

ODEP
OUTIL DE DIAGNOSTIC DES EXPORTATIONS DE PHOSPHORE
MANUEL DE L'UTILISATEUR

Par :

**L'INSTITUT DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT EN
AGROENVIRONNEMENT (IRDA)**

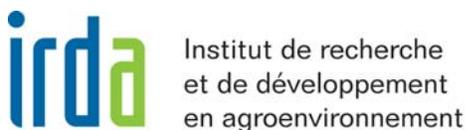
et

**LE CENTRE DE RÉFÉRENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE
DU QUÉBEC (CRAAQ)**

Dans le cadre du projet :
**GESTION DU RISQUE ASSOCIÉ AUX FACTEURS SOURCES ET
TRANSPORT DU PHOSPHORE DES SOLS CULTIVÉS AU QUÉBEC**

Pour
**L'INITIATIVE D'APPUI AUX CONSEILLERS AGRICOLES
(PIACA-204)**

Octobre 2009



Institut de recherche
et de développement
en agroenvironnement

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) est une corporation de recherche à but non lucratif, constituée en mars 1998 par quatre membres fondateurs, soit le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) et le ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation (MDEIE).



Le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) est un vaste réseau d'experts issu du regroupement, en avril 2000, du Conseil des productions animales du Québec (CPAQ), du Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ) et du Groupe de gestion et d'économie agricoles (GÉAGRI).

Pour en savoir plus :

www.irda.qc.ca

www.craaq.qc.ca

Pour nous rejoindre :

IRDA

Saint-Hyacinthe

Centre de recherche et siège social

3300, rue Sicotte, C. P. 480

Saint-Hyacinthe (Québec)

J2S 7B8 CANADA

Tél. : 450 778-6522

Télé. : 450 778-6539

IRDA

Québec

Centre de recherche

2700, rue Einstein

Québec (Québec)

G1P 3W8 CANADA

Tél. : 418 643-2380

Télé. : 418 644-6855

CRAAQ

Québec

Siège social

2875, boulevard Laurier, 9^e étage

Québec (Québec)

G1V 2M2 CANADA

Tél. : 418 523-5411

Tél. : 1 888 535-2537

Télé. : 418 644-5944

Le rapport peut être cité comme suit :

Michaud, A.R., M. Giroux, I. Beaudin, J. Desjardins, G. Gagné, M. Duchemin, J. Deslandes, C. Landry, P. Beaudet et J. Lagacé. 2008. ODEP; un Outil de diagnostic des exportations de phosphore. Projet « Gestion du risque associé aux facteurs source et transport du phosphore des sols cultivés au Québec », réalisé dans le cadre de l'Initiative d'appui aux conseillers agricoles (PIACA-204). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA) et Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec, Canada.

**ODEP
OUTIL DE DIAGNOSTIC DES
EXPORTATIONS DE PHOSPHORE**

MANUEL DE L'UTILISATEUR

**GUIDE D'OPÉRATION
THÉORIE ET
CONCEPTS DE MODÉLISATION**

Préparé par :

Aubert Michaud
Isabelle Beaudin
Marcel Giroux
Julie Deslandes
Gilles Gagné

Équipe de réalisation :

Responsable scientifique : Aubert M. Michaud, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

Pierre Beaudet	ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec	(MAPAQ)
Isabelle Beaudin	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc.	(IRDA)
Julie Deslandes	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc.	(IRDA)
Jacques Desjardins	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc.	(IRDA)
Marc Duchemin	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc.	(IRDA)
Gilles Gagné	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc.	(IRDA)
Marcel Giroux	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc.	(IRDA)
Colline Gombault	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc.	(IRDA)
Joanne Lagacé	Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec	(CRAAQ)
Christine Landry	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc.	(IRDA)
Yves Lemay	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc.	(IRDA)

Stagiaires :

Jean-Baptiste Sarr, Agrocampus, Rennes, France
Jean-Daniel Sylvain, Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke

Collaboration scientifique :

Chandra Madramootoo, Centre Brace pour la gestion des ressources hydriques, Université McGill
Mohamed Chickhaoui, Centre Brace pour la gestion des ressources hydriques, Université McGill

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
1. INTRODUCTION	10
2. CARACTÉRISTIQUES FONCTIONNELLES ET OPÉRATION DU LOGICIEL	12
2.1 Installation et ouverture de l'ODEP	13
2.2 Menu d'accueil	14
2.3 Inscription d'une nouvelle entreprise dans l'ODEP.....	15
2.4 Inscription d'un nouveau champ à l'entreprise.....	16
2.4.1 Saisie de la superficie de la parcelle	18
2.4.2 Régie des sols et des cultures.....	19
2.4.3 Description du sol	23
2.4.4 Relief et condition de drainage	25
2.4.5 Aménagement hydro-agricole.....	27
2.5 Saisir l'information d'un autre champ de l'entreprise	29
2.6 Consulter l'évaluation des exportations d'un champ.....	29
2.7 Consulter l'évaluation des exportations de l'entreprise.....	30
2.8 Saisie de nouveaux scénarios.....	31
2.8.1 Scénario alternatif de gestion élaboré pour un champ	31
2.8.2 Scénario alternatif de gestion élaboré pour l'ensemble de l'entreprise	32
2.9 Consulter les données d'une entreprise	36
2.10 Autres menus utiles.....	37
3.0 THÉORIE ET CONCEPTS DE MODÉLISATION	40
3.1 Cadre d'application de l'outil.....	40
3.2 Cadre d'opération de l'outil.....	42
3.3 Description des modules et des bases de données	45
3.3.1 Base de données hydro-pédologiques	46
3.3.2 Module <i>Hydrologie</i>	54
3.3.3 Module <i>Agroclimat</i>	66
3.3.4 Module <i>Érosion</i>	69
3.3.5 Module <i>Phosphore</i>	75
3.3.5.1 <i>Perte de phosphore dans les eaux de ruissellement.....</i>	<i>76</i>

3.3.5.2 Perte de phosphore dans les eaux de drainage	81
3.3.5.3 Perte de phosphore associée aux engrais de ferme	84
3.4 Validation des prédictions et valeurs de référence	85

RÉFÉRENCES	89
-------------------------	-----------

ANNEXE 1. DONNÉES REQUISES LORS DE LA CRÉATION DE SCÉNARIOS DANS L'ODEP.	94
--	-----------

ANNEXE 2. RÉGIONS AGROCLIMATIQUES DE L'ODEP.....	95
---	-----------

ANNEXE 3. INFORMATIONS CONTENUES DANS LA BASE DE DONNÉES HYDROPÉDOLOGIQUES DE L'ODEP.....	96
--	-----------

ANNEXE 4. VARIATION DU RUISSELLEMENT EN FONCTION DES GROUPES HYDROLOGIQUES POUR QUATRE CLASSES DE CULTURE....	99
--	-----------

ANNEXE 5. AJUSTEMENT DU MODÈLE DE PRÉDICTION DES EXPORTATIONS NETTES DE SÉDIMENTS.....	101
---	------------

ANNEXE 6. PROTOCOLES DE DOSAGE DES DIFFÉRENTES FRACTIONS DU PHOSPHORE, COLLIGÉES DANS LE CADRE DES DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX ET UTILISÉES DANS LE DÉVELOPPEMENT DE L'ODEP	103
--	------------

ANNEXE 7. DISTRIBUTION DES PARAMÈTRES DE QUALITÉ DE L'EAU PRÉDITS PAR L'ODEP	105
---	------------

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Procédure pour ouvrir le fichier Microsoft® Access de l'ODEP afin de s'assurer du fonctionnement de l'ensemble des modules du système.....	13
Figure 2.2 Fenêtre d'accueil du logiciel ODEP offrant la possibilité d'inscrire une nouvelle entreprise ou de consulter/éditer les données d'une entreprise déjà inscrite.....	15
Figure 2.3 Fenêtre associée à l'identification de l'exploitant et de ses champs.....	16
Figure 2.5 La saisie d'un identifiant et de la superficie d'un champ fait apparaître l'onglet parcelle.	17
Figure 2.6 Fenêtre associée à la saisie des données sur la régie des sols et des cultures, la description du sol, le relief et les conditions de drainage, et les aménagements hydro-agricoles.....	18
Figure 2.7 Section de la fenêtre associée à la saisie de la superficie d'une parcelle et du bassin versant auquel elle est associée.	19
Figure 2.8 La saisie des cultures actuelles et antérieures.....	20
Au niveau des cultures de conservation, il est possible de considérer deux types de pratique, soit la culture associée et la culture dérobée en cliquant dans la case appropriée (Figure 2.9). On associe la culture dérobée à une culture de céréales ou de crucifères suivant la récolte. Quant à la culture associée, elle correspond à une culture d'accompagnement de la culture principale (par exemple une implantation de légumineuses ou d'une prairie à une culture de céréales).	
Figure 2.11 La saisie de la quantité et du mode d'application des engrais minéraux.....	22
Figure 2.12 La saisie de la quantité, de la période d'épandage et du délai d'incorporation pour chaque dose d'engrais de ferme.....	23
Figure 2.14 Fenêtre de saisie de la description du sol du champ ou de la parcelle et menu déroulant permettant une saisie facile des données.....	27
Figure 2.15 Fenêtre de saisie des informations sur les aménagements hydro-agricoles du champ.	27
Figure 2.16 Onglet pour retourner à la fenêtre du portrait initial des champs de l'exploitant.	28
Figure 2.17 Options accessibles par le biais de la fenêtre associée au portrait des champs de l'exploitant.....	29
Figure 2.18 Rapport des indicateurs des pertes de phosphore pour le champ sélectionné et ses parcelles.	30
Figure 2.19 Fenêtre apparaissant lorsque le bouton <i>Ajout d'un scénario</i> est sélectionné.....	31
Figure 2.20 Fenêtre apparaissant lorsque le bouton « OK » est sélectionné et qui permet d'élaborer un scénario alternatif de gestion pour un champ donné.	32
Figure 2.22 Fenêtre d'ajout d'un nouveau scénario.....	33
Figure 2.24 Menu permettant de modifier les caractéristiques et les modes de gestion des champs d'une entreprise.....	35
Figure 2.25 Fenêtre d'accueil permettant de consulter les données d'une entreprise déjà inscrite.....	37
Figure 2.26 Autres menus utiles de l'ODEP.....	38
Figure 2.27 Procédure pour ouvrir le fichier Microsoft® Access de l'ODEP afin d'ajouter le nom du bassin versant dans lequel se situe l'entreprise agricole.	39
Figure 3.1 Schéma conceptuel de l'ODEP.	43
Figure 3.2 Dix-huit régions agroclimatiques retenues dans le cadre de l'ODEP.....	44
Figure 3.3 Code de perméabilité basé sur la classification des textures (Cook et coll., 1985).	52
Figure 3.4 Code de structure basé sur la classification des textures (Cook et coll., 1985).	53
Figure 3.5 Bilan hebdomadaire des hauteurs d'eau associées au ruissellement et à l'écoulement aux drains pour les bassins versants expérimentaux du ruisseau Fourchette, en Beauce (a) et du ruisseau Walbridge en Montérégie entre octobre 2004 et décembre 2006.....	56
Figure 3.6 Bilan des exportations saisonnières d'eau et de phosphore par le ruissellement et les écoulements aux drains aux sites expérimentaux de la rivière aux Brochets de l'automne 2002 à l'été 2006.	58
Figure 3.7 Équations décrivant le volume de ruissellement en fonction des groupes hydrologiques pour la culture de maïs.	59
Figure 3.8 Équations décrivant la relation entre l'écoulement aux drains et le ruissellement pour quatre types de culture.	59
Figure 3.9 Image multispectrale acquise au printemps (mai 2006) du bassin versant expérimental du ruisseau Ewing en Montérégie, combinée au modèle numérique d'élévation généré à partir d'un relevé LIDAR.	64
Figure 3.10 Illustration de l'échantillonnage spatial des crues du bassin versant du ruisseau au Castor....	65

Figure 3.11 Délimitation des micro bassins et des parcours de l'eau à l'échelle intra-parcellaire du bassin versant du ruisseau Ewing en Montérégie Est (a) et relation entre le parcours maximal de l'eau et le parcours moyen pour l'ensemble des parcelles du bassin versant (b).....	72
Figure 3.12 Ajustement du modèle de prédiction des exportations nettes de sédiments pour la culture du maïs grain à partir du ruissellement, des exportations de sédiments prédits ainsi que des valeurs des facteurs K, LS et C pour le bassin versant expérimental du ruisseau Walbridge en Montérégie, de novembre 2001 à mai 2003.....	74
Figure 3.13 Relation entre le P réactif dissous (a), le P total dissous (b), et la saturation en P (P/Al) des sols, établis à l'aide de la méthode Mehlich-3.	77
Figure 3.14 Relation entre le facteur d'enrichissement en P des sédiments, estimé sur la base d'un taux de P total du sol moyen de 1,000 mg kg ⁻¹ , et la concentration en MES des eaux de ruissellement modélisée aux exutoires des bassins expérimentaux de référence (Michaud et coll., 2007).....	80
Figure 3.15 Relation entre la biodisponibilité du P particulaire et la teneur en P _{M-3} des sols.	81
Les informations contenues dans la base de données hydro pédologiques servent principalement à identifier chacun des sols d'une entreprise agricole à un groupe hydrologique et à calculer l'érodabilité. Le groupe hydrologique, la présence de drainage souterrain, la condition du drainage de surface ainsi que la condition du profil cultural entrent dans le calcul de la hauteur de ruissellement exporté. L'ODEP utilise neuf groupes hydrologiques, numérotés de 1 à 9. Certains de ces groupes correspondent aux groupes hydrologiques du USDA-NRCS (2007) (Tableau A3.2).....	96
Figure A4.1 Variation du ruissellement en fonction des groupes hydrologiques pour la culture du maïs..	99
Figure A4.2 Variation du ruissellement en fonction des groupes hydrologiques pour la culture du soya..	99
Figure A4.3 Variation du ruissellement en fonction des groupes hydrologiques pour la culture de céréales.	100
Figure A4.4 Variation du ruissellement en fonction des groupes hydrologiques pour la culture de prairies ou pâturages.	100
Figure A5.1 Ajustement du modèle de prédiction des exportations nettes de sédiments pour la culture du maïs.....	101
Figure A5.2 Ajustement du modèle de prédiction des exportations nettes de sédiments pour la culture de soya.....	101
Figure A5.3 Ajustement du modèle de prédiction des exportations nettes de sédiments pour la culture de céréales.....	102
Figure A5.4 Ajustement du modèle de prédiction des exportations nettes de sédiments pour la culture de prairie ou pâturage et culture de couverture.....	102
Figure A6.1 Diagramme représentant les fractions de phosphore dans les eaux de ruissellement de surface et dans les eaux des drains souterrains.....	103
Figure A7.1 Distribution des paramètres de qualité de l'eau prédits par l'ODEP pour le parcellaire de trois paires de bassins versants jumeaux (Walbridge, La Guerre, Fourchette).	105
Figure A7.1 (suite) Distribution des paramètres de qualité de l'eau prédits par l'ODEP pour le parcellaire de trois paires de bassins versants jumeaux (Walbridge, La Guerre, Fourchette).....	106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Moyennes annuelles des composantes du bilan hydrique modélisées pour les bassins versants des ruisseaux au Castor, Walbridge et Morpions pour la période de 2000 à 2003.....	55
Tableau 3.2 Classes d'écoulement de surface en fonction des critères hydropédologiques de pente, de position dans le relief et de présence de dépressions.	63
Tableau 3.3 Classe de condition du profil cultural.	66
Tableau 3.4 Facteurs de couverture végétale <i>C</i> retenus dans l'ODEP pour la prédiction des exportations nettes de sédiments (adaptés de Michaud et <i>coll.</i> , 2007; Wall et <i>coll.</i> , 2007).....	73
Tableau 3.5 Détermination de la teneur naturelle en P total et en P_{M-3} provenant de 158 séries de sol selon les groupes texturaux.	79
Tableau 3.6 Concentrations moyennes de référence de l'ODEP pour les différentes fractions du P dans l'eau des drains selon la texture des sols et le type de culture.	84
Tableau 3.7 Facteurs d'incorporation et de période.	85
Tableau 3.8 Flux mesurés aux exutoires des trois paires de bassins versants jumeaux du réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles pour les périodes 2001-2003 et 2004-2006, et sommation à l'échelle du bassin versant des prédictions massiques de l'ODEP pour leurs parcelles respectifs (adapté de Michaud et <i>coll.</i> , 2004, 2008).....	87
Tableau 3.9 Valeurs de référence et critères d'interprétation associés aux prédictions d'exportation nette de sédiments et de phosphore de l'ODEP.	88
Tableau A1.1 Données requises lors de la création de scénarios dans l'ODEP.	94
Tableau A2.1 Les régions agroclimatiques de l'ODEP et leurs facteurs de pondération de la lame d'eau et du ruissellement annuel.....	95
Tableau A3.1 Informations contenues dans la base de données hydropédologiques de l'ODEP.	96
Tableau A3.2 Correspondance entre les groupes hydriques de l'ODEP et ceux du USDA-NRCS.....	96

1. Introduction

Depuis plusieurs années déjà, le rôle du phosphore dans la problématique de la qualité de l'eau est reconnu. Bien que le phosphore ne soit pas toxique pour l'être humain, une quantité excessive peut être dommageable pour l'environnement. En grande quantité, le phosphore est une des principales causes de l'eutrophisation; la croissance rapide de la végétation aquatique, comme le phytoplancton, les algues et les cyanobactéries. En raison des toxines produites par certains types de cyanobactéries, le développement de fleurs d'eau demeure une sérieuse préoccupation de santé publique.

Des efforts importants ont été faits dans les dernières décennies afin de réduire les sources ponctuelles de phosphore provenant des zones urbaines, tels que les rejets d'usines, les rejets d'égouts ou des usines de filtration et les fosses septiques. Ce sont maintenant les sources diffuses de phosphore qui sont responsables de la plus large part des exportations vers les eaux de surface. Reconnaisant le rôle déterminant des apports de phosphore dans la dégradation des écosystèmes aquatiques en région rurale au Québec, il devient impératif de mieux gérer les sources agricoles diffuses de P. Les conseillers et producteurs agricoles utilisent depuis plusieurs années, des outils de gestion de la fertilisation qui permettent de gérer les ressources en phosphore à l'échelle de la ferme. Ainsi, les exploitations agricoles visées par le Plan agroenvironnemental de fertilisation (PAEF) ont l'obligation de produire un bilan phosphore qui dresse l'inventaire des charges de phosphore, produites ou importées, et de la capacité de support des sols à disposer de ces charges. Toutefois, cet outil ne tient pas compte des facteurs de transport du phosphore vers le milieu aquatique, ni des pratiques de conservation des sols ou des aménagements hydro-agricoles du parcellaire qui réduisent les risques de contamination du milieu aquatique. L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA) et le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), sous l'égide du comité ad hoc groupe mobilité phosphore du CRAAQ, ont donc mis en commun leurs ressources afin de développer un outil de gestion du risque de la mobilité du phosphore en milieu agricole au Québec.

Le développement de l'ODEP répond ainsi au besoin de doter les services conseils agricoles d'un outil universellement accepté de diagnostic, de recommandations et de suivi du risque environnemental lié au phosphore de sources agricoles. L'ODEP met à profit diverses études agroenvironnementales réalisées au Québec au cours des dix dernières années dans le cadre de dispositifs à diverses échelles spatiales, de la parcelle expérimentale, au champ jusqu'au bassin versant. Ces recherches ont permis de caractériser les dynamiques d'accumulation du P dans les sols et son transport vers le milieu aquatique en considérant les conditions climatiques, la nature des sols et l'aménagement des terres propres au Québec. Ces connaissances de base permettent aujourd'hui d'offrir aux intervenants en agroenvironnement un nouvel outil qui est simple, efficace et convivial. L'ODEP fait intervenir autant les notions de source de phosphore que les notions de transport de surface et souterrain du phosphore dans l'élaboration de stratégies de gestion à l'échelle de la ferme.

L'ODEP est un utilitaire informatique permettant d'apprécier les risques d'exportation diffuse de phosphore à l'échelle d'une parcelle ou d'un ensemble de parcelles données, et d'aiguiller le conseiller et le producteur vers des solutions bien adaptées aux spécificités du site à l'étude. Un utilitaire informatique ne remplace cependant pas le jugement professionnel du conseiller agricole. Celui-ci est d'ailleurs largement sollicité autant dans la phase de caractérisation du territoire que dans l'interprétation des résultats et l'élaboration des recommandations. L'interprétation de données à référence spatiale (photographies aériennes, cartes pédologiques, etc.) et les observations effectuées sur le terrain demeurent des composantes essentielles du processus de diagnostic supporté par l'ODEP. La conception et les fonctionnalités de l'utilitaire ODEP en font un outil complémentaire et bien intégré aux autres outils couramment utilisés par les services-conseils au Québec ou en voie de le devenir. L'outil développé s'harmonise ainsi avec les banques de données et les outils informatiques existants en matière de fertilisation intégrée des cultures. Par ailleurs, on ne peut concevoir une démarche de diagnostic à l'échelle du parcellaire sans recourir à une forme ou une autre d'outils à référence spatiale (géomatique). Le format convivial de l'ODEP facilite ainsi les opérations d'entrée de

données et la représentation spatiale des résultats dans des systèmes d'informations géographiques (SIG).

Le présent manuel de l'utilisateur de l'Outil de diagnostic des exportations de phosphore (ODEP) se divise en deux parties. En première section, les caractéristiques fonctionnelles et les étapes à suivre lors de l'utilisation de l'outil font l'objet d'une description détaillée. Les fondements théoriques, les méthodes de calcul et les sources de données à la base du développement des différents modules de l'ODEP sont présentés en deuxième section.

2. Caractéristiques fonctionnelles et opération du logiciel

L'opération du logiciel se déroule selon trois étapes :

1. L'utilisateur doit d'abord importer et/ou saisir les informations de base nécessaires aux routines de calcul de l'ODEP. Celles-ci incluent la zone climatique, le relief des champs, la pédologie, les conditions de drainage, l'aménagement des terres, de même que la régie des sols et des cultures (scénario initial) pour chaque champ de l'exploitation agricole.
2. À partir des données fournies, les routines de calcul de l'ODEP produisent des prédictions de hauteurs d'eau ruisselée et drainée, des taux d'exportation de sédiments et enfin des taux d'exportation de phosphore associés aux eaux de drainage, aux eaux de ruissellement, à l'érosion et aux engrais appliqués. La nature (soluble et particulaire) et la biodisponibilité des exportations prédites de phosphore s'ajoutent au bilan produit. À la demande de l'utilisateur, les résultats sont présentés sous la forme de rapports (chiffriers ou documents) à l'échelle de la parcelle, du champ, de l'entreprise ou d'un ensemble d'entreprises.
3. Suivant la modélisation du scénario initial de régie, l'utilisateur peut composer à volonté différents scénarios de gestion des champs, à l'échelle de l'exploitation. Ces derniers sont identifiés et conservés dans la banque de données de l'ODEP pour référence ultérieure et dans l'édition de différents rapports comparant les résultats de la simulation selon le scénario initial de gestion (0) avec différents scénarios alternatifs.

L'ODEP a été développé dans le logiciel Microsoft® Access, en raison de son utilisation largement répandue, sa convivialité et de ses fonctionnalités bien adaptées à la création, à la manipulation et à la modification des solutions de bases de données requises par l'ODEP. La présente section décrit plus en détail le fonctionnement de l'ODEP.

2.1 Installation et ouverture de l'ODEP

L'ODEP sera généralement fourni sous un format compressé nommé ODEP.zip. Dans un premier temps, vous devrez créer un répertoire sur votre ordinateur pour y copier ce fichier puis le décompresser. Ceci produira 2 fichiers, soit :

1. Un fichier ODEP.mdb qui est, proprement dit, l'utilitaire Microsoft® Access rassemblant l'ensemble des fonctionnalités ainsi que la base de données, qui seront intégrées aux entreprises de votre région;
2. Un fichier ODEP.xls qui est le fichier Microsoft® Excel lié à l'application Access. Il constitue la structure de base pour l'importation des données existantes pertinentes aux caractéristiques des parcelles et leur gestion.

Note importante

Afin de s'assurer que l'ensemble des fonctions de l'ODEP soient opérationnelles, vous devez toujours vous assurer d'ouvrir votre utilitaire *ODEP* dans Microsoft® Access en utilisant le menu *Fichier/Ouvrir* (Figure 2.1) puis en allant sélectionner le fichier *ODEP.mdb* dans le répertoire où vous avez décompressé le fichier *ODEP.zip*. De plus, le fichier *ODEP.xls* doit toujours être dans le même répertoire que le fichier *ODEP.mdb*.

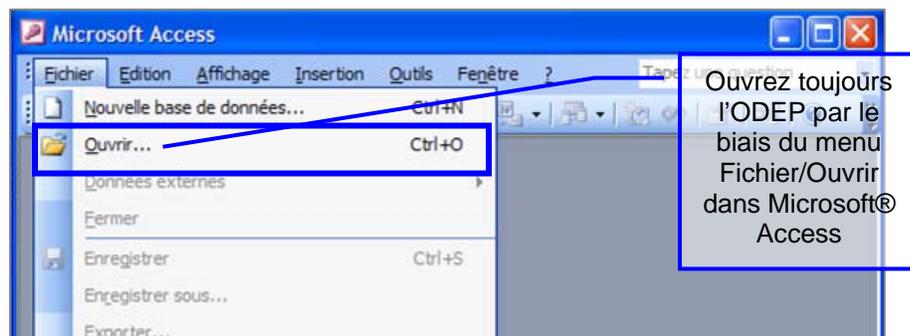


Figure 2.1 Procédure pour ouvrir le fichier Microsoft® Access de l'ODEP afin de s'assurer du fonctionnement de l'ensemble des modules du système.

2.2 Menu d'accueil

À l'ouverture de l'ODEP, la fenêtre d'accueil de l'outil s'affichera (Figure 2.2). À ce moment, trois possibilités vous sont offertes, soit :

1. Accéder au formulaire d'inscription d'une exploitation. Cette option vous permet d'ajouter une nouvelle exploitation à la base de données de l'ODEP. Il vous sera par la suite possible d'intégrer les informations relatives à la gestion de chacun de ses champs en vue d'évaluer les exportations générées par ceux-ci et même d'estimer l'impact de scénarios alternatifs de gestion. Cette option vous amènera au menu présenté à la figure 2.3 et est également abordée à la section 2.3;
2. Consulter des données d'une entreprise. Cette option vous permet d'accéder aux informations détaillées de l'exploitant qui sont déjà intégrées dans le système. Cette fonction vous permet également d'appliquer l'ensemble des fonctionnalités de l'ODEP sur cette entreprise;
3. Accéder à des options supplémentaires. Cette fonction vous donne accès à des fonctionnalités pour importer des données existantes dans l'ODEP, identifier les bassins versants de votre région et produire des rapports globaux à l'échelle de l'entreprise et du bassin versant. Ces fonctions sont détaillées à la section 2.10.

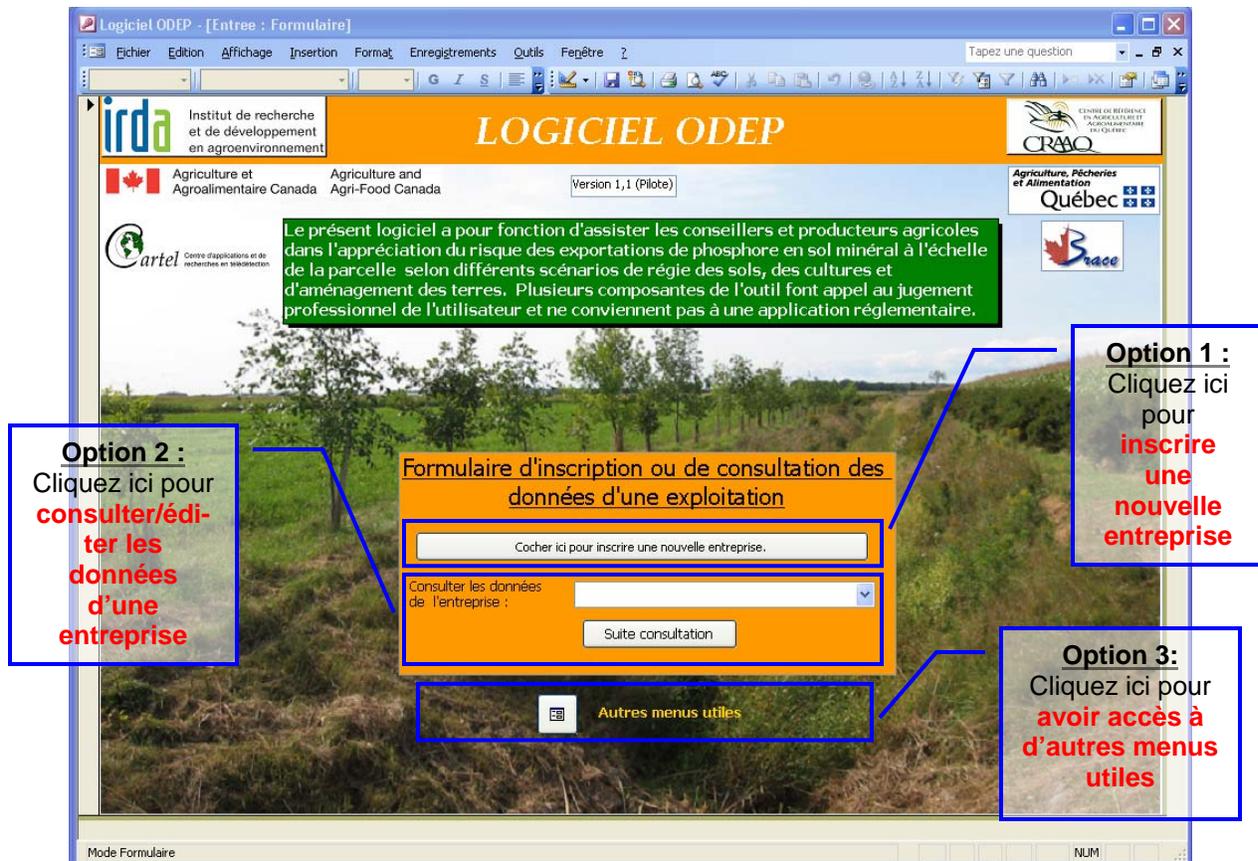


Figure 2.2 Fenêtre d'accueil du logiciel ODEP offrant la possibilité d'inscrire une nouvelle entreprise ou de consulter/éditer les données d'une entreprise déjà inscrite.

2.3 Inscription d'une nouvelle entreprise dans l'ODEP

Lorsque vous choisissez d'inscrire une nouvelle entreprise, la fenêtre ci-dessous apparaîtra (Figure 2.3). Cette fenêtre se subdivise en deux sections :

1. L'identification de l'exploitant (zone orange). L'identification de l'exploitant requiert la saisie d'informations permettant de reconnaître et de localiser l'entreprise, soit le nom de l'exploitant, son adresse, sa municipalité, son code postal ainsi que la région hydrologique à laquelle il appartient. Lorsque la région hydrologique est saisie, un menu déroulant facilite sa sélection. Enfin, un numéro sera automatiquement attribué à chaque nouvelle entreprise qui sera enregistrée à l'aide de ce menu;

2. L'identification des champs de l'exploitant (zone verte). Toutes les informations relatives à la description et à la gestion des champs de l'entreprise sont saisies par le biais de cette option. Il est nécessaire de cliquer sur le bouton

Ajouter un nouveau champ à l'entreprise pour réaliser l'ajout.

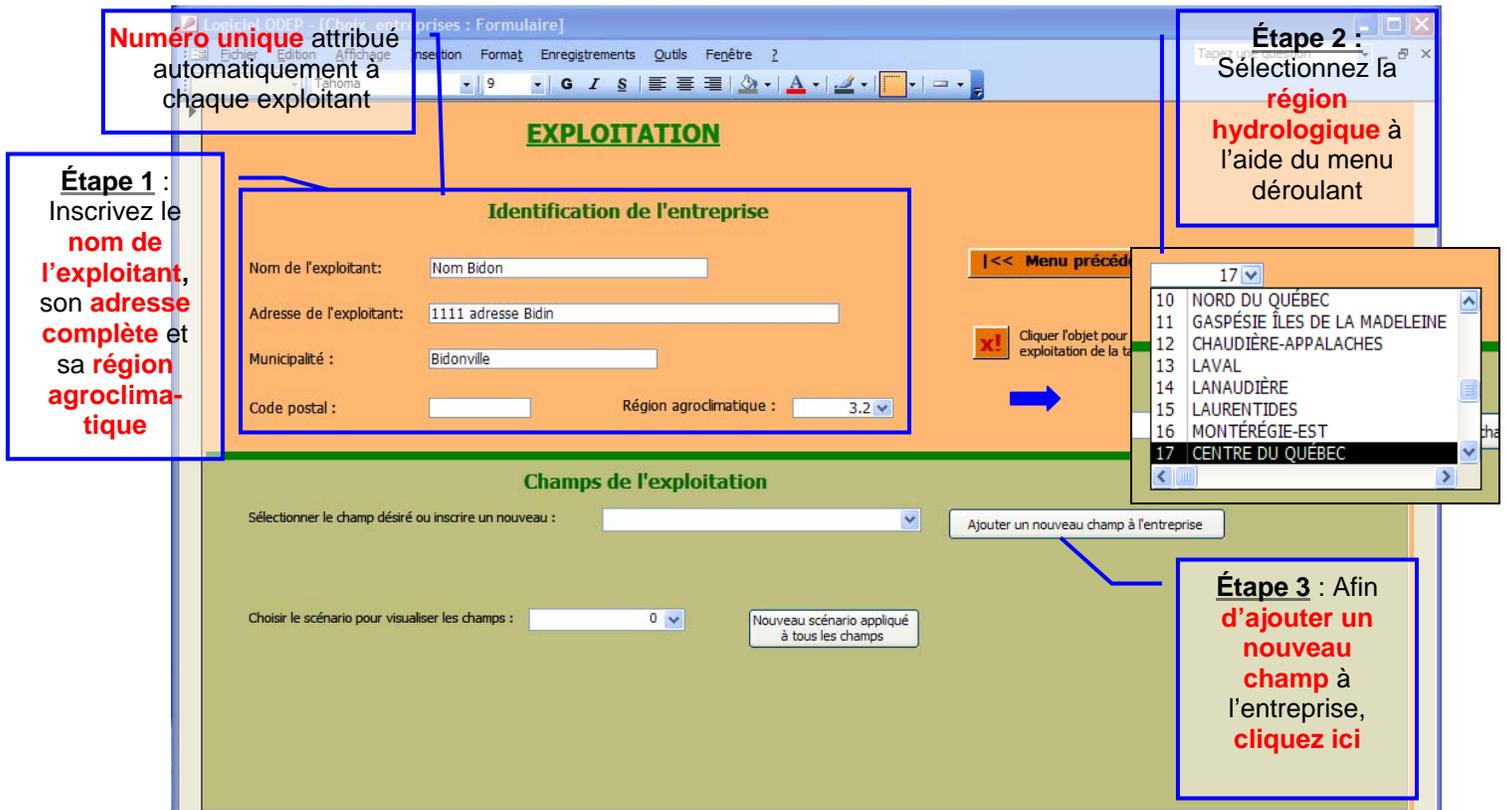


Figure 2.3 Fenêtre associée à l'identification de l'exploitant et de ses champs.

2.4 Inscription d'un nouveau champ à l'entreprise

Une fois que l'exploitant est identifié, vous devez procéder à la description de ses champs et des modes de gestion de ceux-ci. Lorsque le bouton

Ajouter un nouveau champ à l'entreprise est sélectionné, la fenêtre ci-dessous apparaîtra (Figure 2.4). Cette fenêtre donne accès à plusieurs fonctionnalités de l'outil. Pour ajouter un nouveau champ à une entreprise, seule la partie supérieure de cette fenêtre est importante. C'est dans cette fenêtre qu'il faut attribuer un nom/numéro pour identifier le nouveau champ intégré dans l'ODEP (Figure 2.4, Étape 1). Ce numéro peut par exemple

être celui utilisé pour identifier le champ sur le plan de ferme de la Financière agricole. Ensuite, la superficie totale du champ doit être enregistrée (Figure 2.4, Étape 2). Il est important de mentionner ici qu'un champ peut être subdivisé en trois parcelles ou moins qui possèdent soit des caractéristiques différentes (par exemple sol, pente, drainage, bassin versant, etc.) ou des régies différentes (culture, fertilisation, etc.).

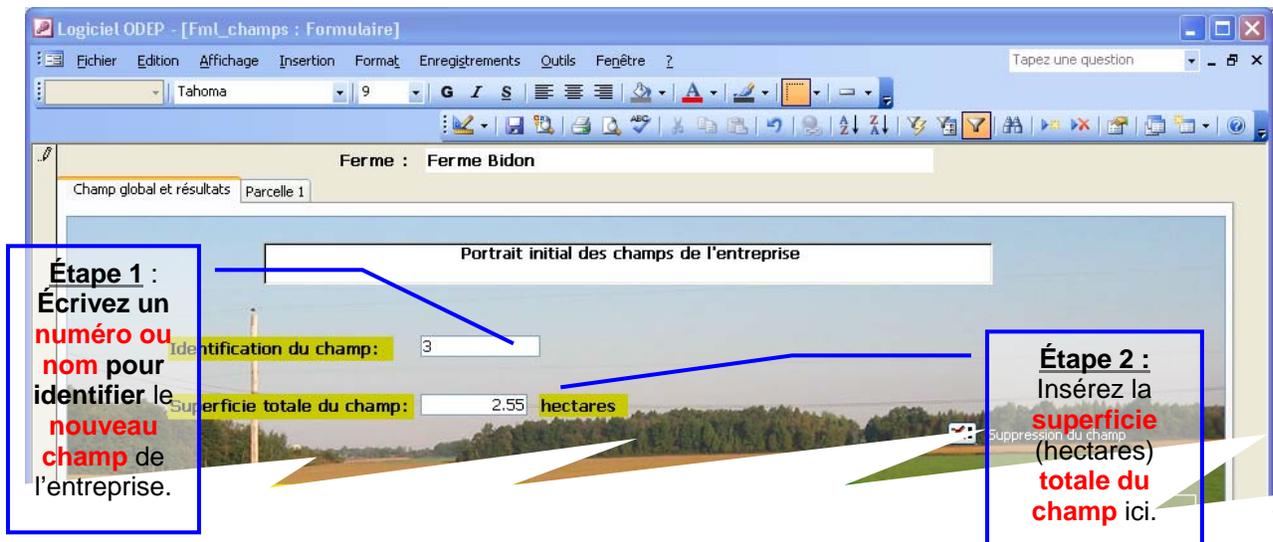


Figure 2.4 Fenêtre associée au portrait des champs de l'exploitant où la partie supérieure permet l'ajout de nouveaux champs appartenant à un exploitant.

Lorsque ces deux étapes sont terminées, vous verrez apparaître un onglet *Parcelle* dans la partie supérieure de cette fenêtre (Figure 2.5).

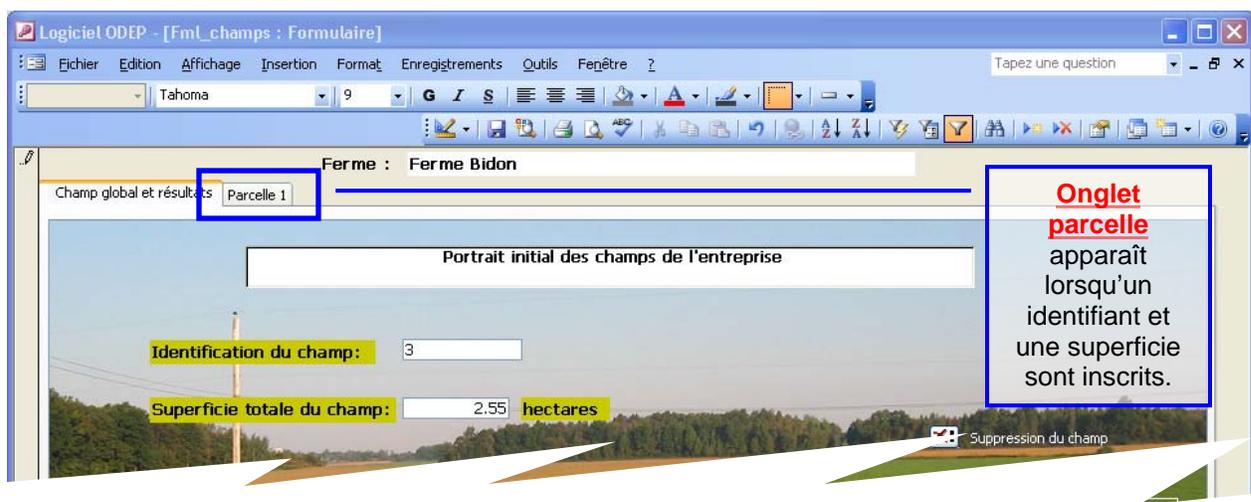


Figure 2.5 La saisie d'un identifiant et de la superficie d'un champ fait apparaître l'onglet parcelle.

En cliquant sur l'onglet **Parcelle 1** une fenêtre permettant la saisie de l'ensemble des informations de cette parcelle apparaît. C'est dans cette fenêtre que sont enregistrées les données sur la régie des sols et des cultures, la description du sol, le relief, les conditions de drainage ainsi que les aménagements hydro-agricoles pouvant être implantés sur ce champ (Figure 2.6). Chacun des cinq blocs thématiques sera abordé séparément dans cette section. Il est important de noter que l'ensemble de ces informations doivent être intégrées dans l'ODEP afin de parvenir à évaluer les indicateurs de pertes de phosphore.

The screenshot shows the 'Logiciel ODEP - [Fml_champs : Formulaire]' window. At the top, it displays 'Ferme : Ferme Bidon' and navigation tabs for 'Champ global et résultats', 'Parcelle 1', and 'Parcelle 2'. The main form area is divided into several sections:

- Header:** 'Champ : 3', 'Superficie de la parcelle : 2', 'Bassin : [dropdown]', 'Parcelle : 1', 'Scénario : 0'.
- Régie des sols et des cultures (Green):** Includes fields for 'Culture', 'Antécédent cultural', 'Travail du sol', 'Fertilisation' (with 'Apport d'engrais minéraux' and 'Période d'épandage'), and 'Engrais de ferme' (with 'Dose 1', 'Dose 2', 'Dose 3').
- Description du sol (Orange):** Includes 'Sol', 'Texture du sol', 'Matière organique', 'P total naturel', 'Sable', 'Groupe hydrologique', and 'Analyse de sol'.
- Relief et condition de drainage (Blue):** Includes 'Pente moyenne', 'Longueur maximale du parcours de l'eau', 'Classe d'écoulement de surface', 'Drainage souterrain', and 'Condition du profil cultural'.
- Aménagement hydro-agricole (Pink):** Includes 'Bande riveraine' and 'Structures de contrôle' with radio button options.

Figure 2.6 Fenêtre associée à la saisie des données sur la régie des sols et des cultures, la description du sol, le relief et les conditions de drainage, et les aménagements hydro-agricoles.

2.4.1 Saisie de la superficie de la parcelle

Dans la partie supérieure beige de la fenêtre, il est nécessaire d'inscrire la superficie de la zone décrite ainsi que la localisation à l'intérieur d'un bassin versant (Figure 2.7, étapes 1 et 2). Si cette superficie est inférieure à celle attribuée à l'ensemble du champ, un second

onglet *Parcelle* apparaîtra. À ce moment, une copie intégrale des caractéristiques saisies pour la *Parcelle 1* sera transférée à la *Parcelle 2*. En sélectionnant l'onglet de la *Parcelle 2*, l'utilisateur pourra par la suite modifier les caractéristiques et/ou les régies de la *Parcelle 2* qui diffèrent de la *Parcelle 1*.

The screenshot shows a software interface for managing parcels. At the top, it displays 'Ferme : Ferme Bidon'. Below this, there are tabs for 'Champ global et résultats', 'Parcelle 1', and 'Parcelle 2'. The main form area contains several input fields: 'Champ : 3', 'Superficie de la parcelle : 2', 'Bassin :' (with a dropdown arrow), 'Parcelle : 1', and 'Scénario : 0'. Four blue callout boxes with white text and blue borders provide instructions for each step: 'Étape 1 : Saisir la superficie de la Parcelle 1' points to the 'Superficie de la parcelle' field; 'Étape 2 : Inscrire le nom du bassin versant dans lequel se situe la Parcelle 1.' points to the 'Bassin' dropdown; 'Étape 3 : Saisir le numéro du scénario, 0 est attribué aux conditions réelles.' points to the 'Scénario' field; and 'Étape 4 : Inscrire le numéro de la parcelle.' points to the 'Parcelle' field.

Figure 2.7 Section de la fenêtre associée à la saisie de la superficie d'une parcelle et du bassin versant auquel elle est associée.

2.4.2 Régie des sols et des cultures

C'est dans cette section que la culture, le travail du sol, le mode et le type de fertilisation sont intégrés dans le système ODEP. Dans un premier temps, il est nécessaire de sélectionner la culture implantée dans le champ ainsi que son antécédent cultural à l'aide de menus déroulants, voir figure 2.8 ci-dessous.



Figure 2.8 La saisie des cultures actuelles et antécédentes.

Au niveau des cultures de conservation, il est possible de considérer deux types de pratique, soit la culture associée et la culture dérobée en cliquant dans la case appropriée (Figure 2.9). On associe la culture dérobée à une culture de céréales ou de crucifères suivant la récolte. Quant à la culture associée, elle correspond à une culture d'accompagnement de la culture principale (par exemple une implantation de légumineuses ou d'une prairie à une culture de céréales).



Figure 2.9 La sélection de pratiques impliquant des cultures de couverture.

Puis, la saisie du travail du sol est possible par le biais d'un menu déroulant présenté à la figure 2.10. Si cette saisie est omise lorsqu'on est en présence de cultures annuelles, l'ODEP ne présentera aucun résultat.

Régie des sols et des cultures

Culture : MsG Antécédent cultural : MsG

Culture de couverture : Associée (légumineuse) Dérobée (céréales ou crucifère)

Travail du sol :
 1 Labour à l'automne + travail secondaire au printemps
 2 Chisel ou pulvérisateur à l'automne + travail second. au printemps
 3 Déchaumage au printemps + travail second. au printemps
 4 Semi-direct ou billons

Fertilisation :
 Apport d'engr

		Période d'épandage	Délai d'incorporation
Engrais de ferme : kg P2O5 / ha	Dose 1	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	Dose 2	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	Dose 3	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Figure 2.10 La saisie du type de travail du sol.

En ce qui concerne la fertilisation, les apports minéraux et organiques sont enregistrés séparément dans l'ODEP. Le système doit être informé de la quantité d'engrais minéral appliqué, en kilogramme de P₂O₅ par hectare, selon le mode d'application : en bandes ou à la volée (Figure 2.11).

Régie des sols et des cultures

Culture : Antécédent cultural :

Culture de couverture : Associée (légumineuse) Dérobée (céréales ou crucifère)

Travail du sol :

Fertilisation : Application en bande à la volée

Apport d'engrais minéraux : kg P2O5 / ha

		Période d'épandage	Délai d'incorporation
Engrais de ferme : kg P2O5 / ha	Dose 1	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	Dose 2	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	Dose 3	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Figure 2.11 La saisie de la quantité et du mode d'application des engrais minéraux.

En ce qui concerne les apports organiques, trois applications peuvent être intégrées dans le système. Pour ce faire, la quantité d'engrais (en kilogramme de P_2O_5 par hectare), la période d'épandage (pré-semis, post-levée, automne hâtif ou tardif) ainsi que le délai d'incorporation (inférieur à 48 heures, de 48 heures à 1 semaine, supérieur à une semaine ou non incorporé) doivent être intégrés pour chaque apport (Figure 2.12).

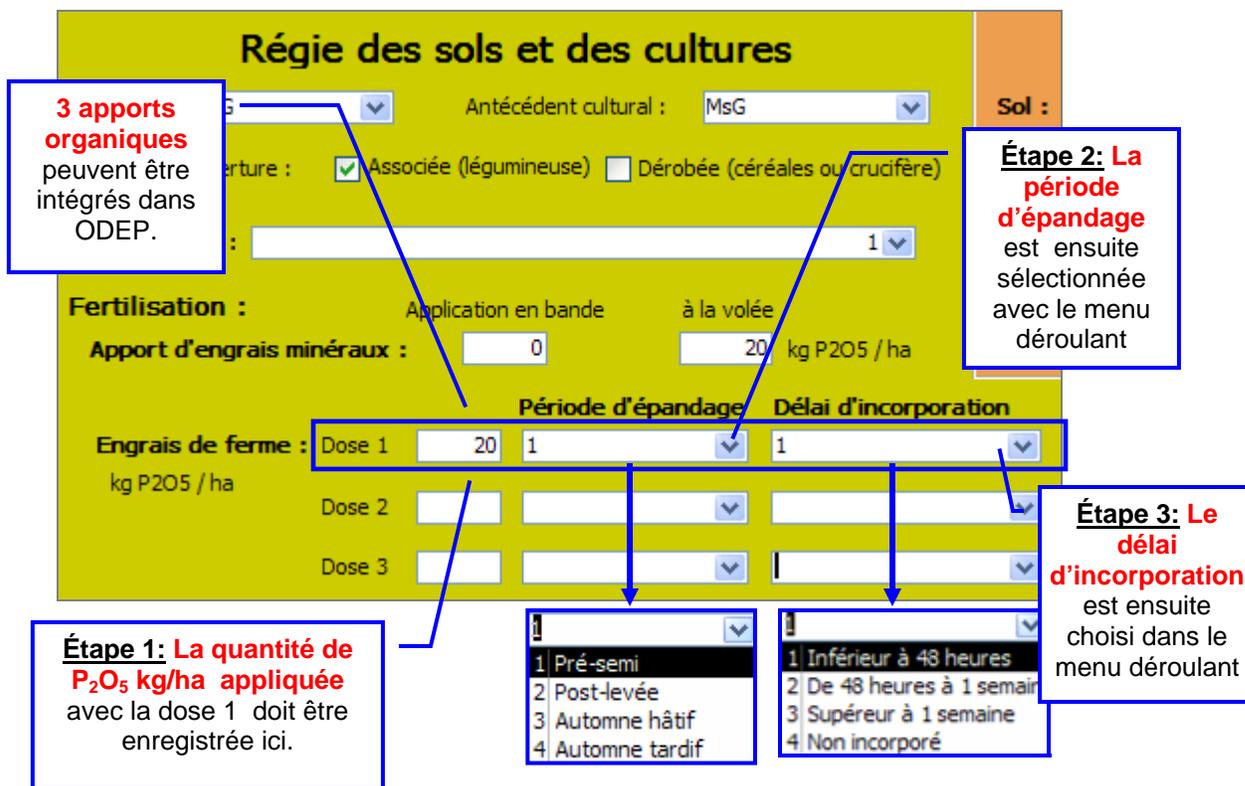


Figure 2.12 La saisie de la quantité, de la période d'épandage et du délai d'incorporation pour chaque dose d'engrais de ferme.

2.4.3 Description du sol

Ce deuxième volet de la caractérisation du champ ou d'une portion de celui-ci (parcelle) concerne les propriétés du sol. Deux options sont possibles pour documenter les propriétés des sols dans l'ODEP. Lorsque l'unité cartographique (rapport pédologique) ou la série de sol et sa phase (texture) sont connues, l'utilisateur peut importer les propriétés des sols, à l'exception de sa richesse ou sa saturation en P, depuis la base de données hydropédologiques de l'ODEP en ayant recours au menu déroulant (Figure 2.13). Au besoin, l'utilisateur peut modifier les valeurs de référence fournies par cette base de données, dans l'éventualité où il dispose de résultats d'analyse ou de diagnostic de terrain. En absence de références cartographiques, l'utilisateur peut aussi saisir manuellement les propriétés des sols dans les fenêtres appropriées.

Il est possible d'obtenir les cartes pédologiques en format numérique ou papier par le biais du site Internet de l'IRDA : <http://www.irda.qc.ca/documents/type/2.html>. La

plupart des rapports et cartes pédologiques sont également accessibles sur le site du *Service national d'information sur les terres et les eaux* à l'adresse suivante : <http://sis.agr.gc.ca/siscan/publications/pq/index.html>. Ces documents permettent de visualiser les unités cartographiques qui ont été recensées lors des prospections pédologiques. Les nomenclatures des unités cartographiques associées aux différents rapports pédologiques sont généralement constituées de la série de sol et de la phase (texture). Les mêmes nomenclatures apparaissent en ordre alphabétique dans le menu déroulant « Sol » de l'ODEP, afin de faciliter l'importation des données. Dans le cas où l'unité cartographique du rapport pédologique comprendrait plusieurs séries de sol (complexe de sols), l'utilisateur est invité à se référer à l'identifiant de la première série, généralement dominante en superficie (Figure 2.13).

The image shows a web form titled "Description du sol" with several input fields and dropdown menus. Two callout boxes provide instructions:

- Left callout:** "En cliquant sur l'hyperlien de l'étude appropriée, vous aurez accès au rapport pédologique ainsi qu'aux cartes associés à cette étude." (Clicking on the appropriate study link, you will have access to the pedological report as well as the maps associated with this study.)
- Right callout:** "En cliquant sur le menu déroulant, vous aurez accès à l'ensemble des séries de sol cartographiées au Québec. Si vous connaissez celle qui est retrouvée sur le champ, sélectionnez-la." (Clicking on the dropdown menu, you will have access to the entire set of soil series mapped in Quebec. If you know the one found in the field, select it.)

The form fields include:

- Sol : SB4
- Texture du sol : LLIA
- Matière organique : 4.33
- P naturel : 886
- Groupe hydrologique : 7
- Argile : 36 %
- Sable : 18 %
- % saturation
- on Analyse de sol 152 kg P(mehlich) / ha
- P/AL: 25

Two dropdown menus are shown below the form:

- Left dropdown (Alphabetical):** ALO, A, ALI, AS, LA, LALI, LLIA, LSA.
- Right dropdown (Soil Series):** SB4, SB4b (St-Blaise loam limono-argileux 3-8 % de pente), SB4m (St-Blaise loam limono-argileux mince), SB4p (Saint-Blaise loam limono-argileux légèrement à mod), SBa4 (St-Blaise variante non calcaire loam limono-argileux), SE2 (Soulanges loam sableux fin), SE2b (Soulanges loam sableux fin 3-8 % de pente), SE3 (Soulanges loam).

Figure 2.13 Fenêtre de saisie de la description du sol du champ ou de la parcelle et menu déroulant permettant une saisie facile des données.

En sélectionnant un sol à l'aide du menu déroulant, vous verrez que les données nécessaires à la description du sol sont automatiquement insérées dans les cases appropriées, mises à part les données relatives à la richesse du sol. Les données, insérées automatiquement, proviennent d'analyses statistiques réalisées sur les bases de données

pédologiques disponibles au Québec. Si ces informations divergent des analyses physico-chimiques disponibles ou des observations au champ, il est possible d'ajuster ces valeurs.

Si vous ne connaissez pas la série de sol, mais possédez des mesures ou observations de terrain, vous pouvez compléter cette section sans attribuer une série spécifique de sol. De plus, si vous ne possédez aucune mesure de terrain, mais connaissez la texture du sol, vous pouvez la sélectionner à l'aide du menu déroulant approprié. Vous verrez que les pourcentages d'argile, de sable, le P naturel et le groupe hydrologique du sol s'ajustent automatiquement.

Les analyses de sol qui ont été réalisées dans le champ permettront d'insérer le contenu en P Mehlich-3 (kg/ha) (Mehlich, 1984) et le taux de saturation en phosphore de la couche arable du sol.

Vous devez par la suite attribuer un groupe hydrologique au sol. Pour les séries et les textures de sol qui sont définies dans le système, un groupe hydrologique a été attribué en fonction de la classe texturale, du drainage et du mode de déposition. Selon votre jugement professionnel, il est possible d'ajuster cette classification pour mieux représenter les conditions du champ. À cette fin, le tableau A3.2 de l'annexe 3 contient des descriptions détaillées des groupes hydrologiques.

2.4.4 Relief et condition de drainage

Dans cette section, une description de la topographie et des conditions de drainage (surface et souterrain, Figure 2.14) doit être produite pour chaque parcelle :

1. Une pente doit être saisie en pourcentage. Celle-ci peut être obtenue par le biais d'observations/mesures sur le terrain (clinomètre, arpentage, GPS précis) ou à l'aide de données à référence spatiale tel qu'un modèle numérique d'altitude ou des courbes de niveau.
2. La longueur maximale du parcours maximal de l'eau doit être estimée et saisie. Celle-ci est généralement déduite par l'interprétation de la photographie aérienne du champ ou de son plan de drainage. En raison de la présence de raies de curage

- et de dépressions, la longueur maximale du parcours de l'eau ne correspond pas à la longueur totale du champ mais à la longueur maximale du plus grand micro bassin du champ. Pour cette raison, un facteur est inclus dans l'ODEP afin de tenir compte des autres micro-bassins.
3. La classe de drainage souterrain doit être identifiée, soit un drainage systématique, un drainage partiel ou l'absence de drainage souterrain.
 4. La classe d'écoulement de surface doit également être évaluée. Trois critères sont proposés (section 3.4.2), se rapportant à la pente, la position occupée par la parcelle dans le paysage et la présence de dépressions afin d'attribuer une classe à la parcelle (bonne, moyenne, déficiente). Par défaut, la parcelle se voit attribuer une classe d'égouttement moyenne.
 5. Finalement, la condition du profil cultural doit être décrite. Celle-ci se réfère à la présence de zones à risque, soit :
 - des zones de battance qui sont généralement associées à une texture de sol à dominance limoneuse ou de sable très fin et qui sont exacerbées par un travail excessif du sol, qui pulvérise les agrégats et minimise la rugosité de surface du champ;
 - des zones de dégradation de la structure du profil cultural pouvant être occasionnées par le compactage du sol associé à la circulation de véhicules lourds en conditions de sols humides et peu portants ou à la présence d'une semelle de labour ou d'une semelle de lissage héritée de travaux secondaires du sol en conditions défavorables.

Bien que ces conditions physiques du sol défavorables conduisent à un égouttement déficient, perceptible par des photographies aériennes ou des relevés de rendement, le diagnostic au champ demeure de mise. À cette fin, la méthode de diagnostic du drainage décrite dans le Guide des pratiques de conservation en grandes cultures (CPVQ, 2000) devrait être utilisée pour définir l'une des 3 classes : bonne, présence ou dominance de zones à risque.

Relief et condition de drainage

Pente moyenne : %

Longueur maximale du parcours de l'eau : mètres

Classe de drainage de surface : Optimale Bonne Mauvaise

Drainage souterrain : Systématique Partiel Absent

Condition du profil cultural : Bonne Présence de zone à risque Dominance de zone à risque

Étape 1 :
Inscrire la **pente** en %

Étape 2 :
Inscrire la **longueur maximale du parcours de l'eau** dans le champ

Étape 3 : Cochez successivement les **classes** de (1) **drainage de surface**, (2) **souterrain** et (3) du **profil cultural**

Figure 2.14 Fenêtre de saisie de la description du sol du champ ou de la parcelle et menu déroulant permettant une saisie facile des données.

2.4.5 Aménagement hydro-agricole

Des informations concernant l'aménagement hydro-agricole terminent le portrait du champ (Figure 2.15). Dans cette section, il est nécessaire de :

1. Définir la largeur de la bande riveraine (absente, inférieure à un mètre, de un à trois mètres ou supérieure à trois mètres);
2. Identifier la présence et l'importance des structures de contrôle du ruissellement (absente, captage en partie ou captage systématique).

Aménagement hydro-agricole

Bande riveraine

Ne s'applique pas

Inférieure à 1 mètre

De 1 à 3 mètres

Supérieure à 3 mètres

Structures de contrôle

Absente

Captage partiel

Captage systématique

Étape 1 :
Cochez la **largeur de la bande riveraine** qui est **représentative du champ**

Étape 2 :
Identifier la **présence et l'importance des structures de contrôle** du ruissellement en cochant la case appropriée

Figure 2.15 Fenêtre de saisie des informations sur les aménagements hydro-agricoles du champ.

Si le champ que vous caractérisez se subdivise en plusieurs parcelles, vous devez compléter la saisie des informations pour chaque parcelle. Tel que mentionné auparavant, lorsque vous intégrez l'information de la première parcelle, une copie intégrale des caractéristiques saisies sera transférée aux autres parcelles du champ. En sélectionnant l'onglet de la *Parcelle 2*, vous pourrez modifier les caractéristiques et/ou régies de la parcelle 2 qui diffèrent de la parcelle 1.

Lorsque le travail est complété, vous devez sélectionner l'onglet *Champ global et résultats* (Figure 2.16).

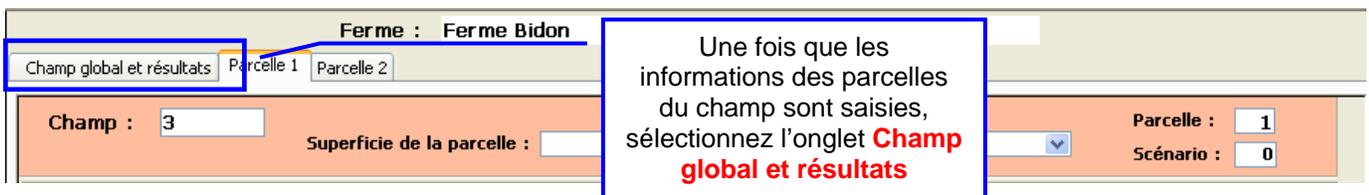


Figure 2.16 Onglet pour retourner à la fenêtre du portrait initial des champs de l'exploitant.

Ceci vous permettra de retourner à la page précédente, vous donnant accès à plusieurs fonctionnalités de l'outil (Figure 2.17) pour :

1. Intégrer les caractéristiques d'un autre champ;
2. Consulter le résultat des exportations du champ;
3. Consulter le résultat des exportations de l'entreprise;
4. Saisir des scénarios alternatifs.

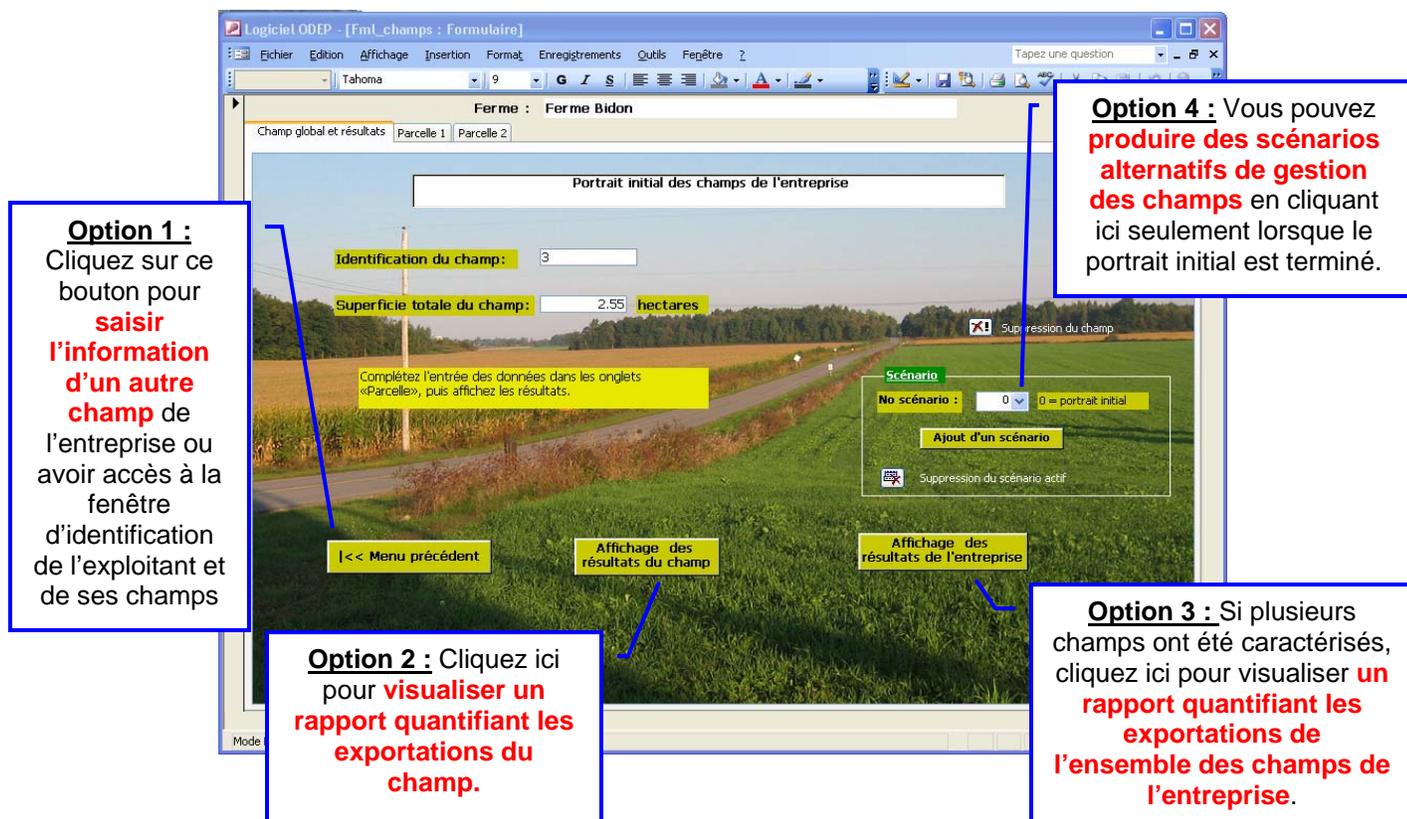


Figure 2.17 Options accessibles par le biais de la fenêtre associée au portrait des champs de l'exploitant.

2.5 Saisir l'information d'un autre champ de l'entreprise

En sélectionnant le bouton **|<< Menu précédent** vous retournerez à la fenêtre d'identification de l'exploitant où il vous sera possible d'ajouter un nouveau champ à l'entreprise en sélectionnant le bouton **Ajouter un nouveau champ à l'entreprise**. Vous devrez ensuite répéter la procédure détaillée à la section 2.4 de ce document.

2.6 Consulter l'évaluation des exportations d'un champ

En cliquant sur le bouton **Affichage des résultats du champ** une nouvelle fenêtre présentera un sommaire du champ sélectionné (Figure 2.18). Ce rapport intitulé *Indicateurs des pertes de phosphore* quantifie les sédiments et les diverses formes de phosphore exportés avec l'eau évacuée en surface et par le biais des drains pour chaque parcelle du champ (se

référer à la section *Théorie et concepts de modélisation* pour la description détaillée des indicateurs). Un bilan de l'ensemble du champ, totalisant toutes les parcelles, est également présenté dans la portion inférieure de ce rapport. Le rapport peut-être imprimé en sélectionnant l'icône  .

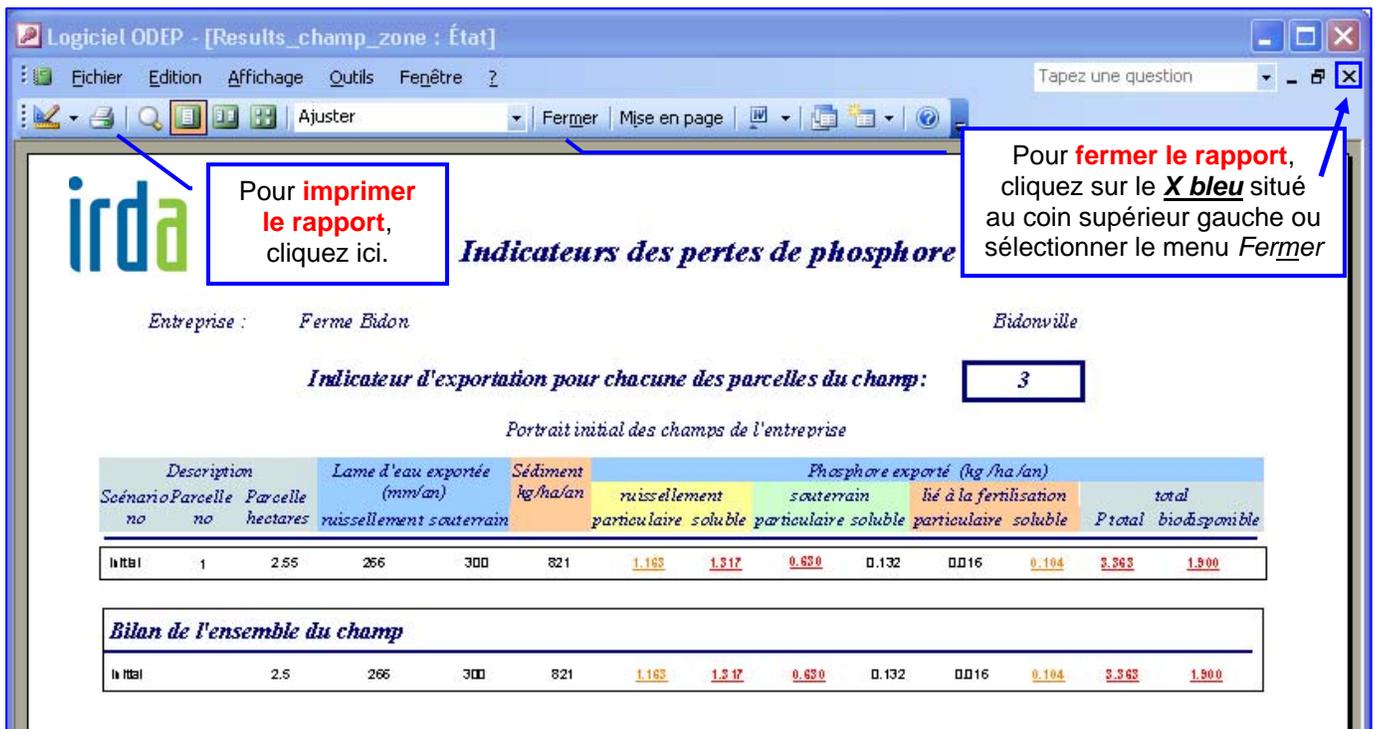


Figure 2.18 Rapport des indicateurs des pertes de phosphore pour le champ sélectionné et ses parcelles.

2.7 Consulter l'évaluation des exportations de l'entreprise

En cliquant sur le bouton **Affichage des résultats de l'entreprise**, une nouvelle fenêtre présentera un sommaire de l'ensemble des champs de l'entreprise. Ce rapport est également intitulé *Indicateurs des pertes de phosphore*. Il présente les mêmes résultats que le rapport précédant mais pour chacun des champs de l'entreprise. Un bilan total de l'ensemble des champs de l'entreprise est également présenté dans ce rapport.

2.8 Saisie de nouveaux scénarios

Afin de prédire l'efficacité de scénarios alternatifs de gestion sur la réduction des exportations de phosphore, l'ODEP offre deux possibilités à l'utilisateur, soit :

1. Réaliser un scénario sur un champ défini, ou;
2. Appliquer un scénario à plusieurs champs de l'entreprise.

2.8.1 Scénario alternatif de gestion élaboré pour un champ

Dans le premier cas, l'utilisateur doit sélectionner le bouton **Ajout d'un scénario** tel qu'identifié à la figure 2.17. À ce moment, la fenêtre ci-dessous apparaîtra (Figure 2.19). Vous devrez attribuer un numéro à votre nouveau scénario. Normalement, il est préférable de laisser l'ODEP attribuer ce numéro par défaut. Appuyez ensuite sur le bouton **OK**.

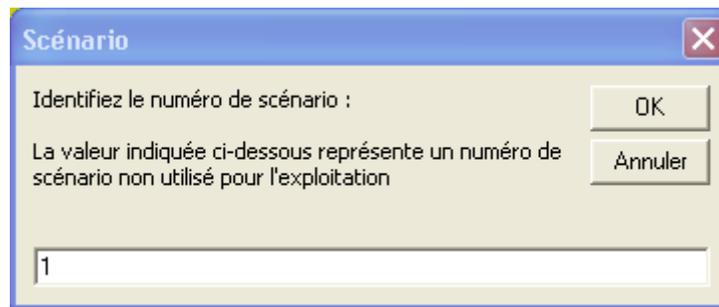


Figure 2.19 Fenêtre apparaissant lorsque le bouton *Ajout d'un scénario* est sélectionné.

Ensuite, la fenêtre ci-dessous apparaîtra (Figure 2.20). Vous pourrez alors attribuer un nom représentatif à votre scénario. L'ODEP créera alors une copie du portrait initial de ce champ qui pourra être modifié par le biais des onglets situés dans la partie supérieure de la fenêtre. Il vous est alors possible de modifier les caractéristiques pertinentes à ce scénario. Vous pourrez par la suite imprimer les indicateurs produits et les comparer au scénario initial.

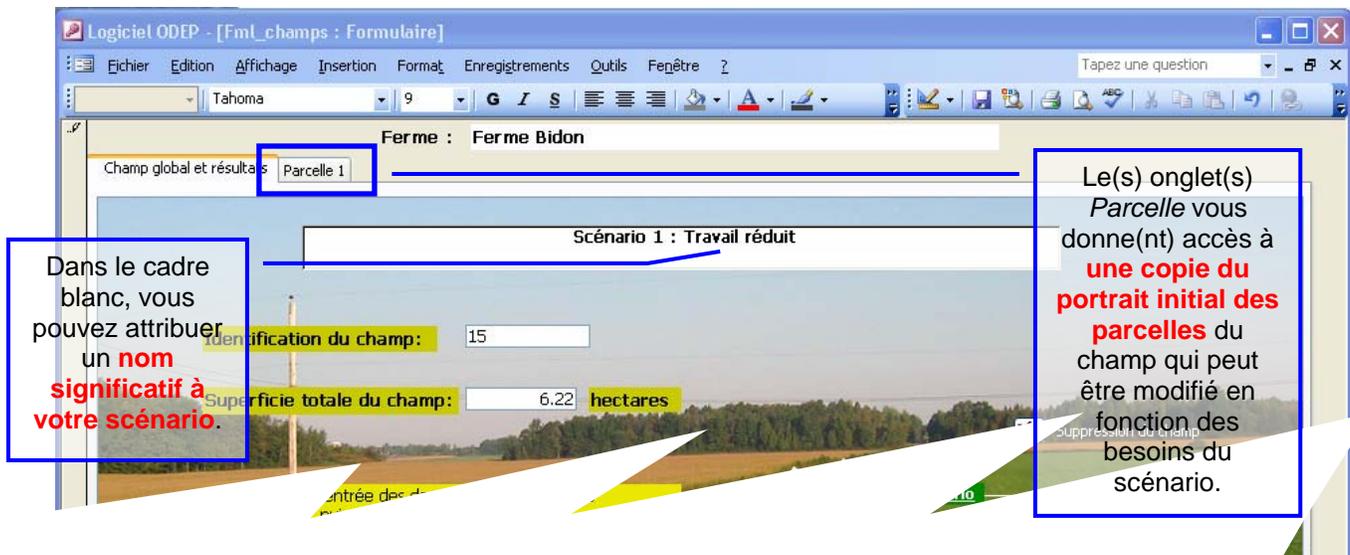


Figure 2.20 Fenêtre apparaissant lorsque le bouton « OK » est sélectionné et qui permet d'élaborer un scénario alternatif de gestion pour un champ donné.

2.8.2 Scénario alternatif de gestion élaboré pour l'ensemble de l'entreprise

Cette fonctionnalité de l'ODEP vous permettra de créer des scénarios plus ou moins complexes et adaptés à l'ensemble des champs de l'entreprise. Dans le premier cas, l'utilisateur doit quitter la fenêtre présentée à la figure 2.17 avec le bouton

| << Menu précédent

. À ce moment, vous retournerez à la fenêtre d'identification de l'exploitant et de ses champs (Figure 2.21).

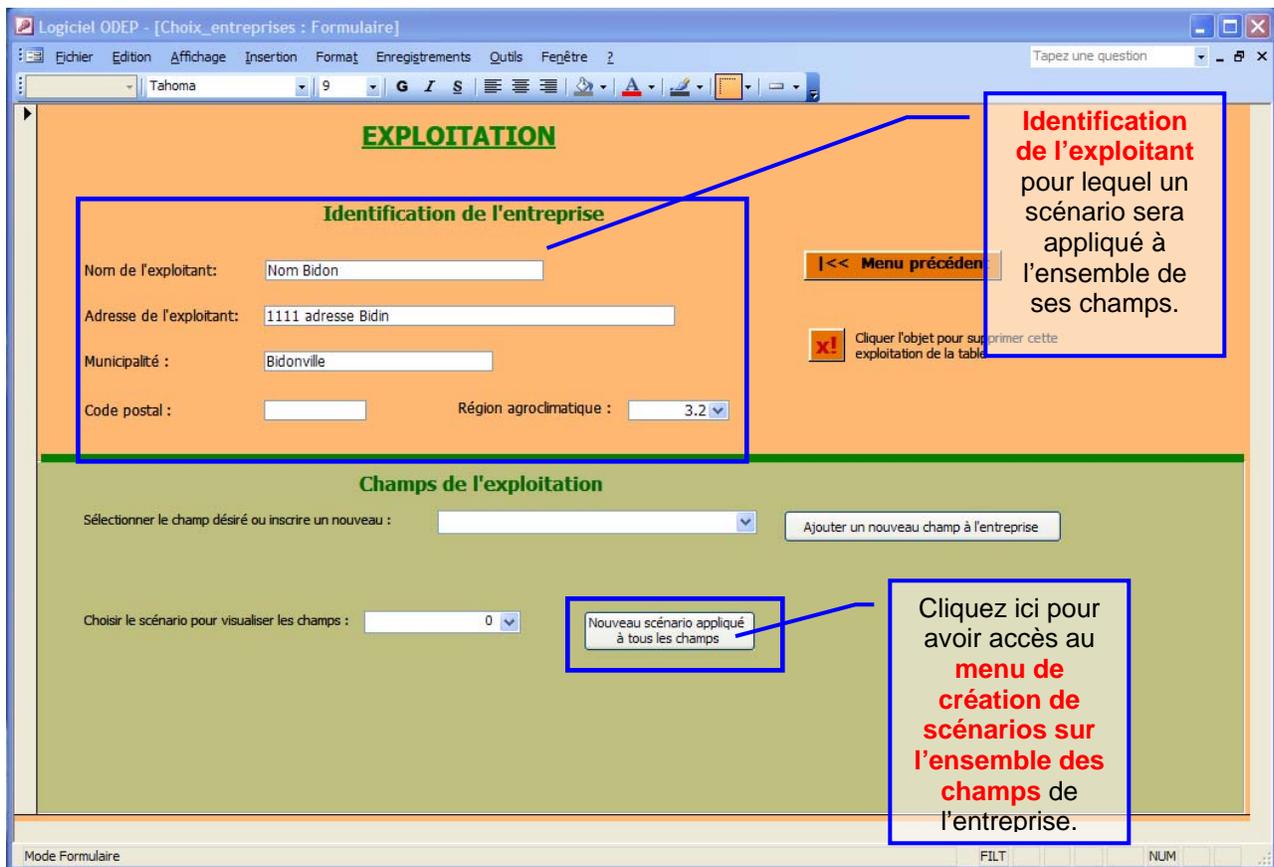


Figure 2.21 Fenêtre d'identification de l'exploitant et de ses champs donnant accès à un menu de création de scénarios alternatifs sur l'ensemble des champs de cet exploitant.

Pour avoir accès aux fonctionnalités de « scénarisation » sur l'ensemble des champs de l'entreprise identifiée dans la partie supérieure orangée de cette fenêtre, il suffit de sélectionner le bouton **Nouveau scénario appliqué à tous les champs** situé dans la partie inférieure de l'encadré vert. À ce moment une petite fenêtre d'ajout d'un nouveau scénario apparaîtra (Figure 2.22).

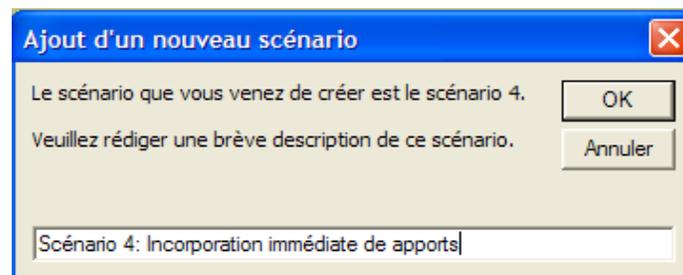


Figure 2.22 Fenêtre d'ajout d'un nouveau scénario.

Vous devrez écrire une brève description du scénario que vous produirez puis appuyer sur le bouton . À ce moment, un avertissement (Figure 2.23) apparaîtra vous avisant que des lignes seront ajoutées à la base de données de l'ODEP. Si vous voulez procéder à la production de votre scénario, sélectionnez *Oui* et l'ODEP fera des copies intégrales des données descriptives des champs que vous avez intégrées dans la caractérisation initiale de l'entreprise.

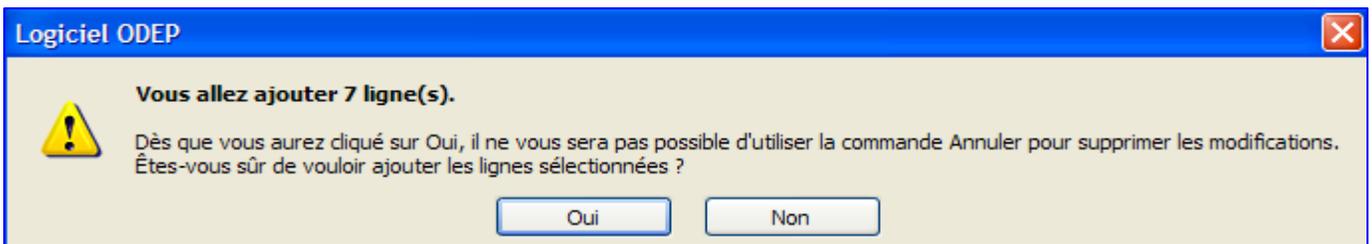


Figure 2.23 Avertissement pour valider la création d'un scénario sur l'ensemble des champs de l'entreprise.

Le menu de création de scénarios (Figure 2.24) est différent de la fenêtre de saisie des données descriptives d'un champ (Figure 2.5), mais ce sont les mêmes caractéristiques qui sont présentées sous un format tabulaire (Annexe 1). Chaque ligne correspond à la description initiale d'un champ de l'entreprise. Vous pouvez modifier à votre guise les caractéristiques et modes de gestion de chaque champ à l'aide des menus déroulants et des espaces réservés. Des aides mémoires sont fournis dans la partie inférieure droite de la fenêtre pour rappeler la codification de certains attributs.

Ensemble des attributs décrivant les conditions initiales d'un champ pouvant être modifiées pour évaluer l'impact d'un scénario alternatif de gestion

Option 3 : Cliquez ici pour exporter automatiquement les données et résultats du scénario dans Excel

Option 2 : Cliquez ici pour produire un rapport des indicateurs des pertes de phosphore des scénarios initial et modifié.

Option 4 : Cliquez ici pour produire automatiquement un rapport contenant les indicateurs des pertes de phosphore des scénarios initial et modifié.

Option 1 : Retour au menu de l'identification de l'exploitant

Aide-mémoire

Scénario no	Champ no	Parcelle hectares	Culture	Antécédent culture	Travail du sol	Couverture associée	Couverture dérobée	Minéraux P.rang	Minéraux P.volée	Fum1 P.dose	Fum1 période	Fum1 délai	Fum2 P.dose	Fum2 période	Fum2 délai	Fum3 P.dose	Fum3 période	Fum3 délai	P mehlich	%sat P/AI	Bande riveraine	Structures contrôles	Drainage souterrain	Écoulement surface	Condition hydro	Pente %	Longueur parcours	Sable %	Argile %	Gr_hydro	MD	Ptot naturel
2	1	0																	0		1	1	3	0	1					0		
2	1	0																	0		1	1	3	0	1					0		
2	1	15	MsG	CER				40											150	10	3	1	1	0	1	0.1	300	9	49	7	4.9443	803
2	1	5	MsG	CER				40											150	10	3	1	1	0	1	0.1	300	91	3	3	3.0986	537

<< Retour au menu précédent Résultats de chacune des parcelles Exporter les données et résultats dans un chiffrier Excel Résultats de l'ensemble de l'entreprise par champ Supprimer ce scénario

Bande riveraine:
 1. ne s'applique pas
 2. < 1 mètre
 3. de 1 à 3 mètres
 4. > 3mètres

Structures contrôles:
 1. Absentes
 2. Captage partiel
 3. Captage total

Drainage souterrain
 1. Systématique
 2. Partiel
 3. Absent

Écoulement surface
 1. Bon
 2. Moyen
 3. Déficent

Condition hydrologique
 1. Bonne
 2. Présence zones à risque
 3. Dominance zones à risque

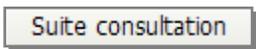
Enr : 1 sur 4 (Filtré) Mode Formulaire FILT NUM

Figure 2.24 Menu permettant de modifier les caractéristiques et les modes de gestion des champs d'une entreprise.

Dans la portion inférieure gauche de cette fenêtre, des boutons vous donnent accès à quatre fonctionnalités de l'outil :

1. Retourner au menu précédent. Cette option vous permet de retourner au menu de l'identification de l'exploitant lorsque l'édition du scénario est terminée. À ce moment, le scénario est sauvegardé automatiquement;
2. Visualiser les résultats de chacune des parcelles. Cette option vous permet de produire automatiquement un rapport contenant les indicateurs des pertes de phosphore du scénario initial « 0 » et du scénario modifié pour chacune des parcelles. Ce rapport possède un format similaire à celui produit à l'échelle du champ (voir figure 2.18);
3. Exporter les données et résultats dans un chiffrier Microsoft® Excel. Ce bouton vous permet d'exporter automatiquement les données et les résultats du scénario dans un chiffrier Microsoft® Excel. Vous pourrez par la suite modifier la mise en page, éditer et manipuler ces données à votre guise;
4. Consulter les résultats de l'ensemble des champs de l'entreprise. Cette dernière fonction vous permet de produire un rapport contenant les indicateurs des pertes de phosphore du scénario initial « 0 » et modifié (dans l'exemple, c'est le 2). Ce rapport possède le même format que les autres rapports produits par l'ODEP.

2.9 Consulter les données d'une entreprise

Pour consulter et/ou éditer les données d'une entreprise déjà enregistrée dans l'ODEP, vous devez retourner à la fenêtre d'accueil de l'ODEP (Figure 2.25). Vous trouverez alors la mention *consulter les données de l'entreprise* à la droite de laquelle un menu déroulant est accessible. En cliquant sur la flèche du menu déroulant, vous aurez accès à la liste des entreprises que vous avez enregistrées dans l'ODEP. Sélectionnez celle qui vous intéresse puis cliquez sur le bouton  situé en dessous du menu déroulant. Ceci vous donnera accès à la fenêtre d'identification de l'exploitant à partir de laquelle vous pourrez accéder à l'ensemble des fonctionnalités de l'ODEP et les appliquer à l'entreprise sélectionnée.

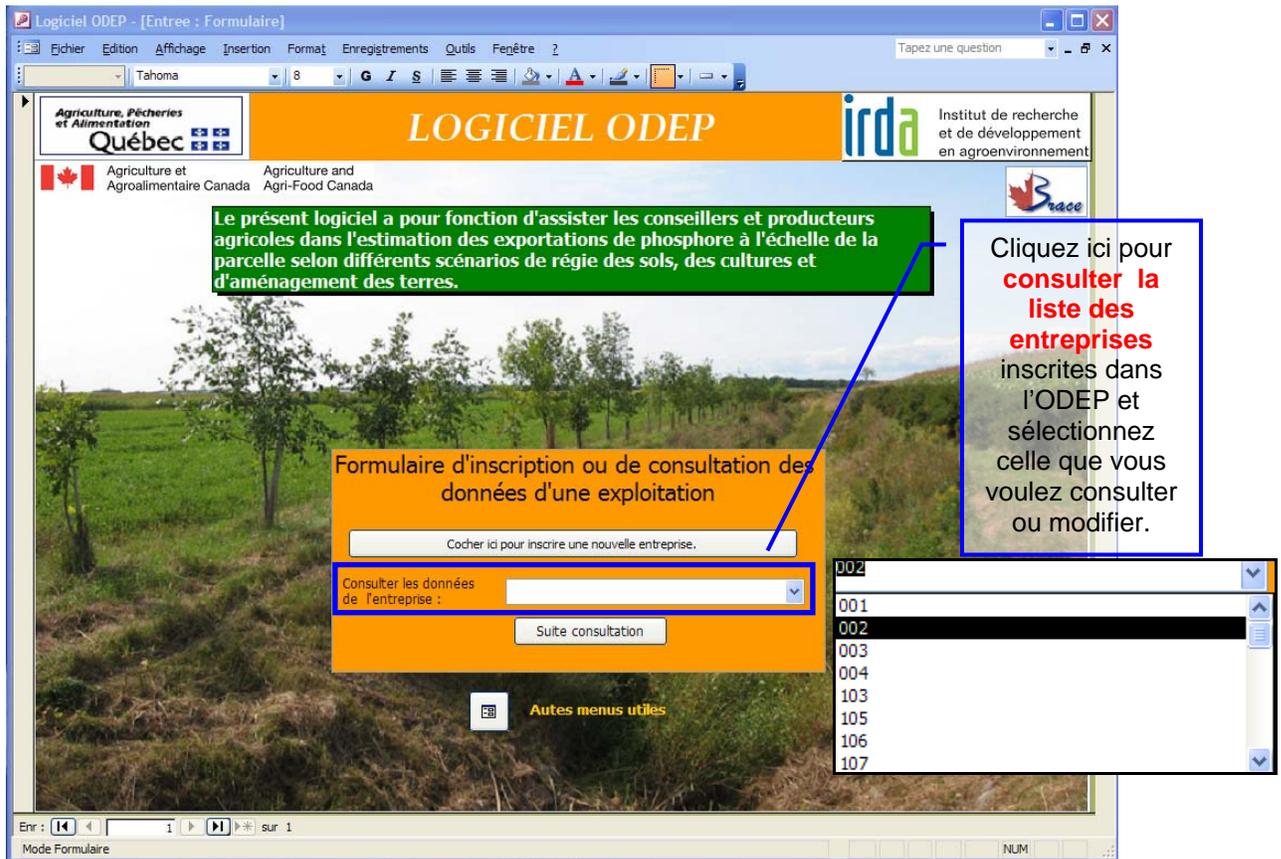


Figure 2.25 Fenêtre d'accueil permettant de consulter les données d'une entreprise déjà inscrite.

2.10 Autres menus utiles

Dans la page d'accueil, il vous est également possible d'accéder à d'autres menus utiles

en cliquant sur , l'icône de la fenêtre d'accueil. À ce moment, la fenêtre ci-dessous apparaîtra (Figure 2.26).

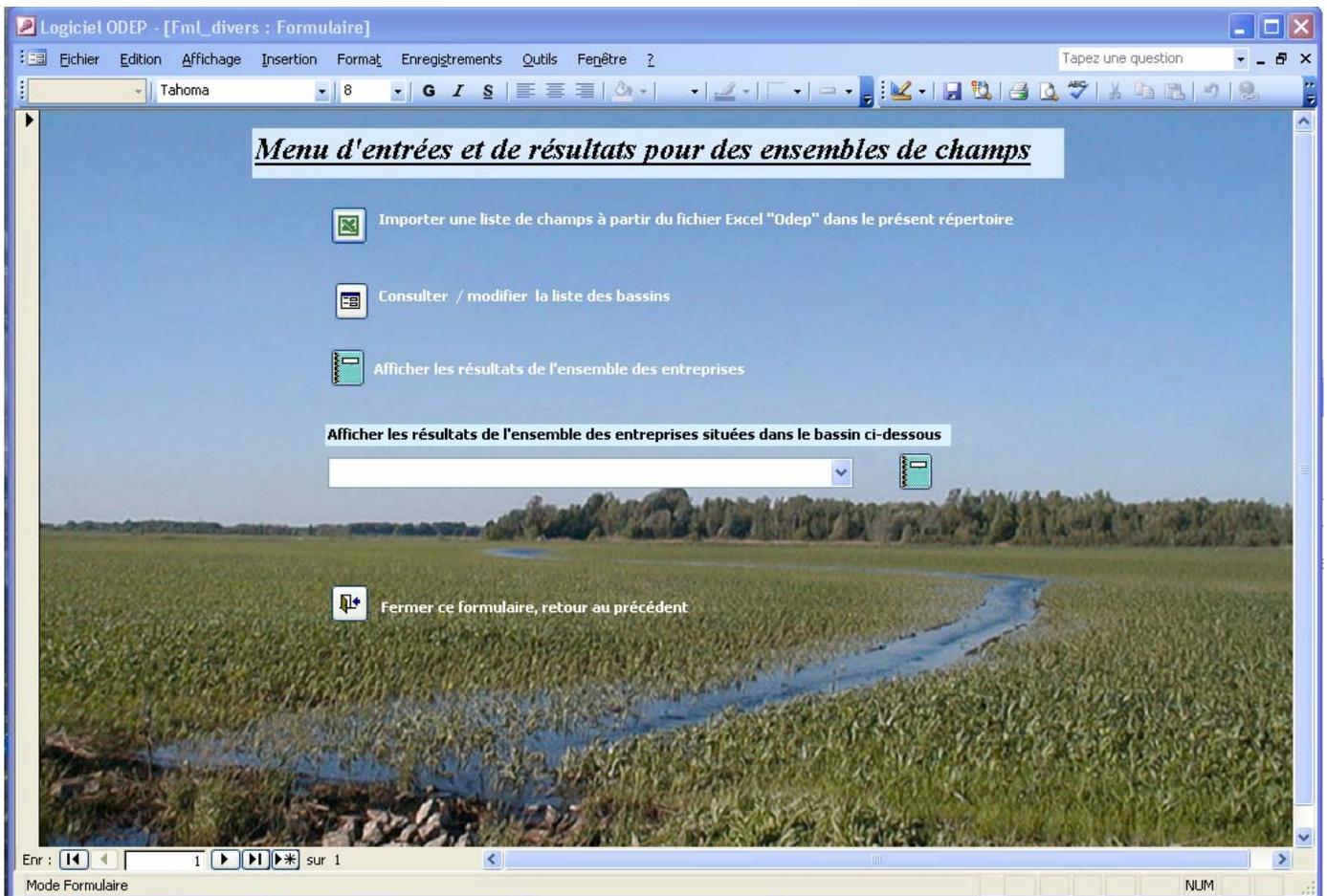


Figure 2.26 Autres menus utiles de l’ODEP.

Dans cette fenêtre, vous avez accès à quatre fonctions :

1. Importer une liste de champs à partir du fichier Microsoft® Excel « ODEP ». Cette fonction permet d’importer dans l’ODEP les données agronomiques dont vous disposez dans d’autres logiciels. Vos données devront toutefois être préalablement intégrées dans un chiffrier Excel nommé *Odep.xls* (situé dans le même répertoire que l’utilitaire Microsoft® Access). Le formatage de ces données doit être réalisé de façon rigoureuse et en cohérence avec les définitions et remarques fournies dans la feuille nommée *DESCRIP_TABLES* de ce chiffrier Excel;
2. Consulter/modifier la liste des bassins. Cette option vous permet de définir les bassins versants de votre région. Vous pourrez par la suite attribuer à chaque champ une appartenance à un bassin versant (Figure 2.27);

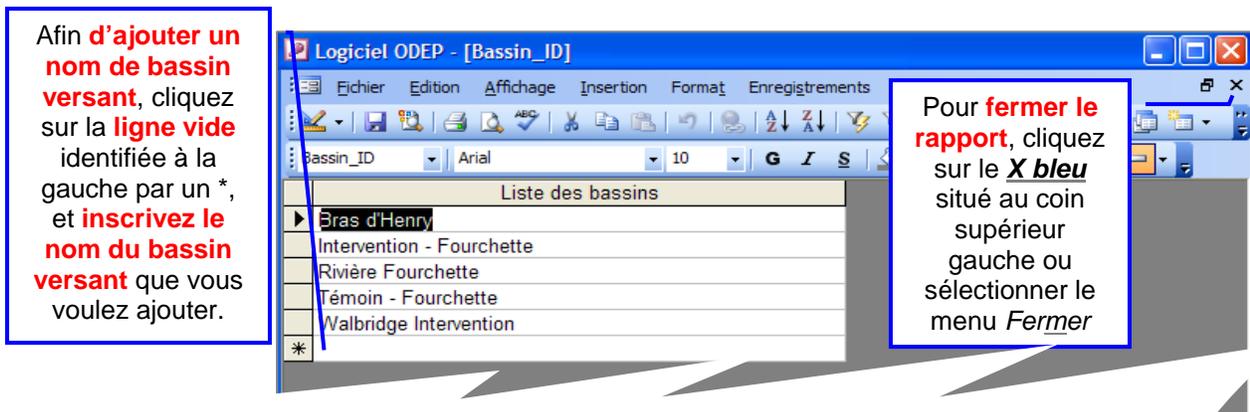


Figure 2.27 Procédure pour ouvrir le fichier Microsoft® Access de l'ODEP afin d'ajouter le nom du bassin versant dans lequel se situe l'entreprise agricole.

3. Afficher les résultats de l'ensemble des entreprises. Cette option vous permet de créer un rapport contenant les indicateurs des pertes de phosphore pour l'ensemble des entreprises enregistrées dans votre ODEP. Le rapport est identique à celui produit à l'échelle du champ et de la parcelle sauf qu'une seule ligne est attribuée à chaque entreprise et les indicateurs présentés correspondent au bilan global de l'entreprise. À titre comparatif, un bilan général est donné à la fin du rapport. Attention, l'exécution de cette fonction peut être relativement longue dépendamment du nombre d'entreprises qui sont intégrées dans l'ODEP;
4. Afficher les résultats de l'ensemble des entreprises situées dans un bassin versant. Cette option est identique à la précédente sauf que celle-ci comptabilise les indicateurs des entreprises d'un bassin versant donné et dresse le bilan général de ce bassin.

3.0 Théorie et concepts de modélisation

3.1 Cadre d'application de l'outil

L'ODEP est un outil de gestion agroenvironnementale développé à l'intention des services-conseils. Il soutient le diagnostic de la vulnérabilité du parcellaire aux exportations diffuses de phosphore vers le milieu aquatique. D'utilisation conviviale et harmonisé aux logiciels de gestion des champs couramment utilisés par les services-conseils agricoles au Québec, l'ODEP permet :

- Une évaluation quantitative des lames de ruissellement de surface, des taux d'érosion, de même que des charges et de la biodisponibilité du phosphore exporté à l'échelle du champ;
- Une interprétation des facteurs déterminants de la vulnérabilité de la parcelle à l'égard de la régie des sols et des cultures, de l'aménagement hydro-agricole et des propriétés des sols;
- La formulation de prédictions des retombées environnementales associées à des scénarios alternatifs de régie des sols, des cultures et d'aménagement hydro-agricole.

L'ODEP guide l'utilisateur dans l'interprétation des facteurs déterminants de la vulnérabilité des champs et lui permet d'évaluer les retombées environnementales associées à différents scénarios alternatifs de gestion. L'ODEP demeure un outil et ne dicte pas les mesures à mettre en place pour mitiger la problématique de la mobilité du phosphore de sources agricoles diffuses. Ainsi, l'utilitaire informatique ne remplace pas le jugement professionnel du conseiller agricole, qui demeure largement sollicité autant dans la phase de caractérisation du parcellaire que dans l'interprétation des résultats et l'élaboration des recommandations. L'interprétation de données à référence spatiale (photographies aériennes, cartes pédologiques, etc.) et les observations colligées sur le terrain demeurent des composantes essentielles du processus de diagnostic supporté par l'ODEP. Aussi, l'ODEP est un outil d'accompagnement du service-conseil qui ne convient pas à un cadre d'application réglementaire.

Puisque l'ODEP peut supporter différentes échelles de travail (parcelle, champ, entreprise et territoire), l'outil est bien adapté au cadre d'interventions concertées en bassin versant. Les prédictions d'ODEP peuvent en effet être agrégées à différentes échelles spatiales car elles sont exprimées de façon quantitative, sous la forme de taux nets d'exportation de sédiments et de phosphore. Conceptuellement, un taux net d'exportation exprime le flux de sédiments ou de nutriments qui quitte le champ et atteint le réseau hydrographique. En pratique, l'ODEP traduit des taux nets d'exportation qui ont été ajustés puis validés avec des flux de sédiments et de phosphore observés aux exutoires de six petits bassins versants expérimentaux (3 à 8 km²) au Québec. Les prédictions d'ODEP prennent ainsi en compte les processus de rétention et de sédimentation à l'œuvre dans les champs, les raies de curage, les bandes riveraines et les fossés. L'ODEP ne prend cependant pas en considération les processus de rétention ou de relargage en rivière.

Avec ses prédictions quantitatives, l'ODEP se distingue de la plupart des indices de risque de perte de phosphore (IRP) développés ailleurs en Amérique du Nord et en Europe, qui expriment généralement la vulnérabilité des champs de manière relative, sous la forme d'indices de risque qui prédisent des taux bruts d'exportation. Ces derniers ne prennent pas en compte les processus actifs de déposition à l'échelle de la parcelle et produisent généralement des estimations supérieures aux taux nets d'exportation. Dans une perspective d'action concertée sur la réduction des exportations diffuses de phosphore, la prédiction quantitative des exportations nettes de phosphore est avantageuse à deux points de vue. D'abord, l'agrégation des prédictions peut servir à établir des plans d'interventions agroenvironnementales à différentes échelles spatiales. D'autre part, une évaluation quantitative permet de faire le lien entre les taux d'exportation de phosphore prédits dans un territoire donné avec les charges cibles de phosphore établies pour le plan d'eau en aval, soit sa capacité support.

Rappelons enfin que les conditions météorologiques contrôlent l'activité hydrologique, l'érosion et la mobilité du phosphore et sont très variables d'une année à l'autre. L'ODEP exprime ses prédictions sur une base annuelle moyenne et n'est pas conçu pour produire des prédictions de flux de P sur une base saisonnière ou événementielle.

3.2 Cadre d'opération de l'outil

Développé en langage Visual Basic sous un environnement Microsoft Access[®], l'ODEP est un utilitaire convivial et autonome composé de quatre modules (Figure 3.1) alimentés par l'utilisateur et une base de données hydro pédologiques. Plus précisément, l'ODEP nécessite l'information de base concernant la zone climatique, le relief, la pédologie, les conditions de drainage et la régie des cultures pour chaque parcelle de champ à l'étude. Sur la base de ces informations, les modules prédisent successivement les hauteurs d'eau ruisselée et drainée, l'érosion et les exportations de phosphore à l'échelle de la parcelle, du champ, de l'exploitation agricole ou du territoire. Structurellement, les informations requises et celles produites par l'ODEP sont contenues dans une vingtaine de tables et autant de requêtes en langage SQL.

La conception et les fonctionnalités proposées par l'ODEP en font un outil complémentaire et bien intégré aux autres outils couramment utilisés par les services-conseils au Québec. L'ODEP s'harmonise donc avec les banques de données et outils informatiques existants en matière de suivi des champs et de fertilisation intégrée des cultures. Ainsi, la compatibilité avec le logiciel Sigachamp (Siga Informatique, 2008) est assurée par un module d'importation et d'exportation alors que l'équipe de Logiag (2008) a procédé à l'intégration des équations de l'ODEP à ses logiciels.

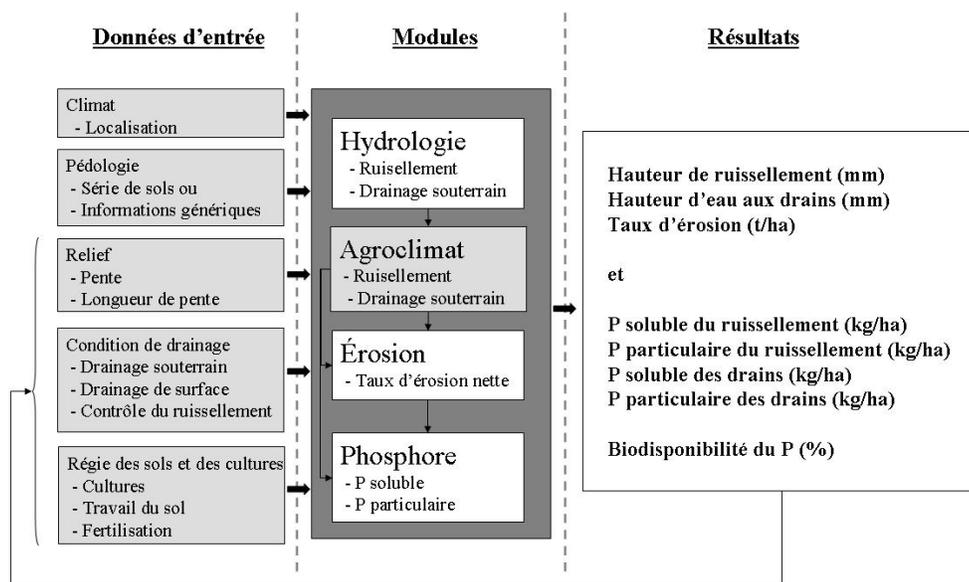


Figure 3.1 Schéma conceptuel de l'ODEP.

Conceptuellement, l'ODEP permet d'évaluer les risques associés aux facteurs *sources* et *transport* de mobilité des sédiments et du phosphore à l'échelle d'un champ ou d'un ensemble donné de champs, et d'aiguiller le conseiller et le producteur vers des solutions bien adaptées aux spécificités du site à l'étude. Une analyse des sources de phosphore et des facteurs de mobilité du P vers le milieu aquatique offre aux utilisateurs une flexibilité dans la formulation et la mise en œuvre d'alternatives de gestion des champs.

Au plan opérationnel, suivant l'importation ou la saisie des propriétés des parcelles et de leur régie du champ dans le portrait de l'entreprise, le module *Hydrologie* de l'ODEP calcule les hauteurs d'eau s'écoulant en surface par ruissellement ou par les drains agricoles. Les équations servant aux calculs du module *Hydrologie* ont été établies à partir de modélisation hydrologique avec le modèle SWAT (Arnold et coll., 1998). Les résultats de plus de 450 unités de calcul, représentatives des propriétés et des régies distinctes des sols, ont été exploités (Deslandes et coll., 2007). Les hauteurs d'eau prédites sont ensuite transmises au module *Agroclimat*. Ce module réévalue les volumes d'eau exportée en tenant compte des conditions agroclimatiques propres à chacune des 18

régions agroclimatiques (Figure 3.2) définies dans l'ODEP. La pondération climatique de ce module fait intervenir deux facteurs. Le *facteur de pondération de la hauteur d'eau annuelle* exprime l'effet combiné des disparités régionales dans les précipitations totales (Environnement Canada, 2005) et l'évapotranspiration (Rochette, 1988) sur les hauteurs totales d'eau exportée aux exutoires des cours d'eau de la région ciblée (bilan hydrologique global). Le *facteur de pondération du ruissellement annuel* exprime plutôt l'influence de la fonte des neiges et de la fréquence des pluies de forte intensité sur la répartition, en surface et souterraine, de la hauteur d'eau totale exportée dans la région ciblée.

La prédiction du ruissellement, révisée pour la région agroclimatique, est ensuite mise à profit dans le module *Érosion* qui calcule, à l'aide d'une variante de l'équation universelle de perte de sol modifiée (MUSLE; Williams, 1975), le taux net d'exportation des sédiments de chaque champ. Cette variation de MUSLE, décrite plus en détail à la section 3.4.4, a été également obtenue à partir des résultats de modélisation avec SWAT.

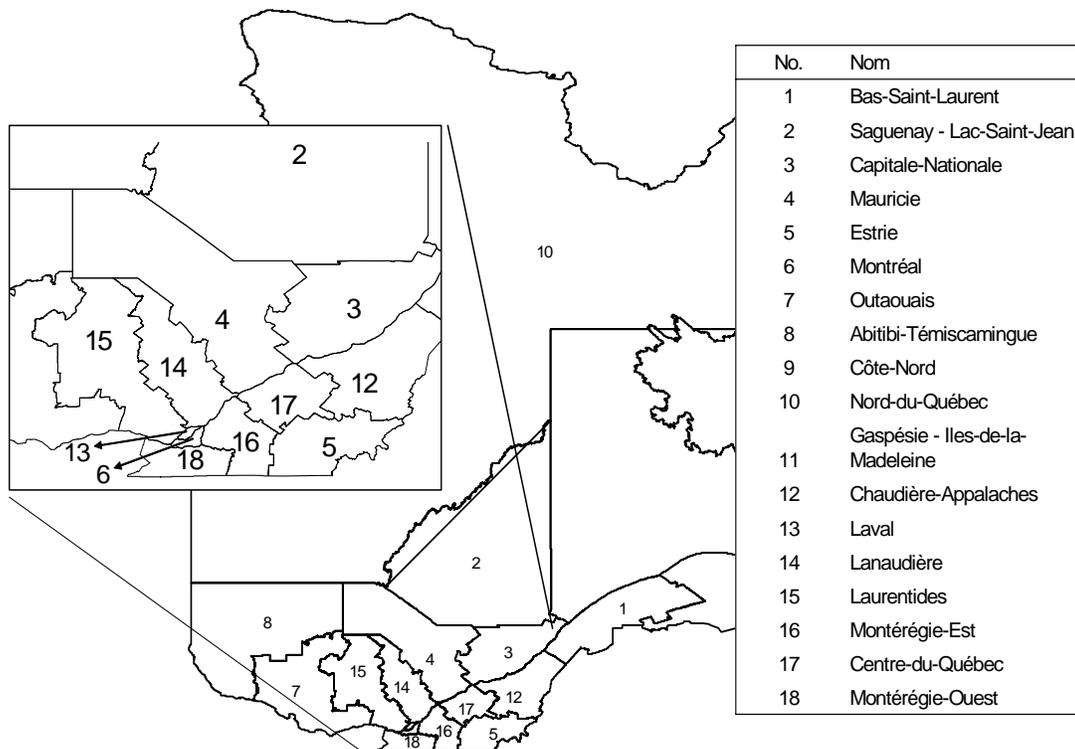


Figure 3.2 Dix-huit régions agroclimatiques retenues dans le cadre de l'ODEP.

Les hauteurs de ruissellement et d'eau aux drains, de même que les prédictions du taux net d'érosion sont ensuite utilisées par le module *Phosphore*. Alors que les algorithmes des modules *Hydrologie* et *Érosion* ont été développés et validés à l'aide de dispositifs expérimentaux en bassins versants, le module *Phosphore* s'appuie plutôt sur des relations établies au Québec en dispositifs de parcelles expérimentales, reliant les propriétés des sols avec la concentration et la spéciation du phosphore, telles qu'observées dans les eaux de ruissellement et de drainage. Le module *Phosphore* établit ainsi les concentrations de phosphore dissous dans les eaux de ruissellement et celles des drains souterrains à partir d'informations sur la teneur en phosphore des sols et sur leur texture. Les prédictions de charges de P dissous sont alors obtenues par le produit des volumes d'eau et des concentrations de P respectives dans les eaux de ruissellement et dans celles des drains. À partir de la prédiction de l'érosion nette et d'un calcul de l'enrichissement des sédiments en P, le module *Phosphore* dérive la quantité de phosphore particulaire exporté des champs par le produit de la charge nette de sédiments et de la concentration de P particulaire estimée. Enfin, l'ODEP prédit la charge de phosphore biodisponible exporté sur la base de la richesse du sol en P.

Par la mise à jour du portrait des champs, l'utilisateur peut composer à volonté différents scénarios de gestion alternative pour l'ensemble des parcelles de l'entreprise (voir section 2.8). Les rapports des prédictions de l'ODEP permettent d'analyser globalement les mérites des différentes pratiques culturales ou d'aménagements des terres quant aux exportations diffuses de phosphore à l'échelle de la parcelle, comme à l'échelle globale des champs de l'entreprise. Les différents scénarios de gestion développés à l'échelle de l'entreprise par l'utilisateur sont systématiquement conservés dans la banque de données qui accompagne l'ODEP. Ils peuvent aussi être exportés dans un chiffrier pour une utilisation ultérieure. Les sections qui suivent décrivent plus en détail le fonctionnement de l'ODEP et ses fondements théoriques.

3.3 Description des modules et des bases de données

Le développement de l'ODEP s'est appuyé principalement sur des observations expérimentales colligées au Québec dans le cadre de dispositifs d'étude à diverses

échelles, incluant des réseaux de parcelles expérimentales sous précipitations naturelles ou sous pluies simulées, des dispositifs de mesures au champ ainsi que des données hydrométriques de suivi et de qualité de l'eau en bassins versants expérimentaux (3 à 10 km²). Les résultats des modélisations hydrologiques à l'échelle des bassins versants ont également été mis à profit. Une description des sources d'information qui soutiennent le développement des différents modules de l'ODEP est rapportée au fil des sections qui suivent.

3.3.1 Base de données hydro-pédologiques

L'hydrologie est au cœur des processus de transport du phosphore vers le milieu aquatique. Cette science est non seulement régie par les conditions climatiques mais également par les propriétés édaphiques des sols qui gouvernent le transport de l'eau dans les sols et les aquifères. En effet, plusieurs études nord-américaines (Michaud et coll., 2002; Michaud, 2004; Michaud et coll., 2004; Michaud et Laverdière, 2004) ont démontré le lien qui existe entre les types de sol, leur position dans le paysage ainsi que les mouvements de l'eau, particulièrement en surface, et l'érosion.

Parce que les sols ont une influence marquée sur les mouvements de l'eau, des sédiments, et donc sur le transport du phosphore, une base de données des principaux sols agricoles du Québec a été mise sur pied et accompagne l'ODEP. Elle contient les principaux paramètres, discutés plus loin dans cette section, servant à l'exécution de l'ODEP. Cette base de données hydro-pédologiques a été construite à partir de deux principales sources de données : la *Base de données électroniques des profils pédologiques (physico-chimiques) de référence des sols du Québec* (Lamontagne et Nolin, 2006) et l'*Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec* (Tabi et coll., 1990). La première base de données contient l'ensemble des caractéristiques physiques et chimiques des profils de sol, déterminées en laboratoire, suite à des campagnes de prospection pédologique entre 1948 et 1998. Cette base de données contient 7 152 enregistrements reliés à une série de sol et compilés pour tous les horizons échantillonnés dans près de 2 000 profils de sol. Ces données incluent notamment la texture de l'horizon, de même que le pourcentage de sable, limon, argile, sable très fin et de matière organique.

Entrepris en 1987, l'*Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec* avait pour but d'identifier les symptômes de dégradation des sols attribuables aux pratiques culturales et révélés par certains facteurs mesurés, tels que la porosité, la densité, la conductivité hydraulique, la stabilité des agrégats, le contenu en matière organique, le pH, la teneur en phosphore, potassium et autres éléments (Tabi et coll., 1990). Ces informations sont disponibles pour 160 séries de sol minéral étudiées lors de ces travaux. De plus, des analyses chimiques récentes sur 158 des 160 séries de sol faisant partie de l'*Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec* ont permis de déterminer la teneur en P total et P Mehlich-3 naturel de ces sols (Giroux et coll., 2008); une information importante dans les équations de l'ODEP.

La base de données hydro pédologiques qui accompagne l'ODEP ne contient que les paramètres nécessaires au fonctionnement de l'utilitaire. Ainsi, certaines données pédologiques contenues dans les sources utilisées, comme la conductivité hydraulique ou la profondeur des couches de sol, n'apparaissent pas dans cette base de données. Le tableau A.3.1, en annexe 3, présente les paramètres pédologiques contenus dans cette base de données, incluant les trois principaux paramètres au cœur du fonctionnement de l'ODEP, soit : le groupe hydrologique, l'érodabilité du sol et le contenu en phosphore du sol à l'état naturel. Alors que le groupe hydrologique est utilisé comme intrant au module *Hydrologie* afin de déterminer les hauteurs d'eau de ruissellement et aux drains souterrains, l'érodabilité du sol est un paramètre majeur des calculs de l'érosion nette. Finalement, le contenu en phosphore total et en phosphore Mehlich-3 des sols naturels sert aux calculs des concentrations en phosphore des sols cultivés. Plus de détails sont présentés à la section 3.3.

Le groupe hydrologique

Le groupe hydrologique rassemble les séries de sol ayant des potentiels similaires de ruissellement lorsqu'ils sont soumis à des climats semblables. Selon les règles de l'USDA-NRCS (2007) utilisées pour ce classement, les propriétés des sols qui influencent le ruissellement, et par conséquence l'attribution d'une série de sol à un groupe hydrologique donné, sont normalement basées sur des mesures terrain

d'infiltration et de transmission de l'eau sous des conditions maximales d'humidité (complètement humide, soit à la capacité de rétention au champ) lorsque le sol est sans végétation et non gelé.

La couche de sol ayant la plus faible conductivité hydraulique saturée (la moins perméable), la profondeur d'une couche de sol plus ou moins imperméable¹ à l'eau (roc, fragipan ou autres) et la profondeur de la nappe (si présente durant la saison de croissance) orientent le classement des séries de sol dans un groupe hydrologique donné. Il est à noter que l'influence de la couverture végétale et de la pente est traitée indépendamment pour ce classement.

Une description détaillée des groupes hydrologiques est présentée à l'annexe 3. Toutefois, de manière succincte, les **groupes hydrologiques** des sols se définissent comme suit :

- **Groupe A** : Ce groupe comprend les sols possédant un taux d'infiltration élevé même lorsqu'ils sont saturés en eau. Typiquement, la texture de ces sols est grossière et ils sont très rapidement à rapidement drainés. Ces sols possèdent une conductivité hydraulique élevée qui est associée à un faible potentiel de ruissellement;
- **Groupe B** : Ce groupe inclut les sols possédant un taux d'infiltration modéré lorsqu'ils sont saturés. Typiquement, la texture de ces sols, bien à modérément bien drainés, varie de fine à moyennement grossière. Ces sols présentent un taux de transmission de l'eau et un potentiel de ruissellement modérément faible;
- **Groupe C** : Ce groupe de sols est caractérisé par un taux d'infiltration lent, possédant une couche qui empêche le mouvement de l'eau vers le bas ou ayant typiquement une texture très fine. Ces sols présentent une conductivité hydraulique lente et ils sont associés à un potentiel modérément élevé de ruissellement;
- **Groupe D** : Ce groupe comprend les sols ayant un taux d'infiltration très lent lorsqu'ils sont saturés. Le groupe D comprend principalement des argiles qui sont

¹ Selon la définition de l'USDA-NRCS, une couche est dite imperméable si la conductivité hydraulique saturée est inférieure à 0,33 cm/h.

pourvues d'une nappe d'eau près de la surface. Ces sols présentent un potentiel élevé de ruissellement.

Le classement des sols du Québec a été effectué en tenant compte des critères de classification du *USDA-Natural Resources Conservation Service*. Un premier classement des sols a été effectué en ayant recours aux données de conductivité hydraulique saturée obtenues pour 158 séries de sol lors de l'*Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec* (Tabi et coll., 1990). La donnée moyenne de conductivité hydraulique obtenue de l'*Inventaire* provenait de 14 sites par série de sol, soit 7 sites pour chacun des deux champs retenus avec le sol d'une même série. Les données pour les sols en prairie ont été utilisées. À chaque site, la couche de surface (ou de labour) jusqu'à une profondeur maximale de 30 cm a été caractérisée. Ensuite, la deuxième couche fût constituée de la couche immédiatement inférieure jusqu'à 40 cm. Enfin, la troisième couche considérée a été celle située entre 40 et 60 cm de profondeur, sauf dans le cas des sols trop graveleux. Un infiltromètre à charge constante a été utilisé pour mesurer la conductivité hydraulique de chacune des couches.

Les 158 séries de sol issues de l'*Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec* (Tabi et coll., 1990) ont ensuite été mises en relation avec les variables quantitatives et qualitatives telles que compilées par Lamontagne et Nolin (1997). La classe d'humidité, la profondeur du sol, le mode de dépôt (marin, fluviatile, morainique, etc.), la classe calcaire, le sous-groupe taxonomique, la classe de drainage et la classe granulométrique des séries de sol du Québec ont été utilisés pour définir des règles de classification à partir des données de l'*Inventaire*. Certaines règles ont été définies par un jugement d'experts puisque les données terrain ne considéraient que les premiers 60 cm (ou 40 cm) du sol. Des consultations ponctuelles sur certaines séries de sol à l'aide des données disponibles dans les rapports pédologiques ont permis de raffiner et de valider les règles, notamment dans le cas des argiles calcaires perméables.

Une fois ces règles établies, celles-ci ont été extrapolées à l'ensemble des séries de sol du Québec. La classification de ces séries en groupes hydrologiques permet donc d'obtenir

une caractérisation générale de la sensibilité des sols au ruissellement. Dans un autre contexte, elle est également requise pour l'évaluation des débits de pointe nécessaires au dimensionnement de petites structures de conservation des sols et de l'eau (Stampfli et coll., 2007).

Rappelons que cet exercice constitue une première classification systématique des groupes hydrologiques des séries de sol du Québec. La classification des propriétés hydro pédologiques des sols est un intrant indispensable au développement d'outils de prédiction hydrologique à l'échelle parcellaire et constitue une importante et immédiate priorité de recherche au Québec. Aussi, la présente classification intégrée à l'ODEP est appelée à être mise à jour, suivant les efforts concertés des équipes de R&D en sols au Québec sur cet important thème de la recherche appliquée, notamment en intégrant les phases de texture de surface, de nouvelles données de conductivité hydraulique et les variantes des séries afin d'obtenir un classement davantage précisé.

Érodabilité du sol

Le facteur d'érodabilité du sol (K) est une mesure quantitative de la sensibilité ou de la résistance inhérente d'un sol à l'érosion. C'est un des paramètres utilisés dans l'ODEP pour calculer le taux net d'érosion exporté des champs. Ce paramètre est calculé selon la formule suivante :

$$K = 2,77 * 10^{-7} * [m * (100 - A_s)]^{1,14} * (12 - MO_s) + [0,0043 * (cs_s)] + [0,0033 * (cp_s - 3)]$$

où

- K correspond à l'érodabilité moyenne de la série de sol (t ha h / MJ ha mm);
- m est la somme des pourcentages de sable très fin (STF_s) [0,05 à 0,10 mm] et de limon (L_s) [0,05 à 0,10 mm];
- A_s représente le % d'argile [0,000 à 0,002 mm];
- MO_s représente le % de matière organique;
- cs_s est un code de structure;
- cp_s est un code de perméabilité.

Cette relation entre les propriétés physiques du sol et son potentiel d'érodabilité a été établie par Wischmeier et Smith (1978) à partir de plus de 10 000 mesures d'érosion annuelle réalisées aux États-Unis sur des parcelles expérimentales. Comme pour le

groupe hydrologique, le calcul de l'érodabilité des séries de sol présentes dans la base de données hydropédologiques de l'ODEP a mis à profit l'information contenue dans la *Base de données électroniques des profils pédologiques (physico-chimiques) de référence des sols du Québec* (Lamontagne et Nolin, 2006) et *l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec* (Tabi et coll., 1990).

Le calcul de l'indice d'érodabilité demande l'intégration de plusieurs données dont la texture, le contenu en matière organique ainsi que la perméabilité et la structure du sol. Pour chacune des variantes (phases) des séries de sol, des statistiques ont été compilées à partir des bases de données électroniques afin de connaître la teneur moyenne en sable, limon, argile, sable très fin et matière organique. Pour certains sols de la *Base de données électroniques des profils pédologiques*, le pourcentage de sable très fin était manquant. Conséquemment, pour chaque mode de déposition (dépôt lacustre, fluviatile, morainique, etc.), des régressions linéaires multiples ont été dressées entre la proportion de sable/limon et la proportion de sable très fin. Ces régressions ont ensuite été appliquées aux profils où la proportion de sable très fin était absente.

Contrairement aux autres données qui tiennent compte de l'horizon de surface, les codes de perméabilité et de structure caractérisent l'ensemble du profil. Néanmoins, ces données sont très rares ou inexistantes à l'échelle de la série. Il existe cependant des informations provenant de *l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec*, mais celles-ci ne sont applicables que pour les séries répertoriées. Conséquemment, pour les autres séries de sol, l'indice de perméabilité a été dérivé à partir de la texture du sol de chaque horizon, selon les recommandations de Cook et coll. (1985, Figure 3.3). L'horizon le moins perméable situé dans les premiers 60 cm de sol a été utilisé comme indicateur de la perméabilité pour l'ensemble du profil. Selon les recommandations de la méthode RUSLE-CAN (Wall et coll., 2002), une pénalité (de -1) a été attribuée au code de perméabilité lorsqu'une couche imperméable était retrouvée sous les 60 cm. Inversement, une augmentation du code de perméabilité a été appliquée lorsque le pourcentage de fragments grossiers par volume dépassait 60 %.

À l'instar du code de perméabilité, l'absence de données sur la structure a dû être palliée par une évaluation indirecte, dérivée à partir de la texture de l'ensemble du profil. L'abaque présenté à la figure 3.4 présente les codes de structure associés à chaque classe texturale.

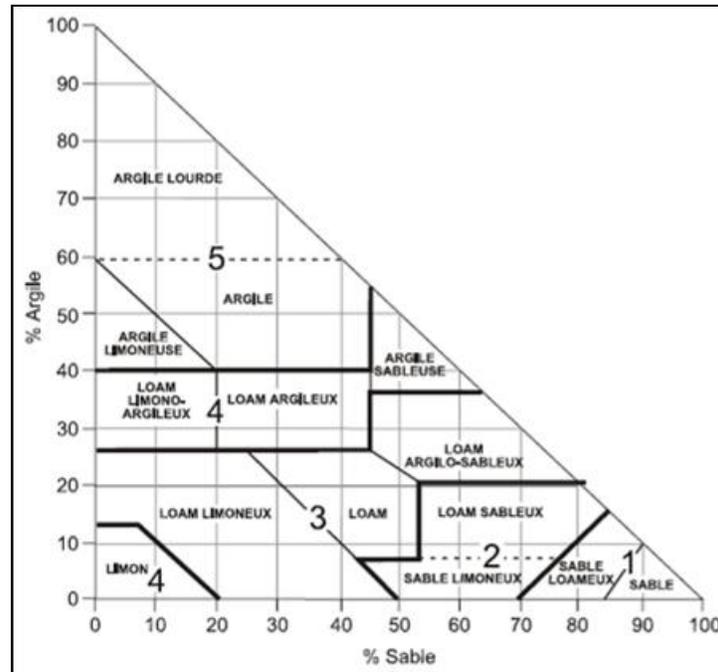


Figure 3.3 Code de perméabilité basé sur la classification des textures (Cook et coll., 1985).

Bien que les codes de perméabilité et de structure aient été approximés, ils tiennent compte des caractéristiques texturales et génétiques du sol. Néanmoins, ces propriétés sont étroitement liées aux modes de gestion et d'aménagement spécifiques au champ qui n'ont pas été considérés. L'imprécision associée à l'évaluation indirecte du code de perméabilité et à sa généralisation a toutefois un impact moindre sur le facteur d'érodabilité, compte tenu de son poids attribué dans l'équation.

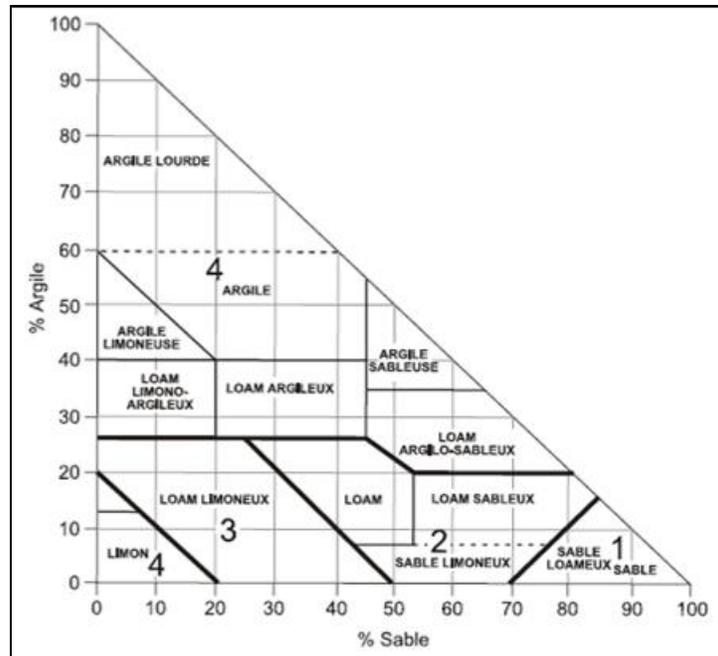


Figure 3.4 Code de structure basé sur la classification des textures (Cook et *coll.*, 1985).

Le contenu en phosphore total des sols naturels

L'état du phosphore du sol joue un rôle déterminant sur les concentrations de P dans les eaux de ruissellement. La teneur en P total du sol exerce un effet sur la concentration en P particulaire des matières en suspension (MES), alors que la saturation en P exerce un effet sur la concentration en P dissous. La teneur en P total du sol n'est toutefois pas disponible dans le rapport d'analyse remis aux agriculteurs. C'est pourquoi il faut l'estimer à partir de la teneur en P total du sol naturel et de la teneur en P Mehlich-3. Il est toutefois difficile, voire impossible, de retrouver des sols agricoles n'ayant pas subi des effets anthropogéniques. Un moyen d'approximer le contenu en phosphore des sols naturels est donc d'analyser le contenu en phosphore de la couche de sol située sous la couche arable.

Les 158 séries de sol faisant partie de *l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec* ont été conservées à l'IRDA, celles-ci étaient donc disponibles à des fins d'analyses chimiques. Pour chacune des séries de sol, un échantillon situé sous la couche de labour jusqu'à 40 cm, a été recueilli. L'extraction du P total dans les sols a été effectuée à 95 °C selon la procédure 3050 (EPA, 1996), avec de l'acide nitrique à 50 %

v/v, suivie d'une addition de peroxyde d'hydrogène à 30 % et complétée par l'ajout d'acide chlorhydrique concentré. Pour les séries de sol non couvertes par la banque de données de l'Inventaire, la teneur naturelle en P total a été estimée selon la classe texturale, tel que proposé par Giroux et *coll.* (2008).

3.3.2 Module *Hydrologie*

Fondements théoriques

Le Québec connaît un bilan hydrique excédentaire; les précipitations totales annuelles y excèdent les volumes d'eau évaporée ou transpirée par les plantes. Ainsi, une bonne partie des précipitations retournent éventuellement au cours d'eau. Selon l'*Atlas national du Canada*, ces quantités oscillent entre 300 mm dans l'Ouest de la province à environ 910 mm sur la Côte-Nord (Ressources naturelles Canada, 2004). Le cheminement emprunté par l'eau excédentaire, en surface ou en migration souterraine, aura un effet déterminant sur les processus d'érosion et de transport diffus de phosphore vers les cours d'eau. En effet, le ruissellement demeure le principal vecteur de transport du P et cette dynamique est largement sous contrôle saisonnier (Figure 3.5). Les plus importants épisodes de ruissellement ont lieu en période de fonte à la fin de l'hiver, au début du printemps et lors des redoux hivernaux. Le gel du sol, la fonte de la neige et une nappe d'eau élevée font en sorte que l'eau emprunte la voie du ruissellement de surface, contribuant alors à une portion importante, sinon dominante, de l'érosion et des exportations annuelles de phosphore.

Compte tenu de l'intensité modérée des précipitations au Québec, les zones des champs à fort potentiel de ruissellement présentent une forte discrimination spatiale. Les particularités du paysage, notamment une position basse dans le relief, la proximité de la nappe phréatique, un sous-sol peu perméable, la proximité ou la convergence des cours d'eau, conditionnent le développement de zones saturées du sol, dont l'étendue varie au gré des saisons et des précipitations. Ce processus de génération du ruissellement, contrôlé par le développement de l'état de saturation du profil de sol, est appelé « ruissellement à surface variable » et demeure le principal vecteur de la migration de l'eau à la surface du parcellaire agricole au Québec. Le ruissellement peut aussi être

généralisé par de fortes pluies, dont l'intensité dépasse la capacité d'infiltration du sol. Ce processus Hortonien, du nom de l'auteur de la théorie (Horton, 1935), contribue épisodiquement à de fortes crues estivales des rivières au Québec, comportant alors une composante importante de ruissellement.

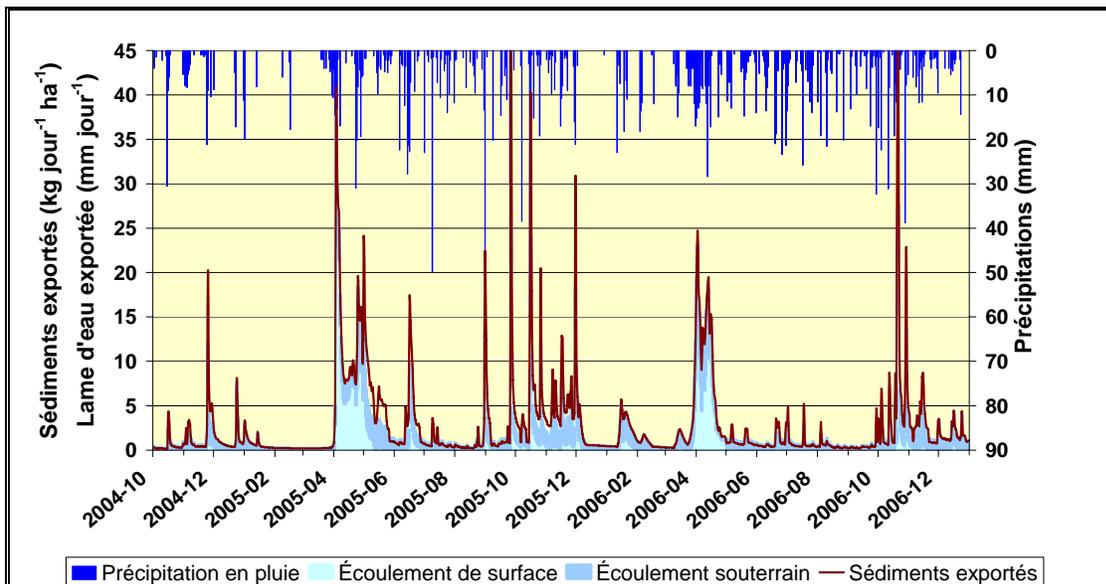
Tableau 3.1 Moyennes annuelles des composantes du bilan hydrique modélisées pour les bassins versants des ruisseaux au Castor, Walbridge et Morpions pour la période de 2000 à 2003.

Fractionnement du bilan hydrique	Quantités
Précipitations totales	1 096 mm
Précipitations neigeuses	252 mm
Fonte de neige	223 mm
Ruissellement	169 mm
Mouvements latéraux de l'eau dans le sol qui contribuent au débit du cours d'eau	16 mm
Contribution des drains souterrains*	198 mm
Contribution de l'eau souterraine (aquifère peu profond) au débit du cours d'eau	224 mm
Transfert d'eau entre l'aquifère peu profond et le sol par évaporation (en période de stress hydrique)	78 mm
Recharge de l'aquifère profond par percolation	42 mm
Recharge totale des aquifères (profond et peu profond)	272 mm
Débit en rivière	572 mm
Eau qui percole et atteint l'aquifère peu profond	272 mm
Évapotranspiration réelle	521 mm
Évapotranspiration potentielle	811 mm
Pertes par transmission	34 mm

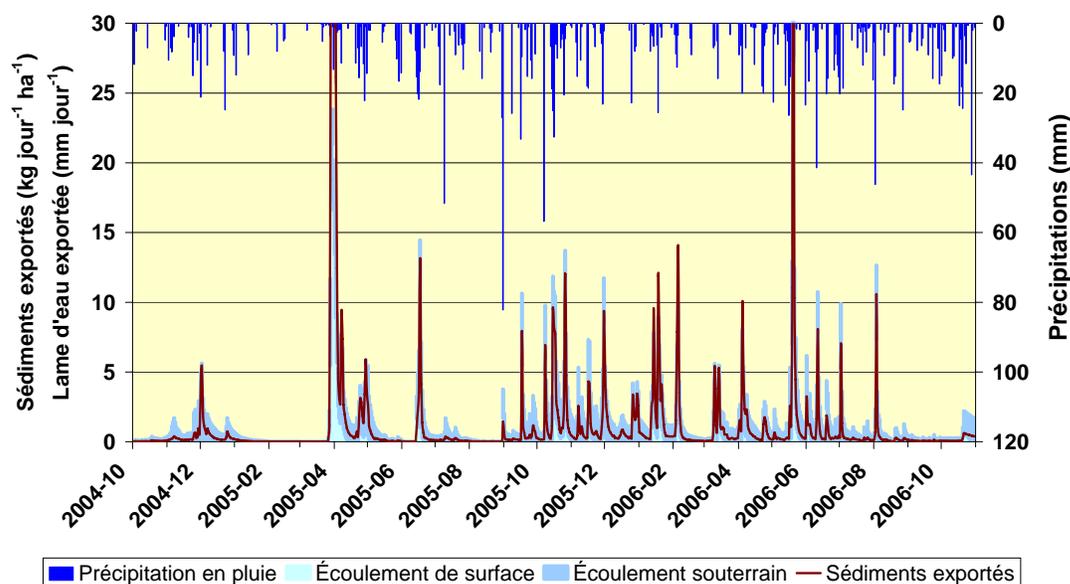
Tiré des travaux de modélisation hydrologique effectués dans le cadre du développement de l'ODEP.

*Attention, cette valeur est ramenée à la superficie totale du bassin. Lorsque seules les superficies drainées sont prises en compte, cette valeur est plutôt de 280 mm en moyenne.

Bien que les deux types d'évènements de ruissellement de surface coexistent au Québec, la forte influence de la saison hivernale sur la saturation du sol et l'intensité relativement faible des précipitations font en sorte que les évènements de ruissellement à surface variable dominant au chapitre des contributions au ruissellement, comparativement aux évènements du type Hortonien. Une implication pratique de la dominance d'évènements de ruissellement à surface variable illustre toute l'importance à accorder aux propriétés du sol et à l'aménagement des terres dans l'appréciation de l'égouttement du parcellaire et de sa vulnérabilité au ruissellement.



a) Bassin expérimental Fourchette témoin en Beauce.



b) Bassin expérimental Walbridge témoin en Montérégie.

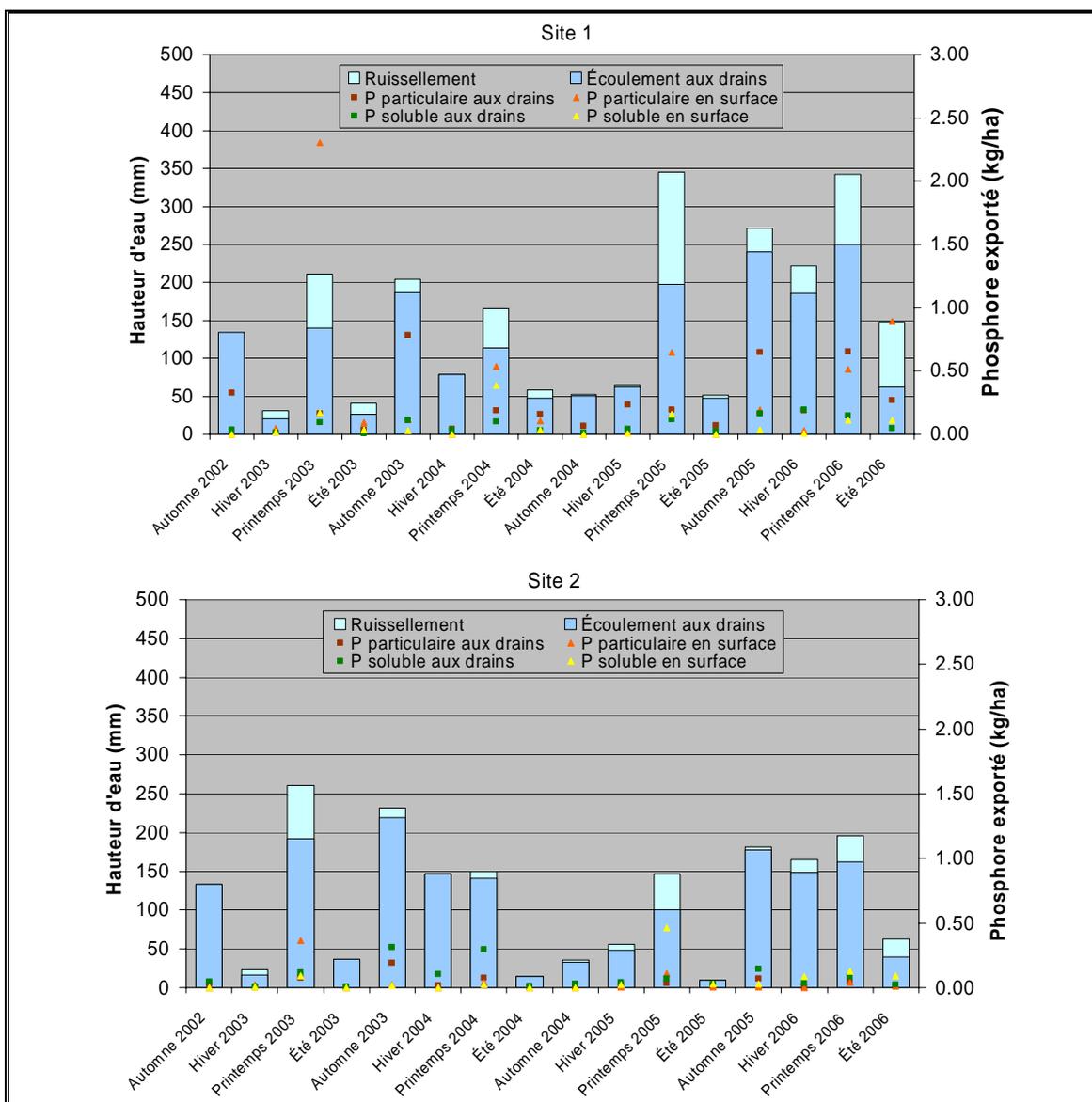
Cette période a été particulièrement fertile en événements de ruissellement au Québec. En plus des fontes et précipitations printanières qui contribuent à la plus importante part du ruissellement annuel, les suites de l'ouragan Katrina en 2005 et la série de fortes pluies printanières en 2006 ont contribué à gonfler la part du ruissellement dans le bilan hydrique annuel (adapté de Michaud et coll. 2008).

Figure 3.5 Bilan hebdomadaire des hauteurs d'eau associées au ruissellement et à l'écoulement aux drains pour les bassins versants expérimentaux du ruisseau Fourchette, en Beauce (a) et du ruisseau Walbridge en Montérégie entre octobre 2004 et décembre 2006.

Dans la mesure où le ruissellement demeure le principal vecteur de transport diffus du P vers le cours d'eau en bassin versant agricole, l'implantation du drainage souterrain atténue les exportations globales de phosphore vers l'écosystème aquatique. Des observations récentes à l'échelle du parcellaire, colligées dans l'Est du Québec (Giroux et coll., 2006a, b) et en Montérégie (Enright et Madramootoo, 2003; Gollamudi et coll., 2007), démontrent qu'une portion importante de l'exportation totale de P peut emprunter la voie des drains souterrains (Figure 3.6), particulièrement dans le cas des sols à texture plus lourde et sujets aux écoulements préférentiels. Compte tenu de l'importance des superficies drainées artificiellement au Québec, il est donc impératif de prendre en compte les exportations de P aux drains dans l'indexation des risques d'exportation de P d'une parcelle drainée souterrainement. À cette fin, une estimation des volumes d'eau s'écoulant par les drains est nécessaire.

Description du module

Les hauteurs d'eau ruisselée et évacuée par les drains prédites par l'ODEP s'appuient sur les observations colligées aux exutoires de bassins versants expérimentaux tributaires de la rivière aux Brochets en Montérégie-Est (Michaud, 2004; Michaud et coll., 2004). Ces observations ont permis de caler et de valider les résultats de modélisations hydrologiques permettant de redistribuer les hauteurs d'eau observées selon les différentes combinaisons de cultures et de groupes hydrologiques de sol composant les bassins versants expérimentaux (Deslandes et coll., 2007). Il en résulte une courbe de distribution des écoulements annuels moyens en ruissellement (Figure 3.7) et en écoulement souterrain (Figure 3.8) pour chacune des classes de culture de l'ODEP. Globalement, les hauteurs de ruissellement prédites par l'ODEP se situent entre 50 et 300 mm sur une base annuelle, alors que les hauteurs d'eau du parcellaire drainé se situent entre 200 et 400 mm. Pour les parcelles non drainées souterrainement, l'ODEP calcule tout de même une exportation (hypodermique) souterraine, évacuée vers les fossés. Celle-ci est estimée en supposant une efficacité de drainage de l'ordre de 15 %, comparativement à celle attribuée au drainage souterrain systématique. Ce ratio, au Québec, est estimé en présumant un espacement moyen entre les fossés d'environ 100 m pour les parcelles dont l'écoulement de surface est non amélioré, comparativement à un espacement moyen des drains de l'ordre de 12 à 15 m en parcelles drainées.



L'importance des contributions de surface et souterraines des exportations de P se distingue sur ces deux champs expérimentaux qui présentent des caractéristiques fortement contrastées. Le site no 1, associé à des sols argileux en position basse du relief, témoigne d'épisodes de transfert préférentiel, avec une proportion importante de P particulaire exporté *via* les drains souterrains. Le site no 2, associé à des sols de texture grossière, bien drainés et en position haute du relief, génère un ruissellement relativement moins important, alors que l'exportation souterraine de P demeure largement sous forme soluble, témoignant d'une moindre importance des migrations préférentielles du P (adapté de Jamieson et *coll.*, (2003), Enright et Madramootoo (2003) et Gollamudi et *coll.*, (2007)).

Figure 3.6 Bilan des exportations saisonnières d'eau et de phosphore par le ruissellement et les écoulements aux drains aux sites expérimentaux de la rivière aux Brochets de l'automne 2002 à l'été 2006.

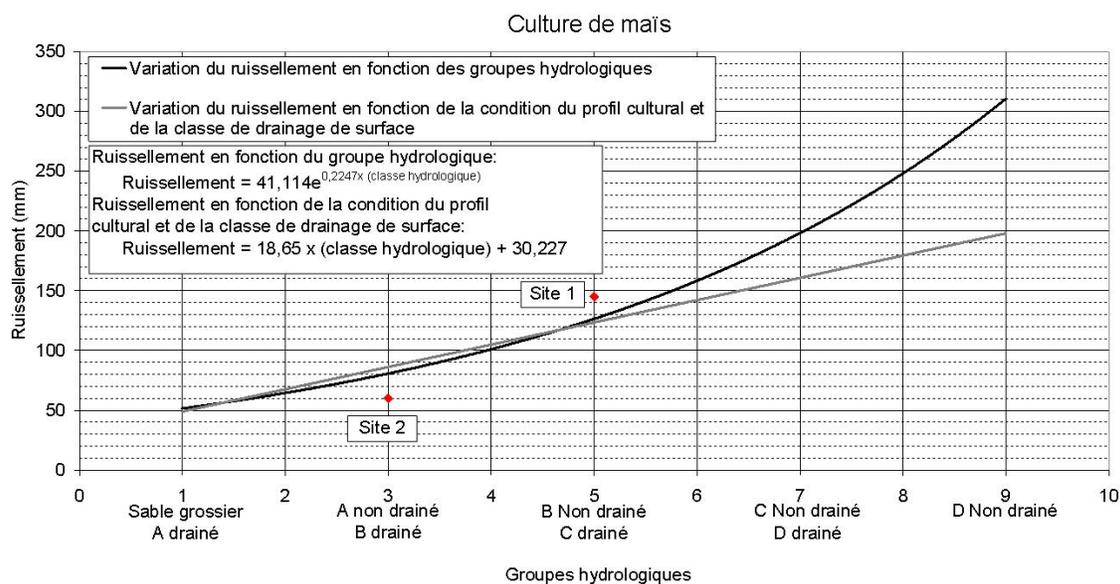


Figure 3.7 Équations décrivant le volume de ruissellement en fonction des groupes hydrologiques pour la culture de maïs.

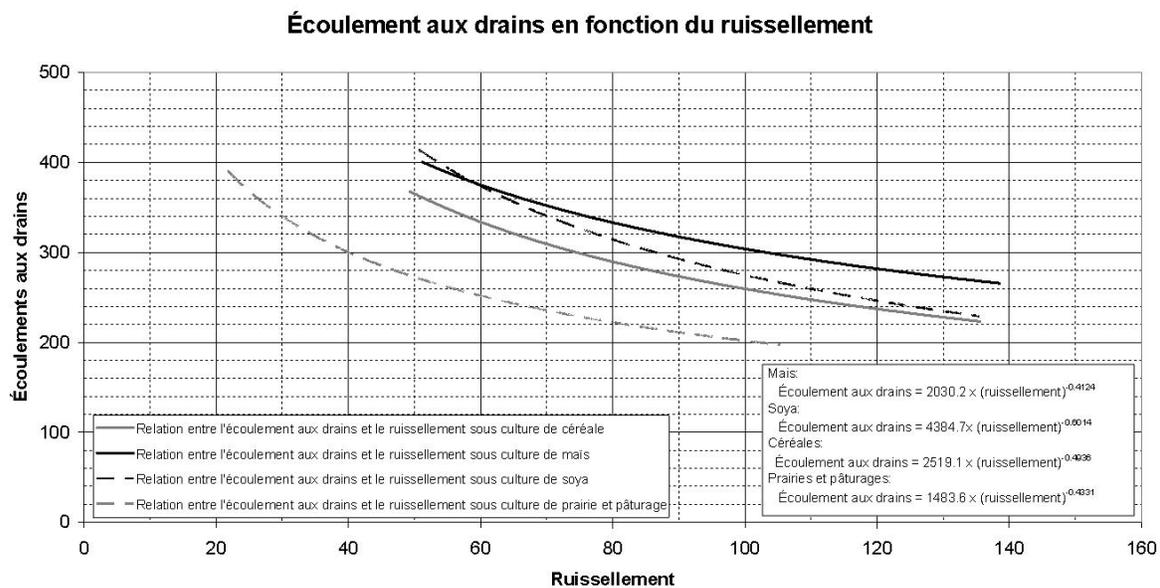


Figure 3.8 Équations décrivant la relation entre l'écoulement aux drains et le ruissellement pour quatre types de culture.

Conceptuellement, l'influence des propriétés hydro-pédologiques de la parcelle et de la régie des sols et des cultures sur les hauteurs d'eau exportée est prise en compte dans l'ODEP par quatre facteurs, soit :

- Le groupe hydrologique du sol (quatre groupes, A à D);
- La classe de drainage souterrain (absente, partielle, systématique);
- La classe d'écoulement de surface (bonne, moyenne, déficiente);
- La classe de condition du profil cultural (absence, présence ou dominance de zones à risque).

Au plan mathématique, la combinaison de ces facteurs permet d'attribuer une classe hydro-pédologique globale à la parcelle. D'une valeur de un à neuf, celle-ci traduit un ordre croissant de vulnérabilité au ruissellement. Pour une classe de culture donnée, l'ODEP associe d'abord une hauteur de ruissellement en fonction du groupe hydrologique du sol non drainé (A à D). À ce point, la classe « A » se voit attribuer une valeur de 3, « B » une valeur de 5, « C » une valeur de 7 et « D » une valeur de 9. La prédiction est par la suite mise à jour en fonction des trois autres facteurs considérés, soit les classes de drainage souterrain, d'écoulement de surface et de condition du profil cultural. La classe hydro-pédologique de la parcelle peut alors augmenter, ou diminuer, selon l'interprétation apportée aux facteurs par l'utilisateur. La classe hydro-pédologique, résultante de l'intégration des quatre facteurs, sert alors d'intrant dans l'estimation de la hauteur moyenne annuelle de ruissellement pour la parcelle et pour une classe de culture donnée (Figure 3.7). Cette dernière sert enfin à estimer la hauteur d'eau drainée souterrainement (Figure 3.8). Chacun des quatre facteurs qui interviennent dans l'évaluation de la classe hydro-pédologique du sol est explicité ci-après.

Le groupe hydrologique du sol

L'utilisateur de l'ODEP est invité à identifier la série de sol au moyen du rapport pédologique ou d'un diagnostic de terrain. Suivant la saisie de la série de sol dans le portrait des champs de l'ODEP, le groupe hydrologique sera automatiquement importé depuis la base de données hydro-pédologiques (décrite précédemment à la section 3.4.1). En absence d'une référence spatiale propre à la série de sol ou dans l'esprit de valider l'appartenance de la parcelle étudiée à un groupe hydrologique donné, l'utilisateur peut

se référer à la clé de classification reproduite au tableau A3.2 de l'annexe 3, en appui à son diagnostic réalisé sur le terrain. Rappelons cependant que la classification du groupe hydrologique s'applique aux propriétés physico-chimiques du sol qui influent sur la perméabilité tout en faisant abstraction de la présence du drainage souterrain.

Les classes de drainage souterrain

Les trois classes de drainage souterrain font respectivement référence à l'absence, la présence partielle ou systématique du drainage souterrain. Un sol systématiquement drainé voit ainsi son classement hydro pédologique diminuer de deux classes alors que celle associée à un sol partiellement drainé ne diminue que d'une classe. Par exemple, une unité cartographique d'argile Sainte-Rosalie initialement classée dans le groupe hydrologique « C » est associée à la classe hydro pédologique 7 en absence de drainage souterrain. Toutefois, en présence d'un drainage souterrain systématique ou partiel, cette série se voit respectivement attribuée une classe 5 ou 6. Pour une culture de maïs, la prédiction de la hauteur annuelle moyenne de ruissellement, sans prise en compte des autres facteurs, passe ainsi de 198 mm en absence de drainage souterrain, à 126 mm en présence systématique de drains.

Les classes d'écoulement de surface

Trois classes d'écoulement de surface sont proposées par l'ODEP de façon à tenir compte de l'influence de l'aménagement hydro-agricole de la parcelle et de sa position dans le paysage sur l'activité hydrologique de surface. Par défaut, l'ODEP assigne la classe d'écoulement de surface « Moyenne » dans le portrait des champs, ce qui n'affecte pas le numéro de la classe hydro pédologique de la parcelle ou la prédiction de la hauteur de ruissellement. L'utilisateur peut cependant élever ou abaisser le numéro de la classe hydro pédologique en évaluant l'écoulement de surface de la parcelle. Trois critères sont proposés pour seconder ce diagnostic, soit l'appréciation des pentes, la position relative de la parcelle dans le relief du bassin versant et enfin la présence de zones humides causées par des dépressions.

Ainsi, une parcelle présentant une pente égale ou supérieure à 3 % ou des planches bombées (dont les arêtes correspondent dans la plupart des cas à environ 3 % de pente) voit son numéro de classe hydropédologique augmenter d'une unité (classe d'écoulement « Déficiante »). À l'opposé, la classe d'une parcelle qui a profité d'un nivellement de précision ou qui présente une pente naturelle uniforme et plane peut être réduite d'une unité (classe d'écoulement « Bonne »).

La position occupée par la parcelle dans le paysage du bassin versant peut aussi être prise en compte dans le diagnostic de l'écoulement de surface (Tableau 3.2). Le raisonnement à la base de ce critère tient au fait qu'une parcelle occupant une position basse dans le bassin versant est plus susceptible de développer un état de saturation en eau du sol, en raison de la montée de la nappe phréatique, qu'une parcelle localisée en position plus élevée dans le paysage, ou en tête du sous-bassin. La parcelle localisée en bas de versant possède ainsi une meilleure connectivité hydrologique avec le réseau de cours d'eau. Dans la littérature pertinente à l'indexation des risques de ruissellement, ce concept de connectivité hydrologique est généralement exprimé par la distance séparant la parcelle du cours d'eau. Au Québec, l'aménagement presque systématique des cours d'eau en milieu agricole a conduit à une densité de drainage de surface relativement uniforme, de l'ordre d'environ 1,5 km de cours d'eau aménagés par km². Chaque champ est donc à toutes fins pratiques bordé par un cours d'eau. Ce n'est donc pas tant le concept de distance, mais plutôt celui de la position ou de l'élévation qui discrimine alors la connectivité hydrologique des parcelles.

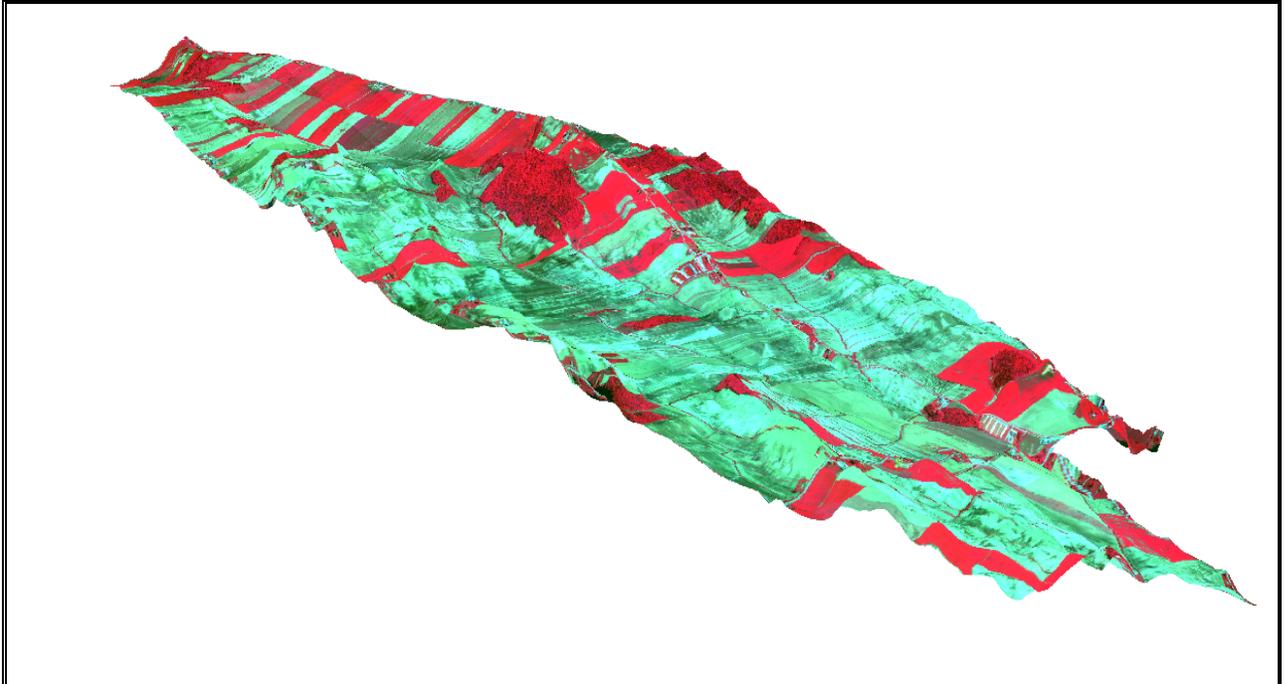
À l'instar de nombreuses études réalisées en Amérique du Nord, plusieurs dispositifs expérimentaux mis en place au Québec à l'échelle du bassin versant (Michaud et *coll.*, 2002; Deslandes et *coll.*, 2002; Michaud, 2004 et Michaud et *coll.*, 2004) ou du champ (Enright et Madramootoo, 2004) ont démontré l'influence de la position occupée dans le paysage sur l'activité hydrologique, ainsi que sur la mobilité des sédiments et du phosphore. Les photographies aériennes et les modèles numériques d'élévation demeurent des outils privilégiés d'appréciation de l'influence du relief sur l'égouttement du parcellaire. La figure 3.9 en apporte une illustration particulièrement éloquente. Alors

que l'image multispectrale rehausse les contrastes dans l'humidité du sol, la perspective 3-D du modèle numérique d'élévation met clairement en évidence l'influence du relief sur les zones hydrologiquement plus actives.

La présence de dépressions est le troisième critère d'appréciation de la classe d'écoulement de surface. Bien que les dépressions présentes dans le champ retiennent de l'eau de surface, il est néanmoins admis qu'elles favorisent globalement l'émission de ruissellement. L'accumulation d'eau contribue inévitablement à une condition physique du sol défavorable à l'infiltration, et favorise éventuellement l'écoulement concentré du ruissellement de surface, lorsque la dépression se remplit d'eau. Encore ici, le jugement du conseiller agricole est sollicité dans le diagnostic de la parcelle, qui sera avantageusement supporté par des observations colligées sur le terrain en conditions printanières et le recours aux photos aériennes ou aux relevés d'élévation.

Tableau 3.2 Classes d'écoulement de surface en fonction des critères hydropédologiques de pente, de position dans le relief et de présence de dépressions.

	Pente	Position dans le relief	Dépressions
Bon	Pente naturelle uniforme ou Améliorée par nivelage	Élevée, tête de bassin	
	Et pente < 3 %	Rabattement rapide de la nappe	Flaques non persistantes
Moyen	Pente variable	Intermédiaire	Présence ponctuelle, faible volume de rétention
	Et pente < 3 %	Rabattement modéré de la nappe	Flaques persistantes
Déficient	Planches bombées	Basse, persistance de la nappe élevée	Présence nombreuse et/ou volume de rétention élevé
	Et/ou pente forte (> 3 %)	Évidence d'écoulement hypodermique	Flaques persistantes



Cette image met en évidence l'influence du paysage sur l'égouttement du parcellaire. Alors que les zones rouges témoignent de couverture végétale en prairie ou en boisée, les zones bleutées témoignent de parcelles fraîchement ensencées ou prêtes à l'être. Les secteurs plus foncés témoignent d'un taux d'humidité du sol plus élevé, expliqué en partie par leur position plus basse dans le paysage du bassin versant. Une situation basse dans le relief ou la convergence des cours d'eau favorisent en effet la proximité de la nappe phréatique et le développement de zones saturées du sol. Ces zones *hydro-actives* du parcellaire demeurent relativement plus vulnérables à la production de ruissellement (adapté de Deslandes et Michaud, 2007).

Figure 3.9 Image multispectrale acquise au printemps (mai 2006) du bassin versant expérimental du ruisseau Ewing en Montérégie, combinée au modèle numérique d'élévation généré à partir d'un relevé LIDAR.

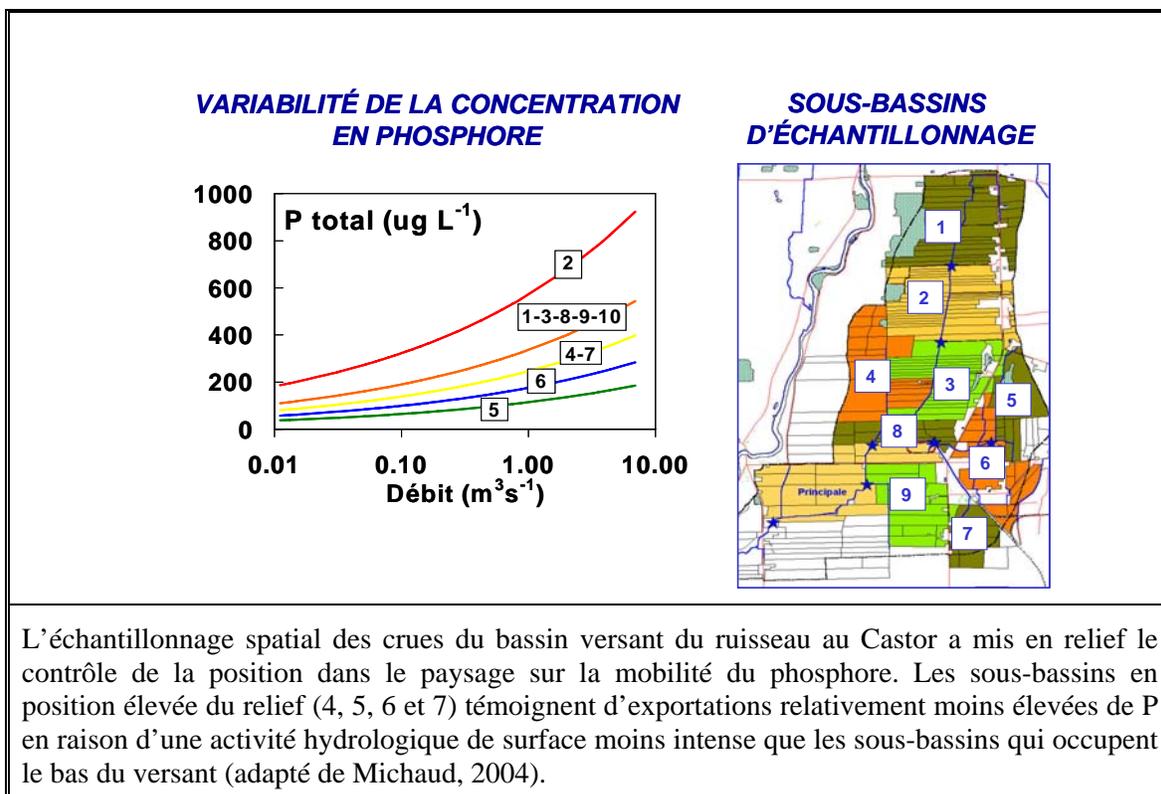


Figure 3.10 Illustration de l'échantillonnage spatial des crues du bassin versant du ruisseau au Castor.

La classe de condition du profil cultural

La classe de condition du profil cultural permet de prendre en compte une condition physique du sol défavorable, dans l'appréciation de l'égouttement de la parcelle. L'ODEP associe par défaut la classe « Bonne » à la condition du profil cultural saisie dans le portrait des champs. La reconnaissance de la classe « Présence de zones à risques » ou « Dominance de zones à risques » implique que le numéro de la classe hydro-pédologique de la parcelle considérée est rehaussé respectivement d'une ou de deux unités dans l'ODEP. Au plan mathématique, ce rehaussement implique une augmentation de la hauteur de ruissellement annuel de l'ordre de 25 à 50 mm. Conceptuellement, cette classe permet à l'utilisateur de prendre en considération les facteurs de régie du sol, particulièrement le travail du sol, sur l'égouttement de la parcelle. Rappelons que le groupe hydrologique, la classe de drainage souterrain et la classe d'écoulement de surface font plutôt intervenir l'influence des propriétés intrinsèques des sols, du relief et de l'aménagement du drainage de surface de la parcelle sur son activité hydrologique de

surface. L'évaluation de la condition du profil cultural permet notamment de prendre en considération deux facteurs associés à la condition physique du profil de sol et susceptibles d'affecter la lame d'eau ruisselée, soit le phénomène de la battance et la dégradation de la structure du profil cultural (Tableau 3.3).

La battance est le phénomène de destruction des agrégats à la surface du sol et du scellement de sa surface par l'action de la pluie. Les sols à texture limoneuse ou de sable très fin sont particulièrement sensibles au processus de battance. Le phénomène est exacerbé par un travail excessif du sol, qui pulvérise les agrégats et minimise la rugosité de surface du champ. La dégradation de la structure du profil cultural peut être occasionnée par le compactage du sol associé à la circulation de véhicules lourds en conditions de sols humides et peu portants ou à la présence d'une semelle de labour ou de lissage héritée de travaux du sol en conditions défavorables. Bien que ces conditions physiques du sol défavorables conduisent à un égouttement déficient, perceptible par des photographies aériennes ou des relevés de rendement, le diagnostic au champ demeure de mise. Une méthode de diagnostic du drainage adaptée au parcellaire du Québec est décrite dans le Guide des pratiques de conservation en grandes cultures (CPVQ, 2000).

Tableau 3.3 Classe de condition du profil cultural.

	Compaction Dégradation de la structure	Battance
Bonne	Pas de limitation	Pas de limitation
Présence/dominance de zones à risque	Présence de semelles de labour et/ou de lissage par les outils de travail secondaire qui limitent la perméabilité du sol.	Vulnérabilité en raison de la texture (loam limoneux, limon) et/ou pulvérisation excessive des agrégats en surface du sol

3.3.3 Module Agroclimat

Les prédictions de hauteurs d'eau exportée par ruissellement et par voies souterraines calculées par l'ODEP s'appuient sur les observations terrain et les résultats de modélisation hydrologique provenant du secteur aval du bassin versant de la rivière aux Brochets, en Montérégie. La disponibilité de données hydrométriques et de suivis de la qualité de l'eau à diverses échelles d'étude dans cette région a permis le calage et la

validation du modèle hydrologique SWAT (Deslandes et al, 2007). Celui-ci permet de décrire l'influence des propriétés et de l'utilisation du sol sur le bilan hydrique. Afin de transposer les relations établies dans cette région de référence aux autres régions agroclimatiques de la province, deux facteurs de pondération climatique ont été retenus, soit un facteur de pondération de la lame d'eau annuelle et un facteur de pondération du ruissellement annuel. Conceptuellement ces facteurs traduisent, pour une région donnée, l'influence relative des hauteurs de précipitation, du taux d'évapotranspiration et de la fonte des neiges sur l'abondance et la répartition des écoulements de surface et souterrains. Au plan opérationnel, les algorithmes de l'ODEP du module *Agroclimat* ajustent *a posteriori* les prédictions hydrologiques générées dans le module *Hydrologie* pour une région agroclimatique donnée. Ainsi, les prédictions des hauteurs d'eau ruisselée et drainée pour chaque champ saisi dans l'ODEP sont d'abord générées en fonction de la région agroclimatique de référence, soit la station météorologique d'Iberville en Montérégie. Les facteurs de pondération climatique propres à la région à l'étude sont par la suite appliqués aux prédictions d'eau ruisselée et drainée produites par le module *Hydrologie* de l'ODEP.

Les facteurs de pondération agroclimatique inclus dans l'ODEP ont été calculés pour 26 stations météorologiques, représentatives des 18 régions agricoles de la province (Figure 3.2). Conceptuellement, le **facteur de pondération de la lame d'eau annuelle** traduit la différence dans les hauteurs totales d'eau exportée (combinant les écoulements de surface et souterrain) entre la région ciblée et la région de référence. Une approximation de la différence dans les bilans hydriques globaux entre la région ciblée et la région de référence est dérivée de leurs profils respectifs de précipitation et d'évapotranspiration. Le facteur de pondération de la lame d'eau annuelle est ainsi calculé à partir de la moyenne à long terme des précipitations (Environnement Canada, 2005) et du taux d'évapotranspiration de référence (Rochette, 1988) associés aux régions ciblées (*i*) et de référence (*r*) :

$$CT(i) = QT(i) / QT(r)$$

où : CT(*i*) = Facteur de pondération de la lame d'eau annuelle pour la région « *i* »;

QT(*i*) = Indice de la lame d'eau annuelle exportée dans la région « *i* »;

$QT(t)$ = Indice de la lame d'eau annuelle exportée dans la région témoin.

$$CT(i) = PPT(i) - Etr(i) / PPT(r) - Etr(r)$$

où : $PPT(i)$, $PPT(r)$ = Moyenne annuelle de précipitation totale pour la région « i » et témoin;

$Etr(i)$ et $Etr(r)$ = Moyenne annuelle d'évapotranspiration de référence pour la région « i » et témoin.

Le **facteur de pondération du ruissellement annuel** exprime quant à lui les influences de la fonte des neiges et de la fréquence des pluies de forte intensité sur la répartition, en surface ou souterraine, de la hauteur d'eau totale exportée. L'influence de la fonte des neiges est exprimée par le **facteur de ruissellement nival**. Celui-ci est estimé sur la base des ratios entre la fonte des neiges de mars et avril pour la région ciblée et celle de la région témoin. Ces bilans de fonte ont été estimés à partir des moyennes mensuelles à long terme (1971-2000) de la couverture de neige au sol (Environnement Canada, 2005), auxquelles a été attribuée une densité moyenne de $0,2 \text{ g/cm}^3$, et des précipitations nivales mensuelles (densité présumée à $0,1 \text{ g/cm}^3$). L'influence de l'intensité et de la fréquence des orages est pour sa part exprimée par le **facteur de ruissellement pluvial**, calculé à l'aide de la moyenne à long terme du nombre de jours ayant des précipitations journalières de plus de 25 mm (Environnement Canada, 2005) et de la pluie maximale probable pour une durée de six heures et une récurrence de deux ans (Hogg et Carr, 1985). Compte tenu de l'importante contribution du ruissellement nival à la hauteur d'eau annuelle ruisselée au Québec, un facteur de pondération de 1,5 a été appliqué à la composante nivale du facteur de pondération du ruissellement annuel. Le facteur de pondération du ruissellement annuel d'une région donnée (i) en fonction de la région de référence (r) s'exprime donc ainsi :

$$Cs(i) = (Csh(i) * 1,5 + Csp(i)) / 2,5$$

où : $Cs(i)$ = Facteur de pondération du ruissellement annuel pour la région « i »;

$Csh(i)$ = Facteur de pondération du ruissellement nival pour la région « i »;

$Csp(i)$ = Facteur de pondération du ruissellement pluvial pour la région « i »;

et

$$Csh(i) = Fp(i) / Fp(r);$$

$$Csp(i) = Pmax(i) * Jr25(i) / (Pmax(r) * Jr25(r))$$

où : $Fp(i)$, $Fp(r)$ = Fonte de neige de mars et avril (mm) pour la région « i » et témoin;
 $Pmax(i)$, $Pmax(r)$ = Maximum probable de pluie d'une durée de six heures et d'une période de récurrence de deux ans pour la région « i » et témoin;
 $Jr25(i)$, $Jr25(r)$ = Nombre de jours avec précipitations journalières de plus de 25 mm pour la région « i » et de référence « r ».

Les facteurs de pondération climatique dérivés pour chacune des régions agroclimatiques de l'ODEP sont rapportés en annexe 2. Ces derniers sont directement intégrés dans l'ODEP. Ainsi, suivant la sélection de la région agroclimatique dans le menu d'ouverture de l'ODEP, les prédictions des modules *Hydrologie*, *Érosion* et *Phosphore* prendront automatiquement en considération les facteurs agroclimatiques propres à la région sélectionnée.

3.3.4 Module *Érosion*

Fondements théoriques

À l'instar des équations prédictives du module *Hydrologie*, la méthode de calcul des prédictions des taux nets d'érosion retenue pour l'ODEP a été développée sur la base de flux de sédiments observés aux exutoires de bassins versants expérimentaux en Montérégie (Michaud et coll., 2004) puis modélisés avec le support du modèle hydrologique SWAT (Michaud et coll., 2007). Cet exercice complexe de modélisation a permis d'associer des taux nets d'exportation de sédiments aux différentes classes de culture et de type de sol composant les bassins versants expérimentaux. Ces résultats de modélisation hydrologique ont à leur tour permis de générer une adaptation simplifiée du modèle de prédiction des taux nets d'érosion, adapté au cadre opérationnel de l'ODEP.

Le modèle hydrologique SWAT, de même que sa version simplifiée intégrée dans l'ODEP, simule le processus d'érosion à l'aide de l'équation modifiée de pertes de sol (MUSLE; Williams, 1975). L'intérêt de retenir une adaptation de l'équation de MUSLE dans l'ODEP pour la prédiction des pertes de sol au Québec tient au fait que ce modèle fait intervenir le taux prédit de ruissellement dans le calcul du taux d'érosion. Cette approche se distingue des équations USLE (Wischmeier et Smith, 1961) ou RUSLE

(Renard et *coll.*, 1996) prises en considération dans la plupart des IRP développés ailleurs en Amérique du Nord. Rappelons que MUSLE, RUSLE ou USLE partagent tous les mêmes paramètres d'équation relatifs à l'influence de l'érodabilité du sol (K), du relief (L, S) et de la région du sol et de la culture (C). Les équations se distinguent cependant par leur composante hydrologique. RUSLE ou USLE font intervenir l'érosivité des pluies comme facteur hydrologique dans le calcul de l'érosion, plutôt que le taux de ruissellement dans le cas de MUSLE. Compte tenu de l'érosivité des pluies relativement faible au Québec, comparativement aux régions états-uniennes, et de l'importance du processus de ruissellement à surface variable dans la définition des zones d'émission de sédiments et de nutriments, l'équation MUSLE est mieux adaptée à l'expression de la variabilité spatiale de la vulnérabilité du parcellaire à l'érosion. Plusieurs études comportant des échantillonnages spatiaux de la qualité de l'eau en bassins versants ruraux au Québec (Deslandes et *coll.*, 2002; Michaud et *coll.*, 2004) ont ainsi démontré que les hauteurs prédites de ruissellement possédaient un meilleur pouvoir explicatif que les prédictions de l'USLE sur la variabilité spatiale des flux de sédiments observés dans le réseau hydrographique.

Description du module

Les équations retenues pour le module *Érosion* de l'ODEP mettent à profit les paramètres de MUSLE des prédictions de pertes de sol (K, L, S, C), identiques à ceux intégrés au modèle SWAT. Toutefois, comme MUSLE est opéré à un pas de temps journalier dans SWAT et qu'il fait intervenir non seulement le ruissellement, mais aussi le débit de pointe², une version simplifiée, opérant annuellement, a été développée pour l'ODEP. L'équation qui suit, retenue pour l'ODEP, lie ainsi la prédiction du taux net d'érosion à la prédiction de ruissellement établie dans le module hydrologique.

² Débit maximal d'un événement

$$Sed = (a * Q_s - b) * C * K * LS$$

où :

- Sed = Exportation annuelle nette de sédiments (t/ha);
- Q_s = Ruissellement annuel (mm/ha);
- K = Facteur d'érodabilité du sol (MJ mm/ha h);
- C = Facteur de culture (--);
- L = Facteur de longueur du parcours de l'eau (--);
- S = Facteur de la pente (--);
- a et b* = Paramètres de calage.

Le facteur K est une mesure quantitative de la sensibilité ou de la résistance inhérente d'un sol à l'érosion. Cette information est fournie pour chacune des séries de sol de la base de données hydropédologiques qui accompagne l'ODEP. Les indices d'érodabilité des séries de sol ont été estimés à partir de l'équation de Wischmeier et Smith (1961) (équation section 3.4.1) à partir des données de granulométrie, de perméabilité, de structure du sol et du taux de matière organique rapportées dans différents rapports pédologiques de la province de Québec.

Les facteurs L et S traduisent respectivement l'influence de la longueur de la pente et de son inclinaison sur le taux d'érosion. Conceptuellement, le facteur *L* exprime l'influence de la distance parcourue par le ruissellement sur son pouvoir érosif. Dans l'ODEP, l'utilisateur est invité à saisir la distance maximale du parcours de l'eau pour la parcelle ciblée. Cette dernière représente généralement la distance séparant le point le plus haut de la parcelle à la première raie de curage ou fossé rencontré par le parcours de l'eau. Une estimation réalisée sur le terrain, ou l'interprétation sommaire d'une photographie aérienne, d'une carte de base comportant des contours d'élévation ou du plan de drainage, permettent d'estimer cette distance maximale du parcours de l'eau. Dans l'ODEP, cette distance maximale est traduite en distance moyenne du parcours de l'eau pour l'ensemble de la parcelle (Figure 3.11). Cette relation a été dérivée des statistiques de parcours de l'eau calculées pour le bassin expérimental du ruisseau Ewing en Montérégie (Figure 3.9). La configuration relativement uniforme du parcellaire agricole au Québec fait en sorte que le ratio « parcours moyen : parcours maximal » est relativement stable, soit à environ 0,575, pour l'ensemble des micro-bassins.

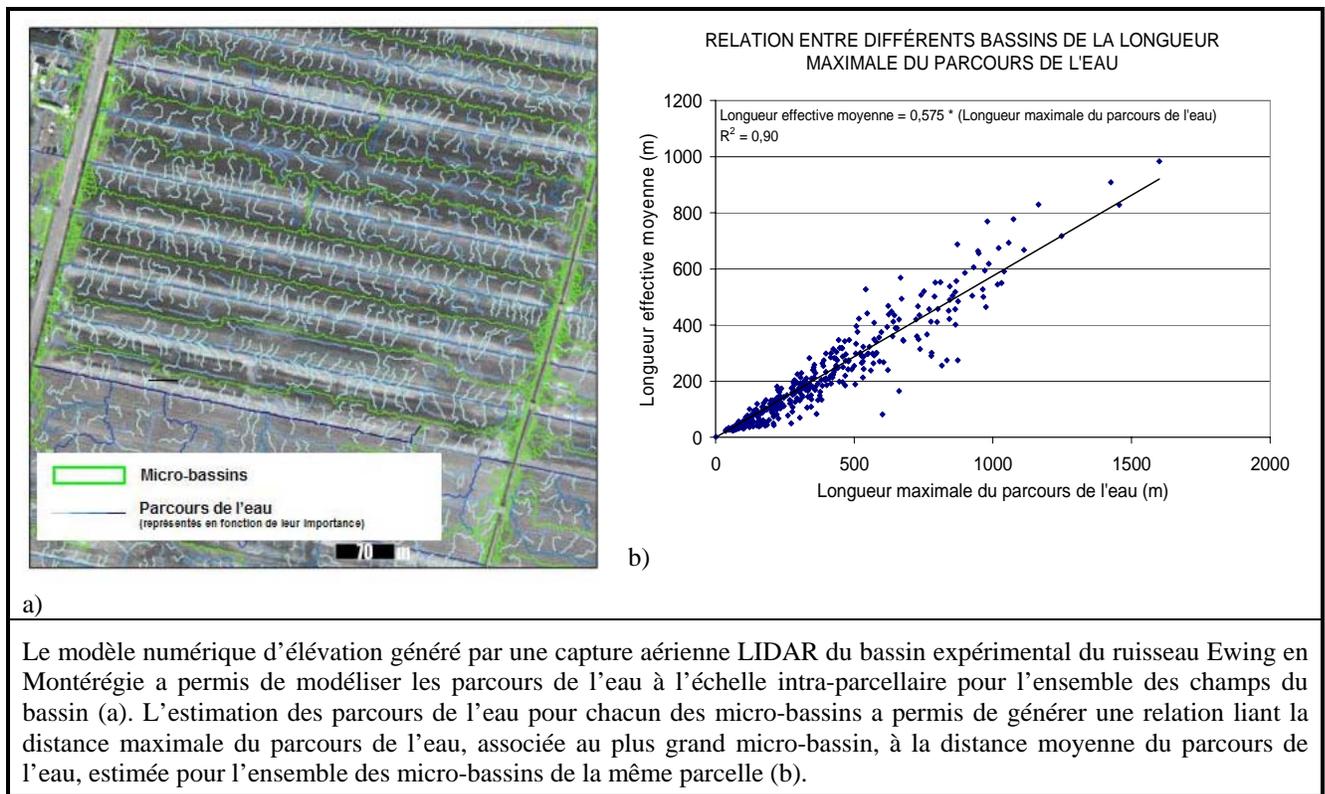


Figure 3.11 Délimitation des micro bassins et des parcours de l'eau à l'échelle intra-parcellaire du bassin versant du ruisseau Ewing en Montérégie Est (a) et relation entre le parcours maximal de l'eau et le parcours moyen pour l'ensemble des parcelles du bassin versant (b).

Le facteur S traduit le pouvoir érosif du ruissellement associé à l'inclinaison ou la pente. Dans l'ODEP, l'utilisateur est invité à saisir la pente associée au parcours maximal de l'eau, déterminé par le facteur L . L'acquisition de cette information peut être supportée par la prise de données sur le terrain (clinomètre ou GPS) ou par diverses références cartographiques (contour d'élévation, modèle numérique d'élévation, plan de drainage ou atlas électronique).

Le facteur de couverture végétale C traduit l'influence de la culture et de la pratique culturale sur la perte de sol. Le facteur reflète les effets de la couverture végétale (feuilles et branches qui interceptent les gouttes de pluie et dissipent une partie de leur force érosive), de la végétation à la surface du sol (résidus de culture et végétation vivante) et le travail du sol (type, période et fréquence de travail du sol). Les facteurs C retenus pour les classes de culture et de pratique culturale dans l'ODEP sont rapportés au tableau 3.4. Ces derniers ont été généralisés à partir des résultats de la modélisation hydrologique

appliqués aux couples « sols-cultures » du bassin versant du ruisseau Walbridge (Michaud et coll., 2007) et complétés par les références citées par Wall et coll. (2002). L'effet des précédents culturels de prairie ou de culture à faible retour de résidus (soya, maïs-ensilage, légumes) est pris en compte par l'application d'un facteur de 0,50 et de 1,20 respectivement. Le précédent culturel de prairie a ainsi comme effet de réduire de moitié l'exportation de sédiments pour l'année courante, alors qu'un précédent de maïs ensilage ou de soya implique une augmentation de 20 % de l'exportation de sédiments.

Tableau 3.4 Facteurs de couverture végétale *C* retenus dans l'ODEP pour la prédiction des exportations nettes de sédiments (adaptés de Michaud et coll., 2007; Wall et coll., 2007).

Culture et pratique culturale	C retenu
Maïs, labour d'automne	0,45
Maïs, déchaumage à l'automne	0,30
Maïs, déchaumage au printemps	0,20
Maïs, semis direct	0,15
Céréales, labour d'automne	0,30
Céréales, déchaumage à l'automne	0,20
Céréales, déchaumage au printemps	0,15
Céréales, semis direct	0,10
Soya, labour d'automne	0,55
Soya, déchaumage à l'automne	0,50
Soya, déchaumage au printemps	0,30
Soya, semis direct	0,25
Culture de couverture	0,15
Prairie, labour d'automne	0,03

Effet du précédent culturel : multipliez 0,5 pour les prairies et 1,2 pour le soya, le maïs ensilage et les légumes.

Les paramètres *a* et *b* sont des paramètres de calage de l'équation, liant la hauteur de ruissellement à la prédiction des sédiments exportés. Ces paramètres ont été estimés à partir des prédictions du modèle hydrologique SWAT, pour chacune des combinaisons de classes de culture et de pratique culturale considérée dans l'ODEP. Les mêmes dispositifs en bassins versants expérimentaux de la Montérégie (Michaud et coll., 2007) qui ont servi à la conception du module *Hydrologie* de l'ODEP ont ainsi été mis à profit dans la prédiction des taux d'érosion. Concrètement, il s'est agi d'appliquer successivement chacun des couples de classes de culture/pratique culturale à l'ensemble du parcellaire des bassins expérimentaux, de « faire tourner le modèle » hydrologique, puis d'extraire

les résultats des prédictions de hauteur de ruissellement et de taux d'érosion pour chacune des parcelles. Pour chacune des combinaisons de classes de culture et de pratique culturale, une équation de régression a été établie entre les hauteurs de ruissellement simulées, en variable explicative, et les quantités de sédiments prédites divisées par les facteurs K, LS et C. La figure 3.12 illustre ces équations de régression pour la culture de maïs grain, alors que l'annexe 5 contient les figures illustrant les équations de régression des cultures de soya, céréales, prairie/pâturages de même que celles du maïs grain. Les paramètres a et b retenus pour la prédiction du taux net d'érosion représentent respectivement la pente des équations de régression et l'ordonnée à l'origine.

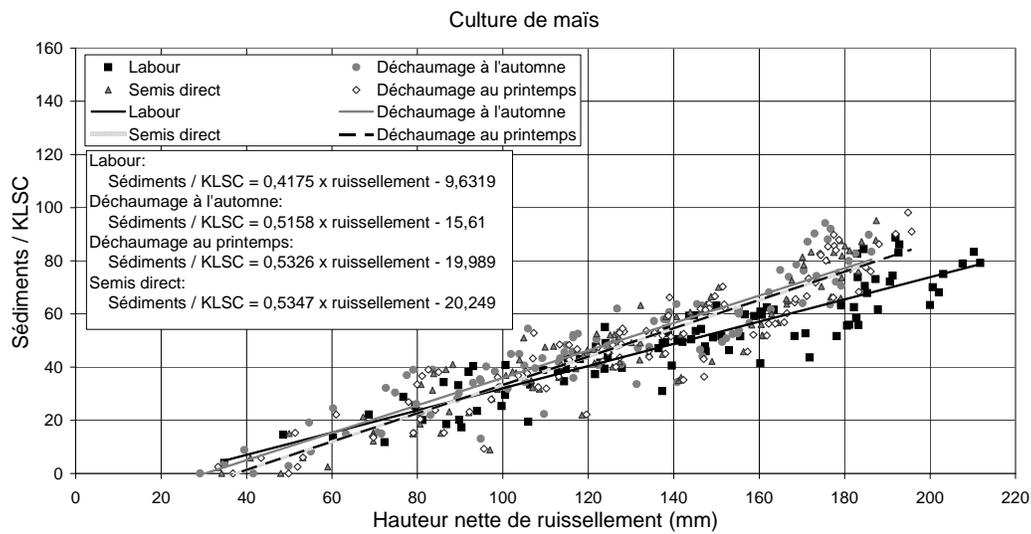


Figure 3.12 Ajustement du modèle de prédiction des exportations nettes de sédiments pour la culture du maïs grain à partir du ruissellement, des exportations de sédiments prédits ainsi que des valeurs des facteurs K, LS et C pour le bassin versant expérimental du ruisseau Walbridge en Montérégie, de novembre 2001 à mai 2003.

3.3.5 Module *Phosphore*

Le module *Phosphore* de l'ODEP calcule des prédictions d'exportation de phosphore sur une base annuelle moyenne. Les exportations associées au ruissellement et aux exportations souterraines sont estimées séparément, de même que la spéciation des exportations prédites sous les formes soluble, particulaire et biodisponible.

La démarche retenue pour le calcul des prédictions d'exportation de P dans l'ODEP est mixte, dans la mesure où elle tire profit de la modélisation hydrologique validée à l'échelle de bassins versants, de même que des relations empiriques développées à partir de dispositifs expérimentaux en parcelles. Compte tenu de la conception modulaire de l'ODEP, les résultats des modules *Hydrologie* et *Érosion* de l'ODEP sont utilisés en intrants dans la prédiction des exportations de P. Alors que ces modules calculent les volumes d'eau et les masses de sédiments exportés, le module *Phosphore* établit les concentrations et la spéciation du phosphore. L'ensemble des observations expérimentales qui ont servi au développement du module *Phosphore* de l'ODEP proviennent d'études réalisées au Québec dans les dix dernières années, dans le cadre de dispositifs en parcelles sous précipitations naturelles, de dispositifs en parcelles sous pluie simulée, de même que dans le cadre de dispositifs au champ. Les déterminations analytiques ont toutes été réalisées au laboratoire de physico-chimie de l'IRDA (ISO 17025) selon des protocoles uniformes, quelque soit la source des échantillons. Des protocoles uniformes de dosage ont ainsi facilité l'intégration des données provenant de différentes sources dans l'établissement des relations empiriques de l'ODEP décrivant l'enrichissement en phosphore des sédiments, des eaux de ruissellement et des eaux de drainage. L'annexe 6 décrit les protocoles de dosage appliqués aux différentes fractions du P modélisées dans l'ODEP :

- Le **phosphore total** rassemble toutes les formes de phosphore particulaire et dissous présent dans les échantillons d'eau;
- Le **phosphore particulaire** est présent dans les matières en suspension (MES), sous une forme non soluble;
- Le **phosphore total dissous** est le phosphore soluble présent dans l'eau sous forme organique et minérale;

- Le **phosphore réactif dissous** se retrouve sous forme d'orthophosphates solubles;
- Le **phosphore organique dissous** est la fraction du phosphore dissous présent dans la matière organique soluble. Cette fraction n'est pas déterminée dans l'ODEP;
- Le **phosphore biodisponible** est la fraction du phosphore immédiatement disponible pour la croissance des végétaux dans le milieu aquatique. Cette fraction correspond au phosphore réactif dissous plus la fraction biodisponible du P particulaire.

3.3.5.1 Perte de phosphore dans les eaux de ruissellement

La prédiction dans l'ODEP des charges totales de P exporté dans le ruissellement s'appuie sur l'estimation des concentrations en P particulaire et en P total dissous dans le sol, de même que sur le volume de ruissellement et d'eau aux drains prédit par le module *Hydrologie* ainsi que la quantité de sédiments prédite par le module *Érosion*.

Modélisation du P total dissous et du P réactif dissous

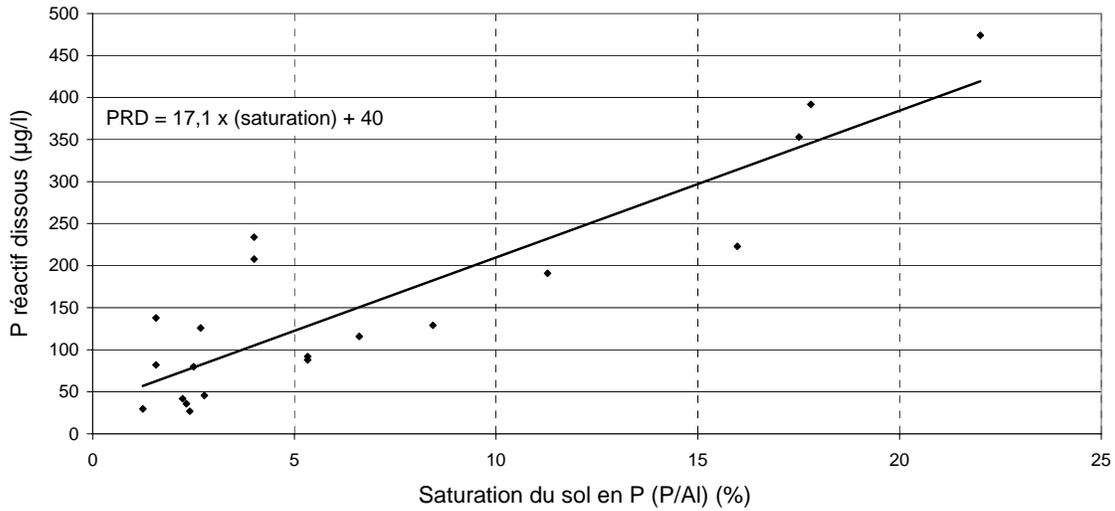
La charge en P total dissous est calculée en multipliant le volume de ruissellement par la concentration en P total dissous.

$$\text{Charge P dissous (g/ha)} = \text{Ruissellement (L/ha)} \times \text{concentration P dissous (g/L)}$$

Comme la concentration moyenne n'est pas connue, il faut la modéliser à partir de la teneur en phosphore assimilable du sol d'origine. NRCS-IOWA (2004), Mallarino et *coll.* (2005) et Vadas et *coll.* (2005) ont démontré que la concentration en P total dissous dans les eaux de ruissellement peut être estimée à partir de la teneur en P assimilable des sols. Au Québec, Giroux et *coll.* (2008) ont démontré que la méthode Mehlich-3, utilisée pour déterminer la teneur en P assimilable des sols (P_{M-3}), de même que l'indice de saturation en P des sols (P/AI) Mehlich-3 sont corrélés avec la concentration en P total dissous et en P réactif dissous dans les eaux de ruissellement. La figure 3.13 illustre l'équation retenue dans l'ODEP liant les concentrations de phosphore soluble à la saturation du sol en P, établies à partir de différents dispositifs en parcelles d'études réalisées au Québec (Giroux et *coll.*, 2008; Enright et Madramootoo, 2004; Michaud et Laverdière, 2004).

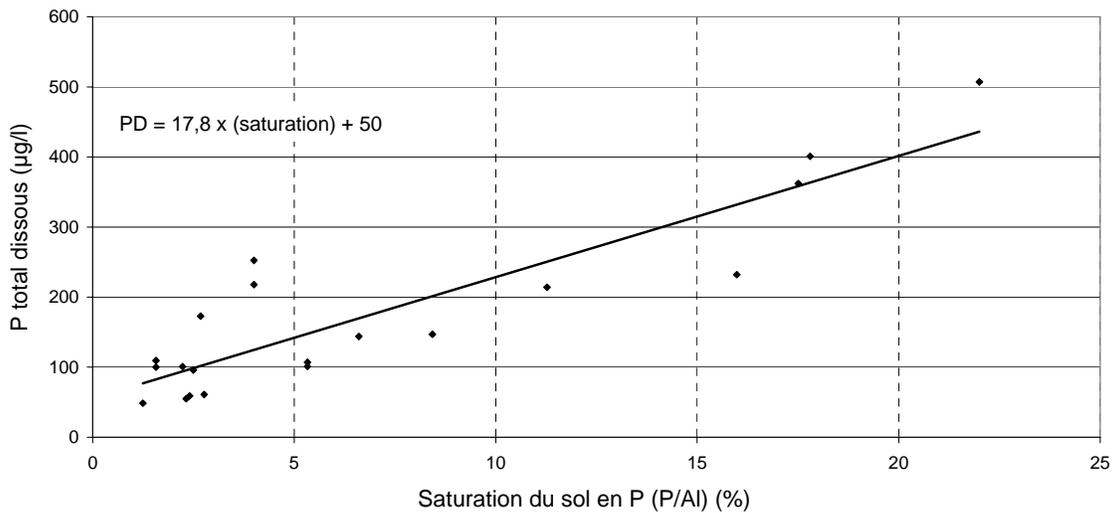
Malgré leurs origines diverses, ces observations traduisent une relation cohérente liant les richesses en phosphore du ruissellement et du sol.

Relation entre le P réactif dissous et la saturation en P des sols



(a)

Relation entre le P total dissous et la saturation en P des sols



(b)

Figure 3.13 Relation entre le P réactif dissous (a), le P total dissous (b), et la saturation en P (P/Al) des sols, établis à l'aide de la méthode Mehlich-3.

Modélisation du P particulaire dans les eaux de ruissellement

La charge de P particulaire calculée par l'ODEP dans les eaux de ruissellement est basée sur l'exportation prédite de sédiments (ou matières en suspension - MES) dans le module *Érosion*, à laquelle est attribuée une concentration en phosphore :

$$\text{Charge P particulaire (g/ha)} = \text{MES (t/ha)} \times \text{concentration P particulaire (g/t)}$$

$$P_{\text{particulaire}} (\text{mg kg}^{-1}) = P_{\text{total sol}} (\text{mg kg}^{-1}) \times E$$

La concentration en P particulaire des sédiments peut être modélisée à partir de la teneur en phosphore total du sol d'origine. Des chercheurs de l'Iowa (NRCS-IOWA, 2004; Mallarino et *coll.*, 2005) ont développé une approche permettant de déterminer la concentration en P particulaire des sédiments à partir de la teneur en P total dans le sol d'origine et en appliquant un facteur qui tient compte de l'enrichissement (E) en P des sédiments pendant le processus d'érosion. Le facteur d'enrichissement traduit les processus actifs de triage et de déposition des particules lors du transport des sédiments. Le ruissellement tend alors à s'enrichir en particules fines, relativement plus riches en matière organique et en P.

La teneur en P total du sol n'est généralement pas déterminée dans le rapport d'analyse remis aux agriculteurs. Elle peut cependant être établie à partir de la teneur naturelle en P total du sol et de l'enrichissement en P d'origine anthropique. Cet enrichissement en P total d'origine anthropique est déterminé à partir de l'enrichissement en P assimilable du sol. Il faut cependant connaître le facteur de proportionnalité (k1), qui relie l'enrichissement en P total à l'enrichissement en P assimilable du sol. Ce facteur, k1, a été estimé à partir de la relation entre la teneur en P total et le P_{M-3} de quelques séries de sol québécois et est en moyenne de l'ordre de 2,3 (Giroux et *coll.*, 2008).

La teneur naturelle en P total (horizon B) des 158 séries de sol du Québec provenant de la banque des sols de *l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles* (Tabi et *coll.*, 1990) a été déterminée au laboratoire de physico-chimie de l'IRDA et intégrée à la banque de données hydro-pédologiques de l'ODEP. Globalement, les teneurs naturelles en

P total mesurées varient entre 167 et 1 885 mg P kg⁻¹ selon les séries de sol. Une généralisation de la teneur naturelle en P total des sols a également été établie par groupe textural (Tableau 3.5). Dans la banque de données hydro-pédologiques de l'ODEP, cette classification a été utilisée en support à l'estimation du P total naturel, en absence de données de référence. Dans l'ensemble, les sols argileux contiennent généralement plus de P total que les sols à texture franche (loams) ou sableuse. L'estimation de la teneur naturelle en P total, combinée à la richesse en P_{M-3} du sol, permettent dès lors à l'ODEP d'estimer la teneur actuelle en P total du sol selon l'équation suivante :

$$\mathbf{P\ total\ actuel = P\ total\ naturel + 2,3 \times (P_{M-3} - 20)}$$

Tableau 3.5 Détermination de la teneur naturelle en P total et en P_{M-3} provenant de 158 séries de sol selon les groupes texturaux.

Groupe texturaux	P total		P _{M-3}	
	Moyenne	E.T.	Moyenne	E.T.
	(mg kg ⁻¹)			
Sols argileux	713	255	16,8	14,9
Sols loameux (incluant les loams sableux)	634	232	19,4	16,7
Sols sableux	537	299	27,0	18,2
Moyenne de tous les sols	662	295	20,0	16,6

Enfin, l'estimation par l'ODEP de la teneur en P particulaire du ruissellement fait intervenir l'estimation du P total du sol et le facteur d'enrichissement en P des sédiments. Ce dernier exprime le ratio entre la concentration en P particulaire (mg kg⁻¹) des sédiments et la teneur en P total du sol (mg kg⁻¹). L'observation en dispositifs expérimentaux a démontré que le facteur E décroît exponentiellement avec l'augmentation de la charge de sédiments. Giroux et *coll.* (2008) ont mis en relief cette relation en combinant les observations de différents dispositifs d'études en parcelles sous pluie naturelle ou simulée (Giroux et *coll.*, 2008; Enright et Madramootoo, 2004; Michaud et Laverdière, 2004). Pour les besoins de l'ODEP, le facteur d'enrichissement a été optimisé sur la base des résultats de la modélisation hydrologique appliqués aux bassins expérimentaux de la Montérégie (Figure 3.14), de façon à assurer la cohérence

entre les volumes de ruissellement, les charges de sédiments et les charges de P prédits par l'ODEP.

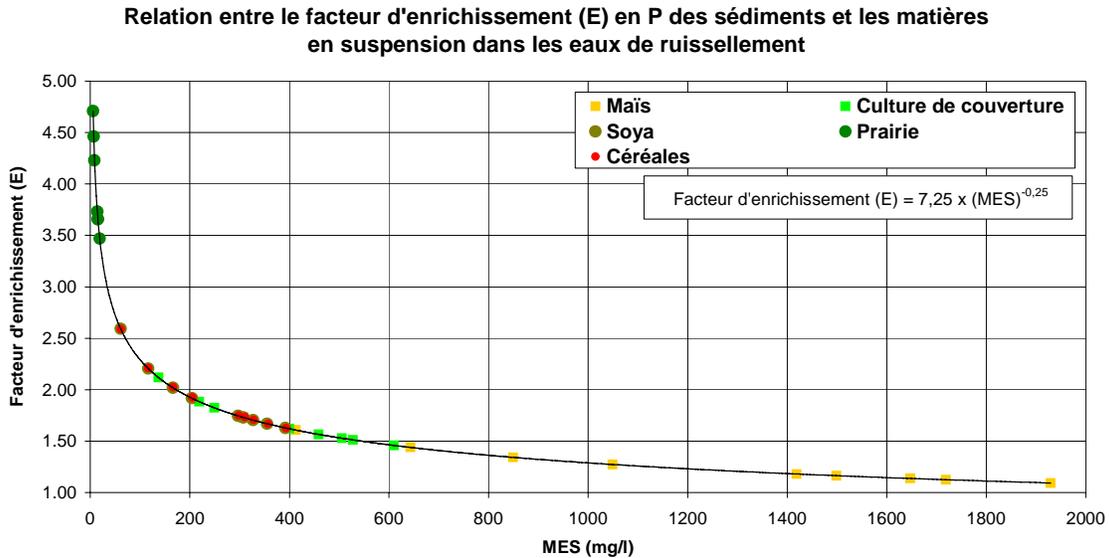


Figure 3.14 Relation entre le facteur d'enrichissement en P des sédiments, estimé sur la base d'un taux de P total du sol moyen de 1,000 mg kg⁻¹, et la concentration en MES des eaux de ruissellement modélisée aux exutoires des bassins expérimentaux de référence (Michaud et coll., 2007).

Modélisation du P biodisponible

Michaud et Laverdière (2004) ont démontré que la biodisponibilité du P dans les eaux de ruissellement est un élément important à considérer pour une meilleure évaluation du risque environnemental. Cette biodisponibilité dépend de la concentration en P réactif dissous mais également du pourcentage de biodisponibilité du P particulaire (Sharpley et coll., 1991). Elle varie aussi selon la teneur en P assimilable des sols. Regroupant les résultats de différents dispositifs d'étude à l'échelle parcellaire et des études sous simulateurs de pluie (Giroux et coll., 2008; Enright et Madramootoo, 2004; Michaud et Laverdière, 2004), Giroux et coll. (2008) ont établi une relation exponentielle entre la biodisponibilité du P particulaire et la teneur en P_{M-3} des sols (Figure 3.15). La concentration en P biodisponible dans les eaux de ruissellement peut être établie en fonction de la concentration en P particulaire, du coefficient de biodisponibilité du P particulaire (BioPP) et de la concentration en P réactif dissous (PRD) :

$$\mathbf{P \text{ biodisponible} = P \text{ particulaire} \times \text{BioPP} (\%) + \text{PRD}}$$

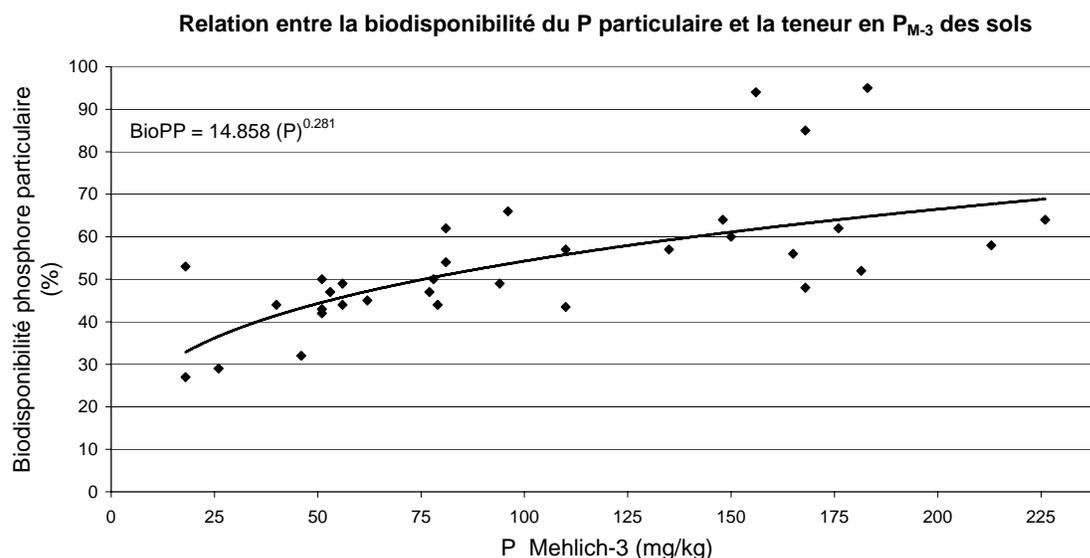


Figure 3.15 Relation entre la biodisponibilité du P particulaire et la teneur en P_{M-3} des sols.

3.3.5.2 Perte de phosphore dans les eaux de drainage

Plusieurs études réalisées au Québec ont mis en évidence l'importance des transferts de P associés au drainage souterrain. Michaud et *coll.* (2002) ont associé des concentrations relativement élevées en P, de l'ordre de 200 à 300 µg P/L, de même que d'importantes fractions particulières (43 à 67 %) aux classes de débits du cours d'eau correspondant à une dominance des transferts hypodermiques et souterrains. Dans leur étude sur la migration du P dans le ruissellement et les drains souterrains de parcelles limitrophes au bassin du ruisseau au Castor, Enright et Madramootoo (2004) ont attribué les accroissements marqués des concentrations en P dans les eaux de drainage souterrain au transport préférentiel de P dans les macropores du sol. Le transport préférentiel du phosphore via le réseau de drainage souterrain était particulièrement actif sur le site argileux, en position basse du relief du bassin, où les concentrations en P particulaire atteignent 80 % du flux total de P exporté en conditions d'écoulement en charge (Jamieson et *coll.*, 2002). Ces observations aux échelles parcellaire et bassin versant sont cohérentes avec celles rapportées dans le cadre d'autres dispositifs expérimentaux au Québec. Simard et *coll.* (1995) ont documenté la migration du phosphore dans des sols

surfertilisés de la région de Lotbinière. Ils ont obtenu des pertes importantes de phosphore total aux drains, la plus grande partie du phosphore perdu était sous forme particulaire. Beauchemin et coll. (1998) ont caractérisé la qualité de l'eau de drainage de 27 sites. Pour les 14 sites ayant démontré une concentration excédant 30 µg/L, dix étaient des gleysols. Rivest et Leduc (1997) ont caractérisé les champs et les eaux de drainage de 80 champs en production de maïs en conditions printanière et automnale, sans pouvoir établir de lien entre la richesse ou la saturation en P des sols et la concentration en P de l'eau dans les drains. Les dépassements observés du critère de qualité (30 µg P/L) n'ont pas pu être expliqués par les pratiques de fertilisation. Les auteurs concluent que le risque de migration souterraine est plutôt associé aux propriétés physiques du sol, notamment aux conductivités hydrauliques élevées et aux conditions propices aux écoulements préférentiels. Giroux et Royer (2006a, b) ont publié deux études sur les pertes d'éléments nutritifs aux drains sous cultures commerciales et sous prairie. Les pertes aux drains se font principalement sous forme de P particulaire et, à un degré moindre, sous forme dissoute dans un sol de type loam limoneux. Les charges de P particulaire perdu sont relativement semblables selon les cultures annuelles et les modes de fertilisation. Par contre, les charges de P dissous peuvent être affectées par les modes de fertilisation. De plus, elles sont plus faibles sous cultures pérennes, comparativement aux cultures annuelles.

Compte tenu de l'état des connaissances encore limité au Québec sur la migration souterraine du P, la prédiction d'exportation souterraine de P supportée par l'ODEP met à profit la hauteur d'eau drainée estimée dans le module *Hydrologie*, à laquelle est attribuée une concentration de référence, adaptée aux cultures annuelles et aux cultures pérennes, en P particulaire et en P soluble. La charge de P total dissous est alors établie à partir du volume drainé multiplié par la concentration en P total dissous :

$$\text{Charge P dissous (g/ha)} = \text{volume d'eau drainée (L/ha)} \\ \times \text{concentration P dissous (g/L)}$$

De même, la charge en P particulaire est établie à partir du volume d'eau drainée multiplié par la concentration en P particulaire.

$$\text{Charge P particulaire (g/ha)} = \text{volume d'eau drainée (L/ha)} \\ \times \text{concentration P particulaire (g/L)}$$

Le tableau 3.6 rapporte les concentrations moyennes de référence utilisées par l'ODEP dans le calcul des charges des fractions particulaire et soluble de P dans l'eau des drains selon la texture des sols et le type de culture. Ces concentrations reflètent les observations colligées dans le cadre de différents dispositifs de mesure de la quantité et de la qualité de l'eau aux drains (Giroux et Royer, 2006a, b; Enright et Madramootoo, 2004; Gollamudi et coll., 2007). Deux facteurs sont pris en compte dans l'établissement des concentrations de référence, soit la texture du sol et la culture (pérenne ou annuelle). L'état des connaissances actuelles ne permet pas de tenir compte de la richesse du sol ou des modalités de fertilisation dans l'évaluation du risque de la mobilité du phosphore au-delà de la couche arable. Les observations colligées au Québec, de même que celles rapportées dans la littérature scientifique, mettent cependant en évidence que les propriétés physiques du sol jouent un rôle déterminant dans les exportations de P observées dans les drains souterrains. Les sols caractérisés par une teneur en argile de plus de 30 % sont typiquement associés à des eaux de drainage comportant une importante fraction de P particulaire.

Tableau 3.6 Concentrations moyennes de référence de l'ODEP pour les différentes fractions du P dans l'eau des drains selon la texture des sols et le type de culture.

CULTURES ANNUELLES			
Texture	P particulaire	P total dissous	P réactif dissous
		mg/l	
> 30 % d'argile	262	44	30
> 20 % d'argile < 70 % de sable	150	51	42
< 20 % d'argile < 70 % de sable	38	57	54
> 70 % de sable	10	6	4

CULTURES PÉRENNES			
Texture	P particulaire	P total dissous	P réactif dissous
		mg/l	
> 30 % d'argile	156	38	25
> 20 % d'argile < 70 % de sable	97	50	40
< 20 % d'argile < 70 % de sable	38	62	54
> 70 % de sable	10	6	4

3.3.5.3 Perte de phosphore associée aux engrais de ferme

L'effet des fertilisants sur la mobilité du phosphore est principalement lié à l'effet qu'ils produisent sur la saturation des sols et la solubilité du P. La solubilité du phosphore est plus élevée pour les fumiers car les matières organiques limitent la fixation du P par l'aluminium, le fer et le calcium présents dans les sols. L'action combinée d'un plus grand volume épandu, d'une plus faible densité et d'une incorporation souvent partielle, fait en sorte que les engrais organiques contribuent plus que les engrais minéraux à l'accroissement des charges solubles, majoritairement biodisponibles, de phosphore (Michaud, 2004).

Dans ODEP, l'effet global de l'apport des engrais est d'abord calculé sur la base de l'enrichissement en P_{M-3} de la couche de sol interactive avec le ruissellement (10 mm). L'ODEP prend aussi en compte l'incorporation par les outils de travail du sol et le risque de ruissellement associé à la période comprise entre l'application et l'incorporation. Le calcul de la contribution de l'apport récent de P associé à la régie de la fertilisation vient s'ajouter au P du sol dans le calcul de l'enrichissement du ruissellement en P soluble.

$$P = \frac{\acute{E}p * 3,08}{2,3} * f_i * f_p$$

où :

- P Enrichissement en P_{M-3} des premiers 10 mm du sol
- $\acute{E}p$ est le taux d'épandage en P (kg/ha)
- f_i est le facteur d'incorporation
- f_p est le facteur de période

Le taux d'épandage en P est obtenu en divisant le taux d'épandage en P_2O_5 par 2,29. Cette valeur est ensuite multipliée par 3,08 pour obtenir le taux d'épandage équivalent sur 10 mm. La constante 3,08 suppose cependant que 40 % de l'épandage demeure dans les dix premiers millimètres du sol et que celui-ci possède une densité apparente de 1,3 mg/kg. Ce taux, en P total, est ensuite transformé en P_{M-3} en divisant par 2,3 (Giroux et coll., 2008). Ce taux est ensuite multiplié par les facteurs d'incorporation et de période (Tableau 3.7) afin d'obtenir la quantité de phosphore qui est ajoutée au contenu en P.

Tableau 3.7 Facteurs d'incorporation et de période.

	f_i	f_p Printemps	f_p Été ou automne hâtif	f_p Automne
Immédiate - < 48 h	0,25	0,25	0,13	0,25
Incorporation > 48 h	0,50	0,50	0,25	0,50
Non incorporé	1,00	1,00	0,50	1,00

3.4 Validation des prédictions et valeurs de référence

Entre 2001 et 2006, l'équipe de recherche en bassins versants de l'IRDA a colligé des données expérimentales aux exutoires de trois paires de bassins versants jumeaux, dans le cadre du réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles (Michaud et coll., 2004, 2009). Ces données ont servi de balise dans la validation de la capacité prédictive de l'ODEP et de l'analyse de sa sensibilité. Rappelons que l'ODEP est conçu pour fournir des prédictions de ruissellement, d'érosion des sols et des pertes de P sur une base annuelle moyenne. En réalité, l'activité hydrologique et les exportations diffuses de sédiments et de nutriments varient considérablement d'une année à l'autre en fonction des conditions météorologiques réelles. Cette importante variabilité interannuelle des

conditions météorologiques complique la validation des prédictions de l'ODEP à l'aide de données expérimentales provenant de suivis de l'écosystème aquatique.

Le tableau 3.8 rapporte les flux mesurés entre 2001 et 2006 aux exutoires des bassins versants expérimentaux de référence des régions agricoles de la Montérégie Est (ruisseau Walbridge), de la Montérégie Ouest (rivière La Guerre) et de la Beauce (ruisseau Fourchette). Alors que les années hydrologiques 2001-2003 témoignent de précipitations annuelles moyennes représentatives des moyennes à long terme pour les trois régions agricoles à l'étude, les années 2004-2006 témoignent de fortes activités hydrologiques automnales (2005 et 2006) et printanières tardives (2006). Aussi, les flux de sédiments et de phosphore demeurent relativement plus élevés en 2004-2006, nonobstant les différences dans les pratiques culturales et l'aménagement des terres entre les deux périodes à l'étude. Dans l'ensemble, les prédictions d'exportation de phosphore de l'ODEP se situent raisonnablement dans les intervalles observés aux exutoires des bassins versants expérimentaux. Ces prédictions valident, à tout le moins, le réalisme et l'ordre de grandeur des prédictions de l'ODEP. Rappelons que ces dernières, rapportées au tableau 3.8, ont été systématiquement calculées pour l'ensemble de 579 parcelles puis agrégées par sommation à l'échelle de leur bassin respectif. Elles n'intègrent donc pas les contributions de l'érosion des rives et autres sources ponctuelles dans le bilan des MES et du P exportés aux exutoires des bassins expérimentaux, pas plus que les processus de rétention à l'œuvre dans le réseau hydrographique. L'érosion des rives, particulièrement sévère dans les bassins expérimentaux de la Beauce et de la Montérégie Ouest, expliquerait en partie la différence entre la sommation des prédictions d'exportation des MES par l'ODEP et les flux mesurés aux exutoires des bassins versants. En Montérégie Est (ruisseau Walbridge), les positions occupées par les bassins jumeaux dans le relief expliquent les différences relatives avec les prédictions de l'ODEP (Michaud et *coll.*, 2004). Ce constat souligne l'importance à accorder au contrôle du paysage sur l'activité hydrologique et la mobilité des nutriments, un thème de recherche encore peu exploité au Québec. Il constitue aussi une invitation pour l'utilisateur de l'ODEP à discriminer le parcellaire en fonction des critères hydropédologiques proposés dans le portrait des champs.

Tableau 3.8 Flux mesurés aux exutoires des trois paires de bassins versants jumeaux du réseau d’actions concertées en bassins versants agricoles pour les périodes 2001-2003 et 2004-2006, et sommation à l’échelle du bassin versant des prédictions massiques de l’ODEP pour leurs parcelles respectifs (adapté de Michaud et *coll.*, 2004, 2008).

		Flux mesurés		Modèle
		2001-2003	2004-2006	ODEP
Walbridge Intervention	Matières en suspension (tonne/an)	91	104	174
Montérégie Est	Phosphore total (kg/an)	427	429	459
	Phosphore biodisponible (kg/an)	237	260	347
Walbridge Témoin	Matières en suspension (tonne/an)	271	266	282
Montérégie Est	Phosphore total (kg/an)	678	748	582
	Phosphore biodisponible (kg/an)	342	414	375
Laguerre Intervention	Matières en suspension (tonne/an)	48	99	83
Montérégie Ouest	Phosphore total (kg/an)	449	535	508
	Phosphore biodisponible (kg/an)	296	327	389
Laguerre Témoin	Matières en suspension (tonne/an)	42	132	20
Montérégie Ouest	Phosphore total (kg/an)	150	310	153
	Phosphore biodisponible (kg/an)	63	130	114
Fourchette Intervention	Matières en suspension (tonne/an)	78	105	57
Beauce	Phosphore total (kg/an)	371	473	416
	Phosphore biodisponible (kg/an)	239	301	241
Fourchette Témoin	Matières en suspension (tonne/an)	163	203	90
Beauce	Phosphore total (kg/an)	451	541	313
	Phosphore biodisponible (kg/an)	232	269	179

Les prédictions estimées par l’ODEP pour les 579 parcelles composant les bassins versants expérimentaux ont par ailleurs permis l’identification de valeurs de référence servant à l’interprétation des rapports produits par l’utilitaire informatique à l’échelle de la parcelle. Les valeurs références de la vulnérabilité « Modérée » ou « Élevée » pour un paramètre donné représentent respectivement le 75^e et le 90^e percentile de la distribution des estimations de l’ODEP associées à l’ensemble des parcelles composant les six bassins versants expérimentaux. Lors de l’édition de rapports dans l’ODEP, un code de couleur s’affiche automatiquement dans le tableau présentant les résultats de la modélisation. Le tableau 3.9 rapporte les valeurs références pour chacun des paramètres prédits par l’ODEP. Les distributions associées à chacun des neuf paramètres de qualité de l’eau prédits par l’ODEP sont par ailleurs illustrées en annexe 7.

Tableau 3.9 Valeurs de référence et critères d'interprétation associés aux prédictions d'exportation nette de sédiments et de phosphore de l'ODEP.

	Vulnérabilité modérée	Vulnérabilité élevée
Sédiment (kg/ha/an) ¹	900 - 1300	> 1300
P particulaire du ruissellement (g/ha/an) ¹	1000 - 1400	> 1400
P soluble du ruissellement (g/ha/an) ²	300 - 450	> 450
P particulaire du souterrain (g/ha/an) ¹	600 - 750	> 750
P soluble du souterrain (g/ha/an) ²	150 - 200	> 200
P particulaire fertilisation (g/ha/an) ²	20 - 50	> 50
P soluble fertilisation (g/ha/an) ²	200 - 500	> 500
P total (g/ha/an) ¹	2000 - 2500	> 2500
P biodisponible (g/ha/an) ¹	1500 - 2000	> 2000

¹Percentiles estimés sur l'ensemble des parcelles en culture (N = 579).
²Percentiles estimés sur les parcelles en cultures annuelles (N = 409).

Il est important de noter ici que ces valeurs de référence ne sont fournies qu'à titre indicatif et méritent d'être réévaluées en fonction des problématiques agroenvironnementales spécifiques aux territoires ciblés. Dans un cadre d'actions concertées à l'échelle du bassin versant, la capacité de support du plan d'eau récepteur quant aux apports de phosphore devrait en principe guider l'établissement de charges cibles globales pour le bassin versant et relativiser les pressions exercées par chacun des secteurs d'activités. L'importance relative du secteur agricole par rapport aux autres vocations du territoire, la sensibilité du plan d'eau récepteur, ou les enjeux socioéconomiques liés aux usages de l'eau sont autant de critères, hors du champ d'étude de l'ODEP, appelés à contribuer à l'établissement d'objectifs réalistes de réduction des exportations de phosphore de sources agricoles diffuses. Il est cependant souhaité par les auteurs que l'ODEP s'inscrive dans une réalisation proactive de cet important processus de concertation régionale par l'apport de bases de connaissance spécifiques à la problématique agroenvironnementale québécoise, propres à soutenir un débat fertile menant à des solutions d'avenir.

RÉFÉRENCES

- Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah et J.R. Williams. 1998. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I, Model development. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 34 (1): 73-89.
- Beauchemin, S., R.R. Simard et D. Cluis. 1998. Forms and concentration of phosphorus in drainage water of twenty-seven tile-drained soils. *J. Environ. Qual.*, 27: 721-728.
- Cook, D.J., N.T. Dickinson et R.P. Rudra. 1985. GAMES : Guelph model for evaluating the effects of agricultural management systems on erosion and sedimentation- User's manual. School of Engineering, University of Guelph. Technical report 126-171. Guelph, Ontario.
- CPVQ (Conseil des productions végétales du Québec). 2000. Guide des pratiques de conservation en grandes cultures. Réalisé en partenariat avec l'Entente auxiliaire Canada-Québec pour un environnement durable en agriculture, le CPVQ, la FPCCQ, le MAPAQ, le MENV et AAC. Document de 7 modules et 34 feuillets. 500 pages.
- Deslandes, J., I. Beaudin, A.R. Michaud, F. Bonn et C.A. Madramootoo. 2007. Influence of landscape and cropping system on phosphorus mobility within the Pike River watershed of southwestern Quebec. *Can. Water Res. J.*, 32(1): 21-42.
- Deslandes, J. et A.R. Michaud. 2007. Rapport d'étape du projet de Gestion raisonnée et intégrée des sols et de l'eau (GRISE), Projet no. 6062 financé par le CDAQ, 29 p.
- Deslandes, J., A.R. 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*, 13 (2) : 111-123.
- 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. Dans: R.A. Cooke (ed.). *Drainage VIII – Proceedings of the Eight international drainage symposium*. Published by ASAS –St. Joseph, MI, USA.
- Environnement Canada. 2005. Données climatiques en ligne. Consulté en ligne en 2008 : http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/canada_f.html.
- EPA (Environmental Protection Agency). 1996. Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods. Method 3050. Publication SW-846, US-EPA, États-Unis. Disponible en ligne : <http://www.epa.gov/sw-846/main.htm>.
- Giroux, M., M. Duchemin, A.R. Michaud, I. Beaudin, C. Landry, P. Enright, C.A. Madramootoo et M.R. Laverdière. 2008. Relation entre les concentrations en

phosphore particulaire et dissous dans les eaux de ruissellement et les teneurs en P total et assimilable des sols pour différentes cultures. Agrosolutions, 19(1) :4-14.

- Giroux, M. et R. Royer. 2006a. Influence des modes de fertilisation sur les pertes d'éléments nutritifs dans les drains agricoles sous prairies et orge grainée. Cahier No 5 de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec, Québec, Canada. 57 p.
- Giroux, M. et R. Royer. 2006b. Influence des modes de fertilisation sur les pertes d'éléments nutritifs dans les drains agricoles sous le maïs-grain, l'orge et le canola. Cahier No 6 de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA) Québec, Québec, Canada. 84 p.
- Gollamudi, A., C.A. Madramootoo et P. Enright. 2007. Water quality modeling of two agricultural fields in southern Quebec using SWAT. Transactions of the ASABE, 50(6) : 1973-1980.
- Hogg, W.D. et D.A. Carr. 1985. Rainfall frequency atlas for Canada - Atlas de la fréquence des pluies au Canada. Programme climatologique canadien, Ministre des approvisionnements et Services Canada, Ottawa, Canada.
- Horton, R.E. 1935. Surface runoff phenomena, Part I, Analysis of the hydrograph. Horton hydrologic laboratory, Publication 101. Edward Bros : Ann Arbor, MI, États-Unis.
- Jamieson, A., C.A. Madramootoo et P. Enright. 2003. Phosphorus losses in surface and subsurface runoff from a snowmelt event on an agricultural field in Quebec. Canadian Biosystems Engineering, 45:1.1-1.7.
- Lamontagne, L. et M. Nolin. 2006. Base de données électroniques des profils pédologiques (physico-chimique) de référence des sols du Québec. Laboratoires de pédologie et agriculture de précision, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec, Canada.
- Lamontagne, L. et M.C. Nolin. 1997. Dossier des noms de sol du Québec. Équipe pédologique du Québec 1997. Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Sainte-Foy, Québec, Bulletin d'extension # 8 : 59 pages.
- Logiag. 2008. Le réseau Logiag. Consulté en ligne en 2008 : <http://www.logiag.com/>
- Mallarino, A.P., B.M. Stewart, J.L. Baker, J.A. Downing et J.E. Sayer. 2005. Background and basic concepts of the Iowa phosphorus index. A support document of the USDA-NRCS field Office technical note 25. États-Unis. 11 p.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich-III soil test extractant: A modification of Mehlich-II extractant. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 15:1409-1416.

- Michaud, A.R. 2004. 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, FSAA, Québec, 151 p.
<http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/files/82800fca-fe39-4eb8-94e1-23690472e20b/22180.html>
- Michaud, A.R., I. Beaudin, J. Deslandes, F. Bonn et C.A. Madramootoo. 2007. SWAT-predicted influence of different landscape and cropping systems alterations on phosphorus mobility within the Pike River watershed of South-western Quebec. *Canadian Journal of Soil Science* 87(3) 329-344.
- Michaud, A.R., J. Deslandes et J. Desjardins. 2004. Rapport final, phases I (calibrage) et II (aménagement) « 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.R., J. Deslandes, J. Desjardins et M. Grenier. 2009. Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles. Rapport final de projet. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). Québec, Québec, 155 p.
- Michaud, A.R., M. Giroux, C. Landry, J. Deslandes, I. Beaudin et R. Lauzier. 2008. Prévention des transferts diffus de phosphore en bassins versants agricoles : Perspectives québécoises et nord-américaines. Dans : *Le phosphore dans l'environnement : bilan des connaissances sur les impacts, les transferts et la gestion environnementale du phosphore*. Océanis. Soumis.
- Michaud, A.R., R. Lauzier et M.R. Laverdière. 2002. Description du système de transfert du phosphore dans le bassin-versant du ruisseau au Castor. *Agrosol* 13(2): 124-39.
- Michaud, A.R. et M.R. Laverdière. 2004. Cropping, soil type and manure application effects on phosphorus export and bioavailability. *Can. J. Soil Sci.*, 84:295-305.
- NRCS-IOWA. 2004. Iowa technical Note no. 25. Iowa Phosphorus index. Natural Resources Conservation Service, Des Moines, Iowa, États-Unis. 32 p.
- Renard, K. K., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool et D. C. Yoder. 1996. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). *Agriculture Handbook, Number 703*, U.S. Department of Agriculture, États-Unis.
- Ressources naturelles Canada. 2004. Atlas national du Canada, 4^e édition, 1974. "Écoulement 1973." Consulté en ligne en 2008:
http://atlas.nrcan.gc.ca/site/francais/maps/archives/4thedition/environment/water/019_20.
- Rivest, R. et P. Leduc. 1997. Évaluation du risque de pollution diffuse associée au phosphore des sols classés excessivement riches. Programme d'aide aux entreprises

- agroalimentaires. Rapport Société d'agriculture de Saint-Hyacinthe et MAPAQ. 59 p.
- Rochette, P. 1988. Contributions au zonage agroclimatique du Québec méridional. Thèse de doctorat, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, Canada.
- Sharpley, A.N., W. Troeger et S.J. Smith. 1991. The measurement of bioavailable phosphorus in agriculture runoff. *J. Environ Quality*, 20 :235-238.
- Siga Informatique. 2008. SigaChamp Windows. Consultation en ligne <http://www.siga.qc.ca/>
- Simard, R. R., D. Cluis, G. Gangbazo et S. Beauchemin. 1995. Phosphorus status of forest and agricultural soils from a watershed of high animal density. *J. Environ. Qual.*, 13 : 211-215.
- Stampfli, N., R. Beaulieu, I. Breune, M. Guillou. 2007. Évaluation des débits de pointe pour les petits bassins versants agricoles du Québec. Fiche technique produite en partenariat entre Agriculture et Agroalimentaire Canada et le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec, 6 p. www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Evaluation%20des%20debits%20de%20pointe_AAC2007.pdf
- Tabi, M., L. Tardif, D. Carrier, G. Laflamme et M. Rompré. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Rapport synthèse. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec, Canada. 70 p.
- USDA-NRCS. 2007. National engineering handbook, part 630 Hydrology, chapter 7 Hydrologic soil groups. USDA-Naturel Ressources Conservation Service. 2007. Site Internet : http://policy.nrcs.usda.gov/media/pdf/H_210_630_7.pdf
- Vadas, P.A., P.J.A. Kleinman, A.N. Sharpley et B.L. Turner. 2005. Relating soil phosphorus to dissolved phosphorus in runoff. *J. Environ. Qual.*, 34 :572-580.
- Wall, G.J., D.R. Coote, E.A. Pringle et I.J. Shelton (editors). 2002. RUSLE-CAN - Équation universelle révisée des pertes de sol pour application au Canada : Manuel pour l'évaluation des pertes de sols causées par l'érosion hydrique au Canada. Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, No de contribution 02-91, 117 p.
- Williams, J.R. 1975. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. Dans : Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources. Proceedings of the sediment-yield workshop. 28-30 novembre 1972. ARS-S-40, USDA Sedimentation Lab., Oxford, MS, États-Unis.

Wischmeier, W.H. et D.D. Smith. 1961. A universal equation for predicting rainfall-erosion losses – An aid to conservation farming in humid regions. ARS Special Report. U.S. Dept. of Agric., Agr. Res. Serv., États-Unis, p. 22-66.

Wischmeier, W.H. et D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No 537, 58 p.

Annexe 1. Données requises lors de la création de scénarios dans l'ODEP.

Tableau A1.1 Données requises lors de la création de scénarios dans l'ODEP.

Données	Description
Scénario no	Numéro du scénario
Champs	Numéro du champ
Zone no	Numéro de la zone (maximum 3 zones)
Culture	Type de culture : céréales (CER), soya (SOYA), maïs grain (MsG), maïs-ensilage (MsE), prairie à moins de 40 % de légumineuses (Pr), prairie à plus de 40 % de légumineuses (LUZ), maraîchage (LEG)
Antécédent culture	Type de culture qui précédait la culture en place (mêmes types de culture)
Travail du sol	Type de travail du sol : labour à l'automne + travail secondaire au printemps (1), chisel ou pulvériseur à l'automne + travail secondaire au printemps (2), déchaumage au printemps + travail second. au printemps (3) et semis-direct ou billons (4)
Couverture associée	Présence ou non de culture de couverture associée
Couverture dérobée	Présence ou non de culture de couverture à la dérobée
Minéraux P rang	Apport de P minéral appliqué en bandes (kg P ₂ O ₅ /ha)
Minéraux volée	Apport de P minéral appliqué à la volée (kg P ₂ O ₅ /ha)
Fum1 P dose	Apport d'engrais de ferme (dose 1) (kg P ₂ O ₅ /ha)
Fum1 P période	Période d'épandage de la dose 1 : pré-semis (1), post-levée (2), automne hâtif (3) et automne tardif (4)
Fum1 P délai	Délai d'incorporation de la dose 1 : inférieur à 48 heures (1), de 48 heures à 1 semaine (2), supérieur à 1 semaine (3) et non incorporé (4)
Fum2 P dose	Apport d'engrais de ferme (dose 2) (kg P ₂ O ₅ /ha)
Fum2 P période	Période d'épandage de la dose 2 : pré-semis (1), post-levée (2), automne hâtif (3) et automne tardif (4)
Fum2 P délai	Délai d'incorporation de la dose 2 : inférieur à 48 heures (1), de 48 heures à 1 semaine (2), supérieur à 1 semaine (3) et non incorporé (4)
Fum3 P dose	Apport d'engrais de ferme (dose 3) (kg P ₂ O ₅ /ha)
Fum3 P période	Période d'épandage de la dose 3 : pré-semis (1), post-levée (2), automne hâtif (3) et automne tardif (4)
Fum3 P délai	Délai d'incorporation de la dose 3 : inférieur à 48 heures (1), de 48 heures à 1 semaine (2), supérieur à 1 semaine (3) et non incorporé (4)
P Mehlich	Contenu en P Mehlich-3 de la couche arable (mg/kg)
% sat P/Al	Pourcentage de saturation P/Al Mehlich-3 (%)
Bande riveraine	Présence et largeur de la bande riveraine : ne s'applique pas (1), moins de un mètre (2), de un à trois mètres (3) et plus de trois mètres (4)
Avaloir	Présence de structures de contrôle du ruissellement (avaloirs) : absente (1), captage partiel (2) et captage total (3)
Drainage souterrain	Présence de drainage souterrain : systématique (1), partiel (2) et absent (3)
Écoulement de surface	État du drainage de surface : bon (1), moyen (2) et déficient (3)
Condition hydro	Condition hydrologique du profil cultural : bonne (1), présence de zones à risque (2) et dominance de zones à risque (3)
Pente	Pente de la parcelle (%)
Longueur parcours	Longueur du parcours de l'eau (m)
Sable %	Contenu en sable de la couche arable (%)
Argile %	Contenu en argile de la couche arable (%)
Gr_hydro	Groupe hydrologique du sol non drainé (3, 5, 7 ou 9)
MO	Contenu en matière organique de la couche arable (%)
Ptot naturel	Contenu en P total naturel du sol (mg/kg)

Annexe 2. Régions agroclimatiques de l'ODEP.

Tableau A2.1 Les régions agroclimatiques de l'ODEP et leurs facteurs de pondération de la lame d'eau et du ruissellement annuel.

Liste des régions agroclimatiques de l'ODEP			
Région	Description de la région	Facteur de pondération de la lame d'eau annuelle	Facteur de pondération du ruissellement annuel
1.1	Bas Saint-Laurent - Est	0,98	1,43
1.2	Bas Saint-Laurent - Ouest	0,96	1,45
2	Saguenay - Lac Saint-Jean	0,86	1,34
3.1	Québec - Portneuf	1,07	1,61
3.2	Québec - Charlevoix à Québec	1,1	1,9
4.1	Mauricie - Ouest de Trois-Rivières	0,93	1,32
4.2	Mauricie - Saint-Narcisse	0,88	1,36
4.2	Mauricie - Est de Trois-Rivières	1,15	1,62
5.1	Estrie - Coaticook	1,07	1,16
5.2	Estrie - Est de Sherbrooke	1,15	1,3
6	Montréal	0,9	1,05
7	Outaouais	1,1	1,35
8.1	Abitibi - Témiscamisque	0,86	1,25
8.2	Abitibi - Val d'or	0,82	1,39
9	Côte Nord	1,14	1,58
10	Nord du Québec	0,86	1,25
11.1	Gaspésie - Baie des Chaleurs	1,01	1,77
11.2	Gaspésie - Nord	1,29	1,78
12.1	Chaudière - Appalaches - Nord	1,29	1,58
12.2	Beauce - Sud	1,23	1,37
13	Laval	0,83	1,09
14	Lanaudière	0,91	1,12
15.1	Laurentides - Basses	1,1	1,33
15.2	Laurentides - Hautes	1,02	1,24
16	Montérégie - Est	1	1
17	Centre du Québec	1,09	1,31
18	Montérégie - Ouest	0,83	0,81

Annexe 3. Informations contenues dans la base de données hydro pédologiques de l'ODEP.

Tableau A3.1 Informations contenues dans la base de données hydro pédologiques de l'ODEP.

Nom de la donnée	Définition
app_carto	Appellation cartographique. Fait le lien avec les polygones des cartes de sol
Nom_long	Nom du sol
SOL1	Appellation cartographique. Fait le lien avec les polygones des cartes de sol
Cansis_1	Code de sol du système canadien de classification des sols
region	Région administrative du Québec (1 à 18)
TEXT	Texture du sol
ATOT	Pourcentage d'argile (%)
LTOT	Pourcentage de limon (%)
STOT	Pourcentage de sable (%)
MATORG	Pourcentage de matière organique (%)
STFs	Pourcentage d'argile (%)
PERMs	Perméabilité du sol (code de 1 à 5)
STRUCTURE	Code de structure du sol (code 1 à 4)
CANSTEX	Code de sol du système canadien de classification des sols et texture du sol
GR_HYDROs	Groupe hydrologique du sol non drainé (code de 1 à 9)
PNATUREL	Teneur en phosphore naturel (mg/kg)

Les informations contenues dans la base de données hydro pédologiques servent principalement à identifier chacun des sols d'une entreprise agricole à un groupe hydrologique et à calculer l'érodabilité. Le groupe hydrologique, la présence de drainage souterrain, la condition du drainage de surface ainsi que la condition du profil cultural entrent dans le calcul de la hauteur de ruissellement exporté. L'ODEP utilise neuf groupes hydrologiques, numérotés de 1 à 9. Certains de ces groupes correspondent aux groupes hydrologiques du USDA-NRCS (2007) (Tableau A3.2).

Tableau A3.2 Correspondance entre les groupes hydriques de l'ODEP et ceux du USDA-NRCS.

ODEP	Classe USDA	DÉFINITION
1	A drainé souterrainement	
2		
3	A non drainé B drainé souterrainement	Groupe A : Les sols de ce groupe ont un faible potentiel de ruissellement lorsqu'ils sont complètement humides. L'eau circule librement à travers le sol. Typiquement, les sols du groupe A ont moins de 10 % d'argile et plus de 90 % de sable ou de fragments grossiers et ont des textures sableuse ou graveleuse. Certains sols à texture de sable loameux, loam sableux, loam ou loam limoneux peuvent être placés dans ce groupe s'ils sont bien structurés, avec une faible densité apparente, ou s'ils contiennent plus de 35 % de fragments grossiers.

Les limites des caractéristiques physiques sont les suivantes.
Les sols ayant une épaisseur de plus de 100 cm avant une couche imperméable sont dans le groupe A si la conductivité hydraulique

ODEP	Classe USDA	DÉFINITION
		<p>saturée de toutes les couches de sol à l'intérieur de ce 100 cm à partir de la surface excède 3,6 cm/h. Aussi, la nappe est à plus de 100 cm.</p> <p>Les sols sont également classés dans le groupe A si la profondeur de toutes les couches imperméables est supérieure à 50 cm mais inférieure à 100 cm et que la conductivité hydraulique saturée de toutes les couches entre la surface et 100 cm excède 14,4 cm/h. Également, la profondeur de la nappe est supérieure à 60 cm.</p>
4 5	B non drainé C drainé souterrainement	<p>Groupe B : Les sols de ce groupe ont un potentiel de ruissellement modérément faible quand ils sont complètement humides. La circulation de l'eau à travers le sol n'est pas entravée. Typiquement, les sols du groupe B ont entre 10 et 20 % d'argile et entre 50 et 90 % de sable et ont des textures de sable loameux ou de loam sableux. Certains sols avec des textures de loam, de loam limoneux, de limon ou de loam sablo-argileux peuvent être placés dans ce groupe s'ils sont bien structurés, avec une faible densité apparente, ou s'ils contiennent plus de 35 % de fragments grossiers.</p> <p>Les limites des caractéristiques physiques sont les suivantes : Les sols ayant une épaisseur de plus de 100 cm avant une couche imperméable sont dans le groupe B si la conductivité hydraulique saturée de toutes les couches de sol à l'intérieur de ce 100 cm à partir de la surface excède 1,44 cm/h mais est inférieure à 3,6 cm/h. Également, la profondeur de la nappe est supérieure à 100 cm;</p> <p>Les sols sont également classés dans le groupe B si la profondeur de toute couche imperméable est supérieure à 50 cm mais inférieure à 100 cm et que la conductivité hydraulique saturée de la couche la moins perméable entre la surface et 100 cm de profondeur est comprise entre 3,6 et 14,4 cm/h. La profondeur de la nappe est supérieure à 60 cm.</p>
6 7	C non drainé D drainé souterrainement	<p>Groupe C : Les sols de ce groupe ont un potentiel de ruissellement modérément élevé quand ils sont complètement humides. La circulation de l'eau à travers le sol est quelque peu restreinte. Typiquement, les sols du groupe C ont entre 20 et 40 % d'argile et moins de 50 % de sable et ont des textures de loam, de loam limoneux, de loam sablo-argileux, de loam argileux et de loam limono-argileux. Certains sols avec des textures d'argile, d'argile limoneuse et d'argile sableuse peuvent être placés dans ce groupe s'ils sont bien structurés, avec une faible densité apparente, ou s'ils contiennent plus de 35 % de fragments grossiers.</p> <p>Les limites des caractéristiques physiques sont les suivantes : Les sols, ayant une épaisseur de plus de 100 cm avant une couche imperméable sont dans le groupe C si la conductivité hydraulique saturée de toutes les couches de sol à l'intérieur de ce 100 cm à partir de la surface excède 0,144 cm/h mais est inférieure à 1,44 cm/h. Également, la profondeur de la nappe est supérieure à 100 cm;</p> <p>Les sols sont également classés dans le groupe C si la profondeur de toute couche imperméable est supérieure à 50 cm mais inférieure à 100 cm et que la conductivité hydraulique saturée de la couche la moins perméable entre la surface et 100 cm de profondeur est</p>

ODEP	Classe USDA	DÉFINITION
8	D non drainé	comprise entre 0,36 et 3,6 cm/h . La profondeur de la nappe est supérieure à 60 cm.
9	D non drainé	<p>Groupe D : Les sols de ce groupe ont un potentiel de ruissellement élevé quand ils sont complètement humides. La circulation de l'eau à travers le sol est restreinte ou très restreinte. Typiquement, les sols du groupe D ont plus de 40 % d'argile, moins de 50 % de sable et ont des textures argileuses. Dans quelques régions, ils ont aussi un potentiel élevé de retrait-gonflement.</p> <p>Les limites des caractéristiques physiques sont les suivantes : Tous les sols avec une couche imperméable située à moins de 50 cm de profondeur et tous les sols avec une nappe située à moins de 60 cm de profondeur sont dans ce groupe, bien que certains peuvent avoir une classification double (voir prochaine section) s'ils sont drainés adéquatement;</p> <p>Les sols ayant une épaisseur de plus de 100 cm avant une couche restrictive sont dans le groupe D si la conductivité hydraulique saturée de toutes les couches de sol à l'intérieur de ce 100 cm à partir de la surface est inférieure ou égale à 0,144 cm/h. Également, la profondeur de la nappe est supérieure à 100 cm;</p> <p>Les sols sont également classés dans le groupe D si la profondeur de toute couche imperméable est supérieure à 50 cm mais inférieure à 100 cm et si la conductivité hydraulique saturée de la couche la moins perméable entre la surface et 100 cm de profondeur est égale ou inférieure à 0,36 cm/h.</p> <p>Groupe hydrique de sol double : Certains sols humides sont classés dans le groupe D uniquement à cause de la présence d'une nappe à l'intérieur des 60 premiers cm de la surface même si la conductivité hydraulique saturée peut être favorable à la transmission de l'eau. Si ces sols peuvent être adéquatement drainés, alors ils peuvent être assignés à un groupe hydrique de sol double (A/D, B/D ou C/D) en se basant sur leur conductivité hydraulique saturée et la profondeur de la nappe une fois drainés. La première lettre s'applique au sol drainé tandis que la deuxième lettre s'applique au sol non drainé. Pour l'usage des groupes hydriques de sol, un drainage adéquat signifie que la hauteur de la nappe saisonnière est gardée à au moins 60 cm sous la surface du sol alors qu'elle peut être plus haute dans des conditions naturelles.</p>

Annexe 4. Variation du ruissellement en fonction des groupes hydrologiques pour quatre classes de culture.

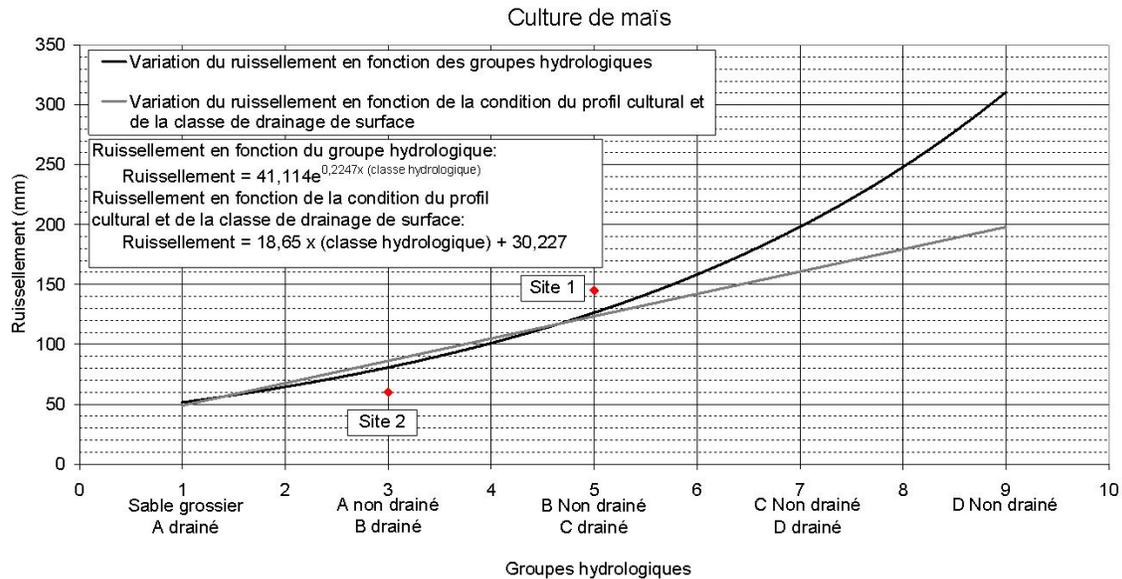


Figure A4.1 Variation du ruissellement en fonction des groupes hydrologiques pour la culture du maïs.

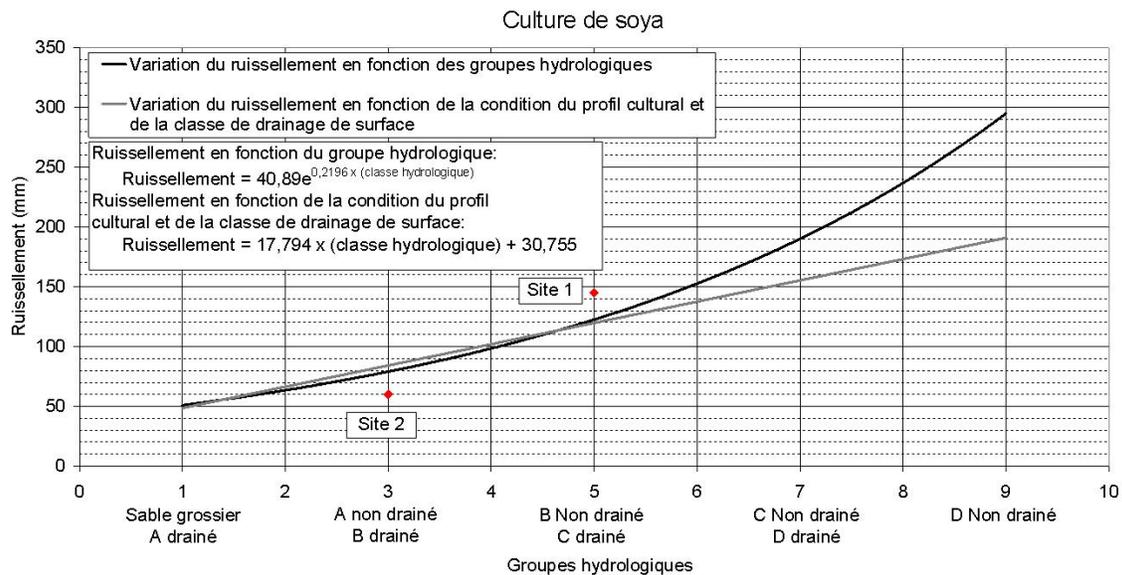


Figure A4.2 Variation du ruissellement en fonction des groupes hydrologiques pour la culture du soya.

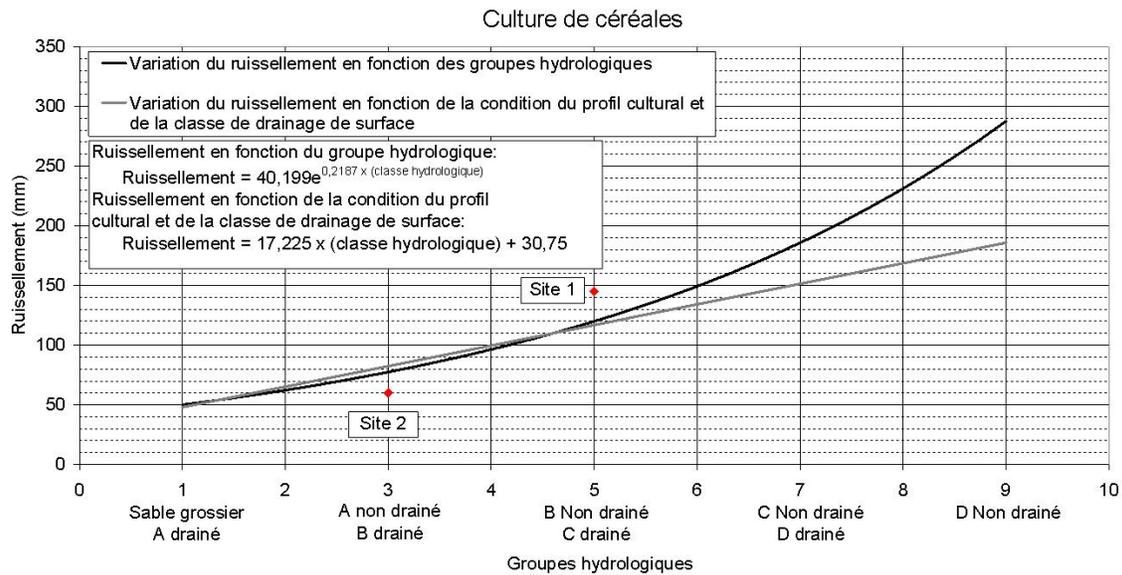


Figure A4.3 Variation du ruissellement en fonction des groupes hydrologiques pour la culture de céréales.

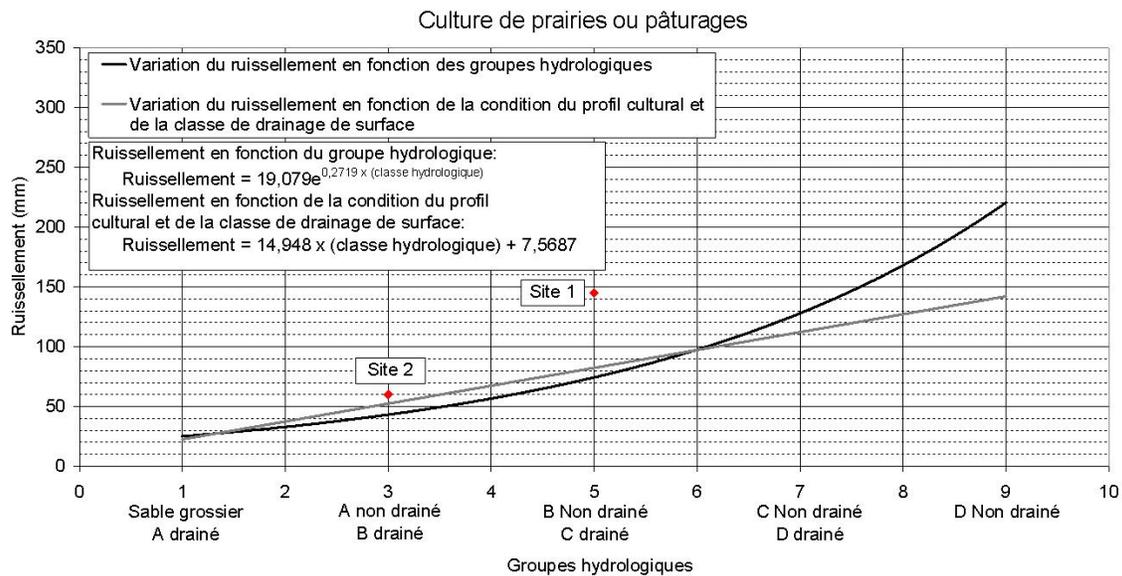


Figure A4.4 Variation du ruissellement en fonction des groupes hydrologiques pour la culture de prairies ou pâturages.

Annexe 5. Ajustement du modèle de prédiction des exportations nettes de sédiments

Cette annexe présente les ajustements du modèle de prédiction des exportations nettes de sédiments pour les cultures de maïs grain, soya, céréales, prairie/pâturages et culture de couverture à partir du ruissellement et des exportations de sédiments prédits ainsi que des valeurs des facteurs K, LS et C. Les données sont tirées du bassin versant expérimental du ruisseau Walbridge, en Montérégie, pour la période de novembre 2001 à mai 2003.

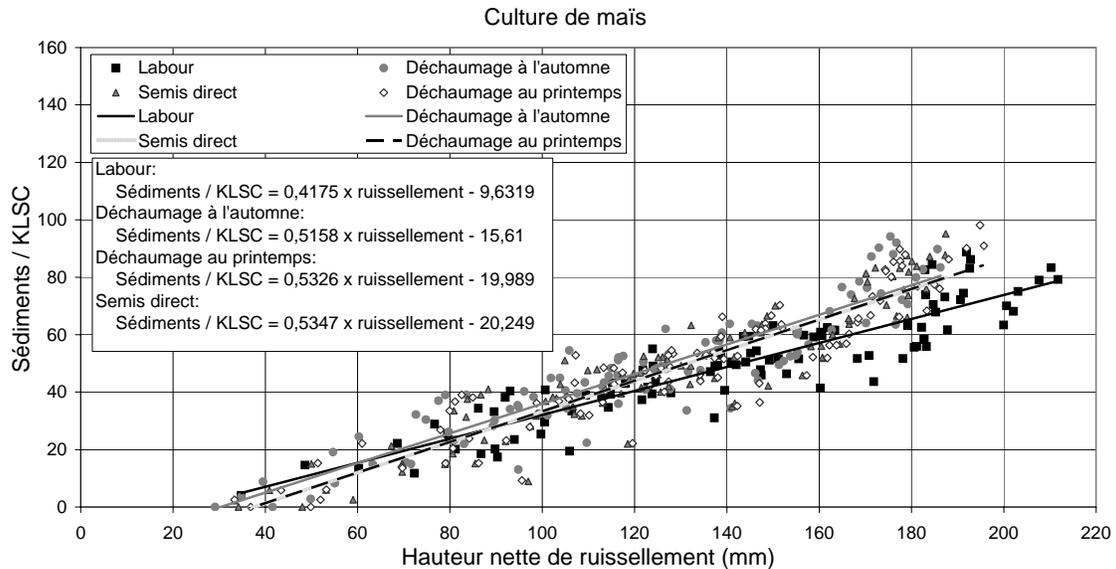


Figure A5.1 Ajustement du modèle de prédiction des exportations nettes de sédiments pour la culture du maïs.

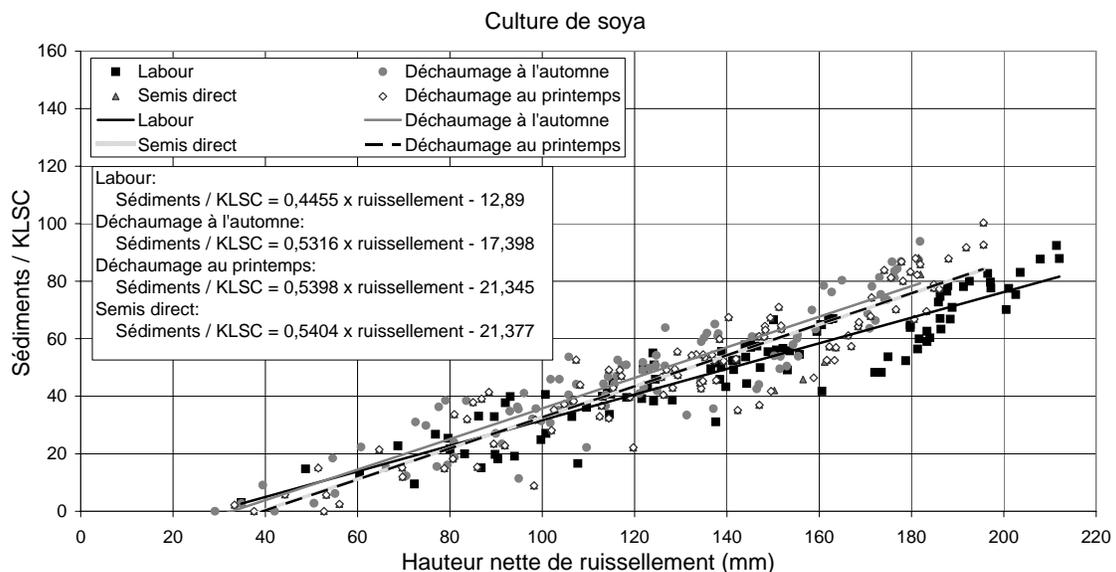


Figure A5.2 Ajustement du modèle de prédiction des exportations nettes de sédiments pour la culture de soya.

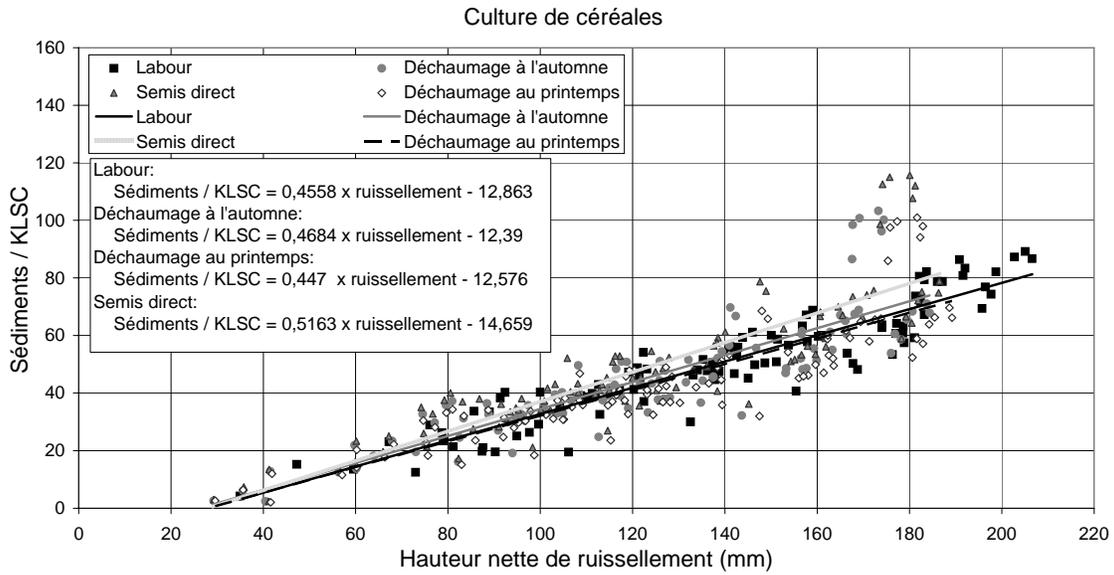


Figure A5.3 Ajustement du modèle de prédiction des exportations nettes de sédiments pour la culture de céréales.

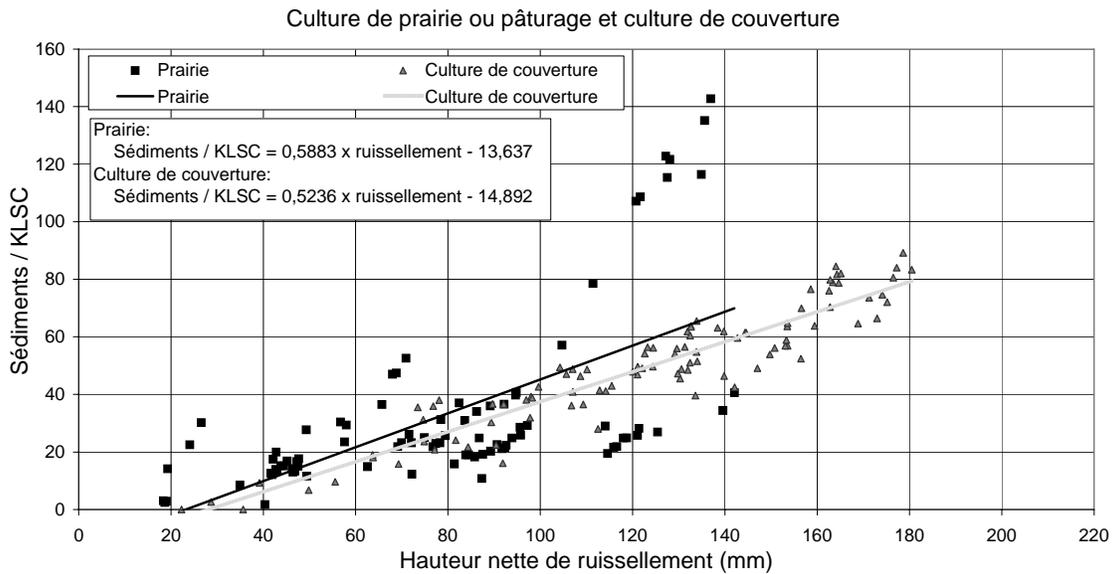


Figure A5.4 Ajustement du modèle de prédiction des exportations nettes de sédiments pour la culture de prairie ou pâturage et culture de couverture.

Annexe 6. Protocoles de dosage des différentes fractions du phosphore, colligées dans le cadre des dispositifs expérimentaux et utilisées dans le développement de l'ODEP

Les prédictions des exportations de P du module de l'ODEP sont fondées en large partie sur des observations expérimentales dont les déterminations analytiques ont toutes été réalisées au laboratoire de physico-chimie de l'IRDA. La présente annexe décrit sommairement les protocoles de dosage appliqués à ces échantillons d'eau de ruissellement ou de drainage et rapportés selon les composantes suivantes :

- Le **phosphore total** rassemble toutes les formes de phosphore particulaire et dissous présent dans les échantillons d'eau;
- Le **phosphore particulaire** est présent dans les matières en suspension (MES), sous une forme non soluble;
- Le **phosphore total dissous** est le phosphore soluble présent dans l'eau sous forme organique et minérale;
- Le **phosphore réactif dissous** se retrouve sous forme d'orthophosphate soluble;
- Le **phosphore organique dissous** est la fraction du phosphore dissous présent dans la matière organique soluble. Cette fraction n'est pas déterminée dans l'ODEP;
- Le **phosphore biodisponible** est la fraction du phosphore immédiatement disponible pour la croissance des végétaux dans le milieu aquatique. Cette fraction correspond au phosphore réactif dissous plus la fraction biodisponible du P particulaire.

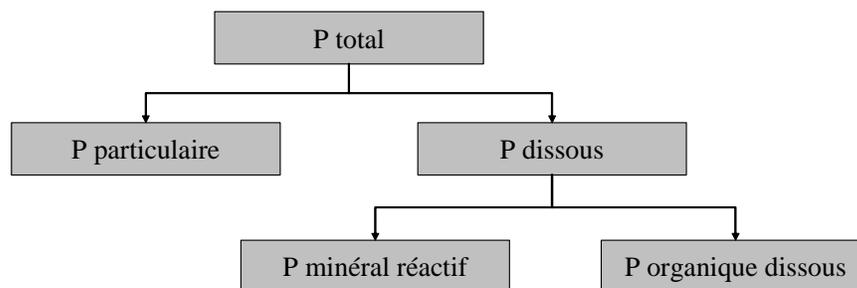


Figure A6.1 Diagramme représentant les fractions de phosphore dans les eaux de ruissellement de surface et dans les eaux des drains souterrains.

La concentration en P total des eaux de ruissellement, incluant les formes de P particulaire et dissous, est déterminée dans les échantillons d'eau non filtrée par digestion

au persulfate de potassium en milieu acide à l'autoclave à 121 °C pendant 35 minutes dans le but de transformer les formes organiques et minérales du P en orthophosphates. Le digestat est ensuite dosé par colorimétrie automatisée sur Technicon AAII par la méthode au molybdate d'ammonium avec l'acide ascorbique comme agent réducteur.

La détermination du P total dissous est effectuée dans le surnageant centrifugé à 1000 tours min⁻¹ pendant 10 minutes. L'échantillon a subi une digestion par ultraviolet (UV) en milieu acide, ce qui permet de transformer les formes de P organique dissous en orthophosphates. Le dosage se fait par colorimétrie et inclut le P réactif dissous de même que le P organique dissous. Le P réactif dissous est déterminé par colorimétrie dans le surnageant centrifugé, sans traitement UV préalable. La différence entre le P total dissous et le P réactif dissous donne le P organique dissous et la différence entre le P total et le P total dissous donne le P particulaire. La concentration en P particulaire dans l'eau (mg P/L) est rapportée à la concentration en MES (kg/L) de façon à déterminer la teneur en P particulaire (mg/kg) des sédiments.

$$P \text{ particulaire (mg kg}^{-1}\text{)} = P \text{ particulaire (mg L}^{-1}\text{)} / \text{MES (kg L}^{-1}\text{)}$$

Le P biodisponible (P_{bio}) est extrait dans une aliquote d'eau non filtrée de 3 ml avec 27 ml d'une solution de NaOH 0,11N et agitée horizontalement pendant 17 heures (Sharpley et coll., 1991). L'agitation a été suivie d'une centrifugation à 10 000 tours min⁻¹ sur centrifugeuse IEC pendant 5 minutes. Le surnageant a été dosé par colorimétrie. Le P_{bio} représente la fraction immédiatement disponible pour la croissance des algues dans un milieu aquatique. Pour déterminer la proportion relative du P particulaire qui est biodisponible, la procédure de calcul, décrite par Michaud et Laverdière (2004), est utilisée. Elle consiste à déterminer le pourcentage de biodisponibilité du P particulaire (BioPP) dans l'eau par l'équation suivante :

$$\text{BioPP (\%)} = (\text{P}_{\text{bio}} - \text{P réactif dissous}) / \text{P}_{\text{particulaire}} \times 100$$

Annexe 7. Distribution des paramètres de qualité de l'eau prédits par l'ODEP

Cette annexe présente la distribution des paramètres de qualité de l'eau prédits par l'ODEP pour le parcellaire des trois paires de bassins versants jumeaux du Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles des régions agricoles de la Montérégie Est (ruisseau Walbridge), de la Montérégie Ouest (rivière La Guerre) et de la Beauce (ruisseau Fourchette).

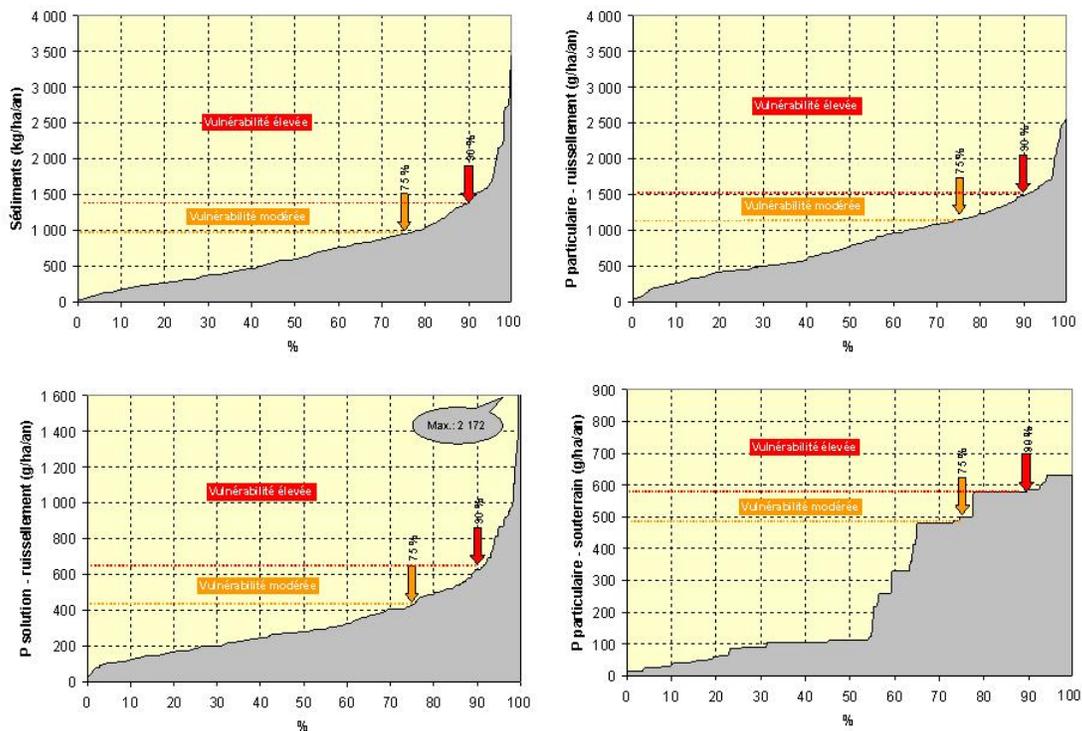


Figure A7.1 Distribution des paramètres de qualité de l'eau prédits par l'ODEP pour le parcellaire de trois paires de bassins versants jumeaux (Walbridge, La Guerre, Fourchette).

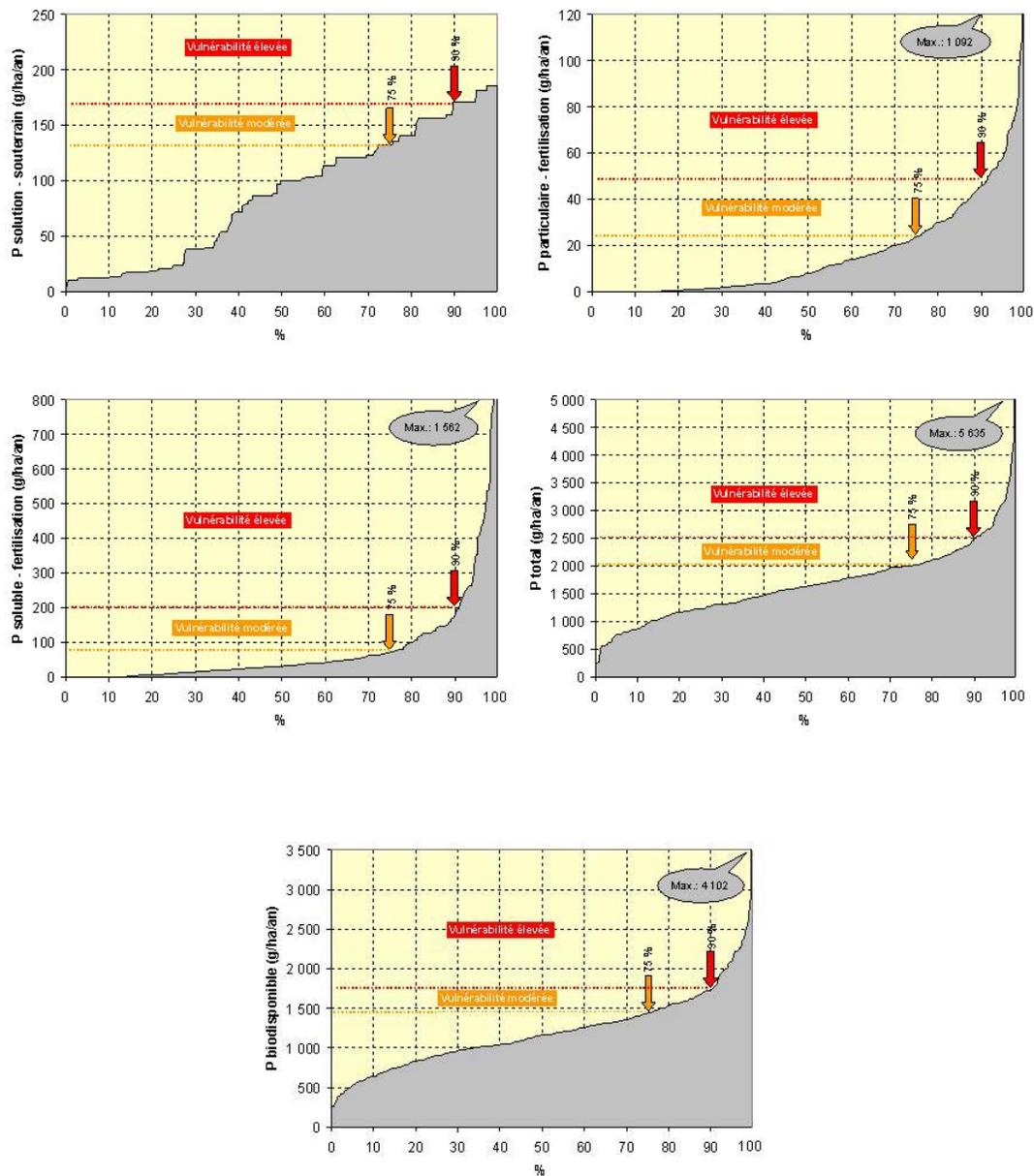


Figure A7.1 (suite) Distribution des paramètres de qualité de l'eau prédits par l'ODEP pour le parcellaire de trois paires de bassins versants jumeaux (Walbridge, La Guerre, Fourchette).