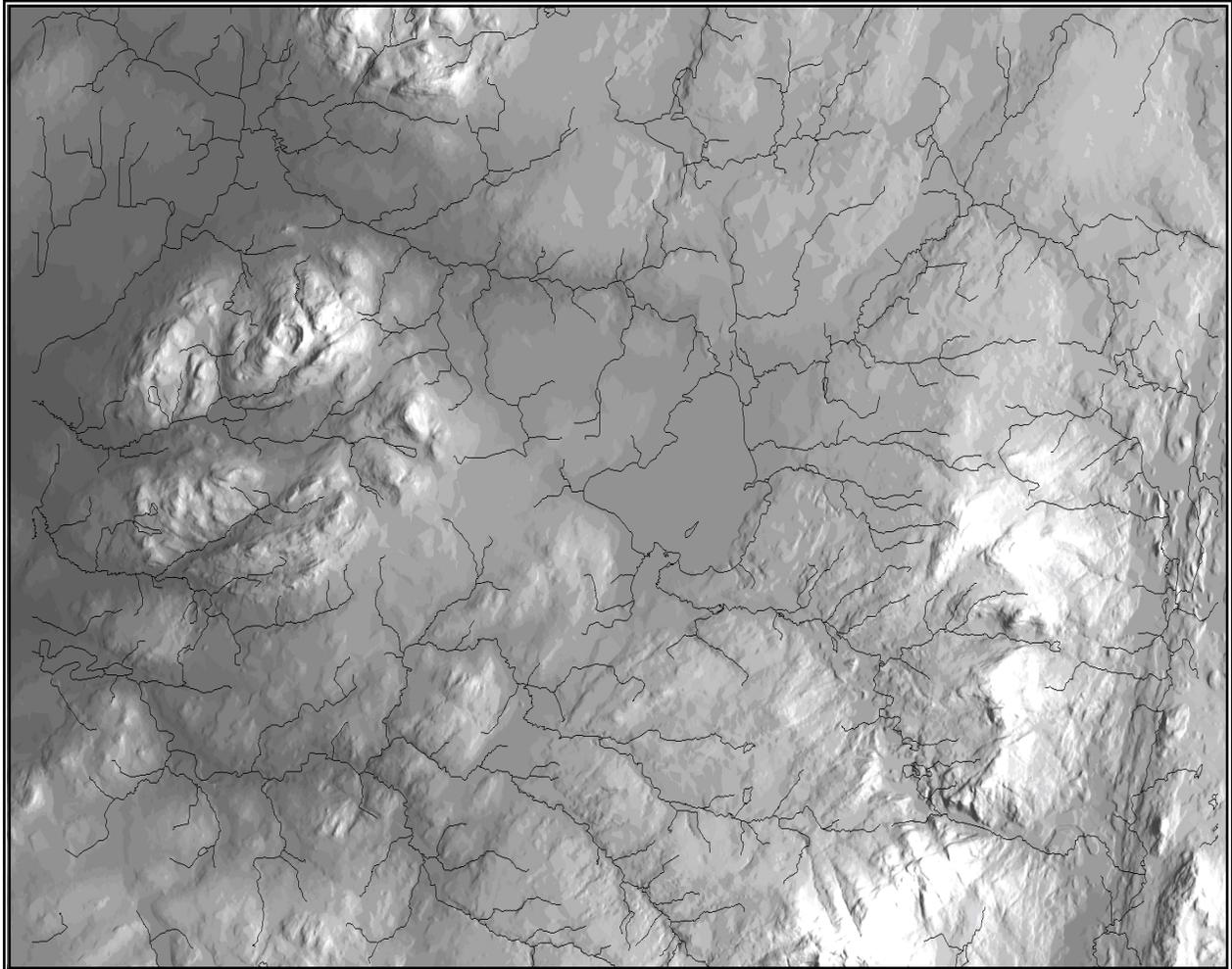


**Modélisation des débits au lac Brome phase 1: Méthode des bassins voisins**  
Rapport technique



**François Besré, géogr. M.Sc. env**  
**août 2010**

Image de la couverture :

Modèle numérique d'altitude extrait de la carte et réseau hydrographique extrait de la carte 31H 100 000 se (BDTQ, 2002).

Pour citation :

Besré, F. 2010 *Modélisation des débits au lac Brome phase 1: Méthode des bassins voisins*. Rapport technique réalisé pour Renaissance Lac Brome et OBV Yamaska, 37 p.

## Table des matières

Table des matières.....	iii
Liste des tableaux.....	iv
Liste des figures.....	iv
Liste des annexes.....	iv
Glossaire.....	iv
Liste des abréviations, des symboles et des acronymes.....	vi
<b>1 Introduction</b>	
1.1 Contexte.....	7
1.2 Mandat.....	7
1.3 Objectifs.....	7
<b>2 Méthodologie</b>	
2.1 Modélisation des débits.....	7
2.2 Morphométrie.....	8
2.3 Calcul des débits.....	8
2.4 Volume du lac Brome et bathymétrie.....	8
2.5 Temps de séjour et taux de renouvellement.....	9
2.6 Débits de crues.....	9
2.7 Charge massique.....	9
<b>3 Résultats</b>	
3.1 Similitudes morphométriques et physiographiques.....	9
3.1.1 La taille.....	9
3.1.2 La forme.....	11
3.1.3 L'altitude.....	11
3.1.4 La pente.....	13
3.1.5 La densité de drainage et hydrographique.....	13
3.2 Synthèse morphométrique.....	14
3.3 Écoulement et débits du bassin du lac Brome.....	14
3.4 Profondeur, bathymétrie et volume du lac.....	17
3.5 Renouvellement des eaux du lac Brome.....	18
3.6 Fréquence des débits de crues.....	19
3.7 Charge massique en phosphore	
3.7.1 Charge annuelle en 2009.....	19
3.7.2 Comparaison charge massique annuelle.....	20
3.7.3 Charge massique journalière.....	21
<b>4 Synthèse des résultats</b> .....	22
<b>5 Conclusion et recommandations</b> .....	23
<b>6 Bibliographie</b> .....	24
<b>Annexes</b> .....	26

## Liste des tableaux

Tableau 1. Superficie et forme des bassins.....	11
Tableau 2. Pourcentage de l'aire des bassins en fonction de l'altitude.....	12
Tableau 3. Altitudes moyennes et médianes des bassins Brome et Davignon.....	13
Tableau 4. Pente moyenne des cours d'eau des sous-bassins.....	13
Tableau 5. Densité de drainage et densité hydrographique des bassins et des sous-bassins.....	14
Tableau 6. Transposition des débits du bassin Davignon au bassin Brome.....	15
Tableau 7. Comparaison des débits transposés.....	16
Tableau 8. Débits journaliers au ruisseau Quilliams.....	17
Tableau 9. Morphométrie du lac Brome.....	18
Tableau 10. Temps de séjour et niveau du lac Brome.....	19
Tableau 11. Estimation de la charge massique en phosphore total du bassin versant du lac Brome en 2009 (mars à octobre).....	20
Tableau 12. Débits et charge massique annuelle.....	21

## Liste des figures

Figure 1. Carte des bassins Davignon et Brome.....	10
Figure 2. Courbes hypsométriques des bassins Brome et Davignon.....	12
Figure 3. Débits annuels, printaniers et estivaux 1968-2010.....	15
Figure 4. Courbe bathymétrique du lac Brome.....	18
Figure 5. Relation débit et teneur en phosphore.....	22

## Liste des annexes

Annexe 1. Morphométrie.....	26
1.1. Indice de compacité de Gravelius	
1.2. Courbe hypsométrique et altitudes	
1.3. Pente moyenne	
1.4. Densité de drainage et densité hydrographique	
1.5. Transfert de données	
1.6. Bilan hydrologique	
Annexe 2.....	28
2.1. Débits journaliers 1968-2010 à Cowansville, station 030314	
2.2. Débits transposés au bassin Brome	
2.3 Régime d'écoulement annuel au bassin Brome	
Annexe 3.....	32
3.1. Caractéristiques de la station 030314 et analyse statistique	
3.2. Volume du lac et bathymétrie	
3.3. Fréquence des débits de crues	
3.4. Charge massique journalière en 2009	
3.5. Débits au bassin Brome en 2009	

## Glossaire

### **Amont -aval**

L'amont et l'aval d'un cours d'eau sont utilisés pour qualifier une position en remontant le courant (amont) ou en descendant le courant (aval).

### **Affluent**

Cours d'eau qui se jette dans un autre ou dans un plan d'eau.

### **Bassin Brome**

Bassin versant du lac Brome

**Bassin Davignon**

Bassin versant du lac – réservoir Davignon

**Bassin versant**

Une région, un territoire qui possède un exutoire commun pour ses écoulements de surface. La surface du bassin versant est délimitée par une ligne reliant tous les points hauts formant ainsi une ligne de partage des eaux.

**Bathymétrie**

Mesure des profondeurs des plans d'eau.

**Charge massique en phosphore**

Quantité de phosphore total en kilogramme résultant du produit des débits et des concentrations en phosphore total

**Courbe hypsométrique**

Répartition de l'altitude dans un bassin versant.

**Crue**

Niveau élevé d'un cours d'eau dû à la fonte des neiges ou à des précipitations abondantes.

**Débit**

Mesure du volume d'eau par unité de temps.

**Densité de drainage**

Voir annexe 1.4

**Densité hydrographique**

Voir annexe 1.4

**Effet de refoulement**

Modification (rétention) du volume d'eau écoulé (débit) d'un cours d'eau par la présence, en hiver, d'un couvert de glace total ou partiel et, en été, par la prolifération d'algues.

**Étiage**

Niveau minimal atteint par un cours d'eau ou un lac en période sèche.

**Exutoire**

L'emplacement le moins élevé d'un bassin versant où converge l'ensemble de ses écoulements.

**Indice de compacité**

Voir annexe 1.1

**Intervalle de récurrence**

Délai de temps entre les occurrences d'un événement.

**Isobathe**

Courbe reliant les points d'égale profondeur sous l'eau.

**Lame d'eau annuelle moyenne**

La lame d'eau est indépendante de la superficie du bassin et se définit comme étant la hauteur de précipitations qui s'écoule en moyenne par unité de temps (mois ou année) ou « hauteur d'écoulement ». Tout comme la hauteur des précipitations, elle s'exprime en millimètres par unité de temps (mois ou année). On parle dès lors de lame d'eau mensuelle ou annuelle.

**Module annuel**

Débit moyen passant à l'exutoire en une année.

**Morphométrie**

Caractéristiques physiques d'un bassin versant et de son réseau hydrographique.

**Moyenne journalière**

Moyenne des données lues sur une période de 24 h et correspondant à une journée.

**Période de retour**

La moyenne de temps des intervalles de récurrence évaluée à partir d'un grand nombre d'événements.

**Physiographie**

Caractéristiques physiques d'une région, d'un territoire, d'un bassin versant.

**Productivité primaire**

Production de matière organique végétale issue de la photosynthèse.

**Relation de puissance**

En science, une loi de puissance est une relation entre deux quantités  $x$  et  $y$  qui peut s'écrire de la façon suivante :  $y=ax^k$ , où  $a$  est une constante dite constante de proportionnalité et  $k$  est une autre constante, dite exposant, puissance, indice ou encore degré de la loi.

**Station hydrométrique ou station de jaugeage**

Station de mesure des débits.

**Sous-bassin**

Une partie d'un bassin versant drainée par un de ses cours d'eau.

**Taux de renouvellement**

Le volume du lac qui s'écoule à l'exutoire par année.

**Temps de séjour**

Période de temps pour renouveler complètement le volume du lac.

**Tributaire**

Cours d'eau qui se jette dans un autre ou dans un plan d'eau.

**Sources : voir bibliographie****Liste des abréviations, des symboles et des acronymes**

$K_G$	Indice de compacité de Gravelius
m	Mètre
$m^3$	Mètre cube
$Mm^3$	Million de mètres cubes
$m^3 s^{-1}$	Mètre cube par seconde
$\mu g l^{-1}$	Microgramme par litre
$km^2$	Kilomètre carré
%	Pourcentage
m/km	Mètre par kilomètre
nb/ $km^2$	Nombre par kilomètre carré
km/ $km^2$	Kilomètre par kilomètre carré
mm	Millimètre
pi	Pied
po	Pouce
kg	Kilogramme
$Kg jr^{-1}$	Kilogramme par jour
$kg an^{-1}$	Kilogramme par année
Pt	Phosphore total
Pt $kg jr^{-1}$	Phosphore total par jour en kilogramme
CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
BDTQ	Base de données topographiques du Québec
HYDAT	Données hydrométriques archivées par Environnement Canada
MDDEP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
MRNF	Ministère des Richesses Naturelles et de la Faune
SECL	Shawinigan Engineering Compagny Limited
OEDD	Observatoire de l'Environnement et du Développement Durable

## 1 Introduction

### 1.1 Contexte

Des problèmes d'apports d'éléments nutritifs affectant la *productivité primaire* occasionnent, depuis plusieurs décennies, des épisodes de prolifération de fleurs d'eau de cyanobactéries au lac Brome. Ce constat motive les résidents, les riverains et interpelle les contribuables des municipalités du *bassin versant* à agir pour ralentir et ultimement freiner le vieillissement du plan d'eau. Une prise de conscience semble s'installer dans l'esprit des utilisateurs. Les efforts de Renaissance Lac Brome, de la ville de Lac-Brome, des autres municipalités environnantes, des gouvernements et des citoyens démontrent une volonté indéniable de préservation et de conservation de la qualité de l'eau.

### 1.2 Mandat

Dans le but de documenter les effets des diverses mesures d'aménagement, de correction, de mitigation et de protection du lac, pour circonscrire et diminuer les apports d'éléments nutritifs au lac mais surtout pour préciser davantage les sites, les cibles, les pratiques, les activités et les actions qui devront être élaborés dans l'avenir à ce sujet, il est impératif de connaître la quantité d'eau qui arrive au lac.

Les éléments nutritifs (phosphore) sont transportés par les différents cours d'eau qui alimentent le lac. Ainsi, pour estimer la quantité d'éléments nutritifs qui parvient au plan d'eau, il est essentiel d'évaluer la contribution hydrologique des *tributaires*. Des données de concentration en phosphore du lac et des tributaires existent, mais on ne connaît pas très bien la quantité d'eau qui parvient au plan d'eau. Mentionnons que les différents tributaires ne sont pas jaugés, c'est-à-dire que l'on ne connaît pas exactement la quantité d'eau qui s'écoule de chacun des *affluents* vers le lac.

En l'absence d'observations ou de stations hydrométriques qui enregistrent le *débit*, il est possible d'utiliser différentes approches pour évaluer la quantité d'eau qui s'écoule d'un cours d'eau. Le rapport suivant présente une première approche d'évaluation de l'écoulement des ruisseaux et des surfaces qui contribuent à l'apport d'eau au réservoir naturel que constitue le lac Brome.

### 1.3 Objectifs

La connaissance de la quantité d'eau s'écoulant dans les tributaires du lac permettra de documenter la charge massique en éléments nutritifs de chacune des aires contributives au plan d'eau (*sous-bassins*) et ce, à différents pas de temps. De plus, il sera possible de préciser le *taux de renouvellement* du lac en fonction des divers régimes d'écoulement obtenus et d'élaborer sur la fréquence des événements d'écoulements importants qui génèrent de l'érosion et un apport supplémentaire d'éléments nutritifs. Enfin, nous établirons la charge massique pour la saison 2009.

## 2 Méthodologie

### 2.1 Modélisation des débits

L'installation de *stations de jaugeage* ou d'observations des débits sur chacun des tributaires serait lourde en temps, en appareils, en analyses et serait problématique pour certains tributaires à faible débit. Cette approche pourrait cependant être évaluée dans une phase ultérieure. Il existe d'autres méthodes d'évaluation des débits et des écoulements par diverses formulations et par des modèles hydrologiques alimentés par les précipitations. Cette dernière approche est en évaluation et pourrait faire l'objet d'une phase ultérieure à ce projet.

L'approche, présentée ici, s'appuie sur la comparaison de deux bassins versants. Elle est pratique car elle permet l'utilisation des paramètres existants et se fonde sur la méthode de transferts de données entre bassins voisins (Anctil et al., 2005). Une longue série d'observations des débits existe (1968-2010) sur le bassin du lac Davignon qui jouxte celui du lac Brome au sud. Anctil ajoute que lorsque deux bassins partagent de nombreuses similitudes physiographiques ou morphométriques, on peut présumer qu'une *relation de puissance* existe. Il est ainsi possible de transposer des quantités d'eau écoulée (débits) par

unité de surface du bassin jaugé (Davignon) au bassin non jaugé (Brome) à condition de limiter les transpositions à l'intérieur d'un rapport d'aire variant entre 0,5 et 2,0.

En fait, le bassin Brome est jaugé à 500 m en aval du barrage Foster depuis 2005 (030351). Le régime d'écoulement est influencé par le contrôle du niveau du lac au barrage. Le lac ainsi que les milieux humides riverains produisent un effet de rétention sur les *crues* enregistrées à cette station. Le couvert de glace hivernal occasionne aussi un *effet de refoulement* qui modifie les débits. De plus, le bilan annuel précipitation – évaporation du lac n'est pas documenté. Nous émettons l'hypothèse que le lac reçoit davantage d'eau des précipitations que la perte qu'il subit par évaporation, annuellement, ce qui aurait pour effet de surestimer la transposition des débits aux sous-bassins versant du lac Brome. Enfin, la série d'observations est courte. Pour ces raisons, nous préférons utiliser les observations de la station Davignon à Cowansville (030314) parce que son régime est moins influencé et que la série d'observations est longue.

## 2.2 Morphométrie

Pour documenter les similitudes entre les deux bassins, plusieurs paramètres concernant la taille, la forme, l'altitude, la pente, l'orientation et la *densité de drainage* ont fait l'objet de mesures à l'aide du logiciel de cartographie numérique (Map Maker 3) sur des cartes au 1:20 000 de la BDTQ (MRNF, 2002).

Plusieurs caractéristiques morphométriques ont été analysées pour les cinq sous-bassins du lac Davignon et pour les neuf sous-bassins du lac Brome. La délimitation des entités territoriales drainées provient des rapports du Groupe Hémisphère (2007) pour le bassin de Davignon et de celui de Teknika HBA inc. (2007) pour le bassin de Brome. La localisation des limites des bassins a été vérifiée et validée. L'aire et le périmètre des bassins et des sous-bassins ont été mesurés numériquement. La forme a été appréciée à l'aide de l'indice  $K_G$  de compacité de Gravelius (Musy et Higy, 2004) (annexe 1.1). Les altitudes moyennes et médianes sont déduites des *courbes hypsométriques* construites pour les bassins Davignon et Brome uniquement. Elles représentent la superficie mesurée par tranche de 100 m en pourcentage de l'aire du bassin (annexe 1.2). La pente moyenne le long du cours d'eau principal a été mesurée pour chacun des sous-bassins sauf pour la portion Berges du lac Brome (annexe 1.3). Les densités de drainage et *hydrographiques* sont établies selon le réseau représenté sur les cartes topographiques au 1:20 000 (MRNF, 2000). Les densités ont été mesurées pour les deux bassins et tous les sous-bassins (annexe 1.4).

## 2.3 Calculs des débits

Les observations transposées proviennent de la station 030314 (MDDEP, 2010), Yamaska Sud-Est au pont-route 202, à Cowansville. À partir des moyennes quotidiennes sont calculés les débits annuels, printaniers (mars-avril-mai), estivaux (juin-juillet-août) et mensuels du bassin et des sous-bassins du lac Brome (annexes 2.1 et 2.2). La transposition utilise la superficie des sous-bassins du lac Brome issue de la carte du Bassin versant du lac Brome (Carteq, 2009). La série d'observations 1968-2010 contient plusieurs absences de données qui produisent des années incomplètes, notamment en 1968, 1971 à 1978, en 1980 et en 2010. Ces années n'ont pas été considérées dans le calcul pour certaines périodes, le plus souvent l'été (1968, 1973, 1978-79) et le printemps (1971-77 et 2010). Les débits d'hiver manquants (1971-77), estimés ou corrigés pour tenir compte de l'effet de refoulement (1968-70, 1981-00, 2003-04) et provisoires (2006-09) rendent hasardeux le calcul des débits d'*étiage* lors de cette période. Les tests statistiques de la série sont donnés à l'annexe 3.1.

## 2.4 Volume du lac Brome et bathymétrie

L'aire, la profondeur moyenne et médiane ainsi que le volume du lac Brome ont été mesurés numériquement (annexe 3.2) à l'aide de la carte bathymétrique (Carteq, 2007). Cette carte est une mise à jour numérique des courbes bathymétriques utilisées par Parent (1972) et Bélanger (1981). Le relevé bathymétrique d'origine provient de la Direction Générale des Eaux du ministère des Richesses Naturelles du Québec, vraisemblablement avant 1972.

## 2.5 Temps de séjour et taux de renouvellement

Le taux de renouvellement a été calculé pour un niveau élevé et bas du lac considérant une amplitude de variation maximale de 1 m d'après les niveaux d'eau aux stations 030312 (secteur du barrage Foster) de 1935 à 1956, 030310 (secteur Inverness) de 1947 à 1965, 030307 (secteur de l'exutoire du ruisseau Argyll) de 1966 à 1995 et de la station 030350 (secteur plage Douglass) de 2005 à aujourd'hui (MDDEP, 2010).

## 2.6 Débits de crues

La fréquence des débits de crues est calculée selon les débits transposés du bassin Davignon au bassin Brome d'après la série d'observations de 1968 à 2009 à la station 030314 à Cowansville (MDDEP, 2010). Nous avons extrait de la série complète des données les débits de plus de  $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  à Davignon qui une fois transposés au bassin Brome correspondent à plus de  $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Sans être exceptionnelle, cette limite de  $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  constitue à notre avis un débit élevé qui produit une forte érosion. Rappelons que la série d'observations est incomplète, en outre en hiver et souvent au printemps (section 2.2) produisant une sous-estimation de la fréquence des événements de fortes crues lors de ces périodes. Une comparaison avec les observations de précipitation serait souhaitable pour isoler la crue de fonte, des précipitations.

## 2.7 Charge massique

La charge massique annuelle en phosphore total est obtenue du produit des débits, transposés du bassin Davignon au bassin Brome puis sur les sous-bassins, par la concentration moyenne ( $\mu\text{g l}^{-1}$ ) en phosphore total des stations les plus en aval des tributaires au cours de la saison de suivi 2009 (Renaissance, 2010). La concentration moyenne est obtenue des six dates de prélèvements entre mars et octobre. La charge massique du lac est évaluée pour les six dates d'après la moyenne de la station de la fosse et celle au barrage Foster à l'exutoire.

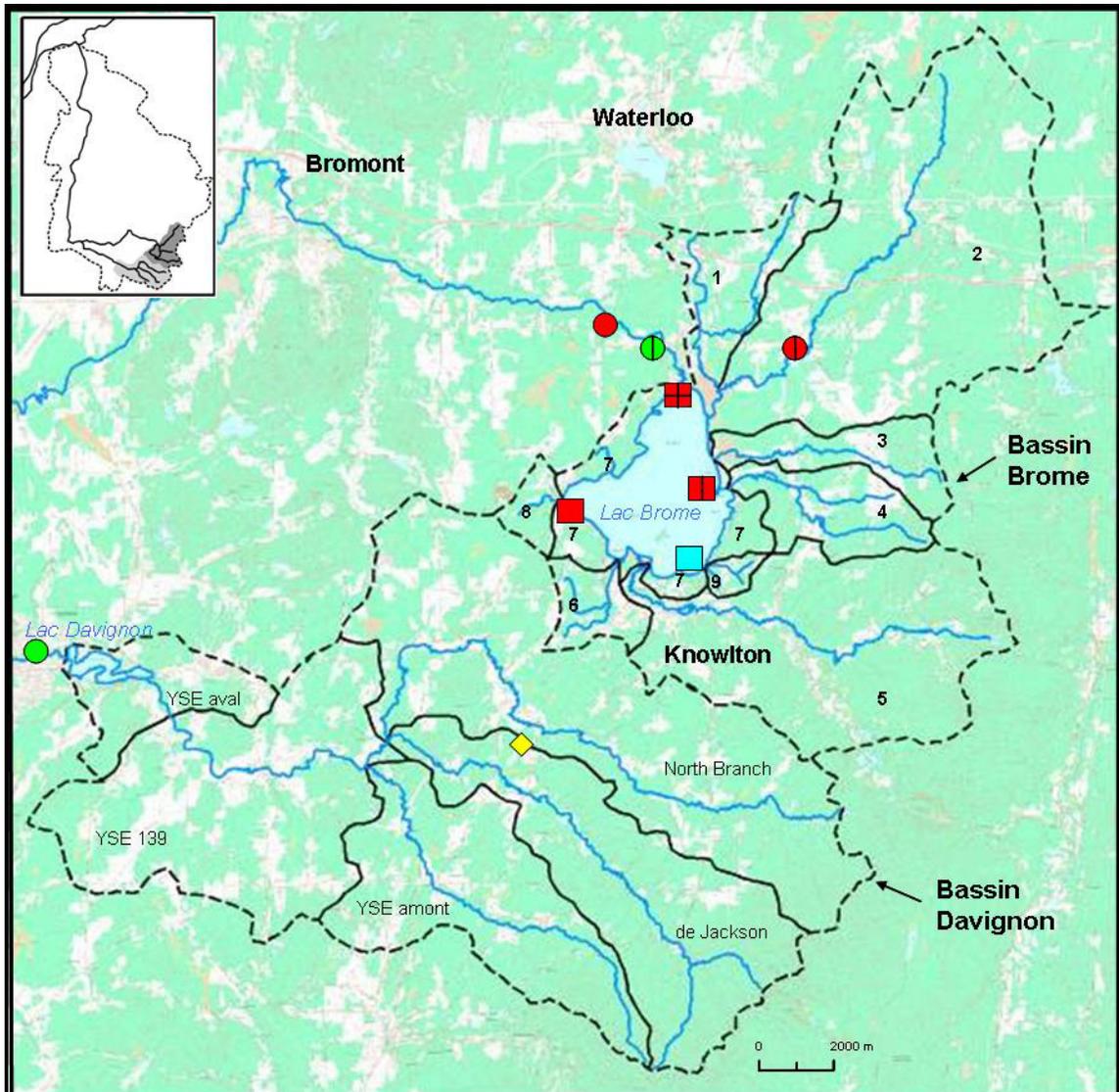
Nous avons aussi calculé la charge massique à chaque date de prélèvement en 2009 en fonction des débits journaliers transposés aux mêmes stations pour comparer les débits, la charge et la période.

# 3 Résultats

## 3.1 Similitudes morphométriques et physiographiques

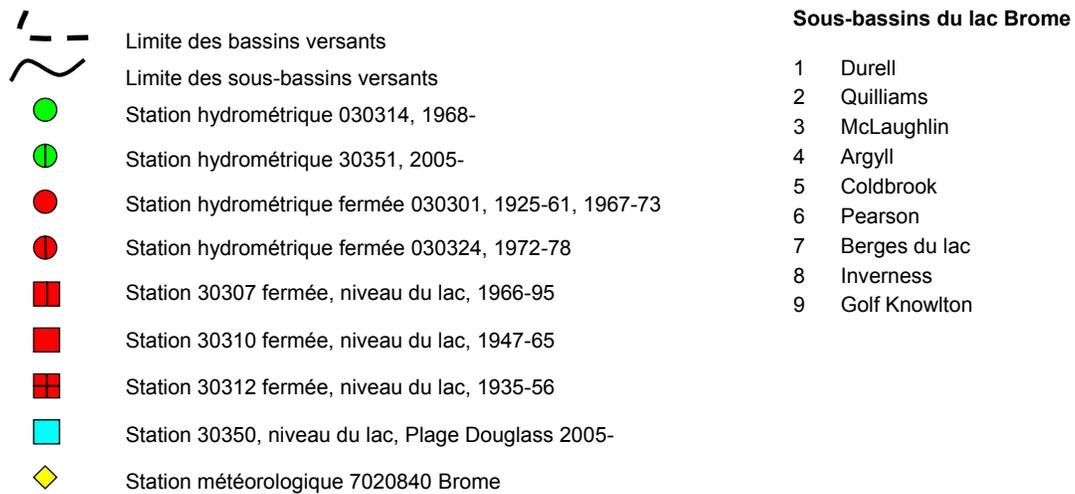
### 3.1.1 La taille

Il s'agit de deux bassins de tête et de taille comparable alimentant la rivière Yamaska Sud-Est; le bassin Brome s'écoule vers la branche centre et son voisin immédiat du sud, le bassin Davignon, se draine vers la branche sud-est (figure 1). La méthode de transferts de données entre bassins voisins est applicable entre le bassin du lac Brome ( $172,1 \text{ km}^2$ ) et son voisin le réservoir Davignon ( $211,4 \text{ km}^2$ ) puisqu'il présente un rapport d'aire acceptable de 0,814 qui se situe entre 0,5 et 2,0 (Anctil et al., 2005). Notons que l'aire du lac Brome ( $14,6 \text{ km}^2$ ) n'est pas considérée dans cette comparaison puisqu'il ne contribue pas aux écoulements dans les tributaires qui l'alimentent (tableau 1).



Renaissance Lac Brome François Besré 2010

Source : BDTQ 2002



**Figure 1 : Localisation des bassins versants, des sous-bassins et des stations hydrométriques**

**Tableau 1 : Superficie et forme des bassins**

Bassins et sous-bassins	Aire <sup>1,2</sup> km <sup>2</sup>	Aire <sup>3</sup> km <sup>2</sup>	Aire <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	Aire %	Périmètre km	Forme $K_G$ <sup>5</sup>
<b>Lac Davignon</b>	12,6	-	1,3	0,5	8,6	2,3
YSE-aval		-	12,9	5,4	19,2	1,6
YSE-139	50,2	-	49,2	16,7	35,7	1,4
YSE-amont	35,4	-	34,5	16,7	32,6	1,5
de Jackson	42,4	-	42,7	20,0	37,8	1,6
North Branch	71,3	-	70,8	33,7	32,6	1,1
<b>Total</b>	<b>211,9</b>	<b>-</b>	<b>211,4</b>	<b>100,0</b>	<b>79,7</b>	<b>1,5</b>
<b>Lac Brome</b>	14,5	14,6	14,6	7,8	20,6	1,5
1-Durrell		11,2	11,9	6,0	19,22	1,6
2-Quilliams		72,7	71,6	39,3	42,91	1,4
3-McLaughlin	9,5	9,7	9,7	5,2	18,58	1,7
4-Argyll	11,7	11,4	11,6	6,4	16,88	1,4
5-Coldbrook	44,6	46,1	45,6	24,2	34,7	1,5
6-Pearson	6,1	6,2	5,6	3,5	11,25	1,3
7-Berges du lac	7,3	8,9	8,5	4,6	-	-
8-Inverness	5,8	4,7	4,6	1,9	7,95	1,2
9-Golf Knowlton	-	1,28	1,8	1,0	5,32	1,1
<b>Total</b>	<b>182,3</b>	<b>186,7</b>	<b>185,4</b>	<b>100,0</b>	<b>78,32</b>	<b>1,6</b>

1-Groupe Hémisphère 2007, p. 12, pour le bassin Davignon

2-Teknika 2007, p.25, pour le bassin Brome

3-Carteq 2009

4-Nos résultats pour l'aire, le périmètre et l'indice  $K_G$

5-Indice de compacité de Gravelius (annexe 1.1)

### 3.1.2 La forme

La comparaison des indices de compacité de Gravelius  $K_G$  entre les deux bassins montrent une bonne similitude bien que de légères différences existent entre les sous-bassins (tableau 1). La forme des deux bassins est moyennement allongée et pourrait s'apparenter, avec un peu d'imagination, à une tête de rhinocéros de forme rectangulaire avec quelques aspérités.

### 3.1.3 L'altitude

Les altitudes sont extraites des courbes hypsométriques des bassins Brome et Davignon (annexe 1.2). Elles représentent la répartition de la surface des bassins en fonction de l'altitude. Pour le bassin Brome, seule la portion terrestre du bassin est considérée dans les calculs d'altitude. Les mesures de surface entre les courbes de niveau sont données au tableau 2. Du pourcentage des aires cumulées, on construit les courbes hypsométriques (figure 2).

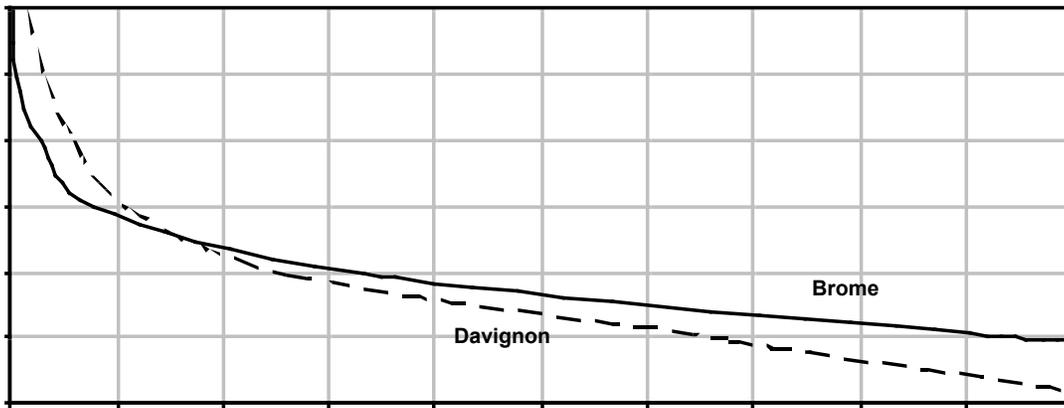
**Tableau 2 : Pourcentage de l'aire des bassins en fonction de l'altitude**

Altitude des courbes de niveau m	Répartition de l'aire km <sup>2</sup>	Aire cumulée km <sup>2</sup>	Pourcentage de l'aire %	Pourcentage cumulé %
<b>Bassin Davignon</b>				
700m	2,2	2,3	1,1	1,1
600m	3,7	6,0	1,8	2,9
500m	6,2	12,3	2,9	5,8
400m	10,5	22,7	5,0	10,8
300m	32,1	54,9	15,2	25,9
200m	87,7	142,7	41,4	67,3
120m	69,2	211,8	32,7	100,0
<b>Total</b>	<b>211,8</b>			
<b>Bassin Brome</b>				
700m	0,0	0,0	0,0	0,0
600m	0,6	0,6	0,3	0,3
500m	3,9	4,5	2,3	2,6
400m	8,9	13,4	5,2	7,8
300m	43,1	56,5	25,2	33,1
200m	106,5	163,0	62,4	95,5
197m	7,8	170,8	4,5	100,0
lac	14,6			
<b>Total</b>	<b>185,3</b>			

Ces courbes fournissent une vue synthétique de la pente du bassin et donc du relief. Les différences d'altitude renseignent sur le comportement des écoulements de surface, en outre leurs vitesses. De ces courbes, on peut tirer les paramètres d'altitude moyenne, d'altitude médiane et de pente moyenne.

La comparaison des courbes hypsométriques de la figure 2 montre:

- une forme semblable et une pente similaire au-dessus de 400 m;
- une altitude légèrement plus élevée au bassin Brome;
- une amplitude de relief moins forte au bassin Brome;
- une proportion équivalente de superficie ( $\approx 15\%$ ) au-dessus de 360 m;
- et une pente plus douce au-dessous de 360 m au bassin Brome.



**Figure 2: Courbes hypsométriques des bassins Brome et Davignon**

L'altitude moyenne est souvent peu représentative de la réalité alors que l'altitude médiane donne une meilleure répartition de la portion de la surface (50%) du bassin au-dessus d'une altitude donnée. On constate, sans étonnement, que le bassin Brome est d'altitude moyenne et médiane légèrement plus

élevée, de près de 25 m, que celui de Davignon (tableau 3). La longueur et la largeur maximales des deux bassins sont équivalentes.

**Tableau 3 : Altitudes moyennes et médianes des bassins Brome et Davignon**

Bassins	Altitude moy. m	Altitude médiane m	Long. max. km	Larg. max. km
Davignon	266,4	240	24,1	16,1
Brome	291,5	265	21,8	14,8

### 3.1.4 La pente longitudinale des cours d'eau

Ce paramètre illustre le rapport entre l'amplitude de la dénivellation du cours d'eau et sa longueur. On remarque une grande diversité des pentes des cours d'eau aussi bien dans le bassin Brome que dans celui de Davignon selon la proportion du parcours des tributaires qui s'écoule sur les versants du chaînon des monts Sutton ou sur son piedmont (tableau 4).

Les pentes et, dans une moindre mesure, l'écoulement sont orientés de façon préférentielle vers le nord-ouest et l'ouest pour le bassin Davignon et vers le nord et l'ouest pour le bassin Brome, bien qu'une composante est et sud soit perceptible en raison de la forme en cuvette de ce dernier.

**Tableau 4 : Pente moyenne des cours d'eau des sous-bassins**

Bassins et sous-bassins	Altitude minimale m	Altitude maximale m	Long. du cours d'eau principal km	Pente m\km	Pente %	Orientation
<b>Davignon</b>				<b>17,7<sup>2</sup></b>	1,77	
YSE-aval	114	118	1,4	2,8	0,28	NO
YSE-139	118	129	9,8	1,1	0,11	O
YSE-amont	129	765	15,1	42,1	4,21	NO
de Jackson	149	745	17,7	33,6	3,36	NO
North Branch	149	349	22,2	9,0	0,9	NO-O
<b>Brome</b>				<b>19,2<sup>2</sup></b>	1,92	
1 Durrell	197	280	8,5	9,8	0,98	S
2 Quilliams	197	268	17,5	4,1	0,41	O-SO
3 McLaughlin	197	462	8,4	31,5	3,15	O
4 Argyll	197	590	7,9	49,7	4,97	O-N
5 Coldbrook	197	378	16,8	10,8	1,08	SO-O-NO-NE
6 Pearson	197	219	3,5	6,3	0,63	N
7 Berges du lac	197	≈320 <sup>1</sup>	-	-	-	NE-SE-O
8 inverness	197	213	1,7	9,4	0,94	E
9 Golf Knowlton	197	254	1,8	31,7	3,17	NO

1-Altitude maximale moyenne des 5 secteurs (288 m, 233 m, 201 m, 343 m et 217 m)

2-Pente moyenne des cours d'eau principaux des sous-bassins

### 3.1.5 La densité de drainage et hydrographique

La densité de drainage et la densité hydrographique estiment le degré de développement du réseau (section 2.2, annexe 1.4). Elles sont relativement élevées dans le haut des versants en pente où les cours d'eau s'écoulent sur une couche de sol mince sur le roc et plus faible au bas des versants où l'infiltration est plus importante (tableau 5). En moyenne, elles sont similaires entre les deux bassins.

**Tableau 5 : Densité de drainage et densité hydrographique des bassins et des sous-bassins**

Bassins et sous-bassins	Aire km <sup>2</sup>	Nb cours d'eau	Densité D <sup>1</sup> nb/km <sup>2</sup>	Long. total cours d'eau km	Densité H <sup>2</sup> km/km <sup>2</sup>
<b>Davignon</b>	1,3	-	-	-	-
YSE-aval	12,9	9	0,78	13,7	1,19
YSE-139	49,2	41	0,82	55,8	1,11
YSE-amont	34,5	36	1,02	58,7	1,66
de Jackson	42,7	69	1,63	90,5	2,14
North Branch	70,8	50	0,70	97,5	1,37
<b>Total</b>	<b>211,4</b>	<b>205</b>	<b>0,97</b>	<b>316,3</b>	<b>1,49</b>
<b>Brome</b>	14,6	-	-	-	-
1-Durrell	11,9	16	1,43	21,1	1,88
2-Quilliams	71,6	72	0,99	114,3	1,57
3-McLaughlin	9,7	9	0,93	15,9	1,64
4-Argyll	11,6	17	1,44	25,3	2,14
5-Coldbrook	45,6	47	1,05	83,2	1,85
6-Pearson	5,6	6	0,94	8,8	1,38
7-Berges du lac	8,5	5	0,58	2,7	0,31
8-Inverness	4,6	3	0,83	2,9	0,81
9-Golf Knowlton	1,8	3	1,64	2,8	1,53
<b>Total</b>	<b>185,4</b>	<b>178</b>	<b>0,96</b>	<b>277,0</b>	<b>1,50</b>

1-Densité de drainage

2-Densité hydrographique

### 3.2 Synthèse morphométrique

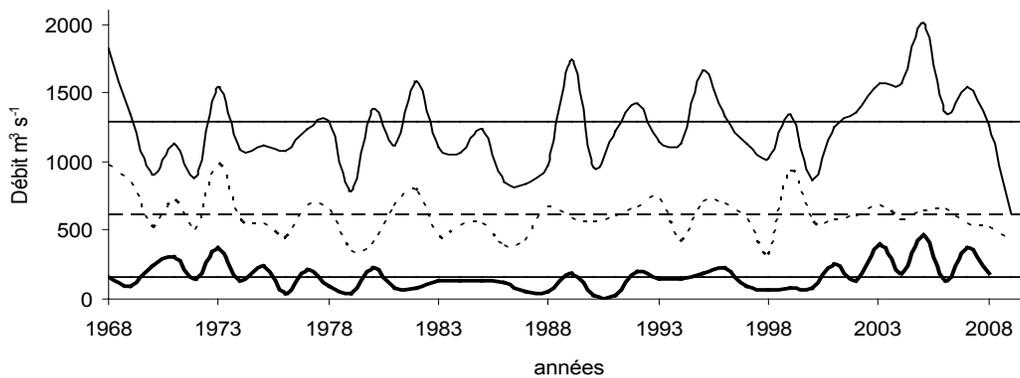
À la lumière de la comparaison des paramètres descriptifs de la *physiographie* et de la *morphométrie* des bassins du lac Brome et du lac Davignon, il ressort un degré élevé de similitudes en raison des nombreuses caractéristiques partagées. Les bassins partagent la taille, la forme et le développement du réseau de drainage qui sont pratiquement identiques. Les altitudes sont légèrement plus élevées au bassin Brome mais l'écart est faible (+25 m) ce qui n'affectera que peu, à notre avis, les précipitations reçues ainsi que les écoulements.

La moyenne des pentes des cours d'eau des sous-bassins, l'orientation préférentielle des écoulements et des pentes sont comparables. De plus, le rapport d'aire (0,814) entre le bassin Brome sur le bassin Davignon se situe entre 0,5 et 2. Le rapport d'aire est satisfaisant, ainsi on peut présumer qu'une *relation de puissance* existe entre les deux bassins et que l'on peut appliquer le transfert de données, soit les observations de débits du bassin Davignon au bassin Brome (section 2.1, annexe 1.5).

### 3.3 Écoulement et débit du bassin versant du lac Brome

Les moyennes journalières observées à Davignon (annexe 2.1) sont utilisées pour calculer les quantités d'eau écoulées (annexe 2.2) à différents pas de temps au bassin Brome par transposition du rapport d'aire sur les débits. Le régime d'écoulement annuel moyen par mois au bassin Brome est présenté à l'annexe 2.3.

Les débits annuels, printaniers et estivaux transposés au bassin Brome pour la période 1968-2010 montrent qu'en moyenne les mois de mars, avril et mai comptent pour 47% du *module annuel* tandis que la période estivale (juin, juillet et août) représente uniquement 13% de celui-ci (figure 3).



**Figure 3: Débits annuels (trait fin), printaniers (tireté) et estivaux (trait gras) et leur moyenne sur la période de 1968 à 2010, au lac Brome.**

Les débits annuels sont trop influencés par la crue et les précipitations printanières pour que des tendances puissent être dégagées. Toutefois, la courbe des débits estivaux illustre mieux les périodes sèches et humides de la série d'observations. Les décennies 1970 et 2000 sont plutôt humides tandis que les années 1980 et fin 1990 - début 2000 correspondent à des périodes sèches.

Les valeurs moyennes des débits journaliers, sur les 32 années complètes de la série (1968-2010)(tableau 6), du bassin jaugé (Davignon) sont transposées au bassin à l'étude (Brome). Les superficies (tableau 6, colonne 1) considérées pour la transposition proviennent de CARTEQ (2009). Le débit moyen journalier est de  $4,36 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  pour le bassin Davignon. Hémisphère (2007) donne  $4,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  pour la période 1968-2001 d'après les moyennes mensuelles de HYDAT (2010).

**Tableau 6 : Transposition des débits du bassin Davignon au bassin Brome**

Bassin et sous-bassins	Aire km <sup>2</sup>	Débit moy. <sup>1</sup> annuel m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Volume annuel m <sup>3</sup>	Débit moy. journalier m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Débit moy. <sup>2</sup> mensuel m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Débit moy. <sup>3</sup> printanier	Débit moy. <sup>4</sup> estival	Lame d'eau annuelle <sup>5</sup> mm
Davignon A <sub>1</sub>	211,4	1607,45	138883680,0	<b>4,36</b>	133,95	755,41	204,84	656,9
1-Durrell	11,2	85,16	7358075,7	0,23	7,10	40,02	70,44	-
2-Quilliams	72,7	552,80	47761795,4	1,50	46,07	259,78	9,40	-
3-McLaughlin	9,7	73,76	6372619,2	0,20	6,15	34,66	9,40	-
4-Argyll	11,4	86,68	7489469,9	0,24	7,22	40,74	11,05	-
5-Coldbrook	46,1	350,54	30286365,4	0,95	29,21	164,73	44,67	-
6-Pearson	6,2	47,14	4073220,5	0,13	3,93	22,15	6,01	-
7-Berges du lac	8,9	67,52	5833902,9	0,18	5,63	31,73	8,60	-
8-Inverness	4,7	35,66	3081194,2	0,10	2,97	16,76	4,54	-
9-Golf Knowlton	1,3	9,66	834353,2	0,03	0,80	4,54	1,23	-
Sous total A <sub>2</sub>	172,1	<b>1308,9</b>	<b>113090996,6</b>	<b>3,55</b>	<b>109,1</b>	<b>615,1</b>	<b>165,3</b>	<b>656,9</b>
Lac Brome	14,6							
Total bassin	186,7							
HYDAT <sup>6</sup> Davignon				3,39 <sup>7</sup>				
Parent 1972 <sup>8</sup>				3,8				633,9

$$1-(A_2 / A_1) \times Q_1 = Q_2 \quad (172,1 \text{ km}^2 / 211,4 \text{ km}^2) \times 1607,45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 1308,92 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

2-Q annuel / 12 mois

3-Mois de mars, avril et mai

4-Mois de juin, juillet et août

5-Hauteur d'eau moyenne écoulée, par année, sur le bassin

6-Relevés hydrologiques du Canada, Station 02OG014 Cowansville, HYDAT 2010,  $4,16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  transposés au bassin Brome

7-Débit mensuel moyen (HYDAT, 2010) par jour

8-Débit moyen journalier sur 34 ans à l'exutoire du lac, station 030301 et lame d'eau écoulée annuelle (2,08 pi)

La ville de Cowansville pompe moins de 10 000 m<sup>3</sup> chaque jour ou 3,65 Mm<sup>3</sup> par année dans le réservoir du lac Davignon pour la distribution d'eau potable. Les débits transposés pourraient être sous-estimés d'au plus 2,6%.

Il s'écoulerait vers le lac Brome un débit annuel moyen de 1309 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> ou 113 millions de m<sup>3</sup> en volume par année. Le débit moyen journalier est de 3,55 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Parent (1972) donne 3,8 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (ou 135 pi<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> à la décharge du lac, 1 km en aval de l'exutoire, sur une série de 34 ans à la *station hydrométrique* 030301 (fermée depuis 1973) alors que Nürnberg et LaZerte (1998) citant ce dernier mentionne 3,645 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> pour une série de 32 ans. Toutefois, l'auteur ne mentionne pas quelles années il a utilisées pour sa série de 34 ans. La station en question (030301 du MDDEP) a enregistré des observations de 1925 à 1961 et de 1968 à 1973. On pourrait supposer que Parent (1972) a simplement utilisé les 34 années complètes d'observations (1925-26, 1928-29, 1932, 1935-60 et 1969-71) pour ses calculs de débits moyens à la décharge du lac pour les transposer ensuite aux affluents du lac en proportion de leur aire respective.

La *lame d'eau annuelle moyenne* écoulee (657 mm) pourra être déduite des précipitations pour documenter l'évapotranspiration dans la mesure où la série de données est suffisamment longue pour qu'il soit possible d'écarter du bilan hydrologique le réservoir sol – nappe phréatique qui varie peu sur des dizaines d'années ( $Q = P - ET + R_{sn}$ ; annexe 1.6). Parent (1972) a calculé 2,08 pi (634 mm) d'eau écoulee par année pour une précipitation moyenne de 45,3 po (1150 mm) par année. Étonnant qu'il arrive à une valeur de lame d'eau plus faible (634 mm) que nous pour un débit moyen journalier plus élevé (3,8 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>).

La comparaison de nos résultats de débits transposés avec ceux de Parent (1972) montre des valeurs un peu plus faibles de notre part (tableau 7). Il est vrai que le découpage des sous-bassins est quelque peu différent sauf peut-être pour le ruisseau Coldbrook et le ruisseau Quilliams. Toutefois, les débits de ces deux affluents sont aussi plus faibles que les résultats de Parent (1972) mais néanmoins comparables.

**Tableau 7 : Comparaison des débits transposés**

Bassin et sous-bassins	Aire <sup>7</sup> km <sup>2</sup>	Débit moy. journalier m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Aire <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	Débit moy. journalier <sup>6</sup> m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Aire km <sup>2</sup>	Débit moy. journalier m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Davignon	211,4	4,36	-	-		
1-Durrell	11,2	0,23	84,2	1,74		
2-Quilliams	72,7	1,50			66,7	1,31 <sup>5</sup>
3-McLaughlin	9,7	0,20	11,2	0,23		
4-Argyll	11,4	0,20	9,5	0,20		
5-Coldbrook	46,1	0,95	47,8	0,99		
6-Pearson	6,2	0,13	11,2	0,23		
7-Berges du lac	8,9	0,18	-	-		
8-Inverness	4,7	0,10	11,1	0,23		
9-Golf Knowlton	1,3	0,03	-	-		
Autres	-	-	11,4	0,23		
Sous total	172,1	<b>3,55</b>	171,9	<b>3,85</b>		
Lac Brome	14,6		14,5			
Total bassin	186,7		186,4			
HYDAT <sup>1</sup> Davignon	-	3,53 <sup>4</sup>				
Nürnberg et LaZerte <sup>2</sup> (1998)	185,7	3,645				
Parent 1972 <sup>3</sup>				3,8		

1-Relevés hydrologiques du Canada, Station 02OG014, 4,34 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> transposés au bassin Brome(HYDAT 2010)

2-Les auteurs citant Parent (1972)

3-Débit moyen journalier sur 34 ans à l'exutoire du lac, station 030301

4-Débit mensuel moyen par jour

5-Moyenne des observations à la station 030324, 1972-1978.

6-Transposition des débits de la station 030301 aux sous-bassins par Parent (1972, p. 9, tableau 1)

7-Aires des sous-bassins selon Carteq (2009)

Il existe des observations de débit sur le ruisseau Quilliams (station 030324 du MDDEP, 1972 à 1978). Nous avons calculé une *moyenne journalière* de  $1,31 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  sur les données existantes de la série. La valeur nous apparaît équivalente à nos résultats compte tenu de la taille du sous-bassin Quilliams à la station 030324 ( $66,7 \text{ km}^2$ ). Toutefois, la série est trop courte et il n'y a aucune année complète d'observations ce qui la rend peu fiable pour la comparaison avec des débits calculés sur de longs pas de temps.

Quelques événements de forts débits sont extraits de la série de la station 030314, à l'exutoire du bassin Davignon (annexe 3.3), et transposés au bassin Brome puis au ruisseau Quilliams pour comparaison avec les débits mesurés à l'exutoire du lac Brome (station 030301) et au ruisseau Quilliams (station 030324). Il n'est pas surprenant de constater que les débits à l'exutoire du lac, lors de ces événements, atteignent des maximums pour la série mais sont, en fait, très faibles par rapport aux débits qui alimentent le lac (débits transposés) (tableau 8). Cet aspect s'explique par l'effet de rétention de la crue produit par le réservoir lacustre que constitue le lac Brome. Cela résulte en un étalement des débits de pointe mesurés à l'exutoire car le régime hydrologique est influencé par le barrage.

D'autre part, lorsque l'on compare les débits journaliers transposés du bassin Brome au ruisseau Quilliams avec les débits mesurés à la station Quilliams (030324), en opération de 1972 à 1978, pour quelques dates de débits supérieurs à  $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  au bassin Brome, on constate aisément que le jaugeage était grandement sous-estimé à cette station de mesure, à tout le moins lors des crues.

**Tableau 8: Débits journaliers au ruisseau Quilliams**

Date	Débits Davignon >50 $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	Débits Brome <sup>1</sup> >40 $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	Débits observés Brome <sup>2</sup> $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	Débits transposés Quilliams <sup>3</sup> $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	Débits Quilliams <sup>4</sup> $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$
1969-04-17	62,00	49,95	28,9	19,5	-
1970-04-25	65,10	52,44	23,1	20,5	-
1971-08-28	95,70	77,09	13,6 <sup>5</sup>	30,1	-
1972-05-05	66,30	53,41	20,5	20,9	-
1973-05-22	79,30	63,88	16,3 <sup>6</sup>	24,9	-
1974-04-05	123,00	99,08	-	38,7	-
1974-04-15	67,40	54,30	-	21,2	7,99 <sup>7</sup>
1974-04-30	75,90	61,14	-	23,9	6,6 <sup>8</sup>
1974-07-10	97,40	78,46	-	30,6	9,6
1975-04-19	105,00	84,58	-	33,0	7,82 <sup>9</sup>
1976-04-01	103,00	82,97	-	32,4	8,61 <sup>10</sup>

1-Débit journalier moyen transposé du bassin Davignon au bassin Brome

2-Débit observé à la station 030301

3-Débit journalier moyen transposé du bassin Brome au sous-bassin Quilliams

4-Débit journalier moyen à la station 030324 1972-78

5-Débit du 30 août 1971 (absence de donnée à la date)

6-Débit du 23 mai 1973 (absence de donnée à la date)

7-Débit du 16 avril 1974 (absence de donnée à la date)

8-Débit du 2 mai 1974 (absence de donnée à la date)

9-Débit du 17 avril 1975 (absence de donnée à la date)

10-Débit du 3 avril 1976 (absence de donnée à la date)

### 3.4 Profondeur, bathymétrie et volume du lac

La profondeur moyenne du lac Brome (6,03 m) est calculée selon l'aire et la profondeur moyenne entre les *isobathes* de la carte bathymétrique de Carteq (2007). Desrochers (1970) donne 4 m de profondeur moyenne, Parent (1972) donne 5,94 m, Bélanger (1981) donne 5,8 m et, Nürnberg et LaZerte (1998) donne 6,3 m plutôt que 6,8 m tel que cité dans Teknika (2008).

La profondeur médiane est tirée de la courbe *bathymétrie* des profondeurs cumulées (figure 4). On note que 50% de la superficie du fond du lac est de moins de 5,6 m et que 70% du fond du lac est moins profond que 7 m alors que Teknika (2007; p. 36) donne 8 m pour 70% de l'aire du lit du plan d'eau.

Le volume de 87,42 millions de m<sup>3</sup> est calculé à l'aide des surfaces entre les isobathes de la carte (annexe 3.2) (section 2.4). Le rapport de Teknika (2007, p.24) mentionne, sans citer la source, un volume d'eau de 83,2 millions de m<sup>3</sup>. Cette valeur provient, en fait, de Bélanger (1981, p.3) calculée selon la taille du lac (14,5 km<sup>2</sup>) et sa profondeur moyenne (5,8 m). Une donnée de capacité de retenue du barrage à l'exutoire de 55,6 millions de m<sup>3</sup> provient du Centre d'Expertise Hydrique du Québec (MDDEP, 2010). D'autres auteurs (Nürnberg et LaZerte, 1998) utilisent un volume de 92,5 millions de m<sup>3</sup>, calculé vraisemblablement de l'aire du lac (14,6 km<sup>2</sup>) et de sa profondeur moyenne (6,3 m).

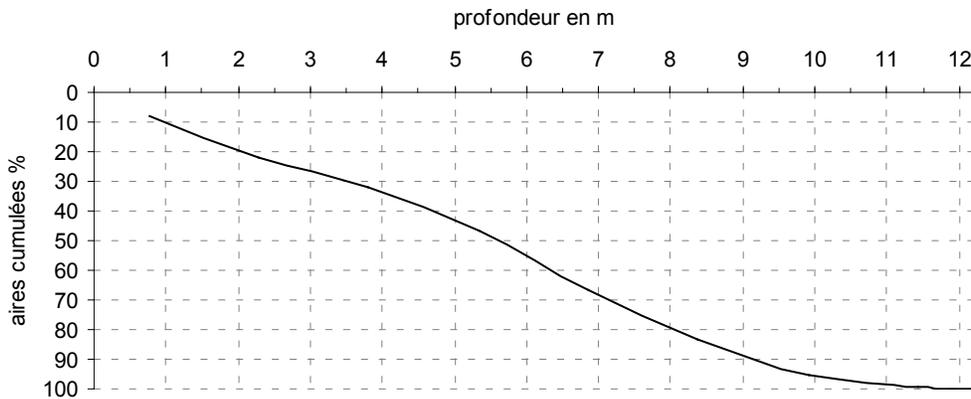


Figure 4: Courbe bathymétrique du lac Brome

### 3.5 Renouvellement des eaux du lac Brome

Les résultats du calcul du volume du lac sont comparables à ceux obtenus par d'autres auteurs (Parent, 1972; Bélanger, 1981; Nürnberg et LaZerte, 1998) (tableau 9) mais plus précis, selon nous, en raison de la méthode de mesures numériques des aires entre les isobathes de la carte (Carteq, 2007).

Tableau 9 : Morphométrie du lac Brome

Auteurs	Profondeur moy. m	Aire km <sup>2</sup>	Volume du lac Mm <sup>3</sup>	Temps de séjour an <sup>-1</sup>	Taux de renouvellement an <sup>-1</sup>	Débit journalier moy. m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Débit annuel Mm <sup>3</sup>
Nürnberg et LaZerte 1998 <sup>1</sup>	6,3	14,6	91,98	0,80	1,25	3,645	115,5 <sup>1</sup>
Bélanger 1981	5,8	14,5	83,20	-	-	-	-
Parent 1972 <sup>1</sup>	5,94	14,5	86,13	0,75	-	3,8	-
SECL 1966 <sup>1</sup>	-	-	-	-	-	4,12	-
<b>Nos résultats</b>	<b>6,03</b>	<b>14,6</b>	<b>87,75</b>	<b>0,78</b>	<b>1,29</b>	<b>3,55</b>	<b>113,1<sup>2</sup></b>

1-À 1 km en aval de l'exutoire du lac, station 030301

2-Par les tributaires alimentant le lac

Le taux de renouvellement du lac avait été estimé à 0,8 an (Teknika, 2007;p.25). Cette donnée provient en fait du rapport limnologique sur le lac Brome (Nürnberg et LaZerte, 1998) où on y mentionne que le *temps de séjour* (annual areal water residence ou water detention time) est de moins d'un an, 0,8 an, calculé selon la moyenne sur 32 années du taux d'écoulement de 3,645 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> à l'exutoire du lac. On cite, à cette occasion, Parent (1972, p 7) qui mentionne un débit moyen de 3,8 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> sur 34 ans et un temps de séjour de ¾ (0,75) d'année. Sur la période 1935-1955, la SECL (1966) calcul 4,12 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> à la même station que Parent 1972 (station 030301).

Le débit journalier moyen retenu par Nürnberg et LaZerte en 1998 (3,645 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) équivaut à un écoulement de 115 millions de m<sup>3</sup> an<sup>-1</sup> (volume du lac / écoulement = temps de séjour, soit 92,5 M m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> / 115 Mm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> = 0,8 an).

La recharge du lac (débit annuel) provenant de la portion terrestre du bassin est de 113,1 Mm<sup>3</sup> an<sup>-1</sup> (tableau 9). Le temps de séjour correspond au temps de résidence du volume d'eau dans le contenant, le lac, soit 0,78 année ou un peu plus de 9,3 mois. Le taux de renouvellement correspond au volume du lac évacué chaque année, soit 1,28 volume du lac s'écoulerait chaque année à l'exutoire.

Le niveau du lac oscille d'environ 1 m par année, au maximum, selon les cotes de niveaux aux stations 030312, 030310, 030307, et 030350 du MDDEP (figure 1) (annexe 2.5). Cette épaisseur d'eau d'un mètre par rapport à la surface du lac représenterait un volume de 14,6 Mm<sup>3</sup> soit 16,6 % du volume du lac.

Pour l'estimation du temps de séjour en fonction du niveau du lac, on considère une variation du volume de 14,6 Mm<sup>3</sup> sur 1 m d'épaisseur d'eau, distribuée de part et d'autre d'une valeur moyenne considérée ici comme 87,75 Mm<sup>3</sup> (tableau 10). La profondeur moyenne et l'aire du lac sont ajustées selon la variation du volume en période des hautes eaux (été) et en période des basses eaux (hiver). En période des hautes eaux, les eaux du lac sont renouvelées aux 10,2 mois tandis qu'en période des basses eaux le lac est renouvelé à tous les 8,6 mois.

**Tableau 10 : Temps de séjour et niveau du lac Brome**

Niveau du lac m	Prof. moy. m	Aire km <sup>2</sup>	Volume du lac Mm <sup>3</sup>	Temps de séjour an <sup>-1</sup>	Taux de renouvellement an <sup>-1</sup>	Charge annuelle <sup>1</sup> Mm <sup>3</sup>
Cote 196,9	6,31	15,0	94,65	0,84	1,19	113,1
Cote 196,4	6,03	14,6	87,75	0,78	1,28	113,1
Cote 195,9	5,65	14,2	80,23	0,71	1,41	113,1

1-Écoulement annuel moyen des tributaires au lac

Parent (1972) considère que la perte par évaporation annule l'apport par précipitation sur la surface du lac Brome. D'autres auteurs, mentionnent que les lacs des latitudes tempérées d'Europe et d'Amérique du Nord contribuent à une augmentation de l'écoulement parce que les précipitations tombant à leur surface sont plus importantes que leur évaporation, dans une faible proportion cependant, de 5 à 15 % (Shelton, 2009 ; p.201). Ainsi, les débits à l'exutoire du lac (station 030301, MDDEP 2010) seraient surestimés et reflèteraient moins la portion terrestre des écoulements. De plus, la superficie du bassin versant à 1 km en aval du barrage à l'exutoire (station 030301) est légèrement plus vaste (188 km<sup>2</sup>) que celui de la portion terrestre du bassin (172,1 km<sup>2</sup>).

### 3.6 Fréquence des débits de crues et période de retour

Nous avons relevé 48 événements de fortes crues de plus de 40 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> sur le bassin Brome au cours de la période 1968 – 2009 (section 2.6) avec une *période de retour* de 9,88 mois. La fonte printanière est la mieux représentée avec un peu plus de 50% des événements revenant au 17,26 mois tandis que les débits relevant de précipitations importantes au printemps (3), en été (7), en automne (6) et en hiver (7) possèdent une période de retour de 19,32 mois. Les résultats sont présentés en annexe 3.3.

### 3.7 Charge massique en phosphore

#### 3.7.1 Charge massique en 2009

La charge massique provenant des affluents est évaluée pour la période de suivi 2009 (Renaissance, 2010). Six prélèvements pour l'analyse de la teneur en phosphore total ont été effectués de mars à octobre et le débit est considéré pour la même période (tableau 11). La moyenne des concentrations des six prélèvements à l'exutoire des tributaires et le débit transposé sur 8 mois sont utilisés dans le calcul de la charge massique. Les concentrations en phosphore total n'ont pas été évaluées pour la période hivernale, de novembre à février 2009.

En 2009, le débit transposé de mars à octobre (816,9 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) est près de la moyenne annuelle calculée sur 32 ans. Le débit de mars à octobre représente 64% du débit annuel en 2009 (annexe 2.2). Pour la

même période, le ruisseau Quilliams aurait contribué pour 42,2% du débit au lac mais en raison de sa forte teneur moyenne en phosphore, il contribuerait pour 59,6% de la charge massique.

La charge en phosphore du lac est évaluée pour un niveau estival élevé (94,65 Mm<sup>3</sup>) et selon la moyenne des concentrations à la fosse (station L1) et à l'exutoire du lac (station L7, tableau 11). Le lac aurait reçu 1864,5 kg de phosphore des affluents de mars à octobre 2009 alors que le lac en contiendrait, en moyenne, 1533,1 kg pour la même période.

**Tableau 11 : Estimation de la charge massique en phosphore total du bassin versant du lac Brome en 2009 (mars à octobre)**

Sous-bassins	Station <sup>1</sup>	Phosphore T <sup>3</sup> µg l <sup>-1</sup>	Débit mars-oct <sup>5</sup> m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Volume mars-oct Mm <sup>3</sup>	Charge massique mars-oct Kg an <sup>-1</sup>
1-Durrell	D-2	13,7	53,13	4590858,9	62,9
2-Quilliams	Q-1	37,3	344,90	29799592,7	1111,5
3-McLaughlin	M-1	25,8	46,02	3976011,7	102,6
4-Argyll	A-2	18,8	54,08	4672838,5	87,8
5-Coldbrook	C-2	12,2	218,71	18896302,9	230,5
6-Pearson	P-2	37,2	29,41	2541368,3	94,5
7-Berges du lac	B <sup>2</sup>	26,2	42,22	3648093,2	95,6
8-Inverness	I-2	37,7	22,30	1926521,1	72,6
9-Golf Knowlton	G-2	12,0	6,17	532867,5	6,4
Lac Brome <sup>4</sup>	L-1 L-7	15,7		94,65 <sup>6</sup>	<b>1533,1</b>
Total bassin			<b>816,95</b>	70584454,8	<b>1864,5</b>
Moyenne bassin		24,5			

1-Stations au lac, la plus en aval des tributaires des sous-bassins (Renaissance, 2010)

2-Teneur moyenne aux stations B6 et B11 à B14, prélèvement le 2009-03-30 uniquement

3-Teneur moyenne au lac en phosphore total, 6 prélèvements entre mars et octobre 2009

4-Teneur moyenne des stations du lac L1 (fosse) et L7 (exutoire) (Renaissance, 2010)

5-Débits mars à octobre 2009 (1002,9 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) de Davignon transposés à Brome

6-Volume du lac en période des hautes eaux, en million de m<sup>3</sup>

À notre avis, cette approche sous-estime le bilan massique pour la période (mars à octobre) puisque nous utilisons une moyenne des teneurs de six prélèvements. Il serait possible d'obtenir un bilan massique plus réaliste et plus précis en pondérant les teneurs en fonction des débits (sachant que la teneur augmente avec le débit) pour chaque jour de la période de prélèvement et même pour la période hivernale. Cette dernière approche sera testée pour les années 2008, 2009 et 2010 lors de la phase 2 du présent projet.

### 3.7.2 Comparaison charge massique annuelle moyenne

Nous avons comparé les charges massiques annuelles arrivant au lac par les sous-bassins calculées par Teknika (2007) avec la charge résultant de la transposition des débits 2009 (tableau 12) et les concentrations en phosphore du suivi du lac 2009 (Renaissance, 2010).

Les débits de Del Giorgio et Prairie (1995) utilisés par Teknika (2007), pour estimer la charge massique entrant au lac par les tributaires, sont nettement plus faibles que nos débits transposés de 2009. Il est, toutefois, hasardeux de comparer nos charges avec celles de Teknika (2007) puisqu'ils utilisent des débits moyens de 1995-96 et des teneurs de 2005 et 2006 de différents auteurs.

**Tableau 12 : Débits et charge massique annuelle**

Sous-bassins	Débits journaliers moyens <sup>1</sup> m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Charge massique annuelle 2005 <sup>2</sup> kg an <sup>-1</sup>	Charge massique annuelle 2006 <sup>3</sup> kg an <sup>-1</sup>	Débits journaliers moyens <sup>4</sup> m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Charge massique annuelle <sup>5</sup> kg an <sup>-1</sup>
Durrell	1,26	2102,0	1283,5	0,22	98,0
Quilliams				1,47	1731,8
Tiffany (McLaughlin)	0,076	104,0	84,8	0,19	159,8
Argyll	0,28	256,1	256,1	0,23	136,9
Coldbrook	0,81	664,1	613,1	0,93	359,2
Pearson	0,046	66,3	57,8	0,12	147,3
Pearson amont	0,046	62,2	41,2	-	-
Berges du lac	-	-	-	0,18	148,9
Inverness	0,063	93,0	79,5	0,09	113,2
Inverness Golf	0,063	-	76,1	-	-
Golf Knowlton	-	-	-	0,02	10,0
<b>Total</b>	<b>2,56</b>	<b>3284,5</b>	<b>2374,8</b>	<b>3,48</b>	<b>2905,0</b>

1-Moyenne des débits journaliers de del Giorgio et Prairie (1995) pour 1994 et 1995 dans Teknika (2007: tab. 13)

2-Produit du débit moyen et des concentrations de Normand-Marleau et Thomas (2005) dans Teknika (2007)

3-Produit du débit moyen et des concentrations de OEDD (2006) dans Teknika (2007)

4-Débits journaliers 2009 de Davignon transposés au bassin Brome

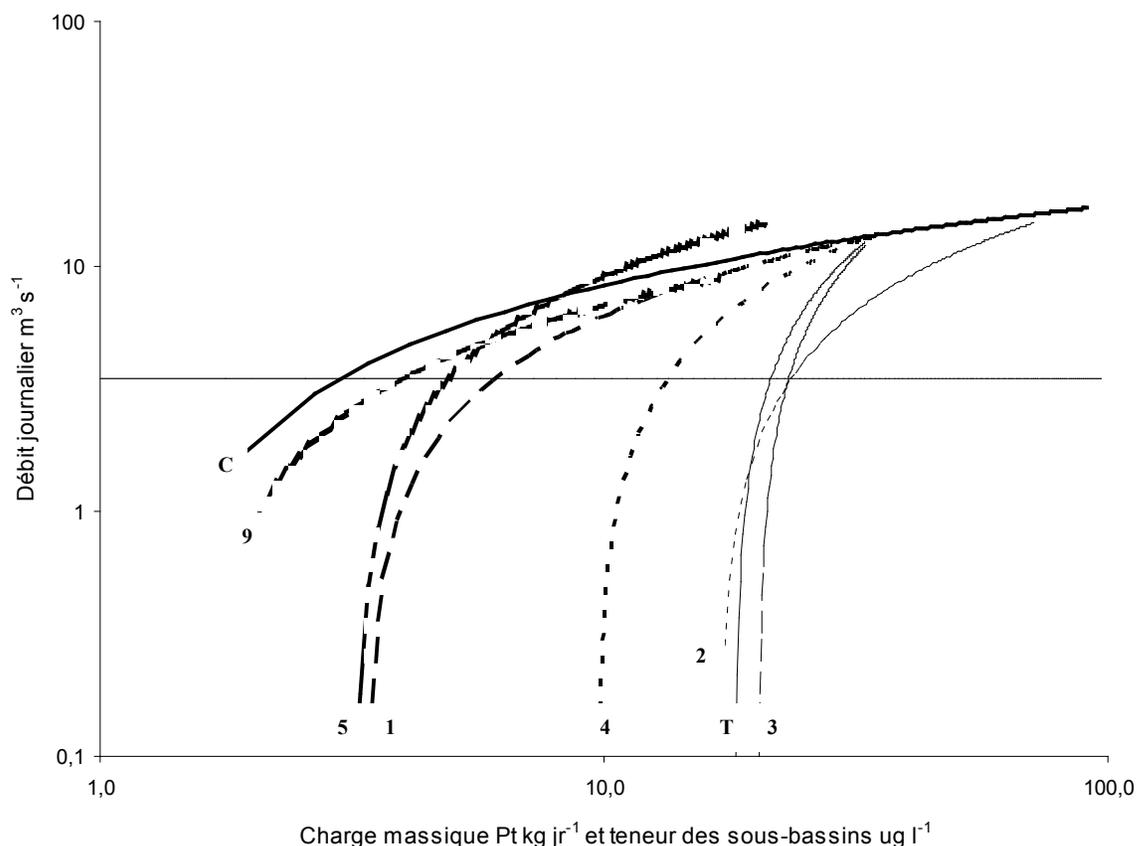
5-Produit du débit journalier moyen et des concentrations moyennes de l'année 2009 tirées de Renaissance (2010), (section 3.7.1)

### 3.7.3 Charge massique journalière

La charge quotidienne en phosphore est calculée pour chacune des dates de prélèvements du suivi du lac en 2009 (Renaissance, 2010) en fonction des débits journaliers transposés (annexe 3.4). Six prélèvements ont été effectués du printemps à l'automne sur les différents tributaires et au lac. Les teneurs des stations le plus près de l'exutoire des affluents ont été retenues pour le calcul. Certains prélèvements proviennent d'autres sources, notamment du MDDEP.

Les prélèvements du 30 mars représentent les valeurs des teneurs lors de la crue printanière, ceux de juin, août et septembre représentent des périodes d'étiage, ceux de juillet correspondent à une précipitation engendrant un débit moyen et ceux d'octobre ont été échantillonnés lors d'un débit du double de la moyenne (annexe 3.5).

La relation entre les débits et la charge massique entrant au lac est étroite (figure 5). Les teneurs en phosphore total mesurées à l'exutoire des tributaires sont relativement constantes en période de faibles débits (étiages) et représentent la teneur des débits de base, soit la concentration minimale du réservoir phréatique des sous-bassins. La teneur augmente rapidement après le débit moyen. Compte tenu de ces résultats, il serait souhaitable de documenter la fréquence et la période de retour des débits au-dessus de la moyenne car ces derniers contribuent, en grande partie, à la charge massique annuelle du lac.



**Figure 5 :** Graphique logarithmique de la relation entre le débit transposé et la charge massique en phosphore total journalière (C) de la saison 2009, six dates de prélèvements. Relation entre le débit et la teneur en phosphore total à l'exutoire des sous-bassins : T- Teneur moyenne, 1-Durrell, 2-Quilliams, 3-McLaughlin, 4-Argyll, 5-Coldbrook, 9-Golf Knowlton. Les ruisseaux Pearson (6), Inverness (8) et le secteur Berges du lac (7) n'ont pas été retenus ici en raison des dates de prélèvements différentes ou de l'absence de données. La droite correspond au débit moyen journalier du bassin versant ( $3,55 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ).

#### 4 Synthèse des résultats

La comparaison des paramètres morphométriques et physiographiques montrent de nombreuses similitudes entre les deux bassins voisins. La taille, la forme, l'altitude, la pente et les caractéristiques du réseau présentent un degré élevé de similarité permettant d'appliquer la méthode de transfert des débits du bassin Davignon au bassin Brome (section 3.2).

Les débits printaniers (mars, avril, mai) calculés sur 32 ans comptent pour 47% du débit annuel alors que l'été le débit ne compte que pour 13% de l'année, en moyenne. Les débits estivaux (juin, juillet, août) illustrent bien les périodes humides dans les années 1970 et 2000 ainsi que les périodes sèches dans les années 1980, fin 1990 et début 2000. Le lac reçoit en moyenne par année  $1308,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ou  $113 \text{ Mm}^3$  d'eau de ses tributaires pour un débit journalier moyen de  $3,55 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Il s'écoule par les affluents l'équivalent de 657 mm par année en épaisseur d'eau sur le bassin de Brome. Les débits transposés aux sous-bassins du lac Brome sont plus faibles que les résultats de Parent (1972) obtenus de la série d'observations de la station, fermée depuis 1973, à l'exutoire du lac. La moyenne journalière ( $1,31 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) calculée à partir de la série d'observations (station Quilliams, 030324) est compatible avec nos résultats pour ce ruisseau mais la série est trop courte et truffée de manque de données pour des analyses plus étendues. La comparaison des débits de crues transposés au ruisseau Quilliams avec les observations de la station du même nom donne, pour des événements datés entre 1972 et 1978, une sous-estimation du simple au triple pour cinq événements relevés. Il en va de même pour le débit à l'exutoire du lac lors de cinq événements de crues entre 1969 et 1973. Ce qui est compréhensible dans ce dernier cas puisque le

lac agit comme un réservoir étêtant la pointe de crue d'autant que son niveau est régularisé à la décharge par un barrage (section 3.3).

La profondeur moyenne du lac s'établit à 6,03 m et son volume à 87,75 Mm<sup>3</sup>. En réalité, 50% du lit du lac est au-dessus de 5,6 m (section 3.4). Le temps de séjour des eaux du lac en régime des basses eaux est de 0,71 an (8,6 mois) contre 0,84 an (10,2 mois) en régime des hautes eaux pour un écoulement annuel de 113 Mm<sup>3</sup> (section 3.5).

Le lac aurait reçu, au moins, les eaux de 48 crues de plus de 40 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> au cours des 40 dernières années, soit un événement à tous les 9,88 mois. Un débit de cette ampleur produit une forte érosion et un nettoyage accentué du lit des cours d'eau et l'érosion des berges, des rives et des fossés (section 3.6).

Le ruisseau Quilliams a contribué pour 59,6% de la charge massique en phosphore de mars à octobre 2009 (1864,5 kg an<sup>-1</sup>). Le débit s'écoulant au lac est juste sous la moyenne lors de cette période en 2009. La charge en phosphore du lac est aussi moyenne en 2009. Les charges massiques annuelles calculées à l'aide des débits de 1995-96 et des teneurs de 2005-06 de Teknika ne sont pas vraiment comparables avec nos résultats de 2009 (section 3.7.2). La charge massique est étroitement liée au débit. Avec l'augmentation des débits, on voit la teneur en phosphore croître ainsi que la charge massique arrivant au lac (section 3.7.3).

## **5 Conclusion et recommandations**

La méthode de transfert de données entre le bassin Davignon et le bassin Brome donne des résultats comparables mais plus précis que les études limnologiques et hydrologiques antérieures. Elles s'appuyaient sur les observations historiques (1925-61, 1968-73) régularisés à l'exutoire par un barrage. Ces mesures de débits historiques sont utiles pour caractériser les écoulements annuels et calculer des débits moyens sur une longue période, mais moins pour des pas de temps courts car les crues sont, en quelque sorte, laminées par l'effet réservoir et la gestion du barrage. Ces débits historiques seraient légèrement surestimés (5 à 15%) puisque que le lac recevrait davantage de précipitation que son évaporation, ce qui est fréquent dans les lacs de climat tempéré en Europe et en Amérique du Nord. Ceci reste, tout de même, à démontrer.

Des affluents du lac Brome seul le ruisseau Quilliams a été jaugé (1972-78), mais les mesures de débits en période de crue de cette station sont trois fois plus faibles que nos débits transposés pour les mêmes dates. Nous avons un doute sur la validité de cette série d'observations, du moins en période de crue, d'autant que la série est incomplète et courte.

Nous sommes d'avis que le transfert de données au bassin et aux sous-bassins du lac Brome présente un portrait fiable des débits moyens des affluents à des pas de temps longs (annuels, mensuels) car la série d'observations s'étend sur quatre décennies (1968-2010). Le transfert de données peut aussi être utilisé pour estimer des débits ponctuels ou de crue à des pas de temps courts (journaliers, hebdomadaires) lors des dates de prélèvements d'échantillons pour évaluer la charge massique, comme en 2009.

La validation des débits transposés au sous-bassin Quilliams n'est pas concluante si on compare nos résultats à la série d'observations de la station du même nom en opération de 1972 à 1978 (030324). Nous n'avons pas d'autres séries d'observations historiques pour valider les débits transposés aux sous-bassins. Dans le but de valider la méthode de transfert de données employée ici, il serait pertinent d'envisager l'utilisation de formules ou de modèles alimentés par les précipitations lors d'une deuxième phase de caractérisation des écoulements dans les sous-bassins du lac Brome.

## 6 Bibliographie

- ANCTIL, F., ROUSSELLE, J. et LAUZON, N. 2005 *Hydrologie : Cheminement de l'eau*. Presses Internationales Polytechnique, Montréal, 317p.
- CARTEQ, 2009 *Le bassin versant du lac Brome*. Sherbrooke, préparé pour Renaissance Lac Brome.
- CARTEQ, 2007 *Lac Brome : Bathymétrie et littoral*, Sherbrooke, préparé pour Renaissance Lac Brome.
- BÉLANGER, B. 1981 *Étude limnologique, synthèse du Lac Brome*. Direction générale des inventaires et de la recherche, ministère de l'Environnement, no 81-1, 19 p.
- DEL GIORGIO, P. et PRAIRIE, Y. 1996 *Brome Lake Project. Final Report 1996*. Prepared for the Town of Brome Lake. Département des Sciences biologiques, Université du Québec à Montréal. November 1996, 33p.
- DESROCHERS, R. 1970 *Brome Lake an eutrophic lake*. Université de Sherbrooke. 20 p. et annexes, non publié.
- GRUPE HÉMISPHERE 2007 *Évaluation du bilan de phosphore du lac Davignon - Cowansville*. Rapport technique réalisé pour le COGEBY (Conseil de gestion du bassin versant de la Yamaska) et la ville de Cowansville, 42 p. et 2 annexes.
- HYDAT 2010 Données hydrométriques archivées par Environnement Canada, <http://www.wsc.ec.gc.ca/hydat/H2O/>
- MDDEP, 2010 Centre d'expertise hydrique du Québec, Montérégie – liste des barrages, barrage X0005651, stations hydrométriques 030314, 030301, 030324 et 030351, stations limnimétriques 030307, 030310, 030312 et 030350,[en ligne] consulté mai et juin 2010.  
[http://www.cehq.gouv.qc.ca/barrages/detail.asp?no\\_mef\\_lieu=X0005651](http://www.cehq.gouv.qc.ca/barrages/detail.asp?no_mef_lieu=X0005651)  
[http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/historique\\_donnees/fiche\\_station.asp?NoStation=030314](http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/historique_donnees/fiche_station.asp?NoStation=030314)  
<http://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/graphique.asp?nostation=030351>
- Ministère des Richesses Naturelles *Courbes bathymétriques du lac Brome*. Direction Générale des Eaux, Hydrographie, document B-7276-1, année de publication inconnue, échelle inconnue.
- Ministère des Richesses Naturelles et de la Faune, 2002, BDTQ , 31H01 101 et 201, 31H02 102 et 202, 31H07 102, 31H08 101 et 31H 100 000 se.
- MUSY, A. et HIGY, C. 2004 *Hydrologie:Une science de la nature*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 314p.
- NORMAND-MARLEAU, M., THOMAS, O. 2005 *Suivi de la qualité des eaux du lac Brome et de ses tributaires par l'usage de la spectrophotométrie UV*. Observatoire de l'environnement et du Développement Durable, Université de Sherbrooke. 47 p.
- NURNBERG, G. et LAZERTE, B. 1998 *Evaluation of the water quality and restoration options of Brome Lake*. For the Town of Brome Lake. May 27, 1998. 42 pages and appendices.
- OEDD 2006 Observatoire de l'Environnement et du Développement Durable, *Suivi de la qualité de l'eau des tributaires du lac Brome en 2006*, Université de Sherbrooke. Pour Ville de Lac Brome et Renaissance Lac Brome.
- PARÉ D., 1978 *Étude hydrogéologique : bassin versant de la Yamaska*. Ministère des Richesses Naturelles, Direction générale des eaux, Québec, Canada, 50 p., Rapport E.B.-3

PARENT, M. 1972 *Étude préparatoire à l'assainissement du lac Brome*. Bessette, Crevier, Parent, Tanguay et associés ingénieurs-conseils, pour le ministère des Affaires Municipales, Division de l'Environnement, 34 p.

RENAISSANCE LAC BROME 2010, *Rapport d'activités – Saison 2009 : Version intégrale*, 6 mars 2010, 50 p.

ROUSSELLE, J. et al. 1990 *Hydrologie des crues au Canada – Guide de planification et de conception*. Ottawa, Comité associé d'hydrologie, Conseil national de recherches Canada, 277p.

SECL, 1966 *Brome lake – upper Yamaska pollution study: Assignment report*, The Shawinigan Engineering Compagny Limited, Montreal, Quebec, December 1966

SHELTON, M.L. 2009 *Hydroclimatology: perspectives and applications*, Cambridge University Press, New York, 426p.

TEKNIKA HBA inc. 2008 *Contrôle des apports en éléments nutritifs dans les eaux du lac Brome*, Résumé du plan directeur, LBRV-108, préparé pour la ville de Lac Brome, 34p.

TEKNIKA HBA inc. 2007 *Contrôle des apports en éléments nutritifs dans les eaux du lac Brome*, Plan directeur version préliminaire LBRV-108, préparé pour la ville de Lac Brome, 111p.

## Annexe 1 Morphométrie

**1.1 Indice de compacité de Gravelius** est défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre d'un cercle ayant la même surface, soit :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi} \cdot A} \approx 0,282 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$

où  $A$  la surface du bassin ( $\text{km}^2$ ) et  $P$  le périmètre du bassin (km). Il est proche de un pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est allongée (Musy et Higy, 2004).

### 1.2 Courbe hypsométrique et altitudes (figure 2, tableau 2)

Les superficies entre les courbes de niveau, par tranche de 100 m, ont été mesurées numériquement sur les cartes de la BDTQ 2002. Elles sont représentées sur la courbe en pourcentage. L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale des bassins, sur la courbe. L'altitude moyenne est définie comme suit :

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i \cdot h}{A}$$

où  $H_{moy}$  est l'altitude moyenne du bassin (m),  $A_i$  l'aire comprise entre deux courbes de niveau ( $\text{km}^2$ ) et  $A$  la superficie totale du bassin (Musy et Higy, 2004; Anctil et al. 2005).

### 1.3 Pente moyenne

La pente longitudinale du cours d'eau principal a été mesurée pour chacun des sous-bassins du lac Davignon et du lac Brome. La pente moyenne  $P_{moy}$  est établie en divisant la différence d'altitude par la longueur totale du cours d'eau, ainsi :

$$P_{moy} = \frac{\Delta H_{max}}{L}$$

où  $P_{moy}$  est la pente moyenne du cours d'eau (m/km),  $\Delta H_{max}$  (m) la dénivellation maximale du cours d'eau (entre sa source et son exutoire) et  $L$  la longueur du cours d'eau principal (km)(Musy et Higy, 2004).

### 1.4 Densité de drainage et densité hydrographique

La densité de drainage ( $\text{km}/\text{km}^2$ ) est une mesure caractérisant le réseau hydrographique. Elle s'exprime comme suit :

$$D_D = \frac{\sum L}{A}$$

Où  $\sum L$  est la longueur totale de tous les cours d'eau (km) et  $A$  est la superficie du bassin ( $\text{km}^2$ ) (Anctil et al., 2005).

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface :

$$F = \frac{\sum N_i}{A}$$

Où  $F$  est la densité hydrographique ( $\text{km}^{-2}$ ),  $N_i$  le nombre de cours d'eau et  $A$  la superficie du bassin ( $\text{km}^2$ ) (Musy et Higy, 2004).

## 1.5 Transfert de données

L'équation suivante permet de transférer les débits  $Q_2$  du bassin Davignon  $A_2$  (station 030314) aux débits  $Q_1$  bassin Brome  $A_1$ .

$$Q_2 = Q_1 \left[ \frac{A_2}{A_1} \right]$$

où

$Q_2$ =débit pour le bassin Brome ( $m^3 s^{-1}$ )

$Q_1$ =débit à la station 030314 ( $m^3 s^{-1}$ )

$A_2$ =aire du bassin Brome ( $km^2$ )

$A_1$ =aire du bassin à la station 030314 ( $km^2$ )

(Anctil et *al.*, 2005).

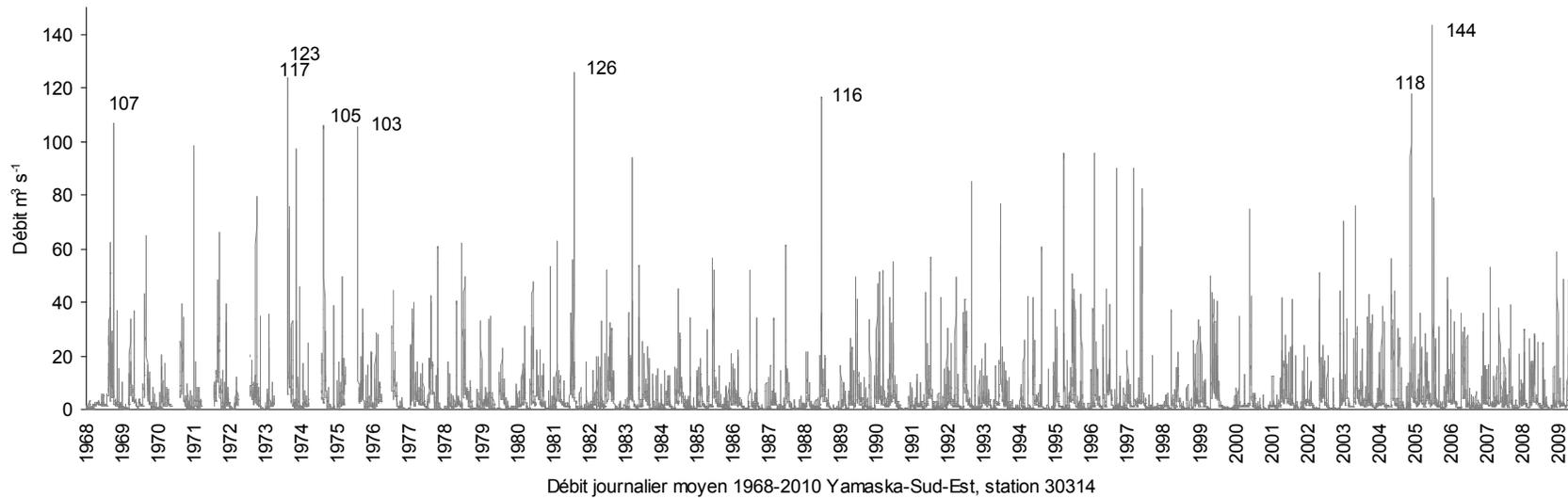
## 1.6 Bilan hydrologique

L'écoulement ( $Q$  ou débit) est le résultat de la différence des précipitations ( $P$ ) par l'évapotranspiration ( $ET$ ) lorsque la série de données est suffisamment longue pour qu'il soit possible d'écarter du bilan hydrologique le réservoir sol – nappe phréatique ( $R_{sn}$ ) qui varie peu sur des dizaines d'années.

$$Q = P - ET + R_{sn}$$

## Annexe 2

### 2.1 Débits journaliers 1968-2010 à Cowansville, station 030314



Débits journaliers 1968-2010 à la station hydrométrique 030314 Yamaska Sud-Est, au pont-route 202 à Cowansville, données validées jusqu'au 2004-09-30, préliminaires par la suite, régime influencé, bassin 210km<sup>2</sup>. Les années 1968, 1972 à 1978, 1981 et 2010, sont incomplètes. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Centre d'expertise hydrique du Québec, données consultées en ligne le 27 avril 2010, [http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/historique\\_donnees/fiche\\_station.asp?NoStation=030314](http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/historique_donnees/fiche_station.asp?NoStation=030314).

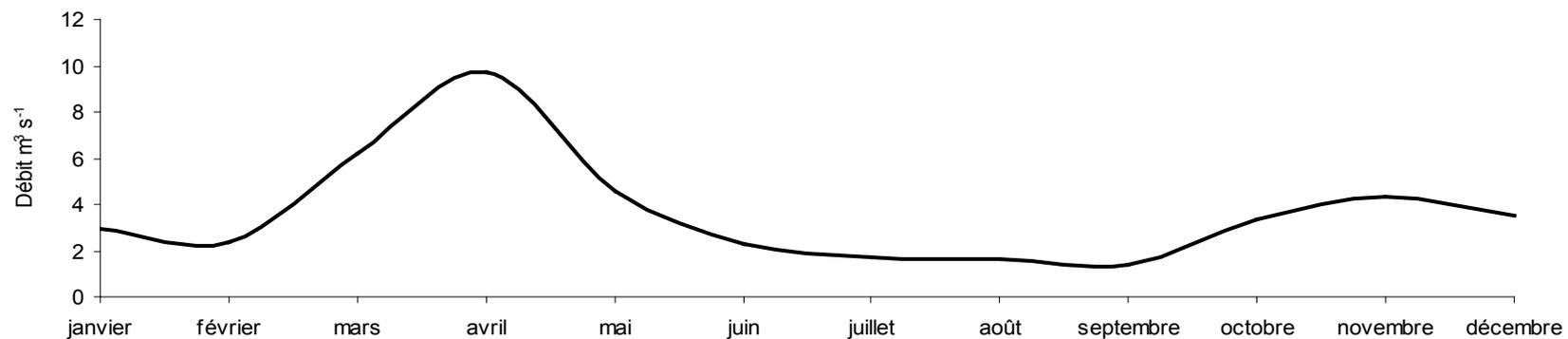
**Annexe 2.2 Débits journaliers moyens, annuels, printaniers, estivaux et mensuels de la station 030314 pour la période 1968-2010 transposés au bassin Brome**

Année et périodes <sup>1</sup>	Débit journalier moy. m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Débit annuel <sup>2</sup> m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Débit printanier <sup>3</sup> moy. m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Débit estival <sup>4</sup> moy. m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Débit mensuel <sup>5</sup> moyen m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
1968 (08-12)	<b>1,030</b>	<b>142,12</b>	-	<b>6,02</b>	-
1969 c h	3,953	1841,81	979,92	166,38	153,48
1970 c	3,742	1362,22	861,61	87,80	113,52
1971 (04-11)	<b>4,159</b>	<b>919,06</b>	<b>528,23</b>	238,44	-
1972 (03-11)	<b>4,573</b>	<b>1138,60</b>	<b>724,41</b>	306,99	94,88
1973 (03-07, 08-11)	<b>4,368</b>	<b>904,13</b>	<b>510,93</b>	<b>142,03</b>	-
1974 (04-11)	<b>6,926</b>	<b>1558,40</b>	<b>995,49</b>	379,41	-
1975 (03-11)	<b>4,578</b>	<b>1103,29</b>	<b>581,42</b>	136,52	-
1976 (04-11)	<b>4,923</b>	<b>1132,40</b>	<b>549,83</b>	238,06	-
1977 (03-07, 09-12)	<b>4,464</b>	<b>1093,71</b>	<b>438,40</b>	<b>36,23</b>	-
1978 (01-07, 09-12)	<b>4,025</b>	<b>1247,75</b>	687,23	<b>215,42</b>	-
1979 c	3,558	1298,72	654,85	90,10	108,23
1980 c <sup>6</sup>	<b>2,179</b>	<b>797,67</b>	<b>349,00</b>	46,02	<b>66,47</b>
1981 c	3,818	1393,67	400,03	227,70	116,14
1982 c s	3,105	1133,27	679,20	83,23	94,44
1983 c h	4,368	1594,29	794,14	84,89	132,86
1984 c s	3,040	1112,52	457,81	132,85	92,71
1985 c s	2,927	1068,42	536,86	140,38	89,03
1986 c	3,405	1242,90	545,54	135,47	103,58
1987 c s	2,371	865,53	388,17	123,65	72,13
1988 c s	2,319	848,80	432,25	49,14	70,74
1989 c s	2,684	979,53	669,88	59,59	81,62
1990 c h	4,814	1757,24	588,55	183,77	146,44
1991 c s	2,648	966,59	559,61	29,52	80,55
1992 c	3,361	1230,15	601,00	22,95	102,51
1993 c h	3,181	1441,18	669,53	206,76	120,10
1994 c s	3,118	1161,16	739,66	146,96	96,76
1995 c s	4,602	1138,17	414,77	152,08	94,85
1996 c h	3,666	1684,20	709,05	191,62	140,35
1997 c	3,666	1338,07	695,15	224,51	111,51
1998 c s	3,115	1137,15	585,65	91,93	94,77
1999 c s	2,830	1032,91	324,60	62,08	86,08
2000 c	3,705	1356,09	935,79	74,50	113,01
2001 c s	2,393	873,61	563,63	74,08	72,80
2002 c s	3,464	1264,37	583,41	252,50	105,36
2003 c	3,736	1363,66	598,00	128,84	113,64
2004 c h	4,335	1586,85	686,19	407,25	132,24
2005 c h	4,339	1583,57	578,01	190,18	131,96
2006 c h	5,559	2029,09	646,85	468,46	169,09
2007 c	3,814	1373,05	655,14	130,17	114,42
2008 c h	4,247	1554,39	546,16	379,00	129,54
2009 c s	3,486	1272,40	530,59	194,64	106,04
2010 (01-04)	<b>5,451</b>	<b>632,32</b>	<b>447,34</b>	-	-
Moy 32 ans	<b>3,543</b>	<b>1308,92</b>	<b>612,86</b>	<b>166,80</b>	<b>107,41</b>
Moy 1968-2010	3,722	1222,21	605,33	-	-
0,814285714 <sup>7</sup>					

1-(09-11) observations septembre à novembre, c: année complète, s : année sèche, h : année humide

- 2-Les années incomplètes sont en gras
  - 3-Les mois de mars, avril et mai des années 1969-70 et 1978 à 2009
  - 4-Les mois de juin, juillet et août des années 1969-72, 1974-76 et 1978-09
  - 5-Débits annuels divisés par le nombre de mois
  - 6- Défectuosité de l'appareil de mesure, en mars et avril les débits proviennent d'une redistribution temporelle des données enregistrées
  - 7-Coefficient de transposition des débits (section 3.1.1)
- Les observations sont validées jusqu'au 2004-09-30, préliminaires par la suite (MDDEP,2010)

### Annexe 2.3 Régime d'écoulement annuel au bassin Brome



Régime d'écoulement annuel au bassin Brome selon les débits mensuels moyens transposés de Davignon pour la période 1968-2001 (HYDAT, 2010) et selon nos calculs 2001-2010.

### Annexe 3.1 Caractéristiques de la station 030314 et analyse statistique

Localisation : rivière Yamaska Sud-Est au pont-route 202 à Cowansville

Coordonnées : NAD83 45° 12' 22" 72° 44' 51"

Aire du bassin versant : 210 km<sup>2</sup>

Exploitant : ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs

Période d'observation : depuis 1968

Condition d'écoulement : régime influencé, réservoir d'eau potable de Davignon, Cowansville

L'ensemble des débits journaliers pour la période 1968-2010 ont été utilisés pour l'analyse statistique.

Taille	14230
Minimum	0,0086 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Maximum	143,5 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Moyenne	4,52 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Écart-type	7,99 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Médiane	1,95 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Coefficient d'asymétrie	5,5805
Variance de l'échantillon	63,88
Coefficient d'aplatissement C <sub>k</sub>	49,83

### Annexe 3.2 Volume du lac et bathymétrie

Tableau synthèse des mesures et des calculs de bathymétrie, de profondeur, de surface et de volume du lac Brome.

Isobathe pi	Prof. moy. m	Aire isobathe km <sup>2</sup>	Aire %	Aire cumulée %	Profondeur moy. de l'aire <sup>1</sup> m	Volume du lac Brome Mm <sup>3,2</sup>
0 5	0,76	1,32	8,3	8,30	0,07	1,01
5 10	2,3	1,97	13,5	21,81	0,31	4,50
10 15	3,8	1,54	9,9	31,76	0,40	5,87
15 20	5,3	2,15	14,9	46,61	0,79	11,49
20 25	6,9	2,87	20,3	66,95	1,34	19,68
25 30	8,4	2,42	16,6	83,50	1,39	20,29
30 35	9,9	1,77	12,1	95,60	1,21	17,38
35 40	11,4	0,59	4,1	99,67	0,46	6,71
40	12,2	0,05	0,3	100,00	0,04	0,61
<b>Lac</b>	-	14,69	100	100	<b>6,03</b>	<b>87,75</b>

1- = Aire isobathe x prof. moy / aire totale = hauteur d'eau sur 14,6 km<sup>2</sup>

2- = Aire isobathe x prof. moy en Mm<sup>3</sup> ou million de m<sup>3</sup>

### Annexe 3.3 Fréquences des débits de crues

Tableau des débits de crues de plus de 40 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> dans le bassin du lac Brome

Date	Débits >50 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> Davignon <sup>1</sup>	Débits >40 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> Brome <sup>2</sup>	Débits observés m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> Brome <sup>3</sup>	Intervalle de récurrence <sup>4</sup> mois	Période <sup>5</sup>	Intervalle de récurrence <sup>6</sup> mois	Intervalle de récurrence p,e,a et fpl <sup>7</sup> mois
1969-04-17	62,00	50,49	28,9	12	f		
1970-04-25	65,10	53,01	23,1	16	f	12	
1971-08-28	95,70	77,93	13,6 <sup>8</sup>	9	a		
1972-05-05	66,30	53,99	20,5	12	p		8
1973-05-22	79,30	64,57	16,3 <sup>9</sup>	11	p		12,5
1974-04-05	123,00	100,16		0,5	f	48	
1974-04-15	67,40	54,88		0,5	f	0,5	
1974-04-30	75,90	61,80		3	f	0,5	
1974-07-10	97,40	79,31		9	e		22,5
1975-04-19	105,00	85,50		12	f	12	
1976-04-01	103,00	83,87		26	f	11,5	
1978-06-21	60,30	49,10		9	e		23
1979-03-06	61,80	50,32		17	f	35	
1981-08-17	53,40	43,48		2	e		34
1981-10-28	63,00	51,30		6	a		2
1982-04-01	55,90	45,52		0,5	f	37	
1982-04-18	126,00	102,60		11	f	0,5	
1983-03-20	51,90	42,26		9	f	11	
1983-12-14	94,10	76,62		2	fpl		26
1984-02-15	53,50	43,56		25	fpl		2
1986-03-20	56,30	45,84		0,5	f	36	
1986-03-27	52,20	42,51		13	f	0,5	
1987-04-01	51,50	41,94		11	f	11,5	
1988-03-26	60,70	49,43		12	f	12	
1989-03-29	116,00	94,46		20	f	12	
1990-11-17	51,40	41,85		1	a		79
1990-12-30	51,30	41,77		4	fpl		1,5
1991-04-10	55,50	45,19		0,5	f	24	
1992-04-23	56,75	46,21		12	f	12	
1993-06-22	85,23	69,40		10	e		30
1994-04-16	76,91	62,63		14	f	24	
1995-06-03	59,63	48,56		7	e		23,5
1996-01-19	94,27	76,76		3	fpl		13,5
1996-04-21	50,77	41,34		8	f	24	
1996-12-02	95,28	77,59		7	fpl		11,5
1997-07-15	90,15	73,41		6	e		8,5
1998-01-09	90,46	73,66		2	fpl		8,5
1998-03-10	60,88	49,57		0,5	f	23	
1998-03-31	82,86	67,47		25	f	0,5	
2001-04-13	75,26	61,28		35	f	36	
2003-03-30	50,79	41,36		8	f	24	
2003-11-20	70,59	57,48		4	a		59
2004-03-27	76,10	61,97		13	f	12	
2005-04-03	56,49	46,00		16	f	12	
2005-10-17	117,90	96,00		7	a		23

2006-05-20	143,50	116,85	1	p	6,5
2006-06-11	78,94	64,28	19	e	1
2008-01-09	53,42	43,50	22	fpl	19
2009-11-28	58,88	47,95		a	10,5
<b>Période de retour</b>			<b>9,88</b>		<b>17,26</b>
					<b>19,32</b>

1-Débit journalier de plus de 50 m3 s-1 extrait des observations de la station 030314, 1968-2010

2-Débit journalier de la colonne 1 transposés au bassin Brome, facteur de conversion 0,814285714

3-Débit observé à la station 030301

4-Intervalle de temps entre deux crues, en mois

5- f : fonte printanière et crue, fpl :pluie hivernale , p :pluie printanière, e : pluie estivale, a :pluie automnale

6-Intervalle de temps entre deux crues de fonte printanière, en mois

7- Intervalle de temps entre deux crues de précipitation de pluie hivernale, printanière, estivale ou automnale, en mois

8-débit du 30 août 1971

9-débit du 23 mai 1973

### 3.4 Charge massique journalière en phosphore des sous-bassins du lac Brome pour 2009

La charge massique est calculée selon le produit des teneurs du suivi du lac 2009 (Renaissance, 2010) et les débits transposés pour la date.

Dates		2009-03-30			2009-06-08			2009-07-07		
Sous-bassins	Station <sup>1</sup>	Pt <sup>3</sup> µg l <sup>-1</sup>	Débit journalier m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Charge journalière <sup>5</sup> kg jr <sup>-1</sup>	Pt µg l <sup>-1</sup>	Débit journalier m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Charge journalière kg jr <sup>-1</sup>	Pt µg l <sup>-1</sup>	Débit journalier m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Charge journalière kg jr <sup>-1</sup>
1-Durrell	D-2	35,0	1,5	4,6	8,0	0,05	0,04	21,0	0,18	0,3
2-Quilliams	Q-1	71,0	9,9	60,6	36,0	0,34	1,07	38,0	1,19	3,9
3-McLaughlin	M-1	33,0	1,3	3,8	24,0	0,05	0,09	33,0	0,16	0,5
4-Argyll	A-2	35,0	1,5	4,7	15,0	0,05	0,07	22,0	0,19	0,4
5-Coldbrook	C-2	21,0	6,3	11,4	5,0	0,22	0,09	11,0	0,75	0,7
6-Pearson <sup>6</sup>	P-2	28,0	0,8	2,0	52,0	0,03	0,13	42,0	0,10	0,4
7-Berges du lac	B <sup>2</sup>	26,2	1,2	2,7	26,2	0,04	0,09	26,2	0,15	0,3
8-Inverness <sup>6</sup>	I-2	35,0	0,6	1,9	82,0	0,02	0,16	30,0	0,08	0,2
9-Golf Knowlton	G-2	27,0	0,2	0,4	9,0	0,01	0,01	15,0	0,02	0,0
Lac Brome <sup>4</sup>	L-7	23,0		2018,4	14,0		1228,6	15,0		1316,4
Total bassin			23,41	92,1		0,81	1,75		2,81	6,7
Moyenne bassin		34,6			28,6			26,5		
Débit annuel équivalent <sup>7</sup>			8536,0			296,1			1025,1	
Charge annuelle équivalente <sup>8</sup>				33608,9			637,9			2432,9

1-Station à l'exutoire des tributaires des sous-bassins et à l'exutoire du lac (L-7) (Renaissance, 2010)

2-Teneur moyenne des stations B6 et B11 à B14, le 2009-03-30

3-Teneur en phosphore total aux stations en microgramme par litre (Renaissance, 2010)

4-Teneur en dates: 05-03, 06-07, 07-07 et contenu en phosphore du lac en kilogramme (Renaissance, 2010)

5-Charge massique en phosphore total en kilogramme par jour

6-Dates de prélèvements différentes (Renaissance 2010)

7-Débit journalier reporté sur une année

8-Charge massique en phosphore reportée sur une année

### Annexe 3.4 Charge massique journalière en phosphore des sous-bassins du lac Brome pour 2009 (suite)

Dates		2009-08-17			2009-09-09			2009-10-26		
Sous-bassins	Station <sup>1</sup>	Pt <sup>3</sup> µg l <sup>-1</sup>	Débit journalier m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Charge journalière <sup>5</sup> kg jr <sup>-1</sup>	Pt µg l <sup>-1</sup>	Débit journalier m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Charge journalière kg jr <sup>-1</sup>	Pt µg l <sup>-1</sup>	Débit journalier m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Charge journalière kg jr <sup>-1</sup>
1-Durrell	D-2	3,0	0,08	0,0	2,0	0,02	0,003	13,0	0,43	0,48
2-Quilliams	Q-1	20,0	0,52	0,9	12,0	0,13	0,136	47,0	2,78	11,30
3-McLaughlin	M-1	19,0	0,07	0,1	21,0	0,02	0,032	25,0	0,37	0,80
4-Argyll	A-2	8,0	0,08	0,1	8,0	0,02	0,014	25,0	0,44	0,94
5-Coldbrook	C-2	2,0	0,33	0,1	<b>25,0</b>	0,08	0,179	9,0	1,76	1,37
6-Pearson <sup>6</sup>	P-2	49,0	0,04	0,2	30,0	0,01	0,029	22,0	0,24	0,45
7-Berges du lac	B <sup>2</sup>	26,2	0,06	0,1	26,2	0,02	0,036	26,2	0,34	0,77
8-Inverness <sup>6</sup>	I-2	22,0	0,03	0,0	36,0	0,01	0,026	21,0	0,18	0,33
9-Golf Knowlton	G-2	2,0	0,01	0,3	2,0	0,00	0,000	17,0	0,05	0,07
Lac Brome <sup>4</sup>	L-7	22,0		1930,6	17,0		1491,8	15,0		1316,3
Total bassin			1,00	1,9		0,25	0,46		5,37	16,5
Moyenne bassin		16,8			18,0			22,8		
Débit annuel équivalent <sup>7</sup>			365,7			92,2			1959,9	
Charge annuelle équivalente <sup>8</sup>				683,1			166,5			6030,5

1-Station à l'exutoire des tributaires des sous-bassins et à l'exutoire du lac (L-7) (Renaissance, 2010)

2-Teneur moyenne des stations B6 et B11 à B14, le 2009-03-30

3-Teneur en phosphore total aux stations en microgramme par litre (Renaissance, 2010)

4-Teneur en dates: 08-02, 09-08, 10-04 et contenu en phosphore du lac en kilogramme (Renaissance, 2010)

5-Charge massique en phosphore total en kilogramme par jour

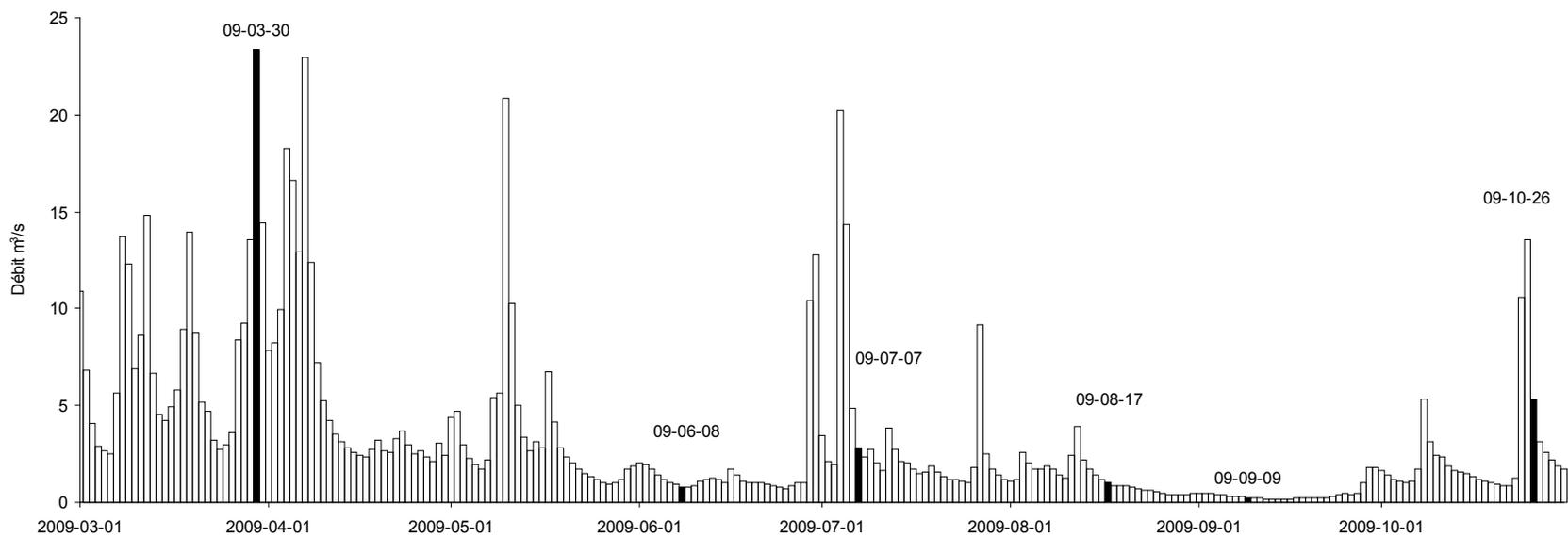
6-Dates de prélèvements différentes (Renaissance 2010)

7-Débit journalier reporté sur une année

8-Charge massique en phosphore reportée sur une année

**25,0**: la teneur est anormalement élevée en raison de travaux au pont rue Maple en date du prélèvement

### Annexe 3.5 Débits au bassin Brome en 2009



Débits mars à octobre 2009 transposés au bassin Brome et dates de prélèvement du suivi 2009 Renaissance Lac Brome (2010).

