

et de barrages ainsi qu'aux programmes de lutte contre les crues.

De tous les ouvrages de protection contre les inondations construits à ce jour, le plus remarquable est sans doute le canal de dérivation de la rivière Rouge (Red River Floodway), conçu de manière à ce que les eaux gonflées par la crue contournent la ville de Winnipeg pour se déverser plus en aval dans la rivière Rouge, près de Lockport. Ce canal, dont la construction a nécessité le déplacement de $764 \times 10^6 \text{ m}^3$ de matériaux, mesure 56,7 km de longueur. Il est conçu pour un débit de $850 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui devrait protéger Winnipeg contre des crues dont la période de récurrence est de 160 ans (tableau 12-5). Depuis la mise en service de ce canal de dérivation en 1968, les dommages causés à la ville de Winnipeg par les inondations ont été éliminés.

Un autre canal de dérivation a été creusé entre la rivière Assiniboine et le lac Manitoba, également dans la plaine du Lac glaciaire Agassiz. Il protège la ville de Portage La Prairie, plusieurs villages et une bande de 90 km de plaines agricoles entre Portage La Prairie et Winnipeg.

En 1975, les gouvernements fédéral et provincial ont lancé conjointement un programme qui vise ultimement à réduire les dommages causés par les inondations. Son but est d'identifier les zones inondables et de décourager tout développement dans les sites sujets à des inondations périodiques. Le programme comporte la cartographie des zones inondables, des systèmes de prévision des crues, un plan d'aménagement du territoire, la construction d'ouvrages de régularisation et l'acquisition de propriétés ou de servitudes afin d'exercer un contrôle sur la mise en valeur des zones inondables.

Effondrement par dissolution

L'effondrement par dissolution constitue un risque potentiel sur les vastes étendues des Prairies dont le sous-sol renferme des évaporites. Le sud de la Saskatchewan, par exemple, comporte quelque $250\,000 \text{ km}^2$ de sels dévoniens dont l'épaisseur atteint 200 m (Pearson, 1963). La dissolution de ces couches de sels se poursuit inexorablement depuis qu'elles se sont déposées, ce qui entraîne la formation de structures d'effondrement dans les unités sus-jacentes (Gendzwill et Hajnal, 1971). Le lac Crater, situé dans le sud-est de la Saskatchewan, est la plus récente des structures d'effondrement connues; elle date peut-être de 13,6 ka (Christiansen, 1971). Le petit nombre des structures d'effondrement actuellement visibles en surface semble indiquer que ces processus ne représentent pas un risque naturel important.

RISQUES DE CATASTROPHES NATURELLES DANS LE CENTRE ET L'EST DU CANADA

J. Locat et J.-Y. Chagnon

La géologie du Quaternaire a les mêmes applications en génie civil, en exploitation minière et en hydrologie dans le centre et l'est du Canada que dans les Prairies. Cependant, les deux régions diffèrent par leur physiographie et par leur évolution quaternaire, surtout dans le cas de la glaciation du Wisconsinien supérieur, et c'est pourquoi les risques de catastrophes naturelles ne sont pas de même nature. Dans la présente section, nous nous proposons de passer en revue les principales catastrophes naturelles liées à la géologie quaternaire de l'Est canadien, en signalant au passage les mesures prises pour minimiser, voire contrer, les danger que posent ces catastrophes.

Une catastrophe naturelle est définie ici comme un événement possible ou une situation géologique imprévue, non voulue et indésirable. En sont donc exclus les problèmes de tassement des fondations, d'élimination des déchets toxiques ou d'approvisionnement en eaux souterraines. Les catastrophes naturelles qui se produisent en Ontario, au Québec et dans les provinces de l'Atlantique sont essentiellement liées à la déformation de la croûte, aux mouvements de masse, aux inondations et à l'érosion. Les processus sous-marins, notamment l'affouillement par les icebergs et l'érosion côtière, sont traités dans le volume 2 de la *Géologie du Canada* (Keen et Williams, 1989).

Événements quaternaires pertinents

De nombreuses catastrophes naturelles sont directement liées à l'histoire géologique quaternaire de l'Est du Canada. Les dépôts du Quaternaire, dont la mise en place a été contrôlée par le relief préglaciaire et les processus glaciaires, contribuent dans une large mesure à déterminer les lieux où plusieurs catastrophes naturelles sont susceptibles de se produire.

À cause de la subsidence de la croûte sous le poids de l'Inlandsis laurentidien, certaines régions, comme la vallée du Saint-Laurent et de la basse vallée des Outaouais, ont été déprimées sous le niveau de la mer de sorte qu'elles ont été submergées dès leur déglaciation. Les barrages formés par le front glaciaire en retrait, conjugués au relèvement différentiel, ont créé plusieurs grands lacs glaciaires (par exemple les lacs Iroquois, Algonquin et Ojibway), dans lesquels des sédiments fins se sont accumulés. La déglaciation a entraîné le relèvement isostatique de la croûte (Quinlan, 1984), mis en évidence par l'émersion tardiglaciaire de la plupart des régions côtières de l'Est du Canada, de la vallée du Saint-Laurent et de la basse vallée des Outaouais. Le relèvement glacio-isostatique des bassins lacustres et marins a ensuite provoqué l'encaissement des cours d'eau dans les sédiments fins, lacustres et marins, donc une situation favorable au déclenchement de glisse-

Locat, J. et Chagnon, J.-Y.

1989: Risques de catastrophes naturelles dans le centre de l'est du Canada. In: *Le Quaternaire du Canada et du Groenland*, chap. 12, sous la direction de R.J. Fulton, Commission géologique du Canada, *Géologie du Canada*, vol. 1. Aussi in: *The Geology of North America*, vol. K-1, Geological Society of America.

ments de terrain (Locat, 1977). Même là où ces dépôts n'ont pas été entaillés, ils demeurent métastables et posent des problèmes pour la réalisation des fondations d'édifices et des routes (Smalley, 1979; Quigley, 1980; Torrance, 1983; Locat et al., 1984).

Les mouvements verticaux ont entraîné la fracturation de sédiments quaternaires et la réactivation d'ancien-

Tableau 12-5. Débit maximal et période récurrence des 15 crues les plus importantes de la rivière Rouge à Winnipeg.

Date du débit maximal	Débit maximal calculé au pont de Redwood (1000 m ³ /s)		Période de récurrence probable (années)
21 mai 1826	6,37	E	667
21 mai 1852	4,67	E	147
8 mai 1861	3,54	E	45
10 mai 1979	3,00	.	26
19 mai 1950	2,93	.	23
24 avril 1974	2,93	.	23
14 avril 1966	2,50	.	14
3 mai 1970	2,26	.	10
3 mai 1882	2,25	.	10
1 mai 1969	2,17	.	9
22 avril 1916	2,02	.	8
30 avril 1948	1,95	.	7
27 avril 1956	1,87	.	7
24 avril 1904	1,87	.	6
27 avril 1897	1,83	.	

E - débit estimé
 * débit naturel calculé, en l'absence d'ouvrage de régularisation

nes failles verticales (Adams, 1981). Dans certaines régions, notamment dans les basses terres de la baie d'Hudson (Hardy, 1976; Andrews et Peltier, 1989), le relèvement isostatique se poursuit encore de nos jours.

Activité tectonique et sismicité

Les séismes sont fréquents dans l'Est canadien (Leblanc, 1981; Basham et Adams, 1984). La documentation historique fait état de tremblements de terre violents dès 1534-1535 (Smith, 1962) et des séismes de magnitude supérieure à 7 sur l'échelle Richter se sont produits périodiquement durant les trois derniers siècles. L'un des exemples bien connus est le séisme qui a secoué les Grand Bancs en 1929 (Basham et Adams, 1982; Keen et al., 1989) et déclenché un énorme glissement de terrain sur le talus continental au large de Terre-Neuve. Le tableau 12-6 présente une liste des séismes récents les plus importants de l'Est du Canada, et la figure 12-15, une carte de la sismicité dans la même région. Des renseignements additionnels sur les zones à forte sismicité que sont les régions du mont Tremblant et de Miramichi sont disponibles dans Horner et al. (1979) et Basham et Adams (1984), respectivement. Ces séismes sont l'expression d'une activité tectonique vraisemblablement liée aux mouvements des plaques lithosphériques et peut-être aussi au soulèvement glacio-isostatique causé par la relaxation de la croûte à la suite de la déglaciation. Ces contraintes semblent se dissiper dans les zones de faiblesse de la croûte. Par exemple, la région de Charlevoix, au Québec, fut le siège d'un impact météoritique il y a 350 Ma (Rondot, 1968; Roy et Duberger, 1983). L'énergie de déformation transmise par cet impact, couplée à la contrainte tectonique régionale,

Tableau 12-6. Principaux séismes de l'Est canadien.

Date	Épicentre	Intensité (échelle Mercalli)	Magnitude (échelle Richter)	Remarques
Juin 1638	Vallée du Saint-Laurent	IX		Près de l'embouchure du Saguenay
Février 1663	La Malbaie	X		Le plus important tremblement de terre jamais enregistré au Québec
Septembre 1732	Montréal	VIII	5,6-6,0	Une personne tuée et 300 foyers endommagés ou détruits
Décembre 1791	Baie Saint-Paul	VIII		
Octobre 1860	Rivière-Ouelle	VIII-IX		Les secousses ont été ressenties sur une région de 1,8 x 10 ⁶ km ²
Octobre 1870	Baie Saint-Paul	IX		
28 février 1925	La Malbaie	IX		Domages considérables à Québec, Trois-Rivières et Shawinigan
18 novembre 1929	Grands Bancs de Terre-Neuve		7	
9 janvier 1982	Miramichi		5,7	

résulte en des rapports de contraintes principales in situ supérieurs à 1 ($\sigma_h/\sigma_v, \nu < 1$) à maints endroits. Ces contraintes déviatoires peuvent excéder la résistance au cisaillement de la roche et engendrer des fractures de décompression (White et al., 1974; Durand et Ballivy, 1974). Adams (1981) et Chagnon et Locat (1984) ont réalisé des compilations de la sismicité et de la néotectonique dans l'Est canadien; Adams en prépare une nouvelle qui paraîtra dans le volume sur la néotectonique de la série *The Geology of North America*, publiée par la Geological Society of America.

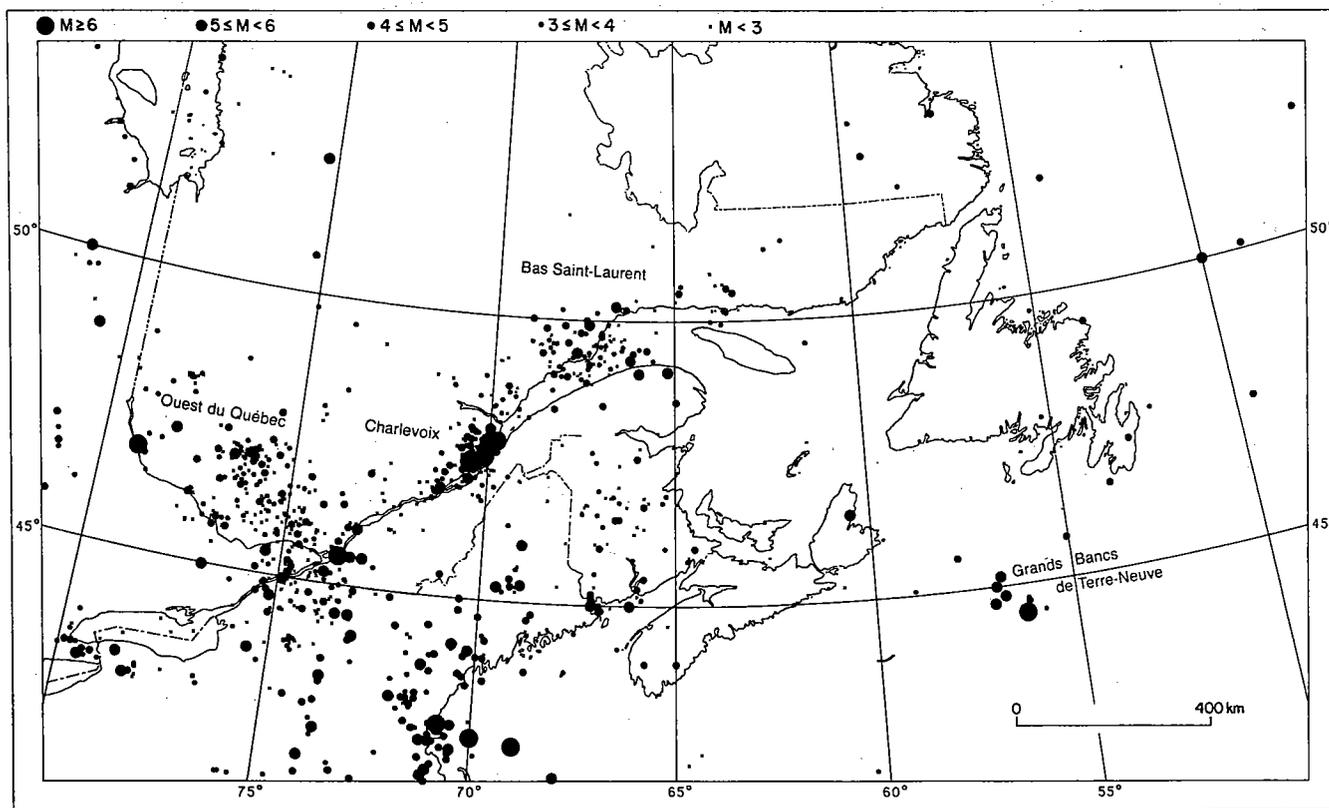
Mouvements de masse

De nombreux glissements de terrain se sont déjà produits, et il s'en produira d'autres, dans les régions de l'Est canadien qui reposent sur des sédiments fins. Les plus récents sont passés en revue au tableau 12-7. Dans de nombreux cas, ces glissements ont fait des victimes. Depuis une vingtaine d'années, d'importantes études ont été entreprises en vue d'en mieux connaître les causes et, dans une certaine mesure, de les prévoir (Chagnon, 1968; Tavenas et al., 1971; Mitchell et Markell, 1974; Quigley, 1980; Leblais et al., 1983; Locat et al., 1984; Lefebvre, 1984). Les mouvements de masse naturels ne surviennent pas uniquement dans les sédiments quaternaires mais également, par endroits, dans les roches consolidées (Dionne, 1969a).

Glissements de terrain dans les argiles plastiques

Plusieurs types de glissements de terrain se produisent dans les sédiments plastiques (fig. 12-16, 12-17 et 12-18). Selon les propriétés du sol, la stratigraphie du dépôt et la topographie sous-jacente, les ruptures vont d'un simple décrochement à une importante coulée de fluage. La stabilité de la première rupture peut être aisément soumise à des analyses de routine (Lefebvre, 1981), mais il reste encore beaucoup à faire pour être en mesure de prévoir les glissements de terrain dans le temps et dans l'espace (Locat et al., 1984). Des techniques de cartographie des zones sujettes aux glissements de terrain ont été mises au point pour l'Ontario (Klugman et Chung, 1976) et le Québec (Leblais et al., 1983). Il est également question, dans une autre partie du présent volume, des coulées d'argiles marines (Carson et Bovis, 1989).

Les principaux glissements de terrain de l'Est canadien se produisent dans les argiles dites sensibles, présentes principalement dans la vallée du Saint-Laurent, la basse vallée des Outaouais et les vallées tributaires. Quigley (1980) et Torrance (1983) donnent une description complète du comportement de ces argiles. Torrance (1974), Locat (1982) et Locat et Lefebvre (1986) traitent du rôle des sels et de leur lessivage sur la sensibilité des argiles marines. Les sols les plus sensibles sont les silts argileux



CGC

Figure 12-15. Localisation des épices et magnitude des tremblements de terre dans l'Est du Canada et les régions adjacentes des États-Unis. (Source: Division de la géophysique, Commission géologique du Canada)

marins (boues) en bordure du Bouclier canadien. Amenés par les eaux de fusion glaciaire, ces silts se sont déposés dans des eaux saumâtres où les taux de sédimentation étaient très élevés, ce qui explique qu'ils soient fréquemment stratifiés, avec alternance d'horizons de silts sableux et de silts argileux. Cette interstratification, en plus de favoriser la formation de zones de pression interstitielle élevée, facilite les processus de lessivage (Donovan et Lajoie, 1979; Locat, 1982). L'abaissement de la nappe phréatique causé par l'encaissement des cours d'eau consécutif au soulèvement isostatique régional a accentué le lessivage des sels, d'où une diminution importante de la limite de liquidité (ou résistance à l'état remanié). Mitchell et Klugman (1979) ont considéré sous de nombreux aspects l'instabilité de masse dans les argiles sensibles.

Éboulements rocheux et avalanches de pierres

De tous les types de glissements de terrain, les éboulements rocheux et les avalanches de pierres sont de loin les moins fréquents dans l'Est du Canada; ils ne s'en produisent guère que dans les régions de fort relief. L'un d'eux est survenu en 1967 près de Saint-Fabien-sur-Mer, environ 200 km en aval de Québec (Dionne, 1969a). Le long des routes de la Gaspésie (A. Drolet, ministère des Transports du Québec, communication personnelle, 1979) et dans certaines parties des provinces Maritimes existent plusieurs petites zones de roches instables. Un autre problème, celui-là plus fréquent et plus sérieux, est posé localement par les avalanches de pierres. Entre 1836 et 1839, ces avalanches ont tué plus de 100 personnes au pied du cap Diamant à Québec (Chagnon et al., 1979). Malgré ces événements malheu-

Tableau 12-7. Glissements de terrain majeurs dans l'Est canadien.

Date	Endroit	Superficie ou volume	Nombre de victimes
avril 1840	Maskinongé (Comté de Maskinongé, Qué.)	35 ha	
27 avril 1894	Saint-Alban (Comté de Portneuf, Qué.)	650 ha	4
septembre 1895	Saint-Luc de Vincennes (Comté de Champlain, Qué.)	2 ha	5
mai 1898	Saint-Thuribe, rivière Blanche (Comté de Portneuf, Qué.)	35 ha	1
6 avril 1908	N.-D.-de-la-Salette (Comté de Papineau, Qué.)	40 ha	33
avril 1925	Portneuf (Comté de Portneuf, Qué.)	1 ha	
24 juillet 1935	Saint-Vallier (Comté de Bellechasse, Qué.)	6 ha	
septembre 1938	Sainte-Geneviève-de-Batiscan (Comté de Champlain, Qué.)	6 ha	
18 mai 1945	Saint-Louis (Comté de Richelieu, Qué.)	4,5 ha	
12 novembre 1955	Nicolet (Comté de Nicolet, Qué.)	190 x 10 ³ m ³	3
23 mai 1962	Rivière Toulnostouc (Comté de Saguenay, Qué.)	3,8 x 10 ⁶ m ³	8
10 mai 1963	Saint-Joachim-de-Tourelle (Comté de Rimouski, Qué.)	6,9 x 10 ³ m ³	
11 décembre 1963			
13 juin 1964	Desbiens (Comté de Lac St-Jean, Qué.)	24,5 x 10 ³ m ³	4
15 avril 1969	Louiseville (Comté de Maskinongé, Qué.)	?	
4 mai 1971	Saint-Jean-Vianney (Comté de Chicoutimi, Qué.)	32 ha 76 x 10 ⁹ m ³	31
12 mai 1972	South Nation River (Ontario)	?	

reux, aucun inventaire n'a encore été fait des éboulements rocheux et des avalanches de pierres dans l'Est du Canada.

Risques d'érosion et d'inondation

Sont comprises ici toutes les catastrophes liées à l'action du vent et de l'eau. Les crues des cours d'eau sont surtout causées par la fonte des neiges au printemps; l'érosion éolienne représente un problème dans certaines régions (aux Îles-de-la-Madeleine, les vents dépassent fréquemment 100 km/h). Le vent peut également provoquer des inondations sur les littoraux lacustres ou marins lorsque le fetch est suffisamment long pour donner naissance à des ondes de tempête. De plus, l'action combinée du vent et de l'eau entraîne l'érosion des côtes par les vagues.

Érosion et sédimentation

L'érosion littorale est un problème fréquent sur les côtes formées de sédiments quaternaires dans tout le système des Grands Lacs et du Saint-Laurent. Elle s'attaque avec une vigueur particulière aux rives du lac Érié (Gélinas, 1974), mais elle constitue un problème constant dans tout le bassin des Grands Lacs (Rukavina, 1976, 1978, 1982). L'encaissement des cours d'eau dans les sédiments fins ainsi que l'affouillement des rives par les vagues et les glaces flottantes sont les principales causes d'instabilité des berges (par exemple, dans le delta du Saint-Laurent près de Sorel) dans les sections les plus larges du Saint-Laurent (Dionne, 1969b, 1970; Troude et al., 1983). Les régions côtières exposées à de forts vents et à des courants de dérive littorale, notamment les Îles-de-la-Madeleine, l'Île-

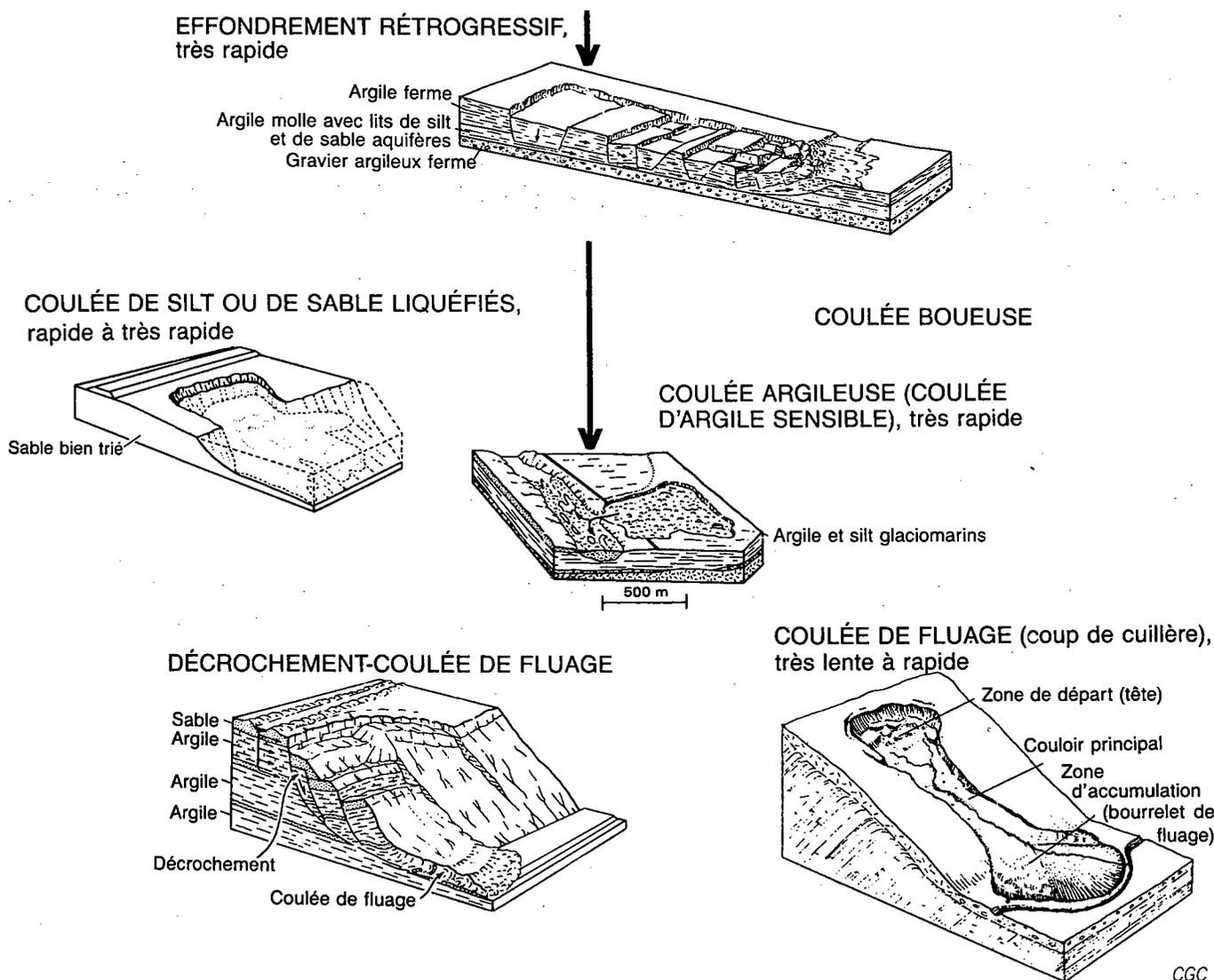


Figure 12-16. Types de glissements de terrain de l'Est du Canada. (Source: Varnes, 1978)

du-Prince-Édouard et certaines parties de la Nouvelle-Écosse, sont sujettes à une érosion vigoureuse et à un recul marqué des côtes (Owens et Drapeau, 1973). Le lecteur trouvera des renseignements additionnels sur l'érosion des littoraux marins et lacustres dans les comptes rendus de trois colloques (Conseil national de recherches du Canada, 1979, 1982; McCann, 1980); cette question est aussi abordée dans le deuxième volume de la *Géologie du Canada* (Keen et Williams, 1989). À quelques endroits, une érosion intense a entraîné une sédimentation rapide dans les secteurs voisins (Greenwood et Davidson-Arnott, 1979; Greenwood et Keay, 1979); par exemple, à Rivière Pentecôte, près de Baie-Comeau, l'érosion des berges de la rivière provoquée par l'action humaine a entraîné l'ensablement de la baie qui servait autrefois de port maritime; le matériel resédimenté est un sable deltaïque meuble qui abonde sur la rive nord de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent (Dredge et Thom, 1976).

Inondations

Les risques d'inondations sont élevés dans les régions de l'Est canadien qui reçoivent périodiquement des pluies torrentielles (parfois associées au passage de tempêtes tropicales en déclin) et qui sont arrosées par d'abondantes précipitations printanières auxquelles la fonte des neiges ajoute un volume d'eau considérable, souvent même avant la débâcle. Les embâcles qui se forment sur le fleuve Saint-Laurent durant la fonte des neiges engendrent fréquemment des inondations, et des problèmes semblables menacent les plaines inondables de nombreux autres cours d'eau. La navigation dans la voie maritime du Saint-

Laurent atténue ce problème, car elle oblige à garder un chenal ouvert dans la glace. Il n'y a cependant à peu près aucune mesure corrective dans les autres régions sujettes à ce type d'inondation, si ce n'est de restreindre les aménagements sur les plaines inondables et de dynamiter les embâcles lorsqu'elles surviennent. Dans le sud ontarien, de petits réservoirs ont été construits sur de nombreux cours d'eau; s'ils réussissent généralement à contenir les crues habituelles, ces réservoirs s'avèrent inefficaces dans le cas de grandes crues causées par des tempêtes catastrophiques, comme celle qui a provoqué l'inondation de Holland Marsh au nord de Toronto en octobre 1954, faisant 78 victimes.

Karst

Plusieurs régions de l'Est canadien reposent sur des calcaires et d'autres, sur des évaporites dans lesquelles peuvent se produire ou se sont déjà produits des phénomènes de dissolution (Roberge, 1977). Des formes karstiques sont bien connues aux Îles-de-la-Madeleine et dans certaines parties de la Nouvelle-Écosse et de Terre-Neuve. Les cavités karstiques souterraines, difficiles à localiser, représentent un problème pour la construction urbaine et routière. Dans la seule région de Québec, notamment près de Boischatel, des passages souterrains s'étendent sur plusieurs kilomètres (Société québécoise de spéléologie, 1980). Aux Îles-de-la-Madeleine, la dissolution du gypse se traduit en surface par des cuvettes karstiques ou dolines. Des cavernes existent également dans certaines parties de l'Ontario (Cowell et Ford, 1980). Si les phénomènes karstiques posent des problèmes d'ingénierie par endroits, aucun effondrement

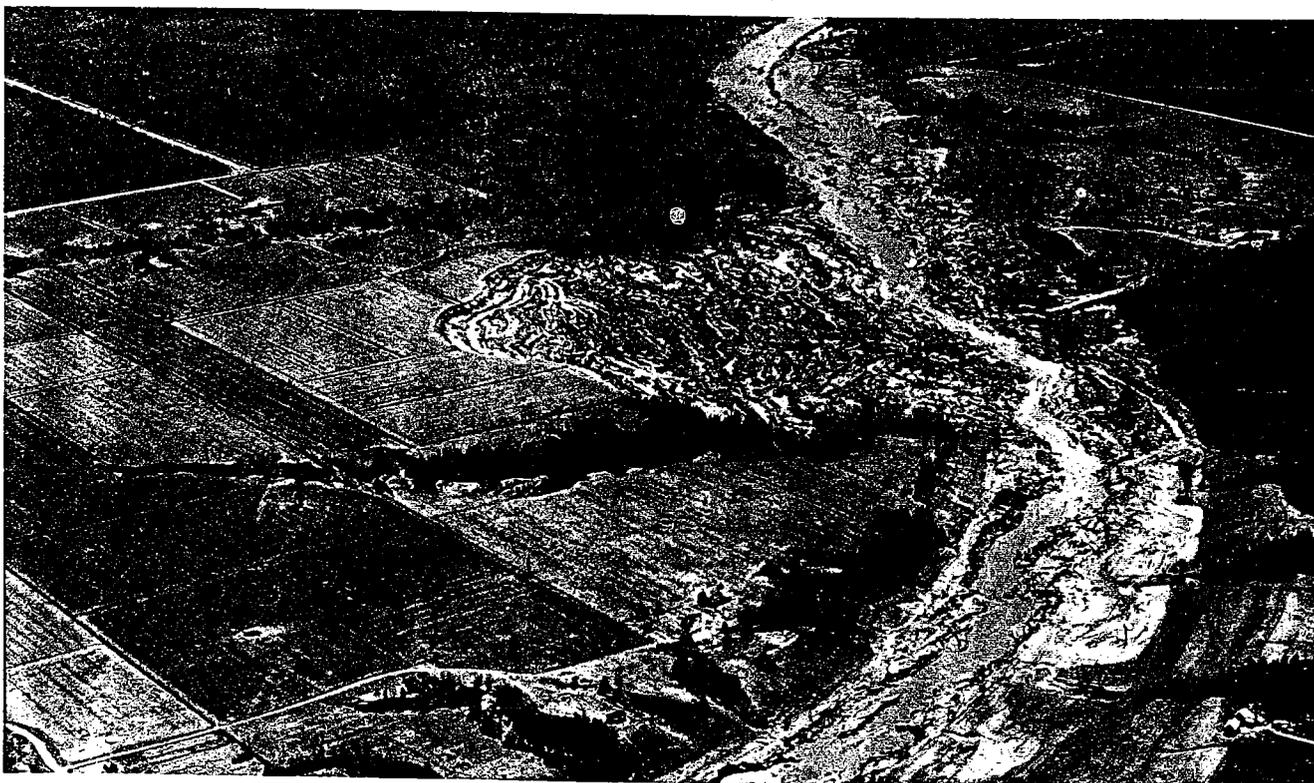


Figure 12-17. Glissement de terrain survenu à la rivière South Nation le 12 mai 1972. Photo: C. Malcolm Photography, Cornwall.

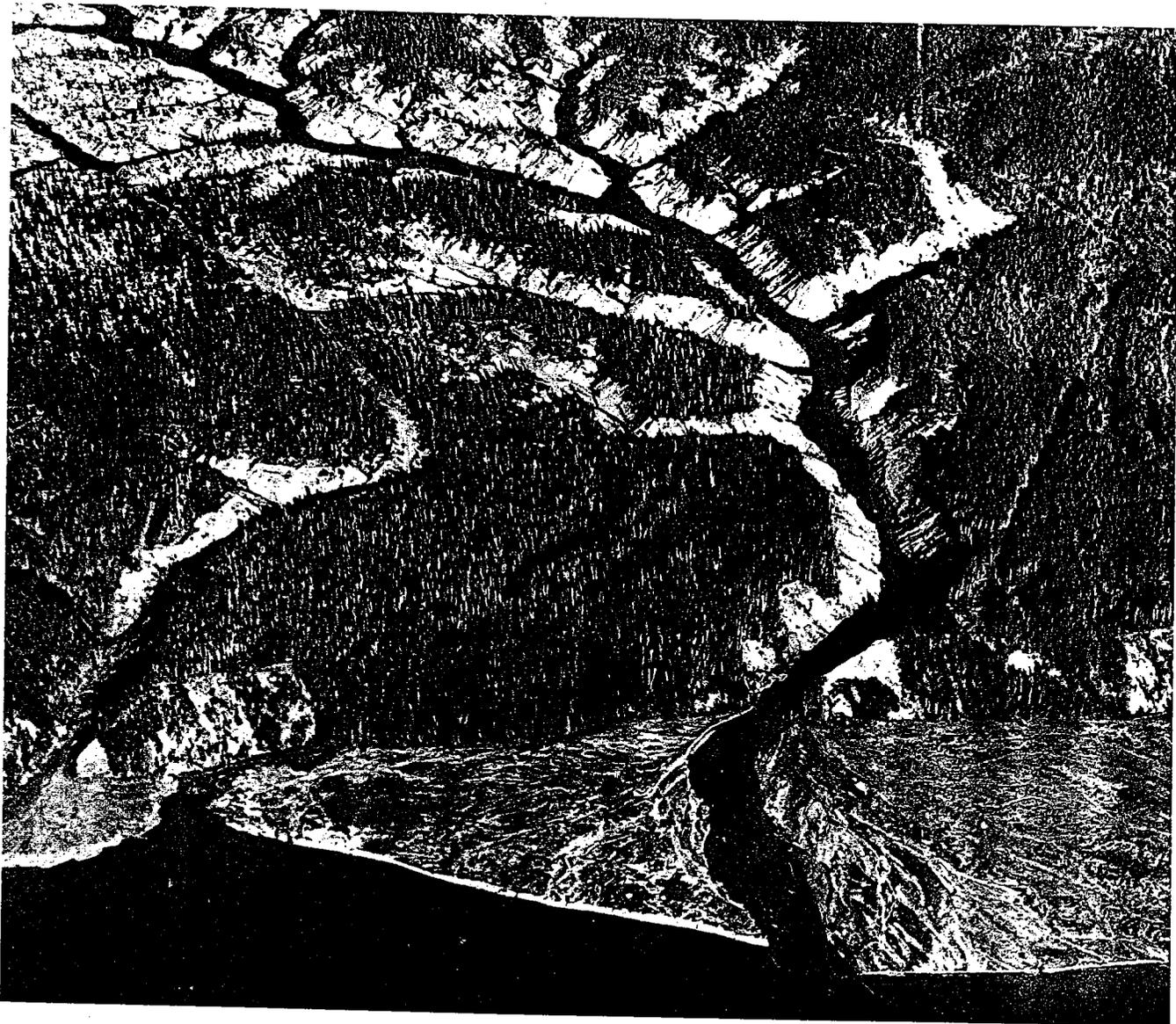


Figure 12-18. Coulée de sable liquéfié sur la berge de la rivière Moisie (Dredge et Thom, 1976). Gracieuseté de la Compagnie minière IOC.

n'a été constaté jusqu'ici et il semble que les processus karstiques n'entraînent pas de risques de catastrophes significatives.

GÉOLOGIE DU QUATERNAIRE ET URBANISME AU CANADA

O.L. White

Dans la plupart des villes canadiennes, la nature et la distribution des dépôts quaternaires, les modelés résultant de l'érosion fluviale et des glaciations quaternaires, la nature

et la distribution des processus actuels sont autant de facteurs à considérer dans le choix des tracés de routes, dans les plans de zonage, dans la conception des ouvrages et dans l'établissement des coûts de construction. Par conséquent, l'efficacité et la réussite des aménagements urbains nécessite une connaissance approfondie de la géologie du Quaternaire. Des données géologiques sont disponibles pour la plupart des zones urbaines du Canada même si, dans certains cas, elles semblent insuffisantes. Les rapports et cartes géologiques existant pour la plupart des villes sont des documents de base à partir desquels peuvent être réalisées les études nécessaires à la planification et au développement régional. Cependant, les données sont souvent insuffisamment détaillées, ou encore elles se présentent sous une forme ou dans un langage qui rebute les planificateurs et aménagistes.

L'importance des données sur la géologie du Quaternaire dans le cadre du processus de planification se démon-

White, O.L.
1989: Géologie du Quaternaire et urbanisme au Canada. In: *Le Quaternaire du Canada et du Groenland*, chap. 12, sous la direction de R.J. Fulton, Commission géologique du Canada, *Géologie du Canada*, vol. 1. Aussi in: *The Geology of North America*, vol. K-1, Geological Society of America.