

L'ÉROSION DES SOLS AGRICOLES EN ESTRIE, CAUSES ET CONSÉQUENCES

par
Joanna M'seffar

Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de l'obtention
du grade de maître en environnement (M.Env.)

CENTRE UNIVERSITAIRE DE FORMATION EN ENVIRONNEMENT UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

Sherbrooke, le 1er décembre 2009

IDENTIFICATION SIGNALÉTIQUE

L'ÉROSION DES SOLS AGRICOLES EN ESTRIE, CAUSES ET CONSÉQUENCES

Joanna M'seffar

Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement de l'Université de Sherbrooke en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Michel Perron

Université de Sherbrooke

décembre 2009

Mots clés : érosion, érosion hydrique, sol, agrégat, ruissellement, pertes de sol, perte d'éléments nutritifs, fertilité, agriculture, solution antiérosive, technique de conservation de sol, eutrophisation des lacs.

L'érosion hydrique est un phénomène naturel, qui, dans la nature, reste en équilibre avec le processus de formation du sol. Même sur les pentes, la présence de la végétation protège efficacement le sol et le risque d'érosion est faible. Cependant, l'agriculture intensive qui a débuté au XIX^{ème} siècle a déstabilisé l'équilibre naturel des écosystèmes. Les pratiques culturales agricoles et la déforestation des grandes surfaces ont enlevé la végétation protectrice et ont entraîné le phénomène *d'érosion accélérée*. L'érosion hydrique nuit à la fertilité des sols agricoles, entraîne les pertes du sol vers les milieux aquatiques causant l'eutrophisation des lacs et réduit, ainsi, le potentiel de production.

La région de l'Estrie ne reste pas à l'abri de l'érosion hydrique. L'érosion se produit particulièrement au printemps, quand le sol est saturé d'eau et la végétation est absente. De plus, les orages violents d'été saturent le sol rapidement et l'énergie des gouttes de pluie occasionne un important ruissellement de la surface et en même temps, l'érosion hydrique.

SOMMAIRE

Dans la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, dans les pays industrialisés, on a procédé à l'intensification de la production agricole. Au Canada et au Québec, plusieurs changements dans les pratiques culturales ont été entrepris. Pour répondre à la croissance de la population et atteindre l'autosuffisance alimentaire, l'utilisation des pesticides et des engrais minéraux s'est accru et les cultures à haut rendement ont été introduites. Des travaux de drainage souterrain et superficiel ont été menés pour augmenter les superficies cultivables, allonger la saison de culture et augmenter les rendements. La taille des champs agricoles a augmenté et les équipements à dimensions de plus en plus grandes ont commencé à être utilisés. Progressivement, la spécialisation de la production agricole a été constatée. L'état et les municipalités ont investi de grandes sommes dans ces changements des pratiques agricoles et ont ensuite enregistré des gains importants.

Toutefois à ce moment-là au Québec, la protection de l'environnement ne se trouvait pas au centre des préoccupations des autorités ni de l'opinion publique. La plupart des changements dans les pratiques agricoles avaient pour but uniquement l'augmentation des rendements et n'étaient pas respectueux de l'environnement. Par conséquent, l'environnement des régions agricoles a subi une dégradation de plus en plus importante. Chaque région est confrontée à plusieurs problèmes environnementaux liés aux activités agricoles. En Estrie, une détérioration de la structure des sols agricoles a été constatée ainsi que la pollution des sols par les pesticides. La surfertilisation a contribué à l'enrichissement des sols et à une augmentation de leur saturation en éléments nutritifs. Les pluies violentes de plus en plus fréquentes, l'augmentation des superficies en cultures annuelles et monocultures, surtout sur les sols légers et sur les terrains en pente ont amplifié le processus d'érosion hydrique. Les conséquences de l'érosion sont graves : les pertes de sol des champs agricoles, la dégradation de leur structure, la perte de la fertilité et une détérioration de la qualité de l'eau. Cette érosion entraîne un déplacement de grandes quantités de sédiments chargés d'éléments nutritifs des champs agricoles vers les rivières et les lacs. Le phosphore constitue une problématique particulière. Amené en trop grande quantité dans les cours d'eau, il cause une eutrophisation des lacs et des rivières.

Aujourd'hui, le secteur agroalimentaire est toujours très important pour l'économie québécoise. Il procure de l'emploi à environ 10 % de la population de la province. Son rôle est de fournir des produits alimentaires de bonne qualité sur le marché.

Les pratiques agricoles du XXI^{ème} siècle doivent assurer un bon niveau de vie aux familles d'agriculteurs et en même temps, minimaliser les impacts néfastes sur l'environnement. Les nouvelles tendances ne constituent pas un retour en arrière, mais elles poussent les agriculteurs à aller de l'avant en leur donnant les outils nécessaires pour continuer leurs activités, de façon à intégrer les nouvelles connaissances acquises.

Le sujet de ce travail s'inscrit dans ce contexte. Son principal objectif est de déterminer les causes et les impacts de l'érosion hydrique en Estrie, ainsi que de présenter des solutions envisageables à cette problématique. Une simulation de perte des différentes formes de phosphore dans un bassin versant à vocation agricole en Estrie fait aussi partie de ce travail. Cette simulation a été effectuée au moyen du logiciel ODEP, développé par l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA).

Plusieurs pratiques agricoles constituent des moyens efficaces pour contrôler le ruissellement de surface et pour diminuer les impacts négatifs de l'érosion hydrique sur l'environnement. Cependant, certains changements de l'approche et des façons de faire des agriculteurs sont nécessaires. Pour un producteur agricole, ce n'est pas un petit changement puisque celui-ci doit changer, parfois radicalement, ses pratiques culturales. Pour que des méthodes respectueuses de l'environnement soient adoptées par les producteurs agricoles, elles doivent être simples, peu coûteuses et adaptables à plusieurs cultures et plusieurs conditions.

L'analyse des solutions de contrôle de l'érosion hydrique effectuée dans ce travail a déterminé sept de ces pratiques : le travail minimal du sol, la culture de couverture, la culture en contre-pente, la rotation des cultures, les résidus des cultures laissés à la surface du sol, la bande riveraine et la révision de la stratégie de fertilisation comme étant

facilement réalisables et universelles. Par contre, la construction de voies d'eau engazonnées et de terrasses ne constitue pas de solutions universelles. Ces méthodes sont chères à réaliser et demandent un suivi et un entretien périodique. Cependant, dans certaines conditions de terrain, elles constituent le seul moyen de pratiquer l'agriculture.

L'application de méthodes culturales qui diminuent les risques d'érosion hydrique a plusieurs effets positifs sur l'environnement. Parmi ces effets, on peut remarquer une amélioration de la qualité du sol, une amélioration de la qualité de l'eau de surface dans les régions agricoles, une augmentation du taux de matière organique dans le sol et par le fait même, une augmentation d'activité biologique. De plus, la fertilité du sol est améliorée et les travaux de nettoyage des cours d'eau se font plus rares. Dans certains cas, l'agriculteur enregistre des économies de carburant, il utilise moins de machinerie agricole et les émissions de gaz à effet de serre en sont dès lors réduites. Tous ces effets positifs sur l'environnement ne peuvent qu'améliorer la qualité de vie des agriculteurs, ainsi que celle de toute la population.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Monsieur Michel Perron d'avoir accepté la charge de suivre la progression de mon travail et de m'avoir encadrée et soutenue. Je lui suis reconnaissante de m'avoir assistée tout au long de ma rédaction grâce à sa solide expérience dans le domaine de l'agriculture au Québec. Malgré son programme chargé et ses déplacements multiples, il a toujours trouvé le temps pour me conseiller et me suggérer les lignes directrices pour mes recherches. Il a été d'une grande aide et inspiration pour moi.

Je souhaite également remercier Monsieur Roberto Toffoli pour la suggestion du sujet de mon essai. Malgré qu'il soit très occupé, il a trouvé le temps pour répondre à mes questionnements. Il m'a également fournie les données nécessaires qui se sont avérées d'une importance majeure pour effectuer les simulations des pertes de phosphore et pour que je puisse mener à bien mon travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à ma famille : mon mari Mehdi et mes enfants : Sofia, Adam et Sara, pour m'avoir supporté moralement et de m'avoir aidé tout au long de mes études à l'Université de Sherbrooke.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
1. MISE EN CONTEXTE DE LA PROBLÈMATIQUE.....	5
1.1 Problématiques environnementales des pertes des éléments nutritifs.....	6
1.2 Modes de transport des éléments nutritifs.....	8
1.2.1 Ruissellement.....	9
1.2.2 Écoulement souterrain.....	10
1.3 Pertes des éléments nutritifs d'origine agricole associées à l'érosion hydrique des champs.....	10
2. SOL.....	13
2.1 Profil du sol.....	13
2.2 Rôle du sol.....	14
2.3 Caractérisation physique du sol.....	16
2.3.1 Texture.....	17
2.3.2 Fraction organique.....	19
2.3.3 Structure.....	20
2.3.4 Rugosité de la surface du sol.....	23
2.4 Fertilité.....	24
2.4.1 Rétention des éléments nutritifs.....	25
2.4.2 Capacité d'échange cationique et saturation du sol.....	27
3. PROBLÈMATIQUE DE L'ÉROSION DES SOLS EN ESTRIE.....	29
3.1 Portrait de l'agriculture en Estrie.....	30
3.2 Types des sols en Estrie et leurs caractéristiques.....	31
3.3 Causes de l'érosion hydrique en Estrie.....	34
3.3.1 Augmentation de la taille des parcelles.....	35
3.3.2 Pluies violentes.....	36
3.3.3 Cultures annuelles et monocultures.....	37
3.3.4 Type du sol.....	38
3.3.5 Profil topographique du terrain.....	39

3.3.6 Cultures dans le sens des pentes	40
3.4 Impacts de l'érosion hydrique	40
3.4.1 Perte des sols- coûts élevés	41
3.4.2 Détérioration de la structure du sol	42
3.4.3 Perte de la fertilité et diminution du rendement.....	43
3.4.4 Détérioration de la qualité de l'eau	44
3.4.5 Phosphore, principal responsable de l'eutrophisation des rivières et des lacs	48
3.5 Estimation des pertes du phosphore dans le bassin versant du ruisseau Cass en Estrie.....	52
3.5.1 Méthodologie	52
3.5.2 Réalisation de l'estimation.....	54
3.5.3 Résultats	56
4 SOLUTIONS À LA PROBLÉMATIQUE D'ÉROSION DES SOLS AGRICOLES EN ESTRIE.....	59
4.1 Solutions proposées.....	60
4.1.1 Travail minimal du sol	61
4.1.2 Culture de couverture	63
4.1.3 Culture en contre-pente	64
4.1.4 Rotation des cultures	65
4.1.5 Culture en bandes alternées.....	66
4.1.6 Résidus des cultures à la surface du sol	67
4.1.7 Voies d'eau engazonnées	69
4.1.8 Terrasses.....	71
4.1.9 Bandes riveraines	72
4.1.10 Réviser la stratégie de fertilisation.....	74
4.1.11 Découpage des parcelles	75
5 ANALYSE DES SOLUTIONS.....	77
5.1 Méthodologie d'analyse.....	77
5.2 Choix de critères d'analyse	77
5.3 Définition des critères et méthode d'analyse	78
5.3.1 Efficacité	78
5.3.2 Coût.....	79
5.3.3 Simplicité	79
5.3.4 Adaptabilité.....	80
5.3.5 Besoin d'un suivi	80

5.4 Analyse	81
5.4.1 Travail minimal du sol	81
5.4.2 Culture de couverture	82
5.4.3 Culture en contre-pente	83
5.4.4 Rotation des cultures	85
5.4.5 Culture en bandes alternées.....	86
5.4.6 Résidus des cultures à la surface du sol	87
5.4.7 Voies d'eau engazonnées	88
5.4.8 Terrasses.....	89
5.4.9 Bandes riveraines	90
5.4.10 Réviser la stratégie de fertilisation.....	93
5.4.11 Découpage des parcelles	94
5.5 Interprétation des résultats d'analyse	93
6. SCHÉMA DES CAUSES, DES CONSÉQUENCES DE L'ÉROSION HYDRIQUE AINSI QUE DES BIENFAITS DE BONNES PRATIQUES AGRICOLES	97
CONCLUSIONS	101
RÉFÉRENCES	105
 ANNEXES	
Annexe 1 Triangle des textures des sols	111
Annexe 2 Liste des cours et des plans d'eau touchés par une fleur d'eau des algues bleu-vert en Estrie entre 2004 et 15 septembre 2009	115
Annexe 3 Résultats des simulations des pertes du phosphore pour le bassin versant du ruisseau Cass	123
Annexe 4 Données fournies par le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation de l'Estrie pour les simulations	151

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Horizons d'un profil du sol

Figure 2.2 Schéma d'une chaîne alimentaire

Figure 2.3 Structure d'un macro-agrégat

Figure 2.4 Fixation des ions sur le complexe argilo-humique

Figure 4.1 Réduction des pertes de sol en fonction de différents pourcentages de résidus

Figure 6.1 Schéma des causes, des conséquences de l'érosion hydrique, ainsi que des pratiques antiérosives avec leurs effets positifs pour l'agriculteur et sur l'environnement.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Propriétés de différentes particules minérales du sol

Tableau 2.2 Influence de la rugosité du sol sur le potentiel de ruissellement

Tableau 3.1 Évolution du nombre des plans d'eau et de municipalités touchés par les fleurs d'eau d'algues bleu-vert en Estrie dans les années 2004-2009

Tableau 3.2 Données disponibles et non disponibles pour le bassin versant du ruisseau Cass

Tableau 3.3 Comparaison des résultats de simulation de pertes de phosphore des champs agricoles dans le bassin versant du ruisseau Cass avec les valeurs de vulnérabilité établies par IRDA, modifié de IRDA (2008d).

Tableau 4.1 Effets de la rotation des cultures sur la teneur en matière organique du sol et la stabilité des agrégats pour un sol loameux

Tableau 4.2 Impact d'une rotation des cultures sur les pertes de sol et le ruissellement

Tableau 4.3 Largeur des bandes recommandées en fonction de la texture du sol

Tableau 4.4 Efficacité de la bande riveraine dans la réduction de la quantité de la matière en suspension, du phosphore et de l'azote transportés dans un cours d'eau

Tableau 5.1 Résumé des résultats d'analyse de solutions envisageables

LISTE DES ACRONYMES

IRDA :	Institute de Recherche et de Développement en Agroenvironnement
MAPAQ :	Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation
PAEF :	Plan agroenvironnemental de fertilisation
pH :	Acidité du sol
PT :	Phosphore total
ppm :	Partie par million
RMS :	Écart type de la hauteur
SimPLE.ca:	Simulator of productivity loss due to erosion for Canada
USLE :	Équation universelle de perte de sol,
mm -	Millimètre
µm :	Micromètre

INTRODUCTION

L'agriculture est une des pierres angulaires de l'économie québécoise. Aujourd'hui, le secteur bio alimentaire fournit de l'emploi à 10 % de la main-d'œuvre québécoise.

Dans le passé, les méthodes agricoles sont demeurées semblables pendant très longtemps. Toutefois, peu à peu, de nouvelles techniques permettant une amélioration de la productivité des sols ont été découvertes. Au XIX^{ème} siècle, la révolution industrielle a entraîné une apparition des machineries agricoles et une spécialisation de la production. Au Canada, l'ouest du pays devient un important producteur des céréales, tandis que le Québec se spécialise dans la production laitière et maraîchère. Également, la production porcine devient ici de plus en plus importante. Cette spécialisation cause cependant la disparition de plusieurs petits producteurs qui ont été incapables de s'adapter à la nouvelle situation.

Depuis les années 1960, les nouvelles techniques de production ont entraîné une surproduction des aliments dans les pays industrialisés. L'augmentation de la production agricole a permis de constituer le surplus des produits alimentaires et de libérer certains pays, dont le Québec, de l'économie agricole de subsistance et de favoriser l'apparition de nouvelles activités, telles l'industrie, le commerce et le secteur des services. Dans les années 1971 à 1986, un changement notable dans l'agriculture québécoise a été constaté. Le nombre de fermes a diminué de 32 %, leur superficie totale a diminué de 18 %, tandis que leur superficie moyenne a augmenté. Aussi, la superficie en pâturage a diminué de 56 % au profit du blé, de l'orge et surtout du maïs-grain. Cette tendance se poursuit encore aujourd'hui. Entre les années 2001 et 2006, le nombre des fermes au Québec a reculé de 4,6 % et leur superficie totale a augmenté de 1,3 % pour la même période du temps. À mesure que le nombre de fermes diminue et que la superficie totale en cultures augmente, la taille moyenne de fermes québécoises augmente (Statistique Canada, 2009). De plus, entre les années 1998 et 2007, les superficies en cultures annuelles ont augmenté en moyenne de 8 % par rapport aux superficies totales en cultures et se situent en 2007 à 52 %. La fréquence du travail du sol a augmenté avec l'augmentation des productions annuelles et des monocultures, ainsi qu'avec l'augmentation de l'usage des engrais chimiques et des pesticides (MAPAQ, s.d.).

Ces changements radicaux qui ont entraîné une production agricole de plus en plus intensive ne restent pas sans impacts sur les sols et sur l'environnement (Chevalier, 1993). Au cours des années 1960-1970, on a commencé à s'intéresser à la contamination par les pesticides, à la pollution des lacs et des cours d'eau par les fertilisants, à l'empoisonnement de l'environnement et aux impacts de ces phénomènes sur la santé. Plusieurs pratiques agricoles ont ainsi commencé à soulever des interrogations (Chevalier, 1993).

Les exigences envers l'agriculture et les agriculteurs sont aujourd'hui au Québec très grandes. La population s'attend à avoir des aliments de haute qualité et à bas prix. La concurrence internationale est également importante. Ces pressions poussent les agriculteurs à pratiquer une agriculture de plus en plus intensive, et ce, dans le but d'obtenir le meilleur rendement possible. Cependant, les coûts sociaux engendrés par ce type de production ne sont peut-être pas sans lui nuire. La pollution diffuse due aux activités agricoles et la baisse de la qualité des produits risquent de dépasser les bénéfices espérés. La mise en place de systèmes agricoles plus respectueux de l'environnement est nécessaire pour conserver nos ressources dans une perspective de développement durable (Prieur, 1995).

Certaines des pratiques agricoles contribuent à une dégradation des sols, soit par la perte de la matière organique, la dégradation de la structure du sol ou la perte du sol par l'érosion. L'érosion est un mouvement du sol d'un lieu vers un autre qui se produit sous l'effet du vent, de l'eau et des méthodes du travail du sol. C'est un phénomène naturel qui n'est pas nouveau. Cependant, certaines activités anthropiques comme la déforestation et l'agriculture intensive, lesquelles réduisent la stabilité du sol, ont augmenté considérablement le taux d'érosion (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2009a).

Après des années d'incitation gouvernementale à l'augmentation des rendements, l'agriculture d'aujourd'hui doit demeurer productive tout en respectant la qualité de l'environnement. Cette double contrainte impose une grande pression aux producteurs agricoles au Québec. De plus, depuis le début des années 1980, l'agriculture fait face à de graves difficultés financières et sociales. Elle subit les fluctuations des marchés mondiaux

et affronte la désapprobation de la société qui considère plusieurs pratiques agricoles comme dommageables à l'environnement. La protection de l'environnement constitue, sans aucun doute, un important défi de l'agriculture du XXI^{ème} siècle. De nombreux producteurs expérimentent déjà la pratique de l'agriculture écologique ou biologique. Cependant, ils font face aux problèmes financiers qui, dans certains cas, mettent les aspects environnementaux en arrière-plan (Chevalier, 1993).

1 MISE EN CONTEXTE DE LA PROBLÉMATIQUE

Avec la prise de conscience des effets négatifs de l'agriculture sur l'environnement, le modèle de culture centré sur la productivité a été remis en cause. L'intensification technologique tant sectorielle que spatiale, les techniques de production et la fertilisation sont à l'origine de la plus grande partie des nuisances agricoles de notre temps (Prieur, 1995). La déforestation et le développement intensif des cultures commerciales ont causé différents problèmes environnementaux. Parmi eux, le problème d'érosion qui entraîne la dégradation de la structure du sol et une perte de la matière organique. L'érosion hydrique est provoquée par les pluies intensives et le ruissellement superficiel, tandis que l'érosion éolienne l'est par le vent. Le plus grand risque d'érosion hydrique se présente durant la fonte des neiges au printemps et pendant les orages violents d'été (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2009b).

L'eau de pluie, en tombant, contient une grande quantité d'énergie grâce à laquelle les gouttes sont capables de fractionner les particules de terre en petits morceaux. Ceux-ci sont par la suite facilement transportés par les eaux de ruissellement. Sur les pentes douces, cette érosion prend la forme de nappes qui emportent progressivement la première couche de terre. De cette manière, le sol s'appauvrit surtout des particules les plus fines et légères : l'argile et l'humus, et sa capacité de rétention en eau et en éléments nutritifs diminue. Si la situation n'est pas maîtrisée, l'eau ruisselle en creusant son chemin dans la pente et l'érosion se fait en rigoles. Dans les conditions particulièrement défavorables, le problème peut se manifester par l'élimination du sol jusqu'à la roche (Pillet, Longet, 1989).

Le phénomène de l'érosion provoque le déplacement d'importantes quantités du sol vers le bas des pentes. Les pertes de sol sur les terres agricoles peuvent avoir de graves conséquences sur la productivité des champs ainsi que sur l'environnement. Pour comprendre ce phénomène, il est primordial de connaître les impacts des pratiques agricoles sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2009b).

1.1 Problématiques environnementales des pertes des éléments nutritifs

L'érosion est presque inexistante là où le sol est recouvert d'une couverture végétale dense. Même sur les pentes, la présence de la végétation protège efficacement le sol et le risque d'érosion est faible. Les arbres agissent comme un brise-vent, les parties aériennes des petites plantes diminuent la violence des vents et des pluies. Les feuilles, les racines et les mousses absorbent l'eau en grandes quantités, et en plus, les racines stabilisent le sol. Dans cette situation, l'eau ne peut pas acquérir une force assez importante pour détruire la structure du sol. Après la pluie, l'eau est progressivement libérée dans le sol, ce qui alimente les végétaux et maintient la nappe phréatique. L'eau est également libérée dans l'atmosphère par évapotranspiration. Toute exploitation agricole et toute mise en culture des terres impliquent une modification de ce couvert végétal et nécessitent, par conséquent, une prévention des risques d'érosion (Pillet, Longet, 1989).

L'érosion hydrique figure parmi les principales causes de la pollution des cours d'eau en milieu agricole. Selon les études, jusqu'à 30 % des sédiments chargés d'éléments nutritifs et de pesticides sont transportés par le ruissellement et atteignent les cours d'eau (Trencia, 1987). Les études menées aux États-Unis dans les années 1980 ont démontré que 99 % des matières en suspension dans les cours d'eau en milieux agricoles proviennent de l'érosion. Les recherches menées en même temps au Canada ont démontré que l'érosion hydrique peut déplacer jusqu'à 15 700 kg/ha/an de sédiments. Les conséquences de l'érosion se manifestent selon différentes formes de dégradation de l'environnement comme des inondations boueuses, de la sédimentation, l'augmentation de la turbidité de l'eau et l'eutrophisation des lacs et des rivières. Ces types de dégradation représentent un coût élevé pour la société d'aujourd'hui. L'érosion hydrique peut être à l'origine de 80 % des ions phosphates et de 73 % des ions nitrates présents dans les rivières des régions agricoles. Le déplacement des pesticides des champs agricoles vers les cours d'eau est également causé par l'érosion hydrique (Gaillard, 2001).

Certaines conditions augmentent les risques d'érosion comme les zones en pentes, les sols légers, les vastes zones plates, les pluies violentes, la sensibilité des sols à l'érosion, les modes de culture ainsi que le climat des régions chaudes et tropicales de la planète.

Dans la nature, le sol perdu à cause de l'érosion hydrique est habituellement remplacé par le sol qui est en formation. Les deux processus, la perte du sol et sa formation, sont en équilibre. Si l'exportation de terre dépasse le rythme de reconstruction, on parle de problème d'érosion sur un terrain donné. La problématique est d'autant plus importante que d'autres facteurs de dégradation entrent souvent en ligne de compte, par exemple : la perte des terres agricoles à cause de l'urbanisation, la construction en général ou la désertification (Pillet, Longet, 1989).

L'érosion éolienne est causée par le vent qui soulève les particules du sol chargées d'éléments nutritifs. Ce processus nuit à la qualité de l'air. La respiration des particules du sol par l'humain peut avoir des effets néfastes sur sa santé et la visibilité réduite peut amener un danger d'accident sur les routes (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2009c).

De plus en plus de lacs subissent l'eutrophisation par la présence de phosphore, les nappes phréatiques sont contaminées par des nitrates et les rivières sont chargées d'ammonium. Tous ces éléments nuisent aussi aux loisirs liés aux milieux aquatiques. L'eau des lacs et rivières est souvent impropre à la baignade. La pêche sportive est interdite à l'occasion à cause de la contamination de la chair des poissons. Également, le traitement de l'eau potable devient un enjeu important pour les municipalités du Québec. Tous ces problèmes sont liés aux flux d'éléments nutritifs et de résidus des pesticides vers des plans d'eau et sont causés par l'érosion hydrique (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2009c).

Une autre problématique qui est liée à l'érosion du sol est la diminution de la productivité des sols. La couche supérieure du sol subit l'amincissement sous l'action de l'eau ou du vent, ce qui diminue le volume de terre disponible pour les racines des végétaux. De plus, l'érosion autant éolienne qu'hydrique des terres agricoles a pour conséquence la perte des éléments nutritifs des sols arables. Les particules du sol qui sont déplacées en plus grandes quantités pendant le processus de l'érosion sont l'argile et l'humus. Ce sont les particules les plus légères, mais aussi les plus riches en éléments nutritifs, donc les plus fertiles, ce qui appauvrit cette couche de terre (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2009a).

Si l'érosion n'est pas contrôlée, la matière organique du sol de certains champs peut disparaître et le sol risque de revenir à l'état minéral proche de celui de la roche-mère (Pillet, Longet, 1989).

1.2 Modes de transport des éléments nutritifs

Pour observer un effet négatif de l'érosion sur l'environnement, il faut d'abord qu'il y ait transport des éléments nutritifs vers des milieux aquatiques. La compréhension de ce processus est nécessaire pour évaluer les risques de contamination par les polluants agricoles et pour pouvoir lutter contre le phénomène d'érosion. L'un des principaux enjeux en agroenvironnement est donc de déterminer des voies de transport des sédiments chargés d'éléments nutritifs provenant des champs agricoles.

L'eau de précipitation, en tombant à la surface du sol, est répartie de trois façons. Une partie s'infiltré dans le sol, est retenue par les particules du sol ou alimente la nappe phréatique. Une autre partie ruisselle sous la surface du sol et finalement la dernière ruisselle à la surface et peut exercer une action érosive (Gaillard, 2001).

Les éléments nutritifs sont transportés en dehors des sols agricoles par deux principales voies de transport : le ruissellement de surface et l'écoulement souterrain. Cependant, c'est le ruissellement qui demeure le principal vecteur de transport des éléments nutritifs. Le ruissellement est un processus qui reste sous contrôle saisonnier. Il est le plus important durant la fonte des neiges à la fin de l'hiver, ainsi qu'au début du printemps à cause des pluies abondantes (IRDA, 2008b).

Les voies de transport ainsi que l'intensité des pertes d'éléments nutritifs sont influencés par plusieurs facteurs, tels : la nature chimique de l'élément, la capacité de fixation aux particules de sol, les propriétés des sols, les pratiques agricoles, le type de culture, les doses et les types d'engrais, les périodes et les méthodes d'épandage, la topographie et le régime hydrique (Giroux, Royer, 2006).

Les ions nitrates qui constituent la principale source d'azote dans le sol, ne se fixent pas aux particules du sol; ils se dissolvent dans l'eau et pendant les pluies sont perdus par lessivage vers les eaux de surface. Les ions phosphates, par contre, sont retenus fortement par les particules du sol et peuvent être transportés par le ruissellement, attachés à ces particules et finissent leur voyage dans les lacs et les rivières. Les ions, ammonium, potassium, calcium, magnésium et sodium sont adsorbés sur le complexe d'échange cationique des sols ou peuvent être dissous dans la solution du sol. Ils se retrouvent dans les eaux de ruissellement et de drainage sous une forme particulaire ou ionique (Giroux, Royer, 2006).

1.2.1 Ruissellement

L'augmentation du volume d'eau de pluie jusqu'à un certain niveau peut déclencher le phénomène de ruissellement. Si l'intensité des précipitations dépasse la capacité d'infiltration d'un sol, un certain volume de sédiments sera transporté avec l'eau de ruissellement sur une distance plus ou moins longue, selon l'énergie du ruissellement.

Il y a quatre principaux facteurs qui influencent le processus de ruissellement : l'intensité de précipitation, la rugosité de la surface du champ, la capacité d'infiltration de l'eau et la profondeur de la nappe phréatique dans le sol (IRDA, 2008b).

Un sol moins perméable atteint l'état de la saturation plus rapidement, pour la même intensité de pluie et provoque un plus grand ruissellement (IRDA, 2008b).

Une surface de sol plus rugueuse freinera le phénomène de ruissellement car elle peut retenir une quantité plus importante d'eau avant le déclenchement du ruissellement. La culture sur les résidus repose justement sur ce principe. Plus il y a de résidus végétaux sur le champ, plus la rugosité du sol sera grande et alors le ruissellement sera retardé ou freiné. La position de la nappe phréatique influence également le phénomène de ruissellement. Plus le niveau de l'eau souterraine est élevé, plus le déclenchement du ruissellement est hâtif (IRDA, 2008b).

1.2.2 Écoulement souterrain

L'eau souterraine atteint les cours d'eau par deux principaux mécanismes : l'écoulement latéral dans la zone non-saturée du sol et l'infiltration dans les zones saturées. L'écoulement souterrain se produit principalement lors des crues provoquées par la fonte des neiges et par des précipitations intenses. Il contribue à ces moments-là de façon importante aux débits des cours d'eau. Cependant, compte tenu des grandes superficies de champs profitant du réseau de drainage souterrain artificiel au Québec, ce sont les drains qui contribuent dans une grande partie à des apports d'eau souterraine au réseau hydrographique. Le temps de contact plus long entre l'eau et le sol favorise l'absorption des éléments nutritifs à travers le profil du sol; ceci diminue donc les quantités de ces éléments atteignant les cours d'eau ou les lacs. Certains sols favorisent l'écoulement plus rapide à travers les particules du sol. C'est l'écoulement préférentiel qui, en général, contient une quantité plus importante d'éléments nutritifs et peut contribuer à un enrichissement des eaux de surface. Le réseau de drainage souterrain contribue à la mobilité des éléments nutritifs, dont le phosphore, dans le sol. Cependant, le drainage souterrain diminue le volume d'eau qui participe au ruissellement de surface, en réduisant par le fait même les exportations totales de phosphore et d'autres éléments vers les écosystèmes aquatiques (IRDA, 2008b).

1.3 Pertes des éléments nutritifs d'origine agricole associées à l'érosion hydrique des champs

Plusieurs études ont été menées pour établir les quantités d'éléments nutritifs qui se retrouvent dans l'eau de ruissellement ou dans l'eau souterraine. La teneur en différents éléments de l'eau de ruissellement et de l'eau souterraine dépend de plusieurs facteurs tels la nature de la culture, le type de sol, le coefficient d'utilisation de chaque élément, les modes, les doses, les types d'engrais, les périodes d'application de ces engrais et les conditions climatiques (Giroux, Royer, 2006).

Le couvert végétal joue un rôle essentiel dans le contrôle de l'érosion. Aussi, le mode de travail du sol modifie la couche arable du champ agricole et sa susceptibilité au détachement et au déplacement des sédiments. Ce mode influence alors le processus de l'érosion. Le sol dénudé temporairement et labouré successivement subit une déstabilisation

structurale, un tassement des particules et par conséquent une diminution d'infiltration au profit du ruissellement. Les terrains mis à nu, comme c'est souvent le cas des terres agricoles, sont particulièrement exposés à l'érosion hydrique (Gaillard, 2001).

La rotation des cultures est très importante en agriculture. Elle influence la fertilité du sol, sa productivité et sa qualité. La rotation des cultures a aussi une importance environnementale. Par exemple, les pertes de nitrates varient considérablement selon le type de culture. Les prairies, le soya, le canola ainsi que les céréales à paille produisent de faibles pertes de nitrates, entre 2 et 8 mg N-NO₃/L. Par contre, les pommes de terre et le maïs sont deux cultures produisant des pertes d'azote importantes. Ces pertes se situent entre 15 et 30 mg de nitrates (N-NO₃)/L, et elles peuvent dépasser 40 mg de nitrates (N-NO₃)/L. Les concentrations en nitrates dans l'eau de ruissellement et dans l'eau de drainage sont également plus élevées dans les champs sans rotations intensivement fertilisés à l'azote. Dans les régions où les pommes de terre sont cultivées intensivement, les contaminations de puits par l'azote sont rapportées régulièrement (Giroux, Royer, 2006).

Le type de sol influence aussi les pertes d'éléments nutritifs. La présence des micropores dans les sols argileux assure une meilleure rétention de l'azote nitrique et rend en général ces sols moins vulnérables aux pertes d'éléments nutritifs. Également, les sols à teneur plus élevée en matière organique et en argile ont une capacité d'adsorber une plus grande quantité d'ions sur leur surface chargée négativement. En plus, l'aménagement d'un système de drainage souterrain constitue un facteur contribuant à la mobilité de différents éléments. La migration des éléments par le réseau de drainage souterrain doit être prise en considération dans le bilan global des pertes provenant du secteur agricole (Giroux, Royer, 2006).

Les modes, les doses, les types d'engrais et leurs périodes d'application sont des facteurs qui influencent les quantités d'éléments nutritifs transportés par l'eau tout au long du processus d'érosion. L'azote, le carbone, le phosphore, la potasse et d'autres éléments sont nécessaires à la croissance des plantes. Toutefois, lorsqu'ils sont en excès, ils peuvent contaminer les eaux de surface et les eaux souterraines et de cette manière constituer une

menace pour les écosystèmes aquatiques. Sous l'effet de l'érosion, les particules de terre contenant des éléments nutritifs sont transportées vers les cours d'eau et les lacs. Les épandages non incorporés d'engrais, suivis de pluies fortes, favorisent les exportations d'éléments par l'eau de ruissellement vers les milieux aquatiques, ce qui entraîne l'enrichissement des eaux de surface. Les pertes d'ammonium et de phosphore sont généralement plus grandes avec des engrais de ferme qu'avec des engrais minéraux. Aussi, la fertilisation intensive augmente les risques de pollution de l'eau de surface par les polluants agricoles (Giroux, Royer, 2006).

Tous les éléments influençant la charge des éléments nutritifs dans l'eau de ruissellement demeurent en interaction. Pour cela, il est très difficile de les classer selon leur importance. Il est donc primordial de les prendre tous en considération dans l'évaluation des risques environnementaux reliés aux champs cultivés.

2 SOL

Le sol est une couche supérieure de la Terre, qui va de quelques centimètres à plusieurs mètres d'épaisseur. Il rend la vie possible et son rôle est irremplaçable. Le sol figure parmi les ressources les plus précieuses de l'humanité. Sa protection se trouve parmi les plus importants enjeux environnementaux du présent siècle.

Le sol est composé de matière minérale, de matière organique, d'eau et d'air, lesquels sont accumulés au-dessus de la roche-mère. Il se distingue de la croûte terrestre par sa position superficielle, sa texture meuble, poreuse et hydratée. C'est une couche infime par rapport aux dimensions de la planète. Le sol constitue un lien entre le monde minéral et le monde vivant. Le type, la nature et les propriétés du sol dépendent du type de roche-mère, des conditions climatiques, de la topographie et de la situation hydrologique (Pillet, Longet, 1989).

La partie minérale du sol provient en grande proportion de la dégradation de la roche de surface par altération. Le reste de la partie minérale provient des apports de l'extérieur par érosion éolienne et hydrique. La partie organique du sol est constituée principalement de l'humus; celui-ci est formé par la dégradation de la matière organique végétale et animale. L'humus est lentement décomposé et minéralisé par la microflore et la microfaune du sol, permettant la libération de matière nutritive pour les plantes. La présence de l'humus est donc fondamentale pour la fertilité des sols (Pillet, Longet, 1989).

2.1 Profil du sol

La coupe verticale du sol constitue son profil. Il est formé de couches superposées, appelées horizons, de différentes couleurs, épaisseurs et compositions. Les horizons pédologiques sont composés d'un mélange de terre arable, d'humus, de graviers et de cailloux. Ils se forment par altération physique, chimique et biologique de la roche-mère sous l'influence de conditions externes, comme la pluie, le vent, la température et l'action des organismes vivants.

Les débris végétaux accumulés à la surface du sol constituent une couche organique appelée l'horizon O. L'horizon A est composé à la fois de la matière organique et de la matière minérale. Il comprend la litière, l'humus et des composants minéraux. La pluie qui tombe sur la surface du sol s'infiltré plus profondément et entraîne avec elle les éléments minéraux vers l'horizon B situé juste en dessous. L'horizon B s'enrichit donc de cette manière. C'est aussi un endroit de transformation des minéraux primaires provenant de la roche-mère. La troisième couche constitue l'horizon C. C'est un horizon d'altération de la roche-mère dont les caractéristiques sont encore très visibles (Pillet, Longet, 1989). La figure 2.1 présente un schéma et un exemple du profil d'un sol.

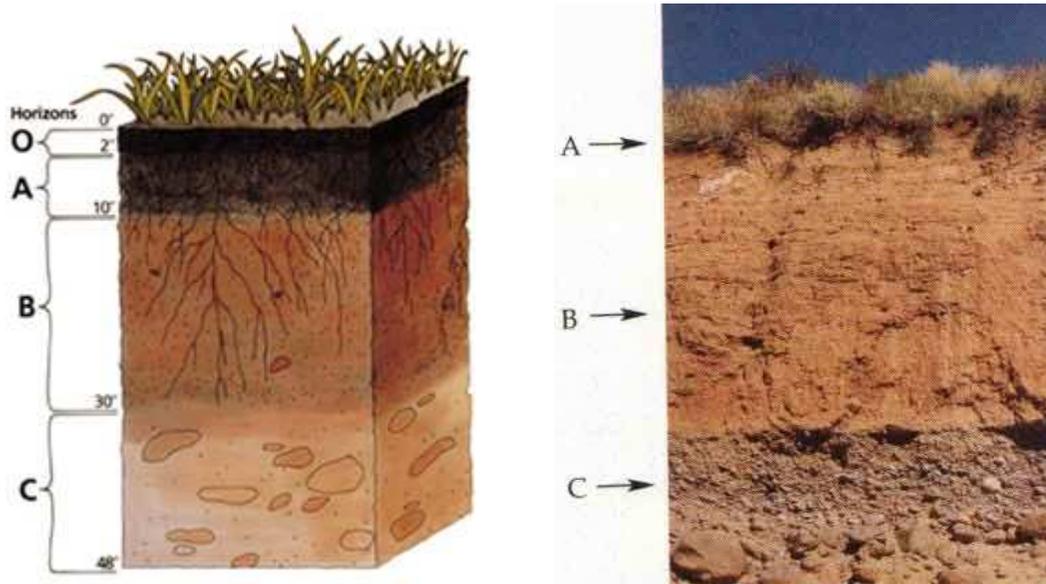


Figure 2.1 : Horizons d'un profil de sol, tiré de Wikipedia (2009).

2.2 Rôle du sol

Toutes les activités humaines sont liées au sol, d'où vient l'importance d'utiliser cette ressource d'une manière durable. Le sol couvre une grande partie de la Terre. Les hommes marchent à sa surface, les plantes s'y enracinent et s'en nourrissent et de nombreux animaux y vivent. Le sol sert à l'agriculture, à l'élevage, aux forêts, aux minerais et il

fournit divers matériaux de construction. Globalement, le sol remplit quatre fonctions principales :

- support pour les structures humaines : bâtiments, routes, barrages
- filtre pour l'eau. Il agit comme un système d'épuration pour l'eau qui traverse ses différentes couches
- abri pour les espèces végétales et animales
- rôle alimentaire. Le sol accumule certains éléments et les met à la disposition des plantes. Les plantes, de leur côté, constituent la nourriture pour les humains et les animaux (Université de Moncton, 2009).

Le sol supporte et nourrit les végétaux qui remplissent le rôle de producteurs de la matière organique de la planète. Les plantes vertes fabriquent et accumulent de la matière organique à partir du gaz carbonique, de l'eau et des éléments minéraux sous l'action de l'énergie solaire. Les éléments nutritifs sont les 14 minéraux nécessaires au développement des plantes. Ce processus, appelé la photosynthèse, est à la base de toute vie et constitue le point de départ de la chaîne alimentaire (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2009). Les plantes sont ensuite ingérées par des consommateurs, animaux herbivores, qui à leur tour deviennent la nourriture des carnivores. Les décomposeurs décomposent et reminéralisent la matière organique des cadavres, débris végétaux et des excréments. La matière organique soluble ainsi créée devient matière nutritive pour les plantes et ainsi la chaîne alimentaire recommence. Le sol supporte tout ce processus de transformation d'énergie (Pillet, Longet, 1989). La figure 2.2 présente un schéma d'une chaîne alimentaire.

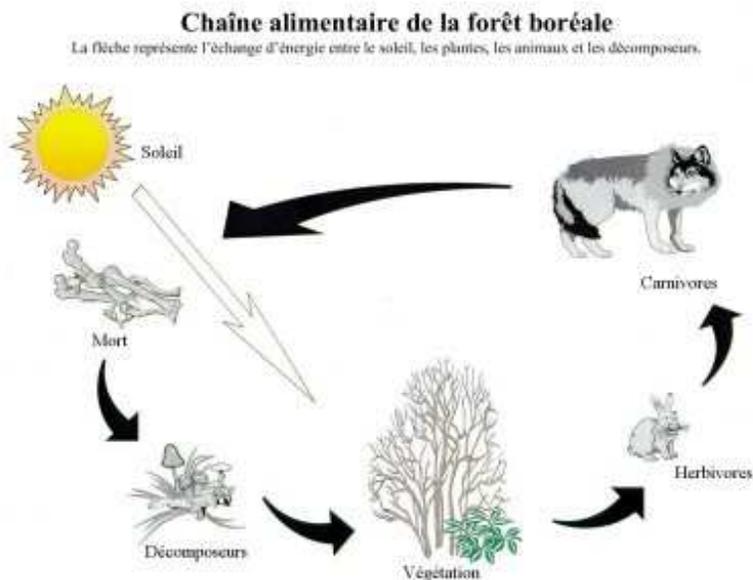


Figure 2.2. Schéma d'une chaîne alimentaire, tiré d'Agence Parcs Canada (2009).

2.3 Caractérisation physique du sol

Le sol est composé de trois phases : solide, liquide et gazeuse. La phase liquide constitue une solution dont la composition varie dans le temps et dans l'espace. Elle sert à l'alimentation des végétaux en eau et en éléments nutritifs. Bien que la solution du sol soit constituée essentiellement d'eau, elle contient également diverses substances dissoutes ainsi que de petites molécules organiques. Leur nature et leur concentration découlent d'apports externes, mais surtout d'échanges internes avec la matrice solide du sol. La concentration de la solution du sol peut être très variable; elle peut être exprimée en quelques ppm, dans les régions caractérisées par des précipitations abondantes, ou en pourcentage dans les régions semi-arides. Les pores d'un sol forment un réseau complexe de conduites de diamètres très différents. Les plus grandes sont habituellement remplies d'air, et les plus petites contiennent la solution du sol qui est disponible pour les plantes. Les pores les plus petits encore sont remplis par la solution qui n'est pas cependant disponible pour les végétaux, car elle est adsorbée par des forces qui agissent de façon très puissante sur les particules du sol (Musy, Soutter, 1991).

La phase gazeuse du sol occupe la partie de la porosité que la solution du sol laisse libre. Sa qualité dépend des systèmes racinaires des végétaux et des microorganismes, qui sont des producteurs de gaz carbonique et des consommateurs d'oxygène. La composition de la phase gazeuse du sol est soumise à de constantes modifications. Cette phase est constituée d'un mélange de divers gaz en proportions variables. L'aération du sol est assurée par les ouvertures des pores à sa surface. En général, la composition de l'air du sol est très voisine de la composition de l'air atmosphérique, cependant l'air du sol contient plus de gaz carbonique et moins d'oxygène que l'air atmosphérique. En plus, l'air du sol a une teneur en vapeur d'eau plus élevée. En s'éloignant de la surface du sol, ces différences sont de plus en plus importantes (Musy, Soutter, 1991).

La phase solide du sol est constituée de particules minérales et de particules organiques. Les minéraux de diverses natures et diverses grosseurs peuvent constituer la partie minérale du sol. Aussi la partie organique peut être diversifiée. Le comportement physique des sols dépend de l'organisation de leur phase solide. La texture et la structure jouent des rôles importants dans les propriétés physiques des sols. Leurs caractéristiques minéralogiques, par contre, déterminent le processus d'échange chimique entre la matrice du sol et la phase liquide, ce qui influence la nutrition végétale. Les paramètres de la phase solide seront décrits plus en détail dans la partie qui suit (Musy, Soutter, 1991).

2.3.1 Texture

La texture du sol se traduit par la proportion des minéraux de différentes grosseurs, sans tenir compte de la nature et de la composition de ces minéraux. La texture du sol est importante car elle influence la capacité du sol à retenir ou à libérer l'eau et les éléments nutritifs. Aussi, l'ensemble des propriétés physiques et chimiques du sol est lié étroitement à sa texture et à sa structure. La texture influence la capacité du sol à retenir et relâcher l'eau, ce qui est essentiel à la croissance des plants. L'analyse granulométrique permet un classement des particules en fonction de leur diamètre, de la façon suivante :

- cailloux et graviers : diamètre plus grand que 2 mm
- sable : diamètre entre 2 mm et 50 μm (sable grossier : 2 mm à 0.2 mm et sable fin : 0.2 mm à 50 μm)

- limon : diamètre de 50 μm à 2 μm (limon grossier : 50 μm à 20 μm et limon fin : 20 μm à 2 μm)
- argile (fraction fine) : diamètre plus petit que 2 μm (Duchaufour, 1995).

Les trois principales grosseurs des particules, soit le sable, le limon et l'argile ont de différentes propriétés. Le tableau 2.1 présente les caractéristiques de différentes grosseurs des particules.

Tableau 2.1 Caractéristiques de différentes particules minérales du sol.

Caractéristique	Particules minérales		
	argile	limon	sable
Diamètre	Moins de 0,002 mm	0,05 à 0,002 mm	0,05 à 2 mm
Aération	Mauvaise	Bonne	Très bonne
Drainage	Mauvais	Bon	Très bon
Rétention de l'eau et des éléments nutritifs	Très bonne	Bon	Mauvais
Maniabilité	Très bonne	Moyenne	Difficile

Cette classification de différentes grosseurs des particules a donné la base pour élaborer un outil qui sert à déterminer rapidement la composition granulométrique du sol, le triangle des textures, présenté à l'annexe 1. Selon ce triangle, il est possible de regrouper les textures en quatre grandes classes qui permettent de définir les principales propriétés du sol :

- texture sableuse qui signifie un sol bien aéré, facile à travailler, mais pauvre en réserves d'eau et en éléments nutritifs.
- texture limoneuse qui se caractérise par de mauvaises propriétés physiques du sol et la formation d'une structure massive. Cette tendance est corrigée par une teneur suffisante en humus.
- texture argileuse qui indique de mauvaises propriétés physiques du sol : imperméable et mal aéré, malgré la richesse chimique. Le travail d'un tel sol est difficile à cause de sa plasticité en état humide et sa compacité en état sec. Si un tel sol contient de grandes

quantités de matière organique, les propriétés défavorables sont atténuées en grande partie.

- texture équilibrée, une texture optimale, dans laquelle les parties minérales se trouvent en bonnes proportions. Le sol à texture équilibrée est le meilleur sol d'un point de vue agronomique (Duchaufour, 1995).

2.3.2 Fraction organique

La matière organique du sol est d'une grande importance. Elle est le fruit de l'activité biologique tant animale que végétale. On peut diviser la matière organique du sol en trois groupes :

- résidus frais des plants et des animaux, peu décomposés.
- humus, qui est le sous-produit de la minéralisation primaire de la matière organique. Sa minéralisation secondaire progresse très lentement. Il donne au sol la couleur noire.
- formes transitoires qui sont des molécules organiques dégradables se situant entre la matière organique fraîche et l'humus (Mussy, Soutter, 1991).

La matière organique fraîche est formée de débris végétaux et animaux de différente nature qui sont déposés à la surface de terre ou y sont incorporés. Elle constitue une source nutritive et énergétique pour la faune du sol et conditionne le degré d'activité des microorganismes du sol. La matière organique fraîche subit d'abord une décomposition microbienne qui entraîne la libération de molécules plus simples. Une partie de ces molécules subit une minéralisation primaire en composés minéraux solubles ou gazeux (Duchaufour, 1995). D'autres composés subissent une humification en se transformant en molécules de plus en plus complexes, de nature colloïdale et de couleur foncée dont l'ensemble constitue l'humus (Hénin, 1976). Cet humus réside dans le sol et constitue 90 % de la matière organique dans sa couche cultivée. L'existence des sites de charge négative sur les particules d'humus provient des groupes carboxyles entrant dans sa composition. Les charges négatives d'humus présentent une attraction envers les molécules d'eau et envers des cations. L'humus est généralement étroitement lié à la fraction argileuse du sol, dont elle modifie le comportement (Mussy, Soutter, 1991).

La biomasse microbienne constitue en moyenne deux à 10 % de la matière organique totale du sol. Elle joue un rôle essentiel dans l'humification. Elle transforme directement la biomasse morte ou elle produit les enzymes qui participent aux différentes étapes de l'humification. L'humus subit une minéralisation progressive et si l'apport de la matière organique dans le sol est faible, son niveau peut diminuer (Duchaufour, 1995).

L'apport annuel de la matière première de l'humus, dans les sols à végétation permanente, se produit lors de la chute des feuilles et de la mort des plantes, ce qui contribue à un renouvellement périodique de la matière organique morte dans le sol. Sur les sols cultivés, l'apport de la matière organique est discontinu et dépend de l'homme. Les résidus de récoltes, les fumiers de ferme, les engrais verts et les amendements organiques divers remplacent l'apport naturel. La décomposition de la matière organique apportée est activée par l'enfouissement, par le travail du sol et par l'ajout des engrais minéraux. La matière organique du sol constitue une réserve d'éléments nutritifs pour les plantes. Lorsque l'apport de la matière organique est insuffisant, la réserve d'humus diminue progressivement, ce qui peut entraîner une dégradation des propriétés chimiques et surtout physiques des sols (Duchaufour, 1995).

La matière organique du sol est très hydrophile. Elle régularise l'humidité du sol, assure son bon fonctionnement et limite sa fragilité à l'érosion autant hydrique qu'éolienne. Dans les sols sablonneux, elle constitue la seule fraction capable de fixer des ions sur sa surface, par conséquent l'humus devient particulièrement important pour la conservation de la fertilité de ces sols et pour la protection du milieu (Entente auxiliaire Canada – Québec sur le développement agro-alimentaire, 1990).

2.3.3 Structure

La structure du sol est la manière dont sont assemblés les divers constituants du sol. Elle découle de l'existence des forces de nature électrostatiques dues aux sites chargés de minéraux argileux et d'humus (Hénin, 1976). La structure dépend de différents processus : biologiques, chimiques, physiques et mécaniques dans le sol. Les ciments flocculeux, les ciments organiques, l'argile ou le complexe argilo-humique, forment des ponts ou des

revêtements autour des particules minérales plus grossières et les lient entre elles en formant des agrégats séparés. De cette manière est déterminée la répartition de la matière solide et des pores dans l'espace du sol. Certains pores sont occupés par l'eau, d'autres, plus grands, par l'air. S'il n'y a pas assez de différents ciments, les assemblages des particules du sol sont peu efficaces et la structure devient particulaire ou cohérente. La répartition des particules et des pores conditionne l'ensemble des propriétés physiques du sol. L'étude de la structure du sol a conduit à distinguer deux niveaux d'organisation, soit la microstructure qui peut être observée seulement au microscope et la macrostructure observée visuellement au champ. Des agrégats sont des microstructures qui constituent les assemblages élémentaires des particules du sol. À l'échelle macroscopique, les éléments structuraux sont des mottes et des agglomérats qui sont constitués par des assemblages d'agrégats (Musy, Soutter, 1991).

Selon le mode d'assemblage des particules du sol, on peut distinguer les structures suivantes :

- particulaire (meuble), caractéristique pour les sols à texture grossière : sable ou sable limoneux. Elle se caractérise par l'absence d'éléments fins et l'absence de liens entre les éléments,
- massive (cohérente), qui est caractéristique pour les sols à texture fine, les limons, avec une quantité insuffisante de ciments argilo-humiques, pour former des agrégats,
- construite, qui est caractérisé par la présence des agrégats liés par les ciments argilo-humiques
- à ciment chimique (précipité), le sol souvent durcit
- par fragmentation, se caractérise par la formation de fentes
- mixtes (Hénin, 1976).

Les structures les plus stables sont des structures construites, des sols riches en humus, biologiquement actives et à texture équilibrée. Elles forment des macroagrégats (diamètre plus grand que 250 μm), construits par un assemblage des microagrégats (diamètre plus petit que 50 μm). Le sol à structure construite se caractérise par une grande porosité et une bonne perméabilité. La figure 2.3 présente un schéma de la structure d'un macro-agrégat.

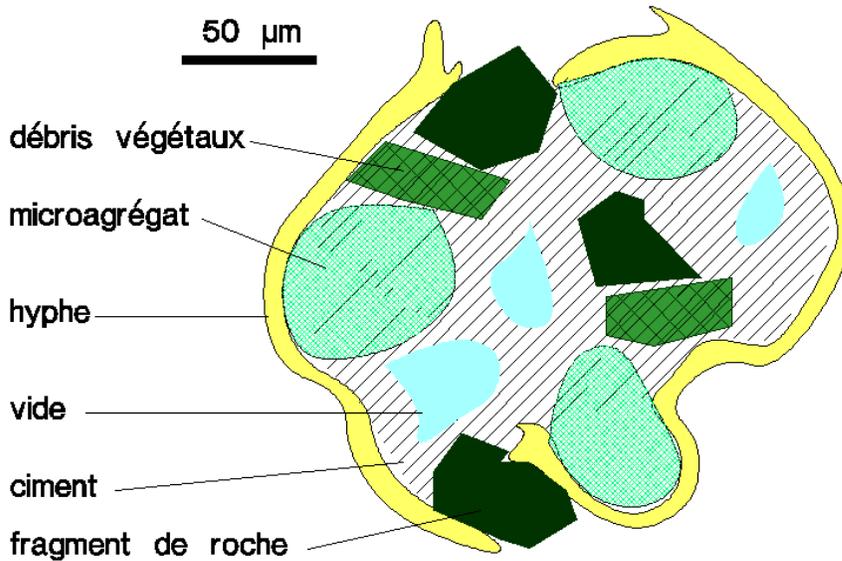


Figure 2.3 Structure d'un macro-agrégat, tiré de : Beauchamp (2008a).

La structure d'un sol n'est pas nécessairement permanente, elle peut être modifiée selon les différentes conditions : météorologique, travail du sol ou apport de la matière organique. Dans des conditions défavorables, la structure du sol subit une dégradation, mais il est possible qu'elle se reconstitue si les conditions redeviennent favorables.

Les facteurs de la dégradation les plus courants sont :

- orages violents entraînant la rupture des agrégats par action mécanique des gouttes de pluie, accompagnée souvent de lessivage des particules fines, ce qui provoque l'appauvrissement du sol,
- disparition des ciments organiques par la biodégradation. Ce phénomène peut être provoqué par le travail excessif du sol activant cette biodégradation,
- acidification et le changement de l'état de l'humus qui entraîne le tassement et la diminution de l'aération du sol,
- tassement par des instruments lourds sur les sols cultivés, ce qui entraîne la disparition des pores grossiers.

L'état actuel de la structure du sol peut être exprimé par sa porosité. La porosité d'un sol est le rapport du volume non occupé par la matière solide au volume total (Hénin, 1976). La porosité donne les indications concernant les propriétés physiques du sol; celles-ci assurent l'alimentation en eau aux plantes et la respiration aux racines. (Duchaufour, 1995).

2.3.4 Rugosité de la surface du sol

La rugosité de la surface du sol est exprimée par la variation de la hauteur de la surface du sol à l'intérieur d'un site donné. Les premières mesures de rugosité de la surface du sol datent de 1957, mais le concept de rugosité est toujours relativement peu connu et mal documenté.

Le degré de rugosité dépend des techniques de travail du sol, de la pluie, de la texture et de la structure du sol. La rugosité joue un rôle important dans le régime hydrique des sols. Elle influence la rétention de l'eau dans le sol, l'infiltration et le potentiel de ruissellement. La rugosité de la surface du sol est un facteur clé dans le déclenchement de l'érosion hydrique. Le paramètre de rugosité utilisé le plus souvent est *l'écart type de la hauteur (RMS)*. Ce paramètre fournit une description verticale de la rugosité du sol, plus précisément l'élévation de la surface mesurée généralement le long d'une ou de plusieurs lignes d'observation, à intervalle régulier. La valeur de RMS influence le potentiel de ruissellement sur un territoire donné. Plus la rugosité de la surface du sol est grande, moins le ruissellement est important. La rugosité du sol est d'importance capitale. Elle affecte les pertes des sols dues à l'écoulement de la surface (Nolin et al. 2005). Le tableau 2.2 présente l'influence de la rugosité du sol sur le potentiel de ruissellement.

Tableau 2.2 Influence de la rugosité du sol sur le potentiel de ruissellement

Classe de rugosité	Variation de la hauteur	Potentiel de ruissellement
Rugosité faible	moins de 1 cm	élevé
Rugosité moyenne	entre 1 et 2 cm	moyen
Rugosité forte	plus de 2 cm	faible

Les sols à rugosité élevée se caractérisent par une porosité plus grande que les sols lisses, ce qui explique la meilleure capacité d'infiltration de ces types de sols. Avec l'augmentation de la rugosité de la surface, la vitesse de ruissellement diminue. Certaines pratiques culturales, telles : le paillage des sols, les engrais verts, le travail en travers de la pente et les résidus des cultures laissés sur les champs entraînent l'augmentation de la rugosité de la surface et un ralentissement de la lame d'eau de ruissellement. Ces différentes pratiques réduisent ainsi les pertes de sol. Le sol plus rugueux présente aussi un plus grand potentiel de capture des particules en suspension dans l'eau de ruissellement et augmente également la capacité du sol à emmagasiner l'eau de précipitation surface (Nolin et al. 2005).

2.4 Fertilité

Une des fonctions essentielles du sol consiste à fournir à la plante des éléments nutritifs nécessaires qui sont absorbés par les racines sous une forme minérale. Certains éléments sont nécessaires aux plantes en quantités importantes (azote, phosphore, soufre, calcium, magnésium, potassium), d'autres sont absorbés en quantités beaucoup moins importantes (bore, molybdène, fer, zinc, manganèse, cuivre). Parmi ces derniers, certains peuvent devenir toxiques s'ils se trouvent en excès dans le sol (zinc, manganèse, cuivre). Les formes d'éléments nutritifs immédiatement assimilables sont les formes solubles. La réserve des éléments nutritifs comprend les composés minéraux solubles, non solubles et la matière organique (Morel, 1996).

La fertilité des sols dépend de la nature du matériau sur lequel le sol a été développé. Elle dépend également des exportations des éléments dues à la végétation qui elle, absorbe les éléments assurant leur fonctionnement. Le sol est un système ouvert, il peut s'enrichir, mais aussi perdre certaines quantités d'éléments nutritifs. La principale cause de l'appauvrissement du sol au plan chimique est l'agriculture. Dans le passé, les terres agricoles étaient souvent déficitaires du point de vue chimique. La consommation des plantes a été supérieure aux apports, par altération de la roche-mère, en l'absence de fertilisation. La seule solution à cette dégradation a été l'introduction des pratiques d'amendement et de fertilisation (INRA, 2004).

La capacité du sol à retenir les éléments nutritifs et à empêcher la perte de ces éléments par lessivage est une caractéristique importante. Sa connaissance est utile pour estimer les besoins des cultures en engrais (Morel, 1996).

Une des conséquences de l'appauvrissement du sol est son acidification. Elle se traduit par de faibles teneurs en cation alcalin et des teneurs élevées en aluminium. L'acidification des sols est en plus aggravée par des dépôts atmosphériques de pluies acides, lesquelles amplifient les pertes de cations alcalins et la solubilisation de l'aluminium. L'acidification des sols se manifeste en carences, surtout des plantes cultivées, en calcium et en magnésium ainsi qu'en toxicité aluminique qui entraîne la mortalité de certains organismes aquatiques (INRA, 2004).

Le maintien du bon niveau d'éléments nutritifs par fertilisation est essentiel pour la productivité des sols agricoles et pour la préservation de la qualité des sols. Cette qualité demeure liée à la structure, à la texture et au mode de travail du sol (INRA, 2004).

2.4.1 Rétention des éléments nutritifs

L'influence de la texture du sol sur ses qualités physiques provient essentiellement des propriétés colloïdales des minéraux argileux. Ces minéraux sont constitués d'un empilement de feuillets, séparés par des intervalles. Ce sont les espaces interfoliaires. La structure des nombreux minéraux argileux présente des sites de charge, surtout négative, qui exercent une attraction sur les cations en particulier. Aussi, les molécules d'eau sont attirées par des sites chargés d'argile, avec lesquels elles ont une grande affinité. Les molécules et les ions sont alors fixés sur la surface externe de ces minéraux. Des composés organiques de faible poids moléculaire peuvent aussi s'insérer entre les feuillets argileux (Morel, 1996). Cette adsorption de nature électrostatique est dynamique en raison de l'action simultanée des forces d'attraction des minéraux argileux envers des ions et des forces de répulsions entre des molécules d'eau (Musy, Soutter, 1991).

Les minéraux argileux et l'humus sont souvent associés en complexes argilo-humiques. La formation de ces complexes peut s'effectuer par la fixation des composantes

électronégatives de l'humus sur les sites électropositifs situés au niveau des bords externes des minéraux argileux, ou par l'intermédiaire de cations polyvalents, tels les ions de calcium (Ca^{2+}), d'aluminium (Al^{3+}) et de fer (Fe^{3+}), formant des ponts cationiques entre le feuillet argileux et l'humus (Musy, Soutter, 1991). La figure 2.4 présente le mécanisme de fixation des ions sur le complexe argilo-humique.

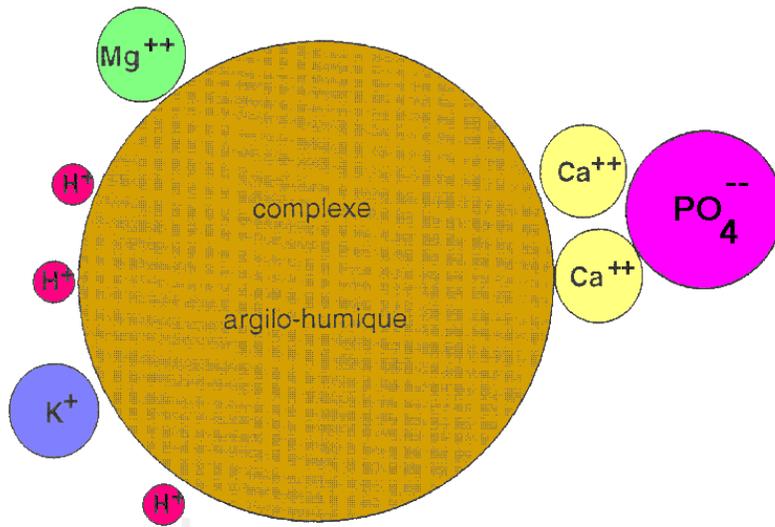


Figure 2.4 Fixation des ions sur le complexe argilo-humique, tiré de Beauchamp (2008a).

Les associations organo-minérales sont conditionnées par le type d'humus et la composition du matériau minéral. Elles jouent un rôle important dans l'organisation de la structure du sol. Les composés organiques solubles ou à petite molécule favorisent le processus d'entraînement, soit par formation de complexe organo-métallique mobile, soit par dépôt d'une pellicule hydrophile autour de la particule d'argile, ce qui favorise leur lessivage. Par contre, les composés insolubles à grosses molécules jouent un rôle de ciment entre les particules minérales et favorisent la formation d'agrégats argilo-humique, qui s'oppose au processus d'entraînement. La présence des cations flocculant de calcium, d'aluminium et d'hydroxydes de fer (Ca^{2+} , Al^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})^n$) en quantité suffisante est nécessaire à leur formation (Duchaufour, 1995).

Les complexes argilo-humiques améliorent la structure du sol, laquelle est alors favorable au développement racinaire. Ces complexes sont très hydrophiles et constituent une réserve d'eau et d'éléments nutritifs qui peuvent être libérés progressivement. (Morel, 1996).

Les précipitations sont essentielles pour alimenter la solution du sol et mettre les éléments nutritifs à la disponibilité des plantes. Lorsqu'une pluie tombe à la surface du sol, une partie est interceptée par la végétation et peut être rapidement évaporée dans l'atmosphère. Cependant, dans un sol cultivé, cette interception est souvent bien moindre. L'eau qui arrive au sol peut s'infiltrer ou elle peut ruisseler à la surface. La quantité d'eau qui s'infiltré dans le sol dépend de la structure du sol et du type de précipitation. Avec une grande intensité de pluie, par exemple de plusieurs dizaines de millimètres dans un court laps de temps, le ruissellement qui entraîne une importante quantité d'éléments nutritifs est quasi inévitable. (INRA, 2004).

2.4.2 Capacité d'échange cationique et saturation du sol

La capacité d'échange cationique d'un sol est une prédisposition du sol à retenir le maximum de cations échangeables à un pH donné. C'est la somme des sites d'échange qui peuvent être occupés par de différents cations. La capacité d'échange cationique exprime aussi la capacité du sol à résister à un changement de pH. Elle est proportionnelle aux teneurs en argile et en matière organique du sol et elle constitue un indice de fertilité d'un sol. Généralement, les sols sablonneux à faible taux de matière organique et d'argile se caractérisent par une faible capacité d'échange cationique. Par contre, une capacité d'échange cationique élevée est caractéristique aux sols argileux ou organiques. L'équilibre d'échange cationique est atteint dans un temps très court. Certains cations sont retenus sur les sites d'échange plus facilement que d'autres, car l'argile et la matière organique peuvent avoir plus d'affinité avec eux. La quantité d'ions fixés par l'argile est plus grande quand la concentration de ces ions est plus grande dans la phase liquide du sol, quand la charge d'ions est plus élevée, quand le rayon de l'ion hydraté est plus petit et qu'il n'est échangé dans aucun complexe ce qui pourrait alors en diminuer la disponibilité (Morel, 1996).

Avec l'augmentation du taux d'argile et de la matière organique du sol, la capacité d'échange cationique augmente également et une plus grande quantité d'éléments nutritifs ajoutés avec la fertilisation peut être adsorbée sur les sites d'échange cationique.

La disponibilité des éléments nutritifs dans le sol est traduite par le pourcentage de saturation du sol. Les milieux récepteurs ont une capacité de retenir les éléments nutritifs dans le sol. La saturation du sol est le niveau d'occupation des sites d'échange cationique. Le paramètre de saturation du sol est surtout utilisé pour exprimer la disponibilité du phosphore dans le sol. La saturation du sol en phosphore est un rapport entre la quantité de phosphore disponible dans le sol et la capacité de rétention de ce sol en phosphore. Cette capacité de rétention est habituellement liée au contenu du sol en hydroxydes de fer et d'aluminium. La saturation en phosphore est donc généralement déterminée par le rapport entre la quantité de phosphore et la quantité d'aluminium dans le sol (CRAAQ, 2003).

La surfertilisation des sols agricoles entraîne l'enrichissement des sols en phosphore, mais aussi l'augmentation du taux de saturation. Cette augmentation entraîne une diminution de rétention de cet élément dans les particules du sol. Plus le taux de saturation du sol est élevé, plus la solubilisation du phosphore augmente et celui-ci devient plus disponible dans l'eau de ruissellement. Lorsque la saturation du sol en phosphore est peu élevée, l'augmentation de cette saturation peut être favorable au niveau agronomique en rendant disponible aux cultures de plus grandes quantités de cet élément. Cependant, les risques environnementaux que représente le phosphore pour la qualité de l'eau augmentent également, car les pertes de phosphore par ruissellement et par lessivage sont aussi plus importantes (MDDEP, 2002a), (CRAAQ, 2003).

3 PROBLÉMATIQUE DE L'ÉROSION DES SOLS EN ESTRIE

Le Québec se caractérise par un bilan hydrique excédentaire. L'eau de pluie ne pouvant pas être absorbée par le sol ruisselle à sa surface. Environ 30-40 % du volume d'eau de précipitation est transporté jusqu'au réseau hydrographique. Cette eau fournit l'énergie pour transporter les sédiments et les substances dissoutes tout au long de son trajet (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2009c). Plus les précipitations sont abondantes, plus l'eau de ruissellement est rapide et capable de transporter de grandes quantités de sédiments chargés d'éléments nutritifs sur la surface du sol. La quantité d'eau de pluie qui retourne aux cours d'eau varie selon les régions. Elle est d'environ 40 cm dans l'ouest de la province et 91 cm sur la Côte-Nord. Également, cette quantité peut varier selon l'année, la saison et la topographie du terrain (IRDA, 2008b).

L'érosion hydrique est la forme de dégradation du sol la plus grave. Déjà en 1986, le Conseil des Sciences du Canada a déclaré que jusqu'à 30 % des terres vallonnées cultivées au Québec étaient modérément ou fortement érodées. Les pertes des revenus attribuables à l'érosion peuvent varier entre 20 et 70 %, en fonction du sol et du climat (Conseil des sciences du Canada, 1986).

En Estrie également, le bilan hydrique est excédentaire. Le phénomène de l'érosion s'accroît ici depuis plusieurs années. Selon les études du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), environ 50 % de terres agricoles en Estrie présentent un risque d'érosion. Environ 22 % de propriétaires des entreprises de grandes cultures observent une érosion hydrique au champ et environ 9 % d'entre eux observent la même situation près des cours d'eau. Parmi des producteurs de pommes de terre, environ 50 % ont déclaré la présence de signes d'érosion dans leurs champs. De plus, les exploitants des entreprises de production animale en Estrie, surtout de production laitière et ovine, constatent la présence d'érosion sur les terres agricoles. Parmi les propriétaires d'entreprises de production laitière, 29 % ont déclaré en 2000 la présence d'érosion hydrique au champ et 9 % l'ont constaté sur les rives des fossés et des cours d'eau. En ce qui concerne les entreprises de production ovine, 40 % d'entre elles sont touchées par l'érosion au champ et 20 % le sont sur les rives des fossés et des cours d'eau.

Également, d'autres productions végétales et animales présentent des signes d'érosion dans les champs (GREPA, 2000).

L'érosion du sol est un processus naturel qui ne peut pas être éliminé, mais qui peut, par contre, être contrôlé. Selon les impacts agronomiques ou environnementaux de l'érosion, un seuil de tolérance différent peut être établi. D'un point de vue environnemental, c'est ne pas la perte de sol d'un champ qui est importante, mais sa fraction atteignant le réseau hydrographique. D'un point de vue agronomique, les pertes de sol qui sont inévitables doivent quand même garantir le maintien d'un bon niveau de productivité des sols à long terme. Le degré de tolérance des pertes des sols agricoles au Québec a été établi entre 2 et 11 t/ha, en fonction de la profondeur des sols (CPVQ, 1995).

Au printemps 2005, le MAPAQ a mené un inventaire des pertes des sols en Estrie. L'étude a démontré que de grandes quantités de sédiments, jusqu'à 30 à 50 t/ha, peuvent être déplacées annuellement à cause de l'érosion hydrique. Ces sédiments se retrouvent souvent dans les cours d'eau et les fossés. À cause de ce phénomène, une dégradation de plus en plus sévère de la qualité de l'eau de surface dans les milieux agricoles de la région est observée (MAPAQ, 2006 a).

3.1 Portrait de l'agriculture en Estrie

Jusqu'à la fin du 18^{ème} siècle, les terres des Cantons- de- l'Est étaient couvertes par de vastes forêts vierges. Dans les années 1800-1810, la région devient la scène d'une grande activité. Cette période se caractérise par le défrichage massif et la construction de maisons et de scieries. En 1833, un grand nombre d'immigrants venus des îles Britanniques s'installe dans la région, ce qui augmente le nombre de maisons et de scieries construites, ainsi que d'écoles, d'églises et de chemins (Ministère de l'Agriculture, 1943).

Pendant des années, les produits des forêts vierges ont été la principale source de revenus d'un grand nombre de colons. Une partie du bois coupé était brûlée pour l'extraction de la potasse. Progressivement, les activités agricoles se développent dans la région, surtout

l'industrie laitière avec la production de beurre et de fromage, ainsi que la production de miel, de sucre d'érable et de sirop d'érable (Ministère de l'Agriculture, 1943).

Présentement, environ 4 % de la population du Québec vit en Estrie, soit 288 500 personnes. L'industrie agricole et agroalimentaire procure de l'emploi à 17 500 personnes, soit 12 % de tous les emplois en l'Estrie. Environ 70 % du chiffre d'affaires de cette industrie est généré par l'agriculture et la restauration. La transformation des aliments et les boissons occupent une place moins importante, mais ce secteur est en pleine expansion (MAPAQ, s.d.).

Environ 6 % de la superficie cultivée au Québec se trouve en Estrie. La Commission de protection du territoire agricole a délimité 68 % de la superficie de la région de l'Estrie comme étant une zone agricole permanente. Cette zone constitue un territoire privilégié pour y mener des activités agricoles et forestières. La zone non agricole est constituée par les centres urbains des municipalités et en partie par la forêt. Les activités agricoles les plus importantes sont la production laitière et porcine, suivies de la production de bovins de boucherie. Les fermes agricoles sont réparties assez uniformément en région, sans zones de grandes concentrations (MDDEP, 2002).

Présentement, les eaux de surface en Estrie reçoivent toujours certaines quantités de pollution d'origine agricole, surtout en provenance de l'entreposage non réglementaire des fumiers. Cependant, la situation s'améliore progressivement grâce au nombre croissant de systèmes d'entreposage des fumiers conformes à la réglementation. En 2007, environ 75 % des engrais de ferme ont été entreposés dans des structures étanches (MAPAQ, s.d.).

3.2 Types des sols en Estrie et leurs caractéristiques

Les sols au Canada sont classifiés selon le système canadien de classification des sols. Dans la hiérarchie de ce système, l'ordre est le niveau le plus élevé donc le plus général. Les ordres des sols sont ensuite divisés en groupes, familles, séries et phases.

La formation d'un sol dépend de plusieurs facteurs, comme le climat, la végétation, le type de roche-mère et la topographie. Une interaction entre ces facteurs a déterminé une formation de sols spécifiques à chaque région. Chaque ordre de sol reflète les effets des conditions de l'environnement pendant le processus de formation du sol. Les sols au Canada appartiennent à dix ordres différents (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2008).

Les séries comprennent tous les sols développés sur les mêmes roches-mères et présentent les mêmes horizons. Le type comprend tous les sols, dont la couche de la surface a la même texture dans une série. La phase d'un type de sol est une variation du type qui a été causée par un facteur local (Ministère de l'Agriculture, 1943).

En Estrie, les sols reconnus font partie principalement de trois ordres. Environ 35 % des sols appartiennent à l'ordre brunisol, 34 % à gleysol et 17 % à podzol. La nature des matériaux sur lesquels les sols se sont développés influence la structure des sols. Environ 83 % des sols de la région se sont développés sur des dépôts glaciaires (till). Ces sols ont les textures de loam à loam sableux. Les loams, en général, conviennent à un travail réduit du sol. Parmi ces sols en Estrie, 47 % sont bien égouttés, 21 % s'égouttent difficilement et environ 7 % des sols sont mal égouttés. Les sols loameux sont naturellement pauvres en phosphore assimilable et en potassium échangeable. Ils ont par contre une bonne capacité d'échange et un bon pouvoir de rétention d'eau et d'éléments nutritifs. Ces caractéristiques assurent de bonnes récoltes dans les conditions normales (MAPAQ, 2002).

En Estrie, on trouve trois principales séries de sols en culture : Greensboro, Calais et Magog. Environ 17 % de sols dans la région appartiennent à la série Greensboro, 8 % à la série Calais et 7,8 % à la série Magog (MAPAQ, 2002).

Les sols Greensboro occupent la superficie la plus importante de la région. On les trouve dans les MRC de Memphrémagog, de Coaticook, du Haut-Saint-François et du Granit. En général, ces sols sont assez riches en phosphore total, mais cet élément est souvent sous forme peu assimilable, étant principalement sous une forme organique. Les sols Greensboro

contiennent aussi de bonnes quantités de potasse, ainsi que de magnésium et de calcium. La texture de ces sols est excellente. Ils contiennent du limon et du sable dans à peu près les mêmes proportions. Cette caractéristique assure à ces sols une bonne rétention de l'humidité et en même temps une bonne capacité d'égouttement. La couche supérieure des sols cultivés Greensboro est brune foncée et la couche plus profonde est plus claire (Ministère de l'Agriculture, 1943).

La superficie des terres de série Greensboro se caractérise par une topographie inclinée et ondulée, avec des pentes entre 5 et 12 %. Leur surface est d'habitude pierreuse. Ces sols conviennent à toutes sortes de cultures (MAPAQ, 1996). Les sols Calais ont été formés sur les mêmes matériaux que les sols Greensboro, mais ils ne sont pas aussi bien égouttés. Une grande partie de ces sols en Estrie se trouve dans le sud-est des comtés de Stanstead et de Compton. La terre Calais se caractérise par une couleur verdâtre lorsqu'elle est sèche. La composition chimique de ces sols est semblable au sol Greensboro, cependant il est plus riche en phosphore total et assimilable. Le sol Calais est très riche à la surface en matière organique et a une bonne capacité de rétention de l'humidité. La porosité de ces sols est modérée et leur drainage va de moyen à mauvais. L'eau s'infiltré très lentement dans le sol, mais suffisamment pour que le terrain puisse être cultivé. Ce type de sol est rencontré sur les longues pentes d'environ 5 % des hautes collines. Là où les pentes sont plus prononcées, le risque d'érosion est élevé et peut rendre ces sols impropres à la culture (Ministère de l'Agriculture, 1943).

Le troisième type de sols en importance dans la région, la série Magog, est caractérisé par une couche compacte et pierreuse à la surface et il est très difficile à travailler. Cependant, sous cette couche pierreuse se trouve une couche plutôt meuble. Ce type de sol est assez riche en éléments nutritifs, il a une bonne teneur en phosphore assimilable, en calcium et en magnésium (Ministère de l'Agriculture, 1943). La texture de ces sols est loameuse ou loameuse-sablonneuse et le pH est neutre. Sa couleur est terne et sombre (MAPAQ, 1998). La topographie de ces sols va de plate à ondulée et l'inclinaison est généralement inférieure à 6 %, l'égouttement est d'habitude mauvais et sa couleur de surface est blanche grisâtre (MAPAQ, 1996).

3.3 Causes de l'érosion hydrique en Estrie

Le déboisement non contrôlé dans la région de l'Estrie a commencé au début du XX^{ème} siècle. Le but des coupes de forêts était de convertir les terrains boisés en terres agricoles. La production agricole devenait, avec le temps, de plus en plus importante à cause de l'augmentation de la population locale. Une augmentation des superficies des champs agricoles a exposé de vastes surfaces de terre à l'érosion hydrique (Ministère de l'Agriculture, 1943).

Déjà dans les années 1938-1940, il a été reconnu que l'érosion des sols dans la région de l'Estrie constituait un grave problème. Les pluies violentes qui tombaient dans la région pendant l'été entraînaient les boues à travers les champs et le long des chemins, pour aboutir dans les rivières. Cette érosion provoquait une perte importante de bonne terre arable et affectait la qualité de l'eau (Ministère de l'Agriculture, 1943).

Présentement, dans la région de l'Estrie l'érosion hydrique est toujours importante. Elle se produit particulièrement au printemps, quand le sol est saturé d'eau et la végétation est absente. Aussi les orages violents d'été saturent le sol rapidement et occasionnent un important ruissellement de la surface (MAPAQ, 2006).

Plusieurs facteurs influencent l'érosion des sols dans la région de l'Estrie, autant les facteurs environnementaux que les méthodes culturales employées dans les champs agricoles. Les plus importantes causes de l'érosion hydrique en Estrie sont :

- sols légers qui sont composés majoritairement de loams. Ces sols sont plus fragiles et plus sujets à l'érosion,
- relief avec beaucoup de pentes,
- augmentation considérable des cultures annuelles au détriment des cultures fourragères dans la région,
- pratiques culturales comme les sols laissés à nu pour l'hiver ou le passage de la machinerie lourde.
- conditions climatiques : les fortes pluies, la fonte des neiges (MAPAQ, 2006; MAPAQ, 2006a).

Le contrôle des conditions qui ont un impact sur l'érosion des sols figure parmi les importants enjeux environnementaux de notre temps. Pour pouvoir limiter l'érosion hydrique, il faut d'abord étudier les composants qui favorisent ce phénomène dans chaque région.

Les principaux éléments qui ont un impact sur l'érosion hydrique dans la région de l'Estrée et qui seront décrits plus en détail sont : l'augmentation de taille des parcelles, les pluies violentes, les cultures annuelles, les monocultures, les sols à texture fine, à faible teneur en matière organique et mal drainés, les terrains en pente et les cultures dans le sens des pentes.

3.3.1 Augmentation de la taille des parcelles

Une tendance forte de l'agriculture des dernières décennies dans les pays industrialisés est l'augmentation de la taille des parcelles et la mise en cultures de très grandes surfaces. Ce phénomène s'explique par la volonté d'augmenter la productivité du travail, et ce, par l'utilisation de machinerie à dimensions de plus en plus grandes. L'augmentation de la taille des parcelles a été traduite par l'arrachage des haies, la suppression des talus et des fossés, par le drainage de zones humides et le recalibrage de cours d'eau. Ces pratiques ont contribué à une amplification du processus d'érosion et de ses effets néfastes sur l'environnement (Prieur, 1995). Le découpage parcellaire qui existait autrefois contribuait à la maîtrise du ruissellement érosif. L'accroissement de la taille des parcelles augmente les risques d'érosion et de déplacement de la terre en dehors du territoire agricole (INRA, 2004). L'eau qui coule à la surface ne rencontre plus d'obstacles et arrache ce qui reste au sol. En plus, les terrains érodés sont souvent ravagés par des inondations périodiques. (Pillet, 1989).

L'augmentation de la taille des entreprises agricoles en Estrie est un fait. Depuis 1993, le nombre d'exploitations agricoles est passé ici de 2 774 à 2 400, ce qui représente une diminution de 13 %, tandis que la superficie des terres agricoles n'a pas changé (MAPAQ, 2006). Les plus grandes entreprises agricoles aménagent de grands champs pour faciliter leur exploitation par l'utilisation d'une machinerie de plus en plus grosse.

3.3.2 Pluies violentes

La pluie constitue un important facteur d'érosion. L'action destructrice des précipitations est liée à la forte énergie cinétique des gouttes d'eau lorsqu'elles tombent au sol. Cette énergie est augmentée par la vitesse de chute et elle est proportionnelle à la taille des gouttes de pluie. Au-delà d'un certain seuil d'intensité de précipitations, l'impact des gouttes provoque l'arrachement de particules de terre, leur dispersion aux alentours et une désagrégation des mottes. Les particules de terre peuvent être projetées à une distance de quelques dizaines de centimètres (Musy, Soutter, 1991). Lorsqu'elles ne sont plus liées en mottes, elles sont facilement entraînées par l'eau de ruissellement et transportées au bas de la pente. Le sol dégradé perd progressivement sa capacité à emmagasiner l'eau de pluie par infiltration et par rétention, ce qui augmente encore plus la quantité d'eau qui ruisselle. Cependant, ce n'est pas le nombre de périodes de précipitations qui joue un rôle principal dans la dégradation de la structure du sol, mais l'intensité de la pluie (INRA, 2004).

Les études menées dans le bassin versant de la rivière aux Brochets en 2002 ont démontré que 80 % de la charge des sédiments atteint le réseau hydrographique pendant une courte période de 28 jours au total, ce qui correspond à 8 % de l'année. Les journées pendant lesquelles le ruissellement a été élevé ont été concentrées durant les périodes d'activités hydrologiques du printemps et de l'automne (Beaudin, 2006).

En Estrie, les quantités de pluie se situent à environ 1027 mm annuellement. Les précipitations moyennes pendant la période de végétation, entre le mois d'avril et le mois de novembre, varient entre 660 mm et 760 mm (Environnement Canada, 2009).

Jusqu'à présent, il n'existe pas d'étude ou de documents officiels traitant de la tendance observée au Québec dans l'intensité des pluies. Au Canada, quelques articles scientifiques ont présenté certaines observations dans cette matière. Selon ces études, pour la période de 1950 à 2003, le nombre de jours de pluie a augmenté de trois à cinq jours annuellement. Aussi, malgré que les tendances concernant les pluies intenses ne soient pas très évidentes, les accumulations de pluies quotidiennes sont à la hausse à peu près partout au Canada. De plus, une hausse des pluies fortes de printemps sur l'est du Canada a été notée depuis

plusieurs années. La plupart des modèles globaux et régionaux du climat prévoient une augmentation des pluies fortes avec la hausse des températures dans le futur (Adrien, 2009). On peut donc s'attendre à plus de précipitations dans la région de l'Estrie à l'avenir. Également, plus de pluies violentes risquent de survenir en région, ce qui augmente le risque d'érosion hydrique.

3.3.3 Cultures annuelles et monocultures

Les cultures annuelles et monocultures exigent un travail intensif du sol. Le passage fréquent des instruments agricoles favorise les déplacements d'importants volumes de sol, sous l'effet de la gravité, du sommet au pied des collines. Au Québec, la proportion des terres cultivées ayant un risque d'érosion attribuable au travail du sol est élevée (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2000). Dans les cultures annuelles et les monocultures, le passage fréquent de la machinerie est nécessaire, car une bonne préparation des champs est essentielle. Alors, peu de résidus de cultures sont habituellement laissés sur le sol dans ce type de cultures, ce qui diminue l'apport de la matière organique. En plus, la perte de la matière organique est accélérée par une rapide oxydation et un coefficient de minéralisation élevé, ce qui épuise progressivement le sol et l'appauvrit à long terme. L'appauvrissement d'un sol contribue à son tour à la détérioration de sa structure (Entente auxiliaire Canada – Québec sur le développement agro-alimentaire, 1990).

Les cultures annuelles et les monocultures laissent le sol à nu pendant un certain temps, ce qui présente un risque d'érosion élevé. Les cultures elles-mêmes, ainsi que les résidus de culture laissés à la surface, protègent le sol contre l'érosion et par conséquent contre la dégradation de la structure. Les surfaces du sol qui ont été mises à nu lors des semis sont fragiles et vulnérables à l'érosion, car elles n'ont aucune protection jusqu'à la levée des plantes. Donc, si dans le mois qui suit le semis, on enregistre des précipitations intensives, les sols sans protection sont alors exposés à l'action des gouttes de pluie. À ce moment de l'année, les fossés, les cours d'eau et les lacs reçoivent de grandes quantités de sédiments, ce qui contribue à la dégradation des eaux de surface en Estrie et au Québec en général (CPVQ, 1999).

Au Québec, l'augmentation des superficies de cultures annuelles par rapport aux superficies totales en cultures a connu une augmentation de 8 % entre 1998 et 2007 et se situe en 2007 à 52 % des superficies totales en culture. En Estrie, une augmentation de 7 % des superficies de cultures annuelles par rapport aux superficies totales en culture a été enregistrée entre 1998 et 2003. Ensuite, une diminution de 3 % a été notée entre 2003 et 2007, pour se situer à 22 % en 2007 (MAPAQ, s.d.).

Les études menées par le MAPAQ ont démontré qu'en Estrie, depuis les 15 dernières années, les superficies de cultures vivaces ont diminué considérablement. Les superficies de fourrages ont diminué de près de 10 000 ha et les superficies de pâturages, de près de 9 500 ha. Par contre, les céréales et les protéagineux ont connu une croissance importante de 15 % entre 1993 et 2000 pour chacun de ces secteurs. Les principales céréales cultivées dans la région de l'Estrie sont : le maïs-grain, l'avoine, l'orge et les céréales mélangées. Certaines cultures annuelles ont connu une augmentation marquée de la production. Par exemple, entre 1993 et 2004, la superficie de culture du soya est passée de 102 ha à 3958 ha, ce qui constitue plus de 3 881 % d'augmentation, et celle du maïs-grain de 2245 ha à 7759 ha, ce qui constitue environ 345 % d'augmentation pour cette culture. Le nombre d'entreprises cultivant en Estrie des céréales et des protéagineux a diminué d'environ 10 %, mais la superficie moyenne des cultures a augmenté de plus de 70 %, passant d'environ 15 ha par ferme à plus de 25 ha par ferme (MAPAQ, 2002). On voit clairement une tendance en agriculture dans la région, qui est celle d'aller vers les cultures annuelles et vers l'augmentation de la superficie des fermes. La recherche de rentabilité est possiblement la cause de cette situation. Les entreprises agricoles doivent s'adapter aux changements des marchés en adaptant leur production selon la demande. Pour d'autres types de culture, les superficies occupées par différentes productions ont très peu changé depuis les 15 dernières années (MAPAQ, 2002).

3.3.4 Type du sol

La perméabilité du sol et sa capacité de rétention en humidité favorisent l'infiltration de l'eau et en même temps réduisent le ruissellement. Sous l'action de la pluie, la surface du sol peut former une croûte qui diminue la vitesse d'infiltration. Également, un sol saturé en

eau ne peut pas en absorber davantage. L'épaisseur du sol joue aussi un rôle important dans le ruissellement. Un sol peu profond étalé sur une roche-mère imperméable constitue une zone favorable au ruissellement de la surface.

Les expériences menées au sud de la France ont démontré une forte relation positive entre le taux de matière organique et d'argile dans le sol et la stabilité de la structure. Cette stabilité est favorisée par un taux élevé de matière organique et d'argile, elle est par contre pénalisée par un taux élevé de sable dans la composition du sol (INRA, 2004).

Les sols Greensboro et Calais ont une structure fragile qui se dégrade assez facilement. La partie minérale des sols Greensboro est composée d'environ 42 % de sable, 41 % de limon et 17 % d'argile. Le taux de matière organique est d'environ 5 %. Un taux élevé de sable, ainsi qu'un faible taux de matière organique expliquent une tendance de ces sols à s'éroder facilement. Les séries des sols Calais et Magog contiennent respectivement 42 % et 45 % de sable, 46 % et 38 % de limon et 12 % et 17 % d'argile. Ces sols sont plus riches en matière organique, laquelle peut atteindre jusqu'à 10 % du volume de couche arable. Cependant, le taux élevé de particules fines ainsi qu'un mauvais égouttement expliquent une érosion importante lorsque les conditions sont propices. Les sols souvent saturés en eau, ce qui est le cas en Estrie, subissent une érosion plus facilement que ceux qui s'égouttent bien (Ministère de l'Agriculture, 1943; MAPAQ, 1996).

3.3.5 Profil topographique du terrain

La topographie du terrain est un élément qui joue un rôle important dans le processus de l'érosion. Il y a deux facteurs de topographie qu'il faut prendre en considération : l'inclinaison et la longueur de la pente. Les deux facteurs ont un impact cumulé en lien avec l'ampleur de l'érosion. Ils contribuent à une érosion de plus en plus accélérée de l'amont vers l'aval de la pente. Les deux éléments sont corrélés et il est difficile de hiérarchiser l'importance de chacun d'entre eux (INRA, 2004).

L'Estrie se caractérise par un relief vallonné. On y retrouve trois collines qui traversent la région du sud-ouest vers le nord-est. Leur topographie est variable. On retrouve en même

temps des terres peu nivelées ainsi que des terrains en pente. Seulement la série Magog parmi les principales séries de l'Estrie présente une topographie aplatie, avec des pentes entre 0 et 2,5 %. Les séries Calais et Greensboro se caractérisent habituellement par des pentes entre 2,5 % et 7 %. Une partie des sols Greensboro est même située sur des pentes de plus de 7 %, ce qui augmente considérablement le risque d'érosion (Ministère de l'Agriculture, 1943).

3.3.6 Cultures dans le sens des pentes

Les labours et les hersages dans le sens de la pente figurent parmi les principales causes anthropiques de l'érosion hydrique dans les champs agricoles. Le sens du travail du sol influence le sens de l'écoulement de l'eau sur un champ agricole (INRA, 2004).

Les cultures le long des pentes ont été pratiquées massivement dans le passé, car les terres au Québec ont été cadastrées perpendiculairement aux cours d'eau, en bandes étroites, et ce type de culture était le plus simple pour les agriculteurs (CPVQ, 1986).

Aujourd'hui, les effets néfastes de la culture dans le sens des pentes sont constatés et ce type de travail du sol est pratiqué de moins en moins souvent. En plus, les pratiques de travail minimal du sol ou les pratiques culturales sans travail du sol gagnent en l'importance.

3.4 Impacts d'érosion hydrique

La modification des écosystèmes naturels dans le but d'exploiter les terres agricoles ne s'est pas faite sans effet sur l'environnement. Le sol privé de son couvert végétal n'est plus en mesure de retenir l'eau de précipitation laquelle s'écoule rapidement, en modifiant en même temps le débit des cours d'eau qui devient par la suite plus irrégulier. L'érosion hydrique constitue une des formes les plus visibles de la dégradation des sols. Elle se manifeste à des degrés différents dans tous les champs agricoles, mais elle n'est pas nécessairement reconnue par les agriculteurs.

Les impacts de l'érosion hydrique sont en même temps agronomiques et environnementaux. Les impacts agronomiques se traduisent par des pertes de sol arable, par la détérioration de la structure du sol et par la perte de productivité des champs. Par contre, la dégradation de la qualité de l'eau causée par un ruissellement chargé de sédiments, d'éléments nutritifs et de pesticides constitue l'impact environnemental de l'érosion hydrique (CPVQ, 1995).

Une rivière qui demeure à son état naturel reste en équilibre. Elle évolue tant que ses paramètres comme la largeur, la profondeur, la pente et le débit s'ajustent aux conditions d'environnement. Si ces conditions changent, la rivière sera poussée à s'ajuster aux paramètres qui lui ont été imposés, avec des effets parfois désastreux (Trencia, 1987).

Les études menées au Québec en 2001, ont estimé les pertes causées par l'érosion hydrique entre cinq et 17 millions de dollars par année, en excluant les coûts associés à la dégradation de la qualité de l'eau (COGEBY, 2001).

3.4.1 Pertes des sols — coûts élevés

La couche arable du sol est de faible épaisseur. L'érosion des sols agricoles entraîne l'amincissement de cette couche, car la régénération n'arrive pas à couvrir les pertes. La productivité de ces sols risque de diminuer et les coûts des pertes de sol peuvent être élevés (INRA, 2004). Au Québec, les pertes annuelles de sol arable sont estimées à trois millions de tonnes (COGEBY, 2001). La perte de sol agricole supérieure à 1 à 7 tonnes par hectare par année peut menacer la durabilité de la production agricole. Le taux maximal de tolérance agronomique de pertes des sols, généralement admise au Québec est de 6 t/ha/an. Cependant, les études de perte de sol menées entre 2000 et 2003, par l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA), dans le bassin versant de la rivière aux Brochets, ont démontré une perte d'environ 50 t/ha/an. Les pertes totales de sédiments, à l'échelle du bassin versant de 630 km², ont atteint 31 267 tonnes par année. Ces études ont confirmé que l'érosion hydrique constitue un important enjeu au plan environnemental dans cette région (Beaudoin, 2006). D'autres expériences menées dans le bassin versant de la rivière Yamaska ont démontré une perte annuelle des sols de 5 à 75 tonnes par hectare. Cette perte variait selon les conditions du sol (à nu ou en végétation), ce

qui donne au total environ 300 000 tonnes par année à l'échelle du bassin versant (COGEBY, 2001). Les sédiments qui s'accumulent dans le bas des pentes, dans les fossés et dans les cours d'eau obstruent les sorties des drains agricoles et des ponceaux. Ces impacts occasionnent des coûts considérables d'entretien des structures ou les rendent inopérantes (Trencia, 1987).

La perte de sol causée par l'érosion hydrique peut être estimée selon l'équation universelle de perte de sol, USLE. Elle permet d'estimer la perte de sol pour un terrain donné dans le but de choisir la meilleure technique de conservation à employer. Les pertes de sols peuvent varier et dépendent de la topographie du terrain, du type de sol, des méthodes culturales et du climat. Les études de perte des sols, menées en 1981 à Lennoxville en Estrie ont démontré que sur le même type de sol, sur une pente de 10 %, les pertes annuelles de sol dépendent de type des cultures et se situent à :

- 190 kg/ha pour une prairie permanente
- 1t/ha pour les cultures du maïs sur chaume, cultivé dans le sens de la pente
- 1t/ha pour les cultures du maïs fourrager, cultivé dans le sens de la pente
- 31,1 t/ha pour un sol nu.

Les premiers 15 cm du sol constituent la partie la plus fertile du profil. Cette partie pèse environ 2 000 tonnes par hectare. On peut donc évaluer à 64 ans le temps nécessaire pour faire disparaître cette couche arable, si la terre est laissée à nu et si les pertes sont constantes de 31 t/ha/an (CPVQ, 1986).

3.4.2 Détérioration de la structure du sol

Une bonne structure de couche arable du sol est essentielle dans les activités agricoles. Elle assure un équilibre entre les fractions du sol, soit solide, liquide ou gazeuse. Une bonne structure est constituée des gros agrégats stables. Elle permet aux cultures d'avoir à leur disposition tous les éléments nécessaires à une croissance optimale.

La dégradation de la structure se traduit par le bris des agrégats et elle résulte principalement des effets mécaniques, comme le compactage par machinerie. La structure du sol peut être affectée également par une pluie forte. L'énergie des gouttes est capable de

détruire les agrégats du sol en les fractionnant en petites particules libres. Les particules dégradées du sol ne sont plus retenues et, les plus fines surtout, peuvent être facilement entraînées avec l'eau de ruissellement vers les cours d'eau (Entente auxiliaire Canada – Québec sur le développement agro-alimentaire 1990). La matière organique, particulièrement accompagnée d'argile, fait partie de la substance qui cimente les particules de terre en agrégats. La perte de certaines quantités de matière organique et d'argile causée par l'érosion hydrique diminue donc la stabilité de ces agrégats, détériore la structure du sol, qui dès lors, devient un milieu de moins en moins favorable aux racines des plantes. Le sol en s'appauvrissant en argile et en matière organique diminue également sa capacité de rétention d'eau et d'éléments nutritifs. L'érosion hydrique favorise la décomposition des agrégats et le compactage et elle en est en même temps le précurseur (Pillet, Longet, 1989).

3.4.3 Perte de la fertilité et diminution du rendement

La couche supérieure du sol est la couche la plus fertile mais au même temps elle est la plus vulnérable à l'érosion hydrique (INRA, 2004). Tous les types de sol peuvent, à des degrés différents, être affectés par ce phénomène. Les terrains touchés par l'érosion sont identifiables par des rendements plus faibles et par des teintes de sol plus pâles. Le matériel érodé est ensuite déposé sur des replats situés en aval (MAPAQ, 2007).

Les mécanismes d'érosion éliminent en premier lieu la matière organique du sol, l'argile et les fractions limoneuses fines. Ces fractions sont les plus chargées d'éléments nutritifs. Leur lessivage entraîne la perte de fertilité des sols et il peut réduire les rendements des cultures, si les éléments nutritifs perdus ne sont pas remplacés en quantités suffisantes (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2009c). Au Québec, les pertes de fertilité sont partiellement compensées par l'application croissante d'engrais, mais cela constitue une dépense supplémentaire pour l'agriculteur (Trencia, 1987). En plus, l'application excessive d'engrais entraîne un processus d'acidification des sols. Il est important de comprendre que l'épandage supplémentaire ne peut pas neutraliser les conséquences néfastes de l'érosion sur les propriétés physiques des sols (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2009c).

À ce jour, il n'y a pas de méthode d'évaluation de la perte de fertilité des champs agricoles et de la perte de rendements due à l'érosion hydrique. Cependant, quelques modèles sont actuellement en cours de développement. Le modèle SimPLE.ca (Simulator of productivity loss due to erosion for Canada) saisit les liens principaux entre la baisse de rendement et l'érosion des sols dans différentes régions agricoles du Canada. Ce modèle a été étudié pour le blé de printemps et le maïs. Il prend en considération trois paramètres essentiels, soit la disponibilité en eau (W), en azote (N) et en phosphore (P) sur une base annuelle. Ces paramètres ont été caractérisés par des facteurs de disponibilité élaborés, se situant entre 0 et 1, mis en relation avec le rendement de la manière suivante :

$$\text{Rendement/productivité (Mg ha-1)} =$$

$$\text{Rendement maximum potentiel (Mg ha-1)} \times W \times N \times P$$

Plusieurs autres facteurs ont été pris en considération dans ce modèle pour définir les paramètres principaux, W, N et P, tels que la capacité de rétention en eau du sol, l'humidité disponible durant l'été, la minéralisation organique, le dépôt atmosphérique, la fertilisation appliquée en azote et la présence de CaCO₃ dans les couches inférieures du sol (Bremer, 2008).

3.4.4 Détérioration de la qualité de l'eau

L'impact environnemental de l'érosion hydrique est la détérioration de la qualité de l'eau de surface. L'eau de ruissellement qui alimente les rivières et les lacs est chargée de matières en suspension, d'éléments nutritifs et de pesticides. L'apport de ces différentes substances modifie la composition chimique de l'eau et en même temps le milieu de vie de plusieurs espèces de la flore et de la faune (CPVQ, 1986). La pollution des eaux de surface nuit aux organismes aquatiques. Certains d'entre eux ne sont plus capables de s'adapter aux changements des conditions et disparaissent. D'autres organismes plus résistants prennent leur place et souvent deviennent envahissants. Ce phénomène entraîne la disparition de certaines espèces, donc l'appauvrissement de la biodiversité et le déséquilibre d'écosystèmes aquatiques.

Une menace particulière pour l'environnement est le phosphore. La principale cause de migration de cet élément des terres agricoles vers les eaux de surface est l'érosion. Épandu

en trop grandes quantités sur des champs, le phosphore se retrouve dans les cours et les plans d'eau et, à long terme, peut entraîner une eutrophisation des milieux aquatiques. L'eutrophisation est caractérisée par une augmentation de turbidité de l'eau, une augmentation de la biomasse, une diminution générale de la qualité de l'eau et la disparition de certaines espèces (Gaillard, 2001).

Le dépôt de sédiments dans les lacs et les cours d'eau causé par l'érosion hydrique peut diminuer le volume des réservoirs d'eau. L'eau moins profonde se réchauffe plus rapidement. Aussi, la turbidité de l'eau est affectée par des quantités importantes de sédiments dans les lacs et les rivières. Une partie de ces sédiments reste en suspension dans l'eau, diminue sa transparence et absorbe l'énergie solaire, ce qui augmente encore plus la température de l'eau. En plus, avec l'augmentation de la température, la teneur en oxygène dans l'eau diminue. Le réchauffement de la température et l'augmentation de la turbidité de l'eau constituent des conditions défavorables pour la vie aquatique.

Le taux de risque de contamination de l'eau par le phosphore a été calculé pour les régions agricoles au Québec en 1996. Selon les résultats, 19 % des terres agricoles présentent de faibles risques, 72 à 73 %, des risques moyens et 10 %, des risques élevés de contamination des eaux de surface par le phosphore (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2000). La dégradation accélérée des cours et des plans d'eau est un phénomène observé sur tout le territoire du Québec. En Estrie, la situation n'est pas différente. L'accroissement des superficies sous cultures annuelles, l'amélioration du réseau de drainage, le redressement des cours d'eau en milieu agricole et l'augmentation des périodes de pluies violentes ont augmenté le débit et la vitesse d'écoulement de l'eau et ont, par conséquent, entraîné l'érosion des rives des cours d'eau. D'autres facteurs, comme la pente, la présence d'obstacles, la forme des talus, la couverture végétale et le type de sol déterminent l'ampleur de cette érosion (MAPAQ, 2008a).

Tout ce qui modifie la direction de l'eau de ruissellement et augmente la vitesse d'écoulement peut créer des foyers d'érosion. L'érosion peut apparaître au niveau des berges, mais aussi dans le lit du cours d'eau et peut entraîner la régression du fond. Lorsque

le sol des berges ne peut plus résister à la force de gravitation, l'érosion des berges risque d'engendrer le glissement des talus sur les sols argileux. Ces sols sont capables de retenir de grandes quantités d'eau, ce qui les rend encore plus lourds et réduit la force de cohésion entre les particules du sol. Le risque de glissement des talus augmente avec l'élévation de la hauteur du talus et de son angle. Aussi, la présence de ponts et de ponceaux modifie le débit d'écoulement et augmente le risque d'érosion. Tous les obstacles à l'écoulement de l'eau peuvent amorcer le processus d'érosion. Lorsque l'obstacle n'est pas submergé, le courant est détourné et dirigé vers une berge et si le problème n'est pas réglé rapidement, il peut entraîner la formation de méandres. Il est donc important d'inspecter les cours d'eau, de retirer les obstacles et de tailler les branches qui peuvent obstruer l'écoulement de l'eau (MAPAQ, 2008a).

Un autre facteur qui favorise le processus d'érosion près des berges est l'accès des animaux d'élevage aux cours d'eau. Les sabots des animaux offrent peu de surface portante et exercent une importante pression sur le sol. En plus, les animaux ont une tendance à passer toujours par les mêmes endroits pour aller boire ou traverser un cours d'eau et ils détruisent la végétation en laissant les berges dénudées. Ils affaiblissent aussi les berges et entament la formation de foyers d'érosion. En s'abreuvant, les animaux contaminent les cours d'eau avec leurs excréments. Selon le *Règlement sur les exploitations agricoles*, il est interdit de donner l'accès aux animaux aux cours d'eau, plans d'eau ainsi qu'aux bandes riveraines, depuis avril 2005, sauf dans le cas de traverse à gué. Quatre ans après l'entrée en vigueur de ce règlement, certains éleveurs n'ont pas encore appliqué cette interdiction. Il est important d'installer des abreuvoirs et de poser des clôtures pour empêcher l'accès aux cours d'eau aux animaux d'élevage (MAPAQ, 2008a).

Dépendant des conditions du milieu et de l'ampleur de l'érosion qui s'exerce, les effets sur l'écoulement de l'eau peuvent être importants. Les particules érodées entraînées par le ruissellement se déposent dans les zones du cours d'eau où l'eau coule lentement, ce qui diminue la capacité de la rivière à conserver son débit normal. L'obstruction par la sédimentation des berges en amont cause l'érosion des berges en aval (Trencia, 1987). La sédimentation, en obstruant le fond des cours d'eaux et des plans d'eau, chasse les

invertébrés qui servent de nourriture aux poissons. Les graviers cachés sous les sédiments ne peuvent plus servir de frayères aux poissons, les œufs subissent une mortalité massive. Les sédiments endommagent par abrasion les branchies des poissons adultes et nuisent à leur alimentation (Trencia, 1987).

Au Québec, l'eau de surface constitue la principale source d'eau potable pour la population, principalement en milieu rural. Une plus grande pollution des eaux de surface augmente l'importance du traitement de l'eau potable et des coûts qui y sont associés. Le groupe de travail sur le programme d'assainissement des eaux en 1986 a déclaré qu'une politique de conservation des sols constituerait un complément nécessaire à la politique d'assainissement de l'eau potable (Tercia, 1987). Une telle politique n'existe pas actuellement.

La pratique des activités récréatives est moins intéressante dans les régions où l'eau est polluée. Les avis de non-consommation ou de non-baignade découragent les vacanciers qui préfèrent se déplacer sur des distances plus grandes à la recherche d'un environnement moins affecté (Trencia, 1987). La restauration des berges ne peut pas régler les problèmes d'érosion hydrique provenant des champs cultivés. Il faut éliminer ou limiter les sources du problème. La revitalisation des rives constitue cependant un complément important aux bonnes pratiques culturelles (MAPAQ, 2008a).

La problématique de prolifération de cyanobactéries dans les lacs de l'Estrie est de plus en plus grande. Dans cette situation, la réduction des flux de phosphore sur les terres agricoles devient urgente. Une modélisation du fonctionnement hydrologique des processus d'érosion et de la mobilité du phosphore a été effectuée dans le bassin versant de la rivière aux Brochets au sud-ouest du Québec entre 1997 et 2003. Elle a démontré que 50 % du flux du phosphore observé provient d'à peu près 10 % de la superficie totale du bassin. Ces secteurs du bassin sont associés à d'importantes quantités d'eau de ruissellement, à un taux élevé d'érosion et à une fertilisation importante en phosphore (Beaudoin, 2006).

3.4.5 Phosphore, le principal responsable de l'eutrophisation des rivières et des lacs

La problématique de prolifération de cyanobactéries dans les lacs de l'Estrie est de plus en plus grande. Dans cette situation, la réduction des flux de phosphore sur les terres agricoles devient urgente.

Dans les milieux naturels, le phosphore se trouve en grandes quantités dans le sol où il provient de l'altération des phosphates de calcium des roches. Le phosphore figure parmi les principaux éléments nécessaires au développement des plantes. Il est essentiel dans la constitution des tissus des végétaux et des animaux, et il joue dans l'organisme un rôle dans le transfert d'énergie (IRDA, 2008).

La quantité de phosphore dans le sol dépasse les besoins des plantes de 15 à 150 fois (IRDA, 2008). Cependant, seulement une certaine fraction du phosphore total des sols peut être utilisée par les végétaux. C'est le phosphore biodisponible qui est présent dans la solution du sol sous la forme soluble des ions orthophosphates. Le reste des phosphates se trouvent dans le sol sous une forme solide qui est adsorbée par les particules du sol et associée aux composés de fer et d'aluminium. Le phosphore adsorbé par les particules du sol peut être progressivement libéré dans la solution du sol et utilisé par les plantes.

Généralement, l'apport naturel en phosphore biodisponible est insuffisant pour répondre aux besoins des cultures et il figure parmi les éléments limitant la croissance végétale dans les milieux naturels. La fertilisation minérale ou organique est donc pratiquée pour combler ces besoins (IRDA, 2008). Toutefois, si l'apport en phosphore est plus important que les prélèvements par les récoltes, au-delà de certaines quantités, le sol devient saturé et n'est plus capable d'adsorber de plus grandes quantités de phosphore. L'enrichissement des sols agricoles entraîne à ce moment-là des pertes significatives de phosphore par ruissellement vers les cours d'eau et des lacs, ce qui augmente le risque d'eutrophisation (MDDEP, 2005). Le cycle naturel du phosphore dans l'environnement a été considérablement modifié durant les dernières années. Les sources anthropiques contribuent considérablement aux apports de phosphore dans l'environnement. Ces sources peuvent être ponctuelles ou diffuses. Les sources ponctuelles sont des points localisés et facilement identifiables, comme les rejets

industriels, les rejets d'usines de filtration, les rejets d'égouts et les fosses septiques. Les sources diffuses sont réparties sur une certaine superficie et sont difficilement identifiables, comme les apports d'origine agricole. L'intensification de l'agriculture durant le dernier siècle a entraîné une augmentation de l'utilisation des engrais en général. Le taux d'accumulation de phosphore dans les sols agricoles mondiaux a triplé entre les années 1960 et 1990 et a ensuite diminué légèrement durant les 15 dernières années. Les études menées dans la baie Missisquoi ont démontré que les sources diffuses sont responsables des apports d'environ 91 % du phosphore dans l'environnement, et parmi ces apports, 80 % provenaient des sources agricoles (IRDA, 2008).

En Estrie, les études du bilan de phosphore à la surface du sol ont démontré une légère augmentation entre les années 1998 et 2003. Les quantités de cet élément sont passées de 32 kg à 35 kg P₂O₅/ha. Ensuite, une diminution a été constatée. En 2007, le bilan de phosphore de sol arable de la région a été de 28 kg P₂O₅/ha (MAPAQ, s.d.).

Malgré que la plupart des composés du phosphore ne soient pas toxiques pour la faune et la flore, son excès peut avoir des impacts négatifs sur l'environnement. La présence de phosphore dans les milieux humides, surtout sous sa forme assimilable, cause une croissance excessive de la végétation aquatique (algues et phytoplancton), ce qui entraîne une eutrophisation accélérée des plans d'eau (IRDA, 2008a). Parmi les effets négatifs de l'eutrophisation, on note la détérioration de la qualité de l'eau, l'augmentation de sa turbidité, la modification des habitats fauniques, la diminution de la biodiversité, la dégradation de l'aspect visuel du paysage, ainsi que la présence de cyanotoxines lors de la prolifération des cyanobactéries. Certaines cyanotoxines, en concentrations importantes, peuvent être nocives pour les animaux et les humains (IRDA, 2008).

La gestion du phosphore dans le milieu agricole est difficile. D'un point de vue agronomique, il est important d'évaluer les quantités de phosphore qui sont disponibles pour les plantes pendant la durée de la période de végétation. D'un point de vue environnemental, c'est la mobilité du phosphore vers les cours d'eau qui est la plus importante. Finalement, d'un point de vue d'agroenvironnement, il est essentiel de maintenir

un niveau de phosphore pour la croissance des plantes, mais sans affecter l'environnement. Dans cette perspective, l'indice de saturation des sols en phosphore est intéressant. Il permet d'établir le seuil agronomique permettant d'évaluer la réponse des cultures à l'application d'engrais et en même temps le seuil environnemental au-delà duquel le risque environnemental devient important (IRDA, 2008c).

Le processus d'érosion et le transport de sédiments constituent les principaux vecteurs d'exportation du phosphore en dehors des sols agricoles. Le taux de différentes formes de phosphore dans le sol et leur mobilité dépendent des facteurs physico-chimiques des sols: la texture, la matière organique, la présence des composés de fer et d'aluminium. Ce taux dépend également de facteurs biologiques (bactéries, mycorhizes) et des pratiques agricoles: la forme, la période et le mode d'épandage des engrais, ainsi que du type de culture (IRDA, 2008 a). Pendant les pluies intenses, le ruissellement se déclenche lorsque le sol est saturé en surface. Avec l'augmentation de l'énergie de l'eau de ruissellement, le risque d'érosion augmente. Le phosphore soluble se dissout rapidement dans l'eau de ruissellement et est transporté vers les cours d'eau. Si le volume d'eau est important, il contient assez d'énergie pour entraîner de grandes quantités de sédiments chargés d'éléments nutritifs comme le phosphore particulaire. De cette manière, les cours d'eau sont enrichis de toutes formes de phosphore. Le phosphore dissous est disponible pour les plantes immédiatement et entièrement, par contre, le phosphore adsorbé sur les particules du sol est disponible partiellement, en proportion de 7 à 80 % selon plusieurs caractéristiques des sédiments et du réseau hydrographique (IRDA, 2008 b).

Au Québec, les déjections animales sont très souvent utilisées comme engrais de ferme, car la production animale est répandue et la disponibilité de ces déjections est grande. Toutefois, le ratio phosphore/azote des fertilisants organiques dépasse les besoins des plantes en phosphore. Jusqu'au milieu des années 1990, la fertilisation a été généralement basée sur les besoins des cultures en azote. Si on fertilise avec des engrais organiques et si seulement les besoins des plantes en azote sont considérés, un surplus de phosphore est généré. Les études effectuées par le MAPAQ en 1995 et 1996 ont démontré qu'environ

15 % des terres agricoles au Québec se situent dans des classes de saturation élevées et très élevées (IRDA, 2008a).

L'exportation de phosphore des sols agricoles est importante surtout immédiatement après l'application d'engrais organique. Progressivement, les formes solubles de phosphore sont adsorbées sur les particules du sol et leur mobilité diminue. Le temps entre l'épandage des engrais organiques et le transport causé par la pluie est décisif par rapport aux quantités de phosphore entraînées par l'eau de ruissellement. Les risques de transport du phosphore vers les cours d'eau sont également plus grands si des engrais organiques sont appliqués en même temps que les engrais minéraux et si l'épandage des engrais organiques se fait à la surface sans incorporation dans le sol. La période d'application joue aussi un rôle important dans les quantités de phosphore entraîné par l'eau de ruissellement. Au Québec, l'activité hydrologique la plus grande survient au printemps et à l'automne. Les épandages d'engrais organiques durant ces périodes comportent, par conséquent, des risques élevés de contamination des eaux par le phosphore (IRDA, 2008a).

Plusieurs études menées au Québec ont démontré que jusqu'à 90 % des exportations de phosphore peuvent provenir de seulement 10 % du territoire des bassins versants. Il est donc important de bien évaluer et de contrôler autant les sources de phosphore que ses mécanismes de transport, afin de prévenir son transfert vers les cours d'eau (IRDA, 2008a). Le Ministère de Développement durable de l'Environnement et de Parcs du Québec a établi un critère pour la prévention de l'eutrophisation, soit de 0,030 mg de phosphore total (PT) par litre d'eau des lacs. La concentration de cet élément dans certaines rivières au Québec est de deux à six fois plus élevée que ce critère. Par exemple, dans la rivière Yamaska, la concentration de phosphore total dans les années 2001 à 2003 était de 0,106 mg/l. Par contre, dans d'autres rivières, le critère de 0,030 mg PT/l n'est pas atteint. La concentration de phosphore total dans l'eau à l'embouchure de la rivière Saint-François dans les années 2001 à 2003 a été de 0,034 mg PT/l. Cette rivière drainant une superficie de 10 200 km² a transporté 343 tonnes de phosphore total annuellement, pour la même période (MDDEP, 2005).

Dans la région de l'Estrie, le problème des cyanobactéries s'intensifie depuis quelques années. Selon les études menées par le MDDEP, une croissance considérable des plans d'eau touchés par les fleurs d'eau d'algues bleu-vert a été notée depuis 2004 (annexe 2). Le tableau 3.1 présente l'évolution du nombre des plans d'eau touchés par les fleurs d'eau d'algues bleu-vert en Estrie dans les années 2004-2009.

Tableau 3.1 Évolution du nombre des plans d'eau et de municipalités touchés par les fleurs d'eau d'algues bleu-vert en Estrie dans les années 2004-2009, modifié de : (MDDEP (2009)

Année	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Nombre de lacs touchés par des fleurs d'eau	5	5	12	16	17	12
Nombre de municipalités touchées par des fleurs d'eau	4	5	23	30	38	25

3.5 Estimation des pertes de phosphore dans le bassin versant du ruisseau Cass en Estrie

Pour avoir un exemple de valeurs des pertes de phosphore des sols agricoles, une simulation sera effectuée pour le bassin versant du ruisseau Cass situé à Stanstead-Est dans la région de l'Estrie. Pour la simulation, le logiciel ODEP, créé par IRDA sera utilisé.

3.5.1 Méthodologie

L'ODEP est un outil informatique développé à l'intention des services-conseils. Il permet d'évaluer les risques d'exportation de phosphore à l'échelle d'une parcelle ou d'un ensemble de parcelles, à partir de données relatives aux exploitations agricoles. De plus, une évaluation du taux d'érosion, des lames de ruissellement annuelles, de la biodisponibilité du phosphore ainsi que des simulations de différents scénarios alternatifs de gestion du territoire agricole sont possibles (IRDA, 2008d).

Le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation en collaboration avec l'Institut de Recherche et Développement en Agroenvironnement a installé des appareils mesurant les pertes réelles de phosphore dans le bassin versant du ruisseau Cass en 2009.

Les mesures seront effectuées par ces appareils durant quelques années. Une simulation de pertes de phosphore, faite au moyen du logiciel ODEP pour le même bassin versant, permettra à MAPAQ de l'Estrie de comparer les résultats théoriques avec les résultats réels obtenus sur le terrain dans le futur (Toffoli, 2009).

Le bassin versant du ruisseau Cass a été divisé en 62 parcelles. Pour effectuer une simulation dans le logiciel ODEP, les données de cinq catégories sont nécessaires pour chaque parcelle, soit : le climat, la pédologie, le relief, les conditions de drainage et la régie des sols et des cultures. Monsieur Roberto Toffoli, agronome au Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation de l'Estrie, a fourni les données suivantes relatives au bassin versant du ruisseau Cass : les photographies aériennes, les cartes de pédologie, les cartes topographiques avec courbes isométriques et classes de pente. Il a également fourni les données concernant les contours des parcelles, les cultures présentes en 2007 sur chaque parcelle et les superficies de chaque champ. Toutes les données fournies sont présentées à l'annexe 4. Certaines données nécessaires pour effectuer la simulation ne sont pas disponibles à l'automne 2009, notamment les analyses de sol, les données de drainage des terrains, les mesures de contrôle du ruissellement et les cultures présentes en 2008 sur chaque parcelle. Dans cette situation, des données théoriques identiques seront utilisées pour toutes les parcelles.

La simulation permettra d'évaluer les risques d'exportation de phosphore de chaque parcelle du bassin versant vers le ruisseau Cass, ainsi que les mêmes risques provenant de l'ensemble des parcelles du bassin versant.

Trois simulations seront effectuées. Dans chaque simulation, les données disponibles seront utilisées sans changement et parmi les données non disponibles, seul le chiffre de la saturation du sol sera changé deux fois. La simulation initiale sera effectuée pour la saturation du sol de 13,1 %, ce qui constitue le seuil agroenvironnemental pour la plupart des sols en Estrie (CRAAQ, 2003). Ensuite, deux scénarios seront réalisés. Un premier pour une saturation moins importante, de 7,6 %, ce qui correspond à une saturation typique pour les sols plus lourds, avec plus de 30 % du contenu en argile (CRAAQ, 2003). Un deuxième

scénario sera réalisé pour une saturation du sol de 20 %. Cette valeur est théorique et considérablement plus élevée que la valeur moyenne de saturation pour les sols de l’Estrie. Cette valeur présente un seuil environnemental à risque élevé.

Le but de la réalisation de la simulation initiale et des deux scénarios est de démontrer une l’influence de la valeur de saturation du sol sur les pertes possibles de différentes formes du phosphore et selon différentes voies de transport. Le concept de saturation du sol a été expliqué dans le chapitre 1.1.2. Généralement, plus le taux de saturation du sol est élevé, plus le phosphore est biodisponible dans la phase liquide du sol et les risques environnementaux sur les écosystèmes aquatiques sont plus élevés également (CRAAQ, 2003).

3.5.2 Réalisation de l’estimation

L’estimation au moyen du logiciel ODEP consiste à entrer trois séries de données relatives à chaque parcelle du bassin versant, une série pour chaque scénario. Les données fournies par M. Roberto Toffoli seront utilisées comme données de base. Les données non disponibles seront remplacées par les données théoriques, les mêmes pour toutes les parcelles. Les données de cultures pour chaque parcelle pour année 2008 seront les mêmes que pour les mêmes parcelles en 2007. Pour les deux scénarios pour le même bassin versant, seule la valeur de saturation du sol sera changée.

Le tableau 3.2 présente les données nécessaires pour effectuer les simulations au moyen du logiciel ODEP, disponibles et non disponibles à l’automne 2009.

Tableau 3.2 Données disponibles et non disponibles pour le bassin versant du ruisseau Cass

Données pour ODEP	Disponibles	Non disponibles
Zone agroclimatique	x	
Localisation du bassin versant	x	
Superficie de la parcelle	x	
Culture		x
Antécédent cultural	x	
Culture de couverture		x
Travail du sol		x
Apport d'engrais minéraux		x
Apport engrais de ferme		x
Présence de bande riveraine		x
Présence des structures de contrôle de l'érosion		x
Type de sol	x	
Texture du sol	x	
Analyse du sol		x
Saturation du sol		x
Pente moyenne	x	
Longueur maximale du parcours de ruissellement	x	
Drainage souterrain		x
Condition du profil cultural		x
Écoulement de surface		x

Pour les données non disponibles, les données suivantes et identiques pour chaque parcelle seront entrées :

- culture : la même que l'antécédent cultural,
- culture de couverture : légumineuses pour les cultures annuelles et rien pour les cultures pérennes,

- travail du sol : cultures annuelles – labour au printemps + travail secondaire au printemps, cultures pérennes – déchaumage au printemps + travail secondaire au printemps,
- apport d’engrais minéraux – 20 kg P₂O₅/ha,
- apport d’engrais de ferme – 3 applications de 20 kg de P₂O₅/ha pour les cultures annuelles et 1 application de 20 kg de P₂O₅/ha pour les cultures pérennes,
- présence de bande riveraine – ne s’applique pas,
- présence des structures de contrôle de l’érosion – absente,
- analyse du sol – 152 kg P₂O₅/ha,
- saturation du sol – 13.1 % pour la simulation initiale; 7,6 % pour le scénario nr.1 et 20 % pour le scénario nr. 2,
- drainage souterrain — partiel,
- condition du profil cultural — présence des zones à risque,
- écoulement de surface – moyen.

3.5.3 Résultats

À partir de données disponibles et théoriques, qui remplacent les données non disponibles, une série de résultats a été obtenue pour chaque parcelle et pour l’ensemble des champs agricoles du bassin versant du ruisseau Cass : la quantité de l’eau de ruissellement de surface et souterraine, la quantité de sédiments exportés vers le ruisseau Cass, le phosphore particulaire et soluble dans le ruissellement de surface et souterrain et lié à la fertilisation, et finalement la quantité de phosphore total et de phosphore biodisponible. Tous les résultats obtenus pour la simulation principale et pour les deux scénarios sont présentés à l’annexe 3.

Plusieurs résultats sont identiques pour la simulation initiale et les deux scénarios, car la saturation du sol n’influence pas ces valeurs. Toutefois, les valeurs de phosphore total et de phosphore biodisponibles diffèrent dépendamment de la valeur de saturation de sol utilisée. Le phosphore total est constitué de toutes les formes de phosphore, particulaire et dissout, présentes dans l’eau de ruissellement. Le phosphore biodisponible est la fraction du phosphore qui est immédiatement disponible pour les végétaux.

Le tableau 3.3 présente les résultats finals pour le phosphore total et le phosphore biodisponible transporté des champs agricoles du bassin versant du ruisseau Cass vers ce ruisseau, ainsi que la comparaison de ces résultats avec des valeurs de vulnérabilité établies par l'IRDA.

Tableau 3.3 Comparaison de résultats de simulation de pertes de phosphore des champs agricoles dans le bassin versant du ruisseau Cass avec les valeurs de vulnérabilité modérée et élevée établies par l'IRDA, modifié de IRDA (2008d).

Forme de phosphore (P)	Pertes de phosphore (kg/ha/an)				
	Vulnérabilité modérée	Vulnérabilité élevée	Scénario 1 (saturation 7,6 %)	Scénario initial (saturation 13,1 %)	Scénario 2 (saturation 20 %)
P total	2.000	Plus que 2,000	0.575	0.712	0.882
P biodisponible	1,425-1,750	Plus que 1,750	0.370	0.453	0.555

Les résultats des simulations des pertes de phosphore des champs agricoles dans le bassin versant du ruisseau Cass, obtenus à partir de données disponibles et théoriques, ne sont pas alarmants. Cependant, une forte corrélation entre le taux de saturation du sol en phosphore et les pertes de phosphore biodisponible pour les plantes et de phosphore total est évidente. Les calculs des pertes de phosphore total, par le logiciel ODEP, correspondants à des saturations du sol de 7,6 %; 13,1 % et 20 % donnent les résultats respectifs suivants : 0.575 kg/ha/an; 0.712 kg/ha/an et 0.882 kg/ha/an, qui se situent dans les limites acceptables des pertes de phosphore des sols agricoles. Selon IRDA, les pertes de phosphore plus grandes que 2,000 kg/ha/an constituent un risque modéré pour l'environnement, alors que les pertes supérieures à 2,500 kg/ha/an constituent un risque élevé (IRDA, 2008d). Les pertes du phosphore biodisponible provenant des champs agricoles du bassin versant du ruisseau Cass ont été estimées à 0.370 kg/ha/an, 0.453 kg/ha/an, 0.555 kg/ha/an pour des saturations respectives du sol de 7,6 %, 13 % et 20 %. Ces résultats se situent aussi dans les limites acceptables. Selon l'IRDA, les risques pour l'environnement qualifiés de modérés des pertes de phosphore se situent entre 1,425 kg/ha/an et 1,750 kg/ha/an, et les risques élevés correspondent à une perte dépassant 1,750 kg/ha/an (IRDA, 2008d).

Les simulations ont démontré qu'avec une augmentation du taux de saturation du sol en phosphore, les pertes de phosphore biodisponible et du phosphore total des sols augmentent également. Malgré les résultats de simulations se situant dans les limites acceptables des pertes de phosphore, la situation peut se détériorer et s'aggraver dans le futur.

4 SOLUTIONS À LA PROBLÉMATIQUE D'ÉROSION DES SOLS AGRICOLES EN ESTRIE

Les pratiques par lesquelles on empêche, on retarde ou on limite le ruissellement de surface, servent dans la lutte contre l'érosion des sols agricoles. Globalement, l'érosion hydrique peut être contrôlée en visant quatre objectifs :

- diminution de l'énergie d'impact des gouttes de pluie,
- diminution de la quantité d'eau de ruissellement,
- diminution de la vitesse de ruissellement en interceptant et en dirigeant le ruissellement de surface vers les structures appropriées, comme les voies d'eau engazonnées,
- amélioration de la structure du sol et la protection de sa surface.

L'impact du martèlement des gouttes de pluie sur le sol peut être réduit en interceptant les gouttes avant qu'elles n'atteignent le sol. Cet effet peut être obtenu en diminuant les périodes pendant lesquelles le sol est laissé à nu. En pratique, on peut retarder le labour au printemps, cultiver les cultures de couverture comme les engrais verts ou cultures intercalaires, laisser les résidus des cultures au sol, pratiquer le travail minimum du sol et pratiquer le semis direct (Trencia, 1987).

On réduisant les quantités de l'eau de ruissellement, l'ampleur de l'érosion est aussi diminuée. Le ruissellement de surface peut être limité en favorisant une plus grande infiltration de l'eau dans le sol par l'amélioration de sa structure et par l'augmentation de sa capacité d'absorption. La vitesse de l'écoulement de l'eau sur le champ peut être diminuée en agissant sur trois facteurs : la pente, la longueur et la rugosité du terrain. La longueur de la pente du terrain cultivé peut être diminuée par l'aménagement de terrasses perpendiculaires à la pente. Les terrasses diminuent la vitesse de l'eau et par le fait même l'énergie capable d'emporter les particules du sol. Aussi, le degré de la pente est modifié lors de la construction des terrasses (CPVQ, 1986).

La rugosité du terrain élevée freine l'écoulement de l'eau et diminue sa vitesse. Pour augmenter la rugosité du sol, il faut orienter les cultures en travers de la pente plutôt que dans le sens de la pente. Il faut aussi conserver la végétation ou des débris de végétaux au

sol le plus longtemps possible. Également, les voies d'eau doivent être engazonnées en permanence, pour que la rugosité du sol soit augmentée durant toute l'année. Les cultures intercalaires permettent d'avoir des bandes de végétation dense entre les rangs, endroit plus exposé à l'érosion (Trencia, 1987).

La prévention de tout processus de dégradation du sol passe nécessairement par la conservation d'une bonne structure. Il est donc important de maintenir un taux suffisant de matière organique et de conserver l'humidité du sol. Pour cela un apport annuel de matière organique est nécessaire. En plus d'assurer une bonne structure au sol, la matière organique aide à prévenir l'acidification du sol et à protéger sa surface de l'action des pluies violentes (Trencia, 1987).

Les pratiques qui contribuent à garder le sol en bonne condition sont, en autres : l'adoption d'un mode de travail du sol approprié aux conditions du terrain et les rotations des cultures. En plus, l'utilisation adéquate de fumiers comme engrais, les engrais verts et le maintien au sol de résidus de récolte permettent de conserver un bon niveau de matière organique. La conservation de la structure du sol dépend aussi des méthodes culturales. En diminuant les passages de machinerie lourde dans le champ, on favorise aussi le maintien d'une bonne structure. Dans cette optique, les travaux sur des champs, pendant que le sol est saturé d'eau, doivent être évités (Trencia, 1987).

Les pratiques de conservation du sol gagnent en popularité depuis plusieurs années, partout au Québec. Cependant, le taux d'application de ces pratiques est toujours insuffisant.

4.1 Solutions proposées

L'érosion des sols agricoles en Estrie est une réalité. Elle a de graves conséquences sur la qualité de l'eau des rivières et des lacs et sur l'environnement en général. La mise en œuvre de mesures antiérosives efficaces ne doit plus tarder. Ces mesures doivent intégrer l'échelle de la parcelle, mais aussi celle du bassin versant. Elles doivent prendre en compte les conditions de l'environnement comme la topographie ou le climat, mais aussi les pratiques culturales. Les agriculteurs doivent être sensibilisés et informés sur les causes, les

conséquences de l'érosion et sur les moyens de lutter contre ce phénomène. Une meilleure gestion des pratiques agricoles peut contribuer au contrôle de l'intensité de ruissellement et de l'érosion. La prévention de l'apparition des signes d'érosion reste toujours le moyen de contrôle le plus simple et le plus économique (Entente auxiliaire Canada – Québec sur le développement agro-alimentaire, 1990).

4.1.1 Travail minimal du sol

Dans le passé, les résidus des cultures étaient jugés indésirables et nuisibles à la germination des semences. Le travail du sol avait pour but d'enfouir la plus grande partie des résidus de culture pour laisser la surface prête à l'ensemencement et à l'épandage des engrais. La préparation du lit de semence était importante pour assurer le bon développement des cultures et un bon rendement (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2000). Le travail conventionnel du sol est une combinaison du travail primaire et secondaire. Habituellement, il s'agit d'un labour d'automne, suivi au printemps de quelques passages de herse, comme travail secondaire. Cette pratique laisse moins de 30 % de résidus de culture au sol. En plus, le sol ainsi travaillé est plus exposé à l'érosion autant hydrique qu'éolienne (MAPAQ, 2008).

Ces dernières années, on assiste à une évolution des méthodes du travail du sol. Cette nouvelle tendance se dirige vers une élimination totale du travail du sol ou du moins une diminution considérable de son intensité afin de réduire l'ampleur et les impacts de l'érosion des sols agricoles. Les méthodes de travail du sol issues de cette tendance ont été appelées les méthodes de conservation du sol (Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rurales, 2009).

Le travail réduit du sol consiste à minimaliser les interventions menées sur les terres agricoles, comme par exemple, limiter les passages de machinerie lourde dans les champs. Le sol ne subit pas de compaction et sa structure ne se dégrade pas. Dans le travail minimum de sol, les résidus de la culture précédente sont laissés à la surface des champs (CPVQ, 1986). L'application de cette méthode oblige les changements de certaines pratiques, mais elle amène des économies de carburant et la réduction du taux d'érosion. En

plus, le producteur passe moins de temps au champ et diminue les dépenses en machinerie agricole. De cette manière, il peut diminuer ses coûts de production (CPVQ, 1999). Les expériences menées au sud de la France ont démontré que toutes les pratiques culturales qui réduisent les retournements de la couche arable de sol favorisent le maintien de la matière organique. De plus, une surface de sol comprenant des débris végétaux a moins tendance à se compacter (INRA, 2004). Présentement, il n'existe aucun système de travail du sol qui soit meilleur pour la plupart des situations rencontrées sur des terres agricoles. La charrue chisel est l'outil le plus souvent adapté pour le travail réduit du sol.

Au Québec, en 2007, le travail réduit du sol a été pratiqué sur 48 % des superficies en cultures annuelles, ce qui constitue une augmentation de 12 % depuis 1998. Cependant en Estrie, la situation est tout à fait différente. Le travail réduit du sol a été pratiqué sur 28 % des superficies en cultures annuelles en 2007, ce qui constitue 33 % de moins que 10 ans auparavant. En 1998, le travail réduit du sol a été pratiqué en Estrie sur environ 60 % des superficies en cultures annuelles (MAPAQ, s.d.). La tendance d'abandonner le travail réduit de sol augmente le risque de l'érosion hydrique avec toutes ses conséquences possibles.

Le semis direct est un excellent exemple de la pratique du travail minimal du sol. C'est une technique très efficace et rentable d'un point de vue de conservation du sol. De plus, elle permet d'atteindre des objectifs de production et de respecter l'environnement en protégeant la qualité du sol et de l'eau, et cela même en dehors des parcelles cultivées. Le semis direct consiste à effectuer l'opération du semis et du travail du sol en un seul passage de machinerie. Cette technique ne nécessite aucune préparation du sol. Les résidus de la culture précédente restent entièrement à la surface du sol tout au long de l'année. Ceci permet une protection maximale du sol contre les impacts des gouttes de pluie et du ruissellement (CPVQ, 1986). Le semis direct présente une occasion de réduire les coûts de travail. Le champ n'est pratiquement pas travaillé entre la récolte et le semis sauf peut-être pour l'injection d'engrais. Par contre, le producteur est obligé de lutter contre les mauvaises herbes dans la presque totalité des cas avec l'utilisation d'un herbicide chimique. La technique de semis direct diminue considérablement les pertes de sol par l'érosion. Elle évite également la détérioration de la structure du sol et les dépôts de sédiments dans les

cours d'eau. Elle prévient finalement la perte de fertilité (Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales, 2009a). Les études menées en Montérégie sur des champs de soya ont démontré que le rendement en semis direct était comparable à celui du travail du sol conventionnel, mais des économies de 34 \$/ha ont été réalisées grâce à la diminution d'opérations culturales. En pratiquant le semis direct, on peut réduire le ruissellement de 64 % et l'érosion de 92 %, par rapport au travail conventionnel du sol (COGEBY, 2001).

4.1.2 Culture de couverture

L'une des principales différences entre un agro-écosystème et un écosystème naturel est l'étendue du sol couvert de végétation contrôlée ou l'étendue du sol dénudé pendant une certaine partie de l'année. Quand une terre est mise en culture, les plantes indigènes sont remplacées par des plantes cultivées, dont certaines assurent une couverture adéquate, en particulier les plantes fourragères. Les cultures en ligne, quant à elles, laissent à nu une importante partie de la superficie (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2000). Le couvert végétal joue un rôle protecteur contre l'impact des gouttes de pluie. Les expériences menées au sud de la France au milieu des années 1990 n'ont démontré aucun ruissellement sur les parcelles où la couverture végétale était de 90 % au printemps, même après des orages à forte intensité. Quelques traces d'érosion ont été observées, au cours de l'hiver, cependant le taux de creusement a été très faible. Sur les parcelles voisines, où le sol au printemps était laissé à nu, des dégâts d'érosion ont été constatés. Il est donc important de maintenir les sols en cultures autant en été qu'en hiver (INRA, 2004).

Au Québec en 2000, le nombre de jours sans couverture du sol dans les régions agricoles était de 62. Les grandes étendues en ligne, surtout le maïs à ensilage, le soya, la pomme de terre et les légumes sont caractérisées par un faible taux de couverture des sols (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2000).

Les cultures de couverture constituent une solution efficace pour diminuer l'érosion des champs cultivés. Elles sont implantées généralement après la culture principale et peuvent être récoltées à l'automne. Les cultures de couverture peuvent aussi être laissées pour l'hiver

comme un engrais vert qui sera incorporé au sol, en améliorant ainsi les propriétés physiques du sol, sa fertilité et l'activité microbienne. Cette méthode culturale est une solution facile à appliquer et très efficace. Elle demande peu de temps de travail, peu de moyens financiers et améliore nettement le rendement (INRA, 2004).

Au Québec, l'utilisation des engrais verts sur des superficies en cultures annuelles a augmenté de 1 % depuis 1998 et se situe à 6 % en 2007. En Estrie, on a enregistré d'abord une augmentation de 2 % d'utilisation des engrais verts entre 1998 et 2003. Ensuite, une diminution de 4 % a été notée entre 2003 et 2007. Les dernières statistiques situent l'utilisation des engrais verts en Estrie, en 2007, à 2 % des superficies (MAPAQ, s.d.).

Les études menées par des chercheurs d'Agriculture et Agroalimentaire Canada ont démontré que les cultures de couverture diminuent les pertes des sols de 76 %, pour ce qui est de la culture de maïs à ensilage cultivé dans le sens de la pente (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2000).

4.1.3 Culture en contre-pente

Les cultures dans le sens de la pente favorisent la formation de chemins préférentiels pour l'écoulement de l'eau. L'apparition soudaine de ravinement peut résulter d'un changement d'utilisation du sol en amont ou de conditions météorologiques particulières. Surtout au printemps, la faible capacité d'infiltration des sols encore gelés favorise l'apparition de rigoles et de ravines dans les champs (MAPAQ, 2007). La culture en contrepente constitue un moyen de limiter l'érosion hydrique sur les pentes inférieures à 10 %. Elle consiste à disposer des cultures perpendiculairement à la pente dominante et permet un établissement de la plupart des cultures annuelles (CPVQ, 1986). Pour augmenter l'infiltration de l'eau dans le sol, il faut créer des obstacles au ruissellement et maintenir le sol poreux. Les cultures en contre-pente peuvent retarder l'apparition du ruissellement. Les sillons laissés par les instruments et les rangs de plantes constituent de mini-barrages, surtout lorsque les pentes sont faibles. La culture en contrepente peut diminuer les pertes de sol de 25 % (CPVQ, 1986). Sur les pentes plus fortes, cette mesure peut s'avérer peu efficace. Dans les cas plus sévères, le reboisement sélectif de la zone érodée ou des travaux de nivellement

peuvent constituer une solution efficace et nécessaire pour lutter contre l'érosion hydrique (Beauchamp, 2008).

4.1.4 Rotation des cultures

La rotation des cultures permet la succession de différentes espèces végétales sur la même superficie. Les rotations avec des graminées et des légumineuses améliorent la teneur des sols en matière organique, contrairement à la rotation comprenant des annuelles seulement. En général, plus le nombre d'années en cultures fourragères est élevé dans la rotation, plus l'accumulation de matière organique dans le sol est grande. Les graminées et les légumineuses ont aussi un effet bénéfique sur la structure du sol. Les graminées améliorent la structure à la surface du sol tandis que les légumineuses avec leurs racines plus profondes stabilisent la structure en profondeur (CPVQ, 1986). Le tableau 4.1 présente les effets de la rotation des cultures sur la teneur en matière organique du sol et la stabilité des agrégats pour un sol loameux.

Tableau 4.1. Effets de la rotation des cultures sur la teneur en matière organique du sol et la stabilité des agrégats pour un sol loameux, tiré de : Source CPVQ (1986, p.98)

Culture	Matière organique dans le sol (%)	Agrégats stables (%)
Prairie continue (sur 10 ans)	4,4	85
Maïs continu	3,1	22
Rotation de 4 ans		
Maïs (1-er année)	4,1	52
Avoine (2-e année)	4,2	56
Foin (3-e année)	4	61
Foin (4-e année)	4,4	74

Peu importe les techniques du travail du sol, la rotation des cultures présente des avantages importants. Elle permet de réduire les impacts de l'érosion. Les graminées utilisées dans la rotation des cultures absorbent presque entièrement l'énergie des gouttes de pluie, éliminent le ruissellement et favorisent l'infiltration de l'eau dans le sol (CPVQ, 1986). L'action des différents systèmes racinaires sur le sol améliore sa structure et augmente l'activité

microbienne du sol par le développement de différents types de bactéries. Les différentes cultures exigent un mode de travail du sol différent, ce qui entraîne la diminution des impacts négatifs de la répétition des mêmes opérations. Pour assurer la présence de résidus sur les champs, une alternance de cultures qui en produisent beaucoup avec celles qui en produisent moins est une pratique très intéressante (Beauchamp, 2008). Le tableau 4.2 présente l'impact de la rotation de cultures sur les pertes de sol et le ruissellement.

Tableau 4.2 Impact de la rotation des cultures sur les pertes de sol et le ruissellement, tiré de CPVQ (1986, p.99)

Culture	Ruissellement (tonnes eau/ha)	Perte du sol (tonnes/ha)
Maïs en continu	551	76,2
Rotation de 4 ans (maïs, avoine, luzerne)	129,9	10,66
Avoine en continu	120,7	2,2
Luzerne en continu	15,5	0,04

Le choix du type de plantes dans la rotation dépend de l'inclinaison et de la longueur des pentes. Sur les sols avec des pentes de plus de 10 % d'inclinaison, seules les rotations longues incluant des pâturages procurent une protection adéquate. Sur les pentes plus petites, les rotations courtes incluant les cultures en rang sont possibles, à condition de la prise en compte de certaines précautions comme les cultures en contre-pente, les cultures par bandes alternées, le travail minimal du sol ou les semis directs (CPVQ, 1986).

4.1.5 Cultures en bandes alternées

La culture en bandes alternées consiste à faire la culture des bandes engazonnées en alternance avec des bandes de cultures annuelles. Ces bandes doivent être longues et étroites, et orientées perpendiculairement à la pente. La largeur des bandes dépend du type de sol (CPVQ, 1986). En général, plus le sol contient de particules fines, plus la bande de végétation doit être large. Toutefois, l'argile avec des tendances à la granulation retient bien les particules de sol et, par conséquent, la largeur de bande de végétation recommandée est moins importante. Le tableau 4.3 présente les recommandations des largeurs des bandes de différentes cultures en fonction de la texture du sol.

Tableau 4.3 Largeur des bandes recommandées en fonction de la texture du sol, tiré de CPVQ (1986, p.118)

Texture	Largeur de la bande (m)
Sable	6
Sable loameux	8
Loam sableux	30
Loam	75
Loam limoneux	85
Loam argileux	105
Loam argilo-limoneux	130
Argile sujette à granulation	25

Deux bandes qui se succèdent sont d'habitude de la même largeur. Elles doivent porter différentes cultures qui ne sont pas récoltées en même temps. Dans les régions où le risque d'érosion est grand, les bandes en herbe peuvent être plus larges que celles en cultures annuelles. La culture en bandes alternées est utilisée principalement pour la rotation : maïs-céréale-foin-foin. Ce type de rotation permet de diminuer l'érosion de 50-75 %, lorsque la culture est pratiquée en travers de la pente par rapport à une culture dans le sens de la pente. Cette méthode est parfois difficile à pratiquer, à cause du cadastre des terres au Québec qui présente des bandes étroites perpendiculaires aux cours d'eau et force les producteurs à cultiver dans le sens de la pente (CPVQ, 1986).

4.1.6 Résidus de culture à la surface du sol

Les résidus de cultures précédentes laissés sur le sol ou paillage constituent un moyen efficace de diminuer l'érosion hydrique sur les champs agricoles. Les résidus de cultures ou la paille, laissés sur la surface du sol, absorbent l'énergie des gouttes de pluie, créent la rugosité du sol, absorbent une certaine quantité d'eau et réduisent la force de l'eau de ruissellement, en plus d'enrichir le sol en matière organique. Les pertes de sols sont ainsi considérablement diminuées. La quantité de résidus nécessaires pour diminuer efficacement les conséquences de l'érosion dépend de l'intensité des pluies, du volume d'eau de ruissellement, des conditions du sol, du type et de la répartition des résidus ainsi que de l'inclinaison de la pente. Cependant, les conditions du terrain varient beaucoup d'une

région à l'autre, ils peuvent même varier dans les limites d'un champ. Généralement, le taux de couverture doit dépasser 30 % pour un terrain qui n'est pas à grand risque d'érosion, pour réduire significativement les pertes de sol (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2009c). En plus de diminuer les impacts des gouttes de pluie sur le sol, les déchets organiques laissés au sol par la culture précédente peuvent apporter annuellement entre 500 et 800 kg/ha d'humus. Ils favorisent l'infiltration de l'eau et diminuent les volumes de l'eau de ruissellement. La neige retenue par les résidus de cultures protège également le sol de l'érosion éolienne (CPVQ, 1986). La figure ci-dessous présente la réduction des pertes de sol en fonction de différents pourcentages de résidus.

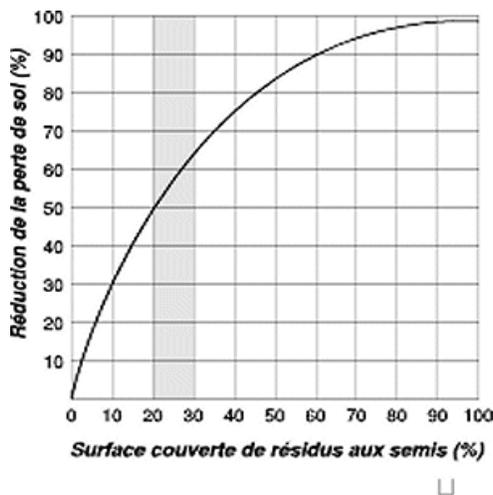


Figure 4.1 Réduction des pertes de sol en fonction de différents pourcentages de résidus, tiré de Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales (2009).

Le recouvrement de 30 % après les semis diminue l'érosion hydrique de 65 % et permet au sol de se régénérer suffisamment pour compenser les pertes. Il faut cependant prendre en considération que la décomposition hivernale et les travaux de printemps contribuent à une diminution de la quantité de résidus laissés à l'automne. Pour atteindre l'objectif de 30 % des résidus après les semis, il faut qu'il reste 45-60 % des résidus sur les champs, après les travaux d'automne (Conseil des productions végétales du Québec, 1999).

Sur les terrains en pente, les quantités de résidus laissés sur les champs doivent être plus grandes, proportionnellement à la valeur de la pente. Sur les pentes de 6-9 %, une valeur d'environ 800- 1150 kg de résidus/ha au sol est recommandée, ce qui représente entre 35 et 50 % du sol recouvert. Pour atteindre cet objectif, souvent l'adoption de pratiques de travail réduit du sol est nécessaire. Sur les pentes de 10-15 %, le recouvrement de 50-70 % est recommandé, ce qui nécessite souvent la pratique de semis direct ou de cultures sans travail du sol. Sur les pentes supérieures à 15 %, les cultures annuelles ne sont pas recommandées et un suivi de l'état du sol est nécessaire. Lorsqu'il y a la présence de conditions qui empêchent de maintenir le niveau recommandé des résidus de culture, l'adoption d'autres pratiques de protection des sols contre l'érosion hydrique est indispensable, comme les cultures couvre-sol, l'épandage de résidus, la culture en bandes et l'aménagement de terrasses. Par contre, là où l'eau s'accumule, l'aménagement d'une voie d'eau engazonnée est efficace (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2009c).

Sur les champs où on n'a pas assez de résidus de cultures, le paillage peut être pratiqué. Il consiste à étendre de la paille ou du foin dans le champ après la récolte. Une étude menée par des chercheurs d'Agriculture et Agroenvironnement Canada a démontré que l'épandage de 2.5 tonnes de paille par hectare a permis de limiter les pertes de sol de 75 % (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2000).

4.1.7 Voies d'eau engazonnées

Lorsque l'érosion hydrique prend des formes importantes et que le ravinement est profond, les pratiques culturales de conservation du sol risquent de ne pas être assez efficaces. Dans cette situation, des structures adaptées doivent être mises en place de façon plus ciblée. Dans les zones où l'eau s'écoule rapidement, le ravinement peut être évité par l'installation d'une voie d'eau engazonnée, ou enrochée (MAPAQ, 2007). Ces structures figurent parmi les techniques de conservation des sols. Leur mise en place est d'habitude associée à d'autres mesures de lutte contre l'érosion du sol, comme le travail réduit du sol, les cultures de couverture et les bandes riveraines.

Les voies d'eau engazonnées sont des canaux naturels ou artificiels, peu profonds et évasés, semés de plantes fourragères courtes résistantes à l'érosion. Elles sont construites dans le but d'intercepter l'eau de ruissellement et de l'acheminer en dehors d'une parcelle cultivée, sans causer d'érosion. L'eau de ruissellement rejoint ensuite un cours d'eau ou un fossé. En général, une voie d'eau aboutit dans une descente remplie des roches. La surface de voies d'eau engazonnées est couverte de végétation ce qui augmente la rugosité et limite la vitesse de l'eau. Parfois, lorsque la vitesse de l'eau dépasse la capacité de résistance de la végétation, ou si la voie d'eau est régulièrement utilisée pour le passage de machinerie agricole à un emplacement précis, l'enrochement d'une partie ou de la totalité d'une voie d'eau engazonnée est recommandé. De façon générale, les voies d'eau engazonnées servent à acheminer le surplus d'eau après les pluies abondantes ou à la fonte des neiges. Le reste du temps, elles demeurent souvent sèches (CPVQ, 1986).

Les fossés de ferme, qui présentent des signes majeurs d'érosion, peuvent être convertis en voies d'eau engazonnées dans le but de diminuer les dégâts causés par l'érosion et de protéger la qualité de l'eau de surface. Les voies d'eau engazonnées peuvent être aménagées dans la zone la plus basse du champ, là où le ruissellement se concentre. Dans un champ plat, elle peut être aménagée à l'endroit qui nuit le moins à l'exploitation du champ. La forme privilégiée d'une voie d'eau engazonnée est parabolique, car elle permet de répartir la lame d'eau sur une grande surface et de réduire la vitesse de l'eau. La pente du talus doit être légère pour faciliter son entretien et permettre la circulation de machinerie (MAPAQ, 2008).

Une voie d'eau engazonnée peut être équipée d'un avaloir, une structure permettant l'entrée de l'eau de ruissellement accumulée dans une dépression. Ensuite, l'eau est évacuée dans un fossé, un cours d'eau ou un étang par une canalisation souterraine. Ceci réduit l'écoulement de surface dans les zones plus sujettes à l'érosion (CPVQ, 1993). Il existe sur le marché plusieurs types d'avaloirs qui peuvent être installés selon les conditions du milieu. Le choix d'un type d'avaloir en particulier dépend du volume d'eau de ruissellement, du temps de séjour de l'eau dans le bassin recherché et de la capacité de la conduite d'évacuation des eaux. Ce type d'aménagement permet de favoriser la

sédimentation des particules de sol en suspension dans l'eau de ruissellement avant que celle-ci soit évacuée (MAPAQ, 2007).

Les expériences menées par des chercheurs d'Agriculture et Agroenvironnement Canada ont démontré qu'il y a une diminution considérable de pertes de sols dans les champs où avaient été aménagées des dérivations et des voies d'eau engazonnées, par rapport aux champs cultivés dans le sens de la pente sans mesures antiérosives. Les champs non-protégés ont enregistré un taux de ruissellement de 30 % des précipitations accumulées, contre un taux de 4 % dans les champs avec des installations antiérosives (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2000).

4.1.8 Terrasses

Une des pratiques culturales les plus efficaces sur une longue pente est l'aménagement de terrasses. Une terrasse est constituée d'un fossé de canalisation combiné à un remplissage de sol aménagé en travers de la pente. Le but de cet aménagement est de réduire la longueur de la pente du champ, d'intercepter et de conduire l'eau de ruissellement de surface à des vitesses non érosives. Cela permet d'amener l'eau vers une sortie d'évacuation ou une voie d'eau engazonnée. La construction de terrasses est coûteuse et demande un entretien pendant l'exploitation du champ. La largeur des terrasses peut varier selon la valeur de la pente, le type du sol, l'intensité des pluies, la vulnérabilité du sol à l'érosion, les pratiques culturales et les mesures de conservation additionnelles. Cependant, l'espacement minimal recommandé n'est jamais inférieur à 40 m pour des raisons économiques, compte tenu de la machinerie à utiliser. L'efficacité des terrasses dans la réduction de l'érosion peut atteindre 85 %. Dans certains cas, pour augmenter l'efficacité des terrasses, l'utilisation de techniques supplémentaires comme les cultures en bandes alternées ou la culture des engrais verts peut être recommandée (CPVQ, 1986).

4.1.9 Bandes riveraines

Les mesures de contrôle de l'érosion hydrique sur les terres agricoles peuvent être considérées comme des mesures préventives pour les cours d'eau. Les cours d'eau dans une région agricole risquent de subir une détérioration de la qualité de l'eau causée par des

sédiments apportés par le ruissellement. La protection du talus et du haut du talus est essentielle pour garder le pouvoir filtrant de cette bande de végétation. Le piétinement des berges par le bétail, l'enlèvement de la végétation du talus et les travaux de culture trop rapprochés de l'eau sont souvent les déclencheurs de l'érosion d'un cours d'eau et de ses berges (MDDEP, 2007).

La végétation des bandes riveraines est indispensable pour améliorer ou garder une bonne qualité de l'eau. Elle absorbe une partie des précipitations, augmente la rugosité du sol et protège contre l'érosion. La végétation ralentit également le ruissellement de surface et favorise le captage des sédiments apportés par ruissellement des terres adjacentes (MDDEP, 2007). Le tableau 4.4 présente l'efficacité de la bande riveraine dans la réduction de la matière en suspension, du phosphore et de l'azote transportés dans un cours d'eau.

Tableau 4.4 Efficacité de la bande riveraine dans la réduction de la matière en suspension, du phosphore et de l'azote transportés dans un cours d'eau, tiré de COGEBY (2001)

Profondeur de la bande riveraine	Réduction de la matière en suspension (%)	Réduction du phosphore (%)	Réduction de l'azote (%)
4,6 m	70	61	54
9 m	84	79	73

La bande riveraine constitue aussi un habitat pour plusieurs espèces d'animaux car elle leur fournit la nourriture et l'abri. Elle favorise donc la diversité biologique des régions. L'entretien de la végétation des berges est important et a pour but de maintenir ses fonctions de protection des cours d'eau. Cet entretien consiste à sauvegarder les végétaux de la bande riveraine et à faire des plantations dans les endroits dénudés. Certaines plantes, comme des espèces indigènes, ont plus d'intérêt pour la revégétalisation des berges. Elles sont très bien adaptées aux conditions climatiques et aux sols du Québec et sont résistantes aux maladies et insectes ravageurs (Tercia, 1987). La bande riveraine doit être composée de trois strates : les arbres, les arbustes et les plantes herbacées. Les arbres ont des racines profondes, ils améliorent la stabilité des pentes et absorbent de l'eau en profondeur en augmentant la capacité de l'absorption de l'eau par le sol. Les racines des arbustes puisent

l'eau à une profondeur moyenne. Elles retiennent le sol en place. Les plantes herbacées (herbes et vivaces) forment une couverture dense. Elles puisent de l'eau dans les premiers centimètres du sol, augmentent la rugosité du sol et filtrent les sédiments. L'enlèvement de la végétation des bandes riveraines entraîne une augmentation de la vulnérabilité du sol à l'érosion et un grand risque de détérioration de la qualité de l'eau. De plus, les habitats des animaux et des végétaux sont détruits, ce qui diminue la diversité biologique et l'attraction touristique de la région (Trencia, 1997).

Il y a plusieurs méthodes de stabilisation des berges sans végétation, mais la moins coûteuse et la plus respectueuse de l'environnement reste toujours l'utilisation des végétaux. Cette méthode est souvent suffisante pour stabiliser les berges et ajoute à la beauté du paysage. L'utilisation de la végétation peut être combinée avec d'autres techniques antiérosives selon les conditions de l'environnement. Pour de meilleurs résultats, il faut adoucir la pente du talus pour prévenir le glissement du sol. L'utilisation du génie végétal est aussi très intéressante. Les arbustes utilisés dans cette technique stabilisent la rive grâce aux racines qui se régénèrent rapidement si elles sont endommagées (MAPAQ, 2008a).

La stabilisation des berges par des matériaux inertes constitue par ailleurs une technique très efficace, mais en même temps très coûteuse. On peut utiliser l'enrochement, les gabions et construire des murs de soutènement. Ces méthodes ne sont pas recommandées dans les endroits où la revégétalisation est possible, car elles ne règlent pas les problèmes de détérioration de la qualité de l'eau de surface. Le pouvoir de filtration des roches est limité et en plus, les roches augmentent la température de l'eau, ce qui nuit à plusieurs espèces de poissons et favorise la croissance des algues dans les lacs.

Ces dernières années, on assiste à une croissance de la conscience environnementale en matière de protection des bandes riveraines au Québec. On enregistre une augmentation des entreprises agricoles conservant des bandes riveraines le long des cours d'eau. Entre 2003 et 2007, on observe une augmentation de 5 % d'entreprises déclarant une bande riveraine de 1 m de profondeur et une augmentation de 6 % d'entreprises déclarant la présence d'une

bande riveraine de 3 m de profondeur. En 2007, 94 % des entreprises déclarant un cours d'eau ont déclaré également la présence d'une bande riveraine de 1 m et 61 % d'entre elles la présence d'une bande riveraine de 3 m. En Estrie, les données sont aussi très encourageantes. Une bande riveraine de 1 m de profondeur est présente dans 91 % des entreprises déclarant un cours d'eau, ce qui constitue une augmentation de 19 % par rapport à 2003. Ainsi, une bande riveraine de 3 m de profondeur est présente en 2007 dans 81 % des entreprises déclarant un cours d'eau, ce qui constitue 16 % d'augmentation par rapport à 2003 (MAPAQ, s.d.).

4.1.10 Révision de la stratégie de fertilisation

Depuis vingt-cinq ans, on observe au Québec une spécialisation des exploitations agricoles. Un déséquilibre entre l'élevage et les cultures est devenu de plus en plus important. Le nombre d'entreprises porcines « sans sol » a considérablement augmenté. Par ailleurs, les problèmes de la qualité de l'eau liés à la pollution diffuse d'origine agricole sont devenus de plus en plus fréquents. En migrant des champs agricoles vers des cours d'eau et des plans d'eau, les polluants sont influencés par plusieurs processus physiques, chimiques et biologiques. Ces processus varient dépendamment des conditions de l'environnement et sont donc difficiles à prévoir. Pour arriver à une diminution de la pollution diffuse agricole, plusieurs mesures doivent être adoptées. Ces mesures sont, entre autres, l'adoption d'une réglementation, des campagnes de sensibilisation auprès des acteurs du milieu agricole, ainsi que l'approche-conseil (MDDEP, 2005).

Le Règlement sur la réduction de la pollution d'origine agricole, adopté en 1997, a imposé l'élaboration d'un plan agroenvironnemental de fertilisation (PAEF) pour les plus grandes entreprises agricoles du Québec. Depuis juin 2002, ce règlement est remplacé par le *Règlement sur les exploitations agricoles (REA)* et a défini avec précision le contenu du plan agroenvironnemental de fertilisation (Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois, 2008). Le PAEF est un outil de suivi des entreprises agricoles, il permet de rétablir un équilibre entre les éléments apportés dans le sol par fertilisation et prélevés avec les cultures. Il permet également une application de fertilisation qui tient compte des objectifs économiques de l'entreprise et des objectifs environnementaux de la

région. Le plan agroenvironnemental de fertilisation est préparé par un agronome et prend en considération la vision globale de l'exploitation agricole. Cette vision touche le contexte agroenvironnemental local et régional ainsi que les données sur l'exploitation agricole.

Selon le *Règlement sur la réduction de la pollution d'origine agricole*, dans le plan agroenvironnemental de fertilisation, trois éléments devraient se retrouver obligatoirement, soit le calcul de l'évolution prévisible de la teneur et du pourcentage de saturation du sol en phosphore, le suivi régulier de cette teneur et du pourcentage et enfin la détermination de la capacité de réception ou du surplus de phosphore d'une entreprise agricole (MDDEP, 2002a). Le PAEF constitue un diagnostic agroenvironnemental de l'entreprise agricole. Il établit le bilan de phosphore, les recommandations en fertilisation et la démarche à suivre pour améliorer la situation agroenvironnementale de l'exploitation. Cependant, pour être efficace, ce plan doit être révisé périodiquement pour prendre en considération l'évolution de la situation de l'entreprise et les changements des différentes composantes (Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois, 2008).

Au Québec en 2007, 90 % des producteurs agricoles ont fait préparer un plan agroenvironnemental de fertilisation pour leur entreprise, ce qui constitue une augmentation de 48 % par rapport à 1998. La situation en Estrie est semblable. Environ 88 % des exploitations agricoles possèdent leur PAEF. La région a enregistré une augmentation encore plus marquante que le Québec, soit de 59 % par rapport à 1998 dans cette matière (MAPAQ, s.d.).

4.1.11 Découpage des parcelles

Le découpage des parcelles peut constituer une mesure efficace contre les déplacements des sédiments à longues distances. Il devrait faire partie des modifications des lois d'orientations agricoles. Le redécoupage parcellaire diminue le transport du sol arable hors de la parcelle par la présence des obstacles physiques qui constituent les limites des champs. Les espaces entre des champs sont couvertes de la végétation non contrôlée : les herbes, les arbustes et parfois des arbres (INRA, 2004). Le découpage des parcelles permet aussi de diversifier les cultures sur un même territoire et favorise l'alternance entre les

parcelles où l'eau peut s'infiltrer et se disperser et les parcelles où ces processus sont plus difficiles (Beauchamp, 2008).

5 ANALYSE DES SOLUTIONS

Toutes les pratiques agricoles ainsi que les aménagements antiérosifs diminuant les risques d'érosion hydrique et augmentent les chances de garder les sédiments chargés d'éléments nutritifs sur les champs agricoles. Cependant, parmi les solutions proposées, certaines sont plus populaires et mieux comprises par les agriculteurs. Certaines peuvent être aussi moins chères et plus simples à réaliser que d'autres.

Une analyse sera effectuée pour déterminer les meilleures solutions antiérosives, celles qui risquent d'avoir le plus d'impacts positifs sur l'environnement ainsi que des retombées positives pour les agriculteurs,

5.1 Méthodologie de l'analyse

Plusieurs méthodes antiérosives ont été proposées au chapitre quatre. Une analyse permettra de déterminer celles qui sont universelles et réalisables facilement.

Pour que l'analyse des solutions soit précise et objective, des critères spécifiques d'analyse seront choisis. Ensuite, chaque critère sera défini précisément et son importance sera déterminée. Également, un pointage sera établi pour chacun des critères et défini de manière à ce qu'il soit adaptable aux solutions proposées. Le seuil pour déterminer les solutions universelles et réalisables facilement sera établi.

Par la suite, l'analyse sera menée selon les critères établis et le pointage de chaque critère sera attribué en lien avec chacune des solutions. Ensuite, le total des points sera calculé pour chaque solution et les résultats seront interprétés en comparant le pointage de chaque solution envisageable et le seuil établi au préalable. Enfin, des conclusions seront tirées.

5.2 Choix de critères d'analyse

L'analyse des solutions envisageables doit être menée selon des critères établis et bien définis. Les critères doivent être choisis en prenant en considération les défis de l'agriculture d'aujourd'hui ainsi que la réalité des producteurs agricoles.

Selon monsieur Roberto Toffoli, agronome du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation de l'Estrie, les agriculteurs deviennent de plus en plus conscients des problèmes environnementaux causés par les activités agricoles. Toutefois, leur situation est difficile. Ils sont confrontés à des normes de qualité du produit et de bas prix exigés par les consommateurs d'une part et à des conditions économiques difficiles d'autre part. Selon monsieur Toffoli, les solutions envisageables doivent être peu coûteuses, faciles à appliquer et simples.

En prenant en considération tous ces éléments, l'analyse des solutions sera effectuée selon les critères suivants :

- l'efficacité
- le coût
- la simplicité
- l'adaptabilité
- le besoin d'un suivi

Chaque critère est important et peut influencer l'application de la solution. Le niveau d'importance est donc le même pour chaque critère. Une note de 0, 5, 10 ou 15 points sera attribuée à chaque solution selon son efficacité à répondre à chaque critère. Ensuite, le total des points attribués sera calculé pour chacune des solutions.

5.3 Définition des critères et méthode d'analyse

Pour que l'analyse soit objective, les critères doivent être clairement définis. Ensuite, toutes les solutions proposées seront évaluées selon les critères d'analyse définis auparavant. Les critères d'analyse sont définis comme suit :

5.3.1 Efficacité

Le critère qui vise à évaluer la capacité de la solution proposée à limiter le transport des sédiments et des éléments nutritifs. Ce transport est causé par l'érosion hydrique, des champs agricoles et en direction des milieux aquatiques. La note attribuée sera de :

- 15 points : si la solution proposée limite le transport des particules de terre très efficacement et dans toutes les conditions.

- 10 points : si la solution proposée limite le transport des particules de terre très efficacement, dans la plupart de conditions.
- 5 points : si l'efficacité n'est pas entière ou si plusieurs conditions reliées au climat ou au terrain influencent cette efficacité.
- 0 point : si la solution proposée limite peu le déplacement des sédiments vers les cours d'eau et ne contribue pas efficacement à protéger l'environnement.

5.3.2 Coût

Certaines solutions, proposées dans le but de freiner l'érosion hydrique, peuvent être efficaces, mais leur coût élevé peut limiter l'application de cette solution. Le critère *coût* vise à évaluer l'importance des coûts d'application de cette solution. Selon l'importance des coûts, la note attribuée sera de :

- 15 points : si la solution ne nécessite pas de coûts supplémentaires ou si les coûts de la solution sont négligeables.
- 10 points : si la solution nécessite peu de coûts supplémentaires pour l'appliquer et si la dépense n'est pas répétitive.
- 5 points : si la solution nécessite certains coûts, si elle peut être implantée progressivement et si elle ne nécessite pas de services professionnels, ce qui augmente considérablement des frais d'implantation,
- 0 point : si les coûts d'application de la solution sont importants et si elle nécessite des services professionnels.

5.3.3 Simplicité

Les solutions antiérosives peuvent avoir différents niveaux de complexité. On peut distinguer deux types de simplicité : la simplicité de compréhension, donc la facilité de comprendre le besoin d'application de la solution, et la simplicité d'exécution, qui signifie l'application peu complexe de la méthode antiérosive.

Selon les différents niveaux de simplicité dans l'application de la méthode, la note attribuée sera de :

- 15 points : si la solution à appliquer est facile à comprendre, si son application n'est pas compliquée et si elle peut être effectuée en une seule étape.

- 10 points : si la solution à appliquer est facile à comprendre et si son application est peu compliquée.
- 5 points : si la solution est assez complexe à comprendre ou à appliquer, et si son application s'effectue en plusieurs étapes.
- 0 point : si la solution proposée est difficile à comprendre, difficile à effectuer et si elle nécessite l'aide d'un professionnel.

5.3.4 Adaptabilité

Pour qu'une solution antiérosive soit universelle, elle doit s'appliquer à toutes les cultures, ainsi qu'à toutes les conditions climatiques et de terrain rencontrées généralement au Québec. Certaines solutions proposées peuvent être plus efficaces dans certaines conditions ou pour certaines cultures. Selon l'adaptabilité de la solution proposée pour toutes les cultures et pour toutes les conditions, la note attribuée sera de :

- 15 points : si la solution proposée s'adapte facilement à toutes les cultures et à toutes les conditions du terrain et du climat.
- 10 points : si la solution proposée s'adapte facilement à la plupart des cultures et des conditions du terrain et du climat.
- 5 points : si la solution s'adapte à certaines cultures ou dans certaines conditions du terrain et du climat.
- 0 point : si la solution proposée est rarement appliquée et seulement dans des conditions spécifiques de climat ou de terrain.

5.3.5 Besoin d'un suivi

L'application de certaines solutions antiérosives peut nécessiter quelques préparations. Aussi, dans le cas de certaines structures antiérosives, un suivi ou un entretien peuvent être nécessaires. Chaque difficulté à surmonter ou tâche supplémentaire à effectuer peuvent avoir un impact sur l'application de la solution. Selon le besoin de préparation, en entretien ou en suivi à effectuer, la note attribuée sera de :

- 15 points : si la solution proposée ne nécessite pas de préparation, de suivi ou d'entretien.

- 10 points : si la solution proposée nécessite une préparation, mais aucun suivi ni entretien par la suite d'application de la solution.
- 5 points : si la solution proposée nécessite peu de préparations, peu d'entretien et peu de suivi.
- 0 point : si la solution proposée nécessite des préparations avant l'application, le suivi et l'entretien régulier.

Chaque solution peut obtenir un maximum de 75 points dans l'analyse de solutions.

Les solutions obtenant 55 points et plus seront jugées universelles et réalisables facilement.

Les solutions obtenant 50 points ou moins seront jugées plus difficiles à réaliser.

Cependant, dans certaines situations, leur réalisation constituera le seul moyen de pratiquer l'agriculture sur un terrain donné.

5.3.6 Analyse

Chaque solution antiérosive proposée et décrite au chapitre trois sera analysée selon les critères et la méthode définis auparavant.

5.4.1 Travail minimal du sol

- Efficacité

Le travail minimal du sol consiste à diminuer le passage de machinerie agricole sur les champs, les résidus des cultures étant alors laissés à la surface. Cette méthode diminue efficacement l'ampleur de l'érosion hydrique. L'efficacité de cette solution dépend du degré de réduction du travail du sol. Plus le travail du sol est réduit, plus la réduction de déplacement des sédiments est importante. La pratique du semis direct est la méthode de réduction la plus efficace. Dans cette situation, la note attribuée au critère *efficacité* est de 15.

- Coût

Le travail minimal du sol apporte aux agriculteurs des économies en temps de travail dans les champs et en carburant. Cependant, certains coûts supplémentaires sont nécessaires

pour l'achat de l'équipement requis avant l'application de cette méthode. Par la suite, aucun coût supplémentaire n'est nécessaire. Pour cela, la note attribuée au critère *coût* est de 10.

- **Simplicité**

Le travail minimal du sol est une méthode culturale qui nécessite un changement de mentalité et de manière de faire. Cette méthode est facile à comprendre, mais son application et sa maîtrise nécessitent une certaine expérience. Pour cela, la note attribuée au critère *simplicité* est de 10.

- **Adaptabilité**

Le travail réduit du sol consiste à minimaliser les interventions menées sur les terres agricoles. Cette méthode est plus facilement applicable aux cultures annuelles qu'aux cultures vivaces. Les conditions des terrains et les conditions climatiques ne limitent pas l'application de cette méthode. Plus ces conditions sont difficiles, plus l'application de cette méthode est efficace dans la réduction de l'érosion hydrique. Dans cette situation la note attribuée au critère *adaptabilité* est de 10.

- **Besoin d'un suivi**

L'application de la méthode de travail réduit du sol ne nécessite pas de structure, ni d'aménagement spécial. Il n'y a donc pas de suivi de cette méthode dans le temps. Pour cela, la note attribuée au critère *besoin d'un suivi* est de 15.

5.4.2 Culture de couverture

- **Efficacité**

Dans le travail conventionnel du sol, la période sans couverture du sol s'étale de l'automne, après la récolte de culture principale, jusqu'au printemps après la germination des semis. Ce temps sans couverture du sol se caractérise par une activité hydrique intensive, ce qui augmente considérablement les risques d'érosion hydrique. Pendant les pluies violentes, le sol sans couverture est facilement entraîné par l'eau de ruissellement. Les cultures de couverture constituent un moyen efficace de limiter cette érosion surtout si elles sont laissées sur les champs pendant l'hiver. Le sol couvert par les plantes et stabilisé par leurs

racines est protégé contre l'action des gouttes de pluie. La culture de couverture constitue un moyen très efficace de limiter l'érosion hydrique. Cependant cette efficacité peut être réduite pendant de l'implantation de la culture de couverture quand le sol est à nu. La note attribuée pour le critère efficacité est donc de 10.

- Coût

L'implantation de cultures de couverture nécessite certains coûts. Il s'agit du coût des semences ainsi que de la main-d'œuvre nécessaire pour effectuer le semis. Cependant, ces coûts sont négligeables, surtout si on enfouit la culture de couverture ou ses résidus dans le sol. L'apport de matière organique améliore la structure du sol et diminue le besoin en fertilisation. Pour cela, la note attribuée au critère *coût* est de 15.

- Simplicité

La culture de couverture est un moyen simple de limiter l'érosion hydrique. Autant la compréhension de son efficacité que l'exécution de cette méthode sont simples. La note attribuée au critère *simplicité* est donc de 15.

- Adaptabilité

Les cultures de couverture peuvent être semées partout où le sol est laissé à nu pendant une période de l'année, peu importe la culture principale et dans toutes les conditions de terrain et de climat. Le type de culture de couverture peut varier, ainsi que les périodes de semis et de récoltes. Toutefois, cette méthode reste universelle au Québec. Pour cela, la note attribuée au critère *adaptabilité* est de 15.

- Besoin d'un suivi

Les cultures de couverture ne nécessitent pas de structures ni d'aménagements spéciaux. Cette méthode de contrôle de l'érosion n'a pas donc besoin de suivi ni d'entretien associés à son application. La note attribuée au critère *besoin d'un suivi* est donc de 15.

5.4.3 Culture en contre-pente

- Efficacité

Le travail du sol dans le sens de la pente crée des chemins préférentiels pour l'eau de ruissellement. La vitesse de l'eau de ruissellement est augmentée par la gravité, ce qui lui donne plus d'énergie pour transporter les sédiments. Le travail du sol en contre-pente crée des obstacles pour l'eau de ruissellement et diminue, par le fait même, la vitesse de l'écoulement de l'eau de ruissellement. C'est une méthode très efficace si la pente du champ agricole n'est pas importante. Pour les pentes plus grandes, la capacité de cette méthode à restreindre l'ampleur de l'érosion hydrique diminue. Dans cette situation, la note attribuée au critère *efficacité* est de 10.

- Coût

Le travail du sol en contre-pente ne nécessite aucun coût supplémentaire. Il consiste uniquement en un changement de direction des travaux dans le champ. Pour cela, la note attribuée au critère *coût* est de 15.

- Simplicité

Cette méthode de travail est simple du fait que le travail se réalise dans le sens de la pente. La compréhension du besoin d'application de cette méthode est bien assimilée et facile ainsi que son exécution. Cependant, si les parcelles sont étroites l'exécution du travail peut-être plus difficile. Pour cela, la note attribuée au critère *simplicité* est de 10.

- Adaptabilité

La culture en contre-pente est universelle. Elle s'adapte à toutes les cultures et aux conditions climatiques. Pour appliquer cette méthode, le terrain doit être en pente. La note attribuée au critère *adaptabilité* est par conséquent de 15.

- Besoin d'un suivi

Les cultures en contre-pente ne nécessitent pas de structures ni d'aménagements spéciaux. Cette solution de contrôle de l'érosion n'a pas donc besoin de suivi ni d'entretien associés à son application. La note attribuée au critère *besoin d'un suivi* est donc de 15.

5.4.4 Rotation des cultures

- Efficacité

La rotation des cultures figure parmi les pratiques antiérosives. Elle entraîne une augmentation du taux de matière organique du sol et, par le fait même, une amélioration de la structure du sol. Les différents types de racines augmentent l'activité microbienne du sol. Généralement, la rotation des cultures stabilise les agrégats du sol et, par conséquent, augmente sa résistance à l'érosion hydrique. L'efficacité de cette méthode dépend des types des cultures qui entrent dans la rotation ainsi que leur durée dans le cycle de rotation. Une bonne rotation équilibrée, avec des plantes pérennes, se caractérise par une grande efficacité. Pour cela, la note attribuée au critère *efficacité* est de 15.

- Coût

La rotation des cultures ne demande aucun coût supplémentaire, au-delà des coûts associés aux activités ordinaires de l'exploitation agricole. Par conséquent, la note attribuée au critère *coût* pour cette méthode est de 15.

- Simplicité

La rotation des cultures est une solution simple. Une fois le but d'utilisation de cette méthode compris, l'exécution n'est pas compliquée. Pour cela, la note attribuée au critère *simplicité* est de 15.

- Adaptabilité

Toutes les conditions de terrain et de climat conviennent à la pratique de rotation des cultures et dans toutes les conditions, la rotation des cultures est recommandée. Également, toutes les cultures peuvent entrer dans un cycle de rotation des cultures. C'est une méthode universelle et, par conséquent, la note attribuée au critère *adaptabilité* est de 15.

- Besoin d'un suivi

La rotation des cultures n'exige aucune structure ni aucun aménagement. Il n'y a donc pas d'entretien ni de suivi de cette méthode. Le seul suivi consiste à faire suivre certains types

des cultures par d'autres et de s'adapter aux différents types de récoltes. Pour cela, la note attribuée au critère *besoin d'un suivi* est donc de 15.

5.4.5 Cultures en bandes alternées

- Efficacité

Les cultures en bande alternées consistent à cultiver des bandes de plantes, par exemple des graminées au travers de bandes de cultures annuelles. Leur largeur peut varier dépendamment du type de culture, de la pente et des risques d'érosion. Cette méthode diminue les risques d'érosion hydrique. Plus les bandes de graminées sont larges, plus l'efficacité est importante. L'efficacité dépend aussi du type de culture annuelle et de la méthode de récolte des différentes cultures. Puisque l'efficacité de cette méthode résulte de certaines conditions, la note attribuée au critère *efficacité* est de 5.

- Coût

La culture en bandes alternées ne nécessite aucun coût supplémentaire. Le travail du sol est fait selon les méthodes qui conviennent à chaque type de culture. Pour cela, la note attribuée au critère *coût* pour cette méthode est de 15.

- Simplicité

La culture en bandes alternées n'est pas compliquée ni à comprendre, ni à appliquer. La récolte avec cette méthode est effectuée en deux étapes, pour chaque culture séparément. Dépendamment des cultures et des conditions climatiques, la récolte d'une des cultures peut être plus difficile. La note attribuée au critère *simplicité* est par conséquent de 10.

- Adaptabilité

La culture en bandes alternées s'applique dans les conditions où le risque d'érosion est élevé, surtout sur les terrains en pente. Elle n'est pas utilisée pour toutes les cultures, et plutôt rarement, principalement pour les cultures à grande interligne, comme le maïs, pour lesquelles le risque d'érosion hydrique est important. À cause de sa faible utilisation dans la majorité des cultures, la note attribuée au critère *adaptabilité* est de 0.

- **Besoin d'un suivi**

Les cultures en bandes alternées ne nécessitent pas de structures ni d'aménagements spéciaux. Cette solution de contrôle de l'érosion n'a pas donc besoin de suivi ni d'entretien associés à son application. La note attribuée au critère *besoin d'un suivi* est donc de 15.

5.4.6 Résidus des cultures à la surface du sol

- **Efficacité**

Les résidus de cultures ou la paille laissés sur la surface de sol absorbent l'énergie des précipitations. En plus, ils créent la rugosité du sol, absorbent de l'eau et diminuent la vitesse de l'eau de ruissellement. Ces résidus enrichissent aussi le sol en matière organique. Les pertes de sols sont ainsi considérablement diminuées. Si les résidus de cultures sont laissés à la surface en quantités suffisantes, l'efficacité de cette méthode est importante. Pour cela, la note attribuée au critère *efficacité* est de 15.

- **Coût**

Les résidus de cultures laissés à la surface du sol c'est une méthode qui ne nécessite pas de coûts supplémentaires, car ces résidus constituent les restes des cultures qui ne sont pas récoltés. Dans le cas du paillage, les coûts de la paille sont à considérer, cependant cette méthode est utilisée assez rarement. Par conséquent, la note attribuée au critère *coût* pour les résidus de culture à la surface est de 15.

- **Simplicité**

Les résidus de cultures laissés sur les champs sont un moyen très simple de limiter l'érosion hydrique. Autant la compréhension de son efficacité que l'exécution de cette méthode sont simples. La note attribuée au critère *simplicité* est donc de 15.

- **Adaptabilité**

Il est recommandé de laisser des résidus de cultures à la surface du champ dans tous les types de production végétale. Cette méthode est adaptable à toutes les cultures et aussi à toutes les conditions de terrain ou de climat. Plus les risques d'érosion sont grands, plus de résidus de cultures ou de paille doivent être laissés à la surface du sol pour une efficacité

maximale. Cependant dans certains cas les résidus peuvent nuire au semis et retarder la levée des plantes. La note attribuée au critère *adaptabilité* est, par conséquent, de 10.

- Besoin d'un suivi

Les résidus de cultures laissés au sol ou le paillage ne nécessitent pas d'aménagements spéciaux. Cette méthode de contrôle de l'érosion n'a pas donc besoin de suivi ni d'entretien associés à son application. La note attribuée au critère *besoin d'un suivi* est donc de 15.

5.4.7 Voies d'eau engazonnées

- Efficacité

Les pratiques culturales de conservation du sol sont à recommander, mais dans les zones où l'eau s'écoule rapidement, elles risquent de ne pas être suffisamment efficaces. Dans cette situation, le ravinement peut être évité par l'installation d'une voie d'eau engazonnée ou enrochée. Cette méthode limite très efficacement les déplacements des sédiments chargés d'éléments nutritifs. Par conséquent, la note attribuée au critère efficacité est de 15.

- Coût

Une voie d'eau engazonnée constitue un aménagement installé dans le but de limiter la perte des sols, des sédiments et des éléments nutritifs. Les coûts d'installation de cet aménagement sont à prévoir surtout si l'installation d'un avaloir est envisagée. Pour cela, la note attribuée au critère *coût* pour cette méthode est de 0.

- Simplicité

L'installation d'une voie d'eau engazonnée est assez complexe. Elle nécessite l'utilisation de machinerie spécialisée et de compétences professionnelles. Par contre, une fois installée, la voie d'eau engazonnée est très simple à utiliser et n'a pas besoin de beaucoup d'interventions ou manipulations pour être efficace. Par conséquent, la note attribuée au critère *simplicité* est de 10.

- Adaptabilité

L'aménagement d'une voie d'eau engazonnée réduit considérablement les conséquences de l'érosion hydrique, peu importe le type de culture sur le champ. Cette méthode s'adapte surtout sur les terrains en pente. La note attribuée au critère *adaptabilité* est par conséquent de 10.

- Besoin d'un suivi

La voie d'eau engazonnée constitue un aménagement qui a besoin de suivi et d'un certain entretien. Si la dépression de la voie d'eau engazonnée est remplie de sédiments, il faut la vider. Le nettoyage est effectué au besoin, habituellement à l'intérieur d'une période de 3 à 5 ans. Également, l'entretien de l'avaloir est nécessaire. Par conséquent, la note attribuée au critère *besoin d'un suivi* est de 5.

5.4.8 Terrasses

- Efficacité

Les terrasses sont des aménagements antiérosifs implantés sur de longues pentes. Le but de cet aménagement est de réduire la longueur de la pente du champ, d'intercepter l'eau de ruissellement et de diminuer considérablement sa vitesse. C'est une structure très efficace dans la lutte contre l'érosion hydrique sur des champs avec des pentes importantes. Son aménagement constitue parfois le seul moyen d'utiliser des terrains comme les terres agricoles. Pour cela, la note attribuée au critère *efficacité* pour les terrasses est de 15.

- Coût

Malgré que la construction des terrasses réduise efficacement l'érosion hydrique, elle est aussi coûteuse et requiert les services d'un ingénieur. Par conséquent, la note attribuée au critère *coût* est de 0.

- Simplicité

La compréhension d'un besoin d'aménager des terrasses sur un terrain en pente n'est pas compliquée. Cependant, la construction de ces structures est très complexe et leur

exploitation nécessite certaines connaissances. La note attribuée au critère *simplicité* est donc de 0.

- Adaptabilité

Les terrasses conviennent à peu près à toutes les cultures. Cependant, les conditions du terrain nécessitant l'aménagement de ces structures sont spécifiques. À cause de ces particularités, la note attribuée au critère *adaptabilité* est de 10.

- Besoin d'un suivi

L'exploitation des champs situés sur des terrasses demande certaines compétences. Le suivi et l'entretien régulier des aménagements sont nécessaires, comme l'évaluation de l'état des structures, le contrôle de l'écoulement de l'eau, l'évaluation du déplacement des sédiments. Par conséquent, la note attribuée au critère besoin d'un suivi est de 0.

5.4.9 Bandes riveraines

- Efficacité

Les bandes riveraines sont des courroies de végétation implantées le long des rivières et autour des lacs. Une bande riveraine bien implantée et d'une bonne profondeur constitue un moyen efficace de contrôler le déplacement des sédiments vers les cours d'eau. Ces sédiments restent piégés au sol à cause de la végétation dense. De plus, les racines des plantes en absorbant les éléments nutritifs filtrent l'eau souterraine qui coule vers le lac ou le cours d'eau. L'implantation de bandes riveraines est un moyen très efficace dans toutes les conditions de terrain ou de climat. Cependant, elle n'empêche pas le déplacement de terre ou de sédiments à l'intérieur d'un champ agricole. Pour cela, la note attribuée au critère *efficacité* est de 5.

- Coût

Une bande riveraine peut s'implanter toute seule. La végétation indigène s'implantera après quelques années, si la surface du terrain est laissée sans intervention. Cependant, pour accélérer l'implantation de la bande riveraine, la plantation d'espèces indigènes peut être à considérer. Une fois la bande riveraine implantée, aucun autre coût n'est nécessaire.

Puisque l'installation d'une bande riveraine nécessite l'achat de plantes et éventuellement des coûts de réalisation, la note attribuée au critère coût est de 10.

- Simplicité

L'implantation d'une bande riveraine le long d'une rivière peut nécessiter certaines interventions, dépendamment des conditions. La réalisation d'une bande riveraine qui répond à la réglementation en vigueur peut nécessiter l'intervention d'un spécialiste et la préparation d'un plan d'aménagement. Par conséquent, la note attribuée au critère simplicité est de 5.

- Adaptabilité

L'implantation d'une bande riveraine nécessite la présence d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau. Son efficacité est grande, peu importe la culture sur le champ avoisinant. Cette mesure est aussi efficace dans toutes les conditions climatiques et dans toutes les conditions de terrain. La profondeur de la bande riveraine doit être adaptée à la pente de la rive, au type de sol et au type de culture sur le champ. Par conséquent, la note attribuée au critère *adaptabilité* est de 15.

- Besoin d'un suivi

La bande riveraine, une fois bien implantée, n'a généralement pas besoin de beaucoup d'entretien ni de suivi. Le principe de l'implantation d'une bande riveraine est de la laisser naturelle et sans interventions. Cependant, une vérification périodique est nécessaire. Dans le cas d'une obstruction des cours d'eau par des branches ou des arbres cassés, leur nettoyage est nécessaire. Dans cette situation, la note attribuée au critère *besoin d'un suivi* est de 10.

5.4.10 Réviser la stratégie de fertilisation

- Efficacité

La révision de la stratégie de fertilisation n'est pas une mesure antiérosive. Cependant, l'application de cette mesure peut diminuer les conséquences néfastes de l'érosion hydrique sur l'environnement. Cette solution ne peut pas limiter l'ampleur de l'érosion, cependant la

fertilisation qui respecte le PAF diminue considérablement les risques de pollution des cours d'eau. Pour cela, la note attribuée au critère *efficacité* est de 5.

- Coût

Tous les producteurs agricoles doivent avoir un plan agroenvironnemental de fertilisation. Il doit être préparé par un agronome et prendre en considération le type de sol, sa richesse, les besoins des cultures en fertilisation, les caractéristiques des champs agricoles et d'autres éléments. Ce plan doit être respecté par l'agriculteur pour minimiser les impacts de ses activités sur l'environnement. Puisque la plupart des producteurs agricoles devraient avoir un plan de fertilisation, qui doit également être révisé périodiquement, la note attribuée au critère *coût* est de 10.

- Simplicité

Le plan agroenvironnemental de fertilisation est préparé par un spécialiste. Le producteur agricole n'a qu'à l'appliquer et respecter les recommandations du plan. Cette stratégie simplifie la tâche des agriculteurs et une fertilisation adéquate et sécuritaire pour l'environnement est plus facile. Pour cela, la note attribuée au critère *simplicité* est de 15.

- Adaptabilité

Chaque entreprise agricole doit avoir une stratégie de fertilisation et la revoir périodiquement. Des conditions différentes, de nouvelles cultures ou un changement de fertilisation peuvent modifier la fertilité du sol. La révision du plan de fertilisation est indispensable, pour être capable de faire les ajustements nécessaires, peu importe le type de production agricole. Par conséquent, la note attribuée au critère *adaptabilité* est de 15.

- Besoin d'un suivi

Le PAF doit être suivi par l'agriculteur et sa révision périodique est nécessaire pour ajuster la fertilisation dans le futur. Ce suivi est effectué par l'agronome du club agroenvironnemental. Le producteur agricole n'a donc qu'à le respecter. Pour ces raisons, la note attribuée au critère *besoin d'un suivi* est de 10.

5. 4.11 Découpage des parcelles

- Efficacité

Le découpage des parcelles peut constituer une mesure efficace pour limiter les déplacements des sédiments sur de longues distances. Les parcelles plus petites, entourées de bandes de végétation, sont moins à risque de subir d'érosion hydrique. Cependant, les déplacements de sédiments à l'intérieur d'une parcelle ne sont pas affectés par le découpage parcellaire. Par conséquent, la note attribuée au critère *efficacité* est de 5.

- Coût

Le découpage parcellaire ne nécessite pas de coûts supplémentaires. Il suffit de diviser des champs en plus petites parcelles sur lesquelles les différentes cultures seront cultivées et de laisser pousser une bande de végétation entre les parcelles. Cependant, certains coûts relatifs à l'utilisation de carburants ou de main-d'œuvre peuvent être à considérer. Par conséquent, la note attribuée au critère *coût* est de 10.

- Simplicité

Le découpage des champs agricoles en plus petites parcelles peut compliquer les travaux agricoles. Il faut planifier la rotation des cultures pour chaque parcelle et avec un grand nombre de parcelles, la planification devient plus compliquée. De plus, l'utilisation de grande machinerie peut devenir impossible ou limitée. Pour cela, la note attribuée au critère *simplicité* est de 5.

- Adaptabilité

Le découpage parcellaire peut être effectué sur tous les champs agricoles. Toutes les cultures peuvent être cultivées sur des parcelles de différentes tailles. Aussi, les conditions de terrain ou de climat n'empêchent pas le découpage qui aura toujours des impacts positifs sur l'environnement. La note attribuée au critère *adaptabilité* est donc de 15.

- Besoin d'un suivi

Le découpage des champs agricoles en plusieurs petites parcelles nécessite un suivi des cultures sur chaque parcelle. Par conséquent, le suivi de la fertilisation par parcelle est

important pour l'appliquer selon les conditions et des besoins des cultures à venir. Par conséquent, la note attribuée au critère *besoin d'un suivi* est de 5.

5.4 Interprétation de résultats d'analyse

Chacune des 11 solutions envisageables décrites au chapitre quatre a été analysée selon cinq critères bien définis. Sept de ces méthodes antiérosives proposées, soit : le travail minimal du sol, la culture de couverture, la culture en contre-pente, la rotation des cultures, les résidus des cultures laissés à la surface du sol, la bande riveraine et la révision de la stratégie de fertilisation ont obtenu une note égale ou plus élevée que 55 points. Ces méthodes sont par conséquent jugées universelles et facilement réalisables. Les voies d'eau engazonnées et les terrasses ont obtenu le pointage le plus faible à cause des coûts élevés de ces aménagements, du besoin de suivi et d'entretien, et des conditions spécifiques nécessitant leur implantation. Malgré que l'application de ces méthodes antiérosives est plus dispendieuse et compliquée et jugée non universelle, certaines conditions de terrain les rendent nécessaires ou du moins très utiles. La culture en bandes alternées est une méthode utilisée dans des conditions spécifiques, elle n'est donc pas universelle. Le découpage parcellaire qui a obtenu 40 points, limitait dans le passé l'érosion hydrique sur de longues distances d'une façon efficace, mais aujourd'hui avec le développement de la technologie, le découpage parcellaire est plutôt irréalisable. Cette méthode ne peut pas, par conséquent, être considérée comme universelle et facilement réalisable. Le tableau 5.1 présente le résumé des résultats d'analyse.

Tableau 5.1 Résumé des résultats d'analyse de solutions envisageables

Critères						
Solutions	Efficacité	Coût	Simplicité	Adaptabilité	Besoin d'un suivi	Total
Travail minimal du sol	15	10	10	10	15	60
Culture de couverture	10	15	15	15	15	70
Culture en contre-pente	10	15	10	15	15	65
Rotation des cultures	15	15	15	15	15	75
Cultures en bandes alternées	5	15	10	0	15	45
Résidus de culture à la surface	15	15	15	10	15	70
Voies d'eau engazonnée	15	0	10	10	5	40
Terrasses	15	0	0	10	0	25
Bandes riveraines	5	10	15	15	10	55
Revoir la stratégie de fertilisation	5	10	15	15	10	55
Découpage parcellaire	5	10	5	15	5	40

6. SCHÉMA DES CAUSES, DES CONSÉQUENCES DE L'ÉROSION HYDRIQUE AINSI QUE DES BIENFAITS DE BONNES PRATIQUES AGRICOLES

Pour visualiser les causes et les effets de l'érosion hydrique, ainsi que les meilleures méthodes contrant ce processus, une affiche a été préparée. Elle est divisée en deux parties. La partie de gauche illustre le schéma des causes et des conséquences de l'érosion hydrique. Tous les éléments utilisés dans le schéma ont été abordés dans le présent travail. Les principales causes de l'érosion hydrique présentés sur l'affiche sont : l'augmentation de la taille des parcelles, les pluies violentes, l'augmentation des superficies en cultures annuelles et monocultures, les sols légers, la topographie du terrain avec beaucoup de pentes et les travaux agricoles effectués dans le sens de la pente. Les conséquences de l'érosion hydrique illustrées sur le schéma sont : des pertes des sols qui engendrent des coûts élevés, la détérioration de la structure du sol, la perte de la fertilité et une diminution des rendements et la détérioration de la qualité de l'eau qui mène souvent à l'eutrophisation des rivières et des lacs.

Sur le côté droit de l'affiche les meilleures pratiques agricoles dans la lutte avec l'érosion hydrique sont proposées. Les pratiques agricoles qui diminuent les risques de l'érosion sont : le travail minimal du sol, les cultures de couverture, les cultures en contre-pentes, la rotation des cultures, les cultures en bandes alternées, des résidus des cultures laissés à la surface du sol, ainsi que la révision de la stratégie de fertilisation pour l'entreprise agricole. Dans certains cas, les aménagements antiérosifs comme : les terrasses, les voies d'eau engazonnées et l'implantation des bandes riveraines sont nécessaires. Les conséquences positives de ces pratiques sur l'environnement sont présentées sur le schéma : la conservation du sol sur le champ et le maintien de la structure du sol et de sa fertilité. Aussi l'amélioration de la structure du sol ainsi que de la qualité de l'eau constituent des conséquences positives de ces pratiques agricoles.

La figure 6.1 présente le schéma des causes, des conséquences de l'érosion hydrique, ainsi des pratiques antiérosives avec leurs effets positifs sur l'agriculteur et sur l'environnement.

CONTRÔLEZ L'ÉROSION POUR QUE VOS INVESTISSEMENTS NE DISPARAISSENT PAS DANS L'EAU

ÉROSION- CAUSES ET EFFETS



PRATIQUES ANTIÉROSIVES



Figure 6.1 Schéma des causes, des conséquences de l'érosion hydrique, ainsi que des pratiques antiérosives avec leurs effets positifs pour l'agriculteur et sur l'environnement.

CONCLUSIONS

Depuis plusieurs années, l'agriculture est au cœur d'un débat traitant de ses impacts réels sur l'environnement. D'un côté, l'avancement de l'agriculture a réussi à augmenter les rendements grâce à la maîtrise de nouvelles techniques de production. De l'autre côté, le prix à payer pour une telle réussite est la dégradation des milieux naturels, ainsi que la baisse de qualité des produits.

Aucune région, quel que soit son climat, n'est à l'abri de l'érosion hydrique. Une prise de conscience de ce phénomène s'impose de la part des utilisateurs du sol. Dans la nature, le sol exerce à l'égard de l'eau et de l'atmosphère une fonction épuratrice. Il doit donc être protégé contre toute forme de dégradation, car la reconstruction d'un sol dégradé est difficile.

L'érosion hydrique est un processus naturel qui a été amplifié par des activités anthropiques. En Estrie, ce phénomène est en constante croissance, surtout avec l'évolution qu'a connue notre région dans les dernières années. Si des actions efficaces ne sont pas entreprises, la viabilité de l'agriculture peut être mise en danger. En plus, l'érosion hydrique constitue la principale cause d'exportation du phosphore des sols agricoles vers les eaux de surface. La détérioration de la qualité de cette eau est un phénomène qui progresse depuis plusieurs années. La prolifération des algues bleues, les avis de non-baignade et l'interdiction de la pêche sont de plus en plus souvent notés au Québec, ainsi que dans la région de l'Estrie. Les écosystèmes aquatiques sont déséquilibrés, ce qui affecte également plusieurs espèces animales et végétales vivant dans ces milieux de notre région.

L'étude menée tout au long de ce travail a permis de déterminer les causes de l'érosion hydrique en Estrie. Ces causes sont l'augmentation de la taille des parcelles, les pluies violentes, les sols légers, l'augmentation des cultures annuelles et monocultures dans la région et la présence de beaucoup de terrains en pentes. Plusieurs impacts de l'érosion hydrique ont aussi été déterminés. Ces impacts sont : la perte du sol, la détérioration de sa structure, la perte de la fertilité et, par conséquent, la diminution des rendements. Il faut

également relever comme impact majeur la détérioration de la qualité de l'eau en région, ce qui se traduit par l'eutrophisation des lacs.

La dégradation des sols en Estrie existe, mais déterminer l'ampleur de cette dégradation est difficile. La situation actuelle résulte d'un manque des connaissances et de sensibilisation de la part de tous les acteurs du milieu agricole et elle est manifestement d'un intérêt capital, car nos ressources en sols à bon potentiel agricole sont limitées.

L'analyse de solutions de contrôle de l'érosion a permis de déterminer sept méthodes culturales universelles et facilement réalisables. Ce sont : le travail minimal du sol, la culture de couverture, la culture en contre-pente, la rotation des cultures, les résidus de cultures laissés à la surface du sol, l'implantation des bandes riveraines et la révision de la stratégie de fertilisation. Deux autres méthodes, les voies d'eau engazonnées et les terrasses, malgré qu'elles soient jugées non universelles, sont nécessaires dans certaines conditions de terrain, pour que celui-ci puisse être utilisé à fins agricoles.

Une simulation des pertes de phosphore dans le bassin versant du ruisseau Cass en Estrie a permis de faire une estimation théorique des pertes des différentes formes de phosphore d'une région agricole. Cette estimation sera dans le futur comparée avec les résultats réels obtenus sur le terrain par des appareils de mesure, installés par le MAPAQ de l'Estrie en collaboration avec l'RDA.

Bien que les méthodes antiérosives soient bien documentées, la nécessité de leur application n'est pas bien comprise par plusieurs agriculteurs. L'adaptation de méthodes culturales respectueuses de l'environnement exige un changement de mentalité des agriculteurs. Les mesures appropriées doivent être appliquées pour diminuer l'érosion hydrique jusqu'à un seuil acceptable. Il n'y a pas de solutions miracles pour régler ce problème. Cependant, l'application de pratiques culturales simples et universelles, favorables du point de vue du contrôle de l'érosion hydrique et connues à ce jour, peut déjà contribuer à la diminution des pertes des sols et à l'amélioration marquante de la qualité de

l'environnement. Il faut ajouter que plusieurs de ces pratiques ne nécessitent pas d'investissements financiers majeurs.

Si on veut pratiquer l'agriculture durable, le maintien de la qualité du sol, de l'eau et de l'air en milieu agricole est nécessaire. Les enjeux pour les prochaines années en agriculture sont ceux-ci: la sensibilisation et l'information des agriculteurs au sujet des causes et des effets de l'érosion hydrique ainsi que l'incitation à changer les méthodes culturales pour celles qui sont plus respectueuses de l'environnement. Pour cela, les recherches doivent continuer et de nouvelles solutions doivent être développées. Une réglementation efficace contribue également à une amélioration de la situation des agriculteurs, à une bonne qualité des produits agricoles et au contrôle des impacts néfastes sur l'environnement.

RÉFÉRENCES

- Adrien, J. (2009). Tendances dans l'intensité des pluies au Québec. Communication personnelle, 30 octobre 2009.
- Agence Parcs Canada (2009). Les interactions forestières. In Agence Parcs Canada, *Centre de ressources éducatives*. [En ligne]. http://www.pc.gc.ca/.../htm/pukaskwaex_f.asp, (Page consultée le 9 novembre)
- Beauchamp, J. (2008).. *La lutte contre l'érosion des champs dans les régions de grandes cultures*, In Université de Picardie Jules Verne. [En ligne]. http://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/Erosion_sol/Erosion-sol.htm, (Page consulté le 21 janvier 2009)
- Beauchamp, J. (2008a). *Pédologie, Propriétés des sols*, In Université de Picardie Jules Verne. [En ligne]. <http://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/sol.htm>, (Page consulté le 21 janvier 2009).
- Beaudoin, J. (2006). Variabilité spatio-temporelle des exportations de sédiments et de phosphore dans le bassin versant de la rivière aux Brochets au sud-ouest du Québec. *Agrosolutions*, vol.17, n°1 Novembre 2006, p.4-20
- Beaudoin J. (2006a). Variabilité spatio-temporelle des flux de sédiments et de phosphore dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets au sud-ouest du Québec. *Agrosolutions*, v17, n°1 Novembre 2006, p. 21-33
- Bremer, E., Greek, K.J., Black, M., Townley-Smith, L., Malhi, S.S., Izaurralde, R.C.,Larney, F.J. (2008). SimPLE.ca : Simulator of productivity loss due to erosion for Canada. *Canadian journal of soil science*, vol. 88, no3, p 365-376
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) (2003). *Guide de référence en fertilisation*. Sainte-Foy, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 1-er édition, 297 p.
- Chevalier P. (1993). *Gestion des ressources renouvelables. Secteur agricole et forestier*. Québec, Télé-université, 558 p. (Collection Science de l'environnement).
- Comité de gestion de bassin versant de la Yamaska (COGEBY) (2001). *La lutte contre l'érosion, tout le monde y gagne!* Brochure, Comité de gestion de bassin versant de la Yamaska, 4p.
- Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois. (2008). Agriculture et agroalimentaire : assurer et bâtir l'avenir. In Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois, , Rapport de la commission, sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois. [En ligne]. <http://www.caaq.gouv.qc.ca/documentation/rapportfinal.fr.html>, (Page consultée le 13 octobre 2009)

- Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ) (1999). 3e colloque sur le travail minimum du sol. In Conseil des productions végétales du Québec. *Un sol en santé, c'est payant*, St- Hyacinthe, 16-17 février 1999, Québec, Conseil des productions végétales du Québec, 121 p.
- Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ) (1995). *Sols. Diagnostic de la dégradation des propriétés physiques des sols*, Québec, Conseil des productions végétales du Québec, 16 p.
- Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ) (1993). *Avaloir*. Feuille technique, Québec, Conseil des productions végétales du Québec ,4 p.
- Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ) (1986). *La dégradation des sols agricoles : Causes, effets, prévention et correction*. Bulletin Technique, Québec, Conseil des productions végétales du Québec, 147 p.
- Conseil des sciences du Canada (1986). *La dégradation des sols au Canada : un mal en progression*. Déclaration du Conseil. Ottawa, Conseil des sciences du Canada, 24 p.
- Duchaufour, P. (1995). *Pédologie, sol, végétation, environnement*. 3e édition, Paris, Masson, 324 p.
- Entente auxiliaire Canada – Québec sur le développement agro-alimentaire. (1990). *Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec*, Rapport synthèse, Québec, Institute de recherche et développement en agroenvironnement, 87 p.
- Gaillard C. (2001). *Amélioration d'un modèle distribué d'érosion hydrique par la prise en compte spatiale de l'influence anthropique, en milieu agricole*. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 178 p.
- Giroux, M., Royer, R. (2006). *Influence des modes de fertilisation sur les pertes des éléments nutritifs dans les drains agricoles sous le maïs-grain, l'orge et le canola*. Cahier de l'observation de la qualité des sols du Québec (cahier nr 6), Québec, Institut de recherche et développement en agroenvironnement, 84 p.
- Groupe de recherche en économie et politique agricoles (GREPA). (2000). *Le portrait agroenvironnemental des fermes du Québec*, Québec, GREPA, 132 p.
- Hénin, S. (1976). *Cours de physique du sol*. Bruxelles, Editest, 159 p.
- Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). (2008). *Les sources, les formes et la gestion du phosphore en milieu agricole*, Fiche technique nr 1, Québec, Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec, 12 p.

- Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). (2008a). *Les sources, les formes et la gestion du phosphore en milieu agricole*, Fiche technique nr 2, Québec, Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec, 12 p.
- Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). (2008b). *Le transport phosphore*, Fiche technique nr 3, Québec, Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec, 11 p.
- Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). (2008c). *Les outils de caractérisation du risque de perte de phosphore vers les eaux de surface*, Fiche technique nr 4, Québec, Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec, 14 p.
- Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). (2008d). *ODEP. Outil de diagnostic des exportations de phosphore. Manuel de l'utilisateur. Version 1,1 (pilote)*, Québec, Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec, 111 p.
- Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). (2004). *Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux*. Versailles, INRA Éditions 358 p.
- Ministère de l'Agriculture. (1943). *Études des sols des comtés de Stansted, Richmond, Sherbrooke et Compton*. Ottawa, Ontario, 63 p.
- Ministère de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire du Canada (2009). La Planification de la gestion des éléments nutritifs. In Agriculture et Agroalimentaire Canada. *Le sol et la terre* [En ligne]. <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1187355760327&lang=fra>, (Page consultée le 28 septembre 2009).
- Ministère de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire du Canada (2009a). Série sur les indicateurs agroenvironnementaux, Rapport no 2. In Agriculture et Agroalimentaire Canada. *L'agriculture écologiquement durable au Canada*, [En ligne]. <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/displayafficher.do?id=1182779793560&lang=fra> (Page consultée le 30 octobre 2009).
- Ministère de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire du Canada (2009b). Conséquences de l'érosion : vue d'ensemble. In Agriculture et Agroalimentaire Canada, *Le sol et la terre*, [En ligne]. <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1187283440379&lang=fra>, (Page consultée le 20 février 2009).
- Ministère de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire du Canada (2009c). Capacité d'échange cationique (CEC) des horizons A, B et C. In Agriculture et Agroalimentaire Canada. *Le service national d'information sur les terres et des eaux*, [En ligne]. http://nlwis-snite1.agr.gc.ca/apaq-aapq/doc/T16CEC_f.pdf, (Page consultée le 18 janvier 2009).
- Ministère de l'Agriculture et Agroalimentaire du Canada. (2008). Explication des ordres des sols, In Agriculture et agroalimentaire du Canada. *Base nationale de données sur les*

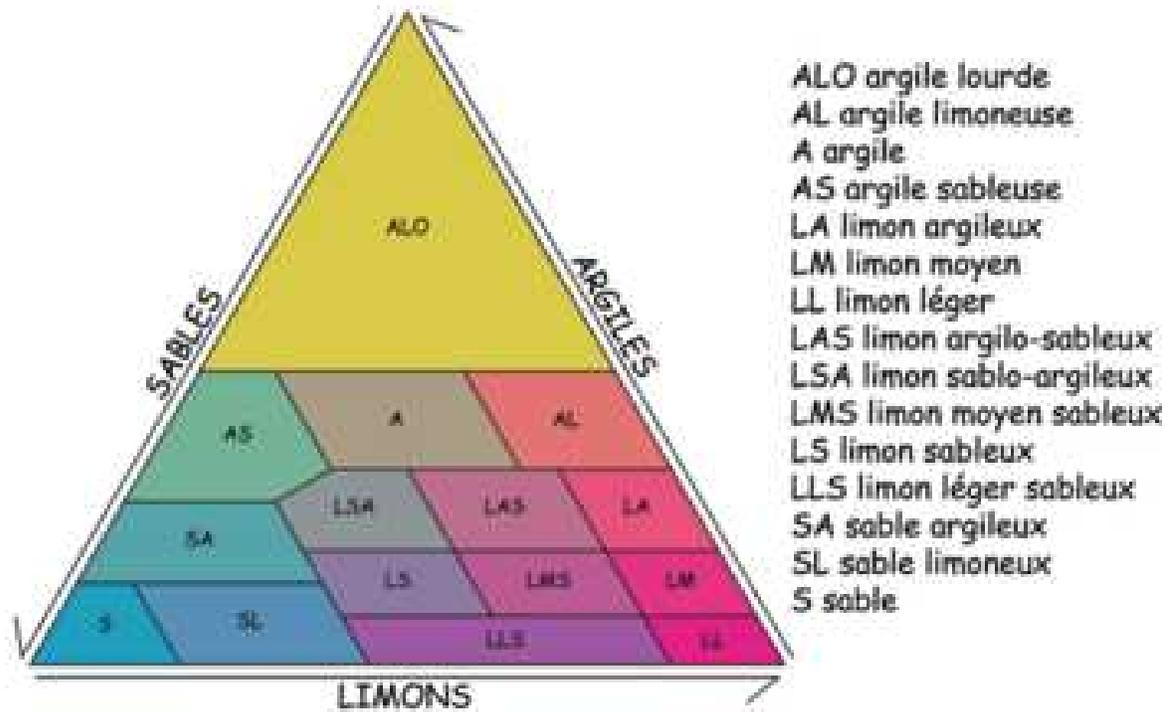
- sols*, [En ligne]. <http://res.agr.ca/siscan/nsdb/interpretation/about-soil-order.html>, (Page consultée le 9 octobre 2009)
- Ministère de l'Agriculture et Agroalimentaire du Canada (2000). *L'agriculture écologiquement durable au Canada : Rapport sur le projet des indicateurs agroenvironnementaux*, Ottawa, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 226 p.
- Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales. (2009). Travail du sol. *In* Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario. *Gestion du sol et usage de fertilisants*, [En ligne]. <http://www.omafr.gov.on.ca/french/crops/pub811/2tillsys.htm>, (Page consultée le 21 octobre 2009).
- Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales. (2009a). Sensibilisation au changement climatiques en agriculture. *In* Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario. *BPG (Bonnes pratiques de gestion)*, [En ligne]. www.omafr.gov.on.ca/.../field/nontillage.htm, (Page consultée le 19 octobre 2009).
- Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales. (2009a). Semis directs : secrets de réussite. *In* Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario. *Les pratiques de gestion optimales*, [En ligne]. http://www.omafr.gov.on.ca/french/environment/no_till/no_till.htm, (Page consultée le 22 octobre 2009).
- Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (s.d). Suivi 2007 du Portrait agroenvironnemental des fermes du Québec. Évolution de la situation au Québec de 1998 à 2007. Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 35 p.
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2008). Diagnostic et solutions des problèmes d'érosions des berges de cours d'eau. *In* Agrireseau du Québec. *Fiche technique*, [En ligne]. http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Berges_FR_web.pdf (Page consultée le 21 octobre 2009).
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2008a). Voies d'eau et rigoles d'interception engazonnées. *In* Agrireseau du Québec. *Fiche technique*, [En ligne]. http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/VoiedEauEngazonnees_FR_web.pdf, (Page consultée le 21 octobre 2009).
- Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2007). *Profil de la région, Estrie*. *In* Agriculture, Pêche et Alimentation du Québec. [En ligne]. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Regions/estrie/VraiProfil/67k>, (Page consultée le 5 octobre 2009).

- Ministère de l'Agriculture des Pêcherie et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2006). *Agriculture et agroalimentaire en Estrie*, In Agriculture, Pêcherie et Alimentation du Québec. [En ligne]. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/FA56E0BD-C06F-4BFF-9F11-6EAA38AF1ED1/0/Estrie3.pdf>, (Page consultée le 5 octobre 2009).
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2006a). Mon sol, je le conserve!, In Agriculture, Pêcheries et Alimentation du Québec, [En ligne]. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Regions/estrie/journal/avril2006/solconserve/solconserve.htm>, (Page consultée le 23 janvier 2009).
- Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) (2002). *Agriculture et agroalimentaire en Estrie. Évolution, tendances et perspectives*, Québec, Bibliothèque nationale du Québec, 87 p.
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, (MAPAQ). (1998), *Étude des sols des comtés de Mégantic*. Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 105 p.
- Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (1996). *Études pédologique de comté de Frontenac*, Québec, Bibliothèque Nationale du Québec, 221p.
- Ministère de Développement durable de l'Environnement et de Parcs (MDDEP). (2009). Bilan des lacs et des cours d'eau touchés par une fleur d'eau des algues bleu-vert du Québec de 2004 au 15 septembre 2009. In Ministère de Développement durable de l'Environnement et des Parcs du Québec. *Eau*, [En ligne]. http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/algues-bv/bilan/liste_comparative.asp, (Page consultée le 3 novembre 2009).
- Ministère de Développement durable de l'Environnement et de Parcs (MDDEP). (2007). Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables, Québec, les publications du Québec, 107p.
- Ministère de Développement durable de l'Environnement et de Parcs (MDDEP). (2005). *Capacité de support des activités agricoles par les rivières : le cas du phosphore total*. In Ministère de Développement durable de l'environnement et des Parcs du Québec. [En ligne]. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/capacite-phosphore.pdf>, (Page consultée le 3 novembre 2009).
- Ministère de Développement durable de l'Environnement et de Parcs (MDDEP). (2002). Portrait régional de l'eau. Estrie. In Ministère de Développement durable de l'environnement et des Parcs du Québec. *Eau*, [En ligne]. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/regions/region05/index.htm>, (Page consultée le 23 octobre 2009).
- Ministère de Développement durable de l'Environnement et de Parcs (MDDEP). (2002a). Suivis du phosphore requis dans un plan agro-environnemental de fertilisation. In

- Ministère de Développement durable de l'environnement et des Parcs du Québec. *Guide agro-environnemental de fertilisation*, [En ligne]. http://www.mddep.gouv.qc.ca/milieu_agri/agricole/guide3.htm (Page consultée le 8 décembre 2009).
- Ministère de l'Environnement Canada (2009). Archives national d'information et de données climatologiques, *In Environnement Canada. Données climatiques en ligne*, [En ligne]. http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/menu_f.html?timeframe=1&Prov=QC&StationID=9999&Year=2007&Month=8&Day=7, consulté le 3 novembre 2009
- Morel, R. (1996). *Les sols cultivés*, 2e édition, Paris, Lavoisier, 389 p.
- Musy, A., Soutter, M. (1991). *Physique du sol*, Lausanne, Collection Presses polytechniques et universitaires romandes 335 p., collection Gérer environnement.
- Nolin, M.C., Quenum, M., Cambouris, A.N., Martin, A., Cluis, D. (2005). Rugosité de la surface du sol- description et interprétation. Québec. *Agrosol*, vol 16, no 1, p.5 – 21.
- Pillet, G., Longet, R. (1989). *Les sols. Faciles à perdre et difficiles à regagner*. Genève, Société suisse pour la protection de l'environnement, collection : Dossiers de l'environnement, volume III, 135 p.
- Prieur M. (1995). *L'agriculture biologique, une agriculture durable? Droit comparé de l'environnement*. Presse Universitaire de Limoges (PULIM), Limoges, 362 p.
- Statistique Canada (2009). Un portrait de l'agriculture canadienne, *In Statistique Canada, Recensement de l'agriculture de 2006*, En ligne], <http://www.statcan.gc.ca/ca-ra2006/articles/snapshot-portrait-fra.htm#ferme>, (Page consultée le 28 novembre 2009).
- Toffoli, R. (2009). Agronome au Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation de l'Estrie, Solutions antiérosives universelles. Communication personnelle, 22 janvier 2009, 24 novembre 2009.
- Trencia G. (1987). *L'érosion en zone agricole : origine, impact et méthodes de contrôle*. Québec, Ministère du loisir, de la chasse de la pêche, 39 p.
- Université de Moncton (2009). Littoral et vie, *In Université de Moncton*, [En ligne], <http://www0.umoncton.ca/littoral-vie/sciences-terre.htm#utilites-sols>, (Page consultée le 6 février 2009).
- Wikipedia (2009). Profil du sol. [En ligne]. http://fr.wikipedia.org/wiki/Profil_de_sol, (Page consultée le 6 février 2009).
- Wikipedia (2009a). Texture du sol. [En ligne]. http://fr.wikipedia.org/wiki/Texture_du_sol, (Page consultée le 6 février 2009).

ANNEXE 1

Triangle des textures des sols (Wikipédia 2009a)



Source : Wikipédia 2009a

Annexe 2

Liste des cours et des plans d'eau touchés par une fleur d'eau d'algues bleu-vert en Estrie entre 2004 et 15 septembre 2009 (MDDEP, 2009)

Bilan des lacs et cours d'eau touchés par une fleur d'eau d'algues bleu-vert au Québec

De 2004 au 15 septembre 2009

Depuis 2008, le Ministère a établi qu'une problématique de fleur d'eau d'algues bleu-vert correspond à une densité supérieure ou égale à 20 000 cellules/ml. Les données antérieures à 2008 ont été révisées en appliquant ce seuil. Les municipalités inscrites au bilan sont celles qui ont été touchées ou avisées par le Ministère de la présence d'algues bleu-vert.

- Plan d'eau touché par une fleur d'eau d'algues bleu-vert (résultat supérieur ou égal à 20 000 cellules/ml à au moins un endroit sur le plan d'eau)
- Plan d'eau qui n'est plus considéré comme touché (résultat inférieur à 20 000 cellules/ml ou observations visuelles seulement sans confirmation de l'atteinte du seuil)

Vos critères de recherche sont les suivants :

Plans d'eau : Tous

Municipalités : Toutes

Bassins versants : Tous

Région administrative : **Estrie**

RÉGION ADMINISTRATIVE : Estrie

Plan d'eau	Bassin versant	<u>Municipalité</u>	2009	2008	2007	2006	2005	2004
Araignées, Lac aux	Chaudière, Rivière	Frontenac	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Argent, Lac d'	Richelieu, Rivière	Eastman	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Argent, Lac d'	Saint-François, Rivière	Dudswell	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aylmer, Lac	Saint-François, Rivière	Stratford	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Aylmer, Lac	Saint-François, Rivière	Weedon	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Boissonneault, Lac	Saint-François, Rivière	Saint-Claude	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Bran de Scie, Lac	Saint-François, Rivière	Orford	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Brompton, Lac	Saint-François, Rivière	Orford	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Brompton, Lac	Saint-François, Rivière	Racine	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Brompton, Lac	Saint-François, Rivière	Saint-Denis-de-Brompton	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Brompton, Petit lac	Saint-François, Rivière	Saint-Denis-de-Brompton	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Denison, Lac	Nicolet, Rivière	Cleveland	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Denison, Lac	Nicolet, Rivière	Danville	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Desmarais, Lac	Saint-François, Rivière	Saint-Denis-de-Brompton	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Drolet, Lac	Chaudière, Rivière	Lac-Drolet	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Elgin, Lac	Saint-François, Rivière	Stratford	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lac (sans toponyme) (Asbestos, Étang d'alimentation)	Nicolet, Rivière	Asbestos	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lambton, Petit lac	Saint-François, Rivière	Lambton	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Leclerc, Lac	Saint-François, Rivière	Orford	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lindsay, Lac	Saint-François, Rivière	Saint-Malo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lippé, Lac	Saint-François, Rivière	Saint-Herménégilde	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Lovering, Lac	Saint-François, Rivière	Magog	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lovering, Lac	Saint-François, Rivière	Stanstead	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lyster, Lac	Saint-François, Rivière	Coaticook (Baldwin)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Magog, Lac	Saint-François, Rivière	Magog	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Magog, Lac	Saint-François, Rivière	Sainte-Catherine-de-Hatley	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Magog, Lac	Saint-François, Rivière	Sherbrooke	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Magog, Rivière	Saint-François, Rivière	Magog	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Magog, Rivière	Saint-François, Rivière	Sainte-Catherine-de-Hatley	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Magog, Rivière	Saint-François, Rivière	Sherbrooke	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Maskinongé, Lac	Saint-François, Rivière	Stornoway	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Maskinongé, Lac	Saint-François, Rivière	Stratford	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Massawippi, Lac	Saint-François, Rivière	Ayer's Cliff	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Massawippi, Lac	Saint-François, Rivière	Hatley (canton)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Massawippi, Lac	Saint-François, Rivière	Hatley (ville)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Massawippi, Lac	Saint-François,	North Hatley	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

	Rivière								
Massawippi, Lac	Saint-François, Rivière	Sainte-Catherine-de-Hatley	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Massawippi, Rivière	Saint-François, Rivière	North Hatley	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Mégantic, Lac	Chaudière, Rivière	Frontenac	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Mégantic, Lac	Chaudière, Rivière	Lac-Mégantic	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Mégantic, Lac	Chaudière, Rivière	Marston	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Mégantic, Lac	Chaudière, Rivière	Piopolis	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Memphrémagog, Lac	Saint-François, Rivière	Austin	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Memphrémagog, Lac	Saint-François, Rivière	Magog	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Memphrémagog, Lac	Saint-François, Rivière	Ogden	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Memphrémagog, Lac	Saint-François, Rivière	Potton	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Memphrémagog, Lac	Saint-François, Rivière	Saint-Benoît-du-Lac	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Memphrémagog, Lac	Saint-François, Rivière	Stanstead (Fitch, Bay)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Miroir, Lac	Saint-François, Rivière	Dudswell	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
Montjoie, Lac	Saint-François, Rivière	Saint-Denis-de-Brompton	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Monts, Lac des	Saint-François, Rivière	Orford	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
Niger, Rivière	Saint-	Standstead-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				

(Nigger, Rivière)	François, Rivière	Est							
Parker, Lac	Richelieu, Rivière	Eastman	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Quilliams, Ruisseau	Yamaska, Rivière	Stukely-Sud	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Saint-François, Grand lac	Saint-François, Rivière	Lambton	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Saint-François, Grand lac	Saint-François, Rivière	Saint-Romain	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Saint-François, Petit lac	Saint-François, Rivière	Saint-François-Xavier-de-Brompton	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Simoneau, Lac	Saint-François, Rivière	Orford	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Stoke, Lac	Saint-François, Rivière	Stoke	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				
Trois Milles, Lac des	Chaudière, Rivière	Sainte-Cécile-de-Whitton	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Trousers, Lac	Richelieu, Rivière	Bolton-Est	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Trousers, Lac	Richelieu, Rivière	Saint-Étienne-de-Bolton	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wallace, Lac	Leach, Ruisseau	Saint-Herménégilde	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
Nombre de plans d'eau touchés différents :			12	17	16	12	5	5	
Nombre total de plans d'eau touchés(toutes les régions) :			119	138*	156*	62*	28	21	

Annexe 3
Résultats de la simulation des pertes du phosphore dans le logiciel ODEP

Indicateurs des pertes de phosphore

Exploitation : bassin versant ruisseau Cass-1

Stanstead est

Scénario initial : saturation du sol 13 % P/Al

<i>Champ no</i>	<i>Description Scénario no</i>	<i>Parcelle hectares</i>	<i>Lame d'eau exportée (mm/an)</i>		<i>Sédiment kg/ha/an</i>	<i>ruissellement</i>		<i>Phosphore exporté (kg/ha/an)</i>				<i>total</i>	
			<i>ruissellement</i>	<i>souterrain</i>		<i>particulaire</i>	<i>soluble</i>	<i>souterrain</i>	<i>liée à la fertilisation</i>		<i>particulaire</i>	<i>soluble</i>	<i>P total</i>
1	Initial	2	148	151	937	0,522	<u>0,418</u>	0,058	0,086	0,025	0,045	1,154	0,751
10	Initial	6,4000000 9536743	154	149	822	0,478	<u>0,435</u>	0,057	0,085	0,023	0,047	1,125	0,733
11	Initial	5,1999998 0926514	154	149	902	0,604	<u>0,435</u>	0,057	0,085	0,025	0,047	1,253	0,814
12	Initial	8,1000003 8146973	154	149	1123	0,713	<u>0,435</u>	0,057	0,085	0,029	0,047	1,366	0,885
13	Initial	0,8999999 76158142	154	149	1196	0,747	<u>0,435</u>	0,057	0,085	0,031	0,047	1,402	0,908
14	Initial	5	99	119	58	0,059	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
15	Initial	8,3000001 9073486	99	119	58	0,059	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
16	Initial	4,4000000 9536743	95	66	55	0,049	<u>0,269</u>	0,025	0,041	0,004	0,049	0,436	0,204
17	Initial	3,5	99	119	60	0,060	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,005	0,051	0,515	0,335
18	Initial	4,6999998 0926514	95	66	57	0,050	<u>0,269</u>	0,025	0,041	0,004	0,049	0,438	0,205

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Champ no	Scénario	Description Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	ruissellement		Phosphore exporté (kg/ha/an)				total	
			ruissellement	souterrain		particulaire	soluble	souterrain	liée à la fertilisation	particulaire	soluble	P total	biodisponible
19	Initial	8,6999998 0926514	99	119	48	0,050	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
2	Initial	5,8000001 9073486	145	129	1394	0,700	0,411	0,049	0,073	0,034	0,045	1,311	0,847
20	Initial	1,1000000 2384186	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
21	Initial	4,8000001 9073486	99	119	70	0,079	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,535	0,348
22	Initial	3	95	66	77	0,074	0,269	0,025	0,041	0,005	0,049	0,463	0,221
23	Initial	1,3999999 7615814	127	52	77	0,072	0,361	0,020	0,033	0,006	0,065	0,556	0,291
24	Initial	1,5	68	140	19	0,026	0,192	0,053	0,087	0,002	0,035	0,395	0,292
25	Initial	0,6999999 88079071	68	140	22	0,029	0,192	0,053	0,087	0,002	0,035	0,398	0,294
26	Initial	8,8000001 9073486	99	119	56	0,057	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333
27	Initial	16,700000 7629395	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
28	Initial	0,6000000 23841858	127	52	83	0,076	0,361	0,020	0,033	0,006	0,065	0,561	0,294
29	Initial	5,4000000 9536743	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
3	Initial	16,399999 6185303	154	149	859	0,494	0,435	0,057	0,085	0,024	0,047	1,142	0,743
30	Initial	5,8000001 9073486	99	119	48	0,050	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Champ no	Description Scénario no	Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	ruissellement		Phosphore exporté (kg/ha/an)				total	
			ruissellement	souterrain		particulaire	soluble	souterrain	liée à la fertilisation	particulaire	soluble	P total	biodisponible
31	Initial	3,4000000 9536743	99	119	48	0,050	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
32	Initial	1,8999999 7615814	95	66	40	0,038	<u>0,269</u>	0,025	0,041	0,003	0,049	0,425	0,197
33	Initial	0,6000000 23841858	99	119	58	0,059	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
34	Initial	12,199999 8092651	127	52	80	0,074	<u>0,361</u>	0,020	0,033	0,006	0,065	0,559	0,293
35	Initial	3,5	99	119	56	0,057	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333
36	Initial	2,7999999 5231628	95	66	33	0,033	<u>0,269</u>	0,025	0,041	0,003	0,049	0,419	0,193
37	Initial	1,5	99	119	53	0,054	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,004	0,051	0,509	0,331
38	Initial	7,1999998 0926514	99	119	112	0,095	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,008	0,051	0,553	0,360
39	Initial	0,6999999 88079071	99	119	48	0,050	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
4	Initial	7,3000001 9073486	154	149	859	0,494	<u>0,435</u>	0,057	0,085	0,024	0,047	1,142	0,743
40	Initial	2,0999999 0463257	99	119	56	0,057	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333
41	Initial	1,2999999 5231628	99	119	48	0,050	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
42	Initial	7	99	119	48	0,050	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
43	Initial	10	127	52	77	0,072	<u>0,361</u>	0,020	0,033	0,006	0,065	0,556	0,291

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Champ no	Description Scénario no	Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	ruissellement		Phosphore exporté (kg/ha/an)				total	
			ruissellement	souterrain		particulaire	soluble	souterrain	liée à la fertilisation	particulaire	soluble	P total	biodisponible
44	Initial	2,0999999 0463257	99	119	48	0,050	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
45	Initial	1,5	99	119	60	0,060	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,005	0,051	0,515	0,335
46	Initial	3,7000000 4768372	99	119	35	0,040	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,003	0,051	0,494	0,321
47	Initial	4,9000000 9536743	99	119	56	0,057	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333
48	Initial	3	99	119	53	0,054	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,004	0,051	0,509	0,331
49	Initial	5,5	99	119	60	0,060	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,005	0,051	0,515	0,335
5	Initial	3,4000000 9536743	154	149	822	0,478	<u>0,435</u>	0,057	0,085	0,023	0,047	1,125	0,733
50	Initial	1,6000000 2384186	99	119	58	0,059	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
51	Initial	2,2000000 4768372	99	119	56	0,057	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,006	0,071	0,534	0,348
52	Initial	2,9000000 9536743	99	119	56	0,057	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333
53	Initial	0,2000000 02980232	99	119	60	0,060	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,005	0,051	0,515	0,335
54	Initial	0,6999999 88079071	68	140	20	0,027	<u>0,192</u>	0,053	0,087	0,002	0,035	0,397	0,293
55	Initial	9,1000003 8146973	127	52	72	0,068	<u>0,361</u>	0,020	0,033	0,006	0,065	0,553	0,289
56	Initial	10,800000 1907349	154	149	567	0,427	<u>0,435</u>	0,057	0,085	0,017	0,047	1,069	0,697

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Champ no	Scénario no	Description Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	ruissellement		Phosphore exporté (kg/ha/an)				total	
			ruissellement	souterrain		particulaire	soluble	souterrain	liée à la fertilisation	particulaire	soluble	P total	biodisponible
57	Initial	0,8000000 11920929	99	119	58	0,059	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
58	Initial	3,4000000 9536743	154	149	728	0,436	<u>0,435</u>	0,057	0,085	0,021	0,047	1,082	0,705
59	Initial	1,2999999 5231628	99	119	56	0,057	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333
6	Initial	13,5	112	170	308	0,238	<u>0,316</u>	0,065	0,097	0,011	0,034	0,760	0,547
60	Initial	5,6999998 0926514	99	119	35	0,040	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,003	0,051	0,494	0,321
61	Initial	0,8999999 76158142	99	119	27	0,033	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,003	0,051	0,486	0,316
62	Initial	3,4000000 9536743	99	119	56	0,057	<u>0,281</u>	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333
7	Initial	2,2000000 4768372	145	129	765	0,446	<u>0,411</u>	0,049	0,073	0,022	0,045	1,045	0,678
8	Initial	8,1000003 8146973	154	149	772	0,456	<u>0,435</u>	0,057	0,085	0,022	0,047	1,102	0,718
9	Initial	1,2000000 4768372	154	149	859	0,494	<u>0,435</u>	0,057	0,085	0,024	0,047	1,142	0,743

Bilan de l'ensemble de l'exploitation

Initial	282,80000 2411008	118	119	305	0,201	0,334	0,045	0,071	0,011	0,051	0,712	0,453
---------	----------------------	-----	-----	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Indicateurs des pertes de phosphore

Exploitation : bassin versant ruisseau Cass-1

Stanstead est

Scénario 1 : saturation du sol 7.6 % P/AI

<i>Champ no</i>	<i>Scénario no</i>	<i>Description Parcelle hectares</i>	<i>Lame d'eau exportée (mm/an)</i>		<i>Sédiment kg/ha/an</i>	<i>ruissellement</i>		<i>Phosphore exporté (kg/ha/an)</i>				<i>total</i>	
			<i>ruissellement</i>	<i>souterrain</i>		<i>particulaire</i>	<i>soluble</i>	<i>souterrain</i>	<i>liée à la fertilisation</i>		<i>particulaire</i>	<i>soluble</i>	<i>P total</i>
1	1	2	148	151	937	0,522	0,273	0,058	0,086	0,025	0,026	0,990	0,647
1	Initial	2	148	151	937	0,522	0,418	0,058	0,086	0,025	0,045	1,154	0,751
10	1	6,4000000 9536743	154	149	822	0,478	0,285	0,057	0,085	0,023	0,027	0,955	0,624
10	Initial	6,4000000 9536743	154	149	822	0,478	0,435	0,057	0,085	0,023	0,047	1,125	0,733
11	1	5,1999998 0926514	154	149	902	0,604	0,285	0,057	0,085	0,025	0,027	1,083	0,705
11	Initial	5,1999998 0926514	154	149	902	0,604	0,435	0,057	0,085	0,025	0,047	1,253	0,814
12	1	8,1000003 8146973	154	149	1123	0,713	0,285	0,057	0,085	0,029	0,027	1,196	0,776
12	Initial	8,1000003 8146973	154	149	1123	0,713	0,435	0,057	0,085	0,029	0,047	1,366	0,885
13	1	0,8999999 76158142	154	149	1196	0,747	0,285	0,057	0,085	0,031	0,027	1,231	0,799
13	Initial	0,8999999 76158142	154	149	1196	0,747	0,435	0,057	0,085	0,031	0,047	1,402	0,908

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Scénario 1 :

Champ no	Scénario no	Description Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	ruissellement		Phosphore exporté (kg/ha/an)				total	
			ruissellement	souterrain		particulaire	soluble	souterrain particulaire	soluble	liée à la fertilisation particulaire	soluble	P total	biodisponible
14	1	5	99	119	58	0,059	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,395	0,261
14	Initial	5	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
15	1	8,3000001 9073486	99	119	58	0,059	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,395	0,261
15	Initial	8,3000001 9073486	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
16	1	4,4000000 9536743	95	66	55	0,049	0,176	0,025	0,041	0,004	0,028	0,323	0,161
16	Initial	4,4000000 9536743	95	66	55	0,049	0,269	0,025	0,041	0,004	0,049	0,436	0,204
17	1	3,5	99	119	60	0,060	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,397	0,262
17	Initial	3,5	99	119	60	0,060	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,515	0,335
18	1	4,6999998 0926514	95	66	57	0,050	0,176	0,025	0,041	0,004	0,028	0,324	0,162
18	Initial	4,6999998 0926514	95	66	57	0,050	0,269	0,025	0,041	0,004	0,049	0,438	0,205
19	1	8,6999998 0926514	99	119	48	0,050	0,184	0,045	0,074	0,004	0,029	0,387	0,256
19	Initial	8,6999998 0926514	99	119	48	0,050	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
2	1	5,8000001 9073486	145	129	1394	0,700	0,269	0,049	0,073	0,034	0,026	1,150	0,744
2	Initial	5,8000001 9073486	145	129	1394	0,700	0,411	0,049	0,073	0,034	0,045	1,311	0,847

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

<i>Description</i>			<i>Lame d'eau exportée</i>		<i>Sédiment</i> <i>kg/ha/an</i>	<i>Scénario 1 :</i>						<i>total</i>	
<i>Champ no</i>	<i>Scénario no</i>	<i>Parcelle hectares</i>	<i>(mm/an)</i> <i>ruissellement</i>	<i>souterrain</i>		<i>ruissellement</i>		<i>Phosphore exporté (kg/ha/an)</i>				<i>P total</i>	<i>biodisponible</i>
					<i>particulaire</i>	<i>soluble</i>	<i>souterrain</i>	<i>liée à la fertilisation</i>		<i>particulaire</i>	<i>soluble</i>		
20	1	1,1000000 2384186	99	119	58	0,059	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,395	0,261
20	Initial	1,1000000 2384186	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
21	1	4,8000001 9073486	99	119	70	0,079	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,416	0,275
21	Initial	4,8000001 9073486	99	119	70	0,079	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,535	0,348
22	1	3	95	66	77	0,074	0,176	0,025	0,041	0,005	0,028	0,349	0,178
22	Initial	3	95	66	77	0,074	0,269	0,025	0,041	0,005	0,049	0,463	0,221
23	1	1,3999999 7615814	127	52	77	0,072	0,236	0,020	0,033	0,006	0,038	0,404	0,218
23	Initial	1,3999999 7615814	127	52	77	0,072	0,361	0,020	0,033	0,006	0,065	0,556	0,291
24	1	1,5	68	140	19	0,026	0,126	0,053	0,087	0,002	0,020	0,314	0,232
24	Initial	1,5	68	140	19	0,026	0,192	0,053	0,087	0,002	0,035	0,395	0,292
25	1	0,6999999 88079071	68	140	22	0,029	0,126	0,053	0,087	0,002	0,020	0,317	0,234
25	Initial	0,6999999 88079071	68	140	22	0,029	0,192	0,053	0,087	0,002	0,035	0,398	0,294
26	1	8,8000001 9073486	99	119	56	0,057	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,393	0,260
26	Initial	8,8000001 9073486	99	119	56	0,057	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Scénario 1 :

Champ no	Scénario no	Description Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	Phosphore exporté (kg/ha/an)						total	
			ruissellement	souterrain		ruissellement particulaire	soluble	souterrain particulaire	soluble	liée à la fertilisation particulaire	soluble	P total	biodisponible
27	1	16,700000 7629395	99	119	58	0,059	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,395	0,261
27	Initial	16,700000 7629395	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
28	1	0,6000000 23841858	127	52	83	0,076	0,236	0,020	0,033	0,006	0,038	0,408	0,221
28	Initial	0,6000000 23841858	127	52	83	0,076	0,361	0,020	0,033	0,006	0,065	0,561	0,294
29	1	5,4000000 9536743	99	119	58	0,059	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,395	0,261
29	Initial	5,4000000 9536743	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
3	1	16,399999 6185303	154	149	859	0,494	0,285	0,057	0,085	0,024	0,027	0,971	0,635
3	Initial	16,399999 6185303	154	149	859	0,494	0,435	0,057	0,085	0,024	0,047	1,142	0,743
30	1	5,8000001 9073486	99	119	48	0,050	0,184	0,045	0,074	0,004	0,029	0,387	0,256
30	Initial	5,8000001 9073486	99	119	48	0,050	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
31	1	3,4000000 9536743	99	119	48	0,050	0,184	0,045	0,074	0,004	0,029	0,387	0,256
31	Initial	3,4000000 9536743	99	119	48	0,050	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
32	1	1,8999999 7615814	95	66	40	0,038	0,176	0,025	0,041	0,003	0,028	0,312	0,153
32	Initial	1,8999999 7615814	95	66	40	0,038	0,269	0,025	0,041	0,003	0,049	0,425	0,197

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Scénario 1 :

Champ no	Scénario no	Description Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	ruissellement		Phosphore exporté (kg/ha/an)				total	
			ruissellement	souterrain		particulaire	soluble	souterrain	liée à la fertilisation	particulaire	soluble	P total	biodisponible
33	1	0,6000000 23841858	99	119	58	0,059	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,395	0,261
33	Initial	0,6000000 23841858	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
34	1	12,199999 8092651	127	52	80	0,074	0,236	0,020	0,033	0,006	0,038	0,407	0,220
34	Initial	12,199999 8092651	127	52	80	0,074	0,361	0,020	0,033	0,006	0,065	0,559	0,293
35	1	3,5	99	119	56	0,057	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,393	0,260
35	Initial	3,5	99	119	56	0,057	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333
36	1	2,7999999 5231628	95	66	33	0,033	0,176	0,025	0,041	0,003	0,028	0,306	0,150
36	Initial	2,7999999 5231628	95	66	33	0,033	0,269	0,025	0,041	0,003	0,049	0,419	0,193
37	1	1,5	99	119	53	0,054	0,184	0,045	0,074	0,004	0,029	0,390	0,258
37	Initial	1,5	99	119	53	0,054	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,509	0,331
38	1	7,1999998 0926514	99	119	112	0,095	0,184	0,045	0,074	0,008	0,029	0,435	0,287
38	Initial	7,1999998 0926514	99	119	112	0,095	0,281	0,045	0,074	0,008	0,051	0,553	0,360
39	1	0,6999999 88079071	99	119	48	0,050	0,184	0,045	0,074	0,004	0,029	0,387	0,256
39	Initial	0,6999999 88079071	99	119	48	0,050	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Scénario 1 :

Champ no	Scénario no	Description Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	ruissellement		Phosphore exporté (kg/ha/an)				total	
			ruissellement	souterrain		particulaire	soluble	souterrain	liée à la fertilisation	particulaire	soluble	P total	biodisponible
4	1	7,3000001 9073486	154	149	859	0,494	0,285	0,057	0,085	0,024	0,027	0,971	0,635
4	Initial	7,3000001 9073486	154	149	859	0,494	0,435	0,057	0,085	0,024	0,047	1,142	0,743
40	1	2,0999999 0463257	99	119	56	0,057	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,393	0,260
40	Initial	2,0999999 0463257	99	119	56	0,057	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333
41	1	1,2999999 5231628	99	119	48	0,050	0,184	0,045	0,074	0,004	0,029	0,387	0,256
41	Initial	1,2999999 5231628	99	119	48	0,050	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
42	1	7	99	119	48	0,050	0,184	0,045	0,074	0,004	0,029	0,387	0,256
42	Initial	7	99	119	48	0,050	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
43	1	10	127	52	77	0,072	0,236	0,020	0,033	0,006	0,038	0,404	0,218
43	Initial	10	127	52	77	0,072	0,361	0,020	0,033	0,006	0,065	0,556	0,291
44	1	2,0999999 0463257	99	119	48	0,050	0,184	0,045	0,074	0,004	0,029	0,387	0,256
44	Initial	2,0999999 0463257	99	119	48	0,050	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
45	1	1,5	99	119	60	0,060	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,397	0,262
45	Initial	1,5	99	119	60	0,060	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,515	0,335

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Scénario 1 :

Champ no	Description Scénario no	Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	ruissellement		Phosphore exporté (kg/ha/an)				total	
			ruissellement	souterrain		particulaire	soluble	souterrain	liée à la fertilisation	particulaire	soluble	P total	biodisponible
46	1	3,7000000 4768372	99	119	35	0,040	0,184	0,045	0,074	0,003	0,029	0,375	0,248
46	Initial	3,7000000 4768372	99	119	35	0,040	0,281	0,045	0,074	0,003	0,051	0,494	0,321
47	1	4,9000000 9536743	99	119	56	0,057	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,393	0,260
47	Initial	4,9000000 9536743	99	119	56	0,057	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333
48	1	3	99	119	53	0,054	0,184	0,045	0,074	0,004	0,029	0,390	0,258
48	Initial	3	99	119	53	0,054	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,509	0,331
49	1	5,5	99	119	60	0,060	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,397	0,262
49	Initial	5,5	99	119	60	0,060	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,515	0,335
5	1	3,4000000 9536743	154	149	822	0,478	0,285	0,057	0,085	0,023	0,027	0,955	0,624
5	Initial	3,4000000 9536743	154	149	822	0,478	0,435	0,057	0,085	0,023	0,047	1,125	0,733
50	1	1,6000000 2384186	99	119	58	0,059	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,395	0,261
50	Initial	1,6000000 2384186	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
51	1	2,2000000 4768372	99	119	56	0,057	0,184	0,045	0,074	0,006	0,041	0,407	0,270
51	Initial	2,2000000 4768372	99	119	56	0,057	0,281	0,045	0,074	0,006	0,071	0,534	0,348

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Scénario 1 :

Champ no	Description Scénario no	Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	ruissellement		Phosphore exporté (kg/ha/an)				total	
			ruissellement	souterrain		particulaire	soluble	souterrain particulaire	soluble	liée à la fertilisation particulaire	soluble	P total	biodisponible
52	1	2,9000000 9536743	99	119	56	0,057	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,393	0,260
52	Initial	2,9000000 9536743	99	119	56	0,057	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333
53	1	0,2000000 02980232	99	119	60	0,060	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,397	0,262
53	Initial	0,2000000 02980232	99	119	60	0,060	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,515	0,335
54	1	0,6999999 88079071	68	140	20	0,027	0,126	0,053	0,087	0,002	0,020	0,316	0,233
54	Initial	0,6999999 88079071	68	140	20	0,027	0,192	0,053	0,087	0,002	0,035	0,397	0,293
55	1	9,1000003 8146973	127	52	72	0,068	0,236	0,020	0,033	0,006	0,038	0,400	0,216
55	Initial	9,1000003 8146973	127	52	72	0,068	0,361	0,020	0,033	0,006	0,065	0,553	0,289
56	1	10,800000 1907349	154	149	567	0,427	0,285	0,057	0,085	0,017	0,027	0,898	0,588
56	Initial	10,800000 1907349	154	149	567	0,427	0,435	0,057	0,085	0,017	0,047	1,069	0,697
57	1	0,8000000 11920929	99	119	58	0,059	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,395	0,261
57	Initial	0,8000000 11920929	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
58	1	3,4000000 9536743	154	149	728	0,436	0,285	0,057	0,085	0,021	0,027	0,911	0,596
58	Initial	3,4000000 9536743	154	149	728	0,436	0,435	0,057	0,085	0,021	0,047	1,082	0,705

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Scénario 1 :

<i>Champ no</i>	<i>Scénario no</i>	<i>Description Parcelle hectares</i>	<i>Lame d'eau exportée (mm/an)</i>		<i>Sédiment kg/ha/an</i>	<i>ruissellement</i>		<i>Phosphore exporté (kg/ha/an)</i>				<i>total</i>	
			<i>ruissellement</i>	<i>souterrain</i>		<i>particulaire</i>	<i>soluble</i>	<i>souterrain</i>	<i>liée à la fertilisation</i>		<i>P total</i>	<i>biodisponible</i>	
59	1	1,2999999 5231628	99	119	56	0,057	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,393	0,260
59	Initial	1,2999999 5231628	99	119	56	0,057	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333
6	1	13,5	112	170	308	0,238	0,207	0,065	0,097	0,011	0,020	0,637	0,454
6	Initial	13,5	112	170	308	0,238	0,316	0,065	0,097	0,011	0,034	0,760	0,547
60	1	5,6999998 0926514	99	119	35	0,040	0,184	0,045	0,074	0,003	0,029	0,375	0,248
60	Initial	5,6999998 0926514	99	119	35	0,040	0,281	0,045	0,074	0,003	0,051	0,494	0,321
61	1	0,8999999 76158142	99	119	27	0,033	0,184	0,045	0,074	0,003	0,029	0,367	0,243
61	Initial	0,8999999 76158142	99	119	27	0,033	0,281	0,045	0,074	0,003	0,051	0,486	0,316
62	1	3,4000000 9536743	99	119	56	0,057	0,184	0,045	0,074	0,005	0,029	0,393	0,260
62	Initial	3,4000000 9536743	99	119	56	0,057	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333
7	1	2,2000000 4768372	145	129	765	0,446	0,269	0,049	0,073	0,022	0,026	0,884	0,576
7	Initial	2,2000000 4768372	145	129	765	0,446	0,411	0,049	0,073	0,022	0,045	1,045	0,678
8	1	8,1000003 8146973	154	149	772	0,456	0,285	0,057	0,085	0,022	0,027	0,932	0,609
8	Initial	8,1000003 8146973	154	149	772	0,456	0,435	0,057	0,085	0,022	0,047	1,102	0,718

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Scénario 1 :

<i>Champ no</i>	<i>Scénario no</i>	<i>Parcelle hectares</i>	<i>Lame d'eau exportée (mm/an)</i>		<i>Sédiment kg/ha/an</i>	<i>Phosphore exporté (kg/ha/an)</i>						<i>total</i>	
			<i>ruissellement</i>	<i>souterrain</i>		<i>ruissellement</i>		<i>souterrain</i>		<i>liée à la fertilisation</i>		<i>P total</i>	<i>biodisponible</i>
						<i>particulaire</i>	<i>soluble</i>	<i>particulaire</i>	<i>soluble</i>	<i>particulaire</i>	<i>soluble</i>		
9	1	1,2000000 4768372	154	149	859	0,494	0,285	0,057	0,085	0,024	0,027	0,971	0,635
9	Initial	1,2000000 4768372	154	149	859	0,494	0,435	0,057	0,085	0,024	0,047	1,142	0,743

Bilan de l'ensemble de l'exploitation

Initial	282,80000 2411008	118	119	305	0,201	0,334	0,045	0,071	0,011	0,051	0,712	0,453
1	283	118	119	305	0,201	0,045	0,045	0,071	0,011	0,029	0,575	0,370

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Indicateurs des pertes de phosphore (scénario2)

Exploitation : bassin versant ruisseau Cass-1

Stanstead est

Scénario 2 : saturation du sol 20% P/AI

<i>Champ no</i>	<i>Scénario no</i>	<i>Parcelle hectares</i>	<i>Lame d'eau exportée (mm/an)</i>		<i>Sédiment kg/ha/an</i>	<i>ruissellement</i>		<i>Phosphore exporté (kg/ha/an)</i>				<i>total</i>	
			<i>ruissellement</i>	<i>souterrain</i>		<i>particulaire</i>	<i>soluble</i>	<i>souterrain</i>	<i>liée à la fertilisation</i>		<i>particulaire</i>	<i>soluble</i>	<i>P total</i>
1	2	2	148	151	937	0,522	0,599	0,058	0,086	0,025	0,069	1,359	0,882
1	Initial	2	148	151	937	0,522	0,418	0,058	0,086	0,025	0,045	1,154	0,751
10	2	6,4000000 9536743	154	149	822	0,478	0,624	0,057	0,085	0,023	0,072	1,339	0,869
10	Initial	6,4000000 9536743	154	149	822	0,478	0,435	0,057	0,085	0,023	0,047	1,125	0,733
11	2	5,1999998 0926514	154	149	902	0,604	0,624	0,057	0,085	0,025	0,072	1,467	0,950
11	Initial	5,1999998 0926514	154	149	902	0,604	0,435	0,057	0,085	0,025	0,047	1,253	0,814
12	2	8,1000003 8146973	154	149	1123	0,713	0,624	0,057	0,085	0,029	0,072	1,580	1,021
12	Initial	8,1000003 8146973	154	149	1123	0,713	0,435	0,057	0,085	0,029	0,047	1,366	0,885
13	2	0,8999999 76158142	154	149	1196	0,747	0,624	0,057	0,085	0,031	0,072	1,616	1,044
13	Initial	0,8999999 76158142	154	149	1196	0,747	0,435	0,057	0,085	0,031	0,047	1,402	0,908

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Scénario 2 : saturation du sol 20

Champ no	Scénario no	Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	Phosphore exporté (kg/ha/an)						total	
			ruissellement	souterrain		ruissellement particulière	souterrain soluble	liée à la fertilisation particulière	souterrain soluble	P total	biodisponible		
14	2	5	99	119	58	0,059	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,662	0,426
14	Initial	5	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
15	2	8,3000001 9073486	99	119	58	0,059	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,662	0,426
15	Initial	8,3000001 9073486	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
16	2	4,4000000 9536743	95	66	55	0,049	0,385	0,025	0,041	0,004	0,074	0,578	0,258
16	Initial	4,4000000 9536743	95	66	55	0,049	0,269	0,025	0,041	0,004	0,049	0,436	0,204
17	2	3,5	99	119	60	0,060	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,664	0,427
17	Initial	3,5	99	119	60	0,060	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,515	0,335
18	2	4,6999998 0926514	95	66	57	0,050	0,385	0,025	0,041	0,004	0,074	0,580	0,259
18	Initial	4,6999998 0926514	95	66	57	0,050	0,269	0,025	0,041	0,004	0,049	0,438	0,205
19	2	8,6999998 0926514	99	119	48	0,050	0,402	0,045	0,074	0,004	0,078	0,653	0,421
19	Initial	8,6999998 0926514	99	119	48	0,050	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
2	2	5,8000001 9073486	145	129	1394	0,700	0,589	0,049	0,073	0,034	0,068	1,513	0,975
2	Initial	5,8000001 9073486	145	129	1394	0,700	0,411	0,049	0,073	0,034	0,045	1,311	0,847

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Scénario 2 : saturation du sol 20

Champ no	Description Scénario no	Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	Phosphore exporté (kg/ha/an)						total	
			ruissellement	souterrain		ruissellement particulaire	soluble	souterrain particulaire	soluble	liée à la fertilisation particulaire	soluble	P total	biodisponible
20	2	1,1000000 2384186	99	119	58	0,059	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,662	0,426
20	Initial	1,1000000 2384186	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
21	2	4,8000001 9073486	99	119	70	0,079	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,683	0,440
21	Initial	4,8000001 9073486	99	119	70	0,079	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,535	0,348
22	2	3	95	66	77	0,074	0,385	0,025	0,041	0,005	0,074	0,605	0,275
22	Initial	3	95	66	77	0,074	0,269	0,025	0,041	0,005	0,049	0,463	0,221
23	2	1,3999999 7615814	127	52	77	0,072	0,517	0,020	0,033	0,006	0,100	0,747	0,383
23	Initial	1,3999999 7615814	127	52	77	0,072	0,361	0,020	0,033	0,006	0,065	0,556	0,291
24	2	1,5	68	140	19	0,026	0,276	0,053	0,087	0,002	0,053	0,497	0,368
24	Initial	1,5	68	140	19	0,026	0,192	0,053	0,087	0,002	0,035	0,395	0,292
25	2	0,6999999 88079071	68	140	22	0,029	0,276	0,053	0,087	0,002	0,053	0,500	0,370
25	Initial	0,6999999 88079071	68	140	22	0,029	0,192	0,053	0,087	0,002	0,035	0,398	0,294
26	2	8,8000001 9073486	99	119	56	0,057	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,660	0,425
26	Initial	8,8000001 9073486	99	119	56	0,057	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Scénario 2 : saturation du sol 20

Champ no	Description Scénario no	Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	Phosphore exporté (kg/ha/an)						total	
			ruissellement	souterrain		ruissellement particulaire	soluble	souterrain particulaire	soluble	liée à la fertilisation particulaire	soluble	P total	biodisponible
27	2	16,700000 7629395	99	119	58	0,059	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,662	0,426
27	Initial	16,700000 7629395	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
28	2	0,6000000 23841858	127	52	83	0,076	0,517	0,020	0,033	0,006	0,100	0,751	0,386
28	Initial	0,6000000 23841858	127	52	83	0,076	0,361	0,020	0,033	0,006	0,065	0,561	0,294
29	2	5,4000000 9536743	99	119	58	0,059	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,662	0,426
29	Initial	5,4000000 9536743	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
3	2	16,399999 6185303	154	149	859	0,494	0,624	0,057	0,085	0,024	0,072	1,356	0,880
3	Initial	16,399999 6185303	154	149	859	0,494	0,435	0,057	0,085	0,024	0,047	1,142	0,743
30	2	5,8000001 9073486	99	119	48	0,050	0,402	0,045	0,074	0,004	0,078	0,653	0,421
30	Initial	5,8000001 9073486	99	119	48	0,050	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
31	2	3,4000000 9536743	99	119	48	0,050	0,402	0,045	0,074	0,004	0,078	0,653	0,421
31	Initial	3,4000000 9536743	99	119	48	0,050	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
32	2	1,8999999 7615814	95	66	40	0,038	0,385	0,025	0,041	0,003	0,074	0,567	0,251
32	Initial	1,8999999 7615814	95	66	40	0,038	0,269	0,025	0,041	0,003	0,049	0,425	0,197

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Scénario 2 : saturation du sol 20

Champ no	Description Scénario no	Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	Phosphore exporté (kg/ha/an)						total	
			ruissellement	souterrain		ruissellement particulaire	soluble	souterrain particulaire	soluble	liée à la fertilisation particulaire	soluble	P total	biodisponible
33	2	0,6000000 23841858	99	119	58	0,059	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,662	0,426
33	Initial	0,6000000 23841858	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
34	2	12,199999 8092651	127	52	80	0,074	0,517	0,020	0,033	0,006	0,100	0,750	0,385
34	Initial	12,199999 8092651	127	52	80	0,074	0,361	0,020	0,033	0,006	0,065	0,559	0,293
35	2	3,5	99	119	56	0,057	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,660	0,425
35	Initial	3,5	99	119	56	0,057	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333
36	2	2,7999999 5231628	95	66	33	0,033	0,385	0,025	0,041	0,003	0,074	0,562	0,247
36	Initial	2,7999999 5231628	95	66	33	0,033	0,269	0,025	0,041	0,003	0,049	0,419	0,193
37	2	1,5	99	119	53	0,054	0,402	0,045	0,074	0,004	0,078	0,657	0,423
37	Initial	1,5	99	119	53	0,054	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,509	0,331
38	2	7,1999998 0926514	99	119	112	0,095	0,402	0,045	0,074	0,008	0,078	0,702	0,452
38	Initial	7,1999998 0926514	99	119	112	0,095	0,281	0,045	0,074	0,008	0,051	0,553	0,360
39	2	0,6999999 88079071	99	119	48	0,050	0,402	0,045	0,074	0,004	0,078	0,653	0,421
39	Initial	0,6999999 88079071	99	119	48	0,050	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Scénario 2: saturation du sol 20

Champ no	Scénario no	Description Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	Phosphore exporté (kg/ha/an)						total	
			ruissellement	souterrain		ruissellement particulaire	soluble	souterrain particulaire	soluble	liée à la fertilisation particulaire	soluble	P total	biodisponible
4	2	7,3000001 9073486	154	149	859	0,494	0,624	0,057	0,085	0,024	0,072	1,356	0,880
4	Initial	7,3000001 9073486	154	149	859	0,494	0,435	0,057	0,085	0,024	0,047	1,142	0,743
40	2	2,0999999 0463257	99	119	56	0,057	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,660	0,425
40	Initial	2,0999999 0463257	99	119	56	0,057	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333
41	2	1,2999999 5231628	99	119	48	0,050	0,402	0,045	0,074	0,004	0,078	0,653	0,421
41	Initial	1,2999999 5231628	99	119	48	0,050	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
42	2	7	99	119	48	0,050	0,402	0,045	0,074	0,004	0,078	0,653	0,421
42	Initial	7	99	119	48	0,050	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
43	2	10	127	52	77	0,072	0,517	0,020	0,033	0,006	0,100	0,747	0,383
43	Initial	10	127	52	77	0,072	0,361	0,020	0,033	0,006	0,065	0,556	0,291
44	2	2,0999999 0463257	99	119	48	0,050	0,402	0,045	0,074	0,004	0,078	0,653	0,421
44	Initial	2,0999999 0463257	99	119	48	0,050	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,505	0,329
45	2	1,5	99	119	60	0,060	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,664	0,427
45	Initial	1,5	99	119	60	0,060	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,515	0,335

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Scénario 2 : saturation du sol 20

Champ no	Description Scénario no	Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	Phosphore exporté (kg/ha/an)						total	
			ruissellement	souterrain		ruissellement particulaire	soluble	souterrain particulaire	soluble	liée à la fertilisation particulaire	soluble	P total	biodisponible
46	2	3,7000000 4768372	99	119	35	0,040	0,402	0,045	0,074	0,003	0,078	0,642	0,413
46	Initial	3,7000000 4768372	99	119	35	0,040	0,281	0,045	0,074	0,003	0,051	0,494	0,321
47	2	4,9000000 9536743	99	119	56	0,057	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,660	0,425
47	Initial	4,9000000 9536743	99	119	56	0,057	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333
48	2	3	99	119	53	0,054	0,402	0,045	0,074	0,004	0,078	0,657	0,423
48	Initial	3	99	119	53	0,054	0,281	0,045	0,074	0,004	0,051	0,509	0,331
49	2	5,5	99	119	60	0,060	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,664	0,427
49	Initial	5,5	99	119	60	0,060	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,515	0,335
5	2	3,4000000 9536743	154	149	822	0,478	0,624	0,057	0,085	0,023	0,072	1,339	0,869
5	Initial	3,4000000 9536743	154	149	822	0,478	0,435	0,057	0,085	0,023	0,047	1,125	0,733
50	2	1,6000000 2384186	99	119	58	0,059	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,662	0,426
50	Initial	1,6000000 2384186	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
51	2	2,2000000 4768372	99	119	56	0,057	0,402	0,045	0,074	0,006	0,109	0,693	0,447
51	Initial	2,2000000 4768372	99	119	56	0,057	0,281	0,045	0,074	0,006	0,071	0,534	0,348

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Scénario 2: saturation du sol 20

Champ no	Description Scénario no	Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	Phosphore exporté (kg/ha/an)						total	
			ruissellement	souterrain		ruissellement particulaire	soluble	souterrain particulaire	soluble	liée à la fertilisation particulaire	soluble	P total	biodisponible
52	2	2,9000000 9536743	99	119	56	0,057	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,660	0,425
52	Initial	2,9000000 9536743	99	119	56	0,057	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,512	0,333
53	2	0,2000000 02980232	99	119	60	0,060	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,664	0,427
53	Initial	0,2000000 02980232	99	119	60	0,060	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,515	0,335
54	2	0,6999999 88079071	68	140	20	0,027	0,276	0,053	0,087	0,002	0,053	0,499	0,369
54	Initial	0,6999999 88079071	68	140	20	0,027	0,192	0,053	0,087	0,002	0,035	0,397	0,293
55	2	9,1000003 8146973	127	52	72	0,068	0,517	0,020	0,033	0,006	0,100	0,743	0,381
55	Initial	9,1000003 8146973	127	52	72	0,068	0,361	0,020	0,033	0,006	0,065	0,553	0,289
56	2	10,800000 1907349	154	149	567	0,427	0,624	0,057	0,085	0,017	0,072	1,282	0,833
56	Initial	10,800000 1907349	154	149	567	0,427	0,435	0,057	0,085	0,017	0,047	1,069	0,697
57	2	0,8000000 11920929	99	119	58	0,059	0,402	0,045	0,074	0,005	0,078	0,662	0,426
57	Initial	0,8000000 11920929	99	119	58	0,059	0,281	0,045	0,074	0,005	0,051	0,514	0,334
58	2	3,4000000 9536743	154	149	728	0,436	0,624	0,057	0,085	0,021	0,072	1,295	0,841
58	Initial	3,4000000 9536743	154	149	728	0,436	0,435	0,057	0,085	0,021	0,047	1,082	0,705

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Scénario 2 : saturation du sol 20

Champ no	Description Scénario no	Parcelle hectares	Lame d'eau exportée (mm/an)		Sédiment kg/ha/an	Phosphore exporté (kg/ha/an)						total	
			ruissellement	souterrain		ruissellement particulaire	soluble	souterrain particulaire	soluble	liée à la fertilisation particulaire	soluble	P total	biodisponible
59	2	1,2999999 5231628	99	119	56	0,057	0,402	0,045	0,074	0,005	<u>0,078</u>	0,660	0,425
59	Initial	1,2999999 5231628	99	119	56	0,057	0,281	0,045	0,074	0,005	<u>0,051</u>	0,512	0,333
6	2	13,5	112	170	308	0,238	0,453	0,065	0,097	0,011	<u>0,052</u>	0,916	0,664
6	Initial	13,5	112	170	308	0,238	0,316	0,065	0,097	0,011	<u>0,034</u>	0,760	0,547
60	2	5,6999998 0926514	99	119	35	0,040	0,402	0,045	0,074	0,003	<u>0,078</u>	0,642	0,413
60	Initial	5,6999998 0926514	99	119	35	0,040	0,281	0,045	0,074	0,003	<u>0,051</u>	0,494	0,321
61	2	0,8999999 76158142	99	119	27	0,033	0,402	0,045	0,074	0,003	<u>0,078</u>	0,634	0,408
61	Initial	0,8999999 76158142	99	119	27	0,033	0,281	0,045	0,074	0,003	<u>0,051</u>	0,486	0,316
62	2	3,4000000 9536743	99	119	56	0,057	0,402	0,045	0,074	0,005	<u>0,078</u>	0,660	0,425
62	Initial	3,4000000 9536743	99	119	56	0,057	0,281	0,045	0,074	0,005	<u>0,051</u>	0,512	0,333
7	2	2,2000000 4768372	145	129	765	0,446	0,589	0,049	0,073	0,022	<u>0,068</u>	1,247	0,807
7	Initial	2,2000000 4768372	145	129	765	0,446	0,411	0,049	0,073	0,022	<u>0,045</u>	1,045	0,678
8	2	8,1000003 8146973	154	149	772	0,456	0,624	0,057	0,085	0,022	<u>0,072</u>	1,316	0,854
8	Initial	8,1000003 8146973	154	149	772	0,456	0,435	0,057	0,085	0,022	<u>0,047</u>	1,102	0,718

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

Scénario 2 : saturation du sol 20

<i>Description</i>		<i>Parcelle</i> <i>hectares</i>	<i>Lame d'eau exportée</i> <i>(mm/an)</i>		<i>Sédiment</i> <i>kg/ha/an</i>	<i>Phosphore exporté (kg/ha/an)</i>						<i>total</i>	
<i>Champ no</i>	<i>Scénario no</i>		<i>ruissellement</i>	<i>souterrain</i>		<i>ruissellement</i>		<i>souterrain</i>		<i>liée à la fertilisation</i>		<i>P total</i>	<i>biodisponible</i>
						<i>particulaire</i>	<i>soluble</i>	<i>particulaire</i>	<i>soluble</i>	<i>particulaire</i>	<i>soluble</i>		
9	2	1,2000000 4768372	154	149	859	0,494	0,435	0,057	0,085	0,024	0,047	1,142	0,743
9	Initial	1,2000000 4768372	154	149	859	0,494	0,435	0,057	0,085	0,024	0,047	1,142	0,743

Bilan de l'ensemble de l'exploitation

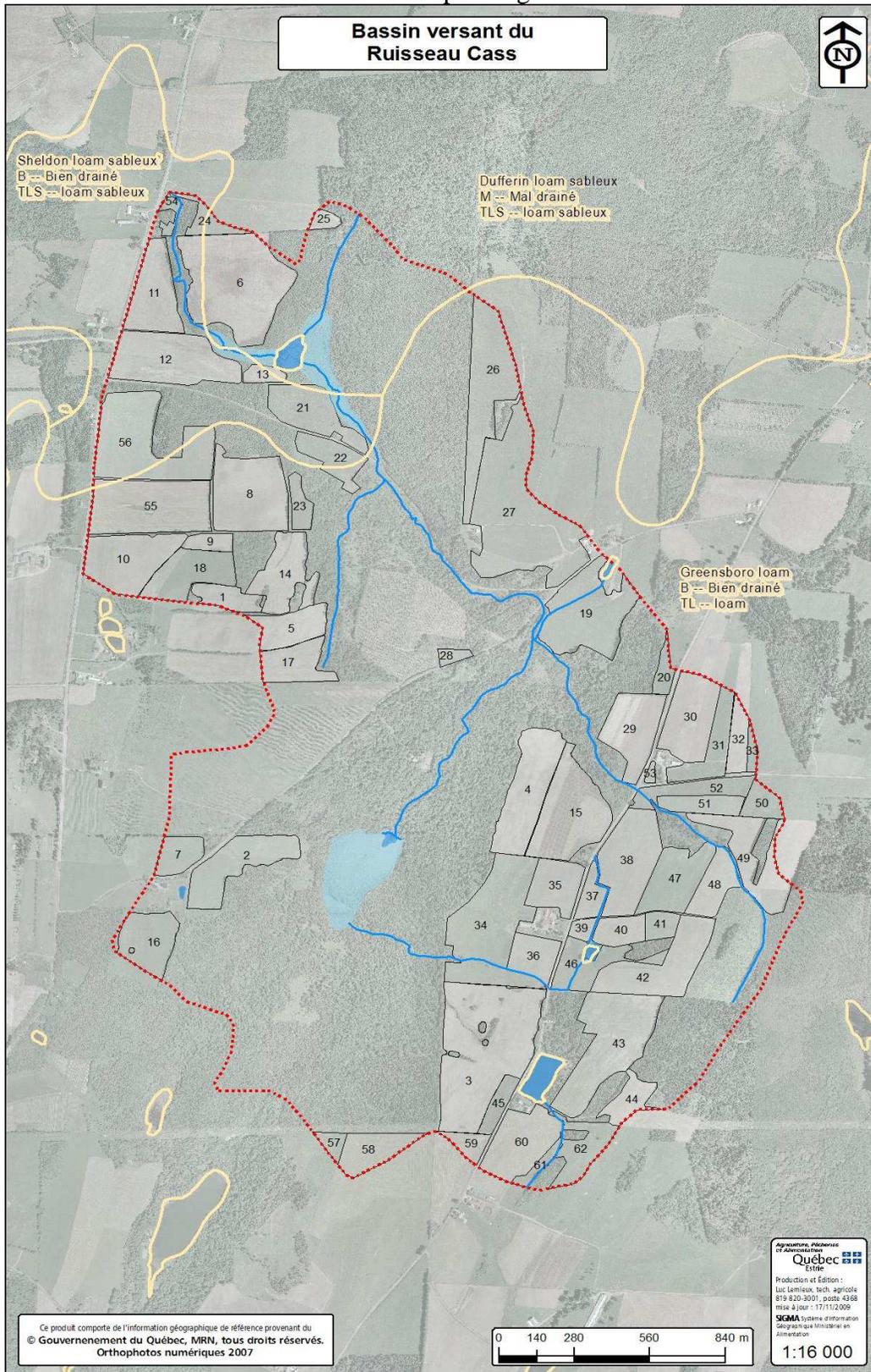
Initial	282,80000 2411008	118	119	305	0,201	0,334	0,045	0,071	0,011	0,051	0,712	0,453
2	283	118	119	305	0,201	0,099	0,045	0,071	0,011	0,077	0,882	0,555

Valeur orange pour zone à vulnérabilité modérée

Valeur rouge pour zone à vulnérabilité élevée

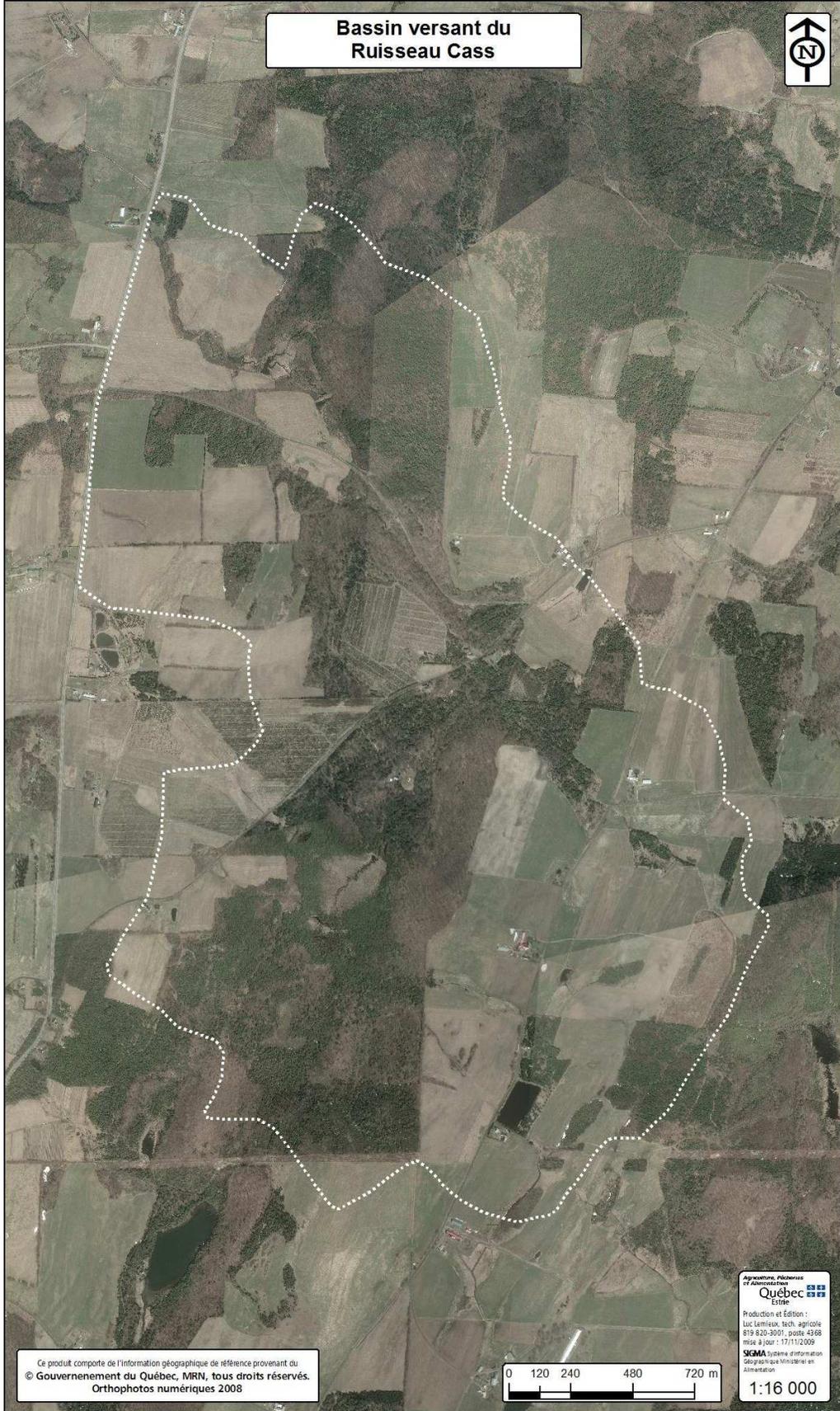
Annexe 4
Données fournies par le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation de
l'Estrie pour les simulations (Toffoli, 2009)

Cartes de pédologie

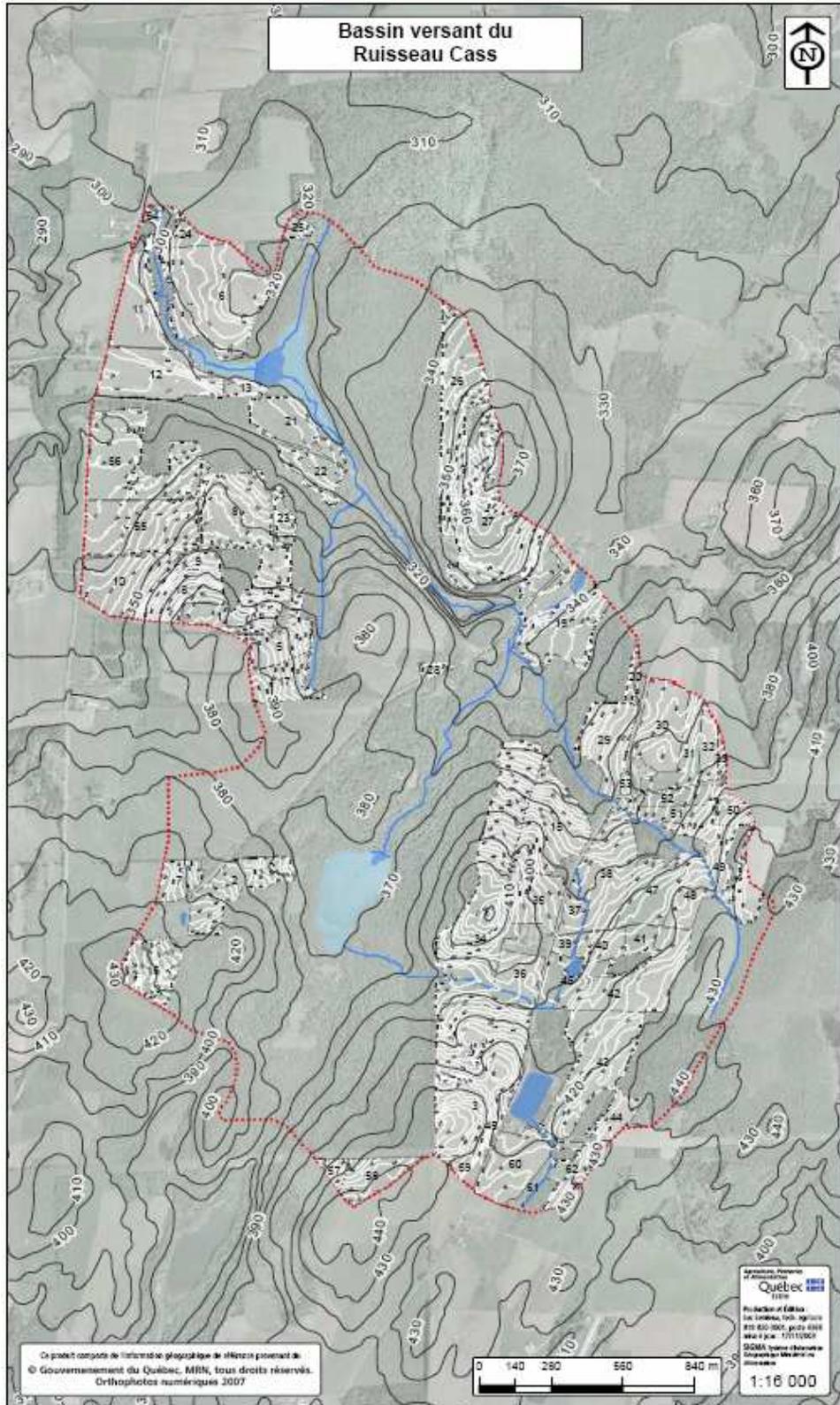


Photographies aériennes

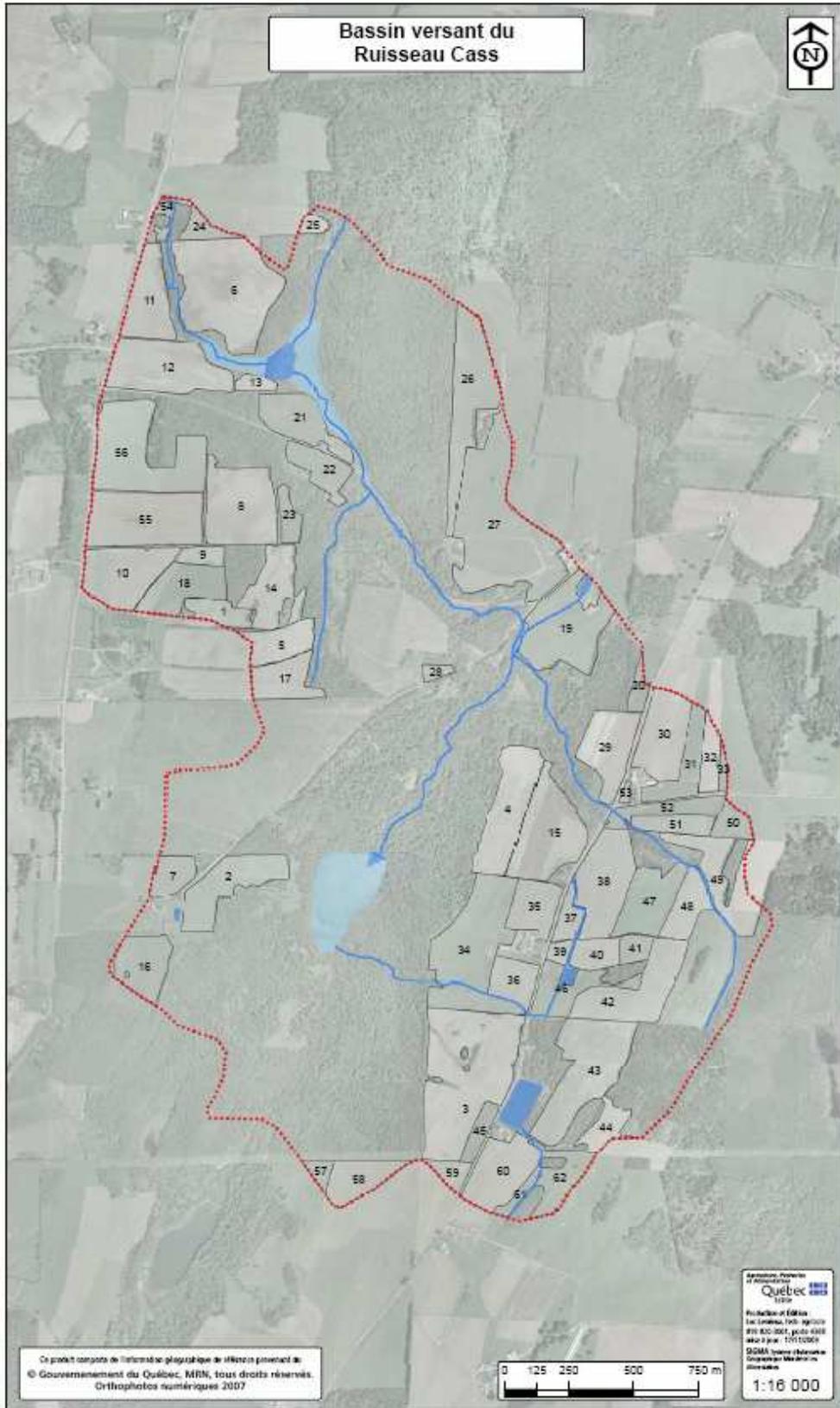




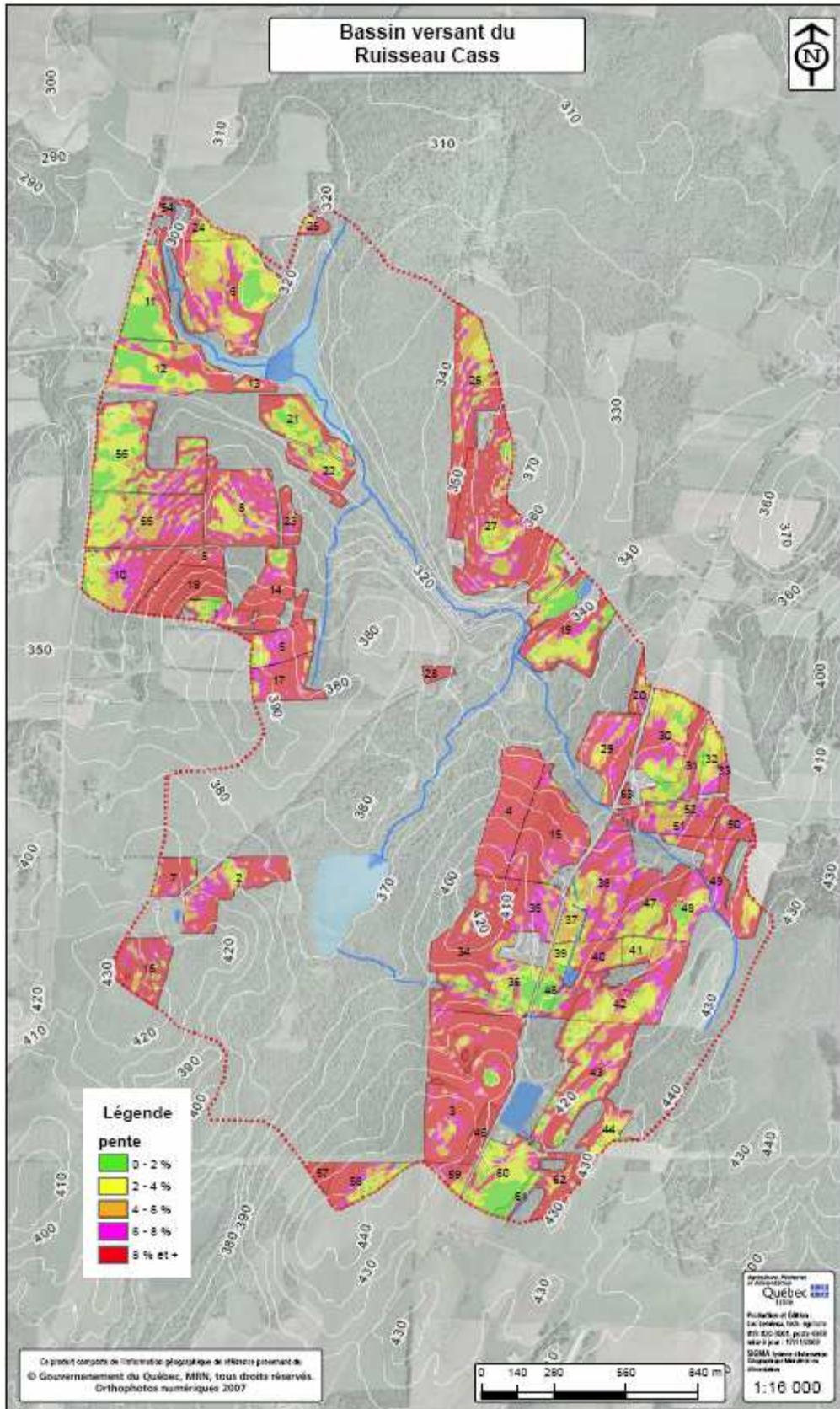
Cartes topographiques avec courbes isométriques



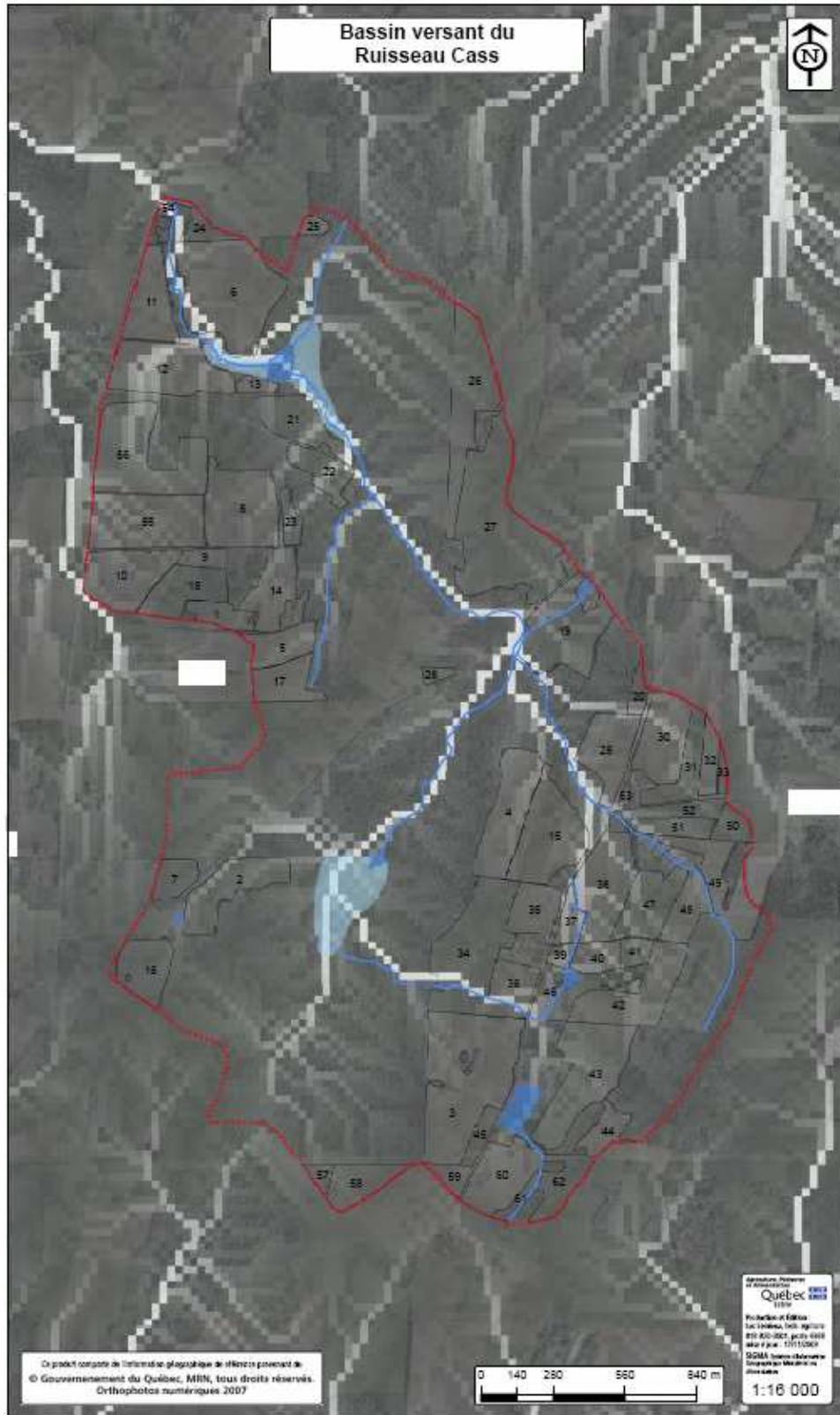
Identification des champs



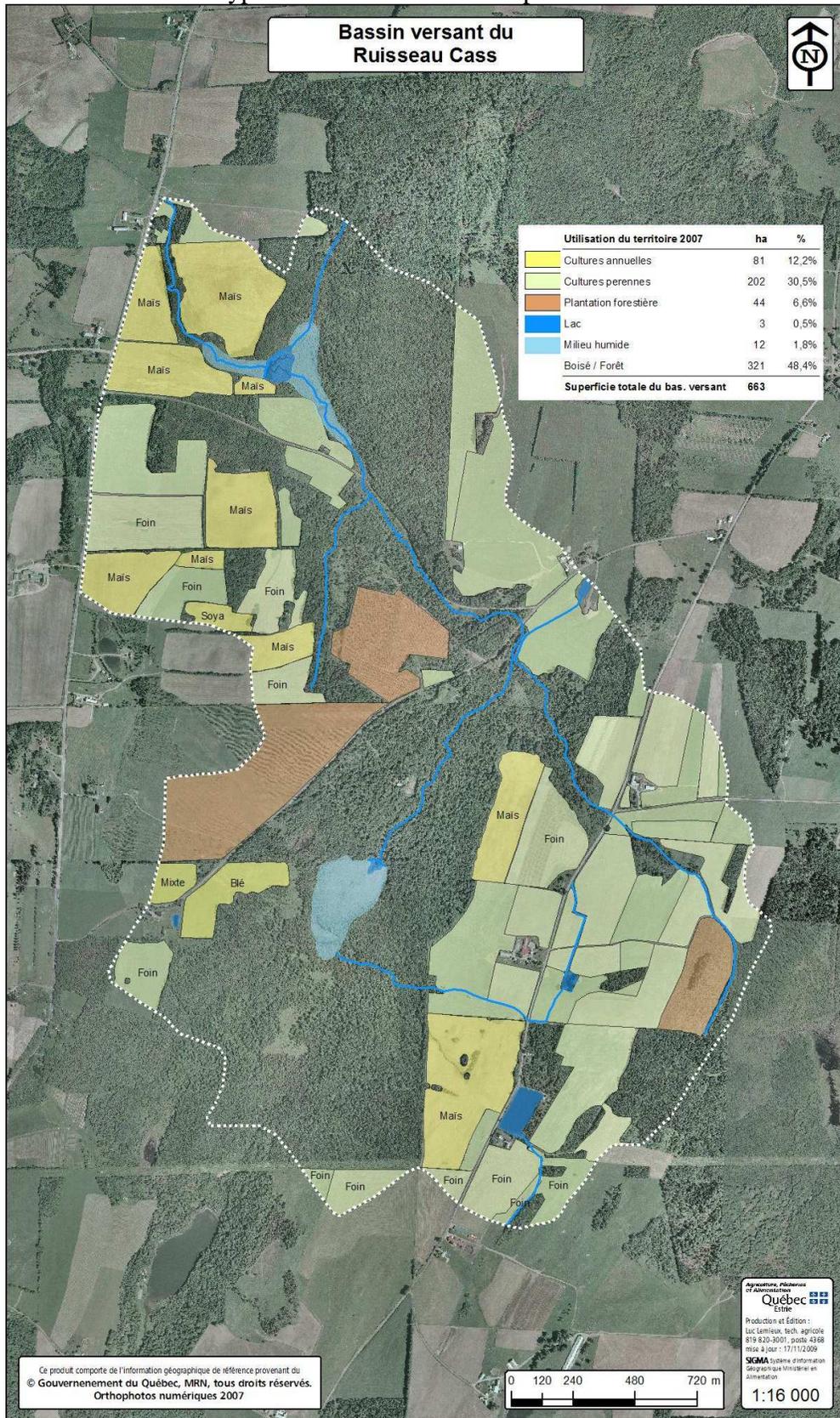
Pentes du bassin versant du ruisseau Cass



Carte d'écoulement



Type de culture sur les champs en 2007



Liste des cultures sur chaque champ en 2007

3	16,4	Maïs	Annuelle
4	7,3	Maïs	Annuelle
5	3,4	Maïs	Annuelle
6	13,5	Maïs	Annuelle
7	2,2	Mixte	Annuelle
8	8,1	Maïs	Annuelle
9	1,2	Maïs	Annuelle
10	6,4	Maïs	Annuelle
11	5,2	Maïs	Annuelle
12	8,1	Maïs	Annuelle
13	0,9	Maïs	Annuelle
14	5,0	Foin	Perenne
15	8,3	Foin	Perenne
16	4,4	Foin	Perenne
17	3,5	Foin	Perenne
18	4,7	Foin	Perenne
19	8,7	<Nul>	Perenne
20	1,1	<Nul>	Perenne
21	4,8	<Nul>	Perenne
22	3,0	<Nul>	Perenne
23	1,4	<Nul>	Perenne
24	1,5	<Nul>	Perenne
25	0,7	<Nul>	Perenne
26	8,8	<Nul>	Perenne
27	16,7	<Nul>	Perenne
28	0,6	<Nul>	Perenne
29	5,4	<Nul>	Perenne
30	5,8	<Nul>	Perenne
31	3,4	<Nul>	Perenne
32	1,9	<Nul>	Perenne
33	0,6	<Nul>	Perenne
34	12,2	<Nul>	Perenne
35	3,5	<Nul>	Perenne
36	2,8	<Nul>	Perenne
37	1,5	<Nul>	Perenne
38	7,2	<Nul>	Perenne
39	0,7	<Nul>	Perenne
40	2,1	<Nul>	Perenne
41	1,3	<Nul>	Perenne
42	7,0	<Nul>	Perenne
43	10,0	<Nul>	Perenne
44	2,1	<Nul>	Perenne
45	1,5	<Nul>	Perenne
46	3,7	<Nul>	Perenne
47	4,9	<Nul>	Perenne
48	3,0	<Nul>	Perenne
49	5,5	<Nul>	Perenne

50	1,6	<Nul>	Perenne
51	2,2	<Nul>	Perenne
52	2,9	<Nul>	Perenne
53	0,2	<Nul>	Perenne
54	0,7	<Nul>	Perenne
55	9,1	Foin	Perenne
56	10,8	<Nul>	Perenne
57	0,8	Foin	Perenne
58	3,4	Foin	Perenne
59	1,3	Foin	Perenne
60	5,7	Foin	Perenne
61	0,9	Foin	Perenne
62	3,4	Foin	Perenne