

APPLICATION D'UN SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE À L'ANALYSE CARTOGRAPHIQUE DES BERGES SENSIBLES À L'ÉROSION (RIVIÈRE DU LIÈVRE, QUÉBEC, CANADA)

Diane SAINT-LAURENT et Marc SCHNEIDER

Résumé

Cette étude porte sur l'analyse et la cartographie des berges de la rivière du Lièvre (Québec), lesquelles sont affectées à divers degrés par l'érosion fluviale. On propose une approche méthodologique qui fait appel à l'application d'un système d'information géographique (SIG), en utilisant l'analyse multicritère avec pondération de divers paramètres (nature des matériaux meubles, pente et hauteur des berges, tracé de la rivière et occupation du sol). L'analyse permet d'élaborer une carte thématique regroupant différentes classes de sensibilité (forte, moyenne et faible) des berges à l'érosion dans le secteur d'étude. Pour l'ensemble, environ 16% des berges présentent une forte sensibilité à l'érosion riveraine, 60% une sensibilité moyenne et le reste des berges (24%) est classé parmi les berges ayant une faible sensibilité à l'érosion. Enfin, cette carte thématique sur l'érosion des berges se présente comme un outil d'aide à la décision pour la gestion et l'aménagement du territoire.

Mots-clés

Érosion des berges, analyse multicritère, système d'information géographique (SIG), cartographie thématique, rivière du Lièvre, Québec, Canada

Abstract

This study proposes an approach based on a multicriteria analysis of the banks of the Lièvre River (Québec) which are affected at various degrees by fluvial erosion. The methodological approach rests on the use of Geographic Information System (GIS) with multicriterion analysis where different variables involved in bank erosion (nature of deposits, height and slope of banks, channel pattern, land uses are weighed. The analysis allows us to elaborate a map of bank erosion sensitivity (strong, medium and weak). The map realised by stacking five maps and by adding the value of parameter (ponderation) obtained with the multicriterion analysis. The major bank erosion forms observed at Lièvre River are the undercutting of the lower bank, shallow slips (by gravity) and landslides in clay height slopes generally caused by flows forces, water waves (induced by wind or motorized boats) and ice. Among the studied researches, about 16% of banks present a strong sensitivity to the riverbank erosion, 60% a medium sensitivity and the rest of banks (24%) are considered as having a weak sensitivity. Finally, the map on the erosion of banks appears as an additional tool of help in the management decision and regional development.

Keywords

bank erosion, multicriteria analysis, Geographic information system (GIS), thematic map, Lièvre River, Québec, Canada

INTRODUCTION

Il existe de nombreux travaux sur les phénomènes et processus d'érosion des berges (Thorne, 1982 ; Lawson, 1985 ; Reid, 1985 ; Nanson et Hickin, 1986 ; Gatto, 1988, 1990 ; Beven et Carling, 1989 ; Lawler, 1992, 1993 ; Calow et Petts, 1994 ; Stott, 1997 ; Knighton, 1998). Certains travaux ont porté sur la dynamique fluviale et les processus d'érosion/sédimentation des rivières et des cours d'eau. D'autres travaux se sont davantage intéressés au transport des charges sédimentaires, notamment en région nordique (Penner et Sweldo, 1974 ; Bray, 1975 ; Beven et Carling, 1989 ; Reid, 1985 ; Saint-

Laurent, 1999 ; Saint-Laurent et Guimont, 2000). Enfin, d'autres études ont porté plus spécifiquement sur l'évaluation des taux d'érosion des berges en appliquant des modèles numériques ou photogrammétriques (Gatto, 1990 ; Barker *et al.*, 1997 ; Denis, 1998 ; Saint-Laurent *et al.*, 1996, 2001, 2002). Bien qu'on mentionne une multitude de facteurs qui participent à l'érosion des berges (ruissellement, sapement, cycle gel/dégel, dessiccation...), il faut reconnaître que l'action des vagues, des courants et des glaces jouent souvent un rôle prédominant (Penner et Sweldo, 1974 ; Williams *et al.*, 1979 ; Lawson, 1985 ; Reid, 1985 ; Gatto, 1988 ; Denis, 1991 ; Saint-Laurent et Guimont, 2000 ; Saint-Laurent *et al.*,

2001). Par ailleurs, certaines caractéristiques morphométriques (matériaux friables, pentes abruptes...) peuvent accentuer les processus d'érosion (Lawler, 1993 ; Knighton, 1998).

Les phénomènes d'érosion fluviale sont fréquents et affectent de nombreuses rivières ou cours d'eau, notamment dans les régions recouvertes d'importantes étendues argileuses. Au Québec, par exemple, les phénomènes d'érosion sont principalement localisés le long des cours d'eau dont les berges sont constituées de dépôts argileux d'origine marine. Ces dépôts marins, qualifiés « d'argiles sensibles » (Mitchell et Eden, 1972 ; Mitchell et Markell, 1974 ; Eden, 1977 ; Williams *et al.*, 1979 ; Carson et Lajoie, 1981 ; Catto *et al.*, 1981 ; Locat, 1982 ; Tavenas, 1984 ; Evans et Brook, 1994), sont en effet à l'origine de nombreux glissements de terrain et coulées argileuses le long des rives. Dans la région outaouaise, notamment, plusieurs cours d'eau et rivières sont affectés par ces phénomènes d'érosion (Gadd, 1976 ; Levasseur et Rissmann, 1984, Théberge, 1985, 1986 ; Clouâtre *et al.*, 1996). Dans le secteur Thurso-Buckingham, par exemple, la superficie affectée par les phénomènes de glissements ou de coulées le long des terrasses argileuses est de l'ordre d'environ 150 à 200 km², soit près de 10 à 15% de ce secteur (Levasseur et Rissmann, 1984). Les processus à l'origine de l'érosion des berges sont multiples et agissent le plus souvent de façon concomitante. On observe, en effet, des éboulements ou des décrochements superficiels le long des pentes, du sapement à la base des talus ou encore des mouvements de terrain importants (glissements, coulées), livrant ainsi au cours d'eau plusieurs tonnes de matériaux. À titre d'exemple, les glissements de terrain datés de 1903 et 1908 sur la rivière du Lièvre (secteurs Poupore et Notre-Dame-de-la-Salette) auraient affecté respectivement 40,0 et 2,4 hectares de rive (Ells, 1904, 1908 ; Mitchell et Markell, 1974). Les glissements de terrain et leurs conditions de formation ont d'ailleurs fait l'objet de divers travaux dans la région outaouaise (Mitchell et Eden, 1972 ; Mitchell et Markell, 1974 ; Gadd, 1976 ; Levasseur et Rissmann, 1984). Ces auteurs ont recensé au moins deux grands types de glissements dans les dépôts argileux de la région, soit le glissement rotationnel simple, soit le glissement rotationnel rétrogressif ou coulée. Malgré leur degré de consistance, ces dépôts argileux (argiles sensibles) sont très vulnérables aux glissements de terrain, en raison notamment de leurs caractéristiques granulométriques et stratigraphiques, comme le mentionne Gadd (1976, p. 6) : « ...*Commonly in this area marine clay is overlain by saturated sand and therefore is in a highly saturated state, susceptible to liquefaction* ». Bien que de tels mouvements de terrain peuvent se produire à tout moment, les périodes les plus critiques se produisent généralement lorsque les matériaux sont gorgés d'eau, soit au printemps lors du dégel et de la fonte des neiges ou lors de fortes précipitations, entraînant une saturation rapide des matériaux et augmentant d'autant l'instabi-

lité des talus riverains (Mitchell et Eden, 1972 ; Mitchell et Markell, 1974 ; Finlay *et al.*, 1979 ; Reid, 1985).

Contexte de l'étude

La présente étude s'inscrit dans le cadre d'une étude environnementale portant sur la région administrative de l'Outaouais, coordonnée par le ministère de l'Environnement du Québec (MEQ). Notre étude vise principalement à développer une approche méthodologique menant à l'élaboration d'un document cartographique identifiant les berges sensibles à l'érosion riveraine, en appliquant l'analyse multicritère et un système d'information géographique (SIG). Soulignons que cette approche méthodologique a été proposée par le ministère (MEQ) dans le cadre de son projet pilote qui vise plus spécifiquement l'intégration des données du Cadre écologique de référence (CER) dans l'élaboration des schémas d'aménagement de la région administrative de l'Outaouais (Gerardin, 1996), et ce, dans le but d'uniformiser l'ensemble des approches méthodologiques pour tout ce territoire. L'un des objectifs de notre étude est donc de fournir une cartographie simple mais détaillée des zones sensibles à l'érosion riveraine pour l'usage des gestionnaires et responsables municipaux de cette région (Schneider, 1999 ; Saint-Laurent 2000). Par ailleurs, cette cartographie peut servir de document de référence aux municipalités régionales de Comté (MRC) pour l'identification des zones à risques naturels, lesquelles zones doivent s'inscrire dans les schémas d'aménagement du territoire. Enfin, la rivière du Lièvre a été choisie pour cette étude puisqu'elle constitue l'une des principales rivières de cette région et qu'elle présente des zones à risques élevés de glissements de terrain en rive.

I. CADRE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE

La zone étudiée couvre la basse vallée de la rivière du Lièvre qui forme avec la rivière Gatineau les deux principaux tributaires de la rivière des Outaouais (figure 1). Cette dernière délimite la frontière du Québec et de l'Ontario sur le versant sud-ouest. Toute cette région comprend deux grandes zones de contacts physiographiques, l'une formée par le Bouclier laurentidien, au nord, et l'autre par les Basses-Terres du Saint-Laurent, au sud (Hébert, 1988 ; Vincent, 1989). Prenant sa source dans les hautes terres du massif laurentien, la rivière du Lièvre s'écoule du nord vers le sud sur une distance de près de 330 km. Le cours supérieur de la rivière recoupe essentiellement le rebord méridional du Bouclier, tandis qu'en aval, son encaissement se prolonge dans les terrasses argileuses des Basses-Terres du Saint-Laurent, et termine son parcours dans la rivière des Outaouais, en aval de la municipalité de Buckingham. La superficie totale du bassin de la rivière du Lièvre est de 9 588 km² et son débit annuel moyen est de l'ordre de 164 m³/s à l'embouchure. La rivière est caractérisée par un régime pluvio-nival qui se traduit par des crues printanières

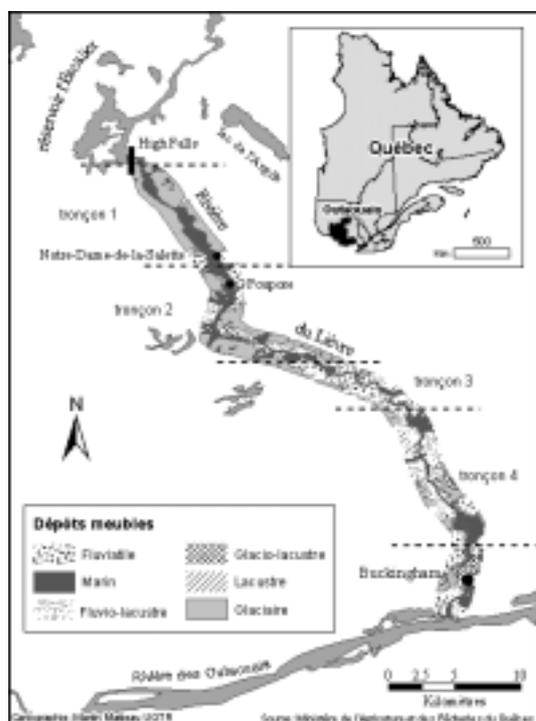


Figure 1. Carte de localisation de la rivière du Lièvre (secteur sud) dans la région de l'Outaouais (Québec, Canada). La répartition des dépôts meubles le long des rives est représentée sur la carte

Sources : Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec (1992) et Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (2002).

(avril-mai) de l'ordre de 234,5 m³/sec (période 1957-1987) à la hauteur du barrage Masson et une période d'étiage (août-septembre) de l'ordre de 132,1 m³/s (station 02LF003, Environnement Canada, 2002). Malgré ces variations annuelles, le débit de la rivière demeure partiellement contrôlé par les réservoirs situés en amont (L'Escalier, Poisson Blanc) qui alimentent les centrales hydroélectriques dont la centrale High Falls. Le tableau 1 fournit quelques caractéristiques générales de la rivière du Lièvre et la figure 2 présente son profil longitudinal depuis le barrage de High Falls.

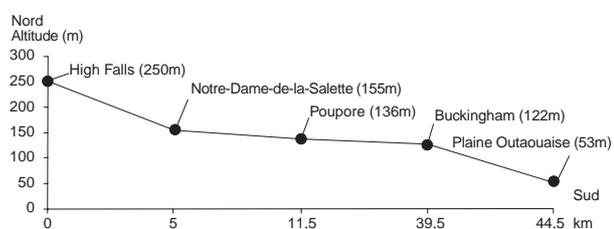


Figure 2. Profil longitudinal de la rivière du Lièvre dans son cours inférieur, entre le barrage High Falls et la ville de Buckingham

Caractéristiques	Description
Largeur moyenne de la rivière	15 mètres
Profondeur de la rivière ⁽¹⁾	Entre 4,7 et 14 mètres
Sens de l'écoulement	Nord-sud
Orientation générale	NW-SE
	NWN-SSE
Tracé de la rivière	Linéaire (4 km en amont de Buckingham) (entre le 5 et 7 km en aval de High Falls)
	Sinueux (entre High Falls et Notre-Dame-de-la-Salette)
	Méandrique (entre Notre-Dame-de-la-Salette et Poupore)
Puissance hydroélectrique (rivière du Lièvre et ses tributaires)	238 MW

⁽¹⁾ Source : MRC des Collines-de-l'Outaouais, Plan de développement intégré des rivières Gatineau et du Lièvre, Document synthèse.



Figure 3. Photographie aérienne illustrant des glissements de terrain et des décrochements en aval (8-10 km) de Poupore

En ce qui a trait à la géologie de surface, la rivière du Lièvre traverse différents types de matériaux meubles, dont les dépôts glaciaires, glacio-lacustres, deltaïques et marins essentiellement. Toutefois, les berges du cours inférieur de la rivière (soit en aval de High Falls) sont constituées surtout de dépôts argileux ou limono-argileux d'origine marine (figure 1). On observe d'ailleurs à divers endroits le long des rives des glissements de terrain et des décrochements qui témoignent de l'instabilité des berges (figure 3). Les dépôts argileux s'observent jusqu'à la hauteur du barrage de High Falls, qui marque en quelque sorte la limite nord de l'extension marine de la Mer de Champlain (figure 4). Cette mer postglaciaire a occupé la vallée du Saint-Laurent, entre Ottawa et Québec, entre 12 et 9,5 ka (Elson, 1969). Entre le barrage de High Falls et Notre-Dame-de-la-Salette, les terrasses argileuses peuvent atteindre facilement 10 à 15 mètres de hauteur et l'épaisseur des dépôts meubles peut atteindre 28 m (Levasseur et Rissmann, 1984). En amont de Buckingham, la rivière circule principalement dans des terrasses sableuses ou sablo-graveleuses ou dans des terrasses argileuses ou limono-argileuses,

caractérisées par la présence de bourrelets d'anciens glissements. Dans la portion en aval de High Falls, la rivière recoupe des affleurements rocheux ou des dépôts glaciaires, alors qu'en aval, notamment entre Notre-Dame-de-la-Salette et l'écluse de Poupore, la présence de ces formations rocheuses devient beaucoup plus sporadique. On peut observer des formations de roches sédimentaires à divers endroits dans le secteur aval de la rivière, soit à quelques kilomètres en amont de Buckingham sur la rive droite de la rivière. Ces affleurements prennent le plus souvent la forme d'une surface rocheuse tabulaire et dénudée. Enfin, des dépôts deltaïques et alluviaux sont observés à l'embouchure de la rivière et ces derniers prennent la forme de placages ou bancs de sable abandonnés sur le replat des terrasses argileuses.

II. APPROCHES ET MÉTHODES

Bien qu'il existe de nombreux travaux concernant l'érosion des berges, très peu ont exploré les méthodes se rapportant à l'analyse multicritère et à l'application d'un système d'information géographique (SIG). Dans ce do-

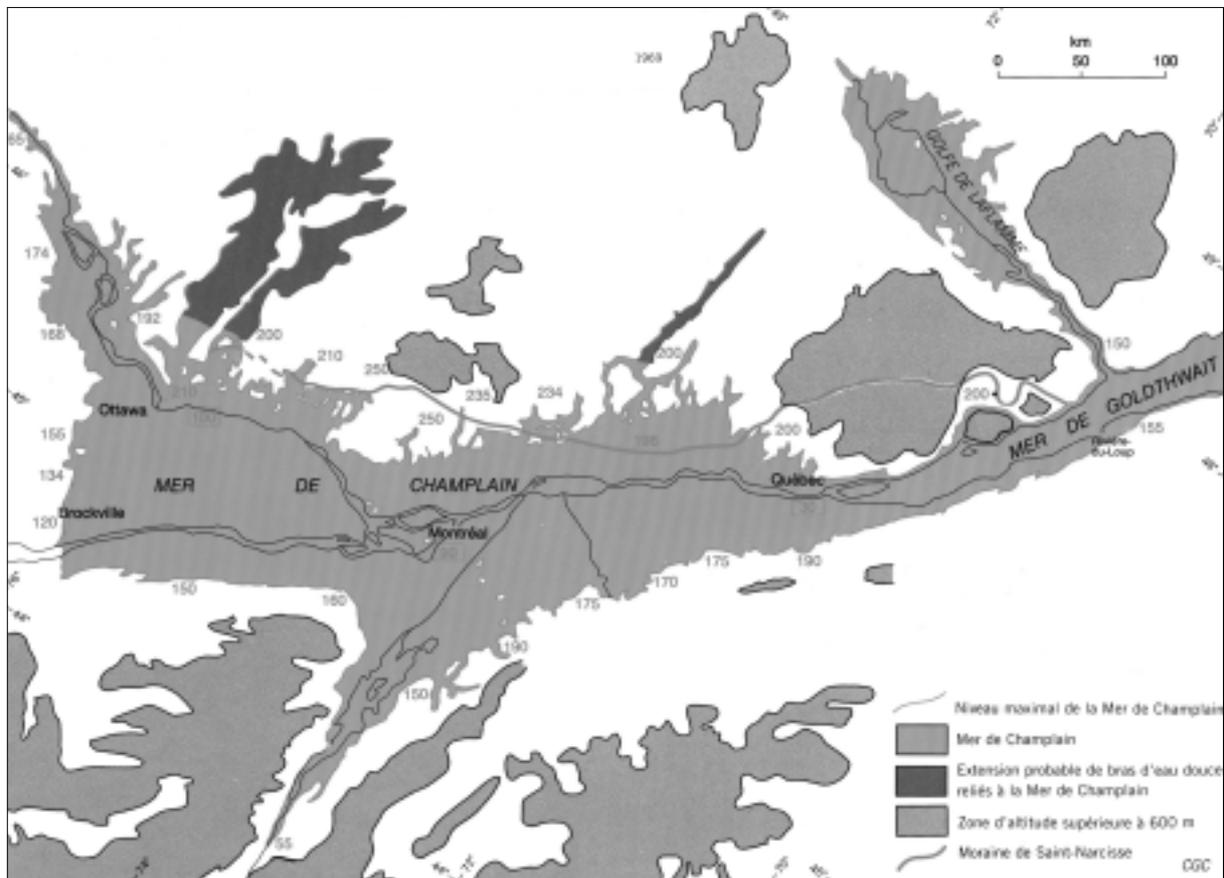


Figure 4. Extension de la limite supérieure de la Mer de Champlain dans la vallée du Saint-Laurent.
Source : In Quatenaire du Canada et du Groenland, chapitre 4, 1989, carte modifiée par les auteurs.

maine, les travaux utilisant ces méthodes se rapportent principalement à l'étude des glissements de terrain et des mouvements de masse en général (Gupta et Jochi, 1990 ; Carrara, 1991 ; Leroi et Rousseau, 1992 ; Desmet et Govers, 1994 ; Fares *et al.*, 1994 ; Scanvic, 1994 ; Clouâtre *et al.*, 1996). L'utilisation de ces méthodes a permis entre autres de regrouper des données multiples et de reproduire des documents cartographiques illustrant les zones à risques élevés (glissements de terrain, éboulis...), en sélectionnant différents paramètres physiques (pente, faciès lithologique...) (cf. Fares *et al.*, 1994). Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé cette double approche en intégrant l'analyse multicritère à un système d'information géographique pour réaliser une cartographie des berges sensibles à l'érosion de la rivière du Lièvre.

A. Principales étapes de la démarche méthodologique

La démarche méthodologique proposée suit différentes étapes qui intègrent l'analyse multicritère à un système d'information géographique (figure 5). Plus spécifiquement, la démarche se base sur cinq grandes étapes, soit :

(1) décrire l'état des berges de la rivière du Lièvre (cours inférieur) par une analyse des photographies aériennes (échelle 1 : 15 000) et une reconnaissance sur le terrain (parcours de la rivière sur une embarcation motorisée) ; (2) identifier les phénomènes d'érosion des berges (sapement, décrochement...) ; (3) compiler et sélectionner des données en vue d'utiliser l'analyse multicritère pour la pondération des critères ; (4) intégrer les critères retenus à un système d'information géographique (logiciels ESRI, Arcview 3.1 ; MapInfo 5.0) ; et enfin, (5) élaborer des cartes codifiant chacun des paramètres retenus afin d'en arriver à l'élaboration d'une carte thématique finale. La consultation des travaux réalisés dans la région outaouaise (Mitchell et Eden, 1972 ; Gadd, 1976 ; Williams *et al.*, 1979 ; Lvasseur et Rissmann, 1984 ; Théberge, 1986 ; Clouâtre *et al.*, 1996), nous a permis d'identifier un certain nombre de paramètres généralement considérés comme des facteurs explicatifs aux phénomènes des glissements de terrain ou aux décrochements le long des rives. À titre indicatif, le tableau 2 présente les paramètres choisis par Lvasseur et Rissmann dans l'analyse des glissements de terrain de

Tableau 2. Paramètres considérés dans l'analyse des glissements de terrain de la région de l'Outaouais	
Paramètres géotechniques	Paramètres géologiques et géomorphologiques
<ul style="list-style-type: none"> • Résistance au cisaillement • Teneur en eau • Pression interstitielle • Chimie de l'eau interstitielle • Limite de consistance • Hauteur de la nappe phréatique 	<ul style="list-style-type: none"> • Nature des dépôts • Stratigraphie • Hauteur des pentes • Degré des pentes • Présence des cicatrices • Allure topographique de la roche en place
Source : <i>Levasseur et Rissmann, 1984.</i>	

Tableau 3. Classement et pondération des critères retenus par Clouâtre <i>et al.</i> (1996)		
Critères	Classification	Pondération
Dépôts sensibles Argile marine Silt et argile silteuse (fluviale)		45/100
		35/100
Pentes de surface	36% et plus	35/100
	16 – 35%	15/100
	0 – 15%	5/100
Hydrographie	Tracé courbe	8/100
	Tracé linéaire	4/100
Pentes du substratum rocheux	31% et plus	7/100
	16 – 30%	5/100
	0 – 15%	3/100
Facteurs anthropiques Autoroute et route principale, chemin de fer Zones urbaines		3/100
		2/100

la région outaouaise, dont le secteur Thurso-Buckingham situé à proximité de notre zone d'étude. Pour notre part, aucun critère de nature géotechnique a été considéré dans notre étude, en raison des coûts associés à ce type d'analyse. Toutefois, les critères retenus dans l'analyse multicritère s'apparentent à ceux choisis par Clouâtre *et al.* (1996) dans l'analyse des glissements de terrain dans la région de l'Outaouais (tableau 3), bien que certaines classes de critères aient été modifiées afin de tenir compte de nos observations de terrain, en particulier la hauteur et la pente des berges et la nature des dépôts (tableau 4). Ainsi, les cinq critères retenus pour l'analyse multicritère sont les suivants : (1) les dépôts meubles ; (2) la pente des berges ; (3) la hauteur des berges ; (4) le tracé du cours d'eau ; et (5) l'occupation du sol. La pondération s'est réalisée en deux étapes, soit une pondération inter-critères et une cotation intra-critère (tableau 4). Enfin, la pondération des critères retenus par l'analyse multicritère a permis d'attribuer des cotes à chacun des critères, délimitant ainsi des classes de sensibilité (forte, moyenne et faible) aux berges de notre secteur d'étude.

B. Source des données et traitements

La principale source de données provient des relevés de terrain réalisés au cours de l'été 1999 dans la portion sud de la rivière du Lièvre (Schneider, 1999) et des bases de données numériques du Cadre écologique de référence (CER) du ministère de l'Environnement du Québec. Aussi, différents documents ont été consultés (cartes topographiques, photos aériennes, cartes des dépôts meubles...). Les bases de données numériques du CER couvrent l'ensemble du territoire de l'Outaouais et renferment diverses données (géologie, hydrographie, peuplement forestier, sols...), disponibles à des différentes échelles (1 : 20 000, 1 : 50 000...). Les données numériques du CER utilisées dans cette étude (ex. : dépôts meubles, utilisation du sol) ont été intégrées dans une base de données commune avec les données des relevés de terrain. Les données sélectionnées sont les suivantes : composition des berges (dépôts argileux, sableux...) ; morphométrie des berges (hauteur et pente) ; présence des formes d'érosion (sapement, décroche-

Tableau 4. Répartition de la pondération (intra et inter-critères) des critères retenus pour l'analyse multicritère

Critères retenus	Classification	Pondération inter-critères	Pondération intra-critère
La nature des dépôts meubles	- Argiles (avec cicatrices de glissement)	0.35 (35/100)	40/100
	- Argiles limoneuses		25/100
	- Argiles sableuses		20/100
	- Sables, graviers avec faible proportion argile et limon		10/100
	- Sables et parfois graviers		3/100
	- Sables et graviers		2/100
	- Graviers, cailloux émoussés et blocs arrondis		0/100
	- Affleurements rocheux		0/100
La pente des berges	- > à 60°	0.25 (25/100)	35/100
	- de 40 à 60°		30/100
	- de 20° à 40°		25/100
	- < à 20°		10/100
La hauteur des berges	- > à 8 m	0.15 (15/100)	50/100
	- de 3 à 8 m		35/100
	- de 1 à 3 m		10/100
	- < à 1 m		5/100
L'hydrographie	- Sinueux ou méandrique	0.15 (15/100)	70/100
	- Linéaire		30/100
Les facteurs anthropiques	- Aménagements	0.10 (10/100)	60/100
	- Agriculture (pâturage, élevage...)		40/100

ment...); tracé du cours d'eau (sinueux, linéaire...); présence d'éléments anthropiques (habitations, bâtiments de ferme, pâturages). Au total 27 stations ont été retenues (tableau 5) et chaque station couvre une longueur linéaire de 10 à 15 mètres environ, réparties le long d'un tronçon de près de 40 km de longueur, soit du barrage High Falls jusqu'à la municipalité de Buckingham. Le choix des stations s'est fait de manière à obtenir la plus grande diversité des types de berges et des formes d'érosion observées en rive. Enfin, rappelons que le tronçon étudié traverse principalement des zones agricoles (pâturage, élevage) ou agroforestières et des zones de vilégiature, alors que la zone urbaine (ville de Buckingham) est localisée à l'extérieur de la zone d'étude.

C. Analyse multicritère par somme pondérée

L'analyse multicritère est de plus en plus souvent combinée aux systèmes d'information géographique afin de répondre à des problèmes de localisation, d'analyse de contraintes, de potentiels, ou de risques (Roy, 1985).

L'analyse multicritère consiste à évaluer des scénarios selon un ensemble de critères en adoptant une démarche structurée. Une des approches les plus couramment utilisées est d'établir un système de performances et de poids par somme pondérée pour établir la performance globale de divers scénarios (*Ibidem*, 1985, p. 341).

L'approche d'analyse multicritère par somme pondérée s'exprime par l'équation suivante :

$$P(o) = \sum_{i=1}^n w_i p_i(o) \quad (1)$$

Selon Roy (1985, p. 344), il devient alors nullement restrictif d'imposer la somme par cette équation :

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (2)$$

Ainsi, $P(o)$ représente la performance globale (ou l'intégralité globale des performances) pour l'option o estimée d'après les n critères i , w_i est le poids pour le

critère i , et $p_i(o)$ est la performance de l'option o en regard du critère i seulement. Selon ce mode d'agrégation, les coefficients a_i sont souvent appelés poids (d'où le nom de somme pondérée). Ils correspondent à des taux de substitution constants (Roy, 1985, pp. 337-344). Le choix d'une méthode mettant en relation divers facteurs de risques suscite, comme le souligne Clouâtre *et al.* (1996, p. 381), beaucoup d'interrogations lors de l'analyse. Bien qu'il existe de nombreuses méthodes, peu d'entre elles s'adaptent au type de données utilisées comme celles associées aux glissements de terrain. Comme le proposent ces auteurs, la méthode qui apparaît la plus appropriée est la méthode opérationnelle du critère unique de synthèse (Roy, 1985, p. 344 ; Clouâtre *et al.*, 1996, p. 381). Cette méthode permet en effet d'intégrer des données comparables qui peuvent être mises en relation pour évaluer les risques, notamment les risques de glissements de terrain. Ainsi, la cotation attribuée à chacun des critères retenus permet d'attribuer un poids plus élevé aux critères jugés plus importants dans l'explication des glissements de terrain. À titre d'exemple, Clouâtre *et al.* (1996), accordent une pondération supérieure au critère « argile marine » des dépôts (soit 45/100) qu'au critère tracé linéaire de la rivière (soit 8/100). Ainsi, l'identification des zones à risque de glissements de terrain résultera de la superposition, par addition, de chacune des classes et des facteurs utilisés, soit une possibilité de 864 combinaisons (*Ibidem*, 1996, pp. 381-382). Enfin, il faut rappeler que l'analyse multicritère se présente comme une méthode interactive avec laquelle l'utilisateur ou le décideur sélectionne des critères d'évalua-

tion qu'il ordonne selon ses préférences. Le résultat peut être représenté sous la forme d'une carte qui peut être modifiée ou améliorée ultérieurement (Laaribi, 2000).

D. Pondération, SIG et cartographie thématique

La première étape de l'analyse multicritère a consisté à la pondération des critères retenus (pondération inter-critères) et de les mettre en relation (tableau 4). À titre d'exemple, le critère « nature des dépôts meubles » a été classé comme le premier facteur dans l'analyse de la sensibilité des berges. Cela tient compte de la présence des argiles marines qui abondent dans la région, lesquelles argiles sont considérées comme des matériaux sensibles à l'érosion hydrique (Markell et Eden, 1972 ; Gadd, 1976 ; Carson et Lajoie, 1981 ; Leroueil *et al.*, 1983 ; Hébert, 1988). La présence des cicatrices de glissements de terrain observées à divers endroits le long des rives témoigne d'ailleurs de la sensibilité des berges à l'érosion. Pour l'analyse multicritère, le facteur « nature des dépôts meubles » a été pondéré à 35/100 (tableau 4). Le critère « pente des berges » constitue le deuxième facteur d'importance. Ce facteur a été pondéré à 25/100. Dans la zone étudiée, les valeurs des pentes des berges varient autour de 15° à 20° et dans la section amont de la rivière, la plupart des pentes sont supérieures à 25° et 35°, ce qui en fait des zones vulnérables aux glissements de terrain et aux coulées argileuses (Mitchell et Markell, 1974 ; Gadd, 1976 ; Williams *et al.*, 1979). Le tracé de la rivière (linéaire, sinueux ou méandrique) obtient une pondération de 15/100. Le tracé

Stations	Profil de la berge	Profil de la rive (linéaire, méandrique ou sinueux)	Formes d'érosion observées	Classes de sensibilisation
1-2-3-5-8-11-12-13-15-18-19-20-21-24-25	Pente > 35° Hauteur 3 à 8 m	Linéaire ou sinueux	Décrochement ou glissement/sapement avec ou sans déchaussement	Fort ou moyen
4-6	Pente > 45° Hauteur < 1 m	Linéaire	Sapement avec ou sans déchaussement	Moyen
7-16	Pente > 35° Hauteur 1 à 3 m	Linéaire, méandrique ou sinueux	Sapement avec ou sans déchaussement/ravinement	Faible
9-10-26	Pente 45° Hauteur > 3 m	Linéaire	Décrochement	Moyen
14-17-23	Pente > 45° Hauteur 3 à 8 m	Linéaire, méandrique ou sinueux	Décrochement ou glissement / présence de cicatrices de glissement	Fort ou moyen
22-27	Pente > 35° Hauteur < 3 m	Linéaire	Sapement avec ou sans déchaussement	Moyen

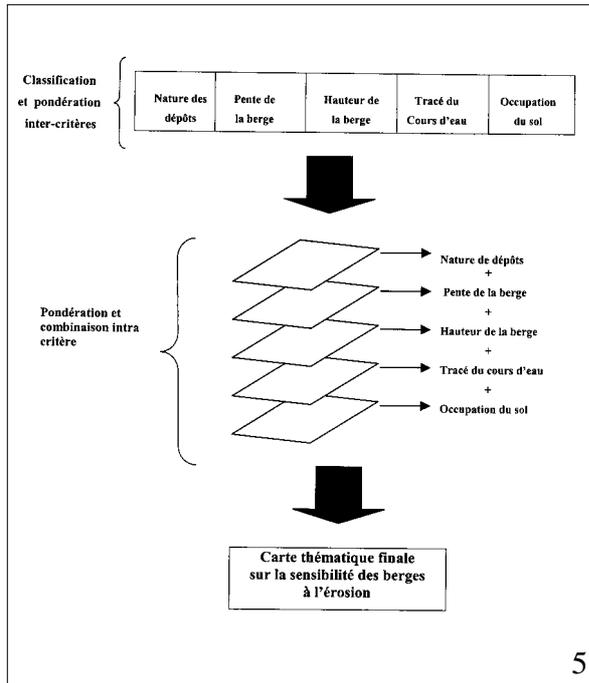


Figure 5. Schéma illustrant les étapes de la démarche méthodologique et le choix des critères pour l'élaboration de la carte de sensibilité des berges à l'érosion

Figure 6. Sapement de la berge causé par les courants lorsque le niveau de la rivière est élevé au printemps (rive gauche à 1,0 km du barrage de High Falls)

Figure 7. Déchaussement d'un arbre mature par l'érosion fluviale (rive droite à 2,2 km en aval du barrage de High Falls)

Figure 8. Décrochement survenu au sommet d'une terrasse d'argile limoneuse. Ce décrochement fait glisser la végétation au pied de la berge

(rive gauche à 1,2 km du barrage de High Falls)

Figure 9. Glissement récent (printemps 1998) survenu sur une terrasse d'argile marine

(rive gauche à 1,6 km en aval du pont de Notre-Dame-de-la-Salette)

Figure 10. Terrasse d'argile limoneuse en milieu agricole. Le piétinement du bétail entraîne une érosion des berges



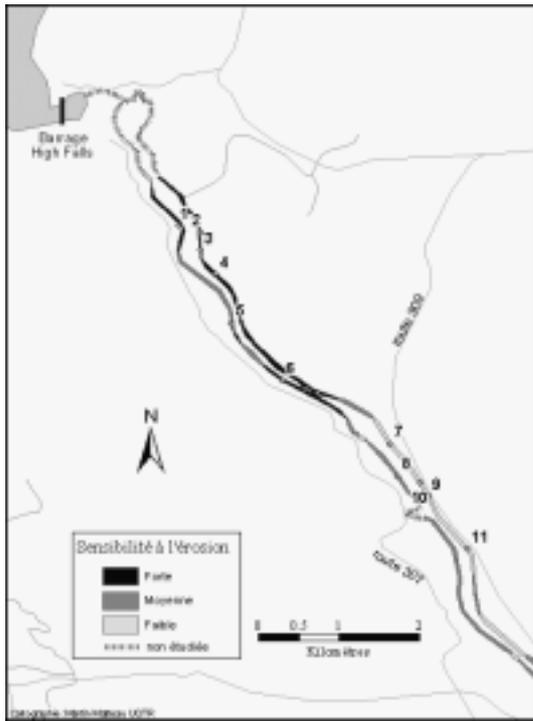


Figure 11. Carte thématique (tronçon 1) de la rivière du Lièvre illustrant les classes de sensibilité des berges à l'érosion



Figure 13. Carte thématique (tronçon 3) de la rivière du Lièvre illustrant les classes de sensibilité des berges à l'érosion

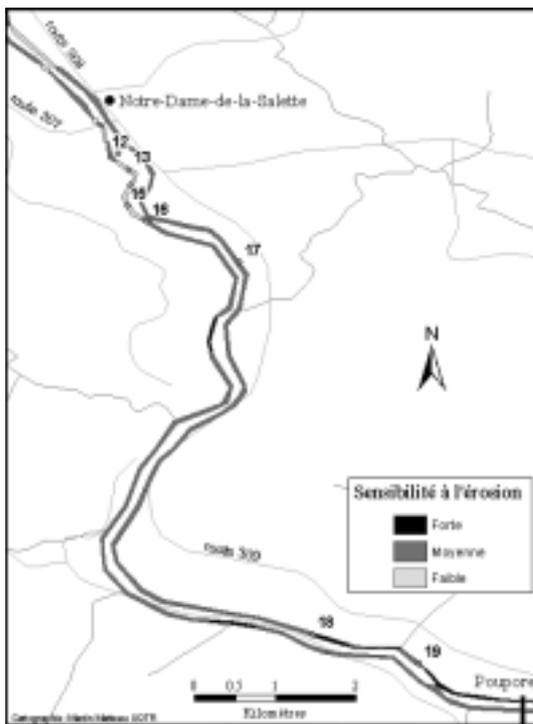


Figure 12. Carte thématique (tronçon 2) de la rivière du Lièvre illustrant les classes de sensibilité des berges à l'érosion

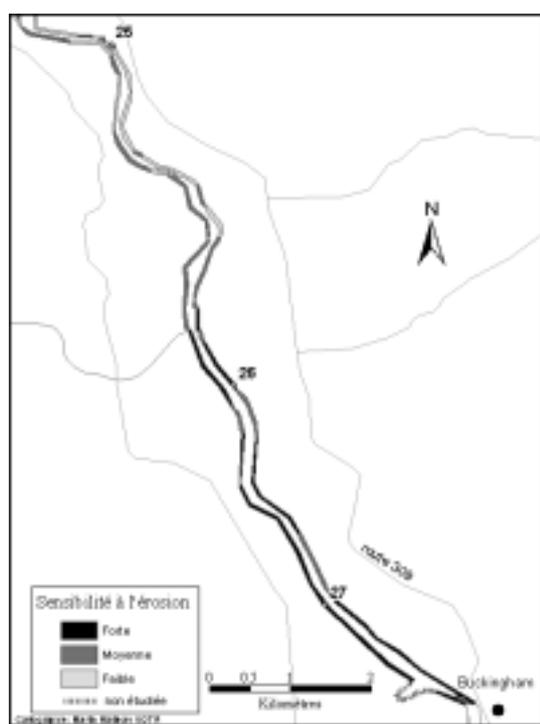


Figure 14. Carte thématique (tronçon 4) de la rivière du Lièvre illustrant les classes de sensibilité des berges à l'érosion

du cours d'eau s'avère un indicateur additionnel à l'évaluation de la sensibilité des berges à l'érosion. En effet, les berges disposées le long d'un tracé sinueux ou méandrique (plutôt que linéaire) risquent d'être plus affectées par la force du courant, en particulier le long des rives concaves (Levasseur et Rissmann, 1984). Enfin, les critères sur l'occupation du sol (agricole, villégiature) sont pondérés à une valeur de 10/100 (tableau 4). La pondération accordée à chacun des critères sélectionnés se fonde sur une évaluation qualitative qui elle-même s'appuie sur l'importance accordée aux facteurs (ou critères) identifiés par différents chercheurs (Mitchell et Markell, 1974 ; Gadd, 1976 ; Williams *et al.*, 1979 ; Clouâtre *et al.*, 1996), notamment les travaux concernant les glissements de terrain. La deuxième étape de l'analyse multicritère a consisté à une pondération plus fine (cotation intra-critère) pour les 5 critères retenus (tableau 4). Pour que chacun des critères soit pris en compte avec un poids respectif, il s'avère intéressant de faire une pondération inter-critères allant de 0 à 100, puis de pondérer l'ensemble de ces critères entre eux sur une échelle de 100 par exemple. On peut qualifier cette dernière étape de pondération ou cotation intra-critère, ce qui permet une répartition plus juste de chacun des critères retenus (Laaribi, 2000).

En dernier lieu, l'utilisation d'un SIG a permis d'élaborer cinq cartes représentant chacun des critères retenus (une carte des dépôts meubles par exemple), et la dernière étape a consisté à superposer chacune des cinq cartes pour réaliser une carte thématique finale montrant la sensibilité des berges à l'érosion, suivant trois classes de sensibilité (forte, moyenne et faible). La délimitation des classes de sensibilité des berges (tableau 6) s'appuie sur la superposition par addition de chacun des critères retenus. Ainsi, la carte finale représente des segments de rive montrant les classes de sensibilité, et le découpage cartographique de la rivière a été subdivisé en 4 tronçons afin de mieux visualiser les segments à risques élevés.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. Processus et phénomènes d'érosion observés

Il est possible d'identifier trois formes principales d'érosion riveraine le long de la rivière du Lièvre (cours inférieur), soit : (1) les formes en surplomb au pied des berges causées par le sapement des eaux (courants et vagues) ; particulièrement lorsque le niveau d'eau de la rivière est élevé, soit durant les crues printanières par exemple ; (2) les éboulements (ou décrochements) le long des pentes qui entraînent souvent la chute d'arbres et d'arbustes ; et (3) les glissements de terrain qui entaillent la rive (les entailles peuvent faire en moyenne entre 3 à 8 m de profondeur et entre 10 et 15 m de largeur). Ces deux dernières formes d'érosion sont souvent elles-mêmes provoquées par le sapement du pied de la berge, qui crée des conditions favorables à l'instabilité des pentes.

Les surplombs causés par le sapement du pied de la berge (figure 6) est la forme d'érosion la plus répandue le long de la rivière. On la retrouve tout autant dans les berges constituées d'argile, d'argile limoneuse ou d'argile sableuse. L'érosion des berges par sapement est principalement causée par la vitesse des courants et par les vagues générées par le vent ou le passage des bateaux motorisés (la circulation des bateaux sur la rivière demeure faible et est limitée surtout aux riverains). Le sapement cause également le déchaussement des arbres (figure 7) qui se déracinent progressivement et tombent au pied de la berge. Les berges argileuses dont les pentes sont fortement inclinées ($>35^\circ$) montrent généralement des signes d'instabilité comme les décrochements (figure 8) ou les bourrelets de glissement (figure 9). Les pentes de plus de 8 mètres de hauteur et fortement escarpées ($>60^\circ$) sont particulièrement vulnérables aux glissements, comme en témoigne la présence de nombreuses cicatrices (anciennes ou récentes) le long de ces berges. Les hautes terrasses argileuses constituent, en ce sens, une contrainte majeure à l'aménagement du territoire et doivent être considérées comme des zones à risques élevés¹. Outre les décrochements et les glissements, on observe aussi le long des terrasses argileuses du ravinement causé par les eaux de ruissellement, notamment sur les pentes dénudées ou partiellement dénudées de végétation. Les pentes affectées par des décrochements fréquents empêchent la végétation de se réinstaller, laissant ainsi ces pentes plus vulnérables à l'érosion de surface (ravinement, ruissellement). Enfin, dans les zones de pâturage, le piétinement des troupeaux de bétail qui s'abreuvent à la rivière, peut constituer un autre facteur d'érosion riveraine (figure 10). Le tableau 7 présente une compilation des données concernant les formes d'érosion observées le long de la rivière du Lièvre, en considérant les différents tronçons. On peut noter que le sapement des berges et les décrochements mineurs constituent les formes d'érosion les plus fréquentes, soit près de 17% sur les 74,5 km de berges étudiées. On peut noter également qu'une partie importante des berges sont aménagées (murets, perrés...), représentant environ 23% du total des berges étudiées. Ces dernières sont surtout localisées dans les zones de villégiature, en particulier en amont et en aval de la municipalité de Notre-Dame-de-la-Salette.

B. Cartographie thématique, sensibilité des berges et aménagement

La compilation des critères pondérés a permis d'élaborer la carte finale montrant les trois classes de sensibilité des berges à l'érosion. Les sections riveraines ayant une forte sensibilité à l'érosion représentent 16% et elles sont localisées surtout dans des hautes terrasses d'argile marine (>5 m), principalement localisées dans le secteur de Notre-Dame-de-la-Salette et en aval du barrage High Falls (figures 11 et 12). Les sections riveraines à sensibilité moyenne couvrent environ 60% de la

Tableau 5. Principales caractéristiques des 27 stations d'observation de la rivière du Lièvre

Stations	Profil de la berge	Profil de la rive (linéaire, méandrique ou sinueux)	Formes d'érosion observées	Classes de sensibilisation
1-2-3-5-8-11-12--13-15-18-19-20-21-24-25	Pente > 35° Hauteur 3 à 8 m	Linéaire ou sinueux	Décrochement ou glissement/sapement avec ou sans déchaussement	Fort ou moyen
4-6	Pente > 45° Hauteur < 1 m	Linéaire	Sapement avec ou sans déchaussement	Moyen
7-16	Pente > 35° Hauteur 1 à 3 m	Linéaire, méandrique ou sinueux	Sapement avec ou sans déchaussement/ravinement	Faible
9-10-26	Pente 45° Hauteur > 3 m	Linéaire	Décrochement	Moyen
14-17-23	Pente > 45° Hauteur 3 à 8 m	Linéaire, méandrique ou sinueux	Décrochement ou glissement / présence de cicatrices de glissement	Fort ou moyen
22-27	Pente > 35° Hauteur < 3 m	Linéaire	Sapement avec ou sans déchaussement	Moyen

Tableau 6. Classes de sensibilité des berges à l'érosion avec la somme pondérée des critères retenus

Classes de sensibilité des berges à l'érosion / Somme pondérée	
Forte	< 60
Moyenne	59-45
Faible	> 45

zone d'étude. La répartition de ces zones est principalement liée à la présence d'argile marine combinée à des pentes relativement fortes (entre 20° à 40°) et des talus variant entre 3 à 8 m de hauteur. Elles dominent surtout les tronçons 2 et 3 de la rivière (figures 12 et 13). Enfin, les sections riveraines à sensibilité faible couvrent près de 24% de la zone étudiée. Ces sections sont surtout localisées dans la portion nord de la rivière et en amont de Buckingham (figures 11 et 13). La portion nord (figure 11) est surtout caractérisée par des berges constituées de matériaux sablo-graveleux ou d'affleurement rocheux. Bien que les premières soient sensibles à l'érosion, les secondes sont considérées comme stables. Enfin, la section entre Notre-Dame-de-la-Salette et l'écluse de Poupore (figure 13) regroupe un certain nombre de berges caillouteuses ou sablo-graveleuses qui constituent habituellement des berges relativement stables, sauf si les pentes sont fortes et élevées.

Ainsi, les sections riveraines classées à sensibilité forte devraient être considérées comme des zones inaptes à toutes constructions (bâtiments de ferme, villégiatures ou autres), se normalisant ainsi à la Po-

litique gouvernementale émise en 1987 et qui vise la protection des personnes et des biens et la protection des cours d'eau et des rives (MEF, 1987, 1998). Soulignons que l'application de cette politique gouvernementale est sous la responsabilité des élus municipaux et des municipalités régionales de comtés (MRC) qui doivent intégrer les normes gouvernementales dans leurs schémas d'aménagement. Actuellement, certaines zones jugées à risques élevés le long de la rivière du Lièvre supportent déjà diverses constructions (bâtiments de ferme, remises, hangars...) qui furent construites bien avant la mise en vigueur de la *Politique* du ministère de l'Environnement (*Ibidem*, 1987). Ces constructions devront éventuellement être déplacées en terrain plus stable afin d'éviter tout danger associé à ces zones à risques. Enfin, les zones jugées à faible sensibilité ne présentent pas, a priori, de contraintes majeures au développement résidentiel ou autres constructions légères, bien qu'il existe des restrictions de construction à l'intérieur de la bande riveraine, soit une distance minimale de 10 à 15 mètres à partir de la ligne des hautes eaux (MEF, 1998).

Tableau 7. Évaluation et répartition des formes d'érosion des berges de la rivière du Lièvre (cours inférieur)

Formes d'érosion riveraine	Tronçon 1 (km)	Tronçon 2 (km)	Tronçon 3 (km)	Tronçon 4 (km)	Σ Tronçons (km)
Aucun signe apparent d'érosion riveraine	3,56 (23%)	7,31 (34%)	2,08 (9%)	6,92 (46%)	19,87 (27%)
Présence de ruissellement, et/ou sapement mineur	2,94 (19%)	6,00 (28%)	9,20 (43%)	3,84 (25%)	21,98 (29%)
Présence de sapement, déchaussement et/ou décrochement mineur	4,06 (26%)	4,28 (20%)	2,71 (12%)	1,64 (11%)	12,69 (17%)
Présence de décrochement et/ou glissement de terrain (récents ou anciens)	0,84 (5%)	1,23 (6%)	0,96 (4%)	0,0 (0%)	3,03 (4%)
Berges aménagées (murets, perrés, etc.)	4,40 (27%)	2,65 (12%)	7,14 (32%)	2,74 (18%)	16,93 (23%)
Total	15,80 (100%)	21,47 (100%)	22,09 (100%)	15,14 (100%)	74,50 (100%)

IV. CONCLUSION

La méthode de caractérisation et de cartographie utilisée dans cette étude sur les berges de la rivière du Lièvre s'appuie sur l'analyse multicritère et à l'utilisation d'un système d'information géographique. Rappelons que cette étude s'inscrit dans le cadre du projet pilote du ministère de l'Environnement du Québec (MEQ) pour la région administrative de l'Outaouais et qui vise l'application du Cadre écologique de référence (CER) comme outil de planification et d'aménagement du territoire dans le cadre d'un projet pilote régional. La démarche utilisée pour la caractérisation et la cartographie des berges de la rivière a permis l'élaboration d'une carte thématique finale qui s'avère un document utile pour identifier facilement les zones vulnérables à tout développement résidentiel, de villégiature ou autres. En ce sens, cette cartographie des classes de sensibilité des berges à l'érosion constitue un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires ou aménagistes de la région. Enfin, l'utilisation d'un SIG présente un double avantage soit, la possibilité d'utiliser des données multisources et

de les regrouper en différentes couches d'information, lesquelles peuvent être remaniées suivant les besoins exprimés par les utilisateurs. Par ailleurs, l'application d'un SIG peut permettre d'intégrer ultérieurement des données additionnelles (analyses géotechniques, sédimentologiques...) qui peuvent être fort utiles dans l'évaluation des risques associés aux phénomènes d'érosion fluviale par exemple (glissements de terrain, éboulements...). Ces données additionnelles pourraient être éventuellement intégrées à la base de données du ministère de l'Environnement et fournir ainsi un meilleur cadre d'analyse régionale en ce qui concerne les phénomènes de risques naturels.

REMERCIEMENTS

Ces travaux de recherche ont été rendus possible grâce à l'appui logistique et financier du ministère de l'Environnement du Québec (MENQ) et grâce à l'appui du GEIGER (Groupe Environnement et Études Régionales) de l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Nous tenons à remercier tout particulièrement M. Jean

Falardeau, du ministère de l'Environnement du Québec (MEQ) et M. Olivier Maquaire de l'Université Louis-Pasteur de Strasbourg. Nous remercions également les réviseurs pour leurs commentaires constructifs et judicieux. Enfin, nous voulons également remercier M. Laurent Schnell pour son aide précieuse sur le terrain et Mme Diane Désy (UQTR) et Martin Matteau (UQTR) pour la confection des cartes.

NOTE

¹ À cet égard, faut-il rappeler l'événement tragique de 1908 qui entraîna la mort de 33 personnes suite à un important glissement de terrain survenu en bordure de la rivière du Lièvre, face à Notre-Dame-de-la-Salette (Journal « The Citizen », 27 avril 1908, voir aussi R. W. Eells, 1908).

BIBLIOGRAPHIE

- BARKER R., DIXON L. et HOOKE J., 1997. Use of Terrestrial Photogrammetry for Monitoring and Measuring Bank Erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, pp. 1217-1228.
- BRAY R.A., 1975. Representative discharges for gravel-bed rivers in Alberta, Canada. *Journal of Hydrology*, 27, pp. 143-153.
- BEVEN K. et CARLING P., 1989. *Floods, Hydrological, Sedimentological and Geomorphological Implications*. Wiley, Chichester, 290 p.
- CALOW P. et PETTS G.E., 1994. The Rivers handbook: hydrological and ecological principles 2, Oxford, Blackwell Scientific. – GIS technics and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface and Landforms*, 16, pp. 427-445.
- CARRARA A., 1991. GIS technics and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, pp. 427-445.
- CARSON M.A. et LAJOIE G., 1981. Some constraints on the severity of landslide penetration in sensitive deposits. *Géographie physique et Quaternaire*, 35, pp. 301-316.
- CATTO M.R., PATTERSON R.J. et GORMAN W.A., 1981. Late Quaternary marine sediments of Chalk River, Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18, pp. 1261-1267.
- CLOUÂTRE E., DUBOIS J.M. et POULIN A., 1996. SIG et délimitation régionale des zones à risque de glissements de terrain : secteur de Hull-Gatineau (Québec). *Le Géographe Canadien/The Canadian Geographer*, 40 (4), pp. 367-386.
- DENIS R., 1998. Morphosedimentological evolution of the shoreline in Pointe-Taillon conservation park, Lac Saint-Jean, Québec. In Leclerc, M., Capra H., Valentin S., Boudreault A. et Côté Y. (éditeurs). *Ecohydraulics 2000, 2nd International Symposium on Habitat Hydraulics, Proceedings, Québec*, Vol. A, pp. A112-A120.
- DESMET P.J.J. et GOVERS G., 1994. GIS-based simulation of erosion and deposition patterns in an agricultural landscape : a comparison of model results with soil map information. *Catena*, 25, pp. 389-401.
- EDEN W.J., 1977. Evidence of creep in steep natural slopes of Champlain Sea clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 14, pp. 620-628.
- ELLS R.W., 1904. The recent landslip on the Lièvre river, Quebec. Geological Survey of Canada, 15th Annual Report, pp. 136A-139A.
- ELLS R.W., 1908. *Landslide at Notre-Dame de la Salette*. Department of Mines, Geological Survey of Canada.
- ELSON J.A., 1969. Late Quaternary marine submergence of Québec. *Revue de géographie de Montréal*, 23, pp. 247-250.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 2002. Données hydrologiques, CDROM-HYDAT.
- EVANS S.G. et BROOK G.R., 1994. An earthflow in sensitive Champlain Sea sediments at Lemieux, Ontario, June 20, 1993, and its impacts on the South Nation River. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, pp. 384-394.
- FARES A., ROLLET M. et BROQUET P., 1994. Méthodologie de cartographie des risques naturels liées aux mouvements de terrain (Région de Taounate – Rif, Nord du Maroc). *Revue française de géotechnique*, 69, pp. 63-72.
- FINLAY P.J., FILL R. et MAGUIRE P.K., 1979. The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. *Canadian Geotechnical Journal*, 34, pp. 811-824.
- GADD N.R., 1976. *Surficial geology and landslides of Thurso-Russell Map-area, Ontario*. Geological Survey of Canada, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, paper 75-35.
- GATTO L.R., 1988. *Techniques for measuring reservoir bank erosion*. U.S army Corps of Engineers, Cold Regions, Research and Engineering Laboratory, special report, 27 p.
- GATTO L.R., 1990. *Predicting reservoir bank erosion, a review of methods*. Association of Engineering Geologists, United States, 50 p.
- GERARDIN V., 1996. Révision d'un schéma d'aménagement en milieu rural québécois à l'aide d'un SIG. La MRC de Papineau, Québec, Canada. *Revue de géographie de Lyon*, 71 (2) : 121-128.
- GUPTAR.P. et JOSHI B.C., 1990. Landslide hazard zoning using GIS approach – A case study from the Ramganga Catchment, Himalayas. *Engineering geology*, 28, pp. 119-131.
- HÉBERT Y., 1988. *Géologie de la région de Buckingham*. Ministère de l'énergie et des ressources, Service géologique du Québec, carte en annexe.
- KNIGHTON D., 1998. *Fluvial Forms and Processes. A New Perspective*. Don Mills, Oxford University Press, 383 p.
- LAARIBI A., 2000. *SIG et analyse multicritère*. Hermès, Paris, France, 190 p.
- LAWLER D.M., 1992. Process dominance in bank erosion systems. In Carling, P.A. and Petts, G.E. (eds), *Lowland floodplain rivers*, Chichester, Wiley, pp. 117-143.
- LAWLER D.M., 1993. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: a review. *Earth surface processes and landforms*, 18, pp. 777-821.
- LAWSON D.E., 1985. *Erosion of Northern Reservoir Shores, an Analysis and Application of Pertinent Literature*. US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, National Technical Information Service (CRREL, Monograph 85-1), 207 p.
- LEROI E. et ROUSSEAU O., 1992. Remote sensing and GIS technology in landslides hazard mapping in the Colombian Andes. *Episodes*, 15, pp. 32-34.

- LEROUEIL S., TAVENAS F. et LE BIHAN J.P., 1983. Propriétés caractéristiques des argiles de l'Est du Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 20, pp. 681-705.
- LEVASSEUR J. et RISSMANN P., 1984. Cartographie des zones exposées aux mouvements de terrain. Région de Angers, Buchingham, Thurso et Plaisance. Rapport du ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de l'Assistance à l'industrie minière, Gouvernement du Québec, 60 p.
- LOCAT J., 1982. Contribution à l'étude de l'origine des argiles sensibles de l'est du Canada. Université de Sherbrooke, Thèse de doctorat en génie civil, 512 p.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DES PÊCHERIES ET DE L'ALIMENTATION DU QUÉBEC (MAPAQ). Carte pédologique, secteur Outaouais, 31/G, format numérique, échelle 1 : 250 000, Gouvernement du Québec.
- MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES RESSOURCES (MER) 1992. Cartographie des districts écologiques (dépôts de surface/ 1 : 40 000). Service de l'inventaire forestier, Gouvernement du Québec.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE (MEF) 1987. Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables. Politique adoptée le 22 décembre 1987 et modifiée le 24 janvier 1996 (décret:103-96), Gouvernement du Québec.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE (MEF) 1998. Protection des rives, du littoral et des plaines inondables. Guide des bonnes pratiques. Gouvernement du Québec, 156 p.
- MITCHELL R.J. et EDEN W.J., 1972. Measured movements of clay slopes in the Ottawa area. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 9, pp. 1001-1013.
- MITCHELL R.J. et MARKELL A.R., 1974. Flowsliding in Sensitive Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 11, pp. 11-31.
- NANSON G.C. et HICKIN E.J., 1986. A statistical analysis of bank erosion and channel migration in western Canada. *Geological Society of America Bulletin*, 97, pp. 497-504.
- PENNER F. et SWELDO A., 1974. Lake Winnipeg Shoreline Erosion, Sand Movement, and Ice Effects Study. *Manitoba Department of Mines, Resources and Environmental Management, Water Resources Branch*, 110 p.
- REID J.R., 1985. Bank-erosion processes in a cool-temperate environment, Orwell Lake, Minnesota. *Geological Society of America Bulletin*, 96, pp. 781-792.
- ROY B., 1985. Méthodologie multicritère d'aide à la décision. Paris, Économica, 423 p.
- SAINT-LAURENT D., BÉRUBÉ M., THÉRIAULT I. et LEMIEUX M., 2002. Phénomènes d'érosion fluviale et conditions hydrodynamiques de la rivière Saint-Maurice, Québec. *Belgeo*, 2, pp.109-132.
- SAINT-LAURENT D., TOUILÉB B.N., SAUCET J-P., WHALEN A., GAGNON B. et NZAKIMUENA T., 2001. Effects of simulated water level management on shore erosion rates. Case study: Baskatong Reservoir, Québec, Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28, pp. 482-495.
- SAINT-LAURENT D., 2000. Application du cadre écologique de référence à l'aménagement du territoire. *Érosion des berges - région administrative de l'Outaouais*. Rapport d'étude présenté au Fond des priorités gouvernementales en Science et Technologie, Gouvernement du Québec.
- SAINT-LAURENT D. et GUIMONT P., 2000. Dynamique fluviale et évolution des berges du cours inférieur des rivières Nottaway, Broadback et de Rupert, en Jamésie (Québec). *Géographie Physique et Quaternaire*, 53 (3), pp. 389-399.
- SAINT-LAURENT D., 1999. Rives et formes d'érosion fluviale à l'embouchure de la rivière de Rupert, Baie de James, Québec. *Le Géographe Canadien/The Canadian Geographer, Landform Examples*, 38, volume 43 (4), pp. 439-436.
- SAINT-LAURENT D., LEMIEUX M., THÉRIAULT I. et BÉRUBÉ M., 1996. Érosion des berges de la rivière Saint-Maurice. Rapport présenté à Hydro-Québec (Vice-présidence Environnement) dans le cadre du projet de la nouvelle centrale Grand-Mère (Avant-projet, phase 1), 56 p. + annexes.
- SCANVIC J.Y., 1994. Observation spatiale et SIG : des outils pour cartographier les zones sensibles aux mouvements de terrain. *Mappemonde*, 4, pp. 44-47.
- SCHNEIDER M., 1999. *Évaluation et cartographie de la stabilité des berges de la rivière du Lièvre (Québec)*. Mémoire de maîtrise, Université Louis-Pasteur, Strasbourg, France, 121 p. + annexes.
- STOTT T., 1997. A comparison of stream bank erosion processes on forested and moorland streams in the balquhider catchment, central Scotland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, pp. 383-399.
- TAVENAS F., 1984. *Landslides in Canadian sensitive clays - a state-of-the-art*. In Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides, Toronto, vol.1, pp. 141-153.
- THÉBERGE J., 1985. *Cartographie géotechnique dans la région de Gatineau-Aylmer-Hull*. Ministère de l'énergie et ressources du Québec. 199 p.
- THÉBERGE J., 1986. *Cartographie des zones exposées aux mouvements de terrain le long de la rivière de l'Achigan*. Direction générale de l'Exploration géologique et minière, Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, 56 p.
- THORNE C. R., 1982. *Processes and mechanisms of river bank erosion*. In Gravel-bed Rivers, R.D. Hey, J. C. Bathurst and C.R. Thorne (eds), Wiley, Chichester. , pp. 227-259.
- VINCENT J.S., 1989. Le Quaternaire du sud-est du Bouclier canadien. In Le Quaternaire du Canada et du Groenland, Commission géologique du Canada, chap. 3 sous la direction de R.J. Fulton, Commission géologique du Canada, Géologie du Canada, pp. 266-295.
- WILLIAMS D.R., ROMERIL P.M. et MITCHELL R.J., 1979. Riverbank erosion and recession in the Ottawa area. *Canadian Geotechnical Journal*, 16, pp. 641-650.

Photographies aériennes

Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec,
photocartotheque du gouvernement du Québec :

- Q65114 (127-129, 235-237), 1 : 15 840, 1965, noir et blanc ;
- Q65122 (31-32), 1 : 15 840, 1965, noir et blanc ;
- Q65123 (45-46 et 227-228), 1 : 15 840, 1965, noir et blanc ;
- Q65128 (31-34 et 156-158), 1 : 15 000, 1965, noir et blanc ;
- Q82804 (132-134, 230-233, 243-245), 1 : 15 000, 1982, noir et blanc ;
- Q82805 (68-70, 87-89,), 1 : 15 000, 1982, noir et blanc ;
- Q82819 (10-12, 97-96, 123-125, 201-202), 1 : 15 000, 1982, noir et blanc ;
- Q90103 (45 à 48 et 170 à 173), 1 : 15 000, 1990, infrarouge ;
- Q90104 (49 à 46), 1 : 15 000, 1990, infrarouge.

Adresse des auteurs :

Diane SAINT-LAURENT
Section Géographie, Université du Québec à Trois-Rivières,
C.P.500, Trois-Rivières, Québec, Canada, G9A 5H7
diane_saint-laurent@uqtr.ca.

Marc SCHNEIDER
Cellule Géographie, CEPS, rue 44 Emile Mark,
B.P. 48, L-4501, Differdange, Luxembourg.