

**MINISTÈRE DE LA FAUNE ET
DES PARCS DU QUÉBEC**

**Étude sur l'érosion du
ruisseau Castle**

par

Teknika inc.

Juin 2001

MINISTÈRE DE LA FAUNE ET DES PARCS DU QUÉBEC

Étude d'érosion du ruisseau Castle

préparée par

Sébastien Girard, ing. stag.

vérifiée par

Martine Codère, ing., M.Sc.A.

TEKNIKA INC.

150, rue de Vimy
Sherbrooke (Québec) J1J 3M7
Tél. : (819) 562-3871
Télec. : (819) 563-3850

Juin 2001

Dossier : SFPG-001

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1 INTRODUCTION	1
2 DESCRIPTION DU MANDAT	2
3 CLIMATOLOGIE.....	3
4 ACTIVITÉS HUMAINES	6
5 HYDROLOGIE	7
6 FONTE DES NEIGES.....	12
7 SÉDIMENTOLOGIE	14
8 TRAVAUX RÉALISÉS À L'AUTOMNE 2000.....	20
9 SOLUTION PROPOSÉE	22
9.1 Détournement des eaux.....	22
9.2 Bassin de sédimentation	23
10 CONCLUSION	24
 ANNEXE 1 Bassins versants du ruisseau Castle	

LISTE DES TABLEAUX

		Page
TABLEAU 1	Précipitations Normales climatiques de Magog de 1948 à 1990	3
TABLEAU 2	Nombre de jours avec précipitations Normales climatiques de Magog de 1948 à 1990	4
TABLEAU 3	Comparaison des précipitations annuelles Stations de Magog et de l'Aéroport de Sherbrooke	4
TABLEAU 4	Précipitations de neige (cm) Station de l'Aéroport de Sherbrooke	5
TABLEAU 5	Observation de la couverture de neige du mont Orford.....	5
TABLEAU 6	Utilisation du sol.....	6
TABLEAU 7	Coefficient de ruissellement du bassin versant (exutoire du parc du Mont-Orford).....	8
TABLEAU 8	Comparaison des débits de ruissellement à l'exutoire du parc du Mont-Orford.....	9
TABLEAU 9	Débit à l'embouchure du ruisseau Castle Méthode de régression	9
TABLEAU 10	Consommation d'eau pour la production de la neige artificielle	13
TABLEAU 11	Comparaison de la neige artificielle à la neige naturelle.....	13
TABLEAU 12	Échantillonnage des matières en suspension	17
TABLEAU 13	Débit solide du ruisseau Castle à l'exutoire du parc du Mont-Orford.....	19
TABLEAU 14	Charge sédimentaire du ruisseau Castle à l'exutoire du parc du Mont-Orford.....	19

1 INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, le ruisseau Castle souffre d'un problème d'érosion et l'on retrouve des sédiments qui sont transportés en période de crue jusqu'au lac Memphrémagog à l'embouchure du ruisseau. Cette problématique est liée à des phénomènes naturels et à des activités humaines. Une des conséquences de cette érosion est l'augmentation de la quantité de sédiments déposée dans le delta sub-aquatique situé à l'embouchure du ruisseau. La formation de ce haut-fond amène des problèmes d'eutrophisation du lac et gêne la libre circulation des bateaux de plaisance.

Parmi les phénomènes d'érosion naturels, notons particulièrement l'action de la pluie, le ruissellement des eaux en surface et l'écoulement des eaux en rivière. Les conditions écologiques difficiles et la géomorphologie des régions montagneuses favorisent également l'érosion superficielle.

Les principales activités humaines qui ont modifié avec le temps les propriétés naturelles du bassin versant sont décrites comme suit :

- ❑ les développements résidentiels;
- ❑ l'établissement de riverains le long du ruisseau (déboisement des rives);
- ❑ les activités récréatives (centre de ski du mont Orford);
- ❑ la construction du réseau routier (autoroute 10);
- ❑ les activités agricoles;
- ❑ l'exploitation d'une sablière;
- ❑ et bien d'autres.

Durant les dernières années, plusieurs travaux ont été réalisés pour atténuer les impacts négatifs du transport des sédiments. Parmi les derniers, il y a eu les travaux de stabilisation des berges à différents endroits stratégiques sur le ruisseau (1993) et les travaux de stabilisation au mont Orford réalisés à l'automne 2000 (voir section 8).

2 DESCRIPTION DU MANDAT

Dans le cadre de la réalisation des travaux au mont Orford de l'automne 2000, il a été convenu d'effectuer une étude pour évaluer la pertinence d'aménager les ouvrages pour détourner une partie des eaux vers le bassin de la rivière aux Cerises et/ou pour faire un nouveau bassin de sédimentation à même le ruisseau Castle (en arrière des garages). Cette étude comprend les activités suivantes :

- une étude hydrologique pour évaluer l'apport hydrique additionnel dû aux aménagements du Centre de ski et à la fabrication de la neige artificielle;
- une campagne d'échantillonnage et un suivi visuel en période de fonte et de pluie pour vérifier si des sédiments sont, malgré les travaux réalisés à l'automne 2000, encore charriés au ruisseau;
- des recommandations quant à la pertinence d'aménager des ouvrages pour détourner une partie du débit du ruisseau Castle ou encore pour en retenir les sédiments.

3 CLIMATOLOGIE

Cette partie a pour but de décrire le ruisseau Castle dans son environnement et de présenter les informations recueillies pour la réalisation de l'étude. La description de l'environnement climatique est effectuée à partir des données provenant de la station météorologique de l'Aéroport de Sherbrooke et de Magog.

Les précipitations liquides, solides et totales sont analysées en moyennes annuelles et mensuelles pour la station de Magog (tableau 1). La hauteur de précipitation totale annuelle est de 1126,8 mm comprenant 834,1 mm de pluie et 292,9 cm de neige. À l'été, les mois de juin à août, les précipitations sont les plus grandes (334,6 mm) et le printemps, les mois de mars à mai, elles sont les plus basses (250,9 mm).

Depuis quelques années, les données de la station de Magog ne sont plus disponibles. Par conséquent, les données des années 1998 à 2001 sont recueillies à la station météorologique la plus près, soit l'Aéroport de Sherbrooke. Ces données sont très semblables à la région de Magog. Le tableau 3 montre l'écart des hauteurs de précipitation entre ces deux stations météorologiques.

TABLEAU 1
Précipitations
Normales climatiques de Magog de 1948 à 1990

Précipitations	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.
Chutes de pluie (mm)	14,9	17,1	33,6	59,9	95,9	102,5	110,1
Chutes de neige (cm)	67,0	54,6	45,5	15,4	0,6	0,0	0,0
Précipitations totales (mm)	81,8	71,7	79,1	75,3	96,5	102,5	110,1
Couvert. de neige à la fin du mois (cm)	25	27	10	0	0	0	0

Précipitations	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Chutes de pluie (mm)	122,0	91,8	90,8	66,4	29,1	834,1
Chutes de neige (cm)	0,0	0,0	1,9	30,6	77,4	292,9
Précipitations totales (mm)	122,0	91,8	92,7	96,8	106,5	1126,8
Couverture de neige à la fin du mois (cm)	0	0	0	6	18	

Source : Environnement Canada

TABLEAU 2
Nombre de jours avec précipitations
Normales climatiques de Magog de 1948 à 1990

Précipitations	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil
Journée de pluie	3	3	6	10	13	13	13

Précipitations	Août	Sept	Oct	Nov	Déc.	Année
Journée de pluie	14	12	13	11	5	114

Source : Environnement Canada

TABLEAU 3
Comparaison des précipitations annuelles
Stations de Magog et de l'Aéroport de Sherbrooke

Précipitations	Magog	Sherbrooke	Écart
Chutes de pluie (mm)	834,1	834,5	0,0%
Chutes de neige (cm)	292,9	288,2	1,6 %
Précipitations totales (mm)	1 126,8	1 108,9	0,4 %

Source : Environnement Canada

Les précipitations de neige pour les années de 1998 à 2001 de la station météorologique de l'Aéroport de Sherbrooke sont décrites dans le tableau ci-dessous. La hauteur de précipitation de neige annuelle de l'hiver 1998-1999 (188,2 cm) est de beaucoup inférieure à la normale climatique (292,9 cm). Tandis que celles des hivers 1999-2000 et 2000-2001 sont légèrement supérieures à la normale climatique. Ces données serviront à évaluer les impacts de la fabrication de la neige artificielle sur le mont Orford.

TABLEAU 4
Précipitations de neige (cm)
Station de l'Aéroport de Sherbrooke

	Hiver 1998-1999	Hiver 1999-2000	Hiver 2000-2001
Octobre	---	14,4	27,2
Novembre	10,8	31,2	14,2
Décembre	20,8	31,6	104,3
Janvier	85,1	85,6	61,6
Février	20,6	98,6	72,2
Mars	49,5	30,3	65,6
Avril	1,4	33,4	0,2
Total annuel	188,2	325,1	345,3

Source : Environnement Canada

La couverture de neige du mont Orford a été suivie périodiquement afin d'évaluer le taux de fonte de la neige. Le tableau ci-dessous indique les épaisseurs de neige au sol qui ont été mesurées à différents endroits sur le mont. Contrairement aux années précédentes, il n'y a pas eu de temps doux durant la période hivernale (janvier à mars) pour faire fondre une partie de la neige. Malgré cela, la crue printanière a atteint le niveau habituellement observé sur les lieux même si, cette année, l'enneigement au sol était plus élevé que la normale. La neige au sol a fondu de façon progressive et lente, car il n'y a pas eu de précipitations de pluie significatives durant les mois d'avril et mai. En début mai, la neige sur le mont Orford était complètement fondue à l'exception des descentes de ski.

TABLEAU 5
Observation de la couverture de neige
du mont Orford

Lieux	Mi-mars 2001	mi- avril 2001	Début mai 2001
Au pied de la montagne	1,2 m	0,5 m	0,0 m
À la mi-hauteur de la montagne	1,7 m	1,4 m	0,0 m
Au sommet de la montagne	1,4 m	0,8 m	0,0 m

4 ACTIVITÉS HUMAINES

Les activités humaines ont modifié environ 20 % de la superficie totale du bassin versant du ruisseau Castle (37,7 km²). Les principales interventions humaines sont décrites dans le tableau ci-dessous. Le développement résidentiel, qui s'est concentré plus au sud du bassin, représente le plus grand changement. À l'état naturel, cette partie du bassin était boisée et le ruisseau se terminait en méandre et en marais. Maintenant, les méandres sont redressés et le marais asséché. De plus, le développement agricole a amené le déboisement des forêts pour la culture des champs et l'élevage du bétail. En troisième lieu, le déboisement pour l'aménagement des pentes de ski du parc du Mont-Orford occupe 1,6 % de la superficie du bassin versant. Toutes ces activités contribuent à l'augmentation de l'écoulement des eaux et, par conséquent, du transport des sédiments.

TABLEAU 6
Utilisation du sol

Utilisation du sol	Superficie approximative	Proportion du bassin versant du ruisseau Castle (37,7 km²)
Pentes de ski	60 ha	1,6 %
Autoroute 10 et échangeur	15 ha	0,3 %
Routes et chemins	25 ha	0,7 %
Voie ferrée	10 ha	0,3 %
Zone résidentielle et rues locales	305 ha	8,1 %
Sablrière	15 ha	0,4 %
Pâturage	150 ha	4,0 %
Culture	150 ha	4,0 %
Sous-total bassin modifié	730 ha	19,3 %
Bassin à l'état naturel	3 040 ha	80,7 %
Total	3 770 ha	100 %

5 HYDROLOGIE

Le ruisseau Castle prend sa source sur le mont Orford, le mont Alfred-Desrochers et le mont Giroux pour se terminer au lac Memphrémagog. La superficie du bassin versant du ruisseau Castle est de 37,7 km² (3 770 ha). Ce bassin versant comprend également le ruisseau Gagné et le ruisseau Des Chênes.

Le bassin de drainage, faisant l'objet de la présente étude, a son exutoire à la limite du parc du Mont-Orford et possède une superficie de 4,7 km² (473,8ha). Cette superficie provenant du parc du Mont-Orford représente donc 12 % du bassin versant du ruisseau Castle (voir annexe 1).

Étant donné qu'aucune donnée hydrologique n'est disponible sur le ruisseau Castle, la méthode rationnelle est utilisée pour déterminer les débits à l'exutoire du parc. Cette méthode est valide puisque que le bassin étudié a une superficie inférieure à la limite permise de 25 km².

La superficie du bassin de drainage comprend 12 % de descentes de ski (surface déboisée) et 88 % de boisé. Le relief du bassin est typique aux régions montagneuses. Le type de sol est composé de 34 % de substratum rocheux et de 66 % de till indifférencié, variant de mince à épais (de 25 cm et plus).

Selon la classification hydrologique des sols et de la végétation, un coefficient de ruissellement est déterminé pour deux cas : un milieu complètement boisé (état naturel) et la situation actuelle comprenant les descentes de ski. Le tableau ci-dessous présente les détails de cette caractérisation.

TABLEAU 7
Coefficient de ruissellement du bassin versant
(exutoire du parc du Mont-Orford)

Description	Classification Hydrologique des sols	Milieu à l'état naturel		Situation actuelle	
		Superficie	Cp	Superficie	Cp
Milieu boisé sur substratum rocheux	C	158,84 ha	0,43	141,11 ha	0,43
Milieu boisé sur till indifférencié	B	314,93 ha	0,26	272,13 ha	0,26
Descente ski sur substratum rocheux	C	0,00 ha		17,73 ha	0,56
Descente ski sur till indifférencié	B	0,00 ha		42,80 ha	0,39
Superficie du bassin versant		473,8 ha		473,8 ha	
Coefficient de ruissellement pondéré			0,317		0,334

Un coefficient de 0,317 est obtenu pour des conditions naturelles de ruissellement et un coefficient de 0,334 représente la situation actuelle. Donc, l'aménagement des descentes de ski augmente le coefficient de ruissellement d'environ 5 %.

Le temps de concentration du bassin, le temps que prendra l'eau de ruissellement pour parcourir la distance entre le point le plus éloigné et l'exutoire, a été évalué en considérant une longueur de cours d'eau de 3 885 m, une pente moyenne du cours d'eau de 9,6 %, ainsi que les coefficients de ruissellement pour les deux cas étudiés. Ces temps de concentration de 73,8 minutes et de 75,4 minutes correspondent respectivement à l'état naturel et à la situation actuelle. Donc, le déboisement des descentes de ski a augmenté de 2 % le temps de descente des eaux de ruissellement jusqu'à l'exutoire du parc.

Pour une récurrence annuelle (station météorologique de l'Aéroport de Sherbrooke), le débit de pointe est de 6,0 m³/s pour des conditions naturelles et de 6,4 m³/s pour la situation actuelle. Ce volume d'eau de ruissellement additionnel représente une augmentation de 7 %.

TABLEAU 8
Comparaison des débits de ruissellement
à l'exutoire du parc du Mont-Orford

	État naturel	Situation actuelle	Écart
Coefficient de ruissellement	0,317	0,334	5 %
Temps de concentration	73,8 min.	75,4 min.	2 %
Débit de pointe annuelle	6,0 m ³ /s	6,4 m ³ /s	7 %
Débit de pointe pour une récurrence de 2 ans	7,3 m ³ /s	7,8 m ³ /s	7 %

Les études antécédentes sur le bassin versant de l'embouchure du ruisseau Castle (situé au lac Memphrémagog) utilisaient la formule régionale basée sur l'écoulement des eaux de la rivière Coaticook (établi par le MEF). Ces débits sont décrits dans le tableau ci-dessous.

TABLEAU 9
Débits à l'embouchure du ruisseau Castle
Méthode de régression

Récurrence (ans)	Débit de crue (m³/s)	Débit d'étiage (m³/s)
2	11	0,095
5	15	0,064
10	18	0,050
20	20	0,040
50	23	0,031
100	26	0,025

Afin d'analyser l'influence du développement des activités récréatives du mont Orford sur les débits à l'embouchure du ruisseau Castle situé au lac Memphrémagog, l'équation classique de la méthode rationnelle est utilisée. Même si la superficie du bassin versant de 37,7 km² est légèrement supérieure à limite permise de 25 km², les résultats nous donnent une bonne évaluation des débits de ruissellement. Afin de vérifier cette hypothèse, les débits de la méthode rationnelle ont été comparés à ceux

Pour une même intensité de pluie, on obtient par calcul algébrique l'équation suivante :

$$\frac{Q_{\text{Orford}}}{Q_{\text{lac}}} = \frac{C_{\text{Orford}} A_{\text{Orford}}}{C_{\text{lac}} A_{\text{lac}}}$$

Par conséquent, la proportion du débit à l'exutoire du parc du Mont-Orford par rapport au débit à l'embouchure du ruisseau Castle est calculée pour les deux cas suivants :

Situation actuelle

$$\frac{Q_{\text{Orford}}}{Q_{\text{lac}}} = \frac{0,334 \times 474 \text{ ha}}{0,25 \times 3\,770 \text{ ha}} = 16,8\%$$

Situation à l'état naturel

$$\frac{Q_{\text{Orford}}}{Q_{\text{lac}}} = \frac{0,317 \times 474 \text{ ha}}{0,25 \times 3\,770 \text{ ha}} = 15,8\%$$

L'exemple suivant montre l'augmentation du débit à l'embouchure du ruisseau Castle causé par le développement du parc du Mont-Orford pour une période de récurrence de 2 ans.

$$Q_{\text{lac}} \text{ augmenté} = 11 \text{ m}^3/\text{s} (1 + 0,168 - 0,158)$$

$$Q_{\text{lac}} \text{ augmenté} = 11,1 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Augmentation} = \frac{Q_{\text{lac}} \text{ augmenté} - Q_{\text{lac}} \text{ initial}}{Q_{\text{lac}} \text{ initial}} = \frac{11,1 \text{ m}^3/\text{s} - 11,0 \text{ m}^3/\text{s}}{11,0 \text{ m}^3/\text{s}} = 1\%$$

L'étude hydrologique démontre bien que le déboisement des descentes de ski du mont Orford augmente le débit de 7 % à l'exutoire du parc. Cependant, ce ruissellement additionnel représente seulement 1 % du débit à l'embouchure du ruisseau Castle situé au lac Memphrémagog.

6 FONTE DE LA NEIGE

En période de fonte, le sol situé en dessous du couvert nival est gelé et imperméable. L'écoulement des eaux de fonte s'effectue par percolation jusqu'au sol imperméable et se dirige par la suite vers le ruisseau. La fonte de la neige résulte des facteurs météorologiques tels que la température et la pluie.

En étudiant l'évolution de la couverture de neige journalière de la station météorologique de l'Aéroport de Sherbrooke, on observe que la neige fond en moyenne de 2 cm/jour par temps ensoleillé et que la profondeur de neige peut diminuer de 15 cm/jour durant une averse. Les débits de fonte sont estimés pour les deux cas présentés. Pendant une averse, le débit de crue est alimenté par les eaux de fonte de la neige et les eaux de ruissellement de la pluie.

Estimation du débit pour la fonte de 2 cm de neige

Densité de la neige au sol = $\pm 0,35 \text{ g/cm}^3$

Masse d'eau de fonte = $0,35 \text{ g/cm}^3 \times 2 \text{ cm} \times 473,8 \text{ ha} = 3,317 \times 10^{10} \text{ g}$

Volume d'eau de fonte = $3,317 \times 10^{10} \text{ g} \div \text{densité de l'eau } (1 \text{ g/cm}^3) = 3,317 \times 10^{10} \text{ cm}^3$

Débit de fonte = $3,317 \times 10^{10} \text{ cm}^3 \div (3\,600 \text{ s} \times 24 \text{ h}) = \mathbf{0,38 \text{ m}^3/\text{s}}$

Estimation du débit pour la fonte de 15 cm de neige

Masse d'eau de fonte = $0,35 \text{ g/cm}^3 \times 15 \text{ cm} \times 473,8 \text{ ha} = 2,487 \times 10^{11} \text{ g}$

Volume d'eau de fonte = $2,487 \times 10^{11} \text{ g} \div \text{densité de l'eau } (1 \text{ g/cm}^3) = 2,487 \times 10^{11} \text{ cm}^3$

Débit de fonte = $2,487 \times 10^{11} \text{ cm}^3 \div (3\,600 \text{ s} \times 24 \text{ h}) = \mathbf{2,88 \text{ m}^3/\text{s}}$

Fabrication de la neige artificielle

Actuellement, le Centre de ski fabrique de la neige artificielle pour offrir des pistes de meilleure qualité à sa clientèle. Cette neige est soufflée principalement sur les descentes du mont Orford et sur les descentes du versant nord du mont Giroux. Le mont Alfred-Desrochers est complètement recouvert de neige naturelle. La neige artificielle est fabriquée pendant une période d'environ 60 jours par année, soit de la mi-novembre à la mi-janvier. Généralement, les pentes de ski sont recouvertes d'environ 1,2 mètre de neige compactée.

Les eaux qui servent à fabriquer la neige sont pompées de l'étang de la rivière aux Cerises. Elles représentent conséquemment un apport additionnel à l'hydrologie du bassin naturel. La consommation d'eau pour la production de la neige artificielle est décrite dans le tableau 10. Cette neige artificielle représente environ 15 % de la quantité de neige naturelle. La comparaison de ces quantités de neiges est montrée au tableau 11.

TABLEAU 10
Consommation d'eau pour la production de la neige artificielle

	Hiver 1997 – 1998	Hiver 1998 – 1999	Hiver 1999 - 2000	Hiver 2000 - 2001
Consommation d'eau	113 990 m ³	205 195 m ³	199 195 m ³	213 587 m ³

TABLEAU 11
Comparaison de la neige artificielle à la neige naturelle

	Hiver 1998 – 1999	Hiver 1999 – 2000	Hiver 2000-2001	Conditions moyennes
Neige artificielle (m ³ d'eau)	205 195	199 195	213 587	205 992
Neige naturelle (cm)	118,2	325,1	345,3	292,9
Neige naturelle (m ³ d'eau)	560 032	1 540 324	1 636 031	1 387 760
Proportion de neige artificielle	37 %	13 %	13 %	15 %

Neige naturelle (m³ d'eau) = Hauteur de neige naturelle x 473,8 ha x 10

Les eaux pompées de l'étang aux Cerises s'accumulent graduellement sur le couvert de neige des pistes de ski et forment une couche épaisse et très compactée. Pendant la période de fonte, la neige artificielle prend beaucoup plus de temps à disparaître. La neige sur les descentes de ski peut prendre de 2 à 3 semaines de plus à fondre que la neige située dans la forêt. Par conséquent, la fabrication de la neige artificielle n'augmente pas les débits de crue dans le cours d'eau, puisque ces eaux de fonte s'écoulent après la période de crue.

7 SÉDIMENTOLOGIE

À la surface du globe agissent plusieurs agents érosifs, résultant des interactions entre l'atmosphère et la biosphère, du travail des eaux courantes, du climat et de bien d'autres facteurs. L'environnement et les paysages ne sont pas statiques. Ils sont continuellement en évolution, tendant vers un état d'équilibre. Par exemple, une rivière qui érode son lit abaisse lentement son profil, de façon à atteindre un niveau de base, soit son altitude à l'embouchure. Chacun des agents érosifs n'a pas la même importance selon les régions.

Processus de l'érosion en milieu montagneux

Sur les territoires montagneux, les affleurements rocheux, les pentes abruptes, le faible couvert végétal et les minces couches de sol sont tous des facteurs qui contribuent au détachement des matériaux et causent des problèmes d'érosion par ruissellement.

L'action érosive de l'eau sur les versants commence par l'impact des gouttes de pluie sur le sol. La répétition constante de ces impacts rompt les mottes de terre et rend la couche superficielle du sol très visqueuse. Ensuite, l'eau de pluie peut s'infiltrer dans le sol ou s'écouler en surface. Le ruissellement parvient à déplacer les particules fines des sols. En région montagneuse, les affleurements rocheux et les pentes abruptes absorbent moins l'eau de pluie et contribuent à augmenter l'écoulement de surface. Les sédiments alors arrachés et transportés finiront leur voyage au bas des pentes en passant par les multiples rigoles qui se sont formées. À partir d'une pente de 7 à 8 %, les versants d'un bassin en milieu montagneux fournissent souvent la majeure partie des matériaux transportés. Les sédiments ne proviennent plus que du lit du ruisseau, mais de l'ensemble des surfaces du ruissellement.

Une fois les sédiments pris en charge par le ruisseau, c'est l'action hydraulique de l'eau courante qui agit comme agent érosif. L'écoulement de l'eau dans le ruisseau exerce une pression et une traction sur les grains du lit du cours d'eau et de ses berges. Plus la vitesse du courant est grande, plus grand sera l'arrachement des grains par l'action

hydraulique et l'abrasion. Au cours d'une année, c'est particulièrement au printemps, durant la période de crue, que l'érosion par les eaux courantes est la plus active. L'énergie d'écoulement est assez élevée pour garder de gros grains en suspension tels que les sables.

Les tronçons supérieurs d'un cours d'eau sont généralement des zones où l'érosion est plus forte. Les pentes des terrains montagneux accentuent la vitesse d'écoulement et par conséquent le taux d'érosion. L'eau y ruisselle avec force, ce qui fait que l'érosion du lit et des berges y est très marquée.

Dans les méandres, l'érosion y est habituellement moins active, car les vitesses sont plus faibles. Par contre, le courant peut maintenir les matières en suspension acquises en montagne jusqu'à l'embouchure du ruisseau Castle situé au lac Memphrémagog. Une fois arrivés au lac, la vitesse devient presque nulle et les sédiments s'y déposent. Par conséquent, un delta se forme à cet endroit.

Études antécédentes

L'étude d'impact sur l'environnement du projet d'ensablement des plages de la région de Magog (1990) indique que les charges totales moyennes annuelles du ruisseau Castle ont été évaluées à 335 tonnes. Cette quantité est basée sur la campagne de mesures réalisée par Roche Ltée, le 7 mai 1987. À ce moment, un débit de 0,6 m³/s (vitesse d'écoulement de 10 à 15 cm/s) et une concentration variant de 1 à 4 mg/L de matières en suspension ont été mesurés à l'embouchure du ruisseau Castle situé au lac Memphrémagog. En se basant sur les mêmes conditions de crue (période et intensité) qu'en 1978, année de référence retenue lors de l'approximation préliminaire effectuée dans le cadre de l'étude de faisabilité de la plage et de la marina (Roche Ltée, 1986), le débit mesuré cette journée correspond à des conditions hydrologiques moyennes durant l'année (à l'exception du printemps).

L'hypothèse qui a été faite pour déterminer la quantité de sédiments transportés annuellement est que 80 % de la charge sédimentaire sont transportés durant la période de crue printanière.

Selon l'étude réalisée par MCI (1998), la sédimentation dans les baies du lac Memphrémagog suit un processus très lent puisque les observations faites sur les photographies aériennes de 1945 et 1985 montrent un rehaussement du delta très faible. On indique un dépôt moyen de 1 mm d'épaisseur par année.

Campagne d'échantillonnage et un suivi visuel

Une campagne d'échantillonnage et un suivi visuel en période de fonte et de pluie nous ont permis d'observer le comportement du ruisseau Castle. Le tableau 12 montre les quantités de matières en suspension qui ont été mesurées. Les filtres utilisés pour déterminer la concentration des matières en suspension (MES) possèdent des ouvertures de pores variant de 1,2 à 1,5 micromètre. Les échantillons ont été pris avant et après les travaux réalisés au parc du Mont-Orford à l'automne 2000.

Pour des conditions d'écoulement normal, l'eau est très claire et il n'y a pas de sédiments en suspension. Pendant une averse, l'augmentation du débit du ruisseau entraîne des grains de très petites dimensions (argile et silt). Malheureusement, la rareté des pluies au début du mois du mai 2001 nous a empêchés d'échantillonner pendant des conditions hydrologiques semblables au 15 septembre 2001. Par conséquent, nous n'avons pas pu quantifier la diminution des sédiments charriés au ruisseau à la suite des travaux de l'automne 2000. Cependant, nous sommes persuadés que ces travaux contribuent à diminuer l'apport en sédiments en période de pluie.

Durant la période de fonte, l'écoulement est légèrement supérieur à la normale. L'eau est d'apparence jaunâtre, mais la quantité de sédiments transportés est négligeable. C'est pendant la crue printanière que la majeure partie des sédiments est charriée par les forces de l'écoulement torrentiel. À ce moment, on peut observer visuellement l'eau chargée de sédiments de gros diamètre tels que le sable.

TABLEAU 12
Échantillonnage des matières en suspension

Date de prélèvement	Matières en suspension (mg/L)				Description de l'écoulement et de l'apparence de l'eau
	Mont Alfred-Desrochers	Mont Orford	Rencontre des deux ruisseaux	Limite du parc du Mont-Orford	
Avant les travaux du mont Orford					
6 sept. 2000	< 2	< 2	< 2	< 2	Écoulement normal Eau très claire
15 sept. 2000	5	12	15	18	Écoulement durant une averse Eau brouillée
Après les travaux du mont Orford					
18 avril 2001	2	< 1	1	< 1	Écoulement durant la fonte de la neige Eau d'apparence jaunâtre
24 avril 2001	59	90	99	103	Écoulement durant la crue printanière Eau chargée de sédiments grossiers (sable)

Charge sédimentaire

Plusieurs formules empiriques permettent d'évaluer la quantité de sédiments transportée dans un cours d'eau. Cependant, ces formules ont été développées pour des bassins versants bien déterminés situés surtout aux États-Unis et elles sont sujettes à des erreurs considérables. En effet, la suspension des particules est très variable d'une crue à l'autre, ce phénomène dépend également du site étudié et de la morphologie de chacun des bassins versant. Par conséquent, la méthode de l'échantillonnage est choisie pour estimer l'ordre de grandeur des apports solides annuels du bassin étudié.

Pour déterminer la charge sédimentaire annuelle, les considérations suivantes ont été prises :

- en analysant les hauteurs de pluie horaire de la station métrologique de l'Aéroport de Sherbrooke pour les années 1998 à 2001, la pluie du 15 septembre 2000 est représentative de l'ensemble des averses des trois dernières années et la durée moyenne de ces pluies est d'environ 6 heures;
- tel que montré au tableau 2, la normale climatique pour le nombre de jours de pluie est de 114;
- pendant les écoulements normaux et les écoulements en période de fonte de la neige, le charriage de sédiments est négligé;
- pendant les averses, nous utiliserons comme hypothèse que la concentration de MES est semblable à l'échantillonnage réalisé le 15 septembre 2000, malgré les travaux correctifs réalisés à l'automne 2000;
- la crue printanière dure environ 4 jours;
- pendant les prélèvements d'échantillonnage, les débits ont été évalués de façon approximative en mesurant la vitesse d'écoulement du ruisseau.

Les tableaux 13 e 14 résument bien l'évaluation de la charge sédimentaire du ruisseau Castle. L'équation pour déterminer le débit solide du ruisseau Castle est la suivante :

$$Q_s = K C Q$$

- où
- Q_s : débit solide en t/j
 - K : constante d'unité = 0,0864
 - C : concentration de MES en mg/L
 - Q : débit liquide en m³/s

TABLEAU 13**Débit solide du ruisseau Castle
à l'exutoire du parc du Mont-Orford**

Description de l'écoulement	MES	Débit estimé	Débit solide
Écoulement normal	0	0,1 m ³ /s	Nul
Écoulement en période de fonte	0	0,4 m ³ /s	Négligeable
Écoulement durant une averse	18 mg/L	1,1 m ³ /s	1,7 t/j
Écoulement en période de crue	103 mg/L	6,4 m ³ /s	57,0 t/j

TABLEAU 14**Charge sédimentaire du ruisseau Castle
à l'exutoire du parc du Mont-Orford**

Description de l'écoulement	Débit solide (tonnes / jour)	Période	Charge sédimentaire
Écoulement durant une averse	1,7	114 j x 6 h/24h	48 t
Écoulement en période de crue	57,0	4 j	228 t
Total annuel			276 t

La charge sédimentaire est estimée à 276 tonnes par année. La problématique de l'érosion du ruisseau Castle est surtout reliée à la crue printanière et aux conditions défavorables du milieu montagneux de la région.

Le déboisement des descentes de ski et la fabrication de la neige artificielle sur le mont Orford ont peu d'influence sur le débit de crue printanière. Par conséquent, même si le mont Orford était complètement boisé, le charriage de sédiments serait sensiblement identique à la situation actuelle. En effet, les conditions naturelles du milieu montagneux sont les principaux facteurs de l'érosion du ruisseau Castle.

8 TRAVAUX RÉALISÉS À L'AUTOMNE 2000

Les travaux réalisés à l'automne 2000 ont pour objectif de diminuer l'apport des sédiments au ruisseau Castle. Les principaux problèmes d'érosion rencontrés étaient causés par le ruissellement des eaux sur des surfaces gravelées dans les stationnements 1 et 2 du Centre de ski du Mont-Orford, par le ravinage le long de certains tronçons de la route qui monte jusqu'au sommet de la montagne et par la détérioration des deux bassins de sédimentation existants. Ces travaux sont décrits comme suit :

- paver le stationnement n° 1 et une partie du stationnement n° 2 pour diminuer l'apport de sédiments par le ruissellement direct sur les surfaces gravelées;
- installer des régulateurs de débit dans chacun des puisards du stationnement n° 1 pour maintenir un débit d'évacuation équivalent à un débit à l'état naturel (sans pavage);
- effectuer des travaux de drainage et de stabilisation pour éliminer les foyers de ravinage le long du chemin qui monte au sommet de la montagne (la section problématique part du chalet de ski jusqu'à la section communément appelée «le fer à cheval»);
- effectuer des travaux correctifs au bassin de sédimentation érigé au pied du versant est du mont Giroux afin d'améliorer son efficacité;
- reconstruire le bassin de sédimentation du stationnement n° 1, le service d'entretien du mont Orford récupère environ 65 m³ de sédiments par année dans ce bassin;
- installer un égout pluvial et une bordure dans le stationnement n° 2 permet de drainer les eaux de surface de ce stationnement vers le bassin versant de la rivière aux Cerises;
- construire des fossés de déviation le long de la descente de ski « la 4 km » qui dirigent l'eau vers la végétation.

Tous ces travaux diminueront l'apport en sédiments dans le ruisseau Castle. À chaque année, environ 75 m³ de gravier (8 à 10 voyages) étaient étendus pour stabiliser les chemins et les stationnements du mont Orford. Les travaux de stabilisation auront pour effet de diminuer considérablement ce volume de gravier qui finalement aboutissait dans le ruisseau Castle.

À la suite de nos observations, le bassin de sédimentation de mont Giroux a une bonne efficacité. Pendant que la concentration de MES du ruisseau Castle était de 18 mg/L, l'eau sortant de ce bassin était très claire. D'autre part, le bassin de sédimentation du mont Orford retient les sédiments durant les averses, cependant il est trop petit pour retenir les sédiments en période de crue printanière.

9 SOLUTION ÉTUDIÉE

À la suite de la réalisation de tous les travaux correctifs pour diminuer l'apport en sédiments au ruisseau Castle, il est évident que la forte crue printanière continuera à éroder le lit et les berges du ruisseau. Par conséquent, dans cette section, nous évaluerons la pertinence de détourner une partie des eaux de crue dans le bassin de la rivière aux Cerises ou d'ériger un nouveau bassin en aval de la confluence des deux branches du ruisseau, en arrière des bâtiments de service du mont Orford.

9.1 Détournement des eaux

Selon la topographie des lieux, il serait en effet possible de détourner une partie du débit de la crue printanière du ruisseau Castle vers le bassin de la rivière aux Cerises. Cela impliquerait la construction d'un ponceau en dessous du chemin du Parc pour diriger les eaux déversées en trop-plein vers le bassin de la rivière aux Cerises.

Cette solution a été proposée parce que les eaux qui servent à fabriquer la neige proviennent de l'étang de la rivière aux Cerises. Le détournement des eaux de fonte en période de crue printanière permettrait de retourner ces eaux à leur origine.

Les eaux de la neige artificielle sont pompées en hiver durant les mois de novembre à janvier. Durant cette saison, les débits dans le ruisseau Castle et la rivière aux Cerises sont très faibles. Au printemps, le débit de la rivière aux Cerises n'est pas influencé par la fabrication de la neige artificielle. En effet, l'écoulement des eaux demeure le même puisque le couvert de neige et la captation des eaux de pluie du bassin versant de la rivière aux Cerises restent identiques.

Par conséquent, le fait de détourner les eaux en période de crue printanière vers le bassin versant de la rivière aux Cerises aura comme effet d'augmenter le débit de pointe et d'aggraver les problèmes d'érosion déjà présents sur cette rivière.

De plus, le document du BAPE indique (p.76) qu'il faut prendre les moyens pour contrer toute augmentation du niveau trophique de la partie nord du lac Memphrémagog notamment par la réduction de la charge sédimentaire en provenance de la rivière aux Cerises et du ruisseau Castle. Donc, les ouvrages de détournement de crue vers le bassin de la rivière aux Cerises sont à déconseiller.

9.2 Bassin de sédimentation

Une autre solution est d'ériger un nouveau bassin de sédimentation en aval de la confluence des deux branches du ruisseau, en arrière des bâtiments de service du mont Orford. Le rôle de ce bassin est de retenir les sédiments emportés par les eaux de pluie et de fonte de la neige.

Pour ce type d'ouvrage, il est recommandé de concevoir le bassin pour retenir toutes les particules ayant un diamètre supérieur à 20 μm . La superficie et la profondeur de la zone de décantation sont déterminées afin de permettre aux sédiments en suspension de se déposer au fond du bassin avant qu'ils atteignent l'exutoire. Ces dimensions dépendent également du débit de sortie.

Pour retenir tous les sédiments en période de crue printanière (débit annuel de 6,4 m³/s), il faudrait construire un grand bassin de sédimentation possédant une superficie d'environ 27 000 m² et les dimensions suivantes :

- une longueur de 540 mètres;
- une largeur de 50 mètres;
- une hauteur de 3 mètres.

Cette grandeur de bassin de sédimentation est requise pour diminuer la vitesse d'écoulement permettant la décantation des particules en suspension. Cette solution est très efficace, mais le coût de construction de cet ouvrage est très dispendieux. La réalisation de ce bassin de sédimentation nécessitera un investissement d'environ 2 millions \$. Par ailleurs, l'accumulation du dépôt à l'intérieur de ce bassin s'effectuera de façon très lente, soit d'environ un demi-millimètre par année.

10 CONCLUSION

Les problèmes de l'érosion du ruisseau Castle sont reliés principalement par les conditions dynamiques du milieu montagneux et par les activités humaines étendues sur tout le bassin versant. La majeure partie des sédiments est prise en charge et transportée par la crue printanière qui ne dure que quelques jours.

L'étude hydrologique a démontré que l'apport hydrique additionnel dû aux aménagements du Centre de ski représente une faible augmentation de 1 % à l'embouchure du ruisseau Castle.

La fabrication de la neige artificielle n'augmente pas le débit de crue printanière puisqu'elle fond après cette période. Donc, elle ne contribue pas davantage à l'érosion du lit du ruisseau.

La campagne d'échantillonnage et le suivi visuel en période de fonte et de pluie ont permis de constater, lorsque l'écoulement est normal, que le transport des sédiments n'est pas très significatif. L'apport des sédiments s'effectue surtout durant la crue printanière et les quantités charriées représentent une sédimentation très lente (un rehaussement de 1 mm par année dans le delta du lac Memphrémagog).

Les travaux correctifs réalisés au parc du Mont-Orford à l'automne dernier contribueront à diminuer l'apport des sédiments en période de pluie, mais n'empêcheront pas l'érosion du ruisseau lors de la crue printanière.

Pour remédier à l'érosion du printemps, le détournement des eaux dans le bassin versant de la rivière aux Cerises est à déconseiller afin de préserver son intégrité. La construction d'un grand bassin de sédimentation à même le ruisseau Castle est une solution très efficace, mais très dispendieuse (un coût de construction d'environ 2 millions \$).

Les représentants du ministère de la Faune et des parcs du Québec devront évaluer si leur budget permet un tel investissement. Par contre, il ne faut pas oublier que la majeure partie des sédiments charriés provient de phénomènes naturels et que le processus de sédimentation est très lent. En effet, les activités du Centre de ski du Mont-Orford ont peu d'impact sur l'érosion du ruisseau Castle en période de crue printanière. Même si le couvert du mont Orford était complètement boisé, le ruissellement des eaux de surface entraînerait quand même des quantités de sédiments équivalentes à celles qui ont été observées cette année (avec le déboisement des descentes de ski). Par ailleurs, tous les ruisseaux du Québec charrient des sédiments, même les lacs, où le courant est pourtant faible, en contiennent. C'est la vitesse de l'évolution des ruisseaux qui varie d'un site à l'autre.

ANNEXE 1

Bassins versants du ruisseau Castle