

Étude rétrospective de l'évolution des
composantes environnementales du bassin
versant du lac Brome :
Passé et présent des filtres naturels de l'eau

Préparée pour le compte de Renaissance lac Brome par
Lionel Humbert, Biogiste Ph.D.

Décembre 2012



Table des matières

Introduction	6
I Évolution du paysage du bassin versant du lac Brome	8
1 Historique du paysage agricole	9
1.1 L'avant-guerre	9
1.2 L'agriculture intensive	10
1.3 La déprise agricole	10
1.4 La CPTAQ et la villégiature	10
2 Le cycle du Phosphore	14
2.1 Évolution du cycle du Phosphore dans les sols	14
2.2 Villégiature et déboisement	15
II Évolution des composantes de filtration naturelle du bassin versant du lac Brome et son effet sur la qualité de l'eau	17
3 Données du bassin versant	18
3.1 Bassin versant	18
3.1.1 Bassins hydrographiques	18
3.1.2 Cours d'eau	18
3.2 Images Landsat	19
3.2.1 Eaux profondes et de surfaces	20
3.2.2 Marais	22
3.2.3 Marécages	23

3.2.4	Forêts	27
3.2.5	Végétation basse	27
3.2.6	Zones anthropisées	27
3.3	Agriculture	28
3.4	Changements d'occupation des sols	28
4	Bilan pour la qualité de l'eau	31
III	Recommandations et solutions	35
5	Accumulation de matière organique et de sédiments	37
5.1	Matière organique aux exutoires des cours d'eau et du lac	37
5.2	Sédimentation et accumulation de matière organique du littoral	38
5.3	Bloquage de la matière organique	39
6	Restauration des rives et gestion des fossés de drainage	41
6.1	Rives	41
6.2	Fossés de drainage	41
7	Gestion des lacs artificiels	46
8	Recommandations par zones	47
8.1	Pour tous les zones	47
8.2	Pour les zones urbaines	47
8.3	Pour les zones agricoles et rurales	47
8.4	Pour les zones forestières	48
9	Recommandations spécifiques pour certains secteurs	49
9.1	À la Pointe Fisher	49
9.2	Exutoire de l'Argyll	49
9.3	Rue Conférence	49
9.4	Plage municipale	50
9.5	Rue Benoit	51
9.6	Parc Eugène	52
9.7	Rue Gaudord, rue des Alizés et rue de la Montagne	52
9.8	Robinson Bay, Domaine Brome et Rock Island	52

10 Bilan des solutions	54
Annexes	60
A Matériel et Méthodes	61
A.1 Délimitation et découpage du bassin versant en sous-unités	61
A.2 Analyse des images satellites Landsat 4/5 et Landsat 7	61
A.3 Étude des photos aériennes	62
A.4 Numérisation et traitement des données	63
A.5 Évaluation du risque sur la qualité de l'eau	63
B Exemple d'une décision de la CPTAQ	65
C Cartes du bassin versant	68

Liste des figures

1.1	Évolution du paysage du développement des condominiums du lac Brome, 400 chemin Lakeside	12
1.2	Évolution du paysage des développements d'Inverness sur le Golf et des Villas Inverness	13
3.1	Exemple de création de lacs artificiels pour la villégiature et l'agriculture	25
3.2	Évolution du paysage de l'exutoire du ruisseau Quilliams	26
5.1	Boudins de fibre de noix de coco végétalisés.	39
6.1	Tranchée et intégration paysagère.	42
6.2	Problématique des fossés autour du lac Brome.	43
6.3	Dispositif de berme filtrante et de trappe à sédiments	44
6.4	Exemples de fosses à sédiments.	45
9.1	Problématique de l'enrochement au niveau de la rue Conférence.	50
9.2	Plage Municipale	51
9.3	Stationnements rue Benoit	51
9.4	Fossés et rue des Alizés nouvellement construite	53
C.1	Carte des sous bassin versants	69
C.2	Carte des composantes environnementales du bassin versant du Lac Brome en 1990	70
C.3	Carte des composantes environnementales du bassin versant du Lac Brome en 2000	71
C.4	Carte des composantes environnementales du bassin versant du Lac Brome en 2012	72
C.5	Carte de l'évaluation du risque pour la qualité de l'eau	73

Liste des tableaux

3.1	Composantes naturelles et anthropiques du bassin versant du lac Brome, en pourcentage de la superficie totale du bassin versant, pour les années 1950, 1966, 1990, 2000 et 2012. IR correspond aux longueurs d'onde de l'infra-rouge.	19
3.2	Caractéristiques des classes d'occupation des sols pour la gestion des eaux pluviales considérant un sol de type C (faible perméabilité). Les vitesses sont données pour une pente de 0,5%	20
3.3	Caractéristiques des classes d'occupation des sols pour le traitement de l'eau.	21
3.4	Statistiques des lacs artificiels	22
3.5	Évolution des surfaces agricoles	28
3.6	Bilan des changements dans l'occupation des sols, en pourcentage de la surface totale du bassin versant, suite à la déprise agricole et au rehaussement du lac	30
4.1	Problématique liée au risque pour la qualité de l'eau pour chaque cours d'eau.	32
4.2	Calcul du risque pour la qualité de l'eau de chaque sous unité du bassin versant du lac Brome	33
10.1	Actions à prioriser et coûts associés	55

Introduction

Au cours des siècles passés, la déforestation, l'agriculture et le développement résidentiel ont profondément affecté la qualité de l'eau. La déforestation et la scarification des sols augmentent la température des cours d'eau (Brown et Krygier, 1970), augmentent la concentration d'azote, de nitrite, de nitrate et de phosphore (Ahtiainen et Huttunen, 1999) dans l'eau des bassins versants.

De plus, de nombreuses matières en suspension (MES) sont relâchées dans l'eau (Ahtiainen et Huttunen, 1999), ayant comme double conséquence de constituer un vecteur de transport du phosphore et de diminuer la clarté de l'eau. Les communautés d'algues sont aussi affectées et augmentent après la disparition du couvert forestier (Holopainen et Huttunen, 1998). Les concentrations de mercure dans les organismes aquatiques, notamment les poissons, augmentent également à la suite de perturbations du couvert forestier (Garcia et Carignan, 2005; Skyllberg *et al.*, 2009). De plus, les zones de filtration naturelle ont également été affectées au cours du développement des villes et des villages. Ces zones tampons permettaient de minimiser les impacts des changements d'occupation des sols sur les lacs et les rivières en aval.

Après les épisodes d'algues bleu-vert (cyanobactéries) dans les lacs, il est devenu évident que le rétablissement de zones filtrantes est nécessaire. Pour ce faire, l'un des principaux enjeux est de déterminer la surface filtrante nécessaire pour rétablir une eau de qualité.

Cette étude vise à récolter des données passées et présentes permettant de déterminer des objectifs clairs et précis quant aux cibles à atteindre pour l'amélioration de la qualité de l'eau du Lac Brome. Ces données regroupent notamment l'évolution des milieux humides filtrants, des rives des cours d'eau du bassin versant du Lac Brome et l'occupation des sols au cours du XX^{ème} et du XXI^{ème} siècle.

Sommaire à la direction

L'examen par photos satellites et photos aériennes du territoire du bassin versant du lac Brome depuis les 50 dernières années a montré de profondes modifications dans l'occupation du territoire. En effet, l'activité agricole sur le territoire a fait place à la villégiature et à la reprise forestière; de grandes superficies de marécages se sont transformées en marais et l'urbanisation a amené de nouvelles résidences, routes et fossés drainant de grandes superficies. Tous ces changements ont eu des effets sur les diverses composantes naturelles qui filtrent les eaux se rendant au lac par les ruisseaux, les routes, les drains et les fossés.

On estime qu'au cours des 20 dernières années 5% du territoire a perdu sa capacité filtrante soit l'équivalent de 850 hectares de marais et marécages. Pour restaurer cette capacité filtrante, des mesures correctives sont proposées, dont divers programmes de restauration des fossés, de gestion de l'aménagement des routes, de mise en place de bassins de sédimentation et des marais filtrants, de même qu'un programme de restauration des bandes riveraines. Et ce, en plus des bonnes pratiques environnementales que tous les citoyens devraient appliquer, comme: éviter les fertilisants et les savons phosphatés, assurer le bon fonctionnement de son installation septique, etc.

L'objectif de restauration de 5% de la capacité filtrante du bassin versant pourrait se faire par une combinaison des diverses actions mentionnées ci-dessus. Nous croyons que 10 km de fossés comblés, 20 km de bandes riveraines, 20 trappes à sédiments et quelques milieux filtrants situés aux endroits stratégiques pourraient s'avérer très profitables à la qualité de l'eau du lac. Par ailleurs, ces moyens permettent à l'eau de s'infiltrer profondément dans les sols, ce qui améliorera la restauration des aquifères et donc l'approvisionnement en eau des municipalités.

Partie I

Évolution du paysage du bassin versant du lac Brome

Chapitre 1

Historique du paysage agricole

Introduction

Le paysage est en constante évolution; actuellement le bassin versant du lac Brome est une matrice de villégiature incluse dans un paysage forestier. Mais ce paysage était complètement différent il y a 50 ans: en effet il était principalement agricole et forestier. Ce chapitre dresse le portrait de cette évolution.

1.1 L'avant-guerre

Avant les deux grandes guerres, la mécanisation de l'agriculture a permis d'augmenter les surfaces agricoles. On parlait donc d'agriculture extensive. Les amendements étaient limités et les engrains chimiques peu utilisés. Malgré ces faibles apports externes, les sols ont accumulé du Phosphore (*P*).

Cette accumulation de *P* dans les sols n'est pas un phénomène récent. Les archéologues utilisent d'ailleurs le *P* comme un traceur des activités humaines (Rapp Jr, 1987; Eidt, 1977; Entwistle et al., 2000; Manzanilla, 1996). Par exemple, Dambrine et al. (2007) rapportent dans des abandons agricoles de la période Gallo-Romaine (III^{ème} et IV^{ème} siècle) des niveaux élevés de cet élément dans les zones d'activité humaine qui sont aujourd'hui des forêts. Ces sols passent de 40-50 mg de *P* par kg de sol dans des zones où l'activité humaine était "forte" à des valeurs de 10-15 mg par kg dans les zones qui n'ont pas été cultivées.

Dans le bassin versant du lac Brome, l'agriculture représentait au moins 29% du territoire avant 1960.

1.2 L'agriculture intensive

Après les grandes guerres, l'industrie chimique a pris de l'ampleur, le coût de la machinerie agricole a baissé et les agriculteurs se sont regroupés en grandes exploitations. Cette période a marqué le début d'une baisse significative des surfaces exploitées en même temps que les rendements augmentaient. Dans la région, ce phénomène couplé à l'augmentation des coûts, à la pauvreté des sols et aux difficultés d'assurer la relève a fait en sorte que de grandes superficies de terres agricoles ont été abandonnées. Des espaces forestiers se sont développés sur ces terres. On estime que de 50 à 80% des forêts actuelles aux Etats-Unis et en Europe sont issues des abandons agricoles (Bellemare et al., 2003; Mather et al., 1999). De plus, le cycle du *P* dans les sols forestiers est fermé c'est-à-dire qu'il n'y a que peu d'intrants et de sortants. C'est pour cela que l'on y retrouve des différences de *P* dans les sols forestiers, découlant d'anciennes activités humaine (Dambrine et al., 2007), 2000 ans après l'abandon des cultures.

1.3 La déprise agricole

Dans les années 1980-1990, le développement des supermarchés et surtout des centrales d'achat ont mis en concurrence l'agriculture locale avec le monde entier. La relève agricole est aussi de plus en plus rare, les jeunes gens préfèrent des vies moins contraignantes. Bon nombre d'exploitations agricoles ont donc fermé.

1.4 La CPTAQ et la villégiature

Le recul des terres agricoles et l'urbanisation ont nécessité la mise en place de la Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles en 1978 (L.R.Q. c. P-41.1). Cette loi vise à protéger les terres agricoles de la spéculation foncière. La Commission de Protection du Territoire Agricole du Québec (CPTAQ) fut créée pour faire appliquer cette loi.

De plus, le règlement sur les exploitations agricoles (L.R.Q. c. Q-2, r. 26) de la Loi sur la qualité de l'environnement (L.R.Q. c. Q-2, a. 31, 53.30, 70, 109.1 et 124.1), article 50.3, interdit la mise en culture de nouvelles terres sur la plus grande partie du territoire du Québec.

Les espaces où la CPTAQ accepte de permettre un développement immobilier se limitent donc souvent aux plus mauvaises terres agricoles où des forêts se sont installées depuis peu suite aux abandons agricoles (*c.f.* exemple en Annexe). Les forêts anciennes, au fort potentiel sylvicole et acéricole, sont également exclues des autorisations de changement d'utilisation des terres.

Aujourd'hui, les bâtiments à usage résidentiel occupent 510 ha sur d'anciennes terres agricoles (donc en zone verte). Ce constat vient confirmer la tendance à l'étalement urbain en zone verte et à la popularité de la villégiature dans notre région. On estime qu'environ 25% des habitations résidentielles sont implantées en zone verte, en dépit des restrictions de la CPTAQ.

Cela doit être mis en perspective avec la perte d'occupation agricole, passant de 27% en 1966 à 8% aujourd'hui (voir tableau 3.5) soit une perte de 19% ce qui correspond à un vaste territoire de 3 270 ha qui sont passés soit en fonction résidentielle ou sont retournés en forêt ou en friche. La superficie moyenne d'occupation résidentielle en zone verte est probablement de 5 à 8 ha.

Conclusion de la partie sur le paysage agricole

Le développement immobilier s'est donc fait, surtout depuis les années 1985, sur d'anciennes terres agricoles où la forêt avait repris ses droits (Figures 1.1 et 1.2). Comme ces sols ont un taux de *P* important, couplé au fait que l'urbanisation s'est accélérée, ceci pourrait avoir une incidence sur la qualité de l'eau et l'état de santé du lac Brome.

12

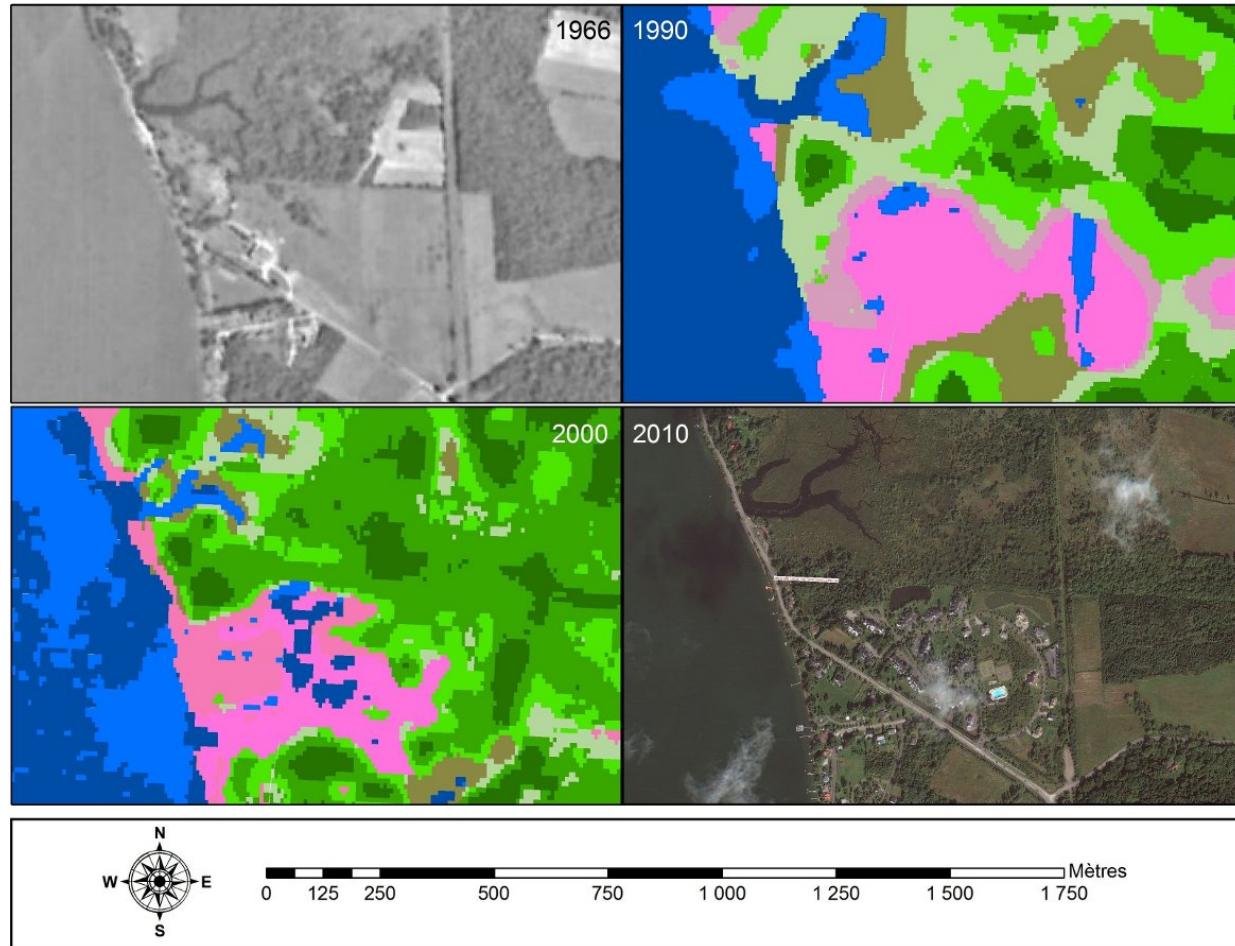


Figure 1.1: Évolution du paysage du développement des condominiums du lac Brome, 400 chemin Lakeside. Les images satellites (1990 et 2000) montrent: en rose les zones urbanisées; les marais en brun; les marécages en gris-vert; les espaces végétalisés en vert en fonction de la biomasse (biomasse faible en vert clair et biomasse forte en vert foncé).

13

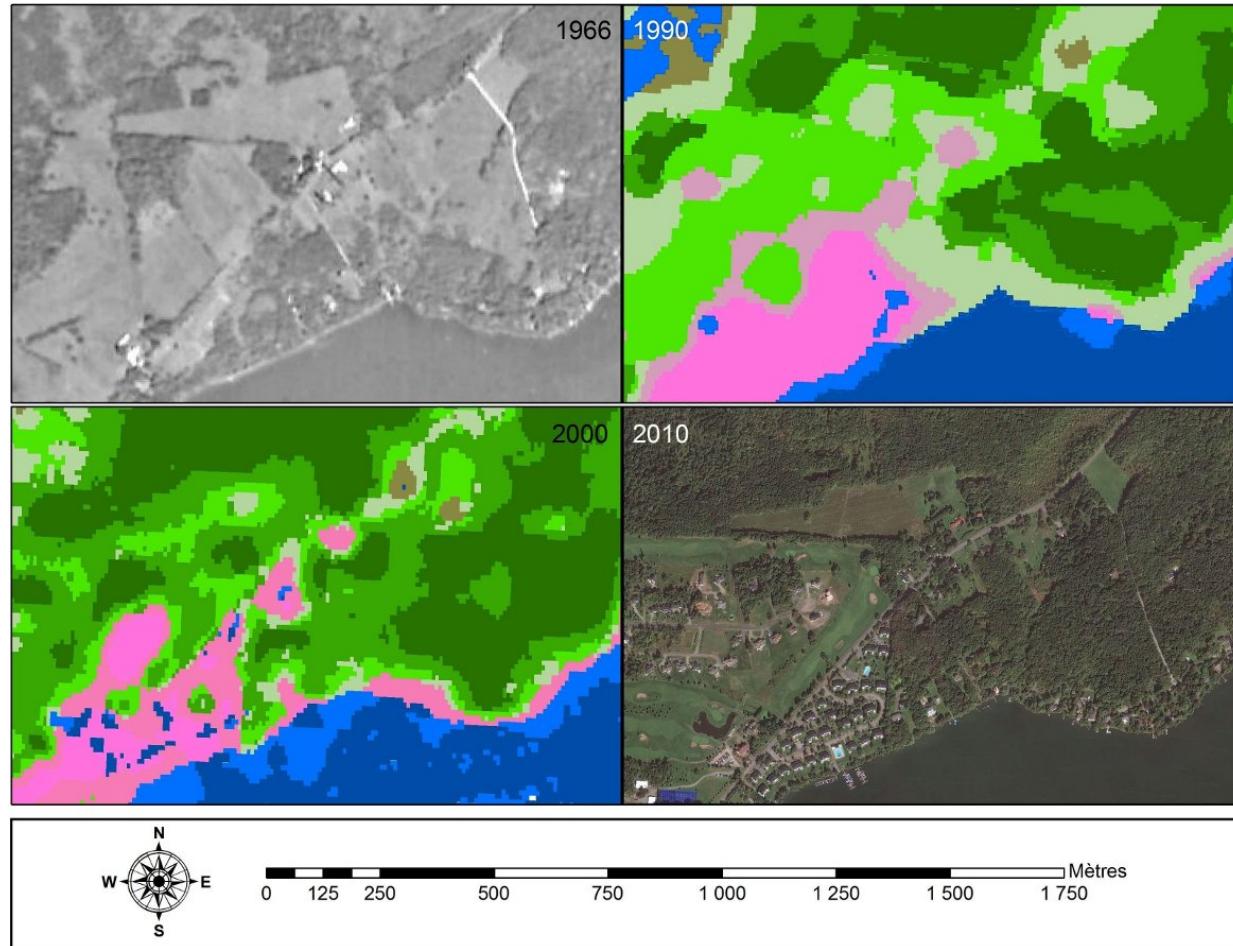


Figure 1.2: Évolution du paysage des développements d'Inverness sur le Golf et des Villas Inverness. Les images satellites (1990 et 2000) montrent: en rose les zones urbanisées; les marais en brun; les marécages en gris-vert; les espaces végétalisés en vert en fonction de la biomasse (biomasse faible en vert clair et biomasse forte en vert foncé).

Chapitre 2

Le cycle du Phosphore

Introduction

Pour les lacs, le problème principal de qualité d'eau est l'augmentation du taux de Phosphore (P), Azote (N) et Potassium (K). Les épisodes de cyanobactéries ont permis aux populations de prendre conscience du problème.

De ces éléments, le P est le plus souvent cité comme étant le plus problématique. Mais il n'en est rien, ils sont tous aussi importants les uns que les autres. Comme le P est très insoluble, si on le trouve en grande quantité dans l'eau, cela indique de gros problèmes en amont.

Le plus souvent, l'agriculture, les détergents domestiques, les installations septiques non-conformes et les engrains domestiques sont pointés du doigt comme étant les grands émetteurs de P . Mais c'est le plus souvent la végétation des milieux urbain (Waller, 1977), qui va directement s'accumuler dans les cours d'eau, comme les feuilles mortes, au lieu d'être recyclées dans les sols. L'érosion des sols est également un des plus grands facteurs d'émission de P dans les zones urbaines (Cowen and Lee, 1976; Waller, 1977; Sharpley et al., 1990; Quinton et al., 2001).

2.1 Évolution du cycle du Phosphore dans les sols

Comme nous l'avons indiqué, le P se distingue des autres éléments nutritifs par le fait qu'il est très peu soluble. Cette insolubilité a une conséquence:

l'agriculture passée a augmenté le taux de *P* contenu dans les sols avec l'utilisation d'engrais chimiques. Mais le *P* a également la propriété de se lier à la matière organique. Jusque dans les années 1980-1990, du *P* s'est accumulé dans les sols et certains de ces sols ont été abandonnés par l'agriculture. Depuis les années 1990 pour protéger les lacs et les cours d'eau on mesure la matière organique contenue dans les sols et on détermine la capacité de ces sol à retenir le *P*. La transformation de terres agricoles en friches puis en forêt à eu des conséquences sur ce *P*. Contrairement aux champs agricoles, les espaces forestiers accumulent et recyclent la biomasse. Le *P* y subit des changements: il passe de sa forme insoluble vers des formes organiques et particulières (Walker and Syers, 1976). Le taux de *P* minéral dans le sol baisse et il est accumulé dans les parties aériennes et souterraines des plantes, particulièrement dans le bois (Tiessen et al., 1984; Johnson et al., 2001). Une partie de ce *P* accumulé retourne au sol par les feuilles et les débris ligneux.

Au sol, les micro-organismes décomposeurs libèrent le *P* dans des formes plus solubles et labiles (chimiquement réactif). On a donc une accumulation de *P* soluble, mais il est immédiatement recapté par les plantes. En effet la prospection racinaire des arbres est très profonde. Les racines vont donc pouvoir éviter les transferts verticaux et horizontaux de *P* par infiltration et percolation vers la nappe phréatique. Dans les zones moins productives, où la matière organique s'accumule, le *P* sous forme soluble va donc s'accumuler. On estime qu'en sol forestier le cycle du *P* est fermé (pas d'intrants et pas de sortants).

Comme les forêts, les marécages qui sont des boisés au sous-bois humide, vont également emmagasinés de grandes quantités de *P*. De plus, les marécages sont dans la zone de transition entre les milieux sec et les milieux humides. Ils participent donc à bloquer la migration du *P* vers les cours d'eau et les lacs.

Il est donc important de maintenir l'intégrité de ses milieux afin de ne pas libérer les grandes quantité de *P* qui y sont emmagasinées.

2.2 Villégiature et déboisement

Lorsque l'occupation de ces sols change à nouveau, il s'effectue un changement important dans les cycles biogéochimiques.

Quand un déboisement a pour but la construction d'habitations (Figures 1.1 et 1.2), le problème principal est qu'il n'y a pas d'accumulateur de

biomasse comme le bétail ou les cultures pour contrer le relargage causé par la végétation. Les parties souterraines des arbres se décomposent libérant le *P* soluble qui n'est plus recapté. De plus les barrières naturelles qui étaient présentes et empêchaient la dispersion de ces éléments par ruissellement ou migration horizontale (comme les racines) disparaissent. On estime que l'emmagasinement du *P* diminue de 30% lors de la conversion de forêt en habitation (Waller, 1977). Mais dans le même temps, l'exportation de *P* vers les cours d'eau est plus élevée de 25 à 110% avec une augmentation moyenne de 60% (Elias et al., 2011; Cowen and Lee, 1976).

Ce problème est présent au lac Brome puisque de grandes surfaces ont été converties en zones d'habitations.

Conclusion

Le cycle du *P* est donc intimement lié à l'occupation des sols. Tout changement d'utilisation des terres est donc susceptible d'influencer la qualité de l'eau du lac.

Partie II

**Évolution des composantes de
filtration naturelle du bassin
versant du lac Brome et son
effet sur la qualité de l'eau**

Chapitre 3

Données du bassin versant

3.1 Bassin versant

3.1.1 Bassins hydrographiques

Le bassin versant du lac Brome totalise 18 190 ha pour un lac ayant une superficie de 1 464 ha. Son bassin versant a été découpé en 34 sous bassin (Carte 1). De ces 34 sous unités, 7 s'écoulent directement dans le lac sans être drainées par des cours d'eau. La surface moyenne de ces sous-unités est de 535 ha avec un maximum de 1 436 ha pour le sous-bassin abritant le ruisseau Coldbrook et un minimum de 12 ha pour le sous-bassin de la pointe Fisher.

3.1.2 Cours d'eau

De nombreux cours d'eau sillonnent le bassin versant, dont le ruisseau Pearson, le ruisseau Coldbrook, le ruisseau Quilliams. Ces cours d'eau parcourent 259,65 km. De ces 259,65 km, 70,6% sont bordés par deux bandes riveraines (10 mètres de part et d'autre), 10,6% n'ont qu'une bande riveraine et 18,7% n'en n'ont pas. Or, on estime que les bandes riveraines ont une efficacité de rétention de 30 à 90% du P qui y transite (Delgado et al., 1995; Magette et al., 1989; Abu-Zreig et al., 2003; Vought et al., 1994). Le ruisseau Quilliams draine 42% des eaux du bassin versant, le Coldbrook 26%, 7% pour l'Argyll, 6% pour le McLaughlin, 5% pour le Pearson, 6% pour le Durrell et 2% pour l'Inverness. Le reste des eaux se rendent directement vers la lac Brome, soit environ 4-5%.

3.2 Images Landsat

L’analyse des images satellites Landsat nous a permis de classer le territoire en 9 classes d’occupation des sols (Tableau 3.1). Les données sont disponibles pour 1990 et 2000. Les valeurs des autres années ont été obtenues par analyse des photos-aériennes et par régression des données des autres années. Enfin les photo-aériennes de 1950 et 1966 étant en noir et blanc, il est donc plus difficile de déterminer certains types d’occupation des sols. Compte tenu de ces remarques, dans le texte nous référerons aux changements de 1990 à 2012, les données de 1950 et 1966 sont données pour comparaison dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1: Composantes naturelles et anthropiques du bassin versant du lac Brome, en pourcentage de la superficie totale du bassin versant, pour les années 1950, 1966, 1990, 2000 et 2012. IR correspond aux longueurs d’onde de l’infra-rouge.

Année	1950 ^a	1966 ^b	1990	2000	2012 ^b
Eau profonde (présence d'une thermocline)	7,13	7,14	7,92	7,05	7,03
Eau de surface (pas de thermocline)	1,20	1,25	1,45	1,9	2,05
Zone anthropisée (IR élevé)	7,44*	7,69*	4,71	2,77	2,7
Zone anthropisée (IR moyen)			4,24	4,97	5,23
Marais	1,12	1,13	2,04	2,88	3,76
Marécages	10,3	10,3	17,67	10,6	10,3
Végétation basse (ex. prés)	26,15	23,02	11,79	11,01	10,61
Forêt ouverte ou culture dense à moyenne réflectance (ex. blé)	23,79	22,31	19,76	32,93	32,3
Forêt dense ou culture à haute réflectance (ex. maïs)	22,87	27,16	30,42	25,89	26,02

L’erreur relative sur les pourcentages est de $\pm 0,03$. ^a évaluée par régression avec les données des autres années. ^b évaluée en partie par régression avec les données des autres années et par photos aériennes. * intègre les valeurs d’IR faible et élevé

La rétention de l’eau et la vitesse d’écoulement sur ces surfaces vont grandement affecter leur capacité à traiter ou charger l’eau en P , en matière en suspension (MES) ou autres contaminants. Les caractéristiques moyennes de ces classes sont regroupées dans le tableau 3.2. On peut constater que les marais vont permettre de très faibles vitesses d’écoulement mais qu’ils

ont une capacité de rétention de l'eau faible par rapport aux marécages qui permettent des écoulements plus rapides mais vont faire beaucoup plus de rétention. Pour le traitement de l'eau on cherche ces deux caractéristiques car un faible écoulement va laisser le temps aux MES, comme la matière organique, de sédimentier et la rétention va favoriser l'enlèvement des éléments nutritifs qui sont dans l'eau. Enfin on peut dresser un tableau de l'efficacité de ces occupations de sols pour l'enlèvement, le stockage et l'immobilisation des MES et du P (Tableau 3.3). Par exemple on observe que les marais vont stocker des MES et du P mais ces derniers ne seront que partiellement immobilisés, alors que les marécages vont immobiliser ces éléments notamment dans la matière ligneuse.

On comprendra donc l'intérêt de connaître l'évolution de l'occupation des sols, et donc des milieux capables de filtrer, pour saisir comment la qualité de l'eau a pu évoluer et cibler les zones d'interventions pour l'améliorer.

Tableau 3.2: Caractéristiques des classes d'occupation des sols pour la gestion des eaux pluviales considérant un sol de type C (faible perméabilité). Les vitesses sont données pour une pente de 0,5%.

Occupation des sols	Ruisseaulement en %	Ruisseaulement en m/s	Rétention en mm
Eau de surface	N/A	0,50	Na
Zone anthropisée (IR élevé)	94	0,42	0
Zone anthropisée (IR moyen)	80	0,20	2,5
Marais	N/A	0,05	1
Marécages	70	0,10	10
Végétation basse	74	0,15	9
Forêt ouverte	77	0,10	10
Forêt dense	70	0,05	15

3.2.1 Eaux profondes et de surfaces

De ces données, il ressort que la surface d'eau profonde a diminué et que les parties en eau de surface ont augmenté.

Il est à noter que le niveau du lac Brome a été rehaussé en 1984 lors de la réfection du barrage Foster. On aurait donc pu s'attendre à un gain en eaux profondes, mais nous observons une diminution. En fait, le rehaussement a eu plusieurs conséquences sur les rives et les exutoires des cours d'eau.

Tableau 3.3: Caractéristiques des classes d’occupation des sols pour le traitement de l’eau. Les “+” indiquent un effet positif (ex. emmagasinage), les “-” un effet négatif (ex. émission, relarguage) et “+/-” un effet variable selon les conditions (ex. coup d’eau)

Occupation des sols	Enlèvement		Stockage		Immobilisation	
	MES	P	MES	P	MES	P
Eau profonde	N/A	N/A	++	++	+/-	+/-
Eau de surface	N/A	N/A	--	--	N/A	N/A
Zone anthropisée (IR élevé)	--	--	--	--	--	--
Zone anthropisée (IR moyen)	-	--	--	--	--	--
Marais	++	+	++	++	+	+
Marécages	+	++	+	+	+	++
Végétation basse	+/-	-	+	++	+/-	-
Forêt ouverte	+	++	+	+	+	++
Forêt dense	++	++	++	++	++	++

On peut voir que les niveaux d’eau dans les cours d’eau ont effectivement monté entre 1966 et 1990 (Figures 1.1 et 3.2), mais ces niveaux ont baissé entre 1990 et 2010 (Figure 1.1 et 3.2). De l’exutoire du ruisseau McLaughlin à la pointe Fisher, on peut observer un envasement du lac (Figure 1.1). Au niveau de l’exutoire du Quilliams, l’envasement y est beaucoup plus avancé. En effet, on peut observer (Figure 3.2) que le lit du cours d’eau est plus étroit et que les marais et marécages ont cédé leur place à des milieux secs boisés entre 1990 et 2000.

En fait, le rehaussement du niveau du lac a eu pour effet d’inonder les bandes riveraines boisées des cours d’eau. Il y a donc eu un déperissement de ces espaces et cette biomasse s’est retrouvée dans le cours d’eau. La topographie plate et l’écoulement faible (méandres) ainsi que le virage à 90° à l’exutoire ont contribué à l’accumulation de cette matière organique au niveau du Quilliams. Malgré la topographie tout aussi plate au niveau de l’exutoire du McLaughlin, la trajectoire de ce cours d’eau est perpendiculaire à la rive du lac, ce qui a permis de rejeter la matière organique générée par le rehaussement plus en aval, d’où un envasement du lac à cet endroit. L’envasement va également changer la direction des écoulements de surface.

Cet envasement serait la cause de la diminution des surfaces en eaux froides et le rehaussement du niveau du lac a amené de l’eau plus profondément dans les terres, ce qui s’est traduit par une augmentation de la

Tableau 3.4: Statistiques des lacs artificiels

Année	1966	1990	2000	2010
Nombre de lacs	35	119	234	295
Surface moyenne en m ²	2373	3910	2984	2583
Surface mediane en m ²	1273	1799	1391	1209
Surface totale en m ²	83 062	465 346	698 151	761 911

surface en eaux de surface.

L’augmentation des eaux de surfaces est également due à la multiplication des lacs privés.

On notera aussi que d’après les photos aériennes, de nombreux lacs ont vu le jour entre 1966 et 2010 (Tableau 3.4). Certains de ces lacs sont d’utilité publique (réservoir incendie, régulation des eaux de surface) mais la plupart sont créés pour l’agriculture, la villégiature et en tant qu’aménagement paysager (Figure 3.1). Malgré le fait qu’ils ont une taille très petite, il semble que leur surface totale soit non négligeable. Ces petits lacs jouent le rôle de bassins de rétention. Leurs surface et profondeur ne permettant pas l’établissement d’une thermocline, on peut s’attendre à ce que la température de l’eau y soit relativement chaude. De plus, leur bassin versant est souvent très limité. Une eutrophisation a sûrement lieu dans la plupart. Cette eutrophisation des eaux de surface va contribuer à la diminution de la qualité de l’eau du bassin versant.

3.2.2 Marais

Les marais sont des formations végétales herbacées en eau stagnante qui agissent comme des filtres naturels. Au Québec, l’article 22 de la Loi sur la Qualité de l’Environnement a pour but de protéger ces milieux car ils rendent de nombreux services à la société.

Dans le même temps, les eaux de surface ont augmenté, et la surface en marais a également augmenté ce qui serait à mettre en relation avec le rehaussement du lac. Ce gain est d’environ 300 ha, et ce entre 1990 et 2012. Mais des zones complètes de marais naturels ont disparu (voir la section sur les marécages, ci-bas).

On pourrait croire que cette augmentation des marais pourrait servir la cause de la qualité de l’eau en abaissant la quantité de P dans l’eau mais ce

n'est pas évident (Smith and McCormick, 2001; Yoo et al., 2006). Les marais artificiels sont souvent plus efficaces dans cette tâche (Craft et al., 1988) dans la mesure où l'on contrôle les intrants et sortants. En fait, ces écosystèmes n'utilisent pas beaucoup de P et ils ne l'immobilisent pas beaucoup non plus (Craft et al., 1988; Debusk and Reddy, 2005). Il est à noter que d'un autre côté, les marais sont un élément déterminant de l'enlèvement des matières en suspension.

Si l'écoulement en surface est suffisamment faible, cette augmentation de la surface en marais permettrait d'augmenter la qualité de l'eau par filtration naturelle. Or, dans la plupart de ces marais, des chenaux sont présents. Ils permettent, lors des grosses pluies, des vitesses d'écoulement importantes. Ces "coups d'eau" vont avoir pour effet la mise en suspension de beaucoup de matière organique qui est emmagasinée dans les marais.

Enfin, les marais vont avoir tendance à émettre des éléments nutritifs dans les périodes hors de la saison de croissance des plantes par décomposition de la matière organique; surtout en automne et au printemps, ce qui peut poser un problème pour la qualité de l'eau.

3.2.3 Marécages

Les marécages, contrairement aux marais, sont des formations végétales arbustives et arborées. L'accumulation d'eau est moins importante que dans les marais et elle survient surtout au printemps lorsque la végétation est en dormance. Au printemps, les arbres et les arbustes vont pomper en grande partie l'eau qui s'est accumulée et qui a engorgé les sols à la fonte des neiges. Leur existence est liée au mauvais drainage du sol et à un type de sol relativement imperméable. Ces formations se distinguent aussi des marais par le fait qu'ils accumulent beaucoup moins de matière organique, car la décomposition de celle-ci y est relativement rapide, et elle va être utilisée et immobilisée dans la matière ligneuse. Enfin, contrairement aux marais, ils sont abrités du gel. La végétation va donc redémarrer plus tôt au printemps et l'entrée en dormance s'effectuer plus tard. D'ailleurs, la particularité de ces milieux est la succession de la végétation avec une cohorte d'espèces printanières, puis des espèces de sous-bois et une cohorte d'espèces automnales.

Les marécages ont vu leur surface fondre autour du lac Brome. Nous estimons que leur surface a diminué de moitié, soit une perte d'environ 1500 ha entre 1990 et 2012.

L'augmentation du nombre d'habitations en milieu forestier et, par le fait

même, l'augmentation du nombre de routes, chemins et fossés de drainage ont sûrement contribué à l'assèchement de nombreux sous-bois, les convertissant en forêts ouvertes. Cet assèchement a diminué la microflore de ces marécages. La décomposition qui s'effectuait dans ces milieux a donc diminué. De plus, le drainage de ces zones d'habitation permet l'écoulement d'une eau chargée en matière organique au printemps, eau qui était retenue par ces marécages auparavant. Enfin, lorsque des champs d'épuration hors-sol sont utilisés dans ces secteurs, on transforme les points bas (cuvettes) de ces marécages en marais. Il y a alors dépérissement des arbres et des arbustes. De grandes quantités d'éléments nutritifs sont alors libérés.

Bon nombre de marécages ont aussi été transformés en marais par le rehaussement du lac Brome comme au niveau de l'exutoire du Quilliams et du McLaughlin (Figure 1.1 et 3.2). La matière organique et le *P* emmagasinés dans les sols se sont vus libérés. La végétation non adaptée a également dépéri, libérant de la matière organique.

Mais le rehaussement a également produit un grand envasement des rives des cours d'eau. Sur ces zones envasées, le *Phragmites australis* s'est installé partout. Or, cette espèce est une pompe à eau, avec une évapotranspiration de 1700 à 2500 mm par an, ce qui est environ 500 à 1300 mm par an de plus que les précipitations. Elle assèche les zones humides d'environ 8000 m³ d'eau par ha, mais si l'on tient compte de l'évaporation (600 mm) cette valeur grimpe à 14000 m³. À titre de comparaison, si l'on considère les précipitations constantes sur 10 ans, 100 hectares de *Phragmites australis* occupant le rivage pourraient faire baisser le niveau du lac Brome de 0,9 mètre en 10 ans. Finalement, l'envasement du lac Brome a pu masquer ce phénomène de perte d'eau en compensant le volume manquant.

Les marécages et les marais riverains se sont donc vus asséchés, comme le montre le verdissement des exutoires du Quilliams et du McLaughlin (voir figures 1.1 et 3.2).

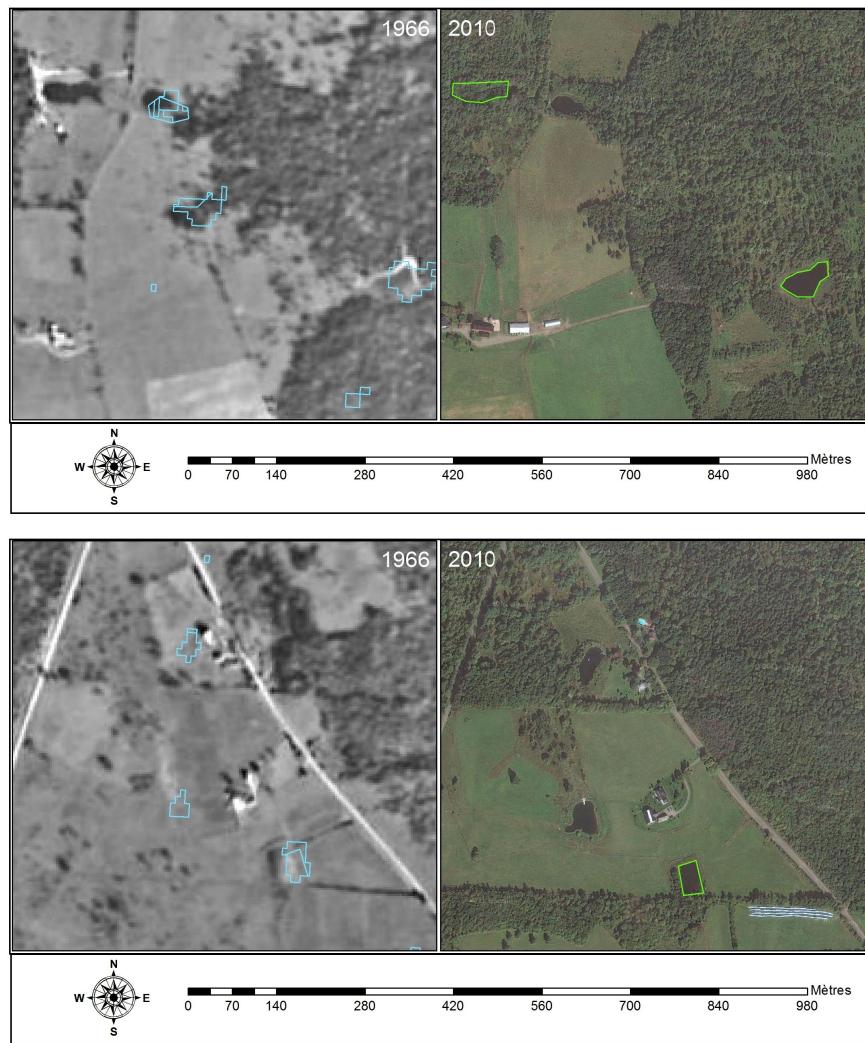


Figure 3.1: Exemple de création de lacs artificiels pour la villégiature et l’agriculture. Les polygones bleus indiquent les zones en eau libre détectées par satellite en 2000 et les polygones vert indiquent les lacs créés vers 1966 (on notera la mise en place des digues).

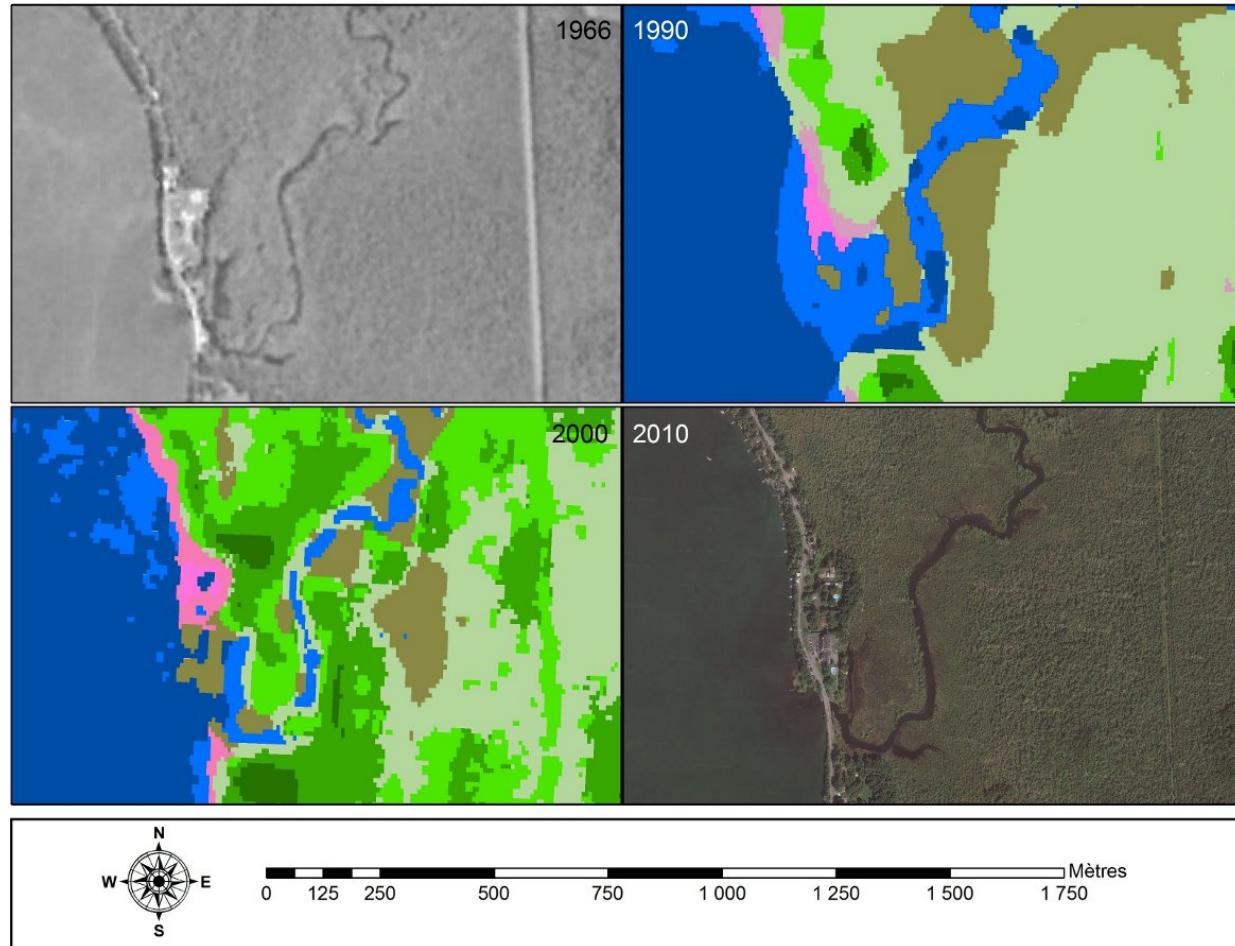


Figure 3.2: Évolution du paysage de l'exutoire du ruisseau Quilliams. On peut voir le recul des marais (brun) et des marécages (gris-vert) au profit des espaces boisés (vert clair à vert foncé). On notera également la diminution du volume d'eau (bleu foncé).

3.2.4 Forêts

Tel que nous l'avons indiqué précédemment, la déprise agricole a permis aux forêts de se réinstaller. Selon les images landsat, cela est vrai pour le lac Brome où un gain de 8% (forêt ouvertes et denses) a été fait entre 1990 et 2000, puis les surfaces forestières se sont stabilisées. Les forêts ouvertes, donc en général jeunes, ont vu leurs surfaces augmenter entre 1990 et 2000. Dans le même temps, les forêts plus denses ont vu leur surface diminuer. Alors qu'en 1990 les forêts denses étaient plus importantes que les forêts ouvertes, en 2000 ce sont les forêts ouvertes qui dominent. Ce changement entre forêt ouvertes et denses pourrait s'expliquer par des coupes forestières, mais également par le fait que du développement domiciliaire s'est effectué dans des zones de forêts matures. Ce type de développement vendu comme "proche de la nature" se sont en effet multipliés, surtout en montagne.

3.2.5 Végétation basse

Les espaces de végétation basse ont légèrement diminué entre 1990 et 2012, mais les changements sont très faibles (perte de 1% en 20 ans). On peut également observer que cette diminution est bien inférieure à ce qu'elle fut entre 1950 et 1990 où la déprise agricole était à son maximum (perte de 14%, soit environ 2500 ha).

3.2.6 Zones anthropisées

L'étude des zones anthropisées est plus délicate. Ce que l'on détecte par satellite sont les sources de chaleur, soit les surfaces de type béton, asphalte, remblai ... Il faut savoir que beaucoup d'efforts ont été fait pour verdier les zones urbaines. De plus, le tout béton a considérablement ralenti depuis les années 1980-90. C'est ce que l'on peut observer autour du lac Brome, les zones avec des IR élevés ont diminué au profit de zones à IR moyen. L'augmentation du nombre d'habitations peut se voir dans les IR moyens, avec un gain de 0,5% par 10 ans soit environ 90 ha. En considérant des terrains de 5 000 m², on obtient 180 nouvelles habitations par décennies. Comme indiqué dans la section sur les forêts, des zones d'habitation de type "proche de la nature" ont augmenté, amenant des surfaces plus chaudes (IR moyen) en milieu forestier. Les surfaces chaudes représentent donc une petite partie du terrain de l'habitation, d'où des augmentations en IR relativement

faibles par rapport à ce que l'on pourrait s'attendre à la vue du nombre de nouvelles habitations.

3.3 Agriculture

Les surfaces agricoles représentent 1756 ha en 2000, contre 4899 ha en 1950. Donc depuis 1950, on peut voir que les surfaces agricoles ont été divisées par trois. En 2010, de la surface de 2000, 15,8% ne sont plus en production (Tableau 3.3). Au niveau du type de production, en 2012, environ 19% sont en grandes cultures, environ 38% en cultures moins intensives, et environ 16% sont en cultures sèches (petites céréales ou prairie de fauche). Il y aurait environ 10% en pâturages.

Tableau 3.5: Évolution des surfaces agricoles

Année	1950 ^a	1966	1990	2000	2010
Surface en m ²	48 996 204,0	42 661 880,0	26 235 532,0	17 561 022,0	14 777 809,0
%	27,0	23,5	14,4	9,6	8,1

Toutes les données sont évaluées d'après les photos aériennes et corrigées d'après les friches agricoles repérées. ^a évaluées d'après les friches agricoles repérées en 1966 et par régression avec les données des autres années.

3.4 Changements d'occupation des sols

Comme nous l'avons vu précédemment l'occupation des sols a beaucoup évolué. Comment cette évolution s'est produite, c'est-à-dire quels ont été les transferts d'une occupation des sols à une autre, reste encore à montrer. Tel qu'énoncé avant, trois événements majeurs se sont produits:

- la déprise agricole
- le rehaussement du lac
- la villégiature

La déprise agricole a permis le transfert de la végétation basse vers les forêts ouvertes depuis 1950 (Tableau 3.6). Selon les données sur la diminution des terres cultivées, ce transfert s'est fait à la hauteur d'environ 19%. Mais de nouvelles habitations ont été construites dans ces abandons, ce qui a retransféré ces terres vers les zones anthroposées et la végétation basse. Il ne faut pas oublier que les forêts ouvertes se sont refermées. D'où un transfert apparent maximum de 15,54% (perte de végétation basse), ce qui donnerait environ 3% de forêt ouverte convertie en forêt dense et qui correspond au gain global en forêt dense entre 1966 et 1990. Le bilan est négatif, il y a donc eu un transfert d'anciennes surfaces agricoles vers des marécages et peut-être vers les marais. En fait, les terres au mauvais drainage sans un entretien des fossés de drainage se sont certainement transformées en marécages.

Comme nous l'avons vu, le rehaussement du lac a eu des conséquences sur l'occupation des sols et les niveaux d'eau. L'inondation des exutoires des cours d'eau a transformé leurs rives en marais et les terres plus à l'intérieur en marécages (Tableau 3.6). Le dépérissement de ces anciens espaces forestiers a amené beaucoup de matière organique dans les cours d'eau, provoquant un envasement des exutoires et du lac. Ceci a créé les conditions parfaites pour l'implantation de *Phragmites australis*. Cette plante à forte évapotranspiration a agi de façon opposée et a asséché ces marais et marécages nouvellement formés, permettant ainsi à une végétation de milieu sec de se remettre en place. Le bilan de cet évènement pour les marécages est nul et positif pour les marais. Mais pour le *P* et la qualité de l'eau, ce bilan est négatif car il y a eu une perte de vrais marécages (transformés en marais) et la création de zones marécageuses dans des espaces boisés dont les plantes n'étaient pas adaptées à ces conditions, et il s'en est suivi un dépérissement de ces forêts.

Si on tient compte du bilan des soixante (60) dernières années, on a gagné en surfaces filtrantes mais il y a plus de surfaces qui génèrent du *P*. On aurait donc un déficit d'environ 1,5% en surfaces filtrantes. Par contre si on ne regarde que le bilan des vingt (20) dernières années on arrive à un déficit d'environ 5% de surfaces filtrantes soit la perte de 7% en marécages moins le gain de 2% en marais.

Tableau 3.6: Bilan des changements dans l'occupation des sols, en pourcentage de la surface totale du bassin versant, suite à la déprise agricole et au rehaussement du lac

Évènement	Occupation des sols	1950	2012	Différentiel
Déprise agricole	Agriculture	27,0	8,1	-18,9
	Végétation basse	26,15	10,61	-15,54
	Forêt ouverte	23,79	32,20	+8,41
	Forêt dense	22,87	26,02	+3,15
	Zone anthropisée	7,44	7,93	+0,49
Bilan (hors surfaces agricoles)				-3,49
Rehaussement du lac	Marécages	10,3	10,3	0
	Marais	1,12	3,76	+2,64
	Eau profonde	7,13	7,03	-0,10
	Eau de surface	1,20	2,05	+ 0,85
	Bilan			+3,39

Chapitre 4

Bilan pour la qualité de l'eau

Chaque bassin versant est unique et sa réponse à une perturbation l'est tout autant. Sa réponse face au P ou toute autre activité humaine peut donc avoir des conséquences et/ou des amples et différentes (Poff and Ward, 1990).

Tel que montré précédemment, le bilan pour la qualité de l'eau du lac Brome devrait être positif si l'on considère seulement les gains faits à cause de la déprise agricole. En effet une source importante de P (les champs et pâtures) a été convertie en puits de P (forêt ouverte).

Mais, si l'on tient compte du rehaussement du lac et de ses effets, il y a un problème d'une arrivée massive de matière organique dans les exutoires des cours d'eau. Cette arrivée de matière organique aurait favorisé l'implantation d'espèces envahissantes en remontant le fond des cours d'eau.

Il semble aussi que les ouvrages de rétention des eaux du ruisseau Quilliams aient causé les mêmes problèmes à Stukeley-Sud, de part et d'autre de l'autoroute 10.

Enfin, avec toutes les données de 2010-2012, notamment celles concernant la présence de bandes riveraines au niveau des cours d'eau et les données d'agriculture, une évaluation du risque sur la qualité de l'eau a été faite pour chaque sous bassin versant (voir Matériel et Méthodes). La carte C.5 indique chaque sous unité selon ce risque et le tableau 4.2 donne les données utilisées.

Dans le tableau 4.1, on observe que la problématique diffère pour chaque cours d'eau.

On peut voir que de façon générale, la perte de rive et les zones anthropisées sont les deux éléments essentiels. De plus, le fait que la rive, ait perdu presque entièrement ses surfaces boisées pose un sérieux problème car ces arbres et arbustes étaient la dernière barrière protectrice du lac contre

Tableau 4.1: Problématique liée au risque pour la qualité de l'eau pour chaque cours d'eau.

Unité du bassin versant	Problématique
Argyll	Aucune (Perte de rive)
Coldbrook	Zones anthropisées > Perte de rive > Agriculture
Durrell	Aucune (Perte de rive)
Inverness	Zones anthropisées
McLaughlin	Perte de rive (Agriculture)
Pearson	Perte de rive et Zones anthropisées
Quilliams	Perte de rive
Littoral	Zones anthropisées > Perte de rive

les matières en suspension et le *P*. Concernant le Quilliams, un de ses sous-bassins a une problématique liée à l'agriculture.

La restauration des rives devrait donc être la priorité.

Tableau 4.2: Calcul du risque pour la qualité de l'eau de chaque sous unité du bassin versant du lac Brome. ID s-unit et ID unit donnent le numéro de la sous unité et le nom de l'unité; IR e et IR m donnent les surfaces en m^2 des zones avec des infra-rouges élevé et moyen; Agro donne les surfaces agricoles en m^2 en fonction de l'intensité agricole de 1 pour faible à 4 pour élevée; Rive donne le nombre de mètres de cours d'eau avec 0: aucune bande riveraine, 1: une seule bande riveraine et 2: les deux bandes riveraines; Pb donne l'évaluation du risque en pourcentage de la surface de la sous unité; et Classe donne la classe de risque avec 1 pour 0-25%, 2 pour 25-50%, 3 pour 50-100% et 4 pour plus de 100% de la surface de la sous unité.

ID s-unit	ID unit	Surface	IR e	IR m	Agro				Rive 0	Rive 1	Rive 2	Pb en %	Classe
					Int 1	Int 2	Int 3	Int 4					
1	Pearson	965	103	103	1	14	25	11	5049	2378	12046	0.81	3
2	Inverness	414	9	40	1	6	33	<1	295	129	2897	0.56	3
3	McLaughlin	1091	24	33	20	106	133	17	6700	7	11788	0.89	3
4	Argyll	1225	20	42	70	72	35	8	1836	1223	8280	0.45	2
5	Coldbrook	484	56	20	10	2	39	56	1461	2257	5069	1.30	4
6	Durrell	688	20	31	22	47	7	<1	854	700	7633	0.43	2
7	Quilliams	767	4	7	7	54	12	3	736	357	7802	0.28	2
8	Quilliams	736	3	19	7	15	0	<1	1267	780	9228	0.18	1
9	Quilliams	1376	5	66	34	50	4	0	2356	2007	19394	0.27	2
10	Quilliams	641	4	24	48	21	50	3	1253	143	6203	0.54	3
11	Quilliams	203	1	15	16	2	9	0	1700	522	2076	0.57	3
12	Quilliams	215	1	7	4	3	0	0	306	903	5158	0.23	1
13	Quilliams	207	4	23	<1	0	0	0	1690	704	1676	0.44	2
14	Quilliams	476	2	34	2	2	0	0	2653	2390	6830	0.32	2
15	Quilliams	259	1	9	<1	6	0	<1	308	0	2651	0.17	1
16	Quilliams	567	9	20	20	48	11	8	685	1041	5323	0.49	2

... suite page suivante...

... suite de la page précédente...

ID s-unit	ID unit	Surface	IR e	IR m	Agro				Rive 0	Rive 1	Rive 2	Pb en %	Classe
					Int 1	Int 2	Int 3	Int 4					
17	Quilliams	445	3	36	0	<1	3	<1	1382	2327	13430	0.36	2
18	Quilliams	555	9	18	13	53	14	6	2074	1702	3022	0.53	3
19	Quilliams	293	6	14	10	39	0	2	1678	210	4784	0.61	3
20	Quilliams	290	12	21	36	54	9	79	1849	2475	5485	1.16	4
21	Rive	127	0	0	0	4	0	0	0	0	449	0.11	1
22	Rive	738	7	18	50	74	25	4	0	0	156	0.46	2
23	Quilliams	577	56	76	10	3	6	13	5168	2576	7816	0.90	3
24	Rive	21	0	0	0	0	<1	0	1462	137	1516	1.30	4
25	Rive	265	13	29	4	4	15	0	0	0	399	0.58	3
26	Rive	427	23	48	1	24	8	<1	0	0	0	0.56	3
27	Rive	25	4	3	0	1	0	0	2069	332	2610	2.43	4
28	Rive	12	4	4	0	0	0	0	65	0	0	1.70	4
29	Coldbrook	253	3	5	31	4	1	3	926	0	858	0.37	2
30	Coldbrook	227	6	10	14	25	11	6	385	745	3401	0.97	3
31	Coldbrook	1075	2	8	8	31	2	2	456	714	7935	0.21	1
32	Coldbrook	891	30	6	2	0	8	30	401	807	4947	0.34	2
33	Coldbrook	328	0	0	0	0	0	0	0	0	3117	0.11	1
34	Coldbrook	1436	19	16	16	35	27	19	2758	968	10824	0.35	2

Partie III

Recommandations et solutions

Si l'on dresse le portrait global du bassin versant du lac Brome face aux problèmes de qualité d'eau on obtient par ordre d'importance:

- l'accumulation de matière organique aux exutoires des cours d'eau, surtout pour le Quilliam et McLaughlin;
- la quasi inexistence de la bande riveraine sur le pourtour du lac;
- la disparition des rives des cours d'eau, ce qui est d'autant plus important dans les cours d'eau qui ont des problèmes de matière organique;
- l'accumulation de sédiments et de matière organique dans les fossés.

Cette partie dresse les solutions envisageables et donne des coûts à titre indicatif. Il est à noter que tous les ouvrages nécessitent l'obtention de permis du MDDEFP, de faire des calculs d'ingénierie ...

En plus des recommandations qui sont faites ci-après, il ne faut pas négliger l'application rigoureuse des actions de base: laisser le gazon pousser jusqu'à 7-10 cm, arroser plus en quantité mais moins souvent, laisser l'herbe tonduة sur le gazon pour le fertiliser, éviter l'utilisation des engrains, s'assurer du bon fonctionnement de son installation septique restent des préalables essentiels pour limiter les apports supplémentaires de *P*.

Chapitre 5

Accumulation de matière organique et de sédiments

5.1 Matière organique aux exutoires des cours d'eau et du lac

De la matière organique s'est accumulée dans le lac à plusieurs endroits. Il y a de fortes accumulations surtout au niveau de:

- l'exutoire du McLaughlin
- l'exutoire du Quilliams
- du barrage Foster
- l'exutoire de l'Inverness

Cette matière organique en se décomposant va produire beaucoup de *P*. Si l'on tient compte du fait que 1300 ha de marécages ont disparu entre 1990 et 2012, et que ces marécages étaient issus de l'inondation de forêt, et en tenant compte de cette surface et du volume marchand sur pied moyen (environ 1/3 de la biomasse) en Estrie ($465 \text{ m}^3/\text{km}^2$), on arrive à environ 6 000 m^3 de bois qui aurait pu se décomposer. Cela donnerait entre 18 et 72 kg de *P* pur considérant une densité moyenne du bois de 0,6 et un taux de *P* de 0,5 à 2% du poids total des minéraux. Si l'on rapporte cette masse de *P* au volume du lac Brome, cela ferait augmenter son taux de *P* de 0,2-0,8 $\mu\text{g/l}$.

Le moyen le plus efficace de s'occuper de cette matière organique serait d'effectuer un draguage. Les coûts de ce type d'intervention se situent aux environs de 100 à 150 \$ le m³ incluant le transport pour un stockage dans des sites de dépôts. Sachant qu'environ 200 ha auraient été submergés au niveau du Quilliams et du McLaughlin, et en tenant compte du volume marchand sur pied moyen en Estrie (465 m³/km²), on arrive à environ 1 000 m³. le coût d'une telle opération serait donc de l'ordre de 100 000 à 150 000 \$. A titre indicatif, une partie de cette matière organique c'est retrouvée dans le lac au fil des ans et elle a été dispersée par les bateaux à moteur:

- au niveau du McLaughlin, 30 ha du lac ont accumulé de la matière organique dans le fond;
- au niveau du barrage Foster 7,5 ha seraient à draguer
- et 10 ha au niveau de l'Inverness

Pour le Quilliams, la majorité de la matière organique s'est accumulée dans son lit, ce qui diminuerait les coûts.

Au niveau du McLaughlin, il faudrait interdire l'utilisation des bateaux à moteur à partir de la descente à bateau allant au lac pour éviter de remettre en suspension la matière organique qui s'est accumulée. Cette interdiction devrait se faire dans une zone de 250 mètres pour le McLaughlin et 100 mètres pour tout les autres cours d'eau. Cette interdiction pourrait être levée si cette matière organique est enlevée.

5.2 Sédimentation et accumulation de matière organique du littoral

On peut voir que sur tout le pourtour du lac, des sédiments se sont accumulés. Un moyen simple et peu coûteux de réduire ces apports serait de restaurer la rive. Pour ce faire deux solutions principales existent:

- la plantation d'arbustes en rive
- la mise en place de boudins en fibre de noix de coco végétalisés

Pour la plantation d'arbustes, ceux-ci peuvent être paysagers, il faut compter 2-3 \$ par arbuste et viser de 1 à 1,5 plants par m².



Figure 5.1: Boudins de fibre de noix de coco végétalisés. ©Bestmann Green Systems

Dans le cas des boudins, cette technique très répandue en Europe, elle permet d'allier aménagement paysager et rôle écologique (Figure 5.1). Le coût est plus important, et il faut compter 50\$ le mètre lorsqu'il est prévégétalisé et 10\$ le mètre non végétalisé. Lorsqu'ils ne sont pas végétalisés, on peut adapter les végétaux à l'aménagement de la résidence, en allant du simple gazon aux fleurs et arbustes.

5.3 Bloquage de la matière organique

Comme nous l'avons indiqué, de la matière organique provenant des cours d'eau s'est accumulée dans le lac. Des travaux de draguage dans un lac sont difficiles et coûteux. Afin d'éviter que plus de matière organique ne se retrouve dans le lac, des ouvrages de contrôle de cette dernière devraient être envisagés. Le moyen le plus simple et le moins coûteux est la mise en place d'un seuil, par exemple par enrochement dans le fond du lit du cours d'eau. Des ouvrages plus complexes avec, par exemple une grille, pourraient aussi être mis en place.

Pour l'enrochement, il faut compter 16\$ la tonne métrique (MG-112 300mm) plus les coûts des engins de chantier (pelle mécanique ...).

Finalement, des ouvrages de régulation des “coups d’eau” devraient être envisagés pour le Quilliams et le McLaughlin pour éviter la mise en suspension de la matière organique durant ces évènements par une déviation d'une partie du volume d'eau. Un bassin de rétention coûte entre 70 000 à 200 000 \$ selon sa taille. Afin de rentabiliser de tels ouvrages, l'option de les transformer en bassin vert de type marais filtrant (150 000 à 300 000 \$) serait à envisager. Pour cela un système multicellules, bassin de rétention en aval du

maraïs, est la meilleure solution dans le cas du Quilliams et du McLaughlin. En effet ce type de système permet de réguler les entrées d'eau et surtout les "coups d'eau" qui pourraient endommager le marais, avec un système de "by pass" et de remplissage à rebours du marais.

Un tel système pourrait donc traiter le P de l'eau des cours d'eau. Ce type de système a été mis en place au niveau du ruisseau Walbridge tributaire de la rivière aux Brochets (baie Missisquoi du lac Champlain) où ce système enlève 50% du P entrant (Kroeger et al., 2007, 2009). Des projets semblables ont été mis en place surtout aux U.S.A. (Fink and Mitsch, 2004, 2007; Mitsch et al., 2008). Ces systèmes peuvent être peu coûteux (Van Der Heyden and Producteurs maraîchers de Saint Jean de Valleyfield, 2009) et offrent de bons rendements (Fink and Mitsch, 2004; Kroeger et al., 2007) avec des réductions en P de l'ordre de 30 à 40% de la masse de P entre la prise d'eau et l'exutoire.

D'autres moyens de contrôle de la vitesse des eaux arrivant dans ces exutoires, en amont des marais, sont possibles. L'un des plus efficaces et peu coûteux consisterait à faire un empierrement du lit du cours d'eau, avec des calibres de pierre nette croissants, pour diffuser les pointes de débit. Ils serviraient également à retenir les matières en suspension. Le coût de tels travaux est estimable à 50 000-75 000\$ pour 30 mètres. Ce type d'ouvrage peut également servir de frayère à poisson. Il est à noter que des passes à poissons seront nécessaires pour certains de ces ouvrages.

Chapitre 6

Restauration des rives et gestion des fossés de drainage

6.1 Rives

La restauration des rives est “facile”, le plus gros problème est d’obtenir l’accord du propriétaire si aucun des travaux (par exemple lors d’un nouveau lotissement, le MDDEFP demande systématiquement leur rétablissement) ne nécessite de CA22 (certificat d’autorisation pour la destruction de milieux humides délivré en vertu de l’article 22 de la L.Q.E. par le MDDEFP) ou A32 (autorisation pour la mise en place d’égouts pluviaux et sanitaires en vertu de l’article 32 de la L.Q.E. et délivré par le MDDEFP). Les cours d’eau dont la perte de la bande riveraine représente le plus grand risque pour la qualité de l’eau sont à prioriser (Tableau 4.1). Si une priorité devait être donnée, celle-ci devrait être faite selon leur débit maximum lors des crues printanières et lors des orgages estivaux. En effet c’est pendant ces périodes que le volume de MES et de P est maximal dans les cours d’eau.

6.2 Fossés de drainage

De la même manière que les rives des cours d’eau, les fossés de drainage le long des routes et des terrains devraient comporter des bandes riveraines côté habitations. Le long des routes, cela est impossible car l’entretien de ces derniers serait impossible. La solution la plus facile consiste à aménager ces fossés en noues de type tranchées (Figure 6.1). Cette solution, très répandue

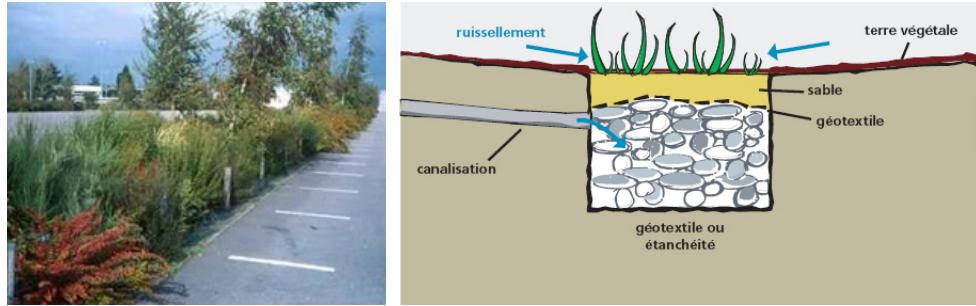


Figure 6.1: Tranchée et intégration paysagère. ©AESN et Région Rhône-Alpes

en Europe, permet de réduire considérablement les coûts d'entretien jusqu'à zéro (0) dans les lotissements car les citoyens les aménagent (fleurs, arbustes) et les entretiennent (coupe du gazon, feuilles). Si on considère que l'entretien de fossés classiques coûte: environ 250\$ par ha par passage pour couper le gazon, environ 315\$ par m³ pour l'enlèvement et l'entreposage des sédiments (Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs, 2011); le coût pour la conversion des fossés en tranchées est d'environ 20 à 30\$ le mètre linéaire soit environ 1 000\$ par façade. La rentabilité devrait être atteinte assez rapidement soit environ 8-10 ans et avec une durée de vie de 25 ans pour ce type d'ouvrage; l'économie est évidente. Tout cela est sans compter que ce type d'ouvrage peut effectuer un bon traitement du *P* et des autres contaminants des eaux. La mise en place de telles tranchées est d'autant plus importante que dans certains secteurs, autour du lac (ex. photographie 6.2 dans le Domaine Brome), les fossés sont remplis de matière organique et de sédiments en quasi-totalité. Cette technique empêche ces problèmes car la matière organique et les sédiments restent en surface. On notera également que des ouvrages neufs sont déjà obstrués comme au pied de la montagne (Photo 6.2). Dans ces cas-ci, des efforts de contrôle de la matière organique devrait être fais, comme la plantation de haies en bordure des habitations.

Il est à noter aussi qu'il faudrait privilégier la technique du tiers inférieur pour l'entretien des fossés, c'est-à-dire que seulement le fond du fossé est curé, les talus sont laissés en gazon (Ministère des Transports du Québec, 1997, Fiche de promotion environnementale FPE-01, 4 p.)

Avant que l'eau des fossés arrivent dans les cours d'eau et au lac, il



Figure 6.2: Problématique des fossés autour du lac Brome. La photographie de gauche montre un ouvrage dans le domaine Brome bloqué à moitié par les sédiments, celle de droite un ouvrage neuf déjà comblé par de la matière organique dans le secteur au pied de la montagne.

faudrait mettre en place des fosses à sédiments et à matière organique. Plusieurs formes et techniques existent, cela va du puits aux trappes à grille (Photographie 6.4). La mise en place d'une grille est un plus pour retenir les feuilles mortes. Si des noues de type tranchées sont mises en place, alors les ouvrages traditionnels comme on les retrouve actuellement ne sont plus nécessaires. Un autre moyen consisterait à mettre en place une berme filtrante avant le ponceau, précédée par une fosse à sédiments (*c.f.* 6.3).

Finalement il faudrait gérer le *Phragmites australis* et *Phalaris arundinacea*, deux espèces nuisibles. Il faut les éradiquer des fossés de drainage car ils génèrent beaucoup de matière organique (décomposition à l'automne et au printemps). Un moyen simple et efficace est d'informer les citoyens et d'émettre un avis de destruction de ces espèces dans la réglementation municipale. La présence des ces plantes fait augmenter les coûts d'entretien des fossés (avec trois ou quatre fauchages nécessaires par an, c'est environ 1 000\$/ha par an). Là encore, des noues de type tranchée règlent le problème.

Contrôle de l'érosion et de la sédimentation sur les chantiers

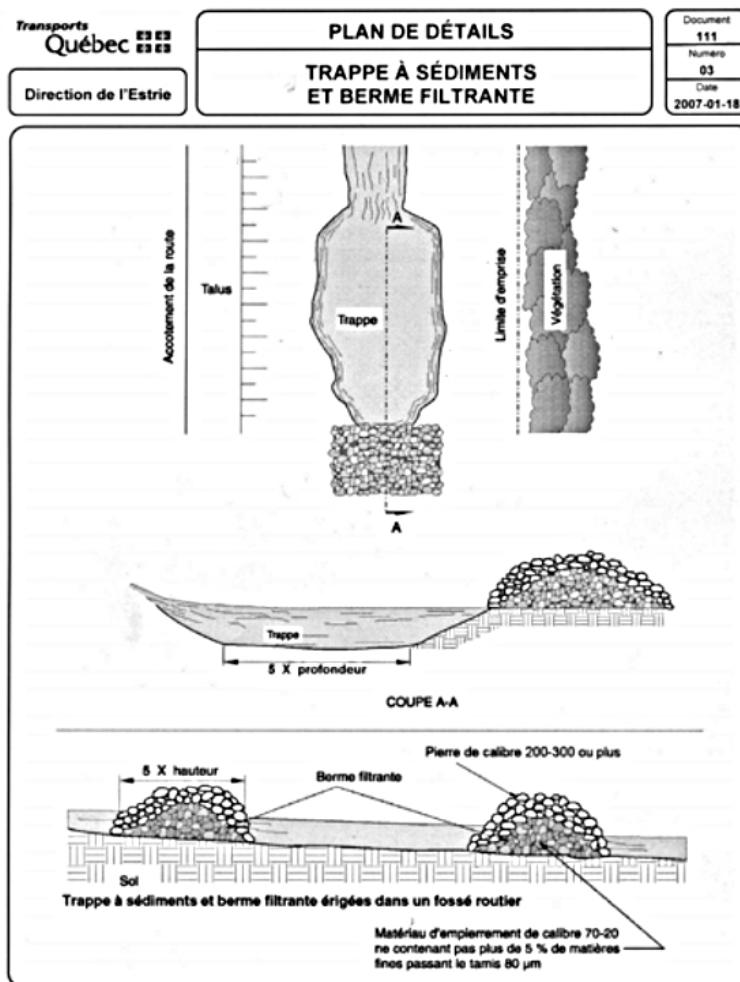


Figure 6.3: Dispositif de berme filtrante et de trappe à sédiments, ©MTQ Estrie.



Figure 6.4: Exemples de fosses à sédiments. En haut des solutions en béton et grille d'acier ©Stomwater, en bas des solutions plus économiques ©USDA Forest Service.

Chapitre 7

Gestion des lacs artificiels

Un aspect qui semble spécifique au lac Brome est le nombre élevé de lacs privés. Il faudrait mettre en place des règles pour ces lacs dans le règlement de zonage. Cette réglementation viserait à éviter que les coups d'eau n'emportent la matière organique accumulée dans le fond, les cyanobactéries qui s'y seraient développées et le P accumulé. Ainsi il faudrait:

- exiger une profondeur minimum de 3-4 mètres pour permettre une thermocline;
- obliger la végétalisation complète des berges, par des arbustes, de type bande riveraine;
- obliger un filtre (ex. berme) pour réduire les matières en suspension et la matière organique aux exutoires;
- obliger un filtre (ex. berme) pour dissiper les débits de pointes à l'entrée de ces lacs;
- pour des lacs peu profonds, demander la transformation en marais filtrants. Dans ce cas, allier paysagement et rôle écologique est facile à réaliser;
- obliger la récolte des parties aériennes mortes des végétaux de ces marais filtrants pour limiter le relargrage pendant la saison dormante (Osborne and Kovacic, 2006). Bon nombre de personnes le font pour les feuilles mortes, il serait donc facile de le faire pour ces plans d'eau.

Chapitre 8

Recommandations par zones

8.1 Pour tous les zones

La mise en place de haies arbustives, qui peuvent être paysagées, devrait être envisagée sur tout le pourtour des terrains des nouvelles habitations, sauf en façade si des noues ou des tranchées sont mises en place. Cela aurait pour effet de limiter les matières en suspension (MES) dans les réseaux pluviaux, et donc de baisser les coûts d'entretien, et de baisser le P sortant des terrains.

8.2 Pour les zones urbaines

Pour les industries et les commerces, il faudrait mettre en place des stationnements drainants et/ou des bassins de rétention et de pré-traitement souterrain. Cela améliorerait grandement le traitement des MES. Dans les zones industrielles pouvant rejeter du P (ex. jardinerie), des haies arbustives devraient être présentes ou des fossés drainants engazonés afin de limiter l'apport en élément nutritif vers les réseaux pluviaux.

8.3 Pour les zones agricoles et rurales

Les haies sur la totalité du pourtour des habitations devraient être obligatoires. De façon idéale, il faudrait que cette haie possède trois rangées d'arbustes variés. Les monocultures sont relativement inefficaces contrairement aux mélanges pour l'enlèvement du P . Cela est très important dans le

cas où les habitations sont sur d'anciennes terres agricoles.

8.4 Pour les zones forestières

Il faudrait interdire les champs d'épuration hors sol ou mettre des conditions (noues, tranchées comblées) dans les zones forestières. D'une manière générale, on utilise ce type de traitement lorsque la roche est affleurente ou dans les zones difficiles à drainer (marécageuses). Or, les rejets vont transformer les marécages en marais, ce qui, dans la majorité des cas, est non souhaitable car l'endroit n'est souvent pas propice à un marécage ou à un marais fonctionnel. Lorsque l'on dit non fonctionnel, c'est que les volumes d'eau y arrivant peuvent être très importants et avec des vitesses trop rapides ce qui va transporter la matière organique vers l'aval. Dans tous les cas, il faudrait limiter le déboisement des terrains et obliger la plantation d'arbustes en façade et sur le pourtour. Des arbustes à forte évapotranspiration seraient souhaitables car ils draineraient naturellement le terrain au printemps (ex. les aulnes).

Chapitre 9

Recommandations spécifiques pour certains secteurs

9.1 À la Pointe Fisher

Il faudrait mettre en place des noues de type tranchées et des haies arbustives autour des terrains. En effet dans ce secteur, les fossés sont peu ou pas entretenus et contiennent beaucoup de matière organique.

9.2 Exutoire de l'Argyll

Il y a des problèmes d'érosion des berges au niveau de l'exutoire en allant du pont vers le lac. Il faut donc restaurer de la rive.

9.3 Rue Conférence

L'enrochement à la sortie du ponceau est mal fait. Cet enrochement a aggravé le problème qu'il était sensé régler: l'érosion des berges (Figure 9.1). Un enrochement pour éviter l'érosion doit faire baisser la vitesse de l'écoulement; pour cela il faut mettre en place du matériel de taille croissante (Figure 9.1). Il serait urgent de rétablir la rive des deux côtés du cours d'eau.

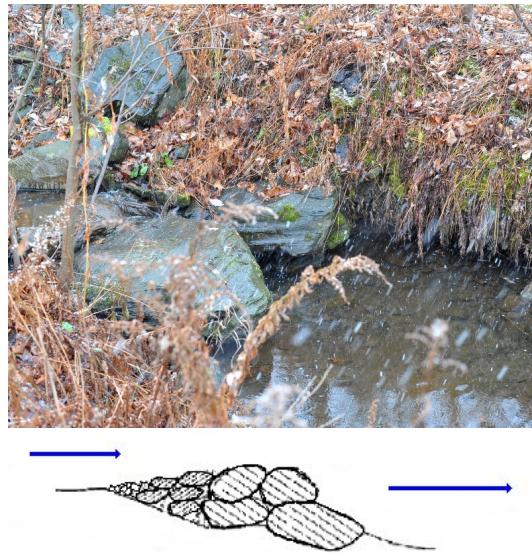


Figure 9.1: Problématique de l'enrochement au niveau de la rue Conférence. L'enrochement devrait être fait comme sur le schéma plus bas: avec du matériel de taille croissante.

9.4 Plage municipale

Plusieurs problèmes sont présents à cet endroit. Tout d'abord, il faut contrôler les sédiments du stationnement en mettant une haie arbustive dense avant le parc. Au niveau de l'amont du chemin qui mène à la plage, l'ajout d'une tranchée avec une grille pour arrêter les sédiments serait un plus. Dans le chemin, les “barrières à sédiments” jouent le rôle inverse. En effet leur inclinaison dirige toute l'eau en un point. L'eau gagne donc en volume et en vitesse ce qui érode encore plus. Il faut les mettre à l'horizontal et installer des lits de graviers en amont de ces derniers pour drainer l'eau, et on pourrait ajouter des drains en-dessous pour acheminer l'eau vers le sable de la plage où elle va s'infiltrer. Il faut aussi gérer la matière organique sortant du boisé (feuilles mortes) qui va directement dans le lac. Il faut prolonger la haie d'arbustes existante (Figure 9.2). Enfin il faut planter des arbres et arbustes pour éviter l'érosion de la rive qui est très importante et mettre des boudins en place ou enrocher pour éviter que le lac ne creuse encore plus sous les racines des arbres existants. Finalement, si les autorités envisagent un



Figure 9.2: Plage municipale. De gauche à droite: matière organique arrivant dans le lac depuis le parc, haie d'arbustes existante retenant la matière organique, l'érosion avancée de la rive.



Figure 9.3: Stationnements rue Benoit

réaménagement des lieux, il serait opportun de remplacer le stationnement actuel par un stationnement vert avec cellules permettant l'infiltration et la revégétalisation.

9.5 Rue Benoit

Ici rien à signaler, à part la finition des stationnements en gravier (bordure entre l'asphalte et le gravier. Noter comme la matière organique est retenue par le gravier par rapport à l'asphalte sur la photographie de la figure 9.3.

9.6 Parc Eugène

Les fossés sont pleins de matière organique, il faudrait les vider. De plus, à l'exutoire des fossés vers le lac, beaucoup de matière organique s'accumule. Une fosse à sédiments ou une grille semble nécessaire à cet endroit, soit à l'exutoire du ruisseau Blackwood. De plus il y a beaucoup de *Phragmites australis* dans les fossés qui doivent être gérés (avis de destruction donné aux citoyens).

9.7 Rue Gaudord, rue des Alizés et rue de la Montagne

Ici nous avons un exemple d'ouvrages récents qui ont déjà des problèmes de sédimentation et d'accumulation de matière organique. Les accottements s'effondrent dans les fossés (Figure 9.4). Il faut gérer la matière organique si on veut éviter les débordements des fossés et de plus, cette matière organique en se décomposant va libérer beaucoup de phosphore. Des noues auraient été plus intéressantes; maintenant, pour pallier à ces problèmes il faudrait: faire installer des haies aux citoyens autour de leurs habitations et des fosses à sédimentation aux points de raccordement entre les fossés. Les accottements seraient à finir avec de l'engazonnement pour les consolider. A certains endroits, il y a déjà des signes de déformation de la chaussée à cause de l'érosion. Certains fossés ont été refaits tout récemment. Il aurait mieux fallu restaurer ces fossés en utilisant la technique des fossés comblés comme cela a été décrit précédemment.

9.8 Robinson Bay, Domaine Brome et Rock Island

Dans ces secteurs le problème principal est la gestion des fossés. Beaucoup sont comblés par des sédiments et de la matière organique. La mise en place de noues de type tranchées serait la solution pour éviter leur obstruction. Il y a aussi la problématique de l'érosion importante de la route dont le matériel se retrouve dans les fossés. Il faudrait peut-être remplacer le revêtement par de la pierre nette de calibre 20mm. La mise en place de noues et le changement de revêtement pourraient être fais en même temps. Dans le



Figure 9.4: Fossés et rue des Alizés nouvellement construite

Domaine Brome, l'implantation d'une fosse à sédiment dans le fossé au pied de la rue, avant de rejeter les eaux dans le lac serait une option intéressante.

Chapitre 10

Bilan des solutions

Voici un tableau (10.1) de bilan par priorités pour la gestion du Phosphore avec les coûts et le type d'ouvrage recommandé et leur localisation.

Tableau 10.1: Actions à prioriser et coûts associés

Les coûts sont donnés à titre indicatif. Ils n'incluent pas les frais annexes, tel que les demandes d'autorisation auprès des ministères compétents, la conception et les calculs d'ingénierie. MO indique matière organique, MES matières en suspension.

Localisation	Action	Ouvrage	Coût
Rive Ouest et Sud ¹	Contrôle des MES et <i>P</i>	Boudins végétalisés	50\$/m
Rive Ouest et Sud ¹	Contrôle des MES et <i>P</i>	Noues de type tranchées	30\$/m
Rive Est ²	Contrôle des MES et <i>P</i>	Boudins végétalisés	50\$/m
Inverness	Contrôle des MES et <i>P</i>	Noues de type tranchée	30\$/m
Quilliams exutoire	Draguage	Aucun	50 000 \$
McLaughlin exutoire	Draguage	Aucun	100 000 \$
McLaughlin exutoire	Contrôle des apports en MO au lac	Seuil empierré	50 000 \$
Quilliams exutoire	Contrôle des apports en MO au lac	Seuil empierré	50 000 \$
Quilliams amont du marais de l'exutoire	Contrôle des coups d'eau, MES et MO	Lit empierré	75 000 \$
Quilliams amont du marais de l'exutoire	Contrôle des coups d'eau, MES, MO et du <i>P</i>	Marais multicellules	500 000 \$
Quilliams amont du marais de l'exutoire	Contrôle des coups d'eau, MES et MO	Bassin de rétention	200 000 \$
McLaughlin amont du marais de l'exutoire	Contrôle des coups d'eau, MES et du <i>P</i>	Marais multicellules	500 000 \$
McLaughlin amont du marais de l'exutoire	Contrôle des coups d'eau et MES e	Bassin de rétention	200 000 \$
Quilliams sous-bassin 20	Contrôle des MES et <i>P</i>	Bandes riveraines de 10 mètres	50\$/m
Quilliams sous-bassin 10, 11, 19 et 18	Contrôle des MES et <i>P</i>	Bandes riveraines de 10 mètres	50\$/m
Pearson et McLaughlin	Contrôle des MES et <i>P</i>	Bandes riveraines de 10 mètres	50\$/m

¹ des Alizés, Au Pied de la Montagne, Domaine Brome, Parc Eugène, Robinson Bay, Rock Island. ² Chemin Lakeside du nord jusqu'à la Pointe Fisher.

Finalement, si certaines de ces recommandations étaient inscrites dans le règlement d'urbanisme, la municipalité pourrait diminuer ses coûts d'entretien annuel, notamment des fossés. Il est à noter que c'est souvent payant pour des promoteurs dans le cadre de développements classiques, car ces techniques permettent de ne pas faire de bassin de rétention. Les promoteurs vont donc économiser le coût du bassin et récupérer l'espace pour faire des lots supplémentaires. Aux États-Unis on estime que dans un développement d'une vingtaine d'habitations, aménagé exclusivement avec des noues et avec des sationnements drainants, le gain pour le promoteur est de l'ordre de 50 000 à 100 000\$ selon le prix du terrain au m².

C'est donc payant pour le promoteur et pour la municipalité.

Il est à noter aussi que les règlements du MDDEFP concernant les rejets visent les MES et le *P*, mais bientôt l'azote sera visé par cette réglementation. La simple mise en place de noues permettrait d'atteindre tous les objectifs sans faire de travaux dans les usines de traitement des eaux usées. De plus, comme l'eau arrivant à l'usine de traitement comporte moins de polluants, les coûts d'opération baissent.

De plus, pour la gestion des problèmes d'approvisionnement en eau de la municipalité de lac Brome, la mise en place de ces recommandations aura un effet positif. En effet les noues, les bandes riveraines ... vont retenir l'eau et la quantité d'eau qui va cheminer vers les aquifères par percolation va augmenter. L'approvisionnement en eau sera donc amélioré.

Ces recommandations ne sont donc pas uniquement faites pour limiter le Phosphore dans l'eau, mais pour gérer l'eau de façon durable.

Bibliography

- Abu-Zreig, M., Rudra, R., Whiteley, H., Lalonde, M., Kaushik, N., 2003. Phosphorus removal in vegetated filter strips. *Journal of Environmental Quality* 32 (2), 613–619.
- Bellemare, J., Motzkin, G., Foster, D., 2003. Legacies of the agricultural past in the forested present: an assessment of historical land-use effects on rich mesic forests. *Journal of Biogeography* 29 (10-11), 1401–1420.
- Cowen, W., Lee, G., 1976. Phosphorus availability in particulate materials transported by urban runoff. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 580–591.
- Craft, C., Broome, S., Seneca, E., 1988. Nitrogen, phosphorus and organic carbon pools in natural and transplanted marsh soils. *Estuaries and Coasts* 11 (4), 272–280.
- Dambrine, E., Dupouey, J., Laüt, L., Humbert, L., Thinon, M., Beaufils, T., Richard, H., 2007. Present forest biodiversity patterns in france related to former roman agriculture. *Ecology* 88 (6), 1430–1439.
- Debusk, W., Reddy, K., 2005. Litter decomposition and nutrient dynamics in a phosphorus enriched everglades marsh. *Biogeochemistry* 75 (2), 217–240.
- Delgado, A., Periago, E., Viqueira, F., 1995. Vegetated filter strips for wastewater purification: a review. *Bioresource technology* 51 (1), 13–22.
- Eidt, R., 1977. Detection and examination of anthrosols by phosphate analysis. *Science (New York, NY)* 197 (4311), 1327.
- Elias, E., Dougherty, M., Srivastava, P., Laband, D., 2011. The impact of forest to urban land conversion on streamflow, total nitrogen, total phos-

- phorus, and total organic carbon inputs to the converse reservoir, southern alabama, usa. *Urban Ecosystems*, 1–29.
- Entwistle, J., Abrahams, P., Dodgshon, R., 2000. The geoarchaeological significance and spatial variability of a range of physical and chemical soil properties from a former habitation site, isle of skye. *Journal of Archaeological Science* 27 (4), 287–303.
- Fink, D., Mitsch, W., 2004. Seasonal and storm event nutrient removal by a created wetland in an agricultural watershed. *Ecological Engineering* 23 (4), 313–325.
- Fink, D., Mitsch, W., 2007. Hydrology and nutrient biogeochemistry in a created river diversion oxbow wetland. *ecological engineering* 30 (2), 93–102.
- Johnson, C., Vieira, I., Zarin, D., Frizano, J., Johnson, A., 2001. Carbon and nutrient storage in primary and secondary forests in eastern amazonia. *Forest Ecology and Management* 147 (2), 245–252.
- Kroeger, A., Madramootoo, C., Enright, P., Laflamme, C., 2007. Efficiency of a small constructed wetland in southern québec for treatment of agricultural runoff waters. In: IWA specialist conference: Wastewater biosolids sustainability-Technical, managerial, and public synergy. pp. 1057–1062.
- Kroeger, A., Madramootoo, C., Enright, P., Laflamme, C., Francoeur-Leblond, N., D'Auteuil, C., 2009. Les marais filtrants: une solution pour restaurer les cours d'eau agricoles. *Agrosolutions* 20 (1), 4–14.
- Magette, W., Brinsfield, R., Palmer, R., Wood, J., 1989. Nutrient and sediment removal by vegetated filter strips. *Trans. ASAE* 32 (2), 663–667.
- Manzanilla, L., 1996. Soil analyses to identify ancient human activities. *Canadian journal of soil science* 76 (2), 107–108.
- Mather, A., Needle, C., Fairbairn, J., 1999. The human drivers of global land cover change: the case of forests. *Hydrological processes* 12 (13-14), 1983–1994.
- Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (Ed.), 2011. Guide de gestion des eaux pluviales. Gouvernement du Québec.

- Mitsch, W., Zhang, L., Fink, D., Hernandez, M., Altor, A., Tuttle, C., Nahlik, A., 2008. Ecological engineering of floodplains. *Ecohydrology & Hydrobiology* 8 (2), 139–147.
- Neill, C., Deegan, L., Thomas, S., Cerri, C., 2001. Deforestation for pasture alters nitrogen and phosphorus in small amazonian streams. *Ecological Applications* 11 (6), 1817–1828.
- Osborne, L., Kovacic, D., 2006. Riparian vegetated buffer strips in water-quality restoration and stream management. *Freshwater biology* 29 (2), 243–258.
- Poff, N., Ward, J., 1990. Physical habitat template of lotic systems: recovery in the context of historical pattern of spatiotemporal heterogeneity. *Environmental Management* 14 (5), 629–645.
- Quinton, J., Catt, J., Hess, T., 2001. The selective removal of phosphorus from soil. *Journal of Environmental Quality* 30 (2), 538–545.
- Rapp Jr, G., 1987. Geoarchaeology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 15, 97.
- Sharpley, A., Smith, S., Boardman, J., Foster, I., Dearing, J., et al., 1990. Phosphorus transport in agricultural runoff: the role of soil erosion. In: Soil erosion on agricultural land. Proceedings of a workshop sponsored by the British Geomorphological Research Group, Coventry, UK, January 1989. John Wiley & Sons Ltd., pp. 351–366.
- Smith, E., McCormick, P., 2001. Long-term relationship between phosphorus inputs and wetland phosphorus concentrations in a northern everglades marsh. *Environmental monitoring and assessment* 68 (2), 153–176.
- Tiessen, H., Stewart, J., Cole, C., 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Science Society of America Journal* 48 (4), 853–858.
- Van Der Heyden, H., Producteurs maraîchers de Saint Jean de Valleyfield, 2009. Étude de faisabilité visant l'aménagement intégré de bassins de stockage, de bassins de sédimentation, de marais filtrants, de zones de débordement et de digues afin de constituer des réserves d'eau destinées à l'irrigation et de réduire les impacts agricole et environnemental des

débordements des ruisseaux norton, cranberry, gibeault delisle et de la rivière l'acadie. Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec.

Vought, L., Dahl, J., Pedersen, C., Lacoursiere, J., 1994. Nutrient retention in riparian ecotones. *Ambio*, 342–348.

Walker, T., Syers, J., 1976. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma* 15 (1), 1–19.

Waller, D., 1977. Effects of urbanization on phosphorus flows in a residential system. *Effects of Urbanization and Industrialization on the Hydrological Regime and on Water Quality*, 52–58.

Yoo, J., Ro, H., Choi, W., Yoo, S., Han, K., 2006. Phosphorus adsorption and removal by sediments of a constructed marsh in korea. *Ecological Engineering* 27 (2), 109–117.

Annexe A

Matériel et Méthodes

A.1 Délimitation et découpage du bassin versant en sous-unités

La délimitation du bassin versant a été faite en se basant sur :

- un modèle numérique de terrain (MNT ou DEM en anglais) d'une précision d'1 mètre (Ressources Naturelles Canada, 2012),
- des photos aériennes au 1:20.000 (Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs),
- les cartes topographiques Toporama rendues disponibles par Ressources Naturelles Canada;

De plus, des vérifications d'écoulement ont été faites au niveau de l'autoroute 10. Le découpage en sous-unités se base sur les branches secondaires des cours d'eau et sur les versants des massifs montagneux. On notera également que les axes routiers constituent souvent des délimitations pour les sous-unités à cause des fossés de drainage.

A.2 Analyse des images satellites Landsat 4/5 et Landsat 7

Les satellites Landsat 4/5 et Landsat 7 nous ont permis d'obtenir des images pour 1990 et 2000 respectivement. Ces images sont orthorectifiées par la

NASA et ont une résolution de 28 mètres et de 14 mètres respectivement. Elles sont originellement en fausse couleur, c'est-à-dire que la couleur des objets n'est pas fidèle à la couleur que nous percevons. Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé un rendu de fausse couleur 7-4-2, c'est-à-dire que l'on attribue à la bande 7 du senseur du satellite (infra rouge) la couleur rouge, à la bande 4 (proche infra-rouge) la couleur verte et à la bande 2 (vert visible) la couleur bleue. L'image finale nous permet d'obtenir :

- les constructions en rose et mauve,
- les sols en culture en vert pomme,
- la végétation allant de vert vif (forêts) à vert foncé (marais et marécages),
- l'eau en bleu foncé (eau profonde ou peu turbide) à bleu clair (faible profondeur ou très turbide);

Les images originales ont donc été traitées pour obtenir une image composite avec le logiciel de SIG (Grass). Puis un traitement des couleurs et une classification en 9 couleurs, selon le type d'objet (forêts, marais, eau vive...), ont été produits à partir de ces images. Afin d'obtenir une meilleure représentation des classifications, la résolution nominale des images a été augmentée selon leur précision, soit 400% pour 1990 et 200% pour 2000. Les images résultantes ont donc la même résolution finale. Une vérification de la classification, en se basant sur les photos aériennes, a été faite car la distinction entre certaines classes peut être difficile. Par exemple, les zones en asphalte apparaissent en mauve, couleur se situant entre le rose et le bleu. Une seconde vérification est faite avec les cartes des sols pour vérifier si le type de formation végétale peut s'installer sur le type de sol présent. La concordance entre les résultats obtenus entre les deux années est également vérifiée. Les images Landsat permettent, par rapport aux photos aériennes, de pénétrer dans le couvert forestier et ainsi détecter des marais et marécages en sous-couvert. De plus nous avons une indication sur la densité de la végétation. C'est une méthode très fiable utilisée pour produire les cartes de rendements agricoles, les cartes d'occupation des sols etc.

A.3 Étude des photos aériennes

Des photos aériennes au 1 :40000, 1 :20000, 1 :10000 et 1 :500 ont été utilisées pour compléter les données des images satellites et produire les données de

2012 et 1966. Une attention particulière a été apportée aux marais, habitations, aux lacs et aux espaces agricoles. Il est à noter que l'évaluation pour 1966 est plus approximative compte tenu du fait que les photographies aériennes sont en noir et blanc.

A.4 Numérisation et traitement des données

Toutes les données pouvant être numérisées l'ont été. On notera que la reproduction, la numérisation des photos aériennes du Ministère des Ressources Naturelles (MRN) est interdite. Les logiciels GRASS (U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories, USA-CERL, 1982-1995) et ArcGis 10.0 (ESRI, 2010) ont été utilisés pour produire les cartes, calculer les surfaces et effectuer les analyses spatiales. Toutes les données sont compatibles avec le logiciel Quantum Gis. L'analyse des résultats dans le but de produire la carte de l'état de santé des sous-unités du bassin versant a été faite avec le logiciel d'analyses statistiques R (CRAN, 2012). Les régressions nécessaires pour la production de certaines données sont également faites sous R.

Il est à noter que, dans le texte, 2010 réfère aux données récoltées par analyse des photos aériennes, et 2012 réfère aux données en partie extrapolées.

A.5 Évaluation du risque sur la qualité de l'eau

Une évaluation du risque sur la qualité de l'eau est effectuée pour chaque sous-unité du bassin versant. Cette évaluation se base sur l'occupation des sols, plus particulièrement la surface en agriculture, l'intensité de l'agriculture et la surface en habitation, ainsi que sur l'état des bandes riveraines. On cherche à obtenir le pourcentage de surfaces problématiques. Ainsi, pour les bandes riveraines on estime la distance moyenne d'où un ruissellement peut provenir. En analysant les MNT (le dénivélé) et l'uniformité des surfaces Landsat, pour le bassin versant du lac Brome, nous avons obtenu des distances de ruissellement de en amont des cours d'eau de 80 mètres de part et d'autres des cours d'eau sans bandes riveraines, 60 mètres pour les cours d'eau avec une seule bande riveraine du côté de la partie dénudée et 10 mètres pour les cours d'eau avec deux bandes riveraines. On peut donc obtenir la surface problématique en multipliant la longueur des cours d'eau par ces dis-

tances selon l'état des bandes riveraines. Les surfaces agricoles sont classées selon leur productivité, c'est à dire les résultats des images Lansdat pour ces surfaces. L'intensité est un facteur multiplicatif des surfaces. Pour une faible intensité le facteur est de 1, pour une intensité moyenne il est de 2, 3 pour les intensités fortes et 4 pour les intensités très fortes.

Toutes ces surfaces: les bandes riveraines, les zones agricoles et les zones urbaines, sont ensuite additionnées et en rapportant ces valeurs aux surfaces des sous-unités, on obtient un pourcentage de surfaces problématiques qui peut dépasser 100% (recouplement de plusieurs surfaces problématiques). Enfin cinq classes de risque ont été déterminées: classe 1 pour de 0% à 25% de surfaces problématiques; classe 2 pour de 25% à 50%; classe 3 pour de 50% à 100%; classe 4 pour 100% et plus.

Annexe B

Exemple d'une décision de la CPTAQ

QUEBEC

DOSSIER NUMERO [REDACTED]

Québec, le 31 mai 1979

COMMISSION DE PROTECTION DU TERRITOIRE AGRICOLE DU QUEBEC

[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
Demanderesse

-et-

[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

Mise-en-cause.

ETAIENT PRESENTS: ALBERT ALLAIN, vice-président
LAUREAN TARDIF, commissaire
ARMAND GUERARD, commissaire

DECISION

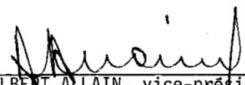
Par sa demande, la demanderesse requiert l'autorisation de lotir,
aliéner et utiliser à une fin autre qu'agricole, une partie
des lots [REDACTED] du cadastre officiel de la paroisse de [REDACTED], division d'enregistrement [REDACTED].

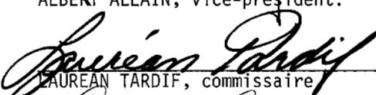
- Considérant que les parties de lots ci-dessus décrites ont déjà fait l'objet d'un plan de subdivision projeté comprenant quarante (40) lots sur lesquels TRENTE (30) ont déjà fait l'objet d'une vente;
- Considérant que cet emplacement cerné sur trois côtés par des voies routières et sur le dernier, par la forêt, la friche et les grandes cultures;

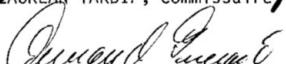
...2/

...2

- Considérant qu'il s'agit d'un milieu agricole présentant plusieurs signes de déstructuration: friches récentes (K) et avancées (U) ainsi que de vastes étendues forestières;
- Considérant que les trois quarts (3/4) des terrains faisant l'objet du projet de lotissement ont déjà été vendus et qu'il serait illusoire de vouloir garder les espaces restants dans la zone agricole;
- PAR CES MOTIFS, LA COMMISSION:
FAIT DROIT à la demande et autorise le lotissement, l'aliénation et l'utilisation à une fin autre qu'agricole de parties des lots [REDACTED] du cadastre officiel de la paroisse de [REDACTED], division d'enregistrement de Bagot, lesquelles sont plus amplement montrées sur un plan de lotissement projeté préparé par monsieur [REDACTED], arpenteur-géomètre, en date du 25 avril 1978 et produit au dossier au soutien de la présente demande.
- La présente autorisation est cependant conditionnelle à ce que la demanderesse fournisse à la Commission dans les SIX (6) mois de la date de la présente décision, une copie d'un plan de subdivision préparé et déposé conformément aux dispositions de l'article 2175 du Code civil.


ALBERT ALLAIN, vice-président.


LAUREAN TARDIF, commissaire


ARMAND GUERARD, commissaire.

Annexe C

Cartes du bassin versant

Figure C.1: Carte des sous bassin versants

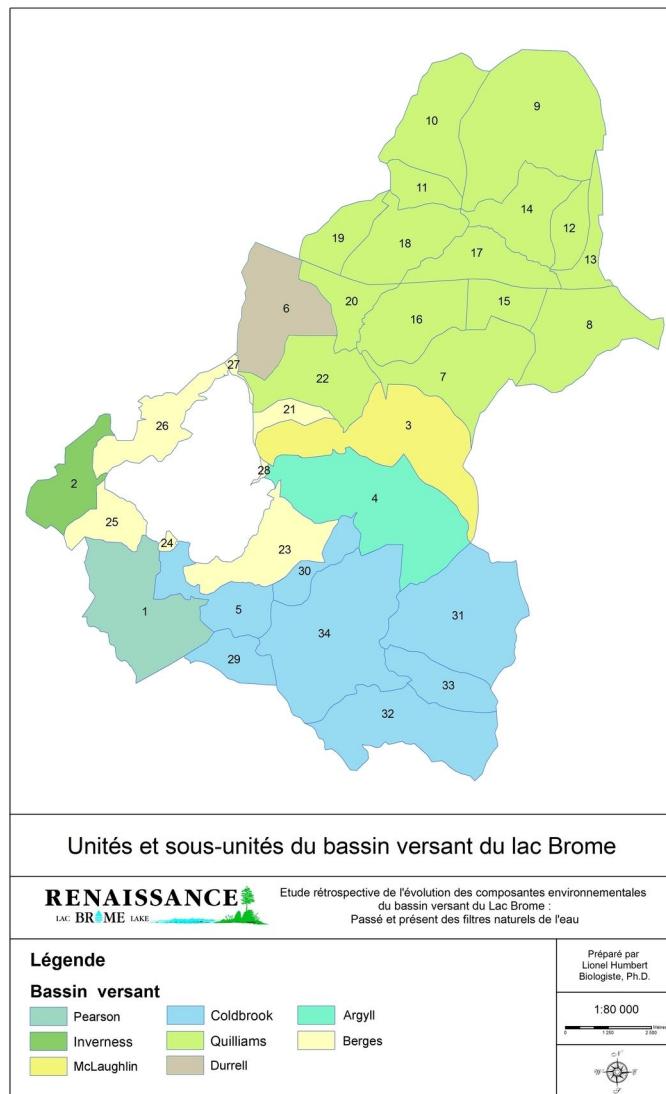


Figure C.2: Carte des composantes environnementales du bassin versant du Lac Brome en 1990

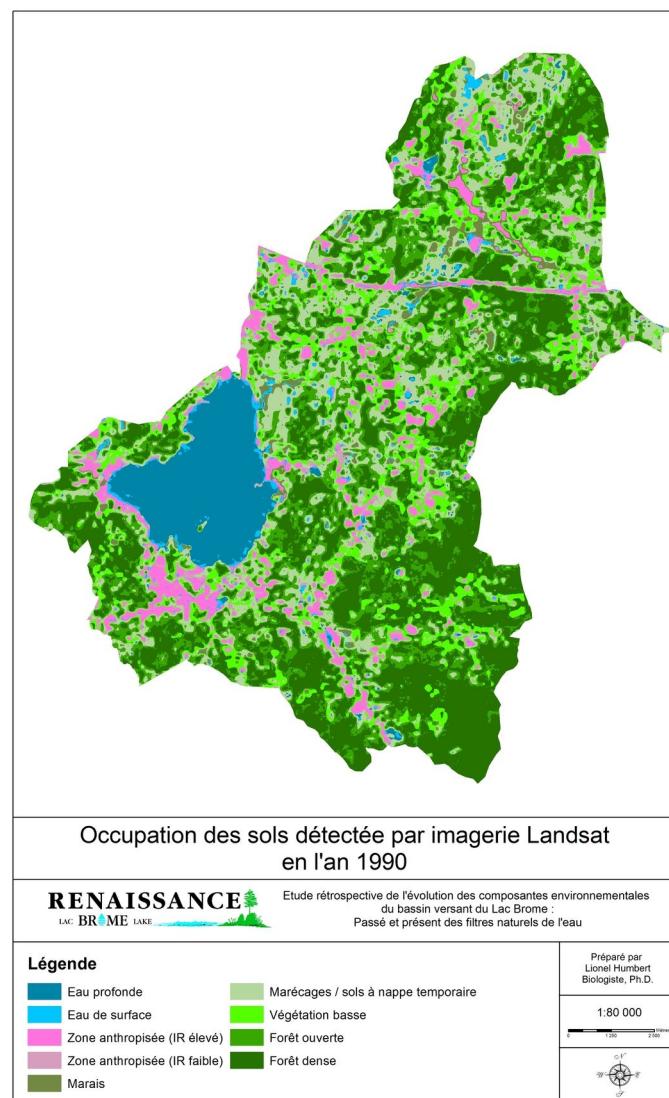


Figure C.3: Carte des composantes environnementales du bassin versant du Lac Brome en 2000

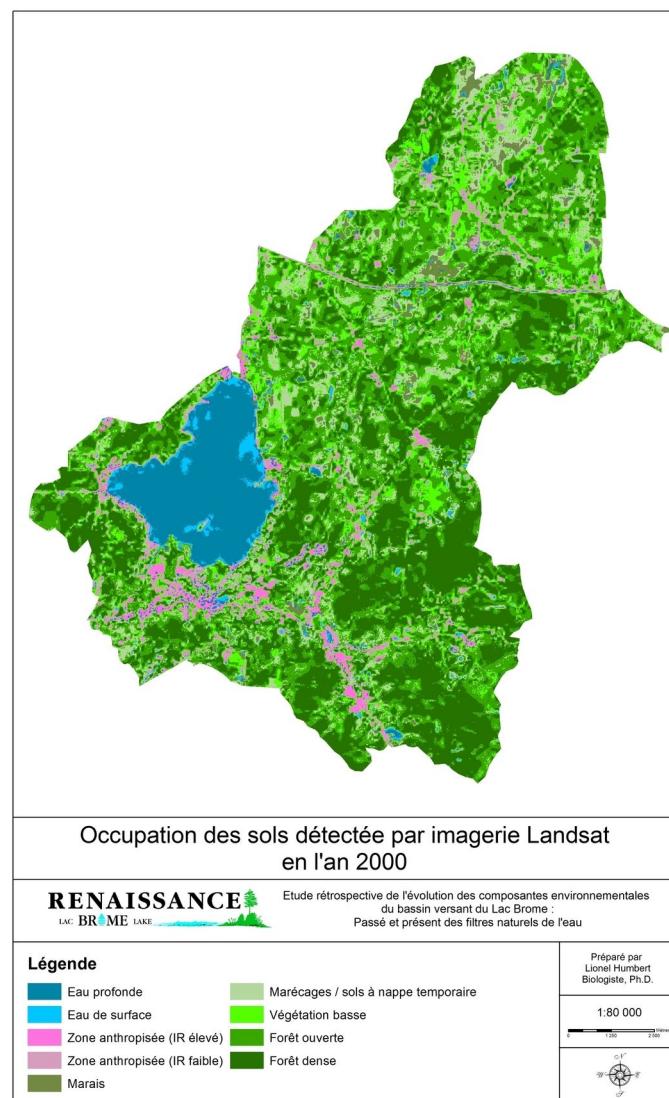


Figure C.4: Carte des composantes environnementales du bassin versant du Lac Brome en 2012

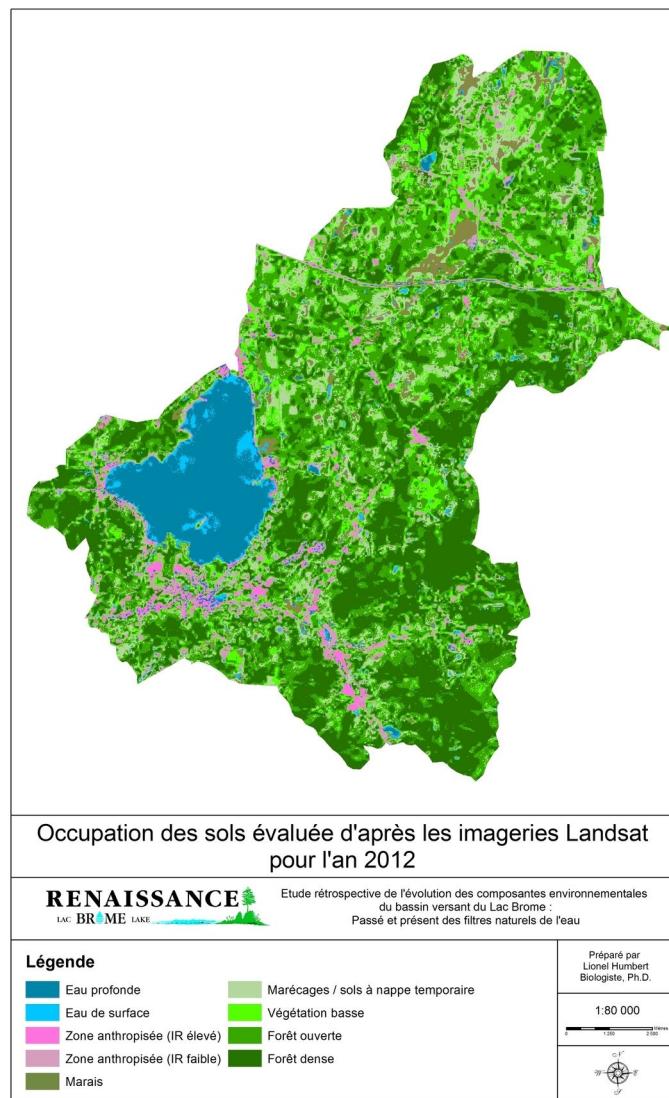


Figure C.5: Carte de l'évaluation du risque pour la qualité de l'eau

