6 138 ha, l'implantation d'une culture associée sur 2 191 ha en céréales et l'aménagement d'ouvrages de contrôle du ruissellement sur au moins 2 500 ha en culture annuelle.

Tableau 22 : Description détaillée des superficies agricoles impliquées dans le scénario agroenvironnemental no. 21 comportant la substitution ciblée de cultures annuelles et l'implantation de pratiques culturales de conservation.

	Description détaillée du scénario 21						
	Scénario de base	Scénario 21	Substitution ciblée des cultures annuelles vulnérables ⁽¹⁾	Conversion aléatoire de pratiques culturales		Plaine inondable protégée ⁽²⁾	Ouvrage de contrôle du ruissellement
				Cultures sur résidus	Culture de couverture associée		
Mais	12 400	10 615 (dont 5363 ha en culture sur résidus)	1 572	5 363		213	2 500
Céréales	4 423	6012 (dont 1726 ha avec culture de couverture)	76		2 191	61	
Soja	1 557	1464 (dont 775 en culture sur résidus)	78	775		15	
Prairies	14 185	14 474					
TOTAL (ha)	32 565	32 565	1 726	6 138	2 191	289	2 500

Proportions des cultures annuelles affectées	10%	45%	2%	13%
Proportions des cultures totales affectées	5%	26%	<1%	7%

⁽¹⁾ La culture annuelle est convertie en céréales avec culture de couverture.

⁽²⁾ La culture annuelle est convertie en culture pérenne permanente.

4. Conclusion

La planification et la mise en œuvre d'actions agroenvironnementales concertées et susceptibles de rencontrer les charges-cibles de phosphore pour la Baie Missisquoi constitue un immense défi. D'abord à l'échelle humaine, car elles interpellent les champs de responsabilités, d'intérêts et d'expertises d'un grand nombre d'intervenants. L'adaptation du modèle hydrologique SWAT aux conditions agroclimatiques de la région de la Baie Missisquoi constitue en soi un important investissement dans l'appui à ce processus décisionnel orienté vers la prévention de la contamination diffuse des eaux de surface. Dans une perspective opérationnelle, le système d'information répond aux besoins suivants : 1) de décrire et représenter la diversité des paysages et des activités humaines à l'échelle du bassin versant (caractérisation), 2) de comprendre les interactions entre ces activités et la nature du parcellaire sur la mobilisation du phosphore (modélisation) et enfin 3) de prédire le devenir des flux de phosphore selon différents scénarios d'intervention (scénarios).

Caractérisation des bassins versants

La représentation spatiale des propriétés physiques et des activités anthropiques, à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets, met en relief des gradients bien démarqués de la vulnérabilité du parcellaire et des pressions environnementales liées aux usages du territoire. Dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets, ces gradients s'expriment de l'amont vers l'aval. Si les systèmes de production agricole sont plus intensifs dans la portion aval du bassin, tant en termes d'apports de nutriments qu'à celui des rotations de cultures, les secteurs cultivés dans la portion amont présentent une forte vulnérabilité aux exportations diffuses en raison d'un relief plus accidenté.

Dans l'ensemble, les méthodes retenues dans la présente étude pour caractériser le parcellaire sont transférables à l'ensemble des régions agricoles québécoises. Elles mettent en relief l'accessibilité d'excellentes banques de données à référence spatiale au Québec, qui offrent l'opportunité de généraliser des portraits physiques et technico-économiques pertinents à la mise en valeur des bassins versants agricoles. Les données géoréférencées pertinentes aux productions agricoles, mises à jour par le MAPAQ, permettent de bien décrire les bilans de masse des nutriments et les pratiques agricoles susceptibles d'influencer leur devenir. De façon complémentaire, le support de la télédétection permet de mieux camper, au plan spatial, les gradients dans les systèmes cultureux. Les images LANDSAT utilisées dans le cadre de la présente étude, à l'instar d'autres sources de données satellitaires, sont disponibles à faible coût pour l'ensemble du territoire québécois.

En ce qui a trait aux données pertinentes au relief, nous devons cependant reconnaître que la documentation des élévations généralement disponibles selon des isolignes de 10 m demeure mal adaptée à l'interprétation de l'activité hydrologique de surface. Dans le cadre de la présente étude, le

recours à des données multi-sources a permis d'atteindre une précision satisfaisante pour le modèle numérique d'altitude (aprox. 1.5 m). Dans d'autres régions agricoles, le manque de données altimétriques appropriées pourrait sérieusement limiter la valeur interprétative d'un MNA à des fins agroenvironnementales. Enfin, les données relatives au réseau hydrographique sont aussi une composante essentielle du portrait physiographique d'un bassin versant. En territoire agricole, une portion importante des cours d'eau a été aménagée à des fins de drainage. Dans le cadre de la présente étude, la localisation et les particularités du réseau hydrographique aménagé ont été acquises des archives de plans de cours d'eau. À l'instar de la plupart des régions agricoles, ces données n'existaient pas en format numérique pour la région à l'étude. L'investissement consenti dans la numérisation des données du réseau réglementé de cours d'eau du bassin versant s'est avéré rentable. Les données d'élévation précises incluses aux plans ont notamment permis de préciser le modèle numérique d'altitude (MNA) du bassin versant. Ces données s'avèrent cruciales tant pour décrire les processus hydrologiques à l'œuvre sur les parcelles en culture, que pour supporter les routines hydro-dynamiques du modèle en cours d'eau. Aussi, la numérisation des plans de cours d'eau apparaît comme un investissement intéressant à considérer dans la réalisation d'un système d'information à référence spatiale (SIG) destiné à appuyer des actions de mise en valeur d'un bassin versant agricole. Enfin, la cartographie des sols utilisée dans la présente étude provient d'un inventaire pédologique datant de 1946 et réalisé à une échelle de 1:63 360. Bien que les caractéristiques physiques des sols aient été bonifiées par les campagnes de 1991, la mise à jour des documents publiés dans cette région est prioritaire et présente des avantages indéniables.

Modélisation hydrologique

L'échelle d'intégration spatiale des propriétés des paysages et des activités agricoles du bassin versant a pleinement répondu aux besoins opérationnels du modèle hydrologique SWAT. L'intersection spatiale des données d'utilisation du sol, de topographie et de pédologie a permis de créer 3 885 URH, dont 2 409 UHR agricoles (superficie moyenne de 16 ha). La finesse de ce découpage a permis d'exprimer la variabilité spatiale des propriétés du parcellaire et d'en modéliser l'effet sur l'activité hydrologique. L'intégration des données de recensement géopositionnées, relatives aux apports de nutriments et aux pratiques agricoles, à l'échelle des 99 sous-bassins (superficie moyenne de 640 ha) et redistribuées en fonction des types de culture, a pour sa part permis de traduire l'influence des apports de nutriments sur la mobilité du phosphore à l'échelle du territoire. Globalement, le bilan annuel moyen d'apport en phosphore pour le parcellaire en culture du bassin a été estimé à 21.3 kg de P par hectare en culture, alors que l'apport efficace de l'azote se situe à 124.7 kg N ha⁻¹. La prise en compte des variabilités spatiales de l'activité hydrologique, de la richesse des sols et des pratiques agricoles a permis de quantifier la vulnérabilité du parcellaire aux processus de contamination diffuse. L'échelle de travail utilisée dans cette étude est compatible avec les objectifs opérationnels de planification et de mise en œuvre d'actions agroenvironnementales.

La présence de dispositifs de suivi hydrométrique et de qualité de l'eau dans le bassin versant s'est avérée un atout essentiel dans le calage du modèle hydrologique et sa validation. Globalement, les indicateurs statistiques de l'ajustement du modèle aux débits journaliers et mensuels mesurés sont satisfaisants, autant sur les petits bassins expérimentaux que sur les tronçons jaugés de la Rivière aux Brochets.

Plusieurs améliorations pourraient cependant être apportées aux algorithmes du modèle de façon à bonifier ses capacités prédictives dans le contexte agro-climatique québécois. La reproduction de l'activité hydrologique hivernale et printanière profiterait notamment de modifications du module de reproduction du climat, de façon à bien distinguer la nature pluvieuse ou neigeuse des précipitations sur une base journalière. Une alternative simple au module actuel serait de permettre à l'utilisateur de définir la quantité de pluie et de neige précipitée plutôt qu'une quantité totale de précipitation journalière. Il apparaît par ailleurs crucial de bien reproduire les périodes de fonte de neige, pendant lesquelles l'activité hydrologie est intense et favorise l'exportation d'une quantité importante de sédiments et phosphore vers le réseau hydrographique. L'attribution des paramètres de fonte et des caractéristiques du couvert nival à l'échelle du sous-bassin, plutôt qu'à celle du bassin versant, permettrait de mieux considérer l'impact des gradients topographiques et d'utilisation du sol dans des grands bassins hétérogènes.

En ce qui a trait à la répartition souterraine et de surface des écoulements, rappelons qu'une surévaluation des hauteurs de ruissellement par la méthode du numéro de courbe utilisée par SWAT a requis un ajustement à la baisse des paramètres (CN) de l'ordre de 20%. Les périodes de récessions des débits des cours d'eau ont ainsi été reproduites de façon satisfaisante, démontrant la capacité du modèle à reproduire efficacement les flux souterrains globaux, incluant les contributions des drains, des flux latéraux et des aquifères peu profonds. La confrontation des résultats journaliers de la modélisation avec les mesures réalisées à l'échelle du champ dans le bassin versant par l'équipe de l'Université McGill, met cependant en relief une possible sous-estimation de l'écoulement dans les drains. L'adaptation des routines de SWAT pertinentes aux écoulements préférentiels, constitue certainement une priorité de développement du modèle, compte tenu de la nature de sols et de l'importance du drainage souterrain systématique au Québec.

Le calage du modèle a permis de reproduire les taux d'érosion, de même que la spéciation et les flux de phosphore des deux bassins expérimentaux de référence (6-8 km²) de façon satisfaisante. Une importante variabilité spatiale des flux et de la spéciation de P a été simulée. Celle-ci reflète l'influence des propriétés physiques et de la gestion du parcellaire. Les fractions solubles et particulaires modélisées à l'échelle de l'URH sont faiblement corrélées et témoignent des influences distinctes des facteurs *Sources* (stock et modalités d'apport) et *Transport* (ruissellement et érosion) sur la mobilisation du P. Les simulations produites par le modèle révèlent que moins du dixième de la superficie du bassin

est responsable de plus de 50% de la migration du P vers le réseau hydrographique. La modélisation suggère également que la moitié du territoire du bassin versant contribue de façon négligeable aux exportations de phosphore.

Efficacité des scénarios agroenvironnementaux

Le scénario de référence, ayant servi au calage du modèle, reflète les pratiques courantes de régie des sols et des cultures dans le territoire à l'étude. L'exercice de calage de SWAT a profité de données expérimentales colligées aux exutoires de bassins expérimentaux. En pratique, de telles bases de validation ne sont pas disponibles pour confirmer l'efficacité des scénarios agroenvironnementaux modélisés dans la présente étude. Concrètement, les paramètres associés aux scénarios agroenvironnementaux ont été adaptés de façon à refléter l'état des connaissances actuelles sur l'efficacité des pratiques agricoles et aménagements de conservation des sols et de l'eau (PAAC). Un premier constat qui se dégage de notre recherche de données de validation est un manque de littérature scientifique sur l'efficacité des PAAC applicables aux conditions agro-climatiques québécoises. En soi, la mesure de l'efficacité environnementale de pratiques agricoles et d'aménagements de conservation, dans les conditions propres à l'aménagement des terres et au climat québécois, demeure une importante priorité de recherche et de développement.

Dans une perspective opérationnelle, la modélisation des différents scénarios agroenvironnementaux souligne l'importance du ciblage spatial lors de l'implantation de PAAC afin d'optimiser leurs retombées environnementales. Globalement, les résultats de modélisation font valoir qu'une application ciblée des PAAC aux portions du parcellaire en cultures annuelles les plus vulnérables, engendrent des gains environnementaux trois fois plus élevés qu'une implantation aléatoire sur une superficie équivalente.

Quant aux efficacités attribuées aux différentes PAAC, le modèle attribue les plus importantes réductions des exportations de phosphore aux cultures de couverture, suivi de la culture sur résidus puis des aménagements hydro-agricoles. Le potentiel élevé d'atténuation des exportations diffuses de phosphore, attribué par SWAT aux cultures de couverture (74% en moyenne sur les URH en culture annuelle), tient à la combinaison de ses propriétés anti-érosives et d'un itinéraire technique qui permet l'incorporation des engrais de ferme. Les différentes pratiques de culture sur résidus (semis direct, déchaumage printanier ou automnal sans labour) réduisent aussi considérablement les exportations modélisées de phosphore (46% en moyenne sur les URH en culture annuelle). Leur efficacité relative démontre cependant une variabilité plus importante que les cultures de couverture, en raison de l'influence des propriétés du sol sur les hauteurs d'eau ruisselée et de l'accumulation des nutriments dans la couche superficielle du sol qui interagit avec le ruissellement. En effet, le modèle ne simule pas systématiquement une diminution du ruissellement associée à la pratique d'un travail réduit, alors que la réduction de la concentration du ruissellement en MES (sédiments) et l'augmentation de la fraction du P soluble sont prédites. Ces

résultats mettent en relief qu'au sein des routines hydrologiques du modèle, la perméabilité du sol et la rugosité de surface ont une influence déterminante sur le déclenchement du ruissellement. Mis à part quelques observations rapportées en Europe du Nord, peu d'observations expérimentales permettent de baliser l'efficacité de la culture sur résidus en fonction du statut nutritif du sol en P (stratification) et de sa perméabilité dans les conditions agro-climatiques propres au Québec. Bien que les prédictions de la présente modélisation apparaissent réalistes à l'égard des données publiées, la validation de l'efficacité de la culture sur résidus en sol riche demeure une importante priorité de recherche.

En ce qui a trait aux aménagements hydro-agricoles, les efficacités de piégeage des sédiments et du phosphore utilisées dans la modélisation s'inspirent directement des observations colligées dans le bassin versant expérimental du Ruisseau au Castor. Ces observations traduisent l'influence d'un type particulier d'aménagement combinant les fossés-avaloir et des bandes riveraines arbustives. Les taux d'atténuation des charges de P retenues (25% de la charge particulaire) demeurent conservateurs et reflètent l'influence de la configuration allongée du parcellaire, qui favorise l'écoulement d'environ 30% des superficies contributives au ruissellement vers les bandes riveraines des cours d'eau. Dans une perspective de planification stratégique d'interventions ciblées sur la qualité de l'eau, un constat découlant des efficacités relatives des PAAC modélisées, est la priorité à accorder à l'implantation de pratiques culturales au champ, à titre de première ligne de défense agroenvironnementale. Les structures de contrôle du ruissellement remplissent alors un rôle complémentaire dans le polissage des flux exportés. Cependant, sur les champs en cultures annuelles à forte pente, de même que sur les sols où la faible perméabilité ou l'absence de drainage souterrain limite la faisabilité de pratiques culturales de conservation, le recours aux ouvrages de contrôle du ruissellement s'impose en raison des risques élevés d'exportation de phosphore.

Techniquement, la structure du SIG développé, combiné aux capacités prédictives de SWAT permettent de modéliser une infinité de scénarios agroenvironnementaux, en allouant différentes PAAC à l'une ou l'autre des 2 409 URH du bassin versant. Il n'appartient certainement pas aux auteurs de la présente étude de dicter le choix et l'envergure des actions agroenvironnementales à mettre de l'avant dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets ou de la Baie Missisquoi. Concrètement, le modèle hydrologique calibré se veut un outil privilégié d'accompagnement du milieu agricole et des différents intervenants la communauté dans l'élaboration et la mise en œuvre concertée de plans d'action réalistes, susceptibles de rencontrer les attentes de l'ensemble de la population. Dans une perspective de rencontre des objectifs de réduction de charges de phosphore convenus entre le Vermont et le Québec pour la mise en valeur de la Baie Missisquoi, l'exercice de modélisation supportée dans le cadre de la présente étude permet cependant d'établir certaines balises quant à l'ampleur de la tâche. L'étude de différents scénarios indique que la rencontre de l'objectif de réduction de 41% des exportations de P serait tributaire d'une implantation de pratiques culturales de conservation (cultures de couverture ou cultures sur résidus) sur la moitié du parcellaire en cultures annuelles, de même que d'une conversion de

10% du parcellaire le plus vulnérable en culture de couverture ou prairie permanente. La rencontre des charges-cibles de phosphore établies dans l'entente Québec-Vermont ferait par ailleurs appel à des investissements, de façon complémentaire, dans la protection systématique des plaines inondables et des bandes riveraines, l'implantation ciblée de structures de contrôle du ruissellement et l'incorporation hâtive des engrais de ferme sur le parcellaire en cultures annuelles.

En termes clairs, malgré les incertitudes inhérentes au processus de modélisation hydrologique, les résultats de la présente étude mettent en relief que la réduction des exportations diffuses de phosphore dans la Baie Missisquoi, compatible avec les charges-cibles établies entre le Vermont et le Québec, représente un chantier agroenvironnemental d'une ampleur inédite au Québec, et fort probablement à l'échelle nord-américaine. Des succès ont été remportés dans le passé dans la réhabilitation de grands lacs, notamment en France. Le renversement des processus d'eutrophisation des lacs Léman, du Bourget et d'Annecy, notamment, est largement redevable à une réduction des sources ponctuelles de phosphore. Dans le cas du Lac Champlain et la Baie Missisquoi, le défi réside plutôt dans le contrôle des sources agricoles diffuses de phosphore. Bien au-delà des implications techniques, la mise en valeur du bassin versant et de sa baie reposera avant tout sur la responsabilisation et l'engagement de tous les intervenants à concerter leurs actions d'encadrement technique, financier, et réglementaire, dans un projet rassembleur, respectueux des magnifiques paysages du Missisquoi et de ses artisans.

5. Références

- Akan, A. Osman. 2002. Modified rational method for sizing infiltration structures. *Can. J. Civ. Eng.*, Vol. 29, pp. 539-542.
- Arnold, J.G. et Fohrer, N. 2005. SWAT2000 : current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, Vol. 19, pp. 563-572.
- Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah, and J.R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *J. American Water Resources Association*, Vol. 34(1), pp. 73-89.
- Bernard, C. 1996. Estimation de l'érodabilité des principales séries de sol du Québec, à l'aide du nomographe de Wischmeier, *Agrosol*, Vol. 9(2), pp. 6-12.
- Blais, S. 2002. Les cyanobactéries en 2000 et en 2001 dans la portion québécoise de la baie Missisquoi: impacts anthropiques et étude in situ. Dans « Le Lac Champlain, à l'aube du nouveau millénaire », Lake Champlain Research Consortium, 59 p.
- Bootsma, A., G. Tremblay et P. Fillion. 1999. Analyses sur les risques associés aux unités thermiques disponibles pour la production de maïs et de soya au Québec, Centre de recherches de l'Est sur les céréales et oléagineux, Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Bulletin technique CRECO N0 de contribution 991396-F, 38 p.
- Beaudet, P., M. Grenier, M. Giroux et V. Girard. 2003. Description statistique des propriétés chimiques des sols minéraux du Québec, 108 p., Internet : <http://www.agrireseau.qc.ca/references/6/sols/index.htm>.
- Beaudin, I., J. Deslandes, A. R. Michaud et G. Lévesque. 2004. Application of SWAT to the Pike-River watershed for diffuse phosphorus transport. 57e Congrès annuel de l'ACRH. Montréal, juin, 8 p.
- Bonn, F., A. Michaud, D. Cluis, C. Madramootoo, A. Roy. 2001. Observation Spatiale et Modélisation des sources d'Érosion et de pollution Diffuse dans les bassins versants Agricoles alimentant des Lacs (OSMEDAL), Projet CRSNG.
- Brunet R C, Astin K.B. 2000. A 12-Mouth sediment and nutrient budget in a floodplain reach of the river Adour, South west France. *Regulated rivers: Research & Management*. Vol. 16, pp. 267-277.
- Cann, D. B., P. Lajoie et P. C. Stobbe. 1946. Étude des sols des comtés de Shefford, Brome et Missisquoi dans la province de Québec, Service des fermes expérimentales, ministère fédéral de l'Agriculture, en collaboration avec le ministère de l'Agriculture de Québec et le collège Macdonald, Université McGill, # 3M-10358-12-47, 94 p.
- Carter, M.R. 1998. Conservation tillage practices and diffuse pollution, Pp. 51-60. In Proc. Of the Conf. On Diffuse Pollution and Agric. II, Edinburgh. 9-11 Apr. 1998. The Scottish Agric. College, Aberdeen.
- Cattai, 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, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke, 120 p.
- Caumartin, J. et R. Vincent. 1994. Diagnostic environnemental de la rivière aux Brochets, Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, 93 p.

- Cope, J.T., C.E. Evans, and H.C. Williams. 1981. Soil test fertility recommendations for Alabama crops. Alabama Agric. Station Circular No. 251.
- Côté, D., A. R. Michaud, T.S. Tran et C. Bernard. 1998. Slurry sidedressing and topdressing can improve soil and water quality in Lake Champlain Bains. In T. Manley and P. Manley, ed., Lake Champlain in Transition: From Research Toward Restoration. American Geophysical Union, Water Science and Application 1, pp. 225-238.
- Côté, D., C. Bernard et D.A. Angers. 1994. Effects of perennial forage species intercropped with silage corn on soil quality in eastern Quebec, International Soil Tillage Research Organization, Proceedings of 13th International Conference, Vol. 1, pp. 147-152.
- CRIACC. 2005. Climat et villes : Indicateurs et normales climatiques pour le sud du Québec, Internet :<http://www.criacc.qc.ca/>
- Dabney, S.M., R.L., Raper, L.D. Meyer and C.E. Murphree. 2000. Management and subsurface effects on runoff and sediment yield from small watersheds. Int. J. Sediment Research Vol. 15(2), pp. 217-232.
- Daniel, T.C., A. N. Sharpley, D. R. Edwards, R. Wedepohl, and J. L. Lemunyon. 1994. Minimizing surface water eutrophication from agriculture by phosphorus management. Journal of Soil and Water Conservation Supplement Vol. 49, pp. 30-38.
- Deslandes, J., A. Michaud et F. Bonn. 2002. Développement et validation des indicateurs agroenvironnementaux associés aux pertes diffuses de phosphore dans le bassin-versant de la rivière aux Brochets, Agrosol, Vol. 13 (2), pp. 111-123.
- Duchemin, M. et R. Majdoub. 2004. Les bandes végétales filtrantes : de la parcelle au bassin versant. Vecteur Environnement Vol. 37(2), pp. 36-50.
- Duguet, F., A. R. Michaud, J. Deslandes, R. Rivest et R. Lauzier. 2002. Gestion du ruissellement et de l'érosion pour limiter les pertes en phosphore en bassin versant agricole. Agrosol Vol. 13(2), pp. 140-148
- Duy , T.N., P.K.S. Lam, G.R. Shaw et D.W. Connell. 2000. Toxicology and risk assessment of freshwater cyanobacterial (blue-green algal) toxins in water, Rev. Environ. Contamin. Toxicol. Vol. 63, pp. 113-186.
- Eckhardt, K. and J.G. Arnold. 2001. Automatic calibration of a distributed catchment model. J. of Hydrology Vol. 251 (1-2), pp. 103-109.
- Edwards, C.L., R.D. Shannon et A.R. Jarrett. 1999. Sedimentation basin retention efficiencies for sediment, nitrogen and phosphorus from simulated agricultural runoff, Transactions of the ASAE, Vol. 42(2), pp. 403-409.
- Enright, P. et C.A. Madramootoo. 2004. Phosphorus Losses in Surface Runoff and Subsurface Drainage Waters on Two Agricultural Fields in Quebec. P. 160-170. in R.A. Cooke (ed.) Drainage VIII – Proceedings of the Eight International Drainage Symposium. Published by ASAS –St. Joseph, MI, USA.
- La Financière agricole du Québec. 2000-2003. Rapport de l'état des cultures, Rapports no. 1 à 13, http://www.financiereagricole.qc.ca/fr/fr.php?l_id=600.
- Foster, G.R., D.K. McCool, K.G. Renard et W.C Moldenhauer. 1981. Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI Metric Units, J. of Soil and Water Cons., Vol. 36, pp. 355-359.

- Franti, T.G., J.M. Lafren, D.A. Watson. 1999. Predicting soil detachment from high-discharge concentrated flow, Transactions of the ASAE, American Society of Agricultural Engineers Vol. 42(2), pp. 329-335.
- Gaynor, J. D. and W. 1. Findlay. 1995. Soil and phosphorus loss from conservation and conventional tillage in corn production. J. Environ. Qual. Vol. 24: pp. 734-741.
- Gangbazo, G., A.R. Pesant, D. Cluis et D. Couillard. 1993. Effets du lisier de porc sur la charge d'azote et de phosphore dans l'eau de ruissellement sous des pluies simulées. Can. Agric. Eng. Vol. 35, pp. 97-103.
- Gilley, J.E., S.C. Finkner, R.G. Spomer, and L.N. Mielke. 1986. Runoff and erosion as affected by corn residue. Part I. Total Losses. Transactions of the ASAE, Vol. 29 (1), pp. 148-152.
- Gouvernements du Québec et de l'état du Vermont. 2002. Entente entre le Gouvernement du Québec et le Gouvernement de l'état du Vermont concernant la réduction du phosphore dans la Baie Missisquoi, 5 p. Internet : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/Infuseur/communique.asp?no=209>
- Grando, S. 1996. Effets de deux modes d'épandage de lisier de porc sur la qualité de l'eau de ruissellement, Mémoire de fin d'études, ENITA de Bordeaux, 64 p.
- Groupe de travail Vermont-Québec sur la réduction du phosphore. 2000. Partage des responsabilités entre le Québec et le Vermont pour la réduction des charges de phosphore dans la baie Missisquoi, présenté au Comité directeur du lac Champlain, 23 p.
- Heatwhite, A.L., P. Haygarth et R. Dils. 2000. Pathways of phosphorus transport, In A.N. Sharpley, Ed., Agriculture and phosphorus management: the Chesapeake bay, Lewis Publisher, Boca Raton, Florida.
- Haygarth, P.M. et S.C. Jarvis. 1999. Transfer of phosphorus from agricultural soils. Adv. Agron. Vol. 66, pp. 195-249.
- Hegman, W., D. Wang, and C. Borer. 1999. Estimation of Lake Champlain Basinwide Nonpoint Source Phosphorus Export. Technical Report No. 31. Lake Champlain Basin Program. Grand Isle, Vermont, 69 p.
- Institut de la statistique du Québec. 2002. Superficie des grandes cultures, rendement à l'hectare et production, par région administrative, Statistique Canada, <http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm/finnc/filr/bioal/culture/culture/am110002.htm>
- Jarrett, A.R. 2001. Designing sedimentation basins for better sediment capture. In J.C. Ascough II and D.C. Flanagan Eds. Soil erosion research for the 21st century, Proc. Int. Symp. pp. 63-66.
- Jamieson, A., C.A. Madramootoo and P. Enright. 2003. Phosphorus losses in surface and subsurface runoff from a snowmelt event on an agricultural field in Quebec, Canadian Biosystems Engineering, Vol. 45, pp. 1.1-1.7.
- Jones, C.A. C.V. Cole, A.N. Sharpley, and J.R. Williams. 1984. A simplified soil and plant phosphorus model. I. Documentation. Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 48, pp. 800-805.
- Knisel, W.G. 1980. CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Report. No. 26, 643 p.

- Kleinman, P.J.A., P. Salon, A.N. Sharpley and L.S. Saporito. 2005. Effect of cover crop established at time of corn planting on phosphorus runoff from soils before and after dairy manure application, *J. of Soil an Water Cons.* Vol. 60(6), pp.311-322.
- Kronvang, B., M. Bechmann, H. Lundekvam, H. Behrendt, G.H. Rubaek, O.F. Schoumans, N. Syversen, H.E. Andersen, and C.C. Hoffman. 2005. Phosphorus Losses from Agricultural Areas in River Basins : Effects and Uncertainties of Targeted Mitigation Measures, *J. Environ. Qual.* 34, pp. 2129-2144.
- Krovang, B., Ø. Falkum, L.M. Svendsen, and A. Laubel. 2002. Deposition of sediment and phosphorus during overbank flooding. *Verh. Int. Ver. Theor. Angew. Limnol.* Vol. 28, pp. 1289-1293.
- Lawrence, R., S. Dabney et R. Schultz. 2002. Improving water and soil quality with conservation buffers, *J. Soil Water Cons.*, Vol. 57(2), pp. 37A-43A.
- Lenhart, T., K. Eckhardt, N. Fohrer and H.-G. Frede. 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 27, pp. 645-654.
- Leonard, R.A., W.G. Knisel, and D.A. Still. 1987. GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems. *Trans. ASAE* 30(5), pp. 1403-1428.
- Madramootoo, C.A., A. Michaud, F. Bonn, D. Meals, A. Cassell, R. Lauzier et M. Simoneau. 2003. Conception et validation d'indicateurs agroenvironnementaux adaptés à la gestion de projets en bassin versant ciblés sur le contrôle des charges de nutriments, *Action concertée FCAR/IRDA*, Dossier 161513, 20 p.
- McDowell, L.L. and K.C. McGregor. 1980. Nitrogen and phosphorus losses in runoff from no-till soybeans. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, Vol. 23, pp. 643-648.
- McDowell L.L. and K.C. McGregor. 1984. Plant nutrient losses in runoff from conservation tillage corn, *Soil and Tillage Res.*, Vol. 4, pp. 79-91.
- McGregor, K.C., R.F. Cullum, C.K. Mutchler. 1999. Long-term management effects on runoff, erosion, and crop production, *Transaction of the ASAE*, Vol. 42 (1), pp. 99-105.
- Meals, D.W. 2004. Water quality improvements following riparian restoration in two Vermont agricultural watersheds, pp 81-95 In T.O. Manley, P. L. Manley and T,B. Mihuc, ed., *Lake Champlain: Partnerships and Research in the New Millenium*. Kluwer Academic/plenum pub. New York, NY.
- Meyer, L.D., S. Dabney, C.E. Murphree, and W.C. Harmon. 1999. Crop production systems to control erosion and reduce runoff from upland silty soils. *Transaction of the ASAE*, Vol. 42(6), pp. 1645-1652.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich-3 soil extractant: A modification to Mehlich-2 extractant. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, Vol. 15, pp. 1409-1416.
- Menzel, R.G. 1980. Enrichment ratios for water quality modeling. In W.G. Knisel (ed.) *CREAMS, A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*. U.S. Dept. Agric. Conserv. Res. Report No. 26, pp. 486-492.
- Michaud, A., J. Deslandes et J. Desjardins. 2004a. Rapport final : Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles, *Projet de recherche et de développement présenté au Fonds d'action québécois pour le développement durable et son partenaire financier le gouvernement du Québec (Projet no. 212)*, IRDA, Québec, 100 p.

- Michaud, A. 2004b. Indicateurs agroenvironnementaux adaptés à la gestion de projets ciblés sur la prévention de la pollution diffuse par le phosphore, Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Québec, 151 p.
- Michaud, A. R., R. Lauzier et M. R. Laverdière. 2002. Description du système de transport du phosphore dans le bassin versant du ruisseau au Castor. *Agrosol* Vol. 13 (2) : pp. 124-139.
- Michaud, A. R. et M. R. Laverdière. 2004. Cropping, soil type and manure application effects on phosphorus export and bioavailability. *Can. J. soil Sci.*, Vol. 84, pp. 284-295.
- Michaud, A.R., R. Lauzier et M.R. Laverdière. 2005. Mobilité du phosphore et intervention agroenvironnementale en bassin versant agricole : Étude de cas du Ruisseau au Castor, tributaire de la Rivière aux Brochets, Québec, *Agrosol*, Vol. 16(1), pp. 47-59.
- Mimeault, M. 2002. Mise en valeur de la Baie Missisquoi et du Lac Champlain. *Agrosol*, Vol. 13(2), pp. 92-96.
- Ministère de l'Agriculture, des pêches et de l'alimentation du Québec. 2003. Fiche d'enregistrement des exploitations agricoles, Québec.
- Ministère du Développement durable, Environnement et Parcs. 2003. Base de données Climatologique du Québec de 1997 à 2003, Service de l'information sur le milieu atmosphérique, Direction du suivi de l'état de l'environnement, Internet : http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/eval/inventory-repertoire/climatologie_f.html
- Ministère du développement durable, Environnement et Parcs. 2005. Cartographie des zones inondables en eau libre, Région hydrographique 03 – Saint-Laurent sud-ouest, Cartes 1 :10 000 numéro 31H03-100-5101, Centre d'expertise hydrique du Québec, Internet : <http://www.cehq.gouv.qc.ca/zones-inond/cartographie/>
- Ministère des ressources naturelles et faune. 2000. Le réseau géodésique du Québec par région administrative, Direction générale de l'information géographique, Photocartothèque québécoise, Québec.
- Ministère des ressources naturelles et faune. 1999. Carte topographique numériques du Québec 1/20000, feuillets 31H03-200-0102, 31H03-200-0202, 31H03-200-0201, 31H03-200-0101, Internet : <http://photocartotheque.mrnfp.gouv.qc.ca/pcq/classes/accueil>.
- Murphy, J. and J.R. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphates in surface waters. *Anal. Acta* 27, pp. 31-36.
- Neitsch, S. L., J. G. Arnold, R. Srinivasan. 2002. Pesticides Fate and Transport Predicted by the Soil and Water Assessment tool (SWAT) : Atrazine, Metolachlor and Trifluralin in the Sugar Creek Watershed, Grassland, Soil & Water Research Laboratory, USDA-ARS, Blackland Research Center, Texas, BRC Publication No. 2002-03, 96 p.
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. William et K.W. King. 2002. Soil and Water Assessment tool Theoretical Documentation, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Texas, 458 p.
- Olsen, S.R., C.V. Cole, F.S. Watanabe, et L.A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circ. 939. U.S. Government Printing Office, Washington D.C.

- Perrone, J. et C.A. Madramootoo. 1998. Improved curve number selection for runoff prediction, *Can. J. Civ. Eng.* Vol. 25, pp. 728-734.
- Pollution from land use activities reference group (PLUARG). 1980. Pollution in the Great Lakes basin from land use activities. International Joint Commission Report to the Governments of the United States and Canada, 414 p.
- Romkens, M. J. and D. W. Nelson. 1974. Phosphorus relationships in runoff from fertilized soils. *J. Environ. Qual.* Vol. 3, pp. 10-13.
- Saleh, A., J. G. Arnold, P.W. Gassman, L.M. Hauck, W.D. Rosenthal, J.R. Williams, A.M.S. McFarland. 2000. Application of SWAT for the upper north Bosque river watershed, *American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 43(5), pp. 1077-1087.
- Santhi, C., J.G. Arnold, J. R. Williams, W.A. Dugas, R. Srinivasan and L. M. Hauck. 2001. Validation of the SWAT Model on a Large River Basin With Point and Nonpoint Sources, *AWRA No. 00044*, Vol. 37(5), pp. 1169-1188.
- Sharpley, A.N., C. Gray, C.A. Jones, and C.V. Cole. 1984. A simplified soil and plant phosphorus model. II. Prediction of labile, organic, and sorbed P amounts. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 48, pp. 805-809.
- Sharpley, A.N., W.W. Troeger and S.J. Smith. 1991. The measurement of bioavailable phosphorus un agricultural runoff. *J. Env. Qual.* Vol. 20, pp. 235-238.
- Sharpley, A.N., S.J. Smith, O.R. Jones, W.A. Berg, and G.A. Coleman. 1992. The transport of bioavailable phosphorus in the agricultural runoff, *J. of Env. Qual.*, Vol. 21, pp. 30-35.
- Sharpley, A.N., S.C. Chapra, R. Wedepohl, J.T. Sims, T.C. Daniel, K.R. Reddy. 1994. Managing Agricultural Phosphorus for Protection of Surface Waters : Issues and Options, *J. Env. Qual.*, 23, pp. 437-451.
- Sharpley, A.N. et A.D. Halvorson. 1994. Management of soil phosphorus. pp. 7-91 In *Soil processes and water quality*. R. Lal et B.A. Stewart ed. Lewis publ. CRC press.
- Soil Conservation Service Engineering Division. 1986. Urban hydrology for watersheds. U.S. Department of Agriculture, Technical Release 55, 156 p.
- Spruill, C.A., S.R. Workman and J.L. Taraba. 2000. Simulation of daily and monthly stream discharge form small watersheds using the SWAT model, *Transactions of Agricultural Engineers*, Vol. 43(6), pp. 1431-1439.
- Srinivasan, R. 2000. Hydrologic unit model for the United States (Humus), Texas Agricultural Experiment Station, Blackland Research Center, Internet: <http://srph.brc.tamus.edu/hamus/>
- Tabi, M., Tardif, L., Carrier, D., Laflamme, G. et M. Rompré. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec – Région agricole 6, Richelieu, Saint-Hyacinthe. Gouvernement du Québec, Publication no. 91-0025. Québec, Canada, 199 p.
- Tolson, B.A. and C.A. Shoemaker. 2004. Watershed modeling of the Cannonsville Basin using SWAT2000: Model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the Cannonsville Reservoir. Version 1.0. Technical Report, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, 159 p.

- Tran, T.S., M. Giroux. 1987. Disponibilité du phosphore dans les sols neutres et calcaires du Québec en relation avec leurs caractéristiques chimiques et physiques, Canadian J. of Soil Sci., Vol. 67, pp. 1-16.
- Tran, T.S., K. Giroux, J. Guilbeault and P. Audesse. 1990. Evaluation of Mehlich-III extractant to estimate the available P in Quebec Soils, Soil Sci. Plant. Anal., Vol. 21(1-2), pp. 1-28.
- Thériault, J.-E., L. Choinière, E. Pageau et H. Talbot. 1943. Carte des sols du comté d'Iberville, Service de la grande culture du Ministère de l'Agriculture et Service de la cartographie Économique du Ministère de l'industrie et du commerce.
- U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook, Hydrology Section 4, Chapters 4-10.
- U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 1999. Soil Survey Geographic (SSURGO) database for Franklin County VT011, Fort Worth, Texas.
- U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 2001. National Soil Survey Handbook, title 430-VI. Internet: <http://www.statlab.iastate.edu/soils/nssh/>
- Walker, W. 1998. Flux, *Stream loads computations, version 5.0*. Environmental laboratory USAE Waterways Experiment Station. Vicksburg, Mississippi, USA.
- Walling, D.E., and Q. He. 1994. Rates of overbank sedimentation on the floodplains of several British rivers during the past 100 years. Publ. 224. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Wang, D., S.N. Kevine, D.W. Meals, Jr., J.P. Hoffman, J.C. Drake et E.A. Cassell. 1999. Importance of instream nutrient storage to P export from a rural eutrophic river in Vermont, USA. pp. 205-224. *In Lake Champlain in Transition: From Research toward Restoration*, Water Science and Application 1, American Geophysical Union.
- White, S., I. Beaudin, J. Hollis, S. Hallett and F. Worral. 2002. TERRACE – Terrestrial Runoff Modelling for Risk Assessment of Chemical Exposure, Year Two Report, version 2.1. Cranfield University at Silsoe, Silsoe, Beds., UK.
- Williams, J.R., A.D. Nicks, and J.G. Arnold. 1985. Simulator for water resources in rural basins. Journal of Hydraulic Engineering 111 Vol. 6, pp. 970-986.
- Williams, J.R., C.A. Jones and P.T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Trans. ASAE 27(1), pp. 129-144.
- Williams, J.R. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds, Water Resources Bull, Vol. 11(5), pp. 965-974
- Wischmeier W.H., Johnson C.B. and Cross B.V. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites, J. Soil and Water Conservation, Vol. 26, No. 5, pp. 189-192.
- Withers, P.J.A., and S.C. Jarvis. 1998. Mitigation options for diffuse phosphorus loss to water. Soil Use Manage. Vol. 14, pp. 186-192.

ANNEXE A : Description des utilitaires PERL

A1. Batch_file_runner

Ce programme permet d'exécuter plusieurs simulations de SWAT en série afin de tester différentes séries et assemblages de paramètres d'entrée. Les fichiers résultants *output.std*, et/ou *basins.rch* et/ou *basins.sbs* sont sauvegardés dans des répertoires distincts.

Le « Batch file runner » nécessite 3 fichiers en format texte :

Auto_run.pl qui contient les instructions à exécuter.

Auto_run_vars.pm qui contient la liste des variables pouvant être modifiées, la liste des fichiers de résultants à sauvegarder ainsi que le chemin d'accès à l'exécutable de SWAT et le chemin d'accès au fichier de modification des variables (*steering.txt*).

« **steering.txt** » contient les chemins d'accès au répertoire contenant les variables originales et au répertoire de résultats ainsi que la liste des variables à modifier.

A2. Chopper

Ce programme permet de couper une partie des fichiers résultants (.sbs, .bsb, .rch) de SWAT car ceux-ci peuvent devenir très volumineux, afin de ne garder les résultats que de certains sous-bassins ou URH URH. Ces résultats peuvent par la suite être analysés dans Excel.

Le « Chopper » nécessite 2 fichiers en format texte :

Swat_chop.pl qui contient les instructions à exécuter.

Swat_chop_vars.pm qui contient la liste des fichiers à couper, le chemin d'accès à ceux-ci ainsi que le chemin d'accès aux fichiers coupés. On y retrouve aussi les types de période à lire (journalier, mensuel, annuel), les années, les sous-bassins et les URH à extraire.

A3. Heat_date

Ce programme permet de calculer pour chacun des sous-bassins, le total des unités de chaleur au-dessus d'une température de base spécifiée (généralement 0°C). Le fichier résultant, *phutot.dat*, est nécessaire au fonctionnement de l'exécutable modifié de SWAT.

Ce programme utilise le fichier *tmp.tmp* du répertoire « ../txtinout/ » du projet de SWAT. À chaque fois que les années de roulement du modèle sont modifiées, le *heat_date.pl* doit être exécuté afin de créer un nouveau *phutot.dat* qui correspond au nouveau set-up. Le fichier *tmp.tmp* ne doit pas contenir de données manquantes (-99).

Heat_date ne nécessite qu'un fichier en format texte :

Heat_date.pl qui contient le chemin d'accès aux fichiers intrants, le nom et l'année du log, le nom du fichier résultant, la température de base à utiliser ainsi que les instructions à exécuter.

A4. Management

Ce programme permet de créer, en deux étapes, les fichiers de gestion agricole de SWAT (*.dbf et *.mgt). Premièrement, les fichiers de gestion ne comportant que le travail du sol, les semences et les récoltes sont créés. Dans un deuxième temps, les fertilisants et les pesticides y sont ajoutés.

Management nécessite 9 fichiers, séparés en 2 groupes:

Mgt1_template.dbf est le modèle du fichier intrant mgt1.dbf de SWAT.

Mgt2_template.dbf est le modèle du fichier intrant mgt2.dbf de SWAT.

CDBFLITE.exe permet de travailler les fichiers en format dbase à partir de commande en ligne (command line)

Dry_spell.pm contient les fonctions qui servent à trouver les périodes sans pluie pendant lesquelles les travaux aux champs sont permis. Ces fonctions sont appelées à partir des exécutables (*.pl) et servent à calculer l'année de simulation, calculer l'accumulation d'unités de chaleur dans l'année en cours, lire les données de précipitations ou encore à calculer les dates. Ce fichier contient aussi la quantité de pluie au-dessous de laquelle on considère qu'il n'y a pas de pluie.

Ces 4 fichiers ne sont jamais modifiés :

Create_mgt.pl contient les instructions pour créer les fichiers mgt1.dbf et mgt2.dbf.

Create_mgt_vars.pm contient les chemins d'accès aux fichiers intrants et aux fichiers de résultats. Il contient aussi le nombre de jour sans pluie avant qu'un travail du sol puisse être effectué ainsi que l'efficacité du mixage biologique et le facteur USLE P.

Crop_rot.pm contient toutes les informations concernant la gestion des cultures, sauf celles qui concernent les fertilisants et les pesticides. On y retrouve le nombre de jours requis avant qu'une opération puisse être effectuée pour chaque groupe de sol, les numéros de courbe par groupe de sol et utilisation du sol, les valeurs des paramètres de départs des cultures pérennes, les rotations et les paramètres des travaux du sol.

Ces 3 fichiers sont utilisés pour créer le mgt1.dbf et le mgt2.dbf sans fertilisant et sans pesticide :

Fert_pest.pl contient les instructions pour ajouter les fertilisants et les pesticides aux mgt1.dbf et mgt2.dbf ainsi qu'aux *.mgt. Ce programme nécessite les *.mgt de la première partie du programme. Comme le programme initial a été modifiée et que ceux-ci ne sont plus créés avec create_mgt.pl, ils doivent être créés dans SWAT et transférés dans le répertoire de travail de Perl.

Fert_pest_data.pm contient les dates d'épandage, le type et la quantité d'épandage de fertilisants ou de pesticide.

ANNEXE B : Modifications du code de SWAT

B1. Corrections pour permettre la simulation des cultures pérennes

Dormance des cultures pérennes

L'élaboration de scénarios de gestion ayant pour but la réduction des exportations de sédiments et de nutriments comporte souvent l'ajout de cultures de couverture de l'automne jusqu'au printemps. Ces cultures, dites pérennes, croissent jusqu'à la période de dormance ou jusqu'à ce que les températures ne permettent plus la croissance. Les plantes entrent alors en dormance et une partie de leur biomasse et de leur indice foliaire (Leaf Area Index - LAI) est conservé jusqu'au printemps où la croissance reprend.

Le code original de SWAT ne permettait pas de simuler ce type de croissance. SWAT tuait la plante à la première journée de dormance. Afin de palier à ce problème, le code de SWAT a été modifié afin de permettre de garder une partie de la biomasse en hiver, de laisser le LAI à une valeur minimale et de redémarrer la croissance à la fin de la période de dormance. Le fichier « perennial.dat », contenant les valeurs minimales du LAI et de la biomasse, a du être ajouté afin de fournir l'information supplémentaire.

Utilisation des températures réelles dans le calcul des fractions d'unités de chaleur annuelles

Même si SWAT utilise les températures réelles fournies par l'utilisateur pour calculer la température moyenne journalière qui sert entre autre à distinguer les précipitations neigeuses des précipitations pluvieuses, il utilise tout de même le générateur de climat pour calculer les fractions annuelles des unités de chaleur. Celles-ci sont utilisées pour identifier les dates des opérations dans les fichiers de gestion.

Un nouveau module (readphutot.f) a donc été ajouté au code de SWAT afin de remédier à ce problème. Cette modification fait lire les unités de chaleur annuelle totale pour chacun des sous-bassins dans le fichier « phutot.dat ». Ce fichier doit par contre être créé avant de faire rouler le modèle. L'utilitaire PERL Heat_date, discuté précédemment, sert à créer ce fichier. SWAT peut situer les fractions d'unités de chaleur en fonction des données existantes. Le tableau ci-bas présente, en bleu, les modifications apportées au code.

Modifications au code fortran de SWAT

Fichier	Code
Correction pour permettre la simulation de cultures hivernales	
Readmgt.f	<pre>nhv = 1 !! Ajouté 15-01-2003 case (5)!! nhv=0 !! Effacé 15-01-2003 nhv = nhv + 1 ihv(iro,nhv,ihru) = Jdt(ndays,day,mon) if (husc > 0.) then phuh(iro,nhv,ihru) = husc phuh(iro,nhv+1,ihru) = husc endif</pre>
Simulate.f	<pre>!! perform end-of-year processes icr(j) = 1 !! if crop is growing, reset values for accumulated heat units, etc. to zero in northern hemisphere if (igro(j) == 1) then if (lat(hru_sub(j)) > 0.) then !! phuacc(j) = 0. !! 15-01-2003 hufh(j) = 0. hia(j) = 0. endif phu(nro(j),icr(j),j) = phu(iix,iiz,j) ncr(nro(j),icr(j),j) = ncr(iix,iiz,j) hitar(nro(j),icr(j),j) = hitar(iix,iiz,j) ncrops(iix,iiz,j) = ncrops(iix,iiz,j) + 1 endif</pre>
Utilisation des températures réelles dans le calcul des fractions d'unités de chaleur annuelles	
Allocate_parms.f	<pre>allocate (phutot(myr,mbb))</pre>
Readinpt.f	<pre>call readphutot</pre>
Readphutot.f	<pre>use parm open (9876,file="phutot.dat") do i = 1, nbyr do j = 1,lubtot read (9876,*) phutot(i,j) end do end do close(9876) return end</pre>
Crpmd.f	<pre>!! update base zero total heat units if (tmpav(j) > 0. .and. phutot(curyr, hru_sub(j)) > 0.01) then gplt(j) = gplt(j) + tmpav(j) / phutot(curyr, hru_sub(j)) endif</pre>
Correction de la dormance des cultures pérennes	

```

Dormant.f      !! beginning of perennial (pasture/alfalfa) dormant period
                 case (3, 6)
                 idorm(j) = 1
                 resnew = 0.
                 resnew = .05 * bio_ms(j)           !! from 0.95
                 sol_rsd(1,j) = sol_rsd(1,j) + resnew
                 sol_rsd(1,j) = Max(sol_rsd(1,j),0.)
                 sol_fon(1,j) = sol_fon(1,j) + snup(j)
                 sol_fop(1,j) = sol_fop(1,j) + spup(j)
                 dm2(nro(j),icr(j),j) = bio_ms(j) + dm2(nro(j),icr(j),j)
                 dmanu(j) = dmanu(j) + bio_ms(j) / 1000.
                 bio_ms(j) = .95 * bio_ms(j)       !! from 0.05
                 snup(j) = 0.
                 spup(j) = 0.
                 strsw(j) = 1.
                 alai(j) = alai_min(ncr(nro(j),icr(j),j))
                 phuacc(j) = 0.

```

```

Dormant.f      alai(j) = alai_min(ncr(nro(j),icr(j),j))

```

Utilisation de l'ancien code pour restreindre la percolation si la couche inférieure est saturée

```

Percmicro.f  !! Restrict seepage if next layer is saturated
                 !! Copied from previous source code
                 if (iwatable > 0) then
                   if (ly1 < sol_nly(j)) then
                     if (sol_st(ly1+1,j) > sol_fc(ly1+1,j)) then
                       if (ldrain(j) /= ly1 + 1) sep = 0.01 * sep
                       end if
                     else
                       if (sol_sw(j) > 1.05 * sol_sumfc(j)) then
                         sep = 0.
                       end if
                     end if
                   end if
                 end if

```

Élimination du stress lié à la saturation des sols sur la croissance des racines

```

Swu.f         !!! commented aeration stress out !!!
                 !! adjust uptake if soil water is greater than 90% of plant available water
                 !! aeration stress
                 !   if (iwatable > 0) then
                 !   if (sol_z(k,j) > gwdepth(j) * 1000.) then
                 !   wuse(k) = 0.
                 !   endif
                 !   if (sol_sw(j) > 1.2 * sol_sumfc(j)) then
                 !   if (sol_st(k,j) > sol_fc(k,j)) then  !! commented 3 lines from here
                 !   wuse(k) = 0.                               !! N.Kannan
                 !   endif
                 !   endif

```

B2. Modification de l'espèce herbacée utilisée par défaut dans SWAT

La base de données des cultures de SWAT contient une liste relativement complète des cultures et des herbages retrouvés aux États-Unis. Pour chacune des espèces, une série de variables, utilisées dans le module de croissance de SWAT, s'y trouve.

Cette base de données peut être enrichie de nouvelles entrées. Les variables descriptives peuvent aussi être modifiées afin de mieux décrire un cultivar mieux adapté aux conditions de la région étudiée. Cette base de données contient aussi des catégories de cultures plus générales, comme les cultures à grandes interlignes, les pâturages ou les forêts. Ces grandes catégories utilisent les variables descriptives des cultivars de la base de données et celles-ci ne sont pas nécessairement optimales pour les conditions québécoises. Même si aucun cultivar n'a été ajouté à la base donnée, les valeurs par défaut de certaines catégories ont été modifiées. Le tableau ci-bas identifie les catégories dont les cultivars ont été modifiés.

Changements apportés à la base de données des cultures

Catégorie	Cultivar original	Cultivar utilisé
Prairie (PAST)	<i>Cynodon (Cynodon dactylon)</i>	Trèfle rouge (<i>Trifolium Pretense L.</i>)
Jachère (RNGB)	Schizachyrium à balais (<i>Schizachyrium scoparium</i>)	Fétuque élevée (<i>Festuca arundicea</i>)

Catégorie	Code	Valeurs originales		Modifications	
Céréales	OATS	DLAI0.8		DLAI0.9	
		TBASE	0.0	TBASE	4.0
		BP1	0.0084	BP1	0.0050
		BP2	0.0032	BP2	0.0020
		BP3	0.0019	BP3	0.0010
Maïs	CORN	BIO_E	39	BIO_E	35
		HVSTI	0.5	HVSTI	0.75
		BLAI	3.0	BLAI	4.0
		DLAI	0.7	DLAI	0.8
Soja	SOYB	HVSTI	0.31	HVSTI	0.48
		DLAI	0.60	DLAI	0.90
Prairie	CLVR	DLAI	0.60	DLAI	0.60

ANNEXE C : Tableau des paramètres utilisés sur les 4 sous-bassins lors du calage du modèle SWAT puis, sur l'ensemble des 99 sous-bassins de la rivière aux Brochets

Fichier	Paramètre	99 BASSINS			AMONT	AVAL	WALBRIDGE INTERVENTION	WALBRIDGE TEMOIN
.BSN	SFTMP	2			1	2	0	0
	SMTMP	0			2	0	-1	-1
	SMFMX	10			4.2	10	4.5	4.5
	SMFMN	2			1.4	2	4.5	4.5
	TIMP	0.25			0.5	0.25	0.45	0.45
	SNOCOVMX	50			250	50	280	280
	SNO50COV	1			1	1	0.2	0.2
	SURLAG	1			4	1	1	1
	APM	0.9			1	1	0.9	0.9
	PRF	2			1	1	0.5	0.5
	SPCON	0.01			0.01	0.01	0.01	0.01
	SPEXP	1.5			1.5	1.5	1.5	1.5
	UBP	27.5			20	100	27.5	27.5
	PPERCO	10			10	5	10	10
	PHOSKD	200			175	100	200	200
PSP	0.4			0.4	0.4	0.4	0.4	
.GW	SHALLST	Brochet aval	Walbridge Témoin et aval de Brochet aval	Walbridge intervention	250	250	500	500
		250	500	500				
	DEEPST	50	25	25	25	50	25	25
	GW_DELAY	FRST=1; AUTRE=30	7	7	15	1(frst); 30	7	7
	ALPHA_BF	0.3	0.9	0.6	0.25		0.3	0.6
	GWQMN	150	200	395	150	150	395	200
	GW_REVAP	0.02			0.02	0.02	0.02	0.02
	REVAPMN	125	125	125	1	1	125	125
RCHRG_DP	0.25	0.15	0.15	0.25	0.25	0.15	0.15	

Fichier	Paramètre	99 BASSINS			AMONT	AVAL	WALBRIDGE INTERVENTION	WALBRIDGE TEMOIN
.HRU	OV_N	CORN = 0.12 94: CORN-rougement & CORN-milton = 0.325 SOYB = 0.12 OATS = 0.12 CRRT = 0.12 APPL = 0.70 RNGB = 0.35 PAST = 0.35 FRST = 0.70 UTRN = 0.10 URMD = 0.10 UCOM = 0.10 WETL = 0.05			CORN = 0.12 SOYB = 0.12 OATS = 0.12 CRRT = 0.14 APPL = 0.70 RNGB = 0.70 PAST = 0.70 FRST = 0.70 UTRN = 0.10 URMD = 0.10 UCOM = 0.10 WETL = 0.05	CORN = 0.12 SOYB = 0.12 OATS = 0.12 CRRT = 0.14 APPL = 0.70 RNGB = 0.70 PAST = 0.70 FRST = 0.70 UTRN = 0.10 URMD = 0.10 UCOM = 0.10 WETL = 0.05	CORN = 0.12 CORN-rougement & CORN-milton = 0.325 SOYB = 0.12 OATS = 0.12 CRRT = NA APPL = 0.70 RNGB = 0.35 PAST = 0.35 FRST = 0.70 UTRN = 0.10 URMD = NA UCOM = NA WETL = NA	CORN = 0.12 SOYB = 0.12 OATS = 0.12 CRRT = NA APPL = 0.7 RNGB = 0.35 PAST = 0.7 UTRN = 0.1 URMD = 0.1 UCOM = 0.1 WETL = NA
	SLSUBSN	Brochet amont	Walbridge Témoin, aval et aval de Brochet aval	Walbridge intervention	50	50 amont 60 aval	30	120
		60	120	30				
	SLSOIL	0(WETL& 94) ; 15 (CORN,SOYB ET TOUT AVAL DE BROCHET AVAL ; 30 (PAST, RNGB, APPL, FRST, U*)			0	15 ; 30 (PAST, RNGB, APPL, FRST, U*)	150	150
	ESCO	0.05 (aval castor) ; 0.75(94) ; 0.9			0.1	0.9	0.75	0.05
	EPCO	0.1(frst+castor+wal int) ; 0.3 (ailleurs)			0.5	0.3	0.1	0.1
	ERRORGP	1.7 FRST, U*=1.0 WETL=0.5 WATR=0			0.0	0.0	1.7	1.7
	FILTERW	1			0.0	0.5	1	1
	DRRAIN	Brochet aval	Walbridge Témoin et aval de Brochet aval	Walbridge intervention	900	900	900	900
		900	900	900				
TDRAIN	18	48	48	18	18	48	48	
GDRAIN	12	24	24	12	12	24	24	

Fichier	Paramètre	99 BASSINS	AMONT	AVAL	WALBRIDGE INTERVENTION	WALBRIDGE TEMOIN
RTE	CH_S2	0.005	variable	Variable	0.005	0.005
	CH_N2	0.06	0.014	0.025 (75+wal temoin) ; 0.075 (varié) ; 0.1 (varié) ; 0.14 (wal int)	0.06	0.05
	CH_K2	15	0.0	0.505 ; 1.263 ; 14.89 ; 15.50	15	0.025
	CH_EROD	0.01	0.0	0.50	0.01	0.01
	CH_COV	0.05	0.0	0.50	0.05	0.05
SUB	CH_K1	15	0.5	0.505 ; 0.89 ; 1.263 ; 15.50	15	0.025
	CH_N1	0.055	0.014	0.025 ; 0.075 ; 0.1 ; 0.14	0.055	0.05

** Deux .mgt ont été modifiés pour modéliser le travail réduit du Walbridge (000940013.mgt et 000940014.mgt)

** Le texte apparaissant en gris dans le tableau identifie les paramètres associés aux exportations de phosphore et sédiments qui n'ont pas été calibrés à certaines échelles, dû au manque de données.