

Université du Québec  
INRS-E.T.E

**Contribution des systèmes d'information géographique à l'analyse  
quantitative de l'aléa « glissement de terrain » – Exemple d'application  
au secteur de Ville de La Baie, Québec.**

Par  
Magalie Levasseur

Mémoire présenté  
pour l'obtention  
du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

**Jury d'évaluation**

Examineur externe	Denis Demers, Ph.D. Service de la géotechnique et de la géologie Ministère des transports du Québec
Examineur interne	Michel Parent, Ph.D. INRS-E.T.E
Directeur de recherche	Didier Perret, Ph.D. INRS-E.T.E
Co-directeur de recherche	Jacques Locat, Ph.D. Département de géologie et de génie géologique Université Laval

## RÉSUMÉ

Au Québec, les coûts directs associés aux glissements de terrain sont estimés à plus de dix millions de dollars annuellement. Une des approches possibles pour gérer le risque associé à ce phénomène naturel consiste à cartographier l'aléa à l'intérieur des zones potentiellement instables. À l'échelle régionale, les méthodes d'évaluation de l'aléa « glissement de terrain » sont généralement qualitatives. Par contre, le développement des systèmes d'information géographique (SIG) facilite maintenant les analyses morphométriques complexes de la surface topographique du terrain naturel, et donc l'évaluation de l'aléa.

L'objectif de ce mémoire est d'élaborer une méthode d'évaluation quantitative de l'aléa en s'appuyant sur les fonctionnalités des systèmes d'information géographique. La méthodologie est développée pour les glissements superficiels d'un secteur de Ville de La Baie, situé dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean au Québec. Cette méthodologie considère les sols seulement, excluant ainsi les pentes rocheuses.

L'analyse morphométrique du terrain à partir d'un modèle numérique d'altitude permet d'extraire la pente et la hauteur des talus, qui sont des caractéristiques essentielles à l'évaluation de l'aléa. Contrairement à ce qui est fait classiquement dans la littérature, c'est la pente globale qui est extraite et non la pente locale au voisinage d'un pixel.

Tout d'abord, l'aléa est évalué par le modèle de la pente infinie qui est très fréquemment utilisé, de par sa simplicité, dans les études basées sur les SIG. Dans ce modèle, le facteur de sécurité est calculé pour chaque pixel en intégrant les valeurs de pente déterminées par analyse morphométrique. Les résultats montrent qu'une proportion importante de pixels, entre 11 et 13%, possède des facteurs de sécurité inférieurs à un, indiquant que ce modèle est peu adapté à l'évaluation régionale de l'aléa.

Cette étude propose ensuite une méthode d'évaluation de l'aléa basée sur les caractéristiques du danger et des facteurs discriminants de l'instabilité. L'aléa est calculé en terme de probabilité, et tient compte, d'une part, de ses composantes spatiale et temporelle, et d'autre part, des phases de rupture et de post-rupture des glissements de

terrain. La probabilité de rupture est calculée à l'aide d'un indice de surface normalisant la surface affectée par les glissements de terrain à la surface totale des talus argileux. La probabilité de post-rupture est évaluée en intégrant les données obtenues sur l'étalement des débris. L'aléa est ensuite estimé en croisant les probabilités de rupture et de post-rupture.

Deux procédures d'évaluation de l'aléa sont proposées; une évaluation de l'aléa global, en considérant l'ensemble des talus argileux, et une évaluation de l'aléa spécifique pour différentes classes de pentes. L'aléa spécifique tient compte du nombre de glissement de terrain à l'intérieur de chaque classe de pentes ainsi que de la représentativité de ces dernières dans le secteur d'étude. L'aléa global varie de  $0.4 \times 10^{-5}$  à  $2.0 \times 10^{-4}$ , et l'aléa spécifique entre  $7.8 \times 10^{-7}$  et  $6.0 \times 10^{-3}$ .

Dans le secteur d'étude, les éléments exposés aux glissements de terrain considérés sont uniquement les habitants des maisons unifamiliales. En faisant l'hypothèse qu'un glissement n'affecte qu'une maison, les conséquences du danger pourraient probablement varier entre un et quatre décès. Le risque est estimé en combinant les résultats des calculs d'aléa aux conséquences de la rupture. Celui-ci est ensuite comparé à un critère d'acceptabilité du risque défini pour les glissement de terrain au Canada. Les résultats montrent que le risque serait acceptable dans la majorité des zones considérées. Par contre, lorsque les valeurs de pente sont supérieures à  $30^\circ$  le risque serait tolérable. Il deviendrait intolérable pour des valeurs supérieures à  $38^\circ$ .

L'ensemble de cette étude est avant tout un exercice méthodologique fournissant de nouvelles idées pour parvenir à quantifier l'aléa, notamment en ce qui concerne l'apport des systèmes d'information géographique. L'approche proposée n'est pas applicable en pratique pour le moment, mais constitue une base utile de réflexion pour les futures applications de la géomatique à ce domaine.

  
Magalie Levasseur

  
Didier Perret

## REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord témoigner ma reconnaissance à mon directeur de recherche Didier Perret, chercheur à la commission géologique du Canada et professeur associé à l'INRS-E.T.E, qui m'a guidée et aidée à toutes les étapes de ma maîtrise. Je le remercie pour l'attention, l'encadrement qu'il m'a donné ainsi que les connaissances qu'il m'a transmises. Mes remerciements vont aussi à Denis Demers, Janelle Potvin et Denis Robitaille du ministère des Transports du Québec pour l'enthousiasme et le regard critique qu'ils ont eu face à cette étude. Leurs nombreux conseils constructifs ont été essentiels à la réalisation de ce travail.

Je suis reconnaissante envers le Réseau GÉOIDE, membre du Programme des réseaux de centres d'excellence du Canada, et l'INRS-E.T.E pour leur soutien financier qui a rendu ce projet possible.

Je tiens à remercier tout spécialement Patrice Carbonneau et Louise Corriveau pour la confiance qu'ils m'ont transmise sur ma capacité de bien mener à terme un projet de recherche. Leur grande écoute et leurs nombreux conseils m'ont fait grandement cheminer aux plans professionnel et personnel.

Je remercie mes amis pour les discussions autour de bonnes bouteilles de vin, les frissons sur des parois de glace, les accolades au sommet de montagnes et les rires sur des relais. C'est grâce à ces moments inoubliables en leur compagnie que je garde la grande motivation que je porte à tout ce que j'entreprends.

Enfin, je remercie Sébastien et ma famille, Pierre, Lorraine et Julie, pour leur amour, leurs encouragements ainsi que leurs supports moral et financier. Ce projet n'aurait pas été possible sans eux.

## TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	ii
Remerciements.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des tableaux.....	ix
Liste des figures.....	x
<b>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1 Problématique.....	1
1.2 Objectif.....	2
1.3 Méthodologie.....	2
1.3.1 Analyse morphométrique des talus à l'aide des SIG.....	2
1.3.2 Évaluation et cartographie de l'aléa « glissement de terrain » par le modèle de la pente infinie.....	3
1.3.3 Évaluation et cartographie de l'aléa « glissement de terrain » par la méthode des indices de surface.....	3
<b>CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE.....</b>	<b>5</b>
2.1 Du danger au risque : quelques définitions.....	5
2.2 Cartographie de l'aléa.....	7
2.2.1 Tendances générales.....	8
2.2.2 Apport des systèmes d'information géographique (SIG).....	9
2.3 Classification des principales méthodes d'évaluation de l'aléa « glissement de terrain ».....	10
2.3.1 Méthodes qualitatives.....	10
2.3.1.1 Approches essentiellement géomorphologiques.....	10
2.3.1.2 Approches basées sur des opérations simples d'algèbre cartographique.....	13
2.3.2 Méthodes quantitatives.....	15
2.3.2.1 Approches basées sur des inventaires de glissements de terrain.....	16
2.3.2.2 Approches statistiques.....	16
2.3.2.2.1 Analyses bivariées.....	17
2.3.2.2.2 Analyses multivariées.....	18
2.3.2.3 Approches basées sur des modèles physiques et/ou géotechniques.....	20
2.3.2.3.1 Analyses déterministes.....	20
2.3.2.3.2 Analyses probabilistes.....	25
<b>CHAPITRE 3 : DESCRIPTION DU SECTEUR D'ÉTUDE.....</b>	<b>45</b>
3.1 Géologie et physiographie.....	45

3.2 Choix du secteur d'étude.....	46
3.2.1 Présence de glissements de terrain.....	47
3.2.2 Disponibilité d'une carte du danger.....	47
3.2.3 Disponibilité de données d'arpentage et de données photogrammétriques à haute résolution.....	48
3.3 Typologie des glissements de terrain.....	48
<b>CHAPITRE 4 : ANALYSE MORPHOMÉTRIQUE DU SECTEUR D'ÉTUDE.....</b>	<b>57</b>
4.1 Généralités.....	57
4.2 Méthodologie.....	58
4.3 Production du MNA.....	59
4.3.1 Données de base.....	59
4.3.2 Méthode d'interpolation utilisée.....	59
4.3.3 Artefacts produits par l'interpolation.....	60
4.3.4 Précision et résolution du MNA.....	61
4.4 Identification des talus.....	61
4.5 Évaluation de la pente globale et de la hauteur totale des talus.....	62
4.5.1 Identification des points hauts.....	62
4.5.2 Identification des chemins de plus grande pente.....	63
4.5.3 Calcul de la pente globale et de la hauteur totale.....	64
4.6 Commentaires.....	64
<b>CHAPITRE 5 : ÉVALUATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA</b>	
<b>« GLISSEMENT DE TERRAIN » PAR LE MODÈLE DE LA</b>	
<b>PENTE INFINIE.....</b>	<b>85</b>
5.1 Présentation du modèle.....	85
5.2 Application du modèle de la pente infinie au secteur pilote.....	87
5.2.1 Méthodologie.....	87
5.2.2 Résultats.....	90
5.2.2.1 Cas des pentes définies localement.....	90
5.2.2.2 Cas des pentes définies globalement.....	90
5.2.2.3 Effet de la position de la nappe phréatique.....	91
5.2.3 Comparaison des résultats obtenus par le modèle de la pente infinie et par la méthode de Bishop simplifiée.....	91
<b>CHAPITRE 6 : ÉVALUATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA</b>	
<b>« GLISSEMENT DE TERRAIN » PAR LA MÉTHODE DES</b>	
<b>INDICES DE SURFACE.....</b>	<b>109</b>
6.1 Cadre général.....	109
6.2 Caractérisation du danger à l'intérieur du secteur d'étude.....	110
6.2.1 Typologie.....	110
6.2.2 Intensité.....	111
6.2.2.1 Superficie des glissements de terrain.....	111

6.2.2.2	Étalement des débris et rétrogression.....	111
6.3	Caractérisation des facteurs discriminants de l'instabilité dans le secteur d'étude.....	112
6.3.1	Facteurs révélateurs.....	112
6.3.1.1	Localisation et fréquence des glissements de terrain historiques.....	113
6.3.1.2	Pente et hauteur des talus déstabilisés.....	113
6.3.2	Facteurs prédisposants.....	114
6.3.2.1	Localisation et superficie des talus argileux.....	115
6.3.2.2	Pente globale et hauteur des talus.....	115
6.3.3	Facteurs déclencheurs.....	116
6.4	Évaluation et cartographie de l'aléa.....	117
6.4.1	Méthodologie.....	117
6.4.1.1	Phase de rupture ( $P_r$ ).....	117
6.4.1.2	Phase de post-rupture ( $P_{p-r}$ ).....	119
6.4.1.3	Évaluation de l'aléa en intégrant les phases de rupture et de post-rupture.....	120
6.4.2	Aléa global.....	120
6.4.2.1	Probabilité de rupture.....	121
6.4.2.2	Probabilité de post-rupture.....	121
6.4.2.3	Aléa global.....	121
6.4.2.4	Cartographie de l'aléa global.....	122
6.4.3	Aléa spécifique par classes de pente.....	122
6.4.3.1	Probabilité de rupture.....	122
6.4.3.2	Probabilité de post-rupture.....	125
6.4.3.3	Aléa spécifique.....	125
6.4.3.4	Cartographie de l'aléa spécifique.....	126
6.5	Estimation du risque.....	126
6.5.1	Identification des éléments exposés.....	126
6.5.2	Évaluation de la conséquence d'une rupture.....	127
6.5.3	Estimation du risque.....	127
6.6	Évaluation de l'acceptabilité du risque.....	128
6.6.1	Critères d'acceptabilité du risque.....	128
6.6.2	Le risque présenté par les glissements de terrain superficiels à Ville de La Baie est-il acceptable ?.....	129
<b>CHAPITRE 7 : DISCUSSION.....</b>		<b>164</b>
7.1	Limites de l'analyse morphométrique.....	164
7.1.1	Artefacts produits par la méthode d'interpolation.....	164
7.1.2	Précision et résolution du MNA.....	165
7.1.3	Procédures d'extraction des paramètres de forme.....	165
7.2	Évaluation de l'aléa « glissement de terrain ».....	166
7.2.1	Limites de l'analyse de l'aléa par le modèle de la pente infinie.....	166
7.2.1.1	Géométrie des talus.....	168
7.2.1.2	Réseau d'écoulement.....	168
7.2.1.3	Précision du MNA.....	169
7.2.2	Limites de l'analyse de l'aléa par la méthode des indices de surface.....	169
7.2.2.1	Intensité.....	169

7.2.2.2 Facteurs discriminants de l'instabilité.....	170
7.2.2.2.1 Facteurs révélateurs.....	170
7.2.2.2.2 Facteurs prédisposants.....	170
7.2.2.2.3 Facteurs déclencheurs.....	171
7.2.2.3 Aléa.....	171
7.2.2.4 Estimation du risque.....	172
7.2.2.4.1 Éléments exposés.....	172
7.2.2.4.2 Conséquences de la rupture.....	173
7.2.2.4.3 Risque.....	173
7.2.2.5 Acceptabilité du risque.....	174
<b>CHAPITRE 8 : CONCLUSIONS.....</b>	<b>176</b>
<b>ANNEXE A : SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE, MODÈLES NUMÉRIQUES D'ALTITUDE ET ANALYSE MORPHOMÉTRIQUE.....</b>	<b>179</b>
<b>LISTE DES RÉFÉRENCES.....</b>	<b>195</b>

## LISTE DES TABLEAUX

4.1	Valeurs des pentes globales et des hauteurs totales mesurées sur le terrain et à l'aide des SIG pour quatre profils d'arpentage situés dans le secteur des Bouleaux.....	66
5.1	Comparaison des facteurs de sécurité obtenus pour six profils d'arpentage par la méthode de Bishop simplifiée et la méthode de la pente infinie en utilisant les valeurs de pente locale et de pente globale, secteur des Bouleaux.....	93
6.1	Nombre de glissement de terrain identifié par photo-interprétation pour différentes années comprises entre 1950 et 2000; Ville de La Baie, secteur sud.....	131
6.2	Probabilité associée à la phase de post-rupture pour quatre bandes de terrain situées à la base des talus.....	131
6.3	Aléa global pour les talus et les quatre bandes de terrain considérées, pour deux superficies de glissement de terrain; Ville de La Baie, secteur sud.....	131
6.4	Limites des cinq classes de pente considérées dans l'évaluation de l'aléa spécifique.....	132
6.5	Nombre de glissements de terrain observé entre 1950 et 2000, et superficie des talus pour les secteurs des Bouleaux et de Ville de La Baie pour les cinq classes de pente considérées .....	132
6.6	Probabilité de rupture calculée pour les cinq classes de pente considérées, et pour des superficies de glissement de terrain de 100 m <sup>2</sup> et 350 m <sup>2</sup> .....	132
6.7	Aléa spécifique pour les cinq classes de pente considérées en fonction du rapport D/H, évalué pour une superficie de glissement de terrain de 100 m <sup>2</sup> ; Ville de La Baie, secteur sud.....	133
6.8	Aléa spécifique des cinq classes de pente considérées en fonction du rapport D/H, évalué en considérant une superficie de glissement de terrain de 350 m <sup>2</sup> ; Ville de La Baie, secteur sud.....	133
6.9	Acceptabilité du risque de glissement de terrain pour les cinq classes de pente en fonction du rapport D/H, estimée en considérant une superficie de glissement de terrain de 100 m <sup>2</sup> ; Ville de La Baie, secteur sud.....	133
6.10	Acceptabilité du risque de glissement de terrain pour les cinq classes de pente en fonction du rapport D/H, estimée en considérant une superficie de glissement de terrain de 350 m <sup>2</sup> ; Ville de La Baie, secteur sud.....	134

## LISTE DES FIGURES

2.1	Cadre général d'analyse du risque de glissement de terrain.....	28
2.2	Classification des principales approches d'évaluation de l'aléa « glissement de terrain ».....	29
2.3	Arbre de décision préliminaire et simplifié utilisé pour qualifier l'aléa « glissement de terrain » en terrain argileux dans les basses-terres de l'est du Canada.....	30
2.4	Carte ZERMOS de la moyenne Vésubie, France.....	31
2.5	Zones exposées aux mouvements de terrain, région de la rivière Yamaska...	32
2.6	Étude comparative de deux cartes des zones exposées aux glissements de terrain obtenues par deux équipes différentes pour le bassin de Marecchia dans le nord de l'Italie.....	33
2.7	Opération d'algèbre cartographique effectuée sur des cartes en format matriciel à l'aide d'un SIG.....	34
2.8	Carte de susceptibilité aux coulées de débris pour la région de Glenwood Springs, Colorado.....	35
2.9	Exemple de feuille de caractérisation de mouvement de pente pour des glissements réactivés dans des argiles et des shales argileux. ....	36
2.10	Carte isoplèthe des glissements de terrain des régions de Umbria et Marche, Italie.....	37
2.11	Définition d'unités aux conditions uniques.....	38
2.12	Carte de l'aléa pour une région de la Toscane, Italie.....	39
2.13	Carte du facteur de sécurité pour la ville de Manizales, Colombie.....	40
2.14	Carte des indices de stabilité pour la région de Kilpala, Colombie-Britannique.....	41
2.15	Profil longitudinal d'un talus et surfaces potentielles de rupture.....	42
2.16	Représentation schématique d'une procédure probabiliste.....	43
2.17	Distribution de la probabilité de rupture calculée pour différents types de sols; ville de Manizales, Colombie.....	44
3.1	Localisation du secteur d'étude, Saguenay-Lac-Saint-Jean.....	50
3.2	Envahissement marin suite au retrait des glaciers, région du Saguenay.....	51
3.3	Carte synthétique des dépôts meubles de la partie sud-est de la région du Saguenay.....	52
3.4	Localisation des glissements de terrain provoqués par les fortes pluies de juillet 1996 dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean.....	53
3.5	Avalanche de boue; rue Henry McNicoll, Ville de La Baie.....	54
3.6	Localisation des glissements de terrain superficiels identifiés par photo-interprétation diachronique, couvrant la période 1927 - 1996, pour le secteur sud de la région de Ville de La Baie.....	55
3.7	Exemples de glissements de terrain superficiels dans le secteur de Ville de La Baie.....	56
4.1	Représentation schématique de la pente globale et de la hauteur totale d'un	67

	talus.....	
4.2	Organigramme des étapes d'analyse morphométrique suivies pour caractériser la hauteur totale et la pente globale des talus du secteur des Bouleaux, Ville de La Baie.....	68
4.3	Localisation du secteur pilote des Bouleaux, Saguenay-Lac-Saint-Jean.....	69
4.4	MNA du secteur des Bouleaux.....	70
4.5	Représentation tridimensionnelle du MNA du secteur des Bouleaux, Ville de La Baie.....	71
4.6	Artefacts du MNA produits par la méthode d'interpolation par spline, secteur des Bouleaux.....	72
4.7	Courbe hypsométrique du secteur des Bouleaux.....	73
4.8	Représentation schématique d'un talus; définition préliminaire.....	74
4.9	Carte des pentes locales, secteur des Bouleaux.....	75
4.10	Carte des talus, secteur des Bouleaux.....	76
4.11	Limites des talus superposées à la représentation tridimensionnelle du MNA, secteur des Bouleaux.....	77
4.12	Exemple d'identification des points hauts basée sur la notion de flux.....	78
4.13	Carte de la distribution des points hauts, secteur des Bouleaux.....	79
4.14	Distribution des points hauts à la surface du relief, secteur des Bouleaux.....	80
4.15	Exemple d'identification d'un chemin de plus grande pente.....	81
4.16	Carte des pentes globales des talus, secteur des Bouleaux.....	82
4.17	Carte des hauteurs totales des talus, secteur des Bouleaux.....	83
4.18	Profils d'arpentage drapés sur la représentation tridimensionnelle du MNA, secteur des Bouleaux.....	84
5.1	Représentation schématique du modèle de la pente infinie avec une rupture planaire parallèle à la surface topographique, et un écoulement parallèle à la pente.....	94
5.2	Simplification de la forme convexo-concave d'un talus à une forme rectiligne.....	95
5.3	Profils d'arpentage drapés sur la représentation tridimensionnelle du MNA, secteur des Bouleaux.....	96
5.4	Cheminement des contraintes et paramètres obtenus suite à des essais triaxiaux CIU pour un site situé à l'intérieur du secteur des Bouleaux.....	97
5.5	Enveloppe de résistance obtenue suite à des essais triaxiaux CID pour un site situé à quelques kilomètres au nord du secteur des Bouleaux.....	98
5.6	Fissures de tension et de chevauchement observées à proximité du profil d'arpentage 002, secteur des Bouleaux.....	99
5.7	Carte des facteurs de sécurité calculés à partir des pentes définies localement, au voisinage d'un pixel, secteur des Bouleaux.....	100
5.8	Histogramme de fréquence des facteurs de sécurité calculés à partir des pentes définies localement et globalement, secteur des Bouleaux.....	101
5.9	Carte des facteurs de sécurité calculés à partir des valeurs des pentes définies globalement, secteur des Bouleaux.....	102
5.10	Carte des facteurs de sécurité obtenus pour une valeur du facteur m égale à 0.25 en utilisant la pente globale, et histogramme de fréquence des facteurs de sécurité, secteur des Bouleaux.....	103

5.11	Carte des facteurs de sécurité obtenus pour une valeur du facteur $m$ égale à 0.50 en utilisant la pente globale, et histogramme de fréquence des facteurs de sécurité, secteur des Bouleaux.....	104
5.12	Carte des facteurs de sécurité obtenus pour une valeur du facteur $m$ égale à 0.75 en utilisant la pente globale, et histogramme de fréquence des facteurs de sécurité, secteur des Bouleaux.....	105
5.13	Carte des facteurs de sécurité obtenus pour une valeur du facteur $m$ égale à 1.00 en utilisant la pente globale, et histogramme de fréquence des facteurs de sécurité, secteur des Bouleaux.....	106
5.14	Variation du pourcentage de pixels ayant un facteur de sécurité inférieur à un en fonction du rapport $m$ ; secteur des Bouleaux.....	107
5.15	Profils d'arpentage superposés aux cartes des facteurs de sécurité calculés avec des valeurs de pentes locales et de pentes globales, secteur des Bouleaux.....	108
6.1	Procédure d'évaluation quantitative de l'aléa « glissement de terrain » développée pour le secteur de Ville de la Baie.....	135
6.2	Fréquence et fréquence cumulée de la superficie des glissements de terrain, Saguenay-Lac-Saint-Jean.....	136
6.3	Fréquence, fréquence cumulée et fréquence cumulée inverse du rapport de la distance d'étalement des débris à la hauteur des talus, Saguenay-Lac-Saint-Jean.....	137
6.4	Nombre de glissements de terrain observé pour les années comprises entre 1950 et 2000; Ville de La Baie, secteur sud.....	138
6.5	Pente et hauteur des talus déstabilisés, Ville de La Baie.....	139
6.6	Fréquence et fréquence cumulée du nombre de glissements de terrain en fonction de la pente des talus, Ville de La Baie.....	140
6.7	Carte des talus argileux dont la pente est supérieure à $22^\circ$ et la hauteur supérieure à 5 m; Ville de La Baie, secteur sud.....	141
6.8	Fréquence et fréquence cumulée de la superficie des talus en fonction de leur pente, secteur des Bouleaux.....	142
6.9	Probabilité de rupture et probabilité de post-rupture associées à un glissement de terrain.....	143
6.10	Probabilité associée à la phase de post-rupture pour différents rapports de la distance d'étalement des débris à la hauteur des talus.....	144
6.11	Carte des talus et des quatre bandes de terrain situées à leur base, et des valeurs de probabilité associées à la phase de post-rupture; butte des Bouleaux, secteur des Bouleaux.....	145
6.12	Aléa global en fonction du rapport de la distance d'étalement des débris à la hauteur des talus, en considérant deux superficies de glissement de terrain; Ville de La Baie, secteur sud.....	146
6.13	Carte de l'aléa global évalué en considérant une superficie de glissement de terrain de $350 \text{ m}^2$ ; butte des Bouleaux, secteur des Bouleaux.....	147
6.14	Probabilité associée à la phase de rupture en fonction de la pente des talus, en considérant deux superficies de glissement de terrain; Ville de La Baie, secteur sud.....	148
6.15	Carte de la probabilité de rupture (aléa spécifique) calculée en utilisant une	149

	superficie de glissement de terrain de 350 m <sup>2</sup> , secteur des Bouleaux.....	
6.16	Aléa spécifique, évalué en considérant une superficie de glissement de terrain de 100 m <sup>2</sup> , en fonction de la pente des talus et du rapport D/H; Ville de La Baie, secteur sud.....	150
6.17	Aléa spécifique, évalué en considérant une superficie de glissement de terrain de 350 m <sup>2</sup> , en fonction de la pente des talus et du rapport D/H; Ville de La Baie, secteur sud.....	151
6.18	Exemple de croisement des polygones de probabilité de rupture en fonction de la pente et des polygones de probabilité de post-rupture; flanc sud de la butte des Bouleaux, secteur des Bouleaux.....	152
6.19	Carte de l'aléa spécifique d'une partie du flanc sud de la butte des Bouleaux calculée en considérant une superficie de glissement de terrain de 350 m <sup>2</sup> , secteur des Bouleaux.....	153
6.20	Identification des éléments exposés au danger de glissement de terrain; butte des Bouleaux, secteur des Bouleaux.....	154
6.21	Estimation du risque de glissement de terrain en considérant une superficie de glissement de terrain de 100 m <sup>2</sup> pour les quatre bandes de terrain situées à la base des talus; Ville de La Baie, secteur sud.....	155
6.22	Estimation du risque de glissement de terrain en considérant une superficie de glissement de terrain de 350 m <sup>2</sup> pour les quatre bandes de terrain situées à la base des talus; Ville de La Baie, secteur sud.....	156
6.23	Risque associé à la rupture de plusieurs ouvrages d'ingénierie, et limites d'acceptabilité du risque.....	157
6.24	Limite d'acceptabilité du risque de glissement de terrain au Canada suggérée par Evans (1997) pour la Colombie-Britannique.....	158
6.25	Limites d'acceptabilité du risque de glissement de terrain suggérées par Morgan (1997) pour le Canada.....	159
6.26	Acceptabilité du risque en considérant une superficie de glissement de terrain de 100 m <sup>2</sup> pour les talus et les quatre bandes de terrain situées à la base des talus; Ville de La Baie, secteur sud.....	160
6.27	Acceptabilité du risque en considérant une superficie de glissement de terrain de 350 m <sup>2</sup> pour les talus et les quatre bandes de terrain situées à la base des talus; Ville de La Baie, secteur sud.....	161
6.28	Carte de l'acceptabilité du risque d'une partie du flanc sud de la butte des Bouleaux estimé en considérant une superficie de glissement de terrain de 350 m <sup>2</sup> ; secteur des Bouleaux.....	162
6.29	Rectification d'un talus instable du secteur des Bouleaux, Ville de La Baie.....	163
7.1	Facteurs de sécurité calculés pour différentes géométries de talus.....	175
A1	Représentation de la réalité à l'aide de plusieurs couches d'information à l'intérieur d'un SIG.....	186
A2	Représentation de l'information à l'intérieur d'un SIG.....	187
A3	Conversion des éléments du monde réel en objets discrets géoréférencés selon le format matriciel, et selon le format vectoriel.....	188
A4	Exemple de MNA en format matriciel.....	189

A5	Réseau triangulaire irrégulier.....	190
A6	Analyse de voisinage par une sous-matrice de dimension 3x3 se déplaçant sur l'ensemble d'un MNA.....	191
A7	Directions de calcul de la pente retenues par un algorithme dit du D8.....	192
A8	Surface passant par les neuf points d'une sous-matrice d'altitude de dimension 3x3.....	193
A9	Recherche des flux sur un MNA matriciel.....	194

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

### 1.1 Problématique

Les glissements de terrain peuvent représenter un enjeu majeur lorsqu'ils interfèrent avec les activités humaines et les biens exposés à ce type de danger. Au Canada, les glissements de terrain sont l'un des aléas naturels les plus importants et sont présents en grand nombre dans les basses-terres argileuses de l'Est du Canada. Par exemple, les 19 et 20 juillet 1996, suite à des pluies exceptionnelles, une partie du Saguenay-Lac-Saint-Jean a été touchée par plus de mille glissements de terrain qui se sont produits sur une superficie du territoire d'environ 350 km<sup>2</sup>, causant deux décès (Ministère des transports du Québec, 1999). En plus des pertes de vie, les glissements de terrain peuvent entraîner des pertes économiques importantes pour les régions exposées à ce phénomène naturel. Il est très difficile d'en évaluer les coûts. Selon Cruden et al. (1989), le coût total imputable aux glissements de terrain pourrait atteindre 1.5 milliards de dollars par an au Canada.

La gestion et la réduction des risques de glissement de terrain peuvent se faire selon plusieurs approches. Une approche possible consiste à évaluer et à cartographier l'aléa « glissement de terrain » à l'intérieur des zones potentiellement instables. Ces cartes constituent un outil de gestion et de réglementation pour l'aménagement du territoire.

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de l'aléa « glissement de terrain » et celles-ci sont présentées entre autres dans les travaux de Alleotti et Chowdhury (1999) et du IUGS (1997). Ces méthodes sont revues au chapitre 2 de ce travail. À l'échelle régionale, ces méthodes sont généralement qualitatives, c'est-à-dire basées sur l'expérience régionale d'experts, et beaucoup plus rarement quantitatives. Les analyses quantitatives requièrent en général une approche théorique plus rigoureuse.

Pour pallier aux difficultés à quantifier l'aléa glissement de terrain, les systèmes d'information géographique (annexe A1) sont de plus en plus utilisés (Brunori et al.,

1996; van Westen et Terlien, 1996; Miller, 1995). Le développement de ces outils rend possible non seulement l'automatisation de certaines tâches de reproduction cartographique (dessin assisté par ordinateur, documents géoréférencés), mais aussi la réalisation d'opérations d'analyse morphométrique très complexes. De plus, des codes de calcul peuvent être greffés aux systèmes d'information géographique (SIG) de façon à réaliser diverses analyses qui ne sont pas disponibles dans les SIG. Dans cette étude, les principaux logiciels utilisés sont MapInfo (version professionnelle 5.5), Geographic Resources Analysis and Support System (GRASS, version 4.2.1) et IGOR Pro (version 4.01).

## **1.2 Objectif**

À partir des éléments exposés ci-avant, l'objectif de cette étude consiste à élaborer une méthode quantitative de cartographie de l'aléa « glissement de terrain » en s'appuyant sur les fonctionnalités offertes par les SIG.

## **1.3 Méthodologie**

La méthodologie proposée lors de ce travail a été développée pour les glissements de terrain superficiels affectant les talus argileux des basses-terres de l'Est du Canada. Elle est appliquée en particulier au secteur de Ville de La Baie, dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Le chapitre 3 présente une description détaillée de la géologie et de la physiographie du secteur d'étude. Ce chapitre expose aussi les diverses raisons ayant conduit au choix de ce secteur afin de développer la méthodologie. Par ailleurs, la typologie des glissements de terrain observés dans cette région est présentée.

### **1.3.1 Analyse morphométrique des talus à l'aide des SIG**

Au chapitre 4, une analyse morphométrique des talus du secteur d'étude est réalisée à l'aide des SIG à partir d'un modèle numérique d'altitude (annexe A2). Cette analyse est effectuée sur un secteur pilote du secteur d'étude, le secteur des Bouleaux, pour lequel un modèle numérique d'altitude (MNA) à haute résolution est disponible.

L'analyse morphométrique permet de quantifier certaines caractéristiques géométriques des talus nécessaires à l'évaluation de l'aléa « glissement de terrain », telles que la pente et la hauteur. Contrairement aux travaux présentés dans la littérature, à l'exception de l'approche de Miller (1995), la pente est extraite globalement, c'est-à-dire du sommet à la base des talus, et non au voisinage d'un pixel. La pente globale reflète davantage la pente au sens géotechnique, puisqu'elle constitue une meilleure approximation de celle identifiée par l'expert sur le terrain pour estimer la stabilité d'un talus. Pour extraire la pente globale, un algorithme a été développé dans le cadre de ce travail puisque aucune procédure similaire n'existe dans les SIG disponibles actuellement.

### **1.3.2 Évaluation et cartographie de l'aléa « glissement de terrain » par le modèle de la pente infinie**

Dans la littérature, les SIG matriciels sont fréquemment utilisés pour quantifier l'aléa « glissement de terrain » à l'aide du modèle de la pente infinie. Ce modèle est couramment utilisé en raison de sa simplicité : le facteur de sécurité est simplement calculé pour chacun des pixels en intégrant les valeurs de pentes locales déterminées par les fonctions du SIG. Afin de vérifier l'applicabilité du modèle de la pente infinie, celui-ci est utilisé pour évaluer et cartographier la stabilité à partir des valeurs de pentes locales et globales extraites au chapitre 4 par analyse morphométrique. Cette approche est présentée au chapitre 5.

### **1.3.3 Évaluation et cartographie de l'aléa « glissement de terrain » par la méthode des indices de surface**

Au chapitre 6, cette étude propose une méthode d'évaluation quantitative de l'aléa basée sur les caractéristiques du danger et des facteurs discriminants de l'instabilité. Deux procédures sont proposées : (i) une évaluation de l'aléa global pour l'ensemble des talus de la région d'étude, et (ii) une évaluation de l'aléa spécifique pour différentes classes de pente. Dans les deux cas, l'aléa est calculé par un indice normalisant la surface affectée annuellement par les glissements de terrain à la surface totale des talus argileux de la région. Les calculs d'aléa proposés tiennent compte, d'une part, des phases de rupture et de post-rupture des glissements de terrain, et d'autre part, des composantes spatiale et temporelle de l'aléa.

Comme exercice d'application, le risque est estimé en combinant les résultats obtenus pour l'aléa aux conséquences que peuvent avoir les glissements de terrain sur les éléments exposés à ce danger. Par simplicité, seules les maisons unifamiliales sont considérées. Ces informations sont comparées à des critères d'acceptabilité du risque proposés dans la littérature.

L'aléa et le risque sont très complexes à évaluer à l'échelle régionale en raison de l'importante quantité d'information requise concernant, entre autres, le danger, les facteurs discriminants de l'instabilité ainsi que la vulnérabilité des éléments exposés. L'évaluation de l'aléa et du risque nécessite donc bien souvent de faire un grand nombre d'hypothèses sur ces données. En raison de ces nombreuses hypothèses, l'approche suivie dans cette étude simplifie la réalité. Ce travail représente donc, avant tout, un exercice méthodologique visant à apporter de nouvelles idées en matière d'évaluation et de cartographie de l'aléa et du risque de glissement de terrain à l'aide des SIG. Il serait donc irresponsable d'utiliser directement les résultats obtenus dans ce travail pour prendre des décisions en matière de gestion du territoire.

## CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente une revue générale des principales méthodes d'évaluation et de cartographie de l'aléa « glissement de terrain ». À l'échelle régionale, le développement de ces méthodes s'est accrue au cours des dernières décennies grâce aux systèmes d'information géographique (SIG). Une brève introduction de quelques notions importantes impliquées dans le processus d'évaluation du risque est présentée dans ce chapitre, puis l'apport des SIG à l'évaluation et à la cartographie de l'aléa est documenté.

### 2.1 Du danger au risque : quelques définitions

L'analyse du risque a pour objectif, d'une part, d'évaluer la probabilité qu'un phénomène se produise et, d'autre part, d'en évaluer les conséquences. Vaunat et al. (1992) proposent, par exemple, un cadre général d'analyse du risque de glissement de terrain, incluant l'évaluation de l'aléa. Ce type d'analyse fait appel à plusieurs notions telles que le danger, l'aléa, les éléments exposés, la vulnérabilité, et le risque (figure 2.1). Dans la langue courante, ces notions sont souvent confuses, et il est nécessaire de définir le plus précisément possible ces termes utilisés en analyse de risque. Les définitions reprises ici ont été proposées par le groupe de travail sur les glissements de terrain du IUGS (International Union of Geological Sciences) en 1997 :

- Danger : le phénomène naturel, dans ce cas, les glissements de terrain, caractérisé par sa géométrie et la mécanique du mouvement<sup>1</sup>;
- Intensité : série de paramètres distribués spatialement décrivant le pouvoir destructif des glissements de terrain (Hungry, 1997);
- Aléa : la probabilité qu'un glissement de terrain se produise durant une période de temps donnée;

<sup>1</sup> Cette définition est conforme à celle suggérée par Varnes (1984), mais diffère de celle introduite par Einstein (1988).

- Éléments exposés : la population, les bâtiments, les travaux d'ingénierie, les activités économiques, les services publics et les infrastructures, situés à l'intérieur d'une zone potentiellement affectée par les glissements de terrain;
- Vulnérabilité : le degré de perte d'un élément ou d'une série d'éléments donnés situés à l'intérieur d'une zone potentiellement affectée par les glissements de terrain;
- Risque : mesure de la probabilité et de la sévérité d'un effet défavorable à la santé, aux biens et à l'environnement.

Une évaluation complète de l'aléa « glissement de terrain » considère à la fois les composantes temporelle et spatiale de l'aléa. La composante temporelle correspond à la probabilité qu'un glissement de terrain se produise durant une période de temps donnée. La composante spatiale fait référence à la probabilité qu'un glissement de terrain se produise à l'intérieur d'une région donnée.

La composante spatiale de l'aléa doit tenir compte de deux phases du mouvement, c'est-à-dire les phases de (i) rupture et de (ii) post-rupture.

- i) La phase de rupture est caractérisée par la formation d'une surface de cisaillement continue dans la masse de sol (Leroueil et Locat, 1998).
- ii) La phase de post-rupture est caractérisée par le mouvement de la masse de sol déplacée, de la rupture à l'immobilisation des débris.

En pratique, l'aléa est rarement évalué en terme probabiliste, c'est-à-dire de façon quantitative, comme l'indique sa définition au sens stricte. En effet, la détermination de la probabilité nécessite une analyse statistique des facteurs discriminants de l'instabilité ou l'application de modèles déterministes ou probabilistes complexes. Par conséquent, c'est généralement la susceptibilité qui est évaluée, c'est-à-dire la possibilité, plus ou moins grande, qu'un glissement de terrain se produise dans une région donnée, sans intégrer la composante temporelle de l'aléa.

Les éléments exposés au danger correspondent aux éléments qui peuvent potentiellement être endommagés par les glissements de terrain et ceci, de façon directe ou indirecte.

Selon Leroi (1996), la vulnérabilité des éléments exposés dépend de l'intensité associée au phénomène. Cependant, l'évaluation de la vulnérabilité, qui tient compte de l'intensité du phénomène est difficile à entreprendre à l'échelle régionale. En effet, l'intensité dépend à la fois des caractéristiques et des propriétés physiques du matériel, ainsi que des caractéristiques géométriques des talus. L'établissement d'une relation entre ces caractéristiques et les glissements de terrain requiert un très grand nombre de données concernant les glissements historiques qui se sont produit à l'intérieur de la région considérée ou alors une modélisation mathématique des phénomènes. Pour cette raison, plusieurs études présentées dans la littérature (Hungry, 1997; Morgan, 1997; Whitman, 1984) proposent plutôt d'évaluer les conséquences du danger sur les éléments exposés.

Dans les travaux concernant le risque de glissement de terrain, plusieurs définitions du terme « risque » peuvent être utilisées. Celui-ci est couramment défini comme étant égal au produit de l'aléa et de la vulnérabilité. Cependant, l'évaluation et la cartographie du risque selon cette définition sont rarement accomplis de façon concrète étant donné la complexité à évaluer la vulnérabilité des éléments exposés. Pour contourner ce problème, certains auteurs, tel que le groupe de travail sur les glissements de terrain du IUGS (1997) ainsi que Morgan (1997), proposent une interprétation plus générale du risque. Leur approche implique une simple comparaison de l'aléa et des conséquences du phénomène. Selon cette interprétation, le risque est estimé à l'aide d'un graphique de la probabilité annuelle d'un événement (aléa) en fonction des conséquences associées au phénomène. Le niveau de risque peut être ensuite comparé à différents critères d'acceptabilité définis par la société.

## **2.2 Cartographie de l'aléa**

### 2.2.1 Tendances générales

Au cours des dix dernières décennies, un effort considérable a été effectué dans plusieurs pays pour cartographier l'aléa « glissement de terrain ». Cet intérêt s'explique, en partie, par une augmentation de la prise de conscience de la signification socio-économique des risques de glissement de terrain, ainsi que par l'accroissement du développement et de l'urbanisation (Aleotti et Chowdhury, 1999). Par conséquent, l'évaluation de l'aléa et sa représentation cartographique ont fait l'objet de nombreuses recherches. Plusieurs méthodes sont maintenant proposées dans la littérature.

Aleotti et Chowdhury (1999) présentent une synthèse des méthodes de cartographie de l'aléa, et proposent une classification des principales approches qui ont été développées à travers le monde (figure 2.2). Selon ces auteurs, elles peuvent se diviser en deux principales catégories : les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives. Les méthodes qualitatives peuvent être des approches géomorphologiques ou des approches basées sur des opérations simples d'algèbre cartographique. Les méthodes quantitatives sont basées sur des analyses statistiques, ou sur des modèles déterministes ou probabilistes.

Dans le cadre d'une revue des pratiques suivies en Italie pour cartographier les zones exposées aux risques de glissement de terrain, Guzzetti et al. (1999) proposent une autre classification. Elle regroupe les méthodes qualitatives et quantitatives d'évaluation de l'aléa en cinq catégories :

- analyses géomorphologiques de l'aléa;
- analyses d'inventaires de glissements de terrain;
- méthodes heuristiques ou basées sur des indices;
- modèles statistiques;
- modèles physiques ou géotechniques.

Les frontières entre ces différentes méthodes ne sont pas toujours nettes et, dans bien des cas, l'évaluation de l'aléa fait appel à plusieurs approches.

Chacune des méthodes d'analyse et de cartographie de l'aléa utilise des données provenant de différentes cartes des facteurs qui influencent la stabilité des talus de la région considérée. Les facteurs sont divisés en plusieurs classes de façon à représenter leur variabilité dans l'espace. Dans la littérature, les facteurs les plus fréquemment utilisés sont la pente, la géologie des dépôts de surface, la géomorphologie, l'utilisation des terres, la végétation, la nature de la roche en place, et la profondeur de la nappe phréatique.

Ainsi, pour évaluer l'aléa à l'échelle régionale, l'utilisation de plusieurs facteurs qui varient dans l'espace nécessite de considérer plusieurs cartes et de réaliser un grand nombre de calculs. Pour ce faire, les SIG sont des outils privilégiés pour manipuler, visualiser, et analyser les données provenant des différentes cartes.

### **2.2.2 Apport des systèmes d'information géographique (SIG)**

Le développement considérable des SIG (annexe A1) depuis les dix dernières années a permis d'augmenter la puissance des techniques d'évaluation et de cartographie de l'aléa à l'échelle régionale. Ce développement s'est observé principalement au niveau des méthodes quantitatives qui requièrent des analyses plus sophistiquées que les méthodes qualitatives. Les premières applications simples datent des années 1970 (Aronoff, 1989). Par contre, c'est au milieu des années 1980 que l'utilisation des SIG s'est répandue grâce au développement d'applications commerciales et de la disponibilité des ordinateurs personnels.

Ces systèmes d'information géographique qui, au départ, n'intervenaient que dans l'automatisation de certaines tâches de reproduction cartographique et de dessin assisté par ordinateur, sont maintenant des outils qui permettent de réaliser des opérations complexes d'analyse spatiale telles que des calculs de pentes, de flux et d'identification

de bassins versants (Aronoff, 1989). Le format matriciel est couramment employé parce qu'il permet de réaliser simplement des opérations d'algèbre cartographique ainsi que des opérations d'analyse de voisinage pour extraire automatiquement des paramètres de forme du terrain naturel.

## **2.3 Classification des principales méthodes d'évaluation de l'aléa « glissement de terrain »**

Cette section présente une revue des principales méthodes d'évaluation et de cartographie de l'aléa « glissements de terrain » basées sur l'utilisation des SIG. Ces méthodes sont illustrées par divers exemples provenant de la littérature. La classification proposée ici reprend pour l'essentiel le travail d'Aleotti et Chowdhury (1999), mais s'inspire également de l'article de Guzzetti et al. (1999) et du rapport du Comité français de géologie de l'ingénieur (CFGI, 2000).

### **2.3.1 Méthodes qualitatives**

Les méthodes qualitatives sont, selon Aleotti et al. (1999), soit directes ou semi-directes. Ces méthodes peuvent reposer sur l'expérience régionale d'experts qui déterminent sur le terrain la prédisposition aux glissements de terrain d'une région donnée. C'est le cas des approches essentiellement géomorphologiques. Elles peuvent aussi être réalisées en combinant, par des approches basées sur des opérations simples d'algèbre cartographique, des cartes de facteurs contrôlant la stabilité des talus d'une région.

Les méthodes qualitatives s'avèrent souvent très subjectives puisqu'elles font appel à plusieurs reprises au jugement d'experts.

#### **2.3.1.1 Approches essentiellement géomorphologiques**

Les approches essentiellement géomorphologiques sont des méthodes directes qui reposent sur les connaissances d'experts qui évaluent l'aléa sur le terrain en suivant des règles de décision qu'ils ont préalablement établies selon leur expérience régionale. Un exemple d'une série de règles de décision préliminaires proposée pour évaluer l'aléa « glissement de terrain » au Québec est présenté à la figure 2.3. Les travaux de terrain sont généralement supportés par une interprétation de photographies aériennes et par diverses cartes de facteurs qui influencent la stabilité des talus.

Dans les approches géomorphologiques, les SIG sont utilisés seulement comme outil de dessin et de visualisation de l'information. À partir des données recueillies, des zones d'aléa plus ou moins élevé sont identifiées et cartographiées à l'aide des SIG. En format vectoriel, les différentes zones forment des polygones à l'intérieur desquels les valeurs d'aléa sont homogènes et, dans certains cas, reliées à une base de données.

Bien que ne faisant pas appel explicitement aux SIG, un des meilleurs exemples d'analyse géomorphologique de l'aléa « glissement de terrain » présenté dans la littérature est la procédure ZERMOS (Zones Exposées aux Risques de Mouvements de Sol). La figure 2.4 présente un exemple de carte d'aléa obtenue par cette procédure. Les zones d'aléa sont distinguées par des codes de couleurs correspondant à différents niveaux d'instabilité. Par exemple, initialement, le zonage était défini de la façon suivante (CFGI, 2000) :

- **Le vert** indique qu'aucune instabilité ne semble devoir se produire dans cette zone, dans l'état actuel des connaissances;
- **L'orange** indique qu'il existe une menace potentielle d'instabilité et que des incertitudes subsistent quant à la nature et à l'ampleur des mouvements;
- **Le rouge** indique que les menaces d'instabilité sont réelles et qu'elles représentent un danger certain.

Un autre excellent exemple d'application de ce type d'approche géomorphologique est présenté dans les travaux de Lebus et al. (1983) du service de la géotechnique du

Ministère de l'énergie et des ressources naturelles (MRN) au Québec. Dans cette étude, des informations recueillies sur des cartes topographiques et sur des profils de talus sont, entre autres, utilisées pour délimiter les zones exposées au risque de glissement de terrain à l'aide de décision établies selon l'expérience d'expert. Un exemple d'une section de carte des zones exposées aux mouvements de terrain réalisée par Rissmann et al. (1985) le long de la rivière Yamaska, entre Yamaska et Saint-Hyacinthe, est présenté à la figure 2.5.

Depuis 1997 le Ministère des transports du Québec (MTQ) a entrepris un programme pilote de cartographie des zones exposées aux glissements de terrain dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Cette cartographie repose sur la méthode proposée par Lebuis et al. (1983) et intègre les nouveaux concepts de formalisation du raisonnement d'experts qui ont été développés depuis les vingt dernières années (Einstein, 1988; Vaunat et al., 1992; Hungr, 1997; Leroueil et Locat, 1998).

Le principal désavantage de l'approche géomorphologique serait relié, selon Aleotti et Chowdhury (1999), à la subjectivité associée à la sélection des facteurs considérés et à l'établissement des règles de décision. Ainsi, les cartes d'aléa basées sur le jugement de différents investigateurs ou experts pour un même secteur peuvent s'avérer, dans certains cas, très différentes et leur comparaison est souvent difficile.

Afin de mettre en évidence la part de subjectivité a priori inhérente à ce type de cartographie, Carrara et al. (1992) présentent quelques exemples d'études comparatives où des équipes différentes ont établi une carte des zones exposées aux glissements de terrain pour un même secteur. La figure 2.6 montre un de ces exemples (bassin de Marecchia dans le nord de l'Italie). La carte du bas a été obtenue par le recouvrement des deux cartes préparées par deux équipes différentes. De cette carte, les auteurs ont évalué que seulement 15% de la superficie des zones d'aléa identifiées par les deux équipes sont communes, ce qui donne une erreur de cartographie de presque 85%. Il apparaît donc que le désaccord entre ces deux équipes est important et que la comparaison des cartes résultantes devient très difficile. Il est à noter que ce type d'étude peut varier selon le type

de mouvements de terrain à analyser et la nature des terrains. Cela montre tout de même qu'il est extrêmement important de fixer des règles encadrant le jugement du spécialiste.

### **2.3.1.2 Approches basées sur des opérations simples d'algèbre cartographique**

Selon Aronoff (1989), l'algèbre cartographique consiste à réaliser des opérations logiques telles que l'addition, la soustraction, la multiplication et la division, pour chaque donnée d'une carte en utilisant les données correspondantes d'une ou de plusieurs autres cartes.

Pour évaluer l'aléa « glissement de terrain », ce type d'approche nécessite, en premier lieu, la sélection des cartes des facteurs qui influencent la stabilité des talus de la région considérée. Ensuite, selon l'expérience régionale d'experts, chaque facteur, ainsi que chacune de leurs classes, se voient attribuer un poids en fonction de leur contribution à l'instabilité. Les cartes des poids ainsi créées sont ensuite superposées et des opérations logiques sont effectuées entre les cartes de façon à obtenir la carte résultante de l'aléa.

Les approches basées sur des opérations simples d'algèbre cartographique bénéficient des SIG pour automatiser les procédures de superposition de cartes et pour réaliser les opérations logiques entre celles-ci. Ces opérations sont réalisées de façon plus efficace en format matriciel que vectoriel. En format matriciel, les opérations logiques sont effectuées pour chacun des pixels, et les résultats pour les pixels correspondants sont indiqués sur une carte résultante correspondant à l'aléa « glissement de terrain » (figure 2.7).

Mejia-Navarro et al. (1994) présentent une approche basée sur l'algèbre cartographique pour évaluer et cartographier certains aléas géologiques de la région de Glendwood Springs au Colorado. Dans cette étude, l'aléa « coulées de débris » (Hdf) est évalué, pixel par pixel, à partir d'une série de trois équations (équations 2.1, 2.2, 2.3) qui utilisent l'information combinée provenant de plusieurs cartes de facteurs. Les facteurs considérés sont les suivants : la topographie, l'hydrologie, les précipitations, les processus

géomorphologiques, la géologie de surface et du socle rocheux, la géologie structurale, la végétation, les propriétés du sol et l'utilisation des terres. Les équations utilisées sont :

$$\text{Sdf} = \text{slopedf} (\text{aspect} \times 7 + \text{usc-casag} \times 4 + \text{sgmdf} \times 9 + \text{veg} \times 8 + \text{hgdf} \times 5 + \text{shrswell} \times 2 + \text{erosK} \times 7 + \text{lusess}^* \times 3 + \text{wsbuf} \times 8 + \text{femahist} \times 10 + \text{isohaa} \times 4) / 67$$

(équation 2.1)

$$\text{Trigger-ps} = (\text{isoseismals} \times 3 + \text{PMP} \times 5) / 8$$

(équation 2.2)

$$\text{Hdf} = \text{Sdf} \times \text{trigger-ps}$$

(équation 2.3)

- Sdf** : susceptibilité aux coulées de débris;
- slopedf** : angle du talus;
- aspect** : orientation du talus;
- usc-casag** : propriétés physico-chimique du matériel altéré en surface;
- sgmdf** : susceptibilité aux coulées de débris du matériel en surface;
- veg** : couvert végétal;
- hgdf** : classe hydrologique du sol utilisée pour estimer le ruissellement suite aux précipitations;
- shrswell** : concentration d'argile et minéralogie, en relation avec le potentiel de retrait-gonflement;
- erosK** : potentiel d'érosion de surface;
- lules** : utilisation des terres;
- wsbuf** : ordre du réseau d'écoulement;
- femahist** : glissement de terrain historiques;
- isohaa** : précipitations annuelles moyennes;
- trigger-ps** : éléments déclencheurs sismiques et climatiques des coulées de débris;
- isoseismals** : position et magnitude des séismes historiques, position des failles et susceptibilité de la géologie de surface et du roc à amplifier les ondes sismiques;
- PMP** : précipitations maximales probables.

Dans les deux premières équations les facteurs considérés sont divisés en classes pour lesquelles un poids relatif est attribué. Chaque facteur est précédé d'un suffixe numérique qui correspond au poids qui lui est affecté. Ces valeurs de poids des facteurs et de leurs classes sont attribuées de façon subjective par les auteurs selon leur contribution à l'instabilité des talus.

La première équation estime la susceptibilité aux coulées de débris pour chaque pixel, tandis que la seconde tient compte des éléments déclencheurs en combinant la carte des accélérations sismiques avec la carte des précipitations maximales probables. Enfin, la troisième équation combine, pixel par pixel, les résultats des deux premières équations et conduit à la carte de l'aléa associé aux coulées de débris présentée à la figure 2.8.

L'attribution d'une pondération aux différents facteurs contrôlant la stabilité et à leurs classes est un premier pas vers une analyse quantitative de l'aléa. Ces approches, que l'on peut appeler semi-quantitatives, n'en restent pas moins fortement subjectives car elles reposent encore beaucoup sur le jugement d'experts.

Il est donc essentiel d'encadrer ce « jugement » en formalisant et en décomposant les différentes étapes du raisonnement. Par exemple, Leroueil et Locat (1998) proposent une grille d'analyse qui permet de guider l'ensemble du processus d'évaluation de l'aléa (figure 2.9). Une telle grille permet de caractériser le danger de façon organisée et amène l'investigateur à encadrer de façon rationnelle le processus d'évaluation de l'aléa.

### **2.3.2 Méthodes quantitatives**

Les méthodes quantitatives sont a priori plus objectives que les méthodes qualitatives puisqu'elles font moins appel au jugement d'experts. Ces méthodes sont indirectes et requièrent une approche théorique rigoureuse, et parfois très complexe. Elles peuvent être basées sur des inventaires de glissement de terrain, des analyses statistiques, ainsi que sur des modèles déterministes ou probabilistes de l'aléa.

### **2.3.2.1 Approches basées sur des inventaires de glissements de terrain**

Les approches basées sur des inventaires de glissements de terrain visent à prédire des patrons d'instabilités futures à partir de la distribution passée et présente des glissements de terrain à l'intérieur de la région considérée. Cette approche est basée sur la préparation de cartes d'isodensité montrant la distribution du nombre ou du pourcentage de la superficie couverte par les glissements de terrain d'une région (Guzzetti et al., 1999).

Les calculs de densité sur l'ensemble d'une région sont obtenus par interpolation. Plusieurs techniques d'interpolation peuvent être utilisées, et conduire, pour une même carte de base de distribution des glissements de terrain, à des cartes d'isodensité pouvant être très différentes. La fonction d'interpolation utilisée doit être sélectionnée avec soin et être bien adaptée à la nature du phénomène étudié (Aronoff, 1989).

Guzzetti et al. (1999), présentent une approche basée sur un inventaire de glissement de terrain afin d'évaluer l'aléa pour les régions de l'Umbria et de Marche en Italie. De façon à illustrer la distribution de l'aléa à l'intérieur de ces régions, les auteurs ont préparé une carte isoplèthe montrant la distribution de la densité de glissement de terrain (figure 2.10). La densité correspond au pourcentage de la région affectée par les glissements à l'intérieur d'une fenêtre circulaire d'environ 1 km<sup>2</sup>. Pour les zones exposées aux glissements de terrain, les valeurs de densité varient de 0.01 à 1.00 (ha/km<sup>2</sup>). Une valeur de densité égale à 1.00 signifie que l'ensemble de la région est couverte par des glissements de terrain.

### **2.3.2.2 Approches statistiques**

Pour évaluer l'aléa « glissement de terrain », les approches statistiques cherchent à établir une relation entre les facteurs qui contrôlent la stabilité des talus et la manifestation du danger. Pour établir cette relation, des poids sont attribués aux facteurs et à leurs classes à l'aide de relations statistiques établies entre la distribution spatiale des glissements de

terrain et celles des facteurs. L'aléa est ensuite évalué en réalisant des opérations d'algèbre cartographique entre les cartes des poids obtenues pour chaque facteur.

En général, c'est seulement la composante spatiale de l'aléa qui est prise en compte, mais il est possible d'incorporer une composante temporelle dans l'analyse, en particulier lorsqu'un lien a été établi entre certains paramètres hydro-météorologiques et l'initiation d'instabilités.

Les approches statistiques permettent d'évaluer les poids de façon plus objective en général, puisqu'elles sont basées sur une analyse statistique, contrairement aux approches basées seulement sur des opérations simples d'algèbre cartographique. Pour y parvenir, ces approches ont grandement bénéficié de la disponibilité des SIG qui sont utilisés principalement pour réaliser les analyses statistiques ainsi que les opérations d'algèbre cartographique.

#### **2.3.2.2.1 Analyses bivariées**

Les analyses statistiques bivariées s'apparentent aux approches basées sur des opérations simples d'algèbre cartographique. Cependant, ces deux types d'approches se distinguent par les calculs des poids qui s'appliquent aux différentes classes de facteurs contrôlant la stabilité. Dans les analyses bivariées, l'attribution des poids aux classes est réalisée en fonction de la densité de glissements de terrain à l'intérieur de celles-ci.

Les étapes suivies dans l'évaluation de l'aléa « glissement de terrain » lors d'une analyse statistique bivariée sont les suivantes (Aleotti et Chowdhury, 1999) :

1. Identification et préparation des cartes des facteurs qui contrôlent la stabilité;
2. Établissement de la carte de localisation des glissements de terrain;
3. Superposition de la carte des glissements de terrain aux cartes des facteurs;
4. Attribution d'un poids à chacune des classes de chacun des facteurs en fonction de la densité de glissements de terrain;

5. Attribution d'un poids à chacun des facteurs selon l'expérience régionale d'experts;
6. Calcul et cartographie de l'aléa par des opérations d'algèbre cartographique entre les cartes des facteurs pondérés.

Même si les analyses statistiques bivariées sont considérées comme des approches plus objectives que les méthodes qualitatives, un certain degré de subjectivité est encore associé à ce type d'approche, particulièrement à l'étape 5 pour laquelle l'attribution des poids des paramètres est réalisée selon le jugement d'experts.

#### **2.3.2.2 Analyses multivariées**

Afin de diminuer la part de subjectivité des analyses statistiques bivariées, les analyses multivariées évaluent les poids des classes mais aussi des facteurs à l'aide d'analyses statistiques. Ce type d'analyse requiert les étapes suivantes :

1. Classification de la région d'étude en unités de terrain homogène;
2. Identification et préparation des cartes des facteurs qui contrôlent la stabilité;
3. Établissement de la carte de localisation des glissements de terrain;
4. Identification du pourcentage des unités de terrain affectées par les glissements de terrain et classification de ces unités en unités stables ou instables à partir de valeurs seuils;
5. Combinaison des cartes de facteurs et de la carte des unités de terrain. Cette étape est suivie par la création d'une matrice absence/présence pour une classe donnée d'un facteur donné à l'intérieur de chaque unité de terrain;
6. Analyse statistique multivariée;
7. Reclassification des unités basée sur les résultats de l'analyse statistique multivariée et classification de l'aléa.

La première étape de l'analyse statistique multivariée requiert de sélectionner une unité de terrain appropriée à l'évaluation de l'aléa « glissement de terrain » pour la région considérée. Dans les premières applications, les unités de terrain étaient des éléments de

surface de dimensions variant avec la dimension de la région. Par la suite, les unités ont été définies sur des bases morphométriques (Aleotti et Chowdhury, 1999).

Les analyses statistiques les plus fréquemment utilisées sont les analyses discriminantes et les régressions multiples.

Brunori et al. (1996) présentent une méthode d'analyse statistique multivariée pour évaluer l'aléa d'une région de la Toscane en Italie. Trois facteurs qui contrôlent la stabilité des talus dans cette région sont pris en considération : la lithologie, l'utilisation des terres, et la pente.

Dans cette étude, les auteurs utilisent, comme unité de cartographie, des surfaces occupées par les glissements de terrain possédant une condition unique, c'est-à-dire la même combinaison de classe correspondant aux trois facteurs considérés. Ces unités de terrain correspondent aux surfaces des glissements de terrain ayant des caractéristiques homogènes, c'est-à-dire la même combinaison de lithologie, d'utilisation des terres et de pente (figure 2.11).

Les variables utilisées dans l'analyse statistique sont définies à partir des unités de cartographie par des rapports de surface. La variable dépendante ( $y$ ) est définie, pour chaque unité, comme le rapport de l'aire de l'unité à l'aire totale touchée par les glissements de terrain. De plus, une variable indépendante ( $x$ ) est définie pour chaque classe qui est représentée dans une même unité. Cette variable correspond au rapport entre l'aire de l'unité caractérisée par la classe et l'aire totale qui est représentée par cette classe dans l'ensemble de la région.

À partir des différentes variables dépendantes et indépendantes, les auteurs appliquent une analyse de régression multiple utilisant une fonction linéaire :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_ix_i + \dots + a_nx_n \quad (\text{équation 2.4})$$

où

$a_i$  sont les coefficients de la régression.

Les coefficients de la régression obtenus par l'analyse statistique permettent d'attribuer un poids aux facteurs et à leurs classes. Enfin, une opération d'addition est effectuée à partir des trois cartes résultantes de façon à calculer l'aléa pour chaque pixel de la région. La figure 2.12 illustre la carte d'aléa obtenue par Brunori et al. (1996).

### **2.3.2.3 Approches basées sur des modèles physiques et/ou géotechniques**

#### **2.3.2.3.1 Analyses déterministes**

Les analyses déterministes sont basées sur les lois physiques de la conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement (Van Westen, 1993). Dans ce type d'analyse, les principales propriétés physiques sont quantifiées et introduites dans des modèles mathématiques qui calculent le facteur de sécurité.

La plupart du temps, les modèles déterministes sont utilisés pour effectuer des études ponctuelles de stabilité. Cependant, la puissance grandissante des SIG permet de réaliser un nombre extrêmement élevé de calculs, et l'application de ces modèles à la cartographie régionale de l'aléa est envisageable. Dans ce type d'analyse, les SIG sont souvent utilisés pour extraire automatiquement des éléments morphométriques du terrain naturel dont certaines caractéristiques peuvent être requises dans l'équation du facteur de sécurité.

Pour évaluer la stabilité d'une région à l'aide de modèles déterministes, des procédures uni-, bi- et tridimensionnelles peuvent être utilisées, les procédures tridimensionnelles étant les plus complexes.

#### ***i)* Le modèle de la pente infinie**

Le modèle déterministe le plus utilisé dans la littérature pour évaluer la stabilité à l'échelle régionale à l'aide des SIG, est le modèle de la pente infinie. Dans ce modèle, la

hauteur n'est pas considérée et seule la pente intervient, et les SIG possèdent généralement des fonctions qui permettent de calculer la pente locale (annexe A3.2). Le modèle de la pente infinie est donc très bien adapté aux calculs effectués à l'aide des SIG matriciels. Par contre, ce modèle est applicable seulement à des mouvements translationnels dont la surface de rupture est plane et parallèle à la pente, elle-même assimilée à un plan incliné.

Dans le modèle de la pente infinie, le facteur de sécurité est calculé pixel par pixel en utilisant l'information provenant de plusieurs cartes telles que la pente, l'épaisseur des dépôts, la résistance au cisaillement du sol, et la profondeur de la nappe phréatique. De plus, l'effet de l'intensité des précipitations et des séismes sur la stabilité des talus peut être pris en compte. C'est entre autres le cas de l'étude faite par Van Westen et Terlien (1996) qui est présentée dans les paragraphes suivants.

Van Westen et Terlien (1996) utilisent le modèle de la pente infinie pour évaluer et cartographier l'aléa « glissement de terrain » de la région de Manizales en Colombie. Dans leur modèle, ces auteurs tiennent compte de la variation du niveau de la nappe phréatique en fonction de l'intensité des pluies ainsi que de l'accélération sismique.

Le niveau de la nappe phréatique est évalué en utilisant un modèle hydrologique externe au SIG. Ce modèle est appliqué à un certain nombre de profils ayant différentes combinaisons d'angle et de longueur de pente, d'épaisseur d'unités et de conductivité hydraulique. Les niveaux d'eau maximums pour chacun des profils sont calculés pour une période de temps donnée et utilisés pour construire une courbe intensité-fréquence du niveau de la nappe phréatique. Une fois les calculs réalisés sur les profils, ces derniers sont mis en relation, à l'intérieur du SIG, avec les combinaisons d'angle et de longueur de pente, d'épaisseur d'unités et de conductivité hydraulique retrouvées dans la région d'étude à partir de la base de données géologiques et de la carte topographique. Ainsi, des cartes des niveaux de la nappe phréatique sont dérivées pour l'ensemble de la région selon des intensités de pluies variables qui correspondent à différentes périodes de retour.

L'accélération sismique est aussi évaluée pour différentes intensités de séismes. L'équation utilisée par les auteurs correspond à une équation générale d'accélération sismique pour le roc, l'accélération est multipliée par un facteur qui tient compte de l'amplification des ondes sismiques dans le sol due aux conditions topographiques et géotechniques de la région (effets de site). L'équation résultante fait intervenir plusieurs paramètres dont la magnitude du séisme et la distance par rapport à son hypocentre. À partir d'un inventaire des séismes qui se sont produits dans la région d'étude, les auteurs ont calculé une courbe intensité-fréquence à partir de l'équation de l'accélération sismique en faisant varier la magnitude du séisme tout en conservant la distance de son hypocentre constante. Cette courbe permet de dériver plusieurs cartes de l'accélération sismique pour des intensités variables de séisme qui correspondent à différentes périodes de retour.

Finalement, à partir des cartes des niveaux de la nappe phréatique et de l'accélération sismique obtenues aux étapes précédentes, les auteurs calculent le facteur de sécurité pixel par pixel. La pente est dérivée localement à l'intérieur du SIG. Les propriétés mécaniques du sol sont considérées homogènes sur l'ensemble de la région d'étude. Les calculs sont réalisés en fonction de différents scénarios en faisant varier la profondeur de la nappe phréatique et l'accélération sismique afin d'évaluer des événements ayant des périodes de retour différentes. La figure 2.13 montre, pour la région de Manizales, une carte de la stabilité calculée pour un scénario correspondant à une intensité de pluie ayant une période de retour de vingt ans.

Pack et al. (1998) proposent aussi une analyse déterministe de l'aléa « glissement de terrain » dans leur approche SINMAP (Stability INDEX MAP). L'approche SINMAP évalue la stabilité, pixel par pixel, par le modèle de la pente infinie en utilisant les facteurs suivant : la pente locale, les propriétés mécaniques des matériaux (cohésion et angle de friction), le climat, la recharge, la transmissivité du sol et la zone de captage des eaux de surface. La pente locale et la zone de captage de chaque pixel de la région sont dérivées à l'intérieur du SIG par des opérations d'analyse morphométrique réalisées sur un modèle numérique d'altitude (MNA) (annexe A2). Les autres facteurs sont considérés constants ou comme ayant une distribution uniforme entre deux limites spécifiques. Ces limites

sont déterminées et entrées par l'opérateur lors de l'analyse et permettent de réaliser des analyses paramétriques.

La stabilité est évaluée pour chaque pixel sous forme d' « indice de stabilité » en utilisant les données qui leurs sont associées. L'indice de stabilité correspond au facteur de sécurité calculé en utilisant les facteurs les plus conservateurs. Un exemple de carte d'indice de stabilité réalisée par ces auteurs pour la région de Kilpala en Colombie-Britannique est présenté à la figure 2.14.

Le modèle de la pente infinie est extrêmement simple d'utilisation; toutefois, ce modèle unidimensionnel d'évaluation de la stabilité a le désavantage de s'appliquer seulement à des conditions géométriques et d'écoulement très particulières. Afin de considérer une géométrie des talus ainsi que des surfaces de rupture plus réalistes, des modèles bi-dimensionnels tel que le modèle de la rupture circulaire doivent être utilisés.

### **ii) Modèle de la rupture circulaire**

Le modèle de la rupture circulaire évalue la stabilité le long d'un profil en considérant la géométrie du talus et celle de la surface de rupture. Pour évaluer le facteur de sécurité, la méthode de Bishop simplifiée, par exemple, divise la masse de sol impliquée dans le mouvement en une série de tranches verticales pour lesquelles l'équilibre est considéré séparément.

Miller (1995) présente un exemple d'analyse déterministe bi-dimensionnelle de l'aléa réalisée avec le modèle de la rupture circulaire pour une région située au nord-ouest de l'état de Washington, aux États-Unis.

Pour appliquer le modèle de la rupture circulaire à l'échelle régionale, un certain nombre de profils à l'intérieur de la région d'étude doivent d'abord être sélectionnés. Ces profils sont extraits à l'aide des SIG par des opérations d'analyse morphométrique réalisées sur un MNA. La procédure d'extraction des profils suivie par l'auteur consiste tout d'abord à

calculer l'aire de drainage de chaque pixel en fonction de la direction du flux des pixels situés en amont du pixel considéré (annexe A3.4). À partir des valeurs d'aire de drainage, les crêtes et les ruisseaux de la région sont identifiés, et correspondent respectivement aux pixels ayant une aire de drainage supérieure ou inférieure à une valeur seuil. Ces deux éléments morphologiques correspondent aux sommets et aux bases des profils à identifier. Ensuite, pour chacun des pixels, un profil est identifié. Chaque profil est délimité au sommet et à la base par le ruisseau et la crête les plus près du pixel considéré. Cette opération produit une couverture dense et uniforme de profils le long desquels l'altitude et les propriétés des matériaux sont interpolées à tous les 30 mètres à partir du MNA et de la carte des propriétés des matériaux. La figure 2.15 présente un exemple de profil. Les points également espacés le long du profil représentent les endroits pour lesquels des données ont été interpolées.

Chaque combinaison de deux valeurs d'altitude le long d'un profil définit une surface de rupture potentielle pour laquelle le facteur de sécurité est calculé par la méthode des tranches. Pour ce faire, les données d'altitude et des propriétés des matériaux sont exportées vers un logiciel externe de stabilité à l'intérieur duquel les facteurs de sécurité sont calculés. Plusieurs scénarios sont testés pour des surfaces de rupture circulaires ou planaires, en incluant des fissures de tension de différentes profondeurs au sommet de la surface de rupture. Le scénario qui donne le facteur de sécurité le plus faible est conservé pour chaque profil. Les valeurs de facteur de sécurité des profils sont finalement importées dans le SIG où celles-ci sont interpolées et représentées sous forme de cartes d'isocontours.

La complexité du modèle de la rupture circulaire associée à l'extraction des profils et à l'exportation des données explique pourquoi son utilisation à l'échelle régionale est beaucoup moins répandue que le modèle de la pente infinie.

Un autre exemple d'application du modèle de la rupture circulaire est présenté par le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) en France, qui a développé un système d'aide à la décision en matière de glissement de terrain basé sur une évaluation

de la stabilité en trois dimensions. Ce système est construit autour des logiciels Arc Info et Oracle pour la gestion des données, et fait appel au code de calcul externe du logiciel CLARA (Hungar, 1987) pour les études de stabilité. Ces procédures ne sont applicables que pour de petits secteurs pour lesquels un grand nombre de données sont disponibles. Ces secteurs correspondent à des portions de talus qui sont extraites d'un MNA manuellement à l'écran à l'aide du SIG. Les données sont ensuite envoyées dans CLARA qui retourne une valeur de facteur de sécurité. Puisque cette procédure ne peut être appliquée que pour des petites portions de terrain, celle-ci ne semble pas être utilisée dans la cartographie de l'aléa à l'échelle régionale.

L'utilisation d'analyses déterministes permet de quantifier et de cartographier facilement la stabilité des talus à l'échelle régionale, particulièrement par le modèle de la pente infinie. Par contre, la fiabilité des résultats obtenus par ce type d'analyse est influencée par la représentativité du modèle utilisé et par les incertitudes concernant les variabilités spatiales et temporelles des nombreux paramètres utilisés dans l'expression du facteur de sécurité. Ces incertitudes sont attribuées, selon Aléotti et Chowdhury (1999), aux faits suivants :

- une masse de sol ne peut être échantillonnée que pour un nombre fini de points;
- les essais de terrain et en laboratoire réalisés pour déterminer certains paramètres du sol sont limités par des contraintes monétaires et temporelles;
- les méthodes de calcul ainsi que les instruments de mesure ne sont pas parfaits.

La prise en compte des incertitudes concernant ces paramètres a conduit au développement d'analyses probabilistes de l'aléa.

#### **2.3.2.3.2 Analyses probabilistes**

Dans la majorité des cas, l'analyse probabiliste vise à évaluer la probabilité de rupture comme étant la probabilité que le facteur de sécurité soit inférieur à une valeur prédéterminée qui est généralement prise égale à un (pente à l'équilibre limite).

La probabilité de rupture est évaluée en appliquant un cadre probabiliste à l'approche déterministe de l'aléa, de façon à tenir compte des incertitudes sur les différents facteurs utilisés dans l'équation du facteur de sécurité. Pour cela, les incertitudes sont déterminées par des fonctions de densité obtenues à partir de données disponibles sur les facteurs ou selon l'expérience régionale d'experts (Wu et al., 1996). La combinaison de ces fonctions, selon différentes méthodes (par exemple la simulation de Monte Carlo; Rubinstein, 1981), définit la fonction de probabilité du facteur de sécurité (figure 2.16). La probabilité de rupture, qui correspond à l'aire sous la courbe jusqu'au facteur de sécurité unitaire, est calculée pour chaque pixel de la région considérée.

Dans l'approche déterministe de Van Westen et Terlien (1996) présentée à la section 2.3.2.3.1, le facteur de sécurité est évalué en utilisant la valeur moyenne de plusieurs paramètres possédant tous un important degré d'incertitude. De façon à tenir compte de ces incertitudes, les auteurs réalisent, dans la même étude, une analyse probabiliste de l'aléa.

Pour évaluer la distribution du facteur de sécurité, les auteurs utilisent une technique de propagation d'erreur. Pour ce faire, seules les fonctions de densité des facteurs qui contrôlent le plus la stabilité des talus sont considérées, c'est-à-dire la cohésion, l'angle de friction et l'épaisseur d'un dépôt de cendre situé à la surface du terrain. Les fonctions de densité de l'accélération sismique et du rapport de la profondeur de la nappe phréatique à l'épaisseur du dépôt sont trop difficiles à évaluer et ne sont pas considérées dans l'analyse.

À partir de la courbe de la distribution du facteur de sécurité, la probabilité de rupture est calculée et correspond à l'aire sous celle-ci jusqu'au facteur de sécurité unitaire. À partir de cette information, les auteurs évaluent la distribution des probabilités de rupture pour l'ensemble de la région considérée. La figure 2.17 présente un exemple de ce type de distribution.

De plus, les auteurs intègrent la composante temporelle de l'aléa en multipliant les valeurs de probabilité de rupture à la probabilité qu'un événement d'une intensité donnée (précipitation ou séisme) se produise pour une période de temps donnée. Cette probabilité est estimée à partir des courbes intensité-fréquence dérivées pour ces deux types d'événements (section 2.3.2.3.1).

L'analyse probabiliste, telle que présentée dans cette section, définit l'aléa comme la probabilité que les forces motrices excèdent les forces résistantes le long d'une surface de rupture potentielle. Cette façon d'évaluer la probabilité est celle recommandée par le groupe de travail sur les glissements de terrain du IUGS (1997). Ce groupe de travail propose aussi deux autres expressions pouvant être utilisées pour exprimer la probabilité de rupture. La première évalue la probabilité en terme de nombre de glissements de terrain ayant une certaine caractéristique, et pouvant se produire dans une région donnée en une année. La seconde considère la probabilité qu'une pente donnée soit affectée par un glissement de terrain pendant une période de temps donnée. Ces différentes façons d'exprimer la probabilité de rupture tiennent compte des caractéristiques des glissements de terrain ainsi que du contexte géologique et géomorphologique de la région considérée.

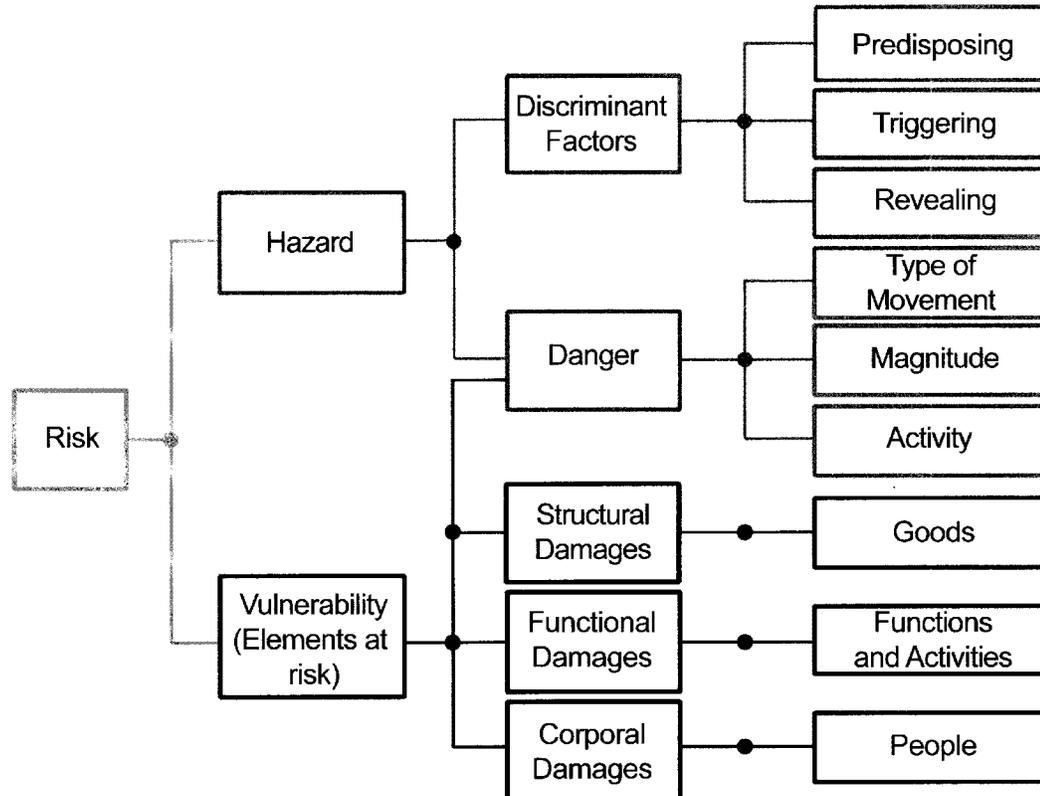


Figure 2.1 : Cadre général d'analyse du risque de glissement de terrain (tiré de Perret et al., 2001, modifié de Leroi, 1996).

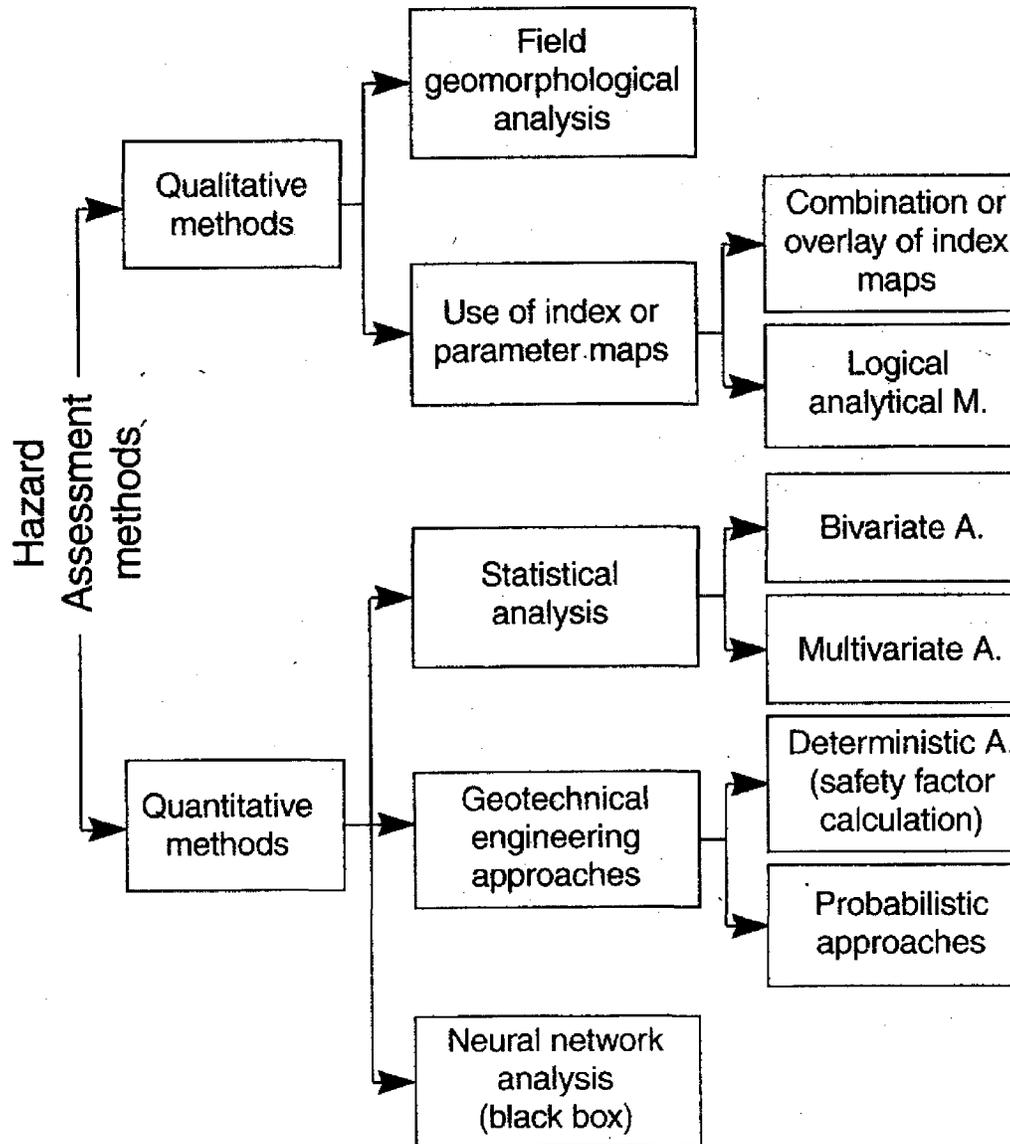


Figure 2.2 : Classification des principales approches d'évaluation de l'aléa « glissement de terrain » (tiré de Aleotti et Chowdhury, 1999).

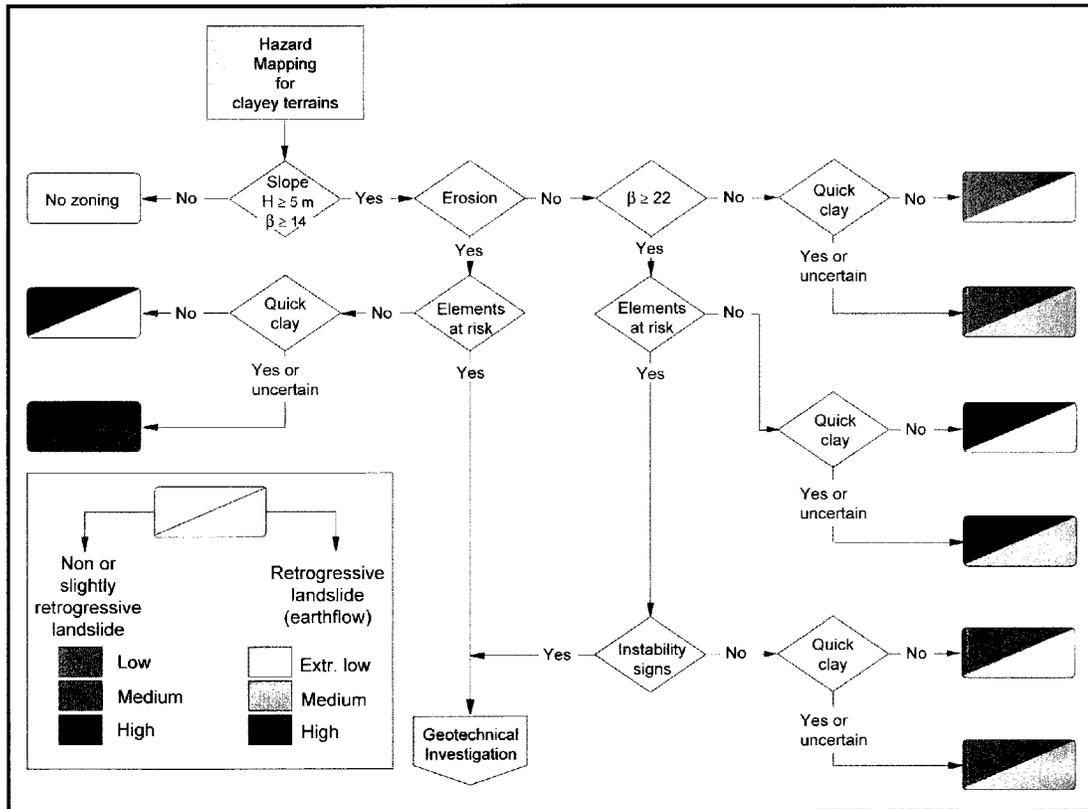


Figure 2.3 : Arbre de décision préliminaire et simplifié utilisé pour qualifier l'aléa « glissement de terrain » en terrain argileux dans les basses-terres de l'est du Canada (tiré de Perret et al., 2001).

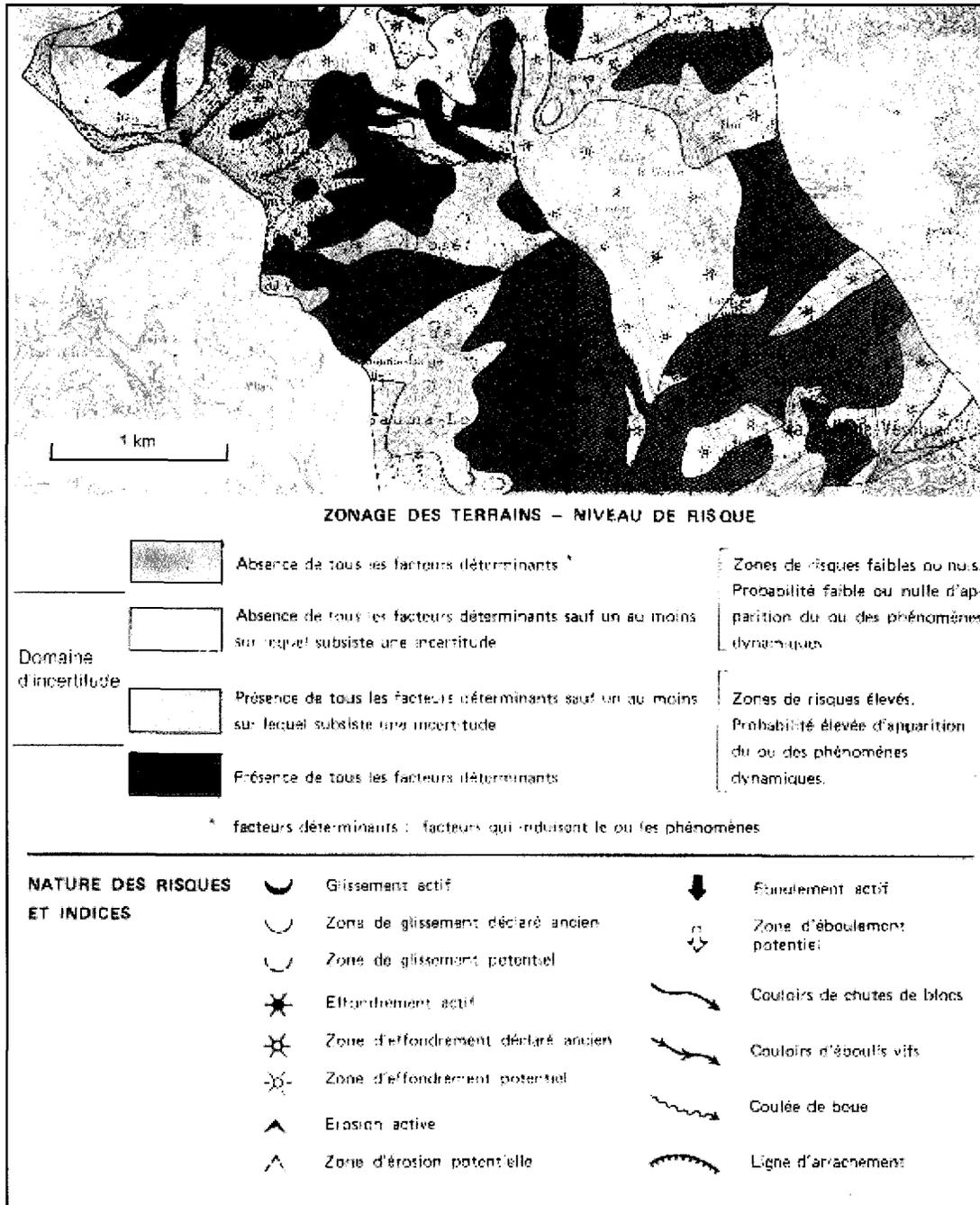


Figure 2.4 : Carte ZERMOS de la moyenne Vésubie, France (tiré du rapport du CFGI, 2000).



Figure 2.5 : Zones exposées aux mouvements de terrain; région de la rivière Yamaska. (tiré de Rissman et al., 1985). Feuille nord, carte No. 3. Les zones en pointillées correspondent à d'anciennes coulées argileuses. L'aléa décroît selon l'intensité de la teinte, du plus foncé au plus pâle.

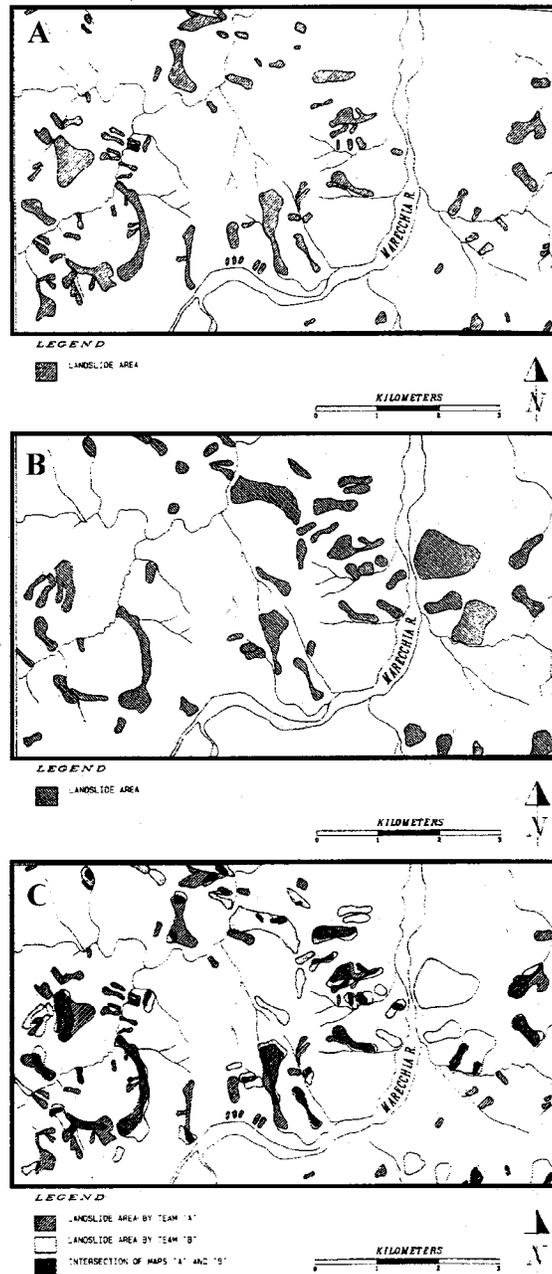


Figure 2.6 : Étude comparative de deux cartes des zones exposées aux glissements de terrain obtenues par deux équipes différentes pour le bassin de Marecchia dans le nord de l'Italie. A : Carte des glissements de terrain préparée par l'équipe A, à partir de travaux de terrain et de l'interprétation de photographies aériennes. B : Carte des glissements de terrain préparée par l'équipe B à partir de l'interprétation de photographies aériennes et de vérifications de terrain. C : Superposition des cartes des équipes A et B (tiré de Carrara et al., 1992).

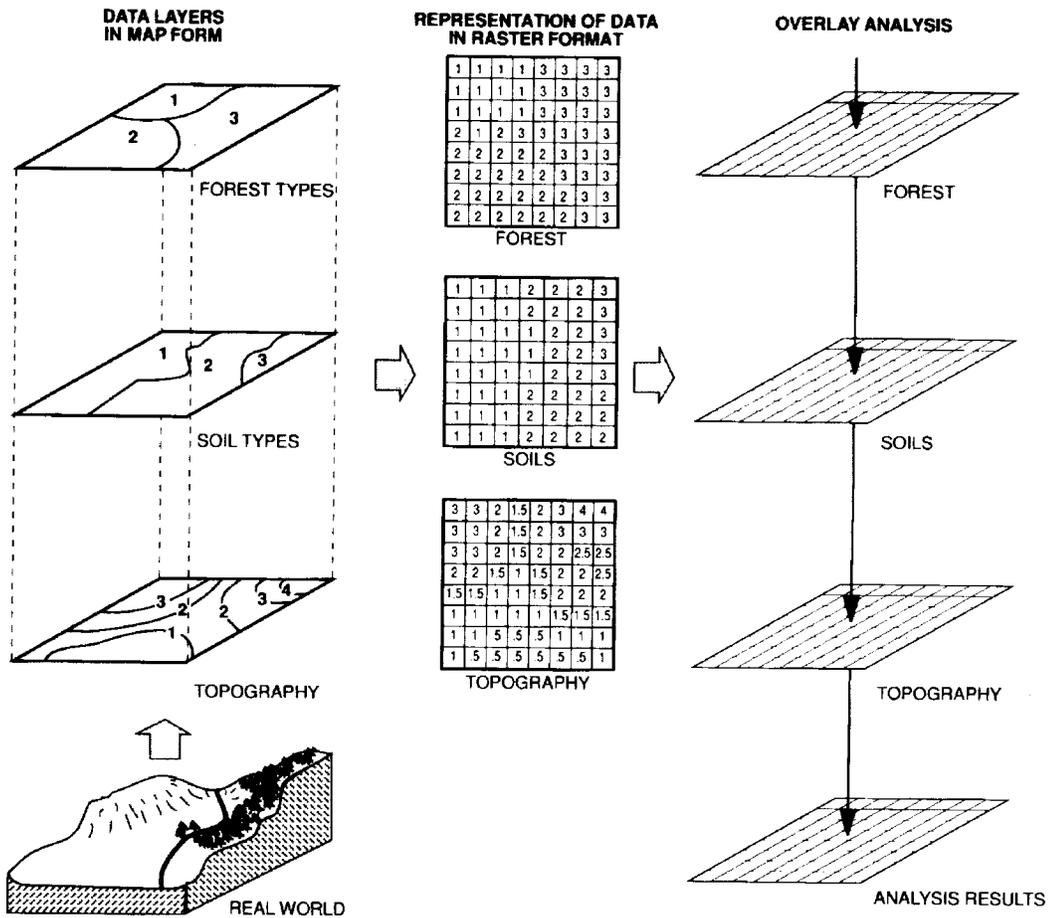


Figure 2.7 : Opération d'algèbre cartographique effectuée sur des cartes en format matriciel à l'aide d'un SIG. Une opération logique est appliquée aux pixels ayant des positions correspondantes sur les différentes cartes. Les résultats sont indiqués au pixel correspondant de la carte des résultats (tiré de Aronoff, 1989).

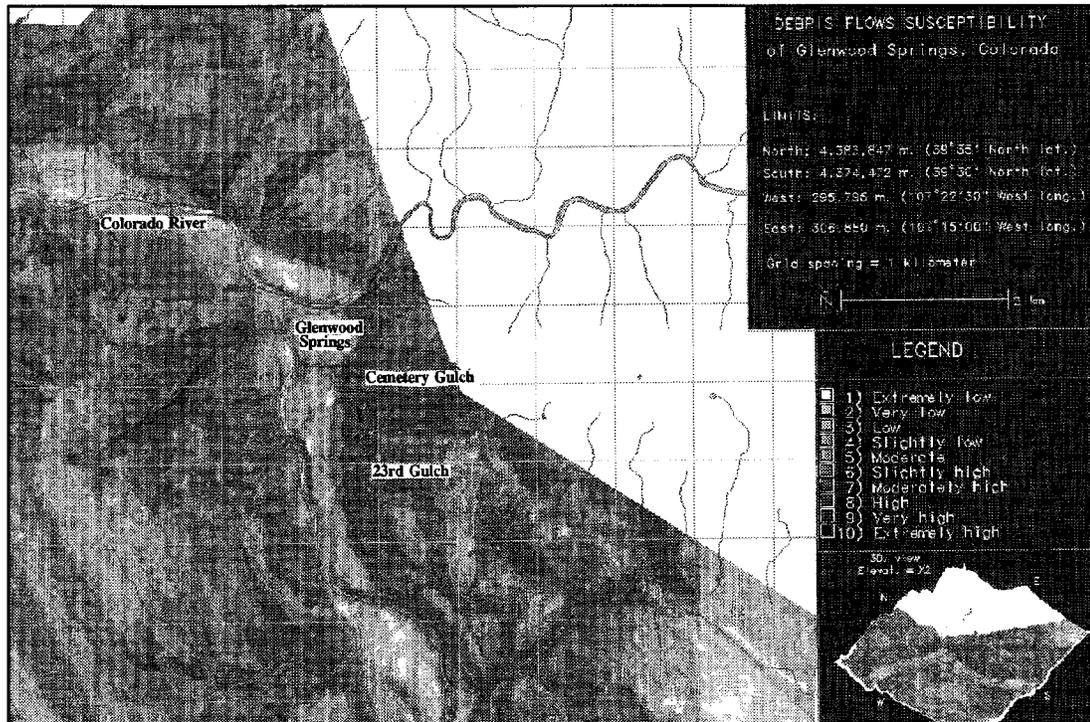


Figure 2.8 : Carte de susceptibilité aux coulées de débris pour la région de Glenwood Springs, Colorado (tiré de Mejia-Navarro et al., 1994).

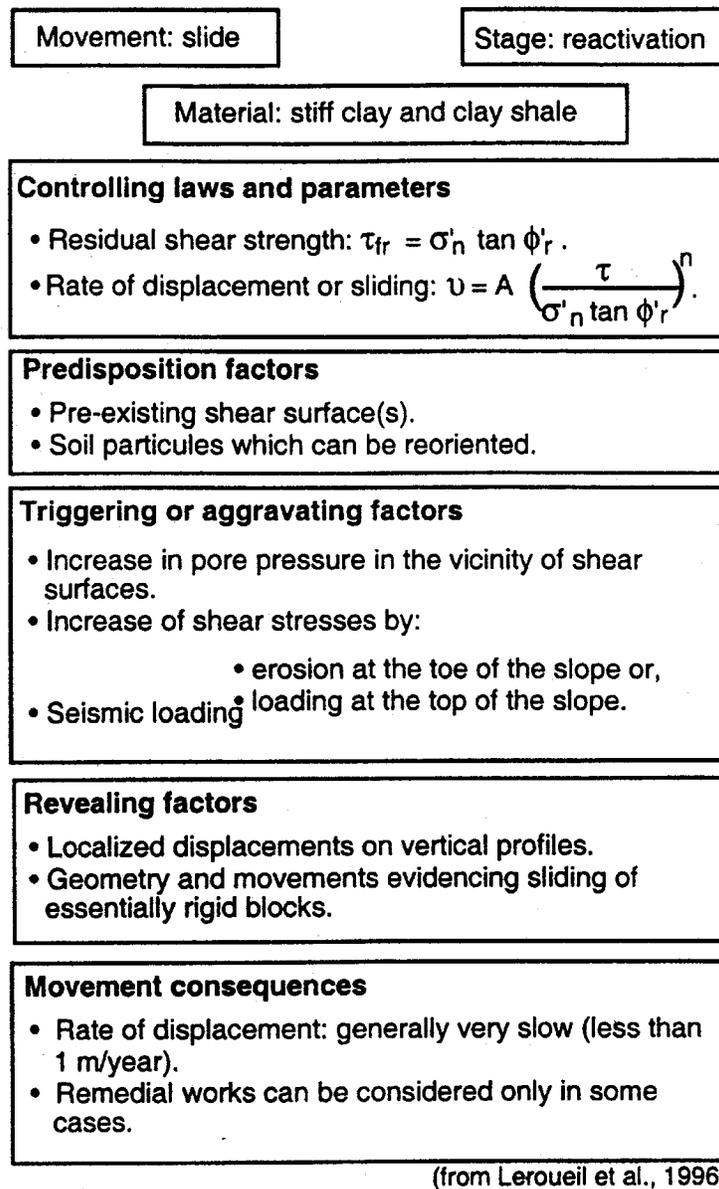


Figure 2.9 : Exemple de feuille de caractérisation de mouvement de pente pour des glissements réactivés dans des argiles et des shales argileux (tiré de Leroueil et al. 1996).

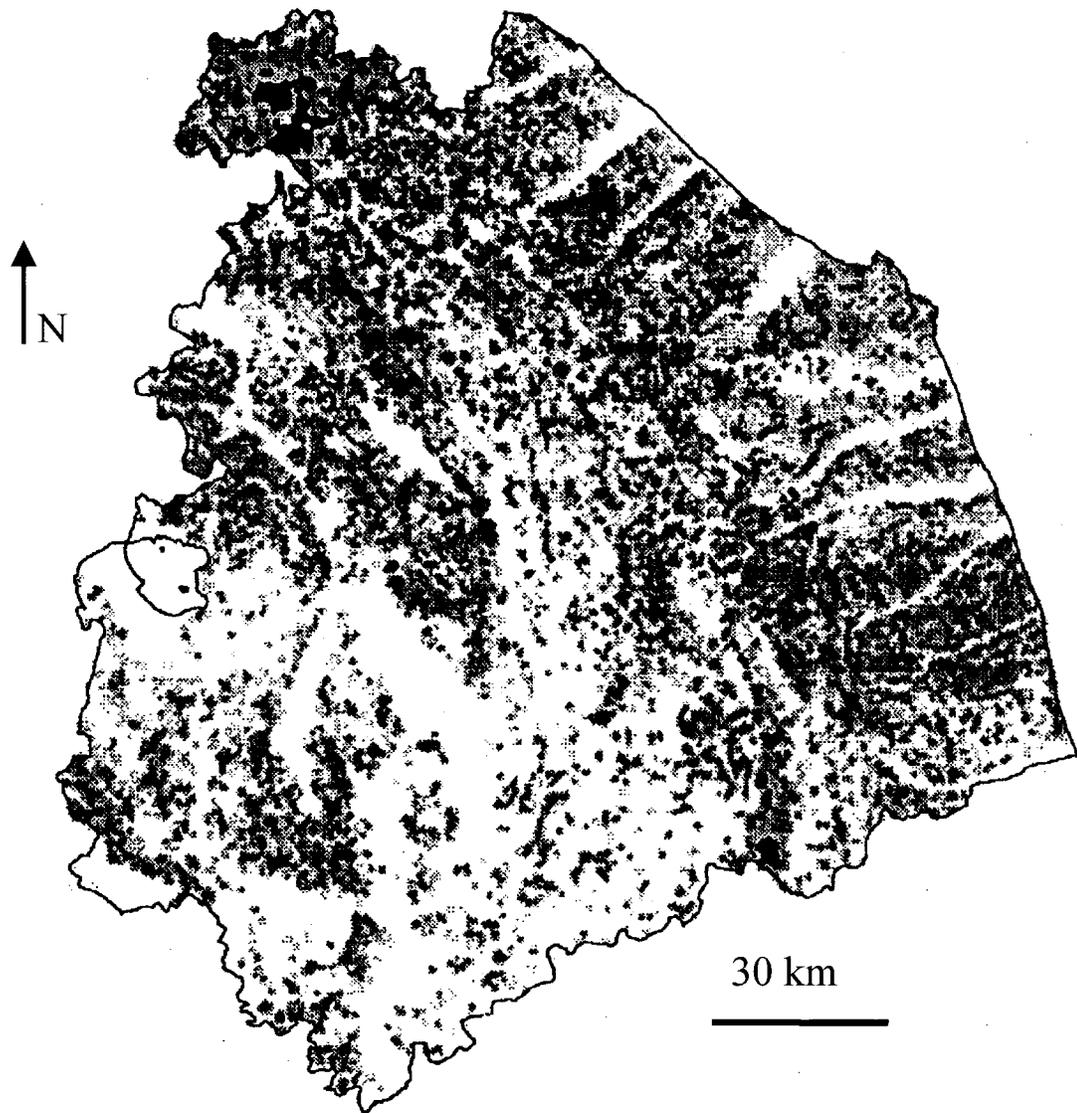


Figure 2.10 : Carte isoplèthe des glissements de terrain des régions de Umbria et Marche, Italie. Les tons de gris indiquent une augmentation du pourcentage de la superficie occupée par les glissements de terrain, de 1% (blanc) à 100% (noir) (tiré de Guzetti et al., 1999).

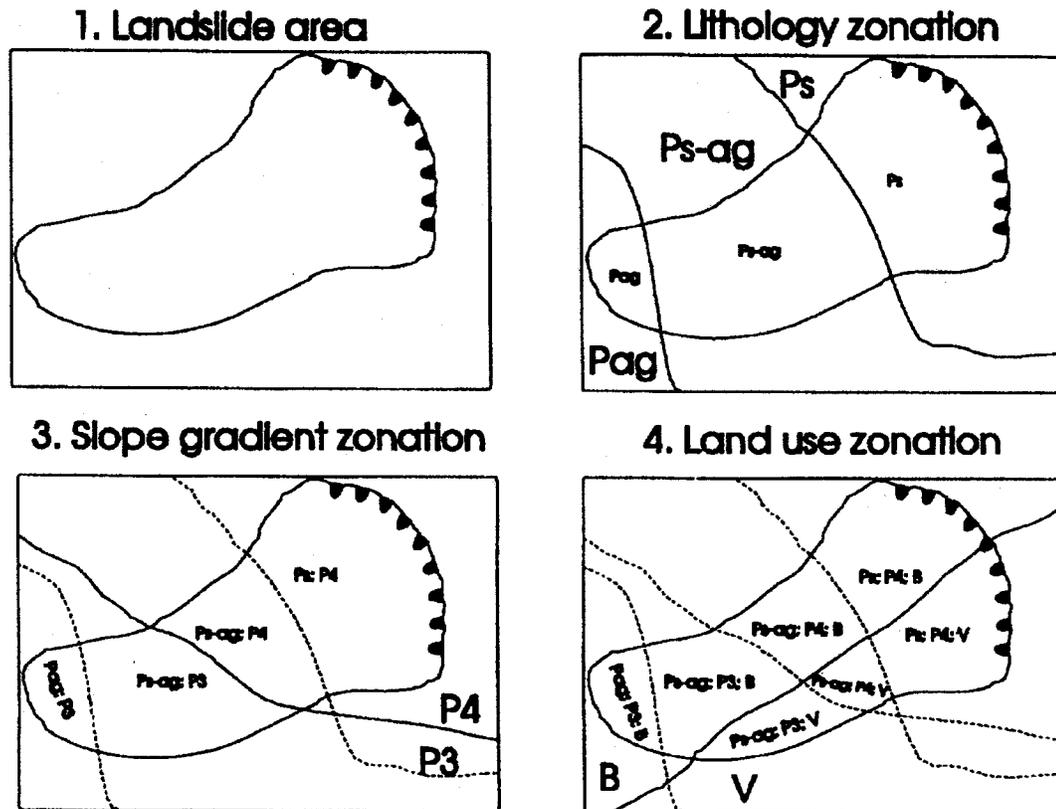


Figure 2.11 : Définition d'unités aux conditions uniques (tiré de Brunori et al., 1996).

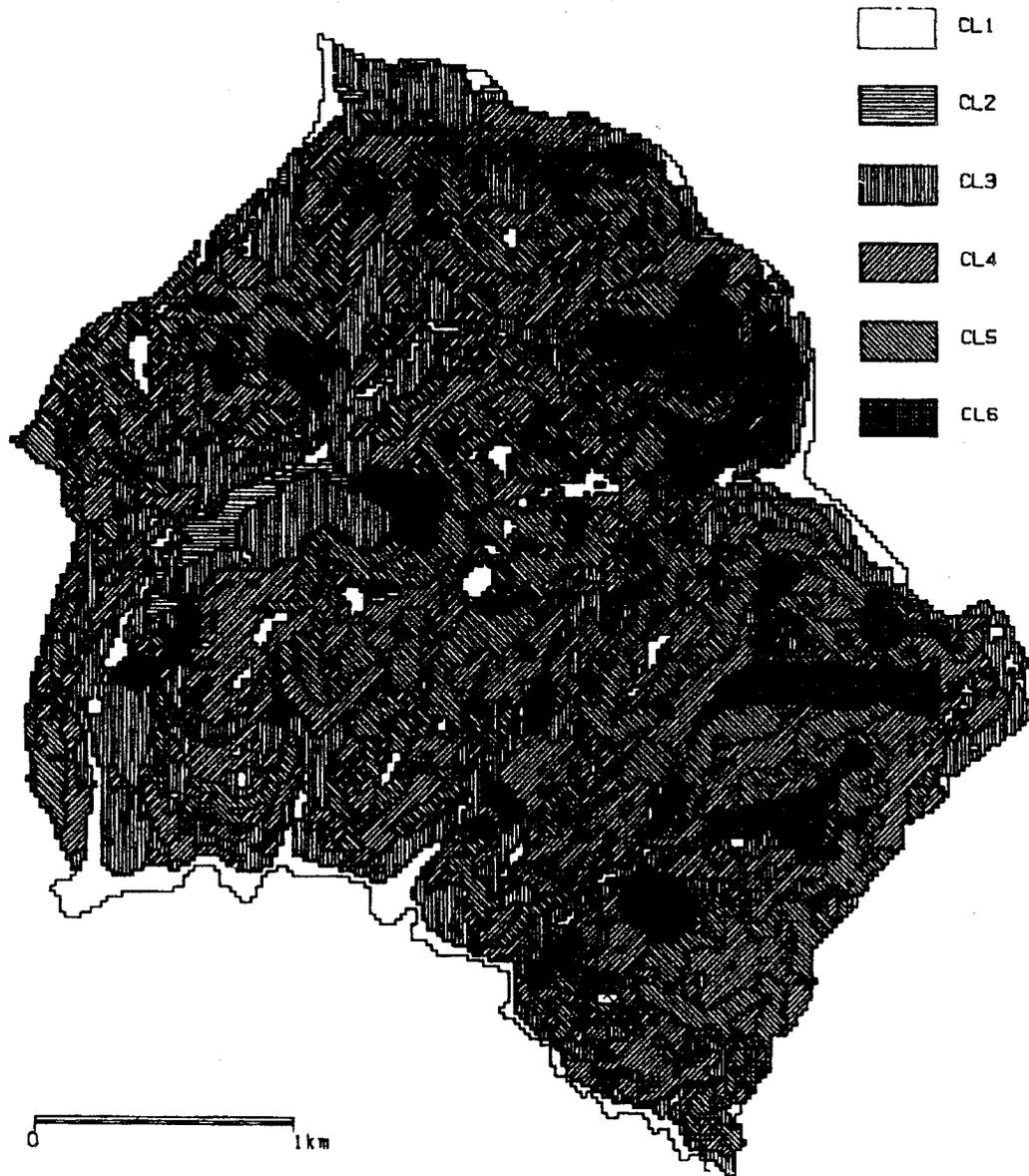


Figure 2.12 : Carte de l'aléa pour une région de la Toscane, Italie. L'aléa est exprimé en pourcentage de la superficie occupée par les glissements de terrain par rapport à la superficie totale des glissements de terrain à l'intérieur de la région considérée. CL1= 1-14 %; CL2 = 15-34 %; CL3 = 35-69 %; CL4 = 70-84 %; CL5 = 85-99 %; CL6 = 100 % (tiré de Brunori et al., 1996).

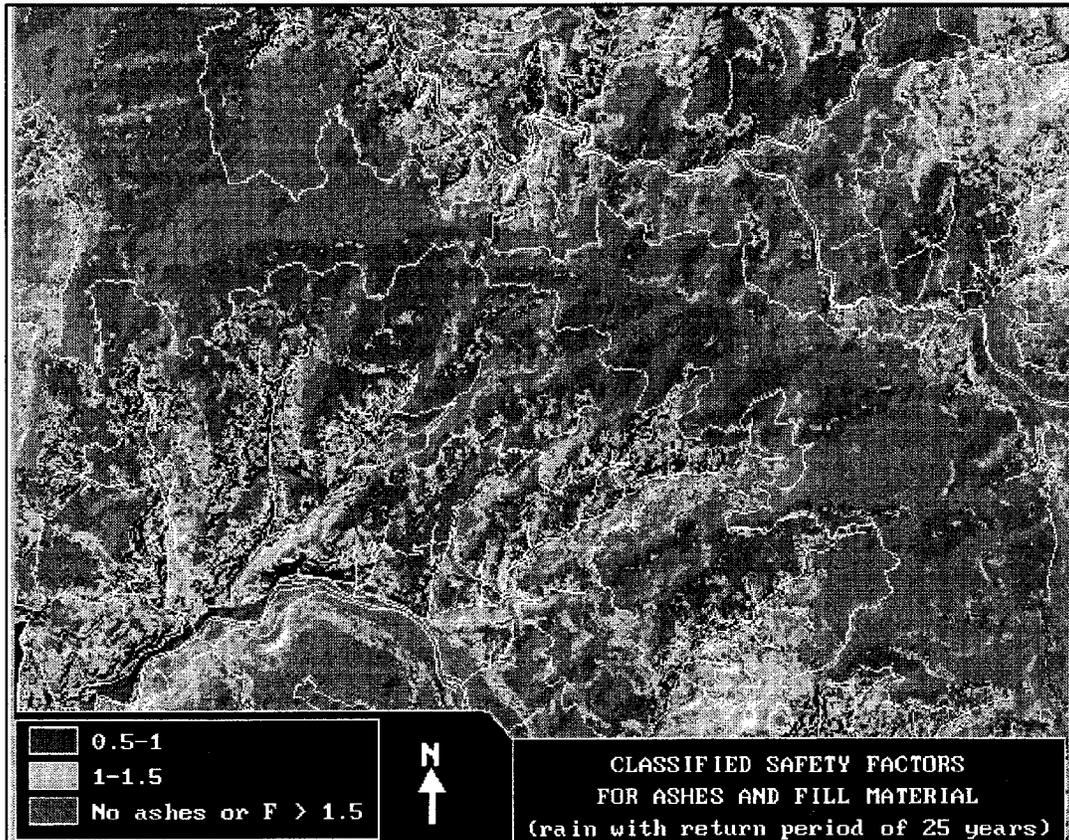


Figure 2.13 : Carte du facteur de sécurité pour la ville de Manizales, Colombie (tiré de Van Westen et al., 1996).

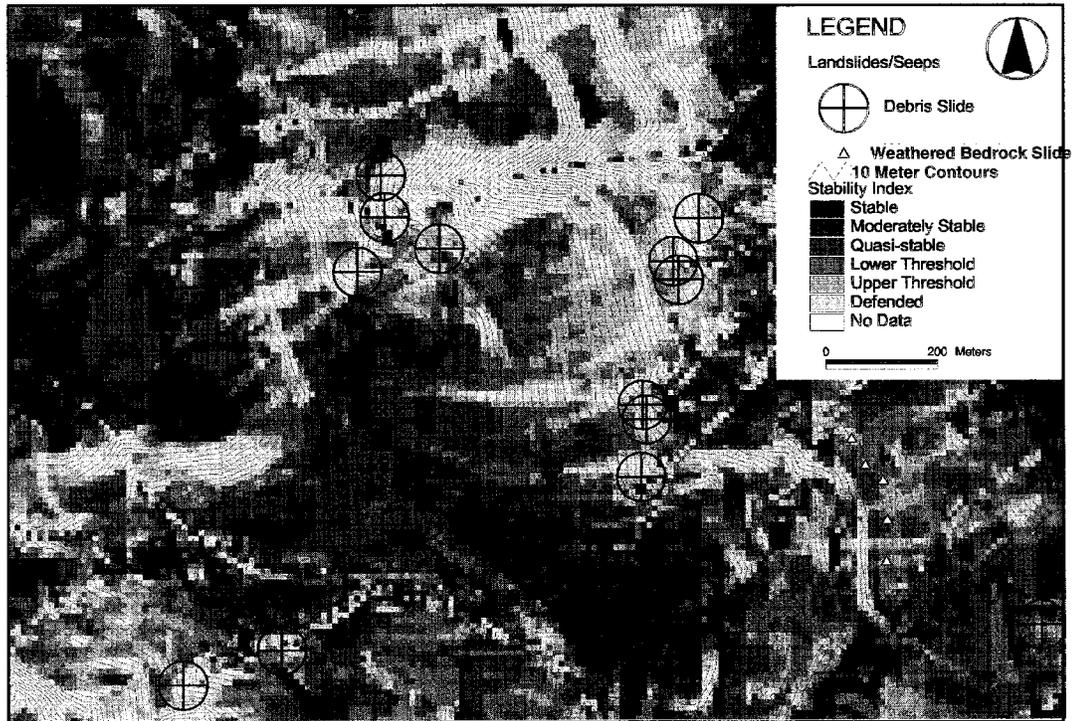


Figure 2.14 : Carte des indices de stabilité pour la région de Kilpala, Colombie-Britannique (tiré de Pack et al., 1998).

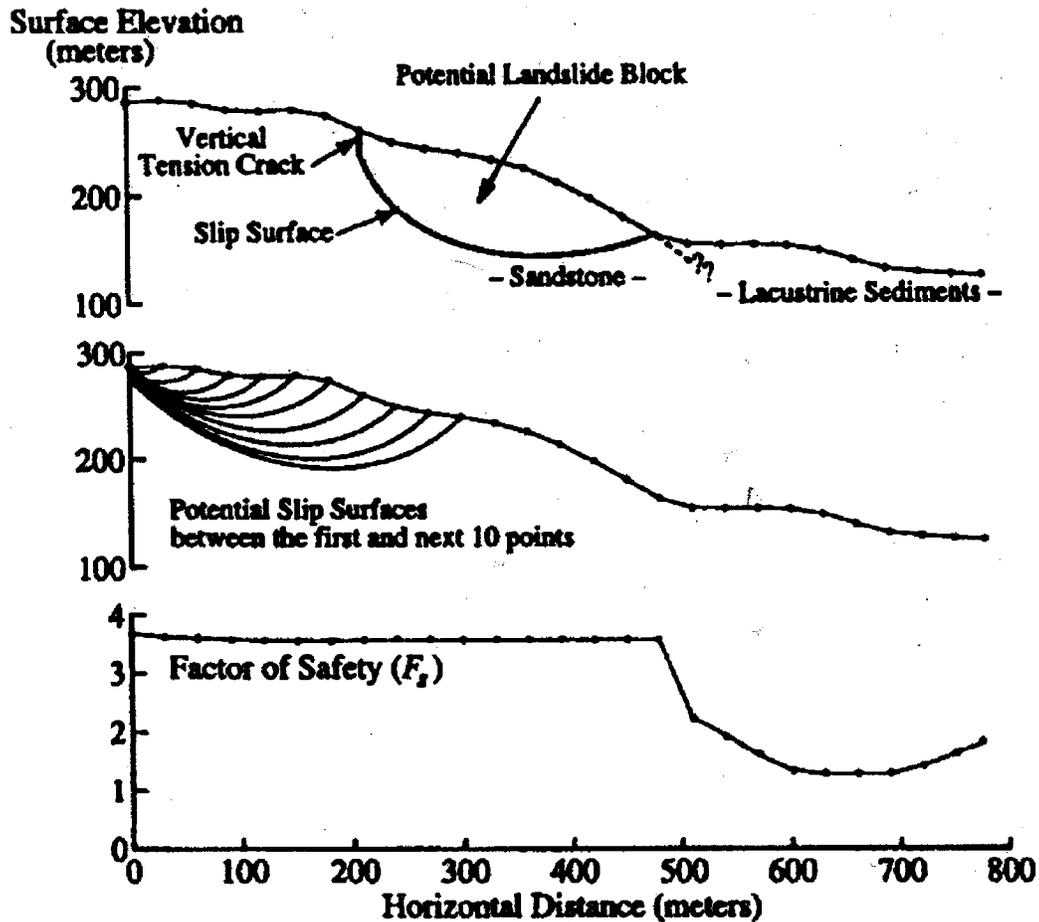


Figure 2.15 : Profil longitudinal d'un talus et surfaces potentielles de rupture. La masse impliquée dans le mouvement est limitée en amont par une fissure de tension verticale, et par une surface de rupture circulaire ou planaire passant par deux points du profil. En partant du premier point, différentes surfaces de rupture, s'étendant entre chacun des points plus bas, sont examinées. Les dix premières surfaces de rupture potentielles sont indiquées sur le graphique central. Ensuite, cette procédure est répétée pour les autres points jusqu'à ce que toutes les combinaisons possibles soient examinées. Dans chacun des cas, la profondeur de la fissure de tension et le rayon de courbure de la surface de rupture varient de façon itérative pour trouver la géométrie la moins stable. Pour chaque point le long du profil, le facteur de sécurité le plus faible ayant été calculé est assigné au point correspondant (tiré de Miller, 1995).

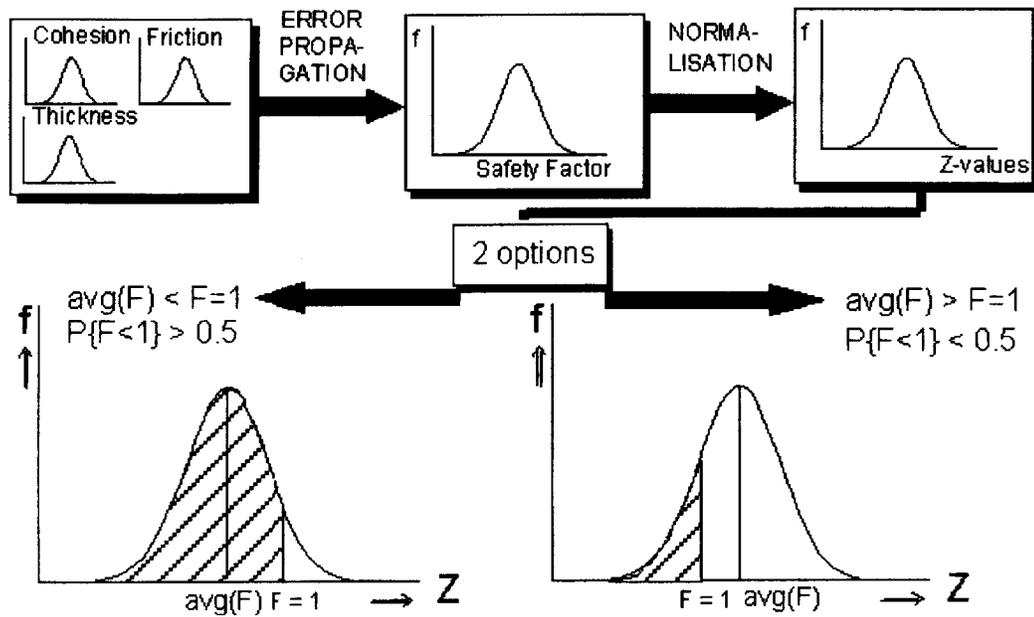


Figure 2.16 : Représentation schématique d'une procédure probabiliste où une fonction de distribution est définie pour chaque paramètre géotechnique (tiré de Van Westen et al., 1996).

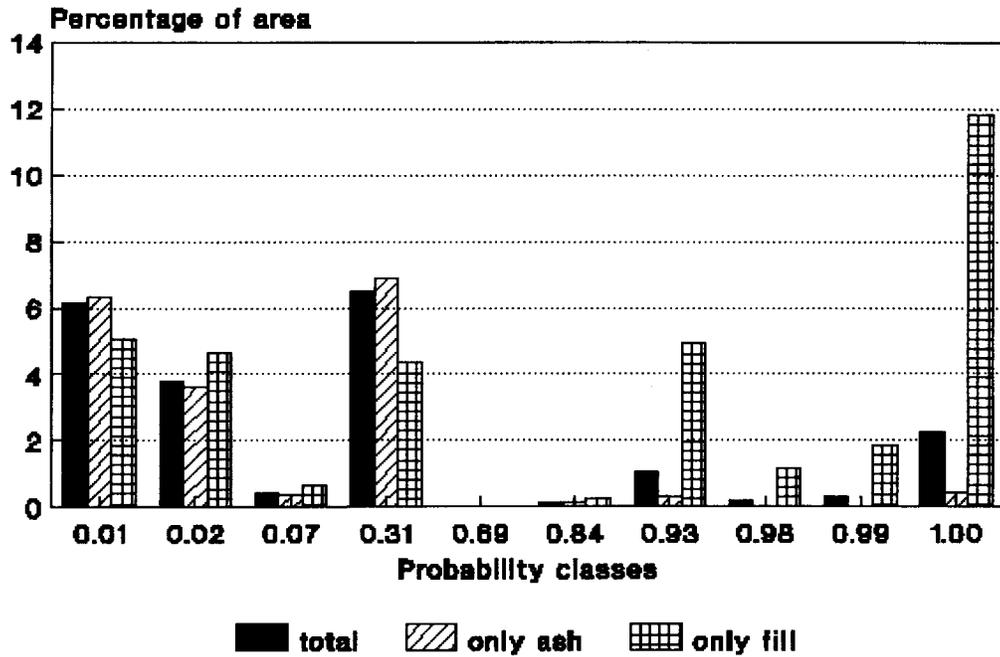


Figure 2.17 : Distribution de la probabilité de rupture calculée pour différents types de sols; ville de Manizales, Colombie. Seules les probabilités de valeurs supérieures à 0 sont indiquées (tiré de Van Westen et al., 1996).

## **CHAPITRE 3 : DESCRIPTION DU SECTEUR D'ÉTUDE**

Ce chapitre décrit brièvement la géologie et la physiographie du secteur de Ville de La Baie qui a été retenu pour illustrer les différentes approches d'évaluation de l'aléa présentées dans ce travail. Les raisons qui justifient ce choix sont ensuite exposées. Finalement, les différents types de glissement de terrain qui peuvent affecter les talus argileux dans le secteur de Ville de La Baie sont décrits.

### **3.1 Géologie et physiographie**

Le secteur de Ville de La Baie est situé dans la région du Saguenay, approximativement à 170 km au nord-est de la ville de Québec (figure 3.1). Cette région couvre une superficie de 260 km<sup>2</sup>, comprenant, d'une part, des zones forestières et agricoles (61% de la superficie), et d'autre part, une zone urbaine (39% de la superficie). Selon le recensement de 1996, la population y est de 21 650 habitants.

La région du Saguenay est située dans une profonde dépression de forme allongée, de direction est-ouest, à l'intérieur des roches gneissiques du bouclier précambrien. Cette dépression résulte d'un fossé d'effondrement (rift) formé au Paléozoïque inférieur qui a été aplani ensuite, puis surcreusé lors des différentes phases de glaciation qui ont affecté la région au cours du Quaternaire. Suite au retrait des glaciers, il y a environ 10 000 ans, la région a été soumise à un envahissement marin correspondant à l'épisode de la mer de Laflamme (figure 3.2). C'est au cours de cette période de déglaciation que les sédiments marins se sont mis en place (Lasalle et Tremblay, 1978).

Avec le relèvement isostatique plus important que l'augmentation moyen du niveau des mers liés à la fonte des glaciers, la région a connu une régression du niveau marin qui a entraîné la formation de diverses terrasses marines et fluviales dans les dépôts quaternaires qui sont bien visibles dans le paysage (Lasalle et Tremblay, 1978). Parallèlement, un réseau de drainage s'est développé et a entaillé les plaines

nouvellement émergées. La figure 3.3 présente la carte synthétique des dépôts meubles de la partie sud-est de la région du Saguenay dressée par Bouchard et al. (1983).

Les dépôts de surface qui affleurent sont principalement des argiles, qui peuvent être recouvertes par un mince placage de sable. La plaine argileuse est entaillée par deux rivières principales, la rivière à Mars et la rivière des Ha!Ha!. Les dépôts de sable les plus importants sont localisés au niveau de l'aéroport de Bagotville et le long de la rivière à Mars (Lasalle et Tremblay, 1978, Paradis et al., 1999). La stratigraphie générale des argiles consiste en une argile massive, parfois très sensible, surmontée d'une argile stratifiée, elle-même couverte par une croûte argileuse fissurée et altérée. La topographie de la roche en place est très irrégulière, et l'épaisseur des dépôts meubles qui comblent les dépressions peut varier considérablement (de quelques mètres à plus de soixante mètres; Dion, 1986).

Les talus du secteur de Ville de La Baie se retrouvent dans les environnements géomorphologiques suivants :

- les zones de ravinement;
- les escarpements des terrasses marines;
- les escarpements latéraux et arrières des grandes cicatrices de glissement de terrain (coulées argileuses).

La hauteur des talus n'excède généralement pas 30 mètres sauf dans la partie sud-ouest du secteur où ils peuvent avoir jusqu'à 50 à 60 mètres de hauteur (secteur de la rue McNicoll). L'inclinaison des pentes peut atteindre 40° sur une dizaine de mètres de hauteur, ce qui est conforme aux valeurs élevées de résistance au cisaillement des argiles de la région (Bouchard et al., 1983; Lefebvre, 1981).

### **3.2 Choix du secteur d'étude**

Le secteur de Ville de La Baie a été choisi pour les trois raisons suivantes :

- présence de glissements de terrain;
- disponibilité d'une carte du danger;
- disponibilité de données d'arpentage et données photogrammétriques à haute résolution.

### **3.2.1 Présence de glissements de terrain**

La région du Saguenay présente des conditions géomorphologiques, géologiques et hydrogéologiques propices aux glissements de terrain. Celle-ci a été régulièrement affectée par des glissements de terrain dans les années passées. Par exemple, entre le 19 et le 20 juillet 1996, une grande partie de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean enregistrait des pluies à caractère exceptionnel provoquant plus de mille glissements de terrain en moins de 36 heures (Perret et Bégin, 1997). La figure 3.4 présente la carte de localisation des glissements de terrain tels qu'inventoriés suite à cet événement. Ces glissements de terrain ont eu relativement peu d'impacts malgré leur nombre élevé, notamment parce qu'ils se sont produits, pour la plupart, dans des secteurs agricoles ou forestiers où la densité de la population est très faible. Toutefois, une avalanche de boue a fait deux victimes à Ville de La Baie (figure 3.5) et quelques catastrophes ont aussi été évitées de justesse, comme par exemple à Petit-Saguenay.

### **3.2.2 Disponibilité d'une carte du danger**

Une photo-interprétation diachronique des secteurs affectés par des glissements de terrain superficiels, couvrant la période de 1927 à 1996, a été effectuée pour le secteur sud de la municipalité de Ville de La Baie (figure 3.6), de la rivière à Mars jusqu'aux contreforts rocheux du parc des Laurentides (document interne, Centre géoscientifique de Québec (CGQ), 1999). Par ailleurs, certains paramètres géométriques des glissements de terrain provoqués par les fortes pluies de juillet 1996 ont été mesurés par le Centre géoscientifique de Québec lors de deux campagnes de terrain en 1996 et 1997.

### **3.2.3 Disponibilité de données d'arpentage et de données photogrammétriques à haute résolution**

Des cartes topographiques à l'échelle 1: 1 000, avec des courbes de niveau espacées aux deux mètres, ont été obtenues par photogrammétrie à partir de photographies aériennes à l'échelle 1: 5 000 et 1: 8 000 pour la majeure partie du territoire habité (documents d'urbanisme, Ville de La Baie). Ces données permettent de produire des modèles numériques d'altitude (MNA) à haute résolution, et donc, d'effectuer des analyses morphométriques du terrain à l'aide des systèmes d'information géographique (SIG).

### **3.3 Typologie des glissements de terrain**

Les types de glissements de terrain les plus courants dans le secteur de Ville de La Baie sont, par ordre de fréquence décroissante (Lafleur et Lefebvre, 1980) :

- les glissements superficiels;
- les glissements rotationnels;
- les coulées argileuses;
- les avalanches et les coulées de boue.

À la fois pour une question de simplicité et parce que leur récurrence est relativement élevée, seulement les glissements de terrain superficiels (figure 3.7) sont considérés dans la présente étude. Ce type de glissement de terrain englobe la majorité des glissements qui se sont produits en juillet 1996.

Ces glissements de terrain superficiels sont très généralement de faible magnitude. La surface de rupture se situe à une profondeur généralement inférieure à deux mètres et leur largeur n'excède une dizaine de mètres qu'en quelques rares occasions. Ces glissements affectent rarement le sommet des talus et ne sont donc pas rétrogressifs. Par contre, les

débris peuvent s'étaler à la base des talus sur des distances importantes pouvant atteindre une à deux fois la hauteur des talus. La distance d'étalement est fonction de la consistance des débris à l'état remanié et de l'énergie potentielle disponible. Ainsi, les débris peuvent causer des dommages significatifs aux éléments exposés situés en pied de talus qui sont surtout, pour le secteur considéré, des maisons unifamiliales.

Dans le secteur d'étude, les glissements de terrain superficiels mobilisent la plupart du temps la croûte argileuse fissurée et altérée se trouvant à la surface des dépôts marins post-glaciaires. Ils sont généralement provoqués par des phénomènes météorologiques tels que des pluies importantes ou des fontes nivales rapides. La croûte argileuse est sensible aux fluctuations rapides des niveaux d'eau souterraine à cause de sa perméabilité plus élevée que l'argile intacte sous-jacente. Cette différence de perméabilité, couplée au contraste des propriétés mécaniques de ces deux couches, tend à contrôler la position de la surface de rupture. Celle-ci est en général plus ou moins plane et parallèle à la surface du terrain, et les débris du glissement de terrain suivent un mouvement plus ou moins translationnel avant d'atteindre la base du talus.

Au chapitre 6, ce travail présente une caractérisation quantitative plus détaillée de certains paramètres de forme des talus et des glissements de terrain du secteur d'étude. Cette caractérisation est nécessaire à l'évaluation quantitative de l'aléa « glissement de terrain » comme il sera discuté plus loin.

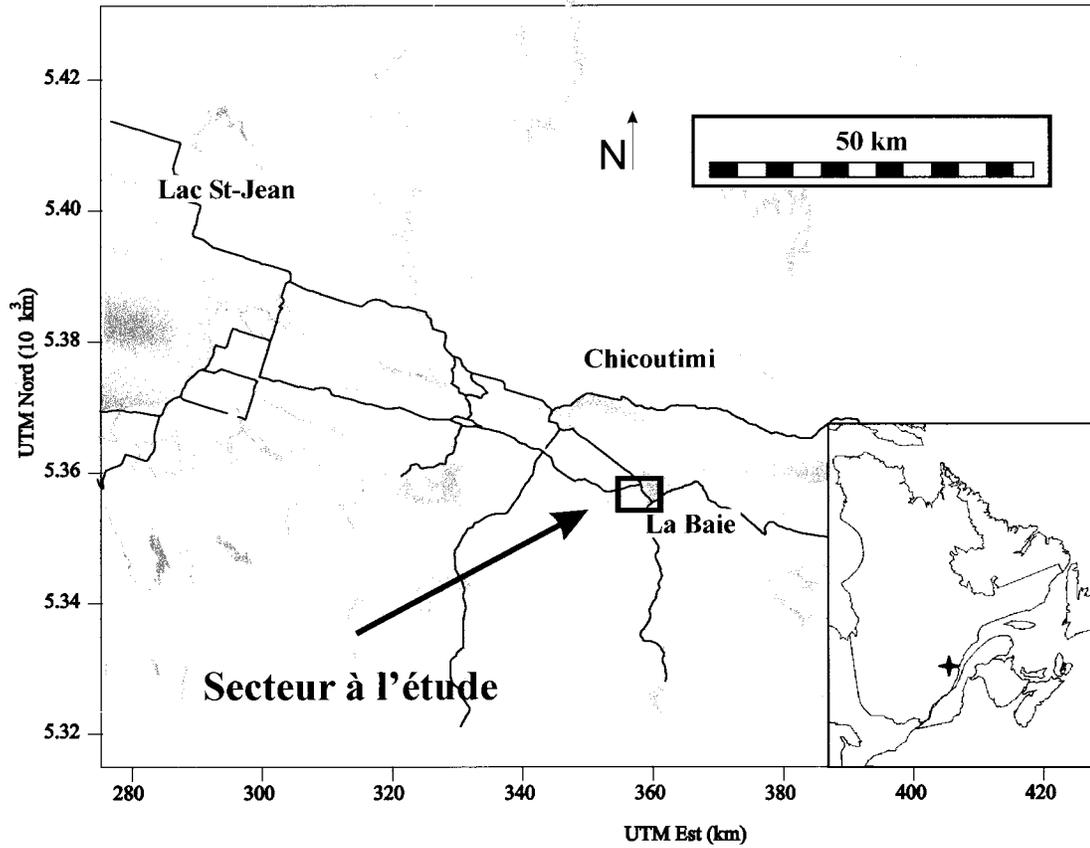


Figure 3.1 : Localisation du secteur d'étude, Saguenay-Lac-Saint-Jean.

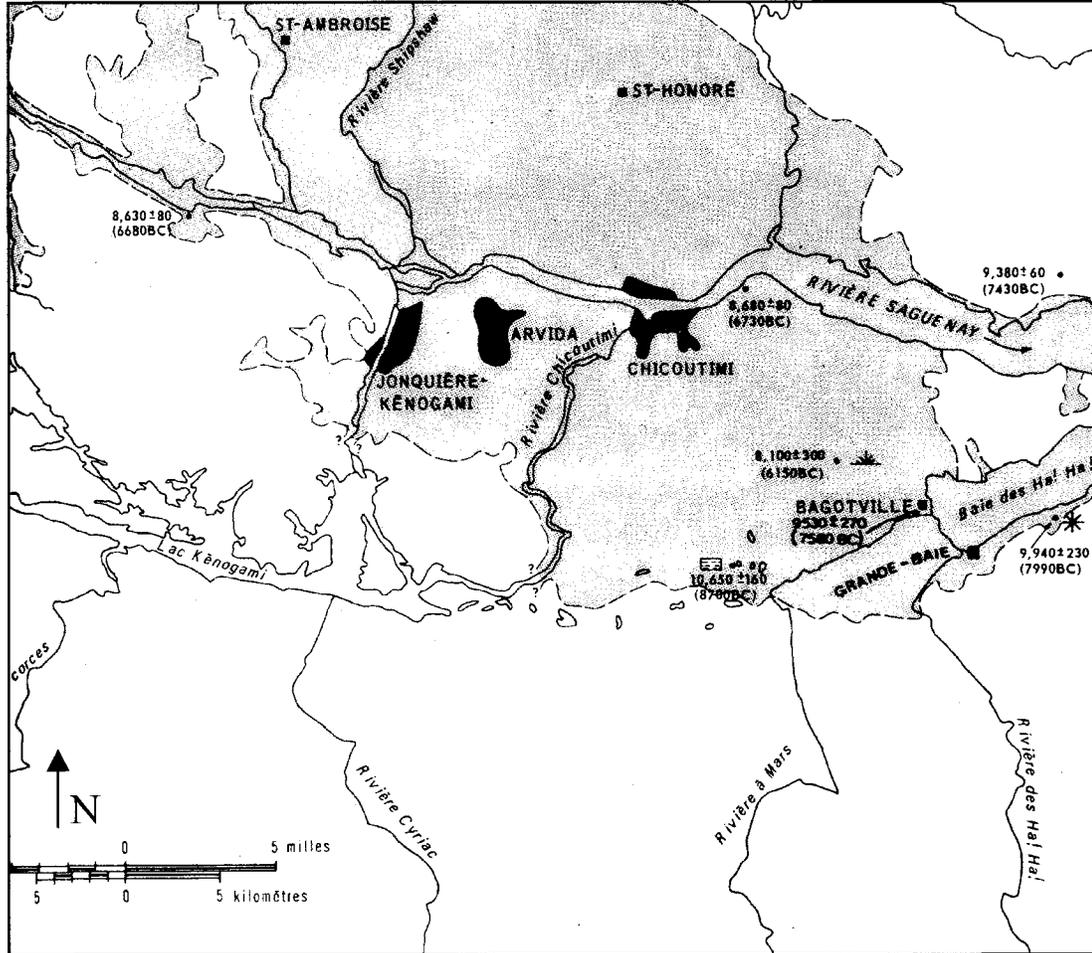


Figure 3.2 : Envahissement marin suite au retrait des glaciers (zone ombragée), région du Saguenay (tiré de Lasalle et Tremblay, 1978).

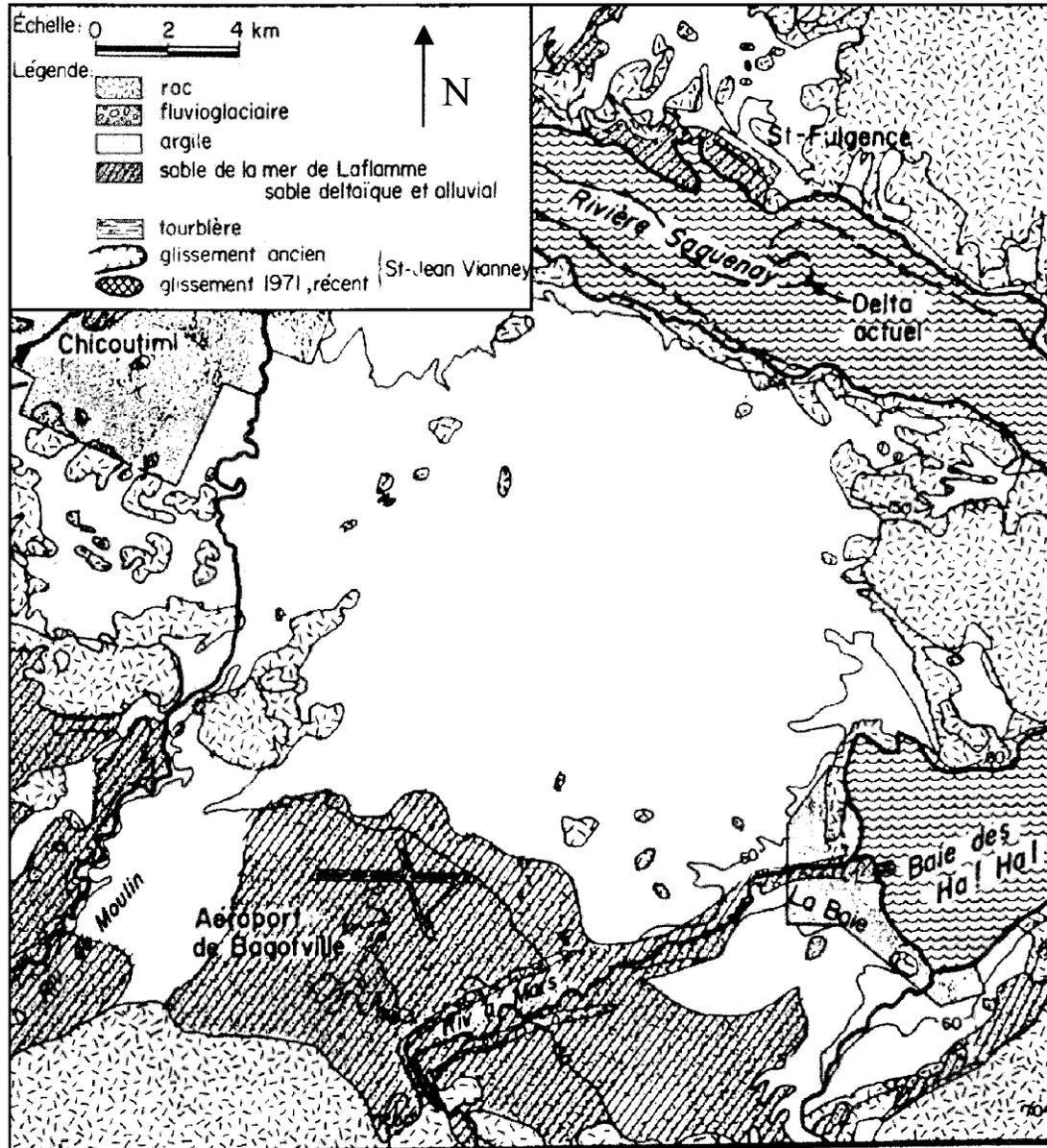


Figure 3.3 : Carte synthétique des dépôts meubles de la partie sud-est de la région du Saguenay (tiré de Bouchard et al., 1983).

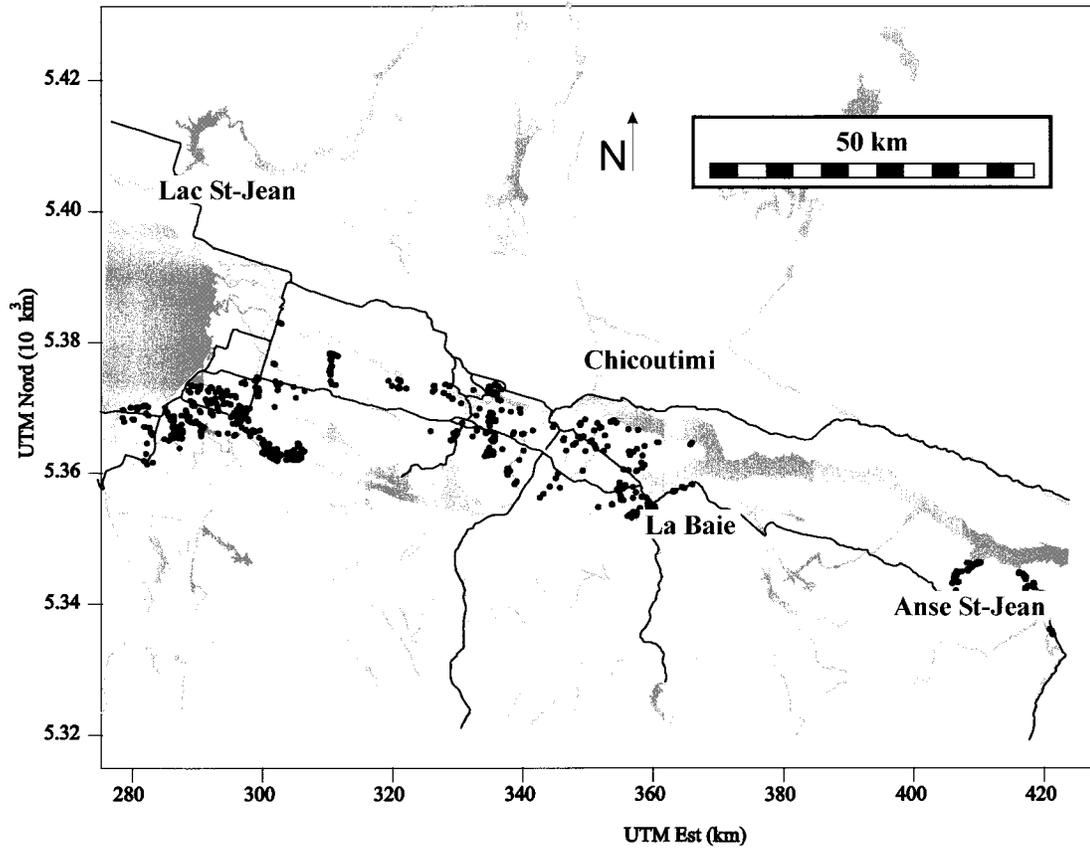


Figure 3.4 : Localisation des glissements de terrain provoqués par les fortes pluies de juillet 1996 dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (tiré de Perret et Bégin, 1997).



Figure 3.5 : Avalanche de boue; rue Henry McNicoll, Ville de La Baie (photographie du ministère des transports du Québec).

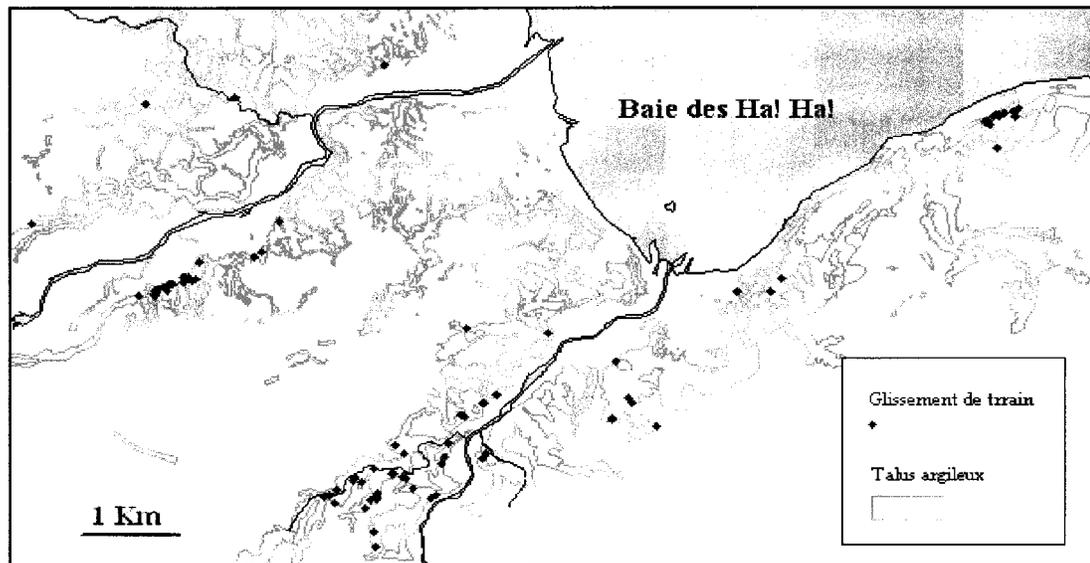


Figure 3.6 : Localisation des glissements de terrain superficiels identifiés par photo-interprétation diachronique, couvrant la période 1927 - 1996, pour le secteur sud de la région de Ville de La Baie (document interne, Centre géoscientifique de Québec, 1999).



Figure 3.7 : Exemples de glissements de terrain superficiels dans le secteur de Ville de La Baie (photographies du CGQ et du MTQ). A : Grande Baie Sud (MTQ). B : Rue John Kane (CGQ).

## **CHAPITRE 4 : ANALYSE MORPHOMÉTRIQUE DU SECTEUR D'ÉTUDE**

Dans l'Est du Canada, Lebuis et al. (1983) ont montré que la stabilité des talus argileux peut être estimée, en première analyse, en considérant seulement deux paramètres de forme, la hauteur et la pente. La caractérisation de ces deux paramètres constitue donc une étape importante dans l'évaluation de l'aléa « glissement de terrain » à l'échelle régionale.

Ce chapitre traite de l'analyse morphométrique des talus d'un secteur pilote à Ville de La Baie (Québec) réalisée à l'aide des systèmes d'information géographique (annexe A1). La méthodologie est exposée à la section 4.2. Le premier objectif est de produire un modèle numérique d'altitude (annexe A2) du secteur (section 4.3) à partir duquel les talus sont identifiés de façon automatique (section 4.4). Ensuite, toujours à partir des données topographiques du modèle numérique d'altitude, les valeurs de pente et de hauteur à l'intérieur des limites des talus sont extraites (section 4.5). La section 4.1 présente quelques généralités concernant l'analyse morphométrique.

### **4.1 Généralités**

La morphologie du terrain joue un rôle important dans les différents processus hydrologique, géologique et biologique qui agissent de façon active sur le relief terrestre. L'importance de la caractérisation de la morphologie est reflétée par les nombreux travaux traitant de l'analyse morphométrique à l'aide des systèmes d'information géographique (SIG) présentés dans la littérature (par exemple Franklin, 1987; Zevenbergen et Thorne, 1987; Dikau et al., 1995; Mitasova et Hofierka, 1993; Mitasova et Mitas, 1993; Blaszczyński, 1997 et Dikau et Sauer, 1999).

L'analyse morphométrique vise à décrire de façon quantitative les différentes formes du terrain naturel telles que la pente, l'orientation, les différentes courbures, les crêtes, etc. Pour caractériser ces paramètres à l'aide des SIG, les modèles numériques d'altitude

(MNA), qui sont une représentation numérique simplifiée de la surface topographique, constituent les données de base.

Certains paramètres de forme primaires, tels que la pente locale et l'orientation (annexe A3), sont extraits automatiquement par les fonctions standards de la plupart des SIG. D'autres formes plus complexes ne peuvent être caractérisées qu'en greffant aux SIG une série de codes de calcul qui nécessitent d'être programmés. C'est le cas, entre autres, pour la pente globale et la hauteur totale des talus (figure 4.1). La section suivante présente la méthodologie proposée dans cette étude pour extraire ces deux paramètres.

## **4.2 Méthodologie**

Trois principales étapes sont proposées pour caractériser quantitativement la pente globale et la hauteur totale des talus du secteur d'étude :

1. Production du MNA
2. Identification des talus
3. Calcul de la pente globale et de la hauteur totale des talus

La figure 4.2 présente un diagramme détaillé des étapes suivies pour caractériser la hauteur totale et la pente globale des talus.

Dans cette étude, ces étapes de l'analyse morphométrique sont réalisées pour un secteur pilote de Ville de La Baie, le secteur des Bouleaux (figure 4.3). Ce secteur, d'environ 1 km<sup>2</sup>, a été sélectionné de façon à limiter les temps de calcul requis pour réaliser les analyses à l'aide des SIG. Étant donné la résolution du MNA, ceux-ci s'avèreraient trop importants pour l'ensemble du secteur de Ville de La Baie.

Les trois principales étapes d'analyse morphométrique réalisées sur le secteur des Bouleaux sont présentées dans les sections qui suivent.

### **4.3 Production du MNA**

La première étape de caractérisation de la pente globale et de la hauteur totale des talus consiste à produire un MNA. Pour le secteur des Bouleaux, un MNA en format matriciel à haute résolution planimétrique (les mailles ayant deux mètres de coté) a été créé (figure 4.4). La représentation tridimensionnelle du MNA est présentée à la figure 4.5.

Cette section traite des données de base (4.3.1) et de la méthode d'interpolation (4.3.2) qui ont été utilisées pour obtenir le MNA ainsi que des artefacts du MNA produit par l'interpolation (4.3.3).

#### **4.3.1 Données de base**

Les données utilisées pour produire le MNA du secteur des Bouleaux sont des cartes topographiques (document d'urbanisme, Ville de La Baie) obtenues par photogrammétrie à partir de photographies aériennes à l'échelle du 1: 5 000 et du 1: 8 000. Les courbes de niveau sont espacées de deux mètres. Des visites de terrain et des relevés d'arpentage effectuées par le Ministère des transports du Québec ont montré que les cartes topographiques représentaient correctement la morphologie du secteur. Les cartes topographiques sont considérées suffisamment précises pour refléter correctement les formes naturelles du terrain. Cette hypothèse est en général respectée, bien que ce soit un peu moins vrai dans les zones fortement boisées.

#### **4.3.2 Méthode d'interpolation utilisée**

Le MNA du secteur des Bouleaux a été obtenu par une interpolation polynomiale de type « spline » après avoir discrétisé les altitudes le long des courbes de niveau, selon l'algorithme présenté par Mitasova et Mitas (1993). Cette interpolation est effectuée à

l'aide de la fonction `s.surf.tps` du logiciel GRASS, (Geographic Resources Analysis and Support System, version 4.2.1).

Le secteur pilote est décomposé en tuiles d'égales dimensions afin d'obtenir un meilleur ajustement de la topographie par la fonction d'interpolation. Les tuiles se chevauchent, ce qui permet d'assurer un passage progressif entre elles. La taille des tuiles est déterminée par l'opérateur et choisie afin de minimiser les artefacts, en particulier les pics et les creux au sommet et à la base des reliefs. De plus, la fonction `s.surf.tps` utilise des paramètres qui permettent de contrôler la tension de la surface ajustée à la série de points d'altitude. Ces ajustements sont délicats et doivent être faits avec beaucoup de soins pour que le MNA obtenu soit le plus fidèle possible à la réalité.

#### **4.3.3 Artefacts produits par l'interpolation**

L'algorithme d'interpolation par spline produit inévitablement des artefacts, bien que légers, à la périphérie des tuiles, ce qui est observable sur la représentation tridimensionnelle du MNA présentée à la figure 4.6. La disposition extrêmement anisotrope des points le long des courbes de niveau est à l'origine de l'aspect caractéristique en palier du MNA (figure 4.6). La figure 4.7 présente la courbe hypsométrique du secteur qui correspond en fait à l'histogramme cumulé et normalisé des altitudes représentées dans le MNA. Cet histogramme montre que certaines altitudes correspondant aux intervalles des courbes de niveau (par exemple à 56, 58 et 64 mètres) sont légèrement sur-représentées dans le MNA. Ces artefacts résiduels peuvent être lissés en appliquant un filtre passe-bas (qui adoucit les variations à hautes fréquences) sur le MNA obtenu par interpolation.

Les artefacts générés lors de la construction du MNA du secteur des Bouleaux sont surtout présents dans les endroits à faible relief. Dans les zones de talus, ces artefacts sont jugés négligeables, et le MNA reproduit suffisamment bien le terrain pour être utilisé dans l'analyse morphométrique des talus du secteur.

#### **4.3.4 Précision et résolution du MNA**

La précision du MNA est déterminée par la précision des données de base utilisées pour le produire. Puisque les courbes de niveau du secteur des Bouleaux sont espacées aux deux mètres, la précision en altitude du MNA est de l'ordre du mètre.

La résolution planimétrique du MNA a été fixée à 2 m (chaque pixel a donc 2 m de côté). Cette dimension de maille est compatible avec la précision planimétrique des cartes topographiques de base, et permet de faire ressortir correctement les formes locales du relief.

#### **4.4 Identification des talus**

Pour qu'un glissement de terrain se produise, il faut qu'il y ait un appel gravitaire, et donc présence d'un relief ou d'un talus.

La notion de talus semble a priori simple et est couramment utilisée dans la vie courante. Cette notion reste cependant très subjective, et il est nécessaire de formaliser ce que l'on entend par talus.

Après plusieurs essais, et en se basant sur l'expérience de terrain, il apparaît que les talus peuvent être délimités assez simplement en fixant un seuil de  $14^\circ$  pour les pentes calculées localement à partir du MNA. Ce critère est aussi utilisé dans la définition des talus proposée par le ministère des transports du Québec (MTQ, 1999) :

« Un talus est défini comme un terrain en pente d'une hauteur de 5 m ou plus, présentant une inclinaison de  $14^\circ$  ou plus. Si une partie du terrain, dont l'inclinaison est inférieure à  $14^\circ$ , est située entre deux parties plus fortement inclinées, elle est considérée comme faisant partie du talus, à moins que sa largeur soit supérieure à 10 m (figure 4.8). »

Cette définition fait intervenir la présence de palier. Toutefois, dans le cadre de ce travail, seul le critère de définition basé sur la pente est considéré.

Pour le secteur des Bouleaux, la carte des pentes locales calculée en tenant compte des altitudes au voisinage des pixels (annexe A3.2) est présentée à la figure 4.9. À partir de cette carte, seuls les pixels de pente supérieure à  $14^\circ$  ont été conservés; ils représentent les talus (figure 4.10). À la figure 4.11, les limites de ces talus sont superposées à la surface du relief du secteur des Bouleaux. Ce critère, très simple, d'identification des talus, et basé seulement sur la pente, permet d'isoler correctement les talus du secteur des Bouleaux comme l'illustre la figure 4.11.

#### **4.5 Évaluation de la pente globale et de la hauteur totale des talus**

Dans les SIG disponibles actuellement, aucune fonction d'analyse spatiale n'existe pour extraire automatiquement la pente globale et la hauteur totale des talus. Un code de calcul, permettant d'extraire automatiquement ces paramètres de forme, a donc été développé (Perret et Larocque, 2000; document interne CGQ). Les étapes suivies pour extraire les valeurs de pente globale et de hauteur totale des talus sont les suivantes :

1. Identification des points hauts
2. Identification des chemins de plus grande pente
3. Calcul de la pente globale et de la hauteur totale

##### **4.5.1 Identification des points hauts**

L'ensemble des pixels du MNA faisant partie des talus, tel que défini à la section précédente, est considéré pour identifier les points hauts.

Un point haut est défini en se basant sur les flux entrants et sortants (annexe A3.3) au pixel considéré, qui doit en outre appartenir aux talus. Ce pixel correspond à un point haut s'il est caractérisé soit :

- par l'absence de flux entrant. Cette condition permet d'identifier correctement les points hauts situés sur les éperons;
- par la présence dans son voisinage immédiat d'au moins un pixel n'appartenant pas au talus. Ce pixel doit en outre avoir un flux sortant dirigé vers un autre pixel appartenant entièrement au talus, c'est-à-dire bordé sur ses quatre côtés par des pixels appartenant aussi au talus. Cette condition permet d'isoler les points hauts dans les autres situations, et tient compte des effets de bord.

Un exemple d'identification de points hauts selon ces deux conditions est présenté à la figure 4.12. Les résultats obtenus pour le secteur des Bouleaux sont illustrés à la figure 4.13. La figure 4.14 présente la distribution des points hauts à la surface du relief du secteur des Bouleaux. Cette série de points constitue le point de départ des chemins de plus grande pente identifiés à l'étape suivante.

#### **4.5.2 Identification des chemins de plus grande pente**

Les chemins de plus grande pente correspondent au trajet que suivrait, sous l'action de la gravité, une bille placée en chacun des points hauts. Ces chemins représentent donc le plus court trajet à la surface du relief pour atteindre le pied du talus. Les derniers pixels de chaque chemin, situés à la base des talus, correspondent aux points d'arrivée.

Pour les talus de forme complexe (éperon, dépression, talweg, etc.) les chemins peuvent changer fortement de direction avant d'atteindre la base du talus. Dans ce cas, ces derniers sont découpés en plusieurs segments, que l'on pourrait qualifier de « sous-talus », si le changement de direction s'écarte trop de la direction du segment précédent. Comme l'algorithme utilisé pour extraire les chemins de plus grande pente est basé sur une procédure dite du D8 (par exemple Tarboton, 1997), il n'y a pas de changement de

direction de moins de  $45^\circ$ . Ainsi, le talus est segmenté en plusieurs « sous-talus » lorsque la direction change de  $45^\circ$  ou plus au pixel considéré. Un exemple d'identification de chemin de plus grande pente est présenté à la figure 4.15.

#### **4.5.3 Calcul de la pente globale et de la hauteur totale**

La pente globale et la hauteur des talus correspondant à tous les chemins sont calculées à partir de leurs points de départ et d'arrivée. La hauteur correspond à la différence d'altitude entre ces deux points. La pente est calculée en fonction de la différence d'altitude et de la distance horizontale comprise entre les deux points. Les valeurs obtenues sont attribuées à tous les pixels appartenant au même chemin. Les cartes résultantes de la pente globale et de la hauteur totale des talus sont présentées aux figures 4.16 et 4.17 respectivement.

#### **4.6 Commentaires**

La méthode d'analyse morphométrique proposée pour calculer la pente globale et la hauteur totale des talus est bien adaptée pour les formes simples du relief. C'est ce que montre la comparaison des valeurs de pente globale et de hauteur totale obtenues par l'algorithme à celles mesurées sur le terrain pour quelques profils d'arpentage situés à l'intérieur du secteur des Bouleaux (figure 4.18). Il est à noter que la localisation des profils d'arpentage n'est connue qu'approximativement, à environ 10 ou 20 mètres près en planimétrie sur le terrain. Le tableau 4.1 présente les valeurs résultantes obtenues par l'algorithme et sur le terrain. En général, les valeurs de pente globale extraites automatiquement du MNA se comparent raisonnablement bien aux valeurs mesurées sur le terrain. Les écarts observés varient entre 0.5 et 7%. Par contre, les valeurs de hauteur totale calculées varient entre 11 et 19%. Cela est dû en partie à l'inexactitude du MNA par rapport au relief réel, à la localisation approximative des profils sur le terrain (10 à 20 m près), et probablement aussi à l'algorithme utilisé pour extraire l'information du MNA. On admettra que, pour cet exercice méthodologique, la caractérisation des talus par

analyse morphométrique fournie des résultats suffisamment satisfaisants pour être utilisés dans l'évaluation quantitative de l'aléa.

<b>Numéro du profil</b>	<b>Pente (°) (Terrain)</b>	<b>Pente (°) (SIG)</b>	<b>Hauteur (m) (Terrain)</b>	<b>Hauteur (m) (SIG)</b>
<b>005</b>	26.5	26.6	22.0	19.6
<b>002</b>	35.1	32.6	14.8	16.52
<b>003</b>	28.2	27.4	18.8	15.3
<b>001</b>	26.0	25.0	18.6	15.8

Tableau 4.1 : Valeurs des pentes globales et des hauteurs totales mesurées sur le terrain et à l'aide des SIG pour quatre profils d'arpentage situés dans le secteur des Bouleaux (document interne; CGQ, 1997).

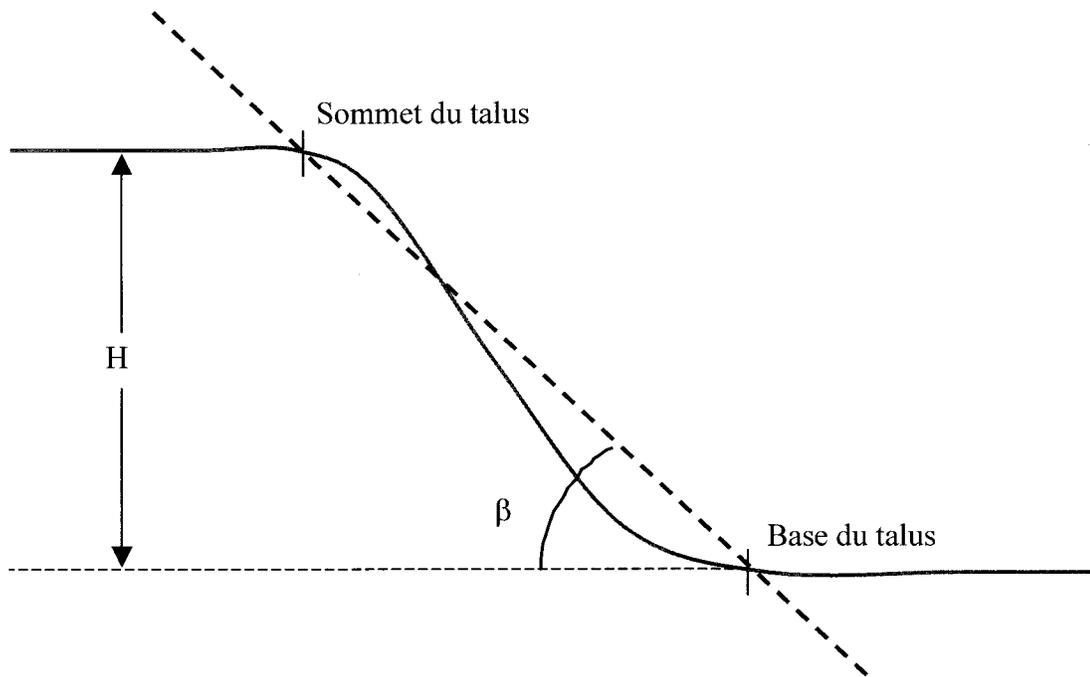


Figure 4.1 : Représentation schématique de la pente globale ( $\beta$ ) et de la hauteur totale ( $H$ ) d'un talus.

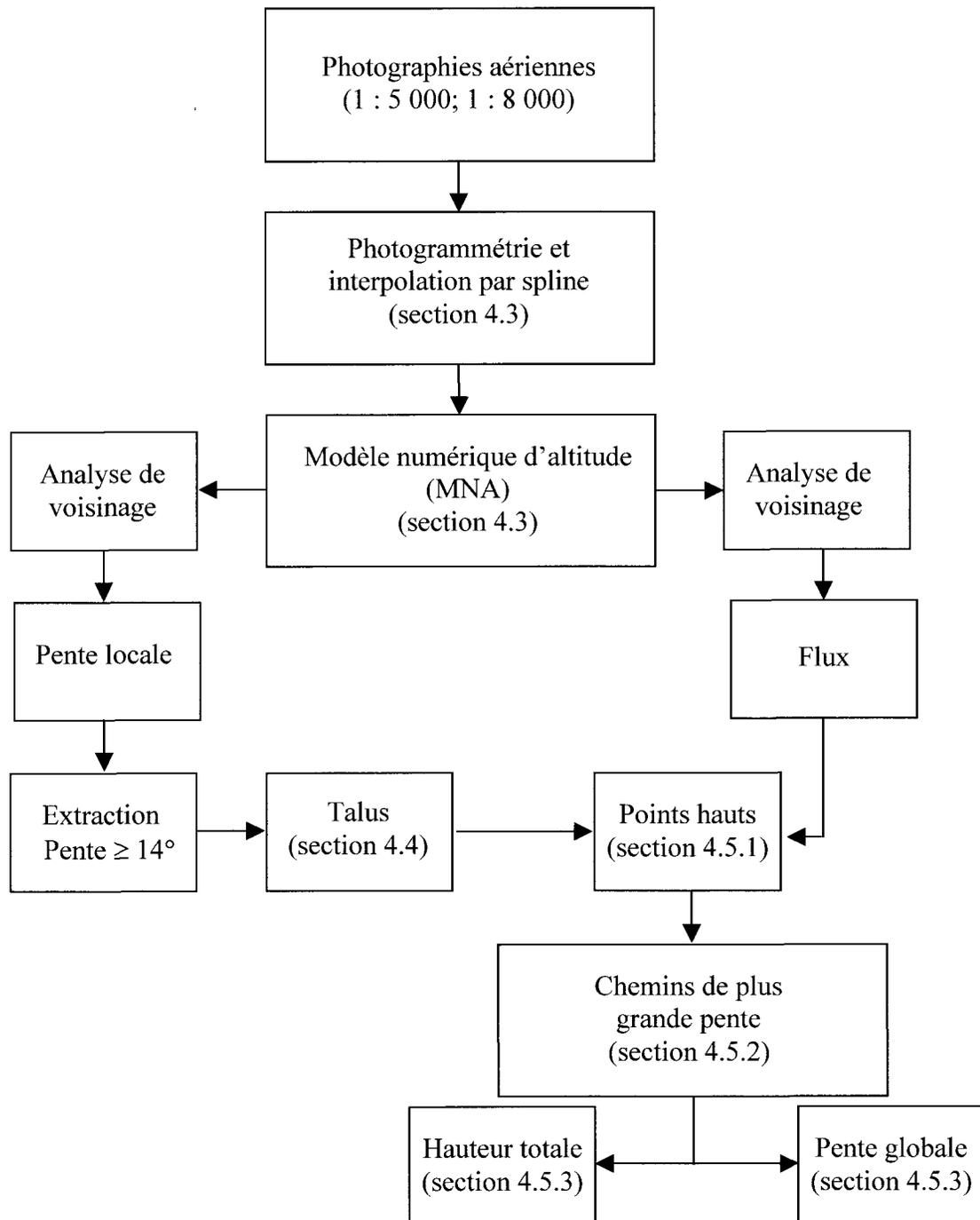


Figure 4.2 : Organigramme des étapes d'analyse morphométrique suivies pour caractériser la hauteur totale et la pente globale des talus du secteur des Bouleaux, Ville de La Baie.

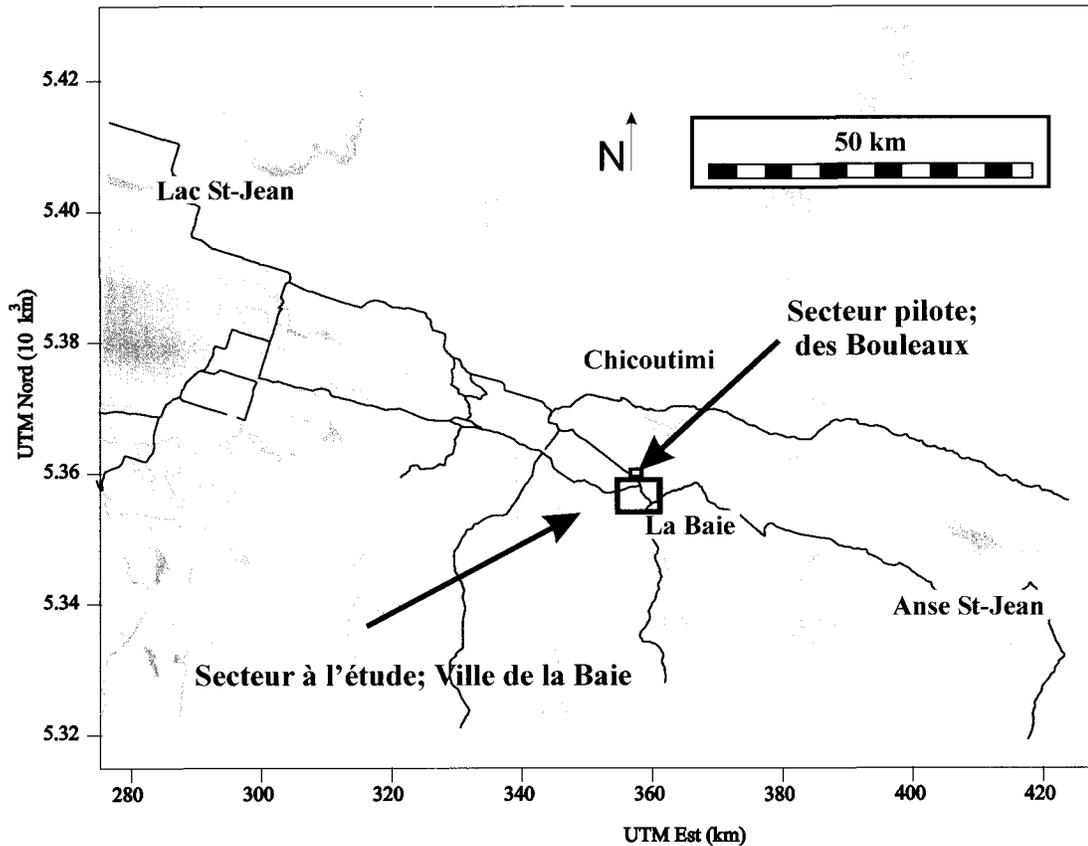


Figure 4.3 : Localisation du secteur pilote des Bouleaux, Saguenay-Lac-Saint-Jean. Les coordonnées nord-ouest sud-est du secteur de Ville de la Baie sont respectivement (MTM, zone 7, NAD 83) : 5 355 990 N / 286 129 W et 5 350 238 S / 270 530 E. Les coordonnées nord-ouest sud-est du secteur des Bouleaux sont respectivement (MTM, zone 7, NAD 83) : 5 356 812 N / 275670 W et 5 355 986 S / 274 578 E.

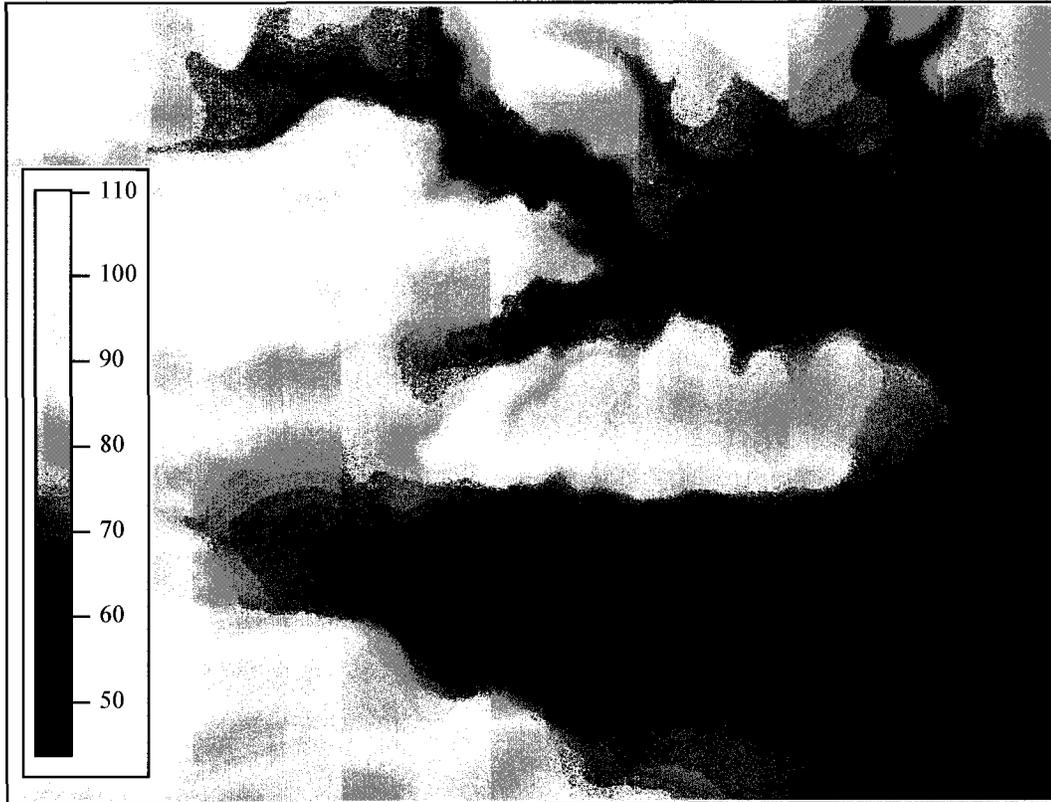


Figure 4.4 : MNA du secteur des Bouleaux. La légende indique l'altitude exprimée en mètre. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m. La taille des pixels est de 2 x 2 m. La taille du MNA est de 546 colonnes par 416 lignes.

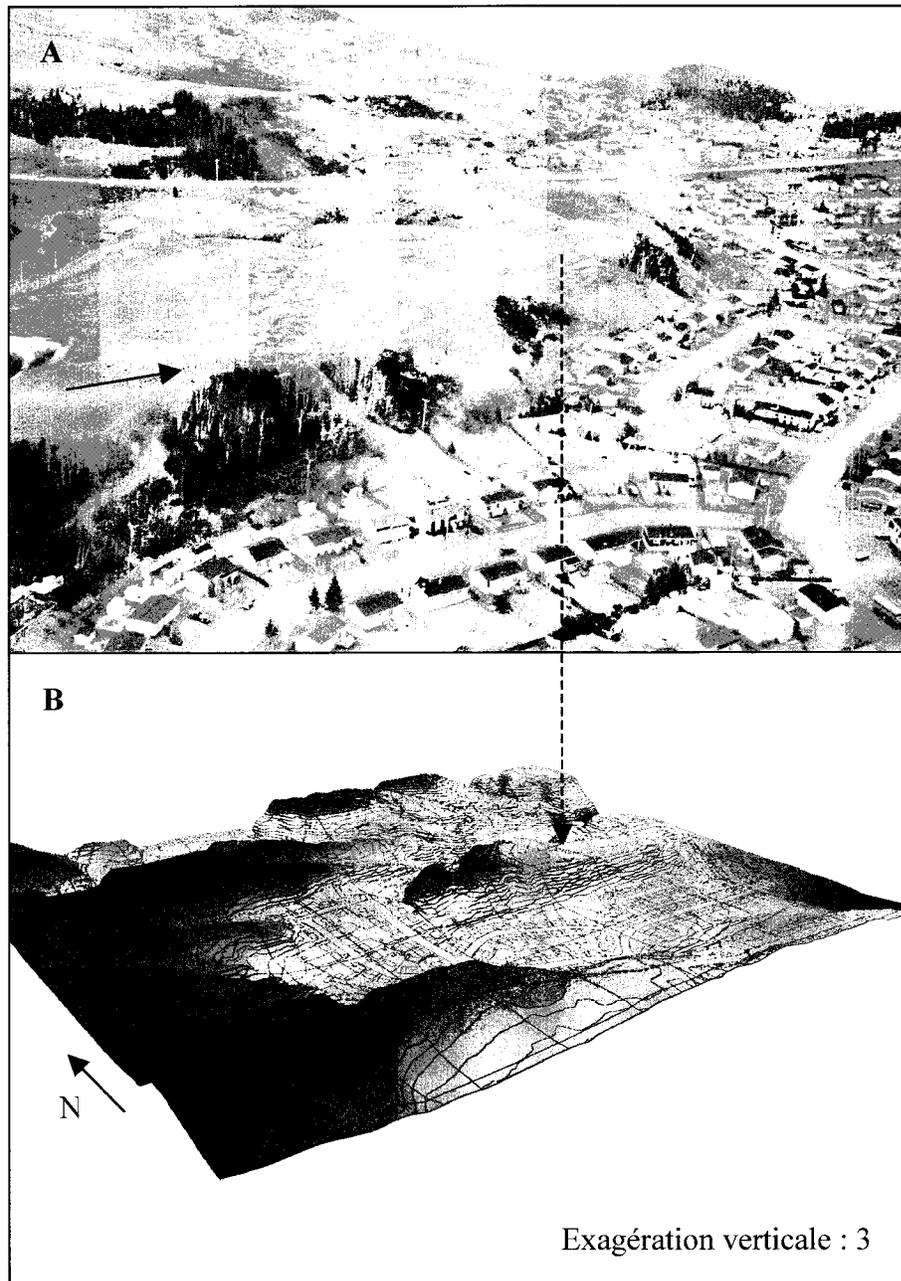


Figure 4.5 : Représentation tridimensionnelle du MNA du secteur des Bouleaux, Ville de La Baie. A : Vue aérienne du secteur. B : Représentation tridimensionnelle du MNA avec la carte topographique et la carte cadastrale superposées. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

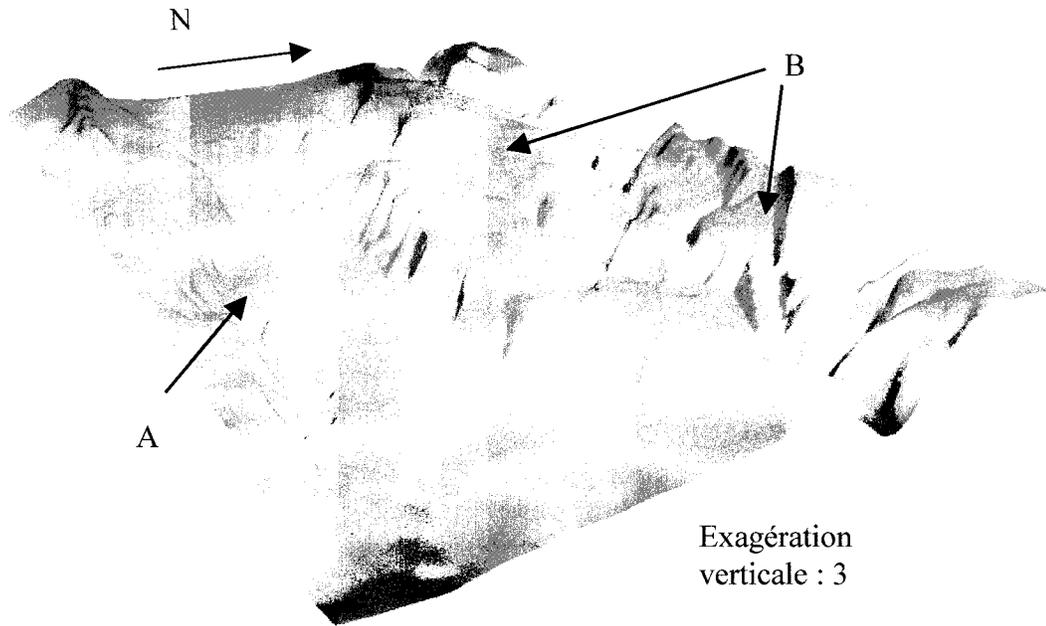


Figure 4.6 : Artefacts du MNA produits par la distribution anisotrope des altitudes le long des courbes de niveau et par la méthode d'interpolation par spline, secteur des Bouleaux. A : Artefacts situés à la périphérie des tuiles d'interpolation. B : Artefacts au passage des courbes de niveau. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

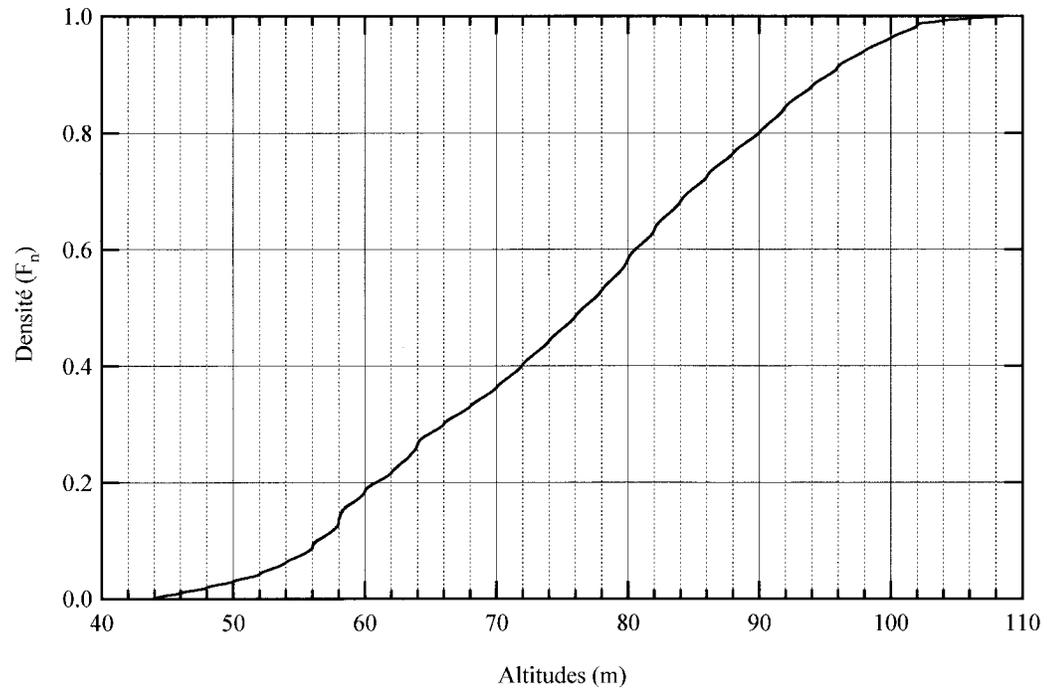


Figure 4.7 : Courbe hypsométrique (histogramme cumulé et normalisé des altitudes) du secteur des Bouleaux.

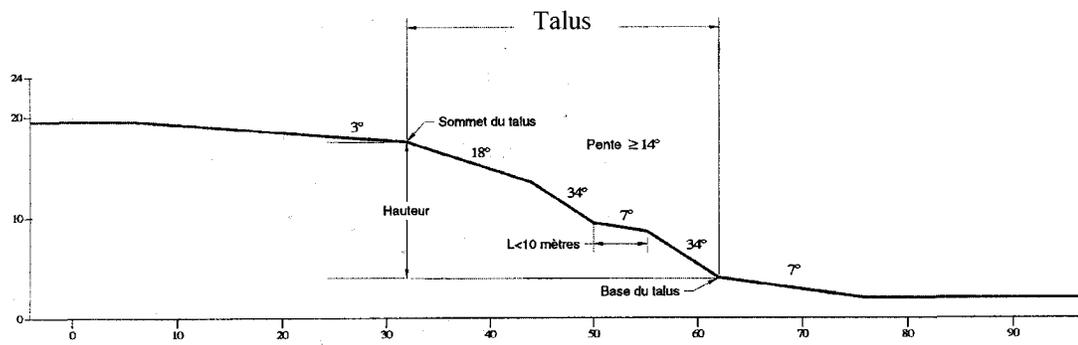


Figure 4.8 : Représentation schématique d'un talus; définition préliminaire (document interne; ministère des transports du Québec, 1999).



Figure 4.9 : Carte des pentes locales, secteur des Bouleaux. La légende indique la pente en degré. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

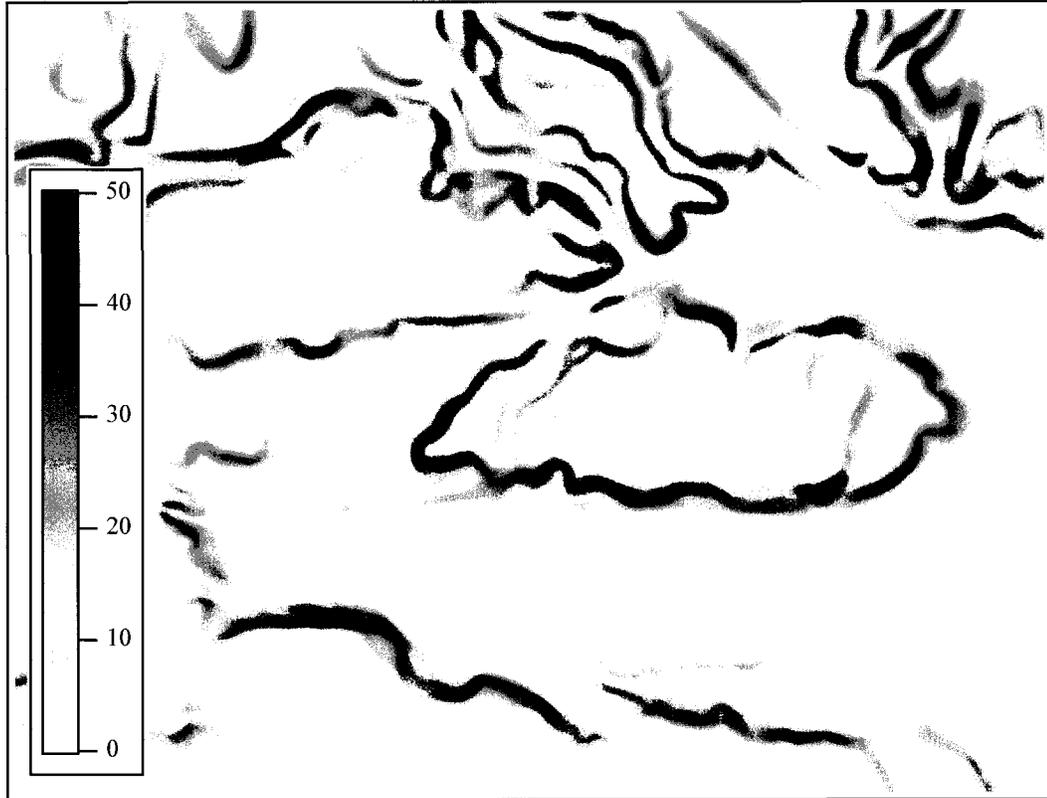


Figure 4.10 : Carte des talus, secteur des Bouleaux. La légende indique les valeurs de pente locale en degré. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

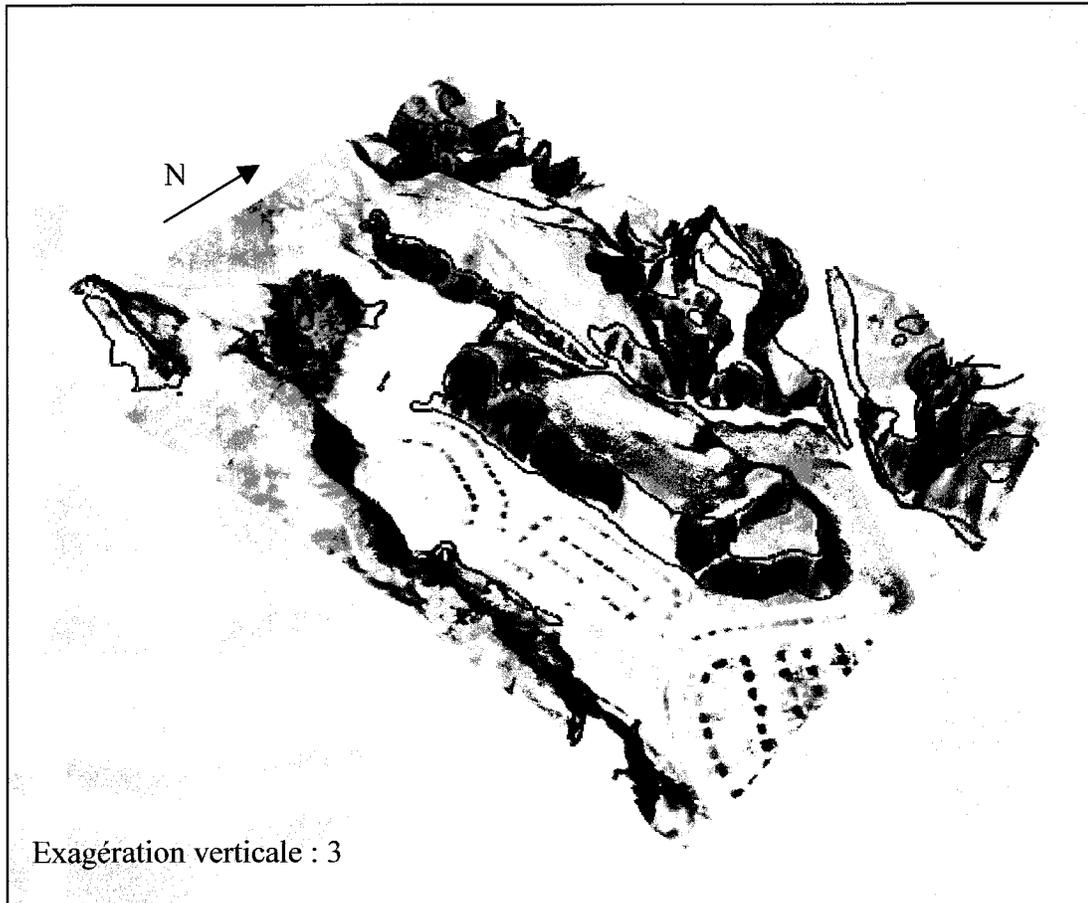


Figure 4.11 : Limites des talus superposées à la représentation tridimensionnelle du MNA, secteur des Bouleaux. La photographie aérienne (Q76819-73, 1 : 10 000, 1979) est drapée sur le MNA. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

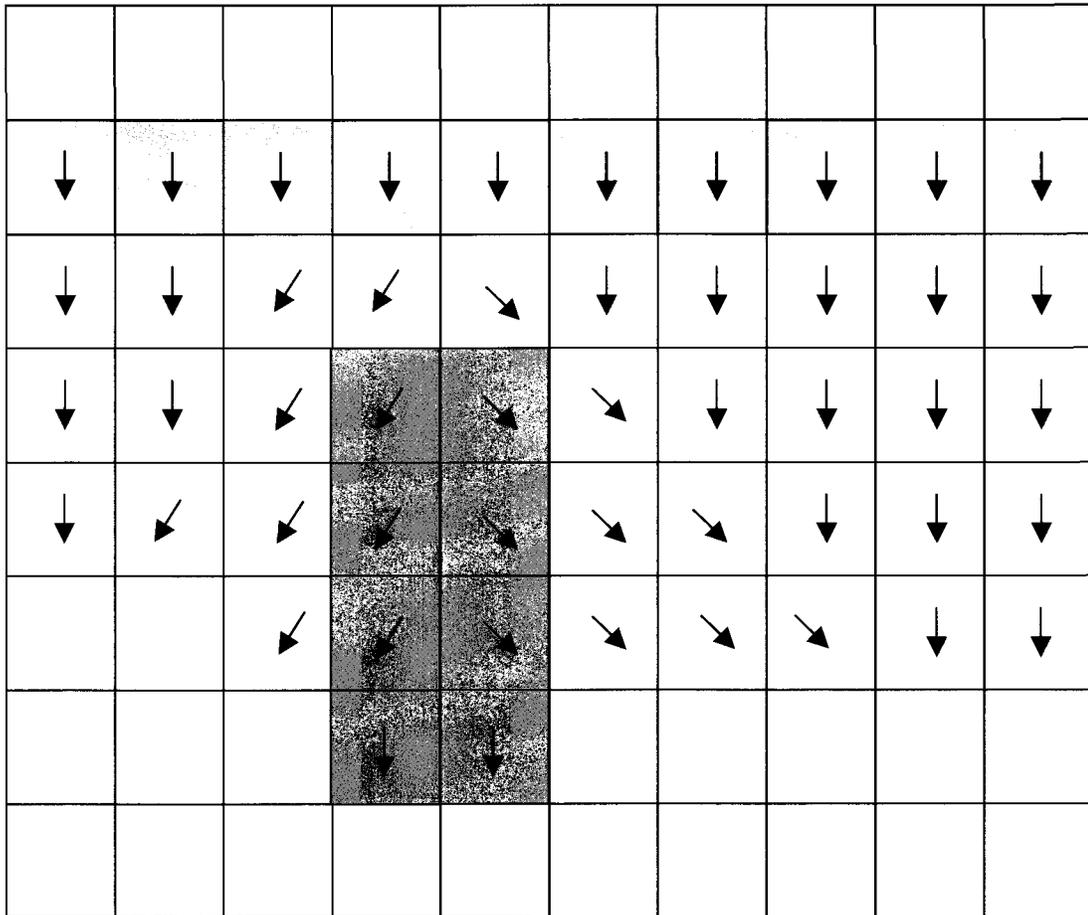


Figure 4.12 : Exemple d'identification des points hauts basée sur la notion de flux. Les flèches correspondent aux flux des pixels appartenant aux talus. Les pixels en gris foncé représentent les points hauts qui répondent au premier critère d'identification tandis que les pixels en gris pâle répondent au second critère.

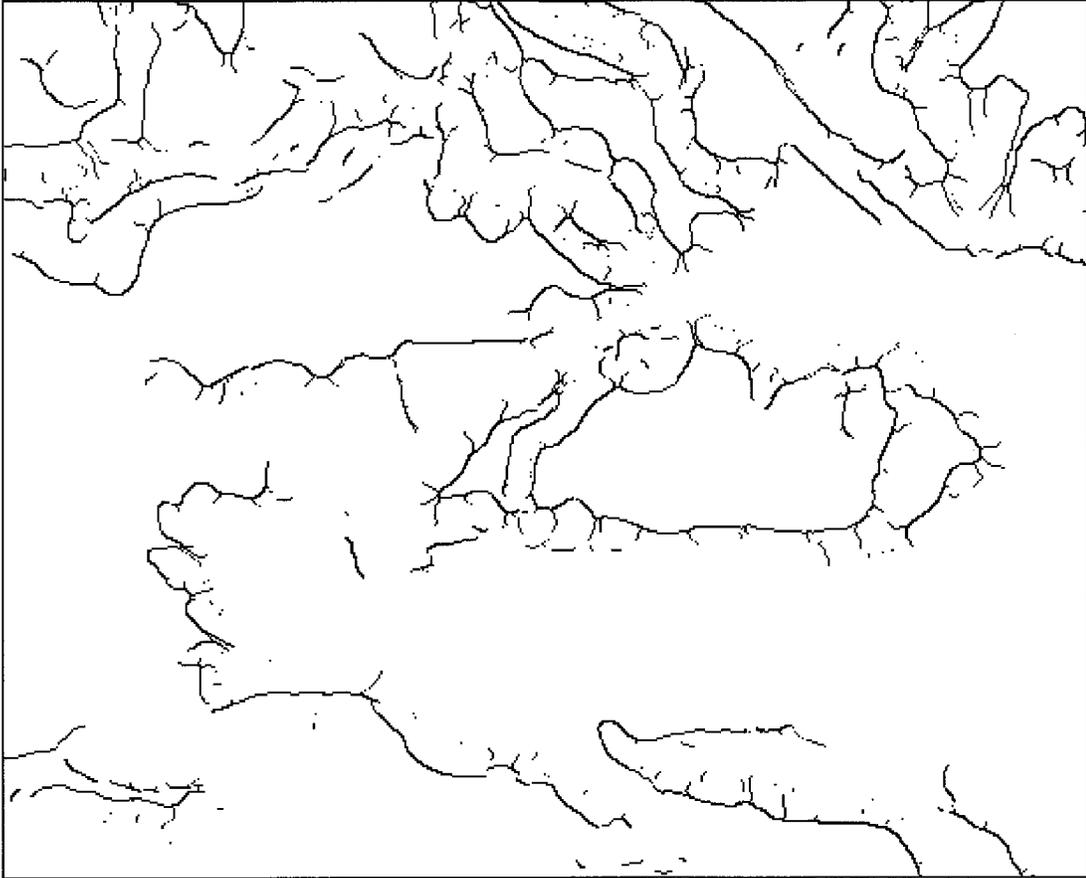


Figure 4.13 : Carte de la distribution des points hauts, secteur des Bouleaux. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

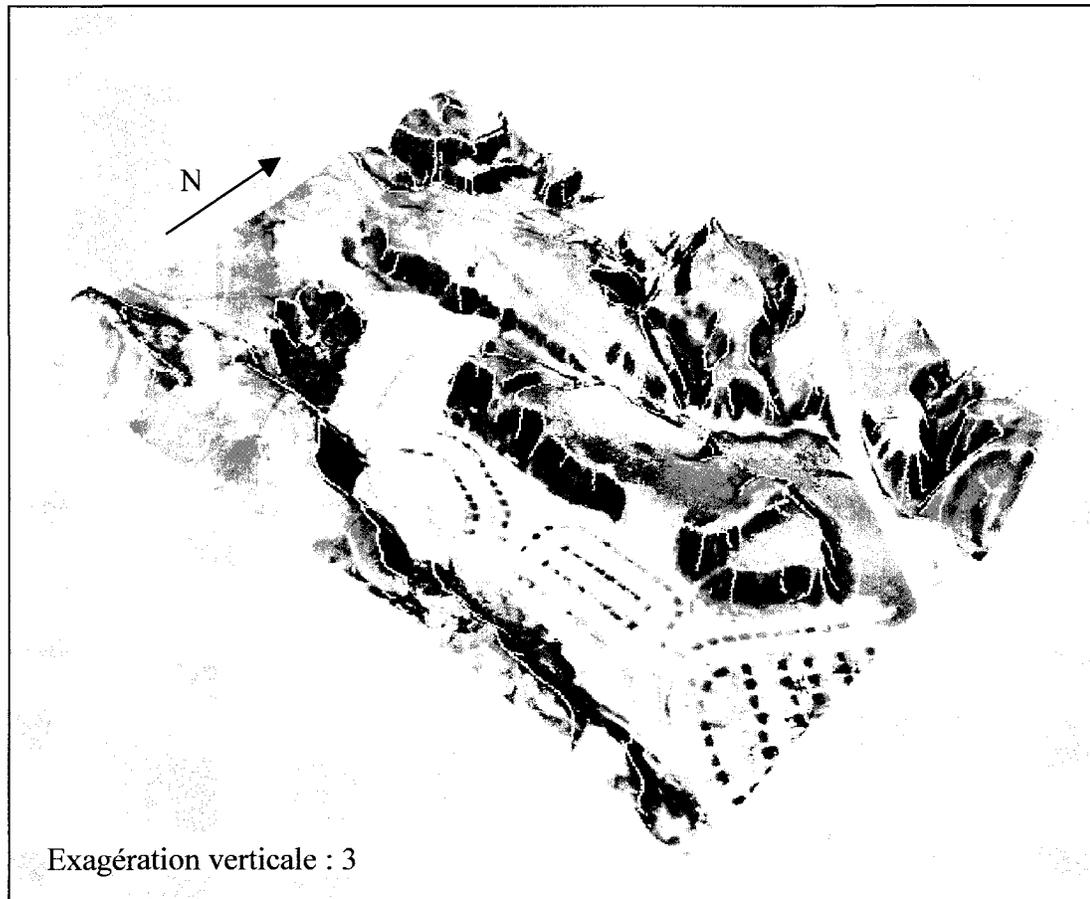


Figure 4.14 : Distribution des points hauts à la surface du relief, secteur des Bouleaux. La photographie aérienne (Q76819-73, 1 : 10 000, 1979) est drapée sur le MNA. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

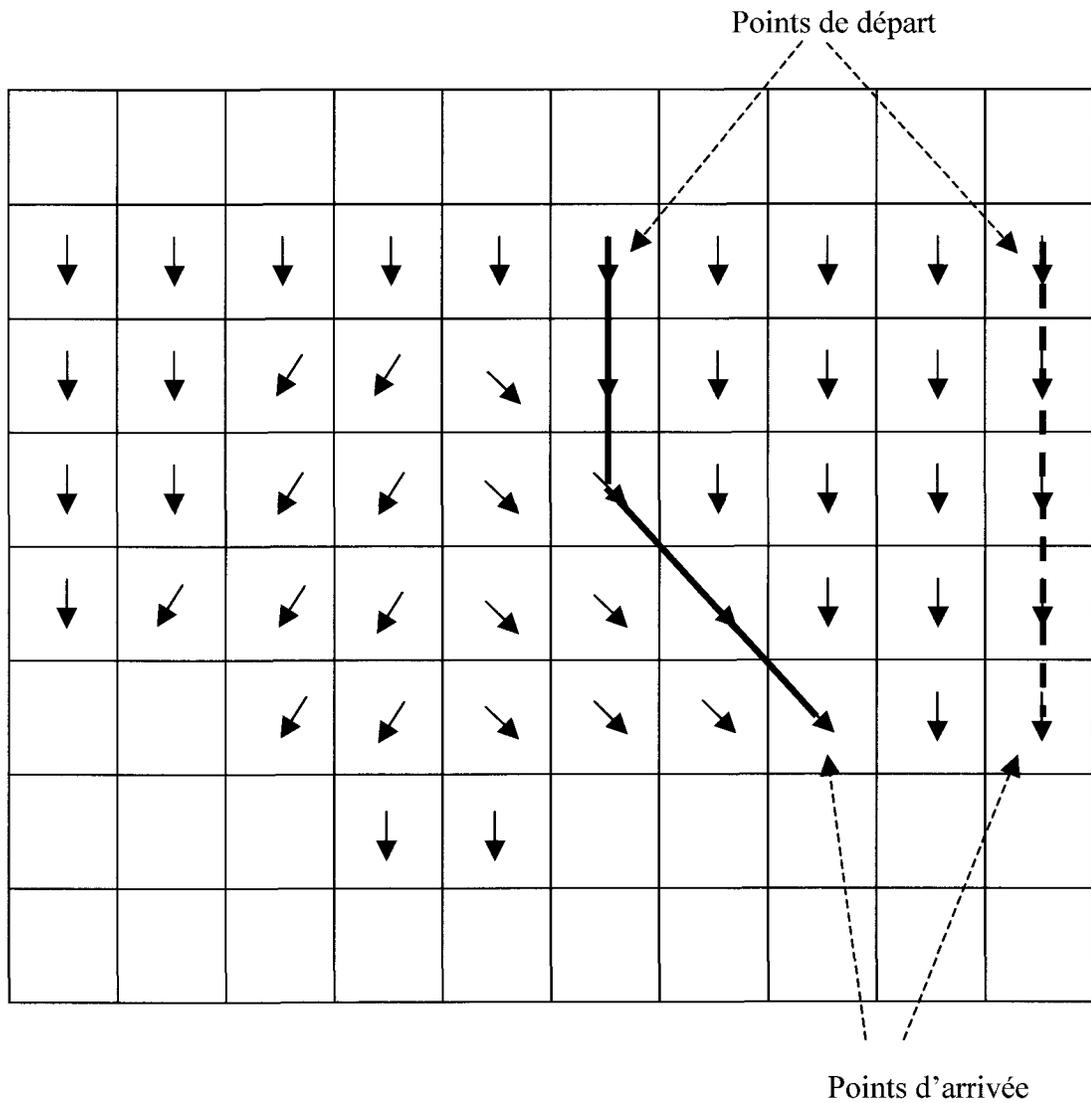


Figure 4.15 : Exemple d'identification d'un chemin de plus grande pente. La ligne en tirets représente un chemin au niveau d'un talus de forme simple pour lequel la direction de plus grande pente ne varie pas. La ligne continue indique un chemin découpé en deux segments de différentes directions au niveau d'un éperon. Le pixel situé au changement de direction correspond à la fois au point d'arrivée de la première section et au point de départ de la deuxième section.

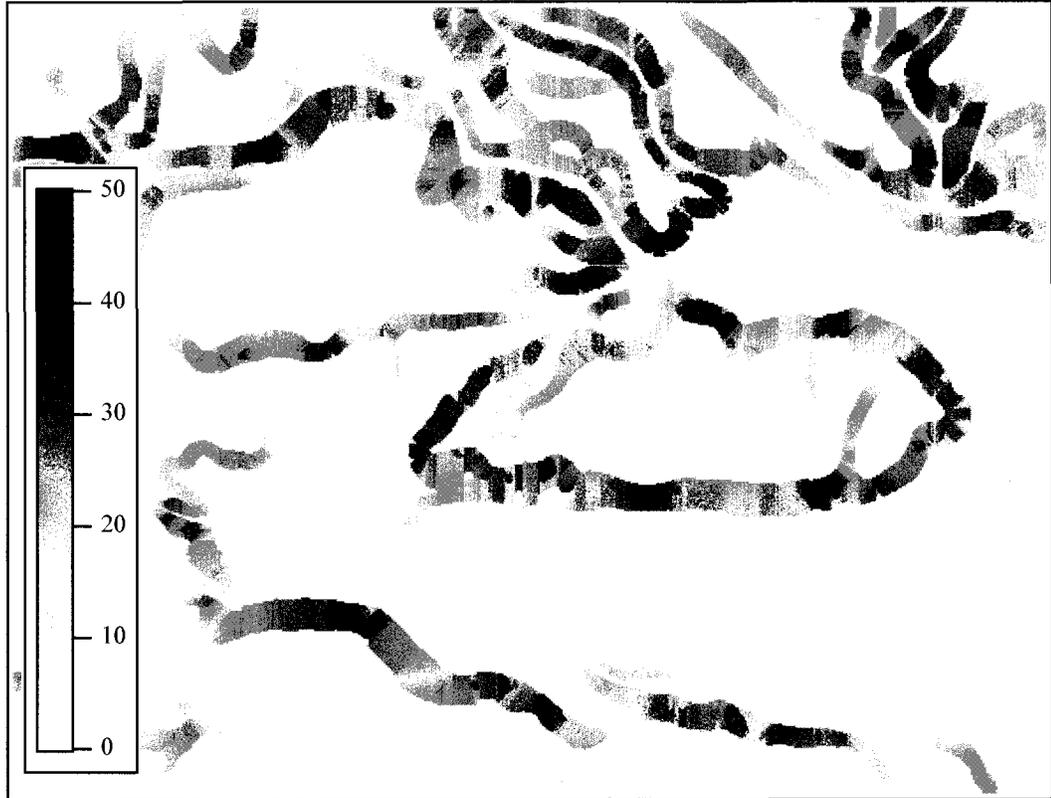


Figure 4.16 : Carte des pentes globales des talus, secteur des Bouleaux. La légende donne la pente en degré. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

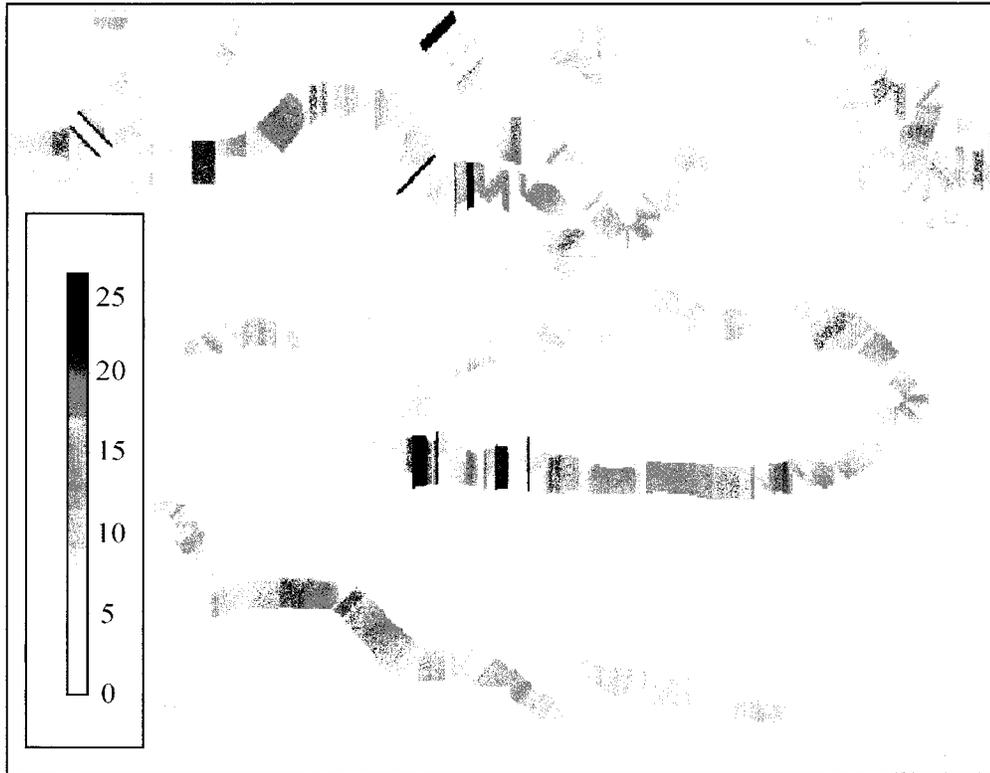


Figure 4.17 : Carte des hauteurs totales des talus, secteur des Bouleaux. La légende indique la hauteur en mètre. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

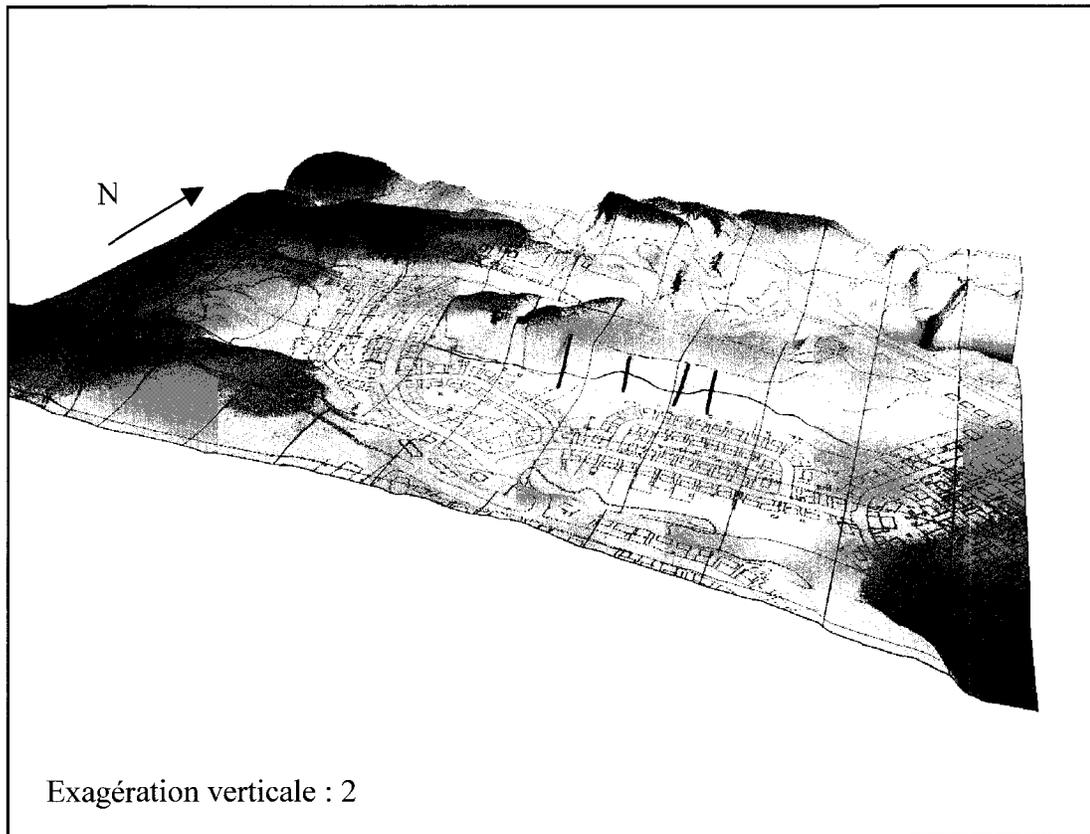


Figure 4.18 : Profils d'arpentage drapés sur la représentation tridimensionnelle du MNA, secteur des Bouleaux. Les informations cadastrale y sont aussi superposées. De gauche à droite, les numéros des profils sont : 005, 002, 003, 001. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

## **CHAPITRE 5 : ÉVALUATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA « GLISSEMENT DE TERRAIN » PAR LE MODÈLE DE LA PENTE INFINIE**

Dans la littérature consacrée à l'apport des systèmes d'information géographique (SIG) à l'évaluation quantitative de l'aléa « glissement de terrain », le modèle de la pente infinie est de loin le modèle le plus utilisé pour la cartographie à l'échelle régionale (par exemple van Westen, 1993; Pack et al., 1998).

Ce chapitre décrit brièvement le modèle de la pente infinie et discute de son intégration aux SIG. Le modèle de la pente infinie est ensuite appliqué au secteur pilote des Bouleaux, un quartier résidentiel situé au nord de la rivière à Mars à Ville de La Baie. Deux approches sont proposées : dans la première, le facteur de sécurité est obtenu en utilisant la pente définie localement, tandis que l'autre utilise la pente globale des talus, c'est-à-dire celle utilisée classiquement sur le terrain.

### **5.1 Présentation du modèle**

Le modèle de la pente infinie est une méthode à l'équilibre limite qui évalue la stabilité des talus pour des mouvements translationnels. Le facteur de sécurité, défini comme le rapport de la résistance au cisaillement à la contrainte de cisaillement, est calculé sur une surface de rupture considérée plane et parallèle à la surface du terrain, elle-même assimilée à un plan incliné (figure 5.1). Selon Morgenstern et Sangrey (1978), ce modèle est approprié quand le cisaillement prend place dans la croûte altérée d'un dépôt ayant une profondeur faible par rapport aux autres dimensions du glissement de terrain. Ces conditions sont à peu près respectées pour les glissements de terrain superficiels situés à l'intérieur du secteur de Ville de La Baie (chapitre 3).

Le facteur de sécurité, qui tient compte des composantes déstabilisantes de la gravité et les composantes stabilisantes de friction et de cohésion sur le plan de rupture, se calcule selon l'équation générale suivante (Graham, 1984) (figure 5.1) :

$$F = \frac{c' + (\gamma - m\gamma_w)z \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad (\text{équation 5.1})$$

où :

- F : facteur de sécurité;
- c' : cohésion effective (kPa);
- $\phi'$  : angle de friction effectif ( $^\circ$ );
- $\gamma$  : poids volumique du sol ( $\text{kN/m}^3$ );
- $\gamma_w$  : poids volumique de l'eau ( $\text{kN/m}^3$ );
- m : rapport de l'épaisseur de la nappe phréatique à l'épaisseur de la masse déstabilisée ( $m = z_w / z$ ) (sans dimension);
- z : profondeur de la surface de rupture sous la surface du terrain (m);
- $z_w$  : hauteur de la nappe phréatique au-dessus de la surface de rupture (m);
- $\beta$  : inclinaison de la surface du terrain ( $^\circ$ ).

Dans l'application du modèle conventionnel de la pente infinie (équation 5.1), trois principales hypothèses sont faites au niveau (i) de la géométrie des talus, (ii) du réseau d'écoulement dans le talus et (iii), des propriétés mécaniques du sol :

- La géométrie : la forme du talus est simplifiée à une forme rectiligne, tel qu'illustrée à la figure 5.2.
- Le réseau d'écoulement : la nappe phréatique est considérée parallèle à la surface du terrain et les écoulements se font aussi parallèlement à la pente (figure 5.1).
- Les propriétés mécaniques du sol : les propriétés mécaniques du sol sont considérées homogènes sur l'ensemble du profil considéré.

Le modèle de la pente infinie est le modèle le plus utilisé dans la littérature où l'on essaie d'intégrer les SIG à l'évaluation quantitative de l'aléa « glissement de terrain », et à sa cartographie à l'échelle régionale. En dépit des nombreuses hypothèses faites, la simplicité d'utilisation de ce modèle explique sa grande popularité.

En effet, parmi l'ensemble des paramètres requis dans l'équation du facteur de sécurité, seule la pente varie spatialement si la profondeur de la nappe phréatique et les paramètres mécaniques sont considérés constants. La hauteur des talus, qui est toujours délicate à calculer automatiquement, n'intervient pas (d'où le nom de « méthode de la pente infinie »). La pente est un paramètre qui se calcule très facilement localement à l'aide des fonctionnalités disponibles dans la plupart des SIG. La pente locale est calculée en tenant compte des altitudes au voisinage du pixel considéré (annexe A3.2).

Le facteur de sécurité est évalué localement, pour chaque pixel, par des opérations d'algèbre cartographique en utilisant les valeurs des paramètres intervenant dans l'équation 5.1, et extraites des cartes de facteurs correspondantes au pixel considéré. Ici, la stabilité est évaluée pour des portions de terrain ayant une dimension de 4 m<sup>2</sup>, ce qui correspond à la taille des pixels couvrant le secteur des Bouleaux .

## **5.2 Application du modèle de la pente infinie au secteur pilote**

Le modèle de la pente infinie est appliqué au secteur pilote des Bouleaux ayant fait l'objet d'analyses morphométriques (chapitre 4).

### **5.2.1 Méthodologie**

Deux procédures sont proposées pour évaluer le facteur de sécurité sur l'ensemble du secteur pilote. La première utilise des valeurs de pente locale (figure 4.10) et la seconde, des valeurs de pente globale (figure 4.16). Dans les deux procédures, le facteur de

sécurité est calculé pixel par pixel en utilisant la valeur de pente associée à chacun des pixels.

Dans cette analyse, les valeurs des paramètres, autres que la pente, sont considérées constantes sur l'ensemble du secteur pilote. Pour ce qui est de la cohésion et de la friction, cette hypothèse est, en général, respectée puisque les matériaux (croûte argileuse) sont relativement homogènes sur l'ensemble du secteur des Bouleaux. Cette observation s'appuie sur la carte des formations superficielles de ce secteur et les reconnaissances géotechniques effectuées par le MTQ (Ministère des transports du Québec, 1999). Par contre, cette hypothèse est plus délicate à faire dans le cas de la profondeur de la surface de rupture et de la position de la nappe phréatique. Pour les glissements de terrain peu profonds du secteur de Ville de La Baie, les inventaires effectués après les fortes pluies de juillet 1996 montrent que la surface de rupture est le plus souvent située à moins de deux ou trois mètres de profondeur. La profondeur de la nappe phréatique, quant à elle, est obtenue par un calage sur un talus marginalement stable de telle sorte que le facteur de sécurité est fixé à un.

Même si ces paramètres sont considérés constants, leur effet sur la stabilité des talus peut facilement être évalué par des analyses paramétriques. Ces analyses peuvent, par exemple, simuler différents niveaux de la nappe phréatique éventuellement reliés à des intensités variables de pluies.

Les sections qui suivent présentent les valeurs des paramètres qui ont été sélectionnées pour calculer le facteur de sécurité pour le secteur des Bouleaux.

#### Cohésion et angle de friction :

Les valeurs de cohésion et d'angle de friction utilisées dans le modèle de la pente infinie sont celles évaluées par le ministère des transports du Québec (MTQ) et le Centre géoscientifique de Québec (CGQ) lors de différentes études de stabilité réalisées pour le

secteur des Bouleaux. Ces études ont été menées, entre autres, sur les profils d'arpentage présentés à la figure 5.3 en utilisant la méthode de Bishop simplifiée.

Les essais triaxiaux de type CIU qui ont été effectués en laboratoire donnent des valeurs de cohésion de 6.8 kPa et d'angle de friction de  $43^\circ$  (figure 5.4). Ces valeurs sont à peu près conformes à celles obtenues par Lefebvre (1981), qui sont de 5 kPa et  $41^\circ$ , sur des argiles situées à quelques kilomètres au nord du secteur des Bouleaux (figure 5.5). Les contraintes auxquelles certains de ces essais ont été effectués (Lefebvre, 1981) sont compatibles avec les contraintes s'appliquant au niveau de la surface de rupture pour les glissements de terrain considérés dans cette étude. À partir de ces valeurs, une analyse de stabilité à rebours a été effectuée pour un talus du secteur des Bouleaux (profil 002; figure 5.3) présentant des signes clairs d'instabilité (figure 5.6). Il est à noter que l'analyse à rebours a été faite pour une surface de rupture circulaire de faible courbure, qui n'est donc pas très éloignée d'un plan. Les signes d'instabilité (fissure de tension, bourrelet de compression) indiquent que le talus est marginalement stable à cet endroit et permettent de fixer le facteur de sécurité à un dans l'équation 5.1. La nappe phréatique est positionnée à 2 m de profondeur au sommet du talus et à la surface du terrain à sa base, tel que suggéré par les observations de terrain.

Suite à l'analyse à rebours, la cohésion calculée est de 5 kPa en fixant l'angle de friction à  $43^\circ$ .

#### Profondeur de la surface de rupture et de la nappe phréatique pour le modèle de la pente infinie :

La profondeur de la surface de rupture et de la nappe phréatique sont particulièrement difficiles à estimer à l'échelle régionale. Ces paramètres sont généralement évalués selon les connaissances régionales d'experts ou en couplant un modèle hydrologique au modèle de la pente infinie. Pour le secteur des Bouleaux, ces paramètres sont évalués selon les connaissances régionales de spécialistes.

La surface de rupture est assimilée à un plan situé à 3 m de profondeur. La position de la nappe phréatique est évaluée à 60 cm de profondeur. L'utilisation de ces valeurs permet d'obtenir une valeur unitaire du facteur de sécurité à proximité du profil d'arpentage 002 en utilisant les valeurs de pente définie globalement.

## **5.2.2 Résultats**

### **5.2.2.1 Cas des pentes définies localement**

La figure 5.7 présente la carte des facteurs de sécurité calculés à partir des valeurs de pente définies localement pour le secteur des Bouleaux. Étant donnée la forme généralement convexo-concave des talus, les pentes locales varient de faibles aux extrémités à élevées au centre des talus. Ainsi, à la figure 5.7, les valeurs de facteur de sécurité observées aux extrémités des talus sont beaucoup plus élevées qu'au centre. En effet, au centre des talus, celles-ci sont généralement inférieures à un et peuvent atteindre des valeurs aussi faibles que 0.6. À l'opposé, des valeurs allant jusqu'à 2.43 sont observées à proximité de la base et du sommet des talus.

L'histogramme de fréquence de la figure 5.8 permet de visualiser la distribution des valeurs de facteur de sécurité calculées pour le secteur des Bouleaux à partir de la carte des pentes définies localement. Cette figure montre que pour une assez grande proportion de pixels, environ 13%, le facteur de sécurité calculé est inférieur à un. Ces pixels correspondent essentiellement à ceux situés au centre des talus.

### **5.2.2.2 Cas des pentes définies globalement**

La carte de la figure 5.9 présente la distribution spatiale des facteurs de sécurité calculés à partir des valeurs de pente définies globalement pour le secteur des Bouleaux. L'utilisation des valeurs de pente globale, attribuées à chacun des pixels appartenant au même chemin de plus grande pente, explique la consistance des facteurs de sécurité

obtenus le long des profils des talus. Les quelques variations observées par endroits sont dues à la segmentation des chemins de plus grande pente.

La distribution des facteurs de sécurité obtenus avec les valeurs de pente définies globalement est présentée à la figure 5.8. Cette distribution montre que la proportion de pixels ayant un facteur de sécurité inférieur à un, environ 11%, est légèrement inférieure à celle calculée avec les pentes définies localement. La dispersion de la distribution est moins importante que dans le cas des facteurs de sécurité calculés avec les valeurs de pente locale, ce qui signifie qu'il y a moins de valeurs très élevées et très faibles.

En comparant les figures 5.7 et 5.9, on observe que dans le cas des pentes globales, ces pixels sont observés non pas au centre des talus comme dans le cas des pentes locales, mais plutôt au niveau des sections de talus ayant des pentes globales élevées, ce qui est normal et évidemment plus réaliste.

### **5.2.2.3 Effet de la position de la nappe phréatique**

L'effet de la position de la nappe phréatique sur la stabilité des talus peut être évalué par une analyse paramétrique. Les figures 5.10 à 5.13 présentent des cartes du facteur de sécurité, ainsi que des histogrammes de fréquence du facteur de sécurité, dérivés pour le secteur des Bouleaux en utilisant un rapport  $m$  variant de 0.25 à 1.00. Pour un rapport  $m$  de 0.25 à 1.00, la proportion de pixels ayant une valeur de facteur de sécurité inférieure à un passe de 0.03% à environ 45%. Cette variation est illustrée par le graphique de la figure 5.14. Ces simulations de la position de la nappe phréatique peuvent présenter un certain intérêt pour identifier les secteurs les plus critiques en fonction des quantités potentielles de pluies reçues.

### **5.2.3 Comparaison des résultats obtenus par le modèle de la pente infinie et par la méthode de Bishop simplifiée**

La stabilité des talus au niveau des profils d'arpentage, présentés à la figure 5.3, a été évaluée par le MTQ et le CGQ par la méthode de Bishop simplifiée. En superposant ces profils aux cartes des facteurs de sécurité (figure 5.15), il est possible de comparer, à proximité des profils, les facteurs de sécurité évalués par le modèle de la pente infinie avec ceux calculés par la méthode de Bishop simplifiée (on rappelle que la courbure de la surface de rupture retenue dans l'analyse de stabilité est très faible). Les résultats obtenus par les deux méthodes, vis-à-vis de ces profils, sont reportés au tableau 5.1.

Les valeurs de facteur de sécurité obtenues en utilisant la pente définie localement sont très variables à proximité d'un même profil. Les facteurs de sécurité sont sous-estimés au centre des talus et surestimés aux extrémités par rapport aux valeurs calculées par la méthode de Bishop simplifiée. Par exemple, à proximité du profil 002, lequel possède un facteur de sécurité près de l'unité, des valeurs aussi élevées que 2.27 sont observées aux extrémités du profil. Ces observations viennent du fait que les valeurs de pente utilisées dans l'équation du facteur de sécurité sont celles évaluées sur des portions de terrain de la taille d'un pixel ( $4 \text{ m}^2$ ) et non celles de la pente globale des talus.

Par conséquent, il est illusoire de vouloir corréler les résultats obtenus par le modèle de la pente infinie – pente locale avec ceux calculés par la méthode de Bishop simplifiée, entre autres, parce que les pentes considérées par ces deux méthodes sont très différentes.

Les facteurs de sécurité obtenus en utilisant les valeurs de pente globale sont évidemment constants le long des profils des talus constitués d'un seul segment (talus de forme simple), mais peuvent différer lorsque les talus sont formés de plusieurs segments. D'une façon générale, ils sont un peu plus élevés que les facteurs de sécurité obtenus par la méthode de Bishop simplifiée.

<b>Numéro du profil</b>	<b>F.S. Bishop simplifiée</b>	<b>F.S. Pente infinie (Pente locale)</b>	<b>F.S. Pente infinie (Pente globale)</b>
006	1.22	0.92-2.45	1.00-1.28
005	1.19	1.04-2.16	1.06-1.25
002	1.00	0.79-2.27	1.00
003	1.16	0.97-2.39	1.22-1.25
001	1.21	1.03-2.38	1.34-1.36
004	1.05	1.21-2.36	1.27-1.34

Tableau 5.1 : Comparaison des facteurs de sécurité (F.S.) obtenus pour six profils d'arpentage par la méthode de Bishop simplifiée et la méthode de la pente infinie, en utilisant les valeurs de pente locale et de pente globale, secteur des Bouleaux.

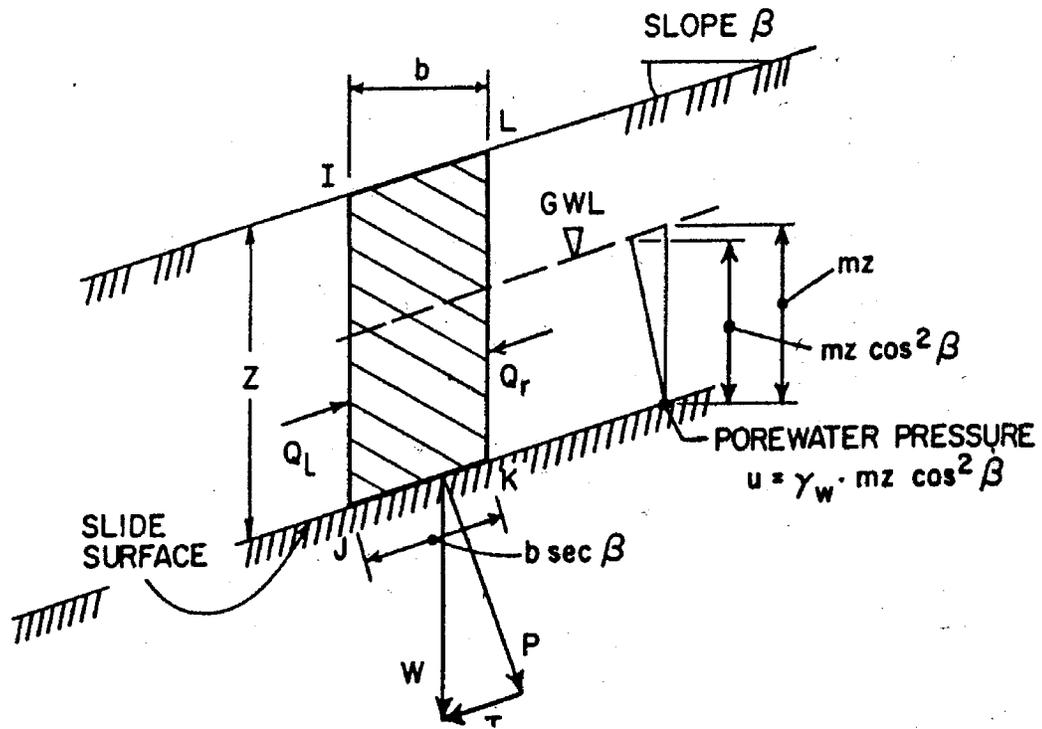


Figure 5.1 : Représentation schématique du modèle de la pente infinie avec une rupture planaire parallèle à la surface topographique, et un écoulement parallèle à la pente (tiré de Graham, 1984).

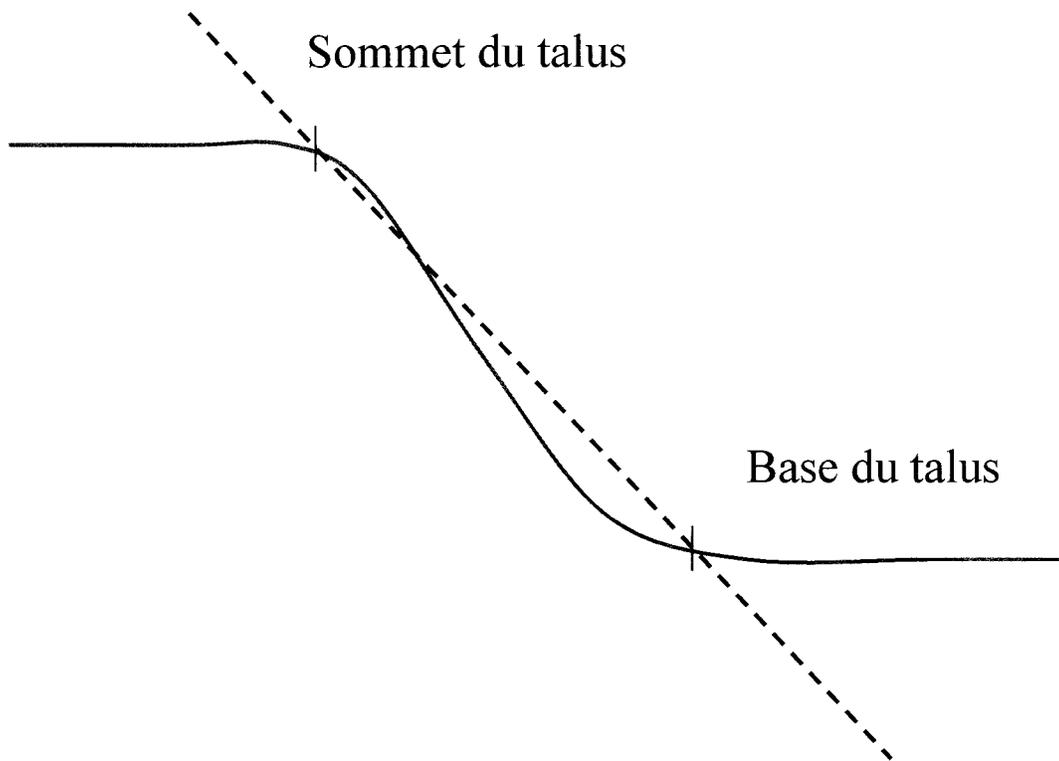


Figure 5.2 : Simplification de la forme convexo-concave d'un talus à une forme rectiligne.

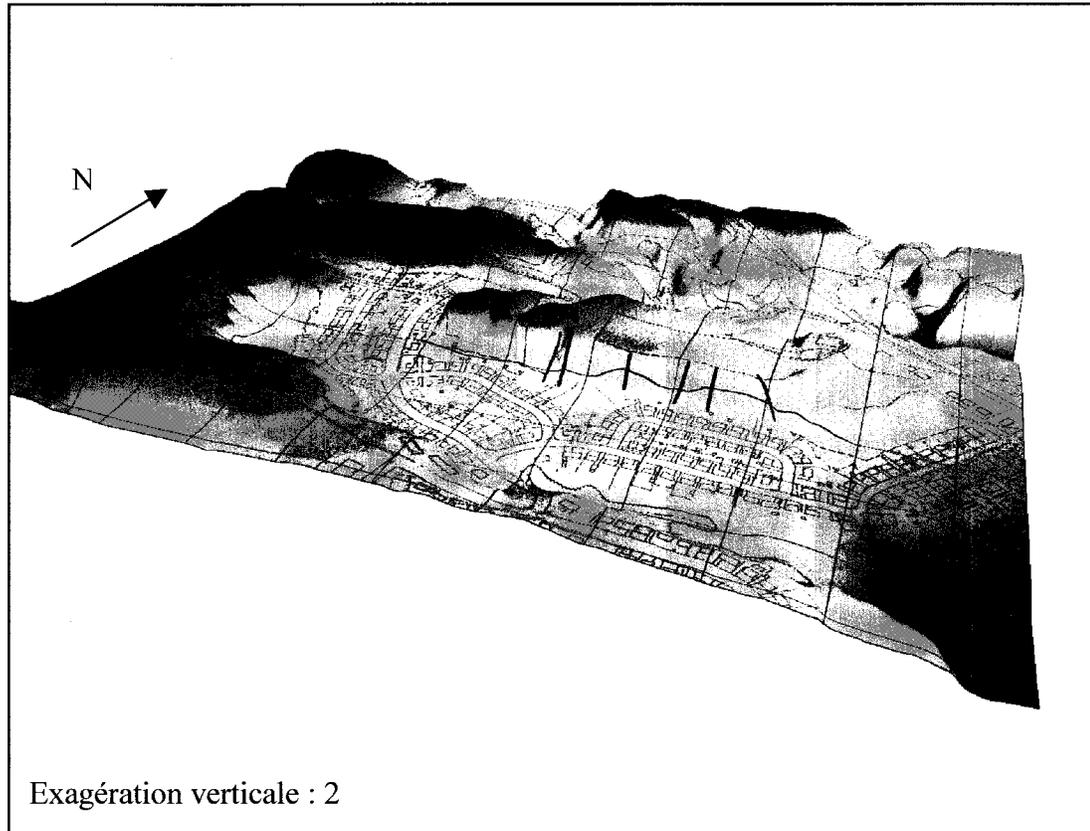


Figure 5.3 : Profils d'arpentage drapés sur la représentation tridimensionnelle du MNA, secteur des Bouleaux. De gauche à droite les numéros des profils sont : 006, 005, 002, 003, 001, 004. Deux profils supplémentaires sont considérés par rapport à la figure 4.18. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

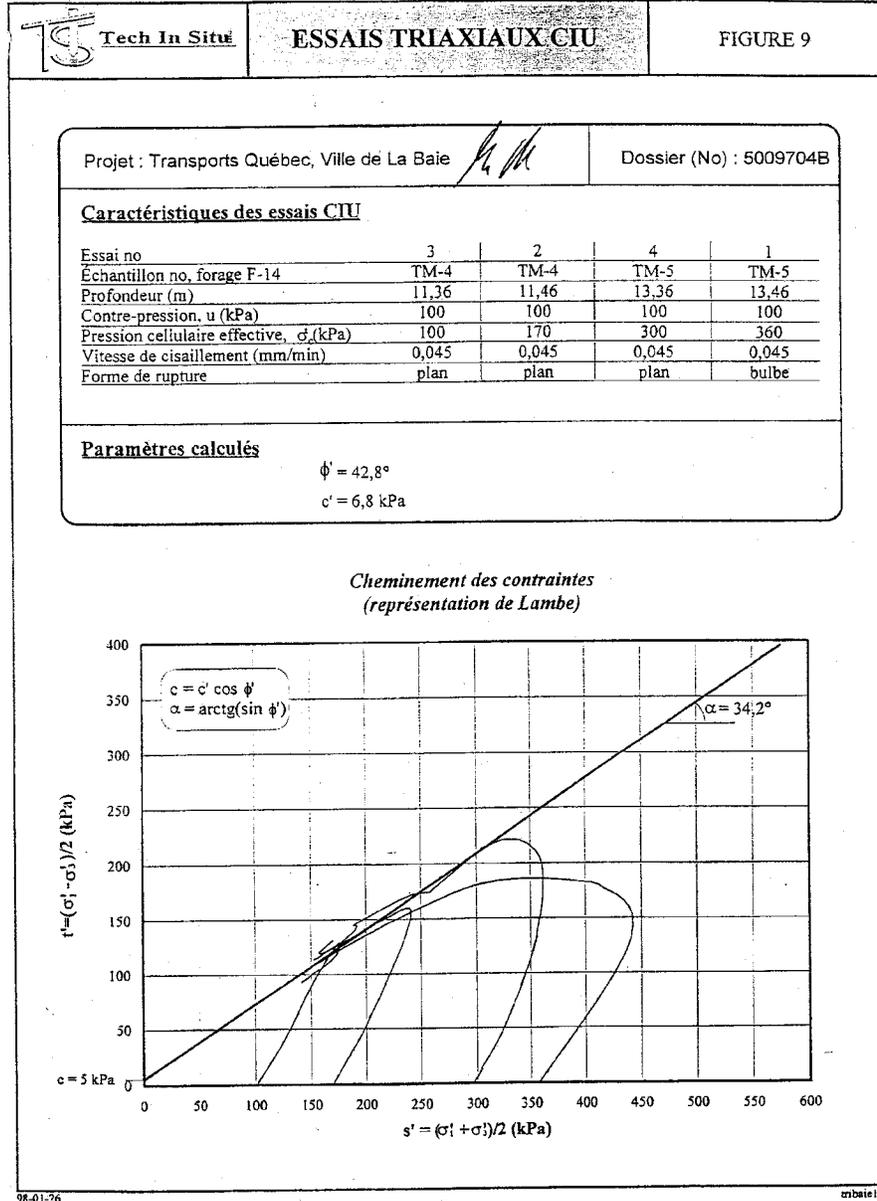


Figure 5.4 : Cheminement des contraintes et paramètres obtenus suite à des essais triaxiaux CIU pour un site situé à l'intérieur du secteur des Bouleaux (Tech In Situ Inc., 1998).

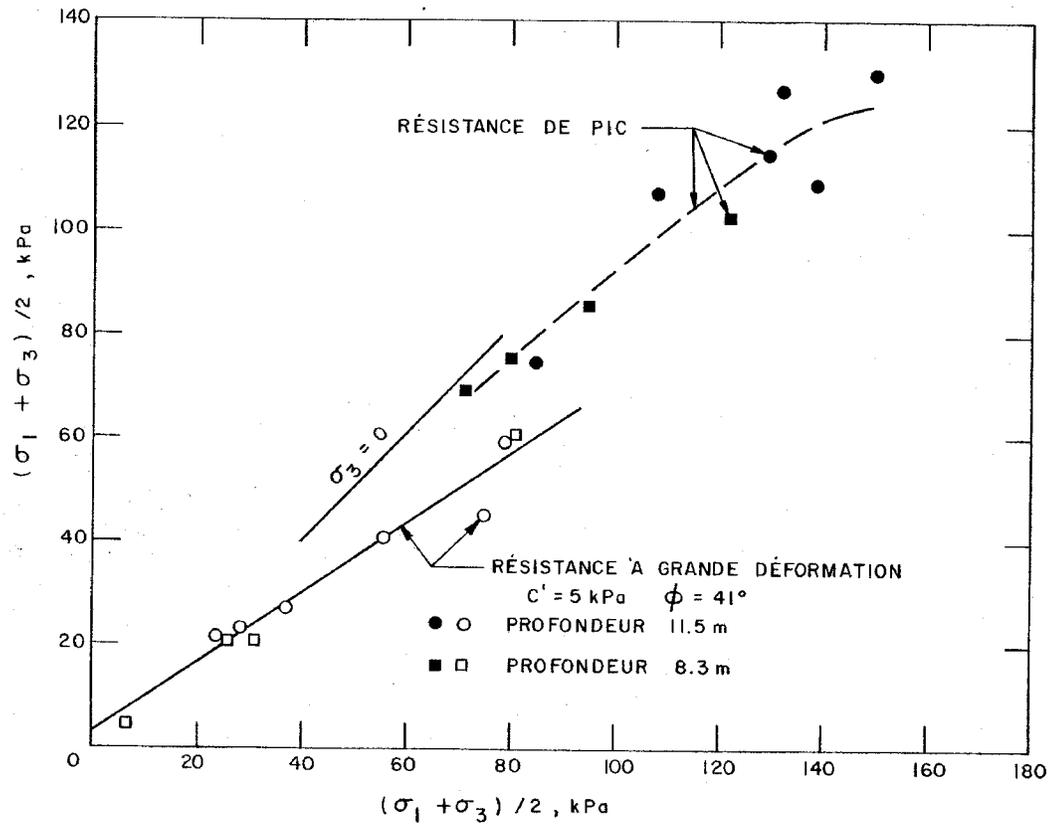


Figure 5.5 : Enveloppe de résistance obtenue suite à des essais triaxiaux CID pour un site situé à quelques kilomètres au nord du secteur des Bouleaux (tiré de Lefebvre, 1981).

A



B

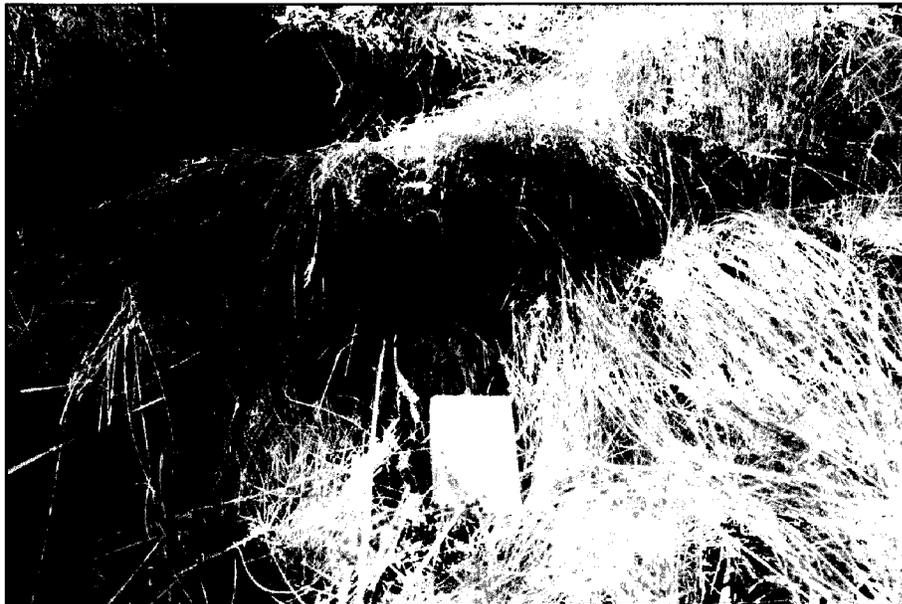


Figure 5.6 : Fissures de tension (A) et de chevauchement (B) observées à proximité du profil d'arpentage 002, secteur des Bouleaux. Le carnet donne l'échelle (photographies CGQ, 1997).

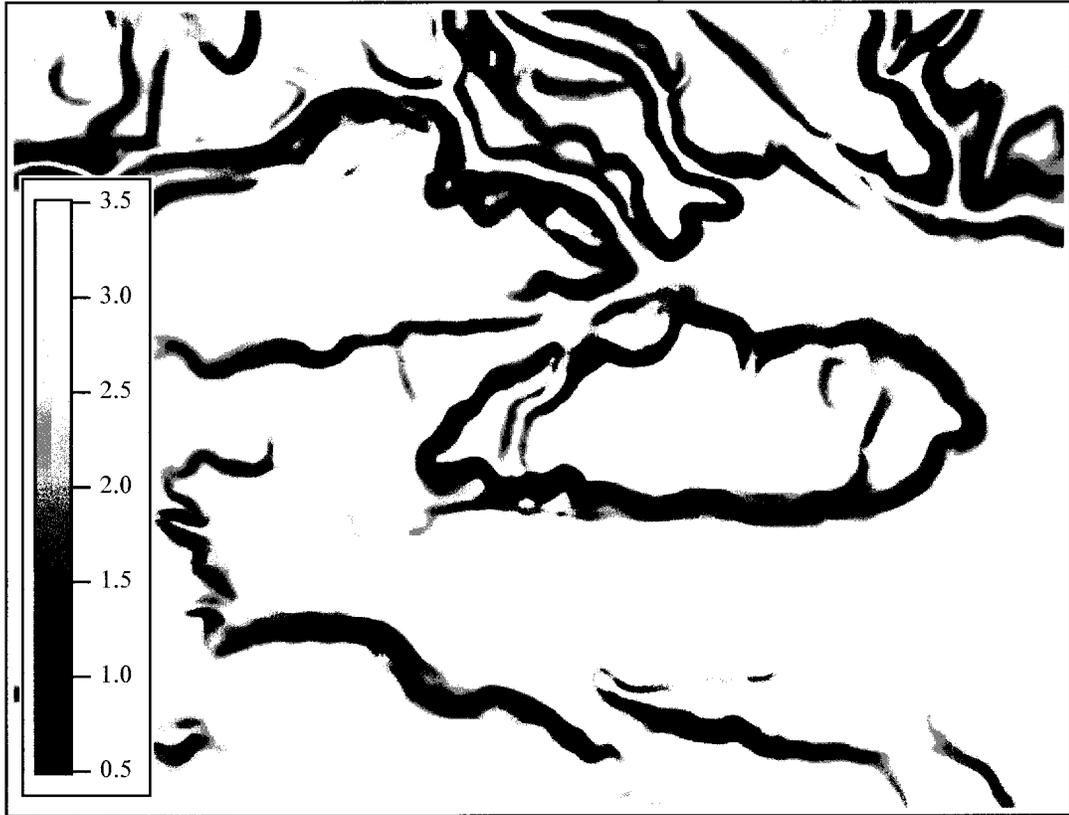


Figure 5.7 : Carte des facteurs de sécurité calculés à partir des pentes définies localement, au voisinage d'un pixel, secteur des Bouleaux. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

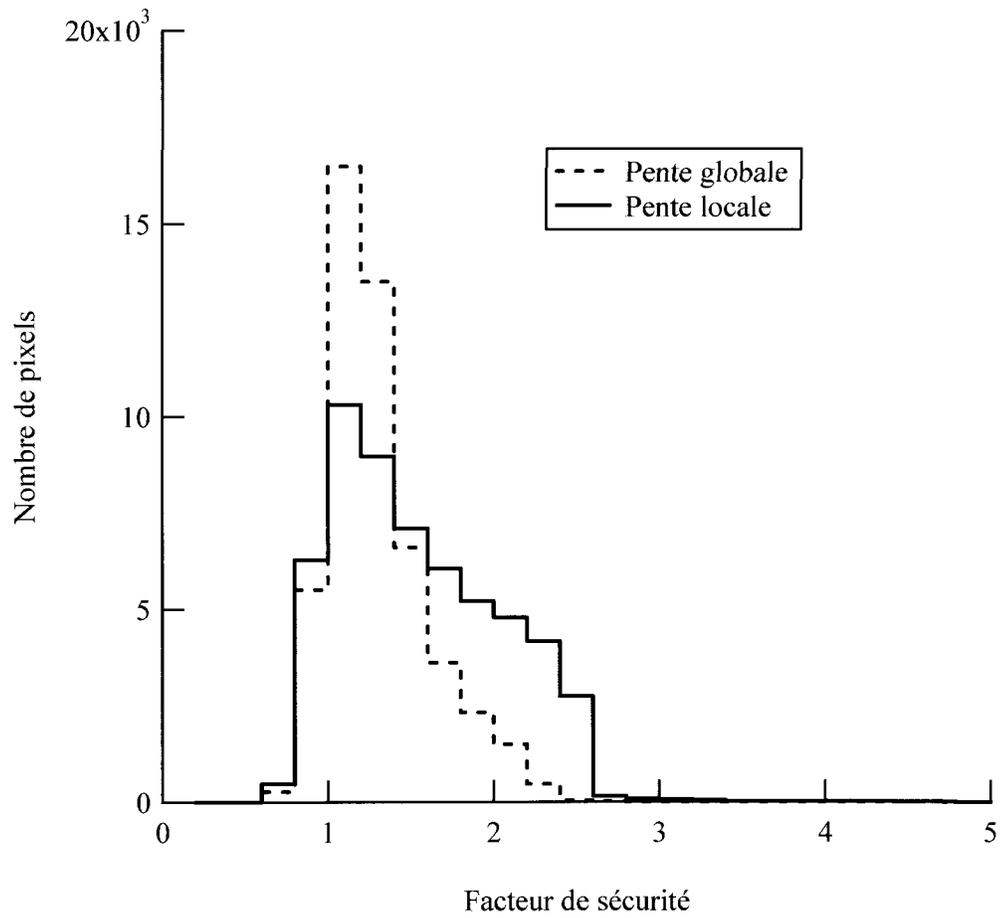


Figure 5.8 : Histogramme de fréquence des facteurs de sécurité calculés à partir des pentes définies localement et globalement, secteur des Bouleaux.

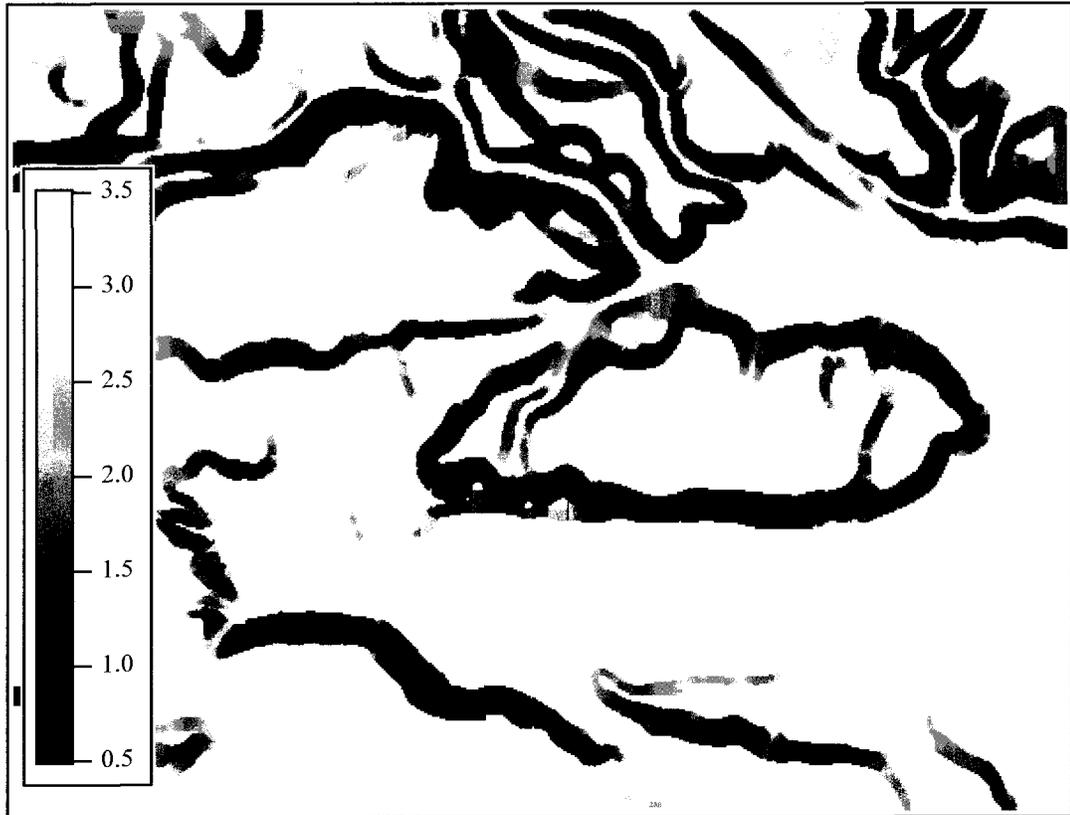


Figure 5.9 : Carte des facteurs de sécurité calculés à partir des valeurs des pentes définies globalement, secteur des Bouleaux. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

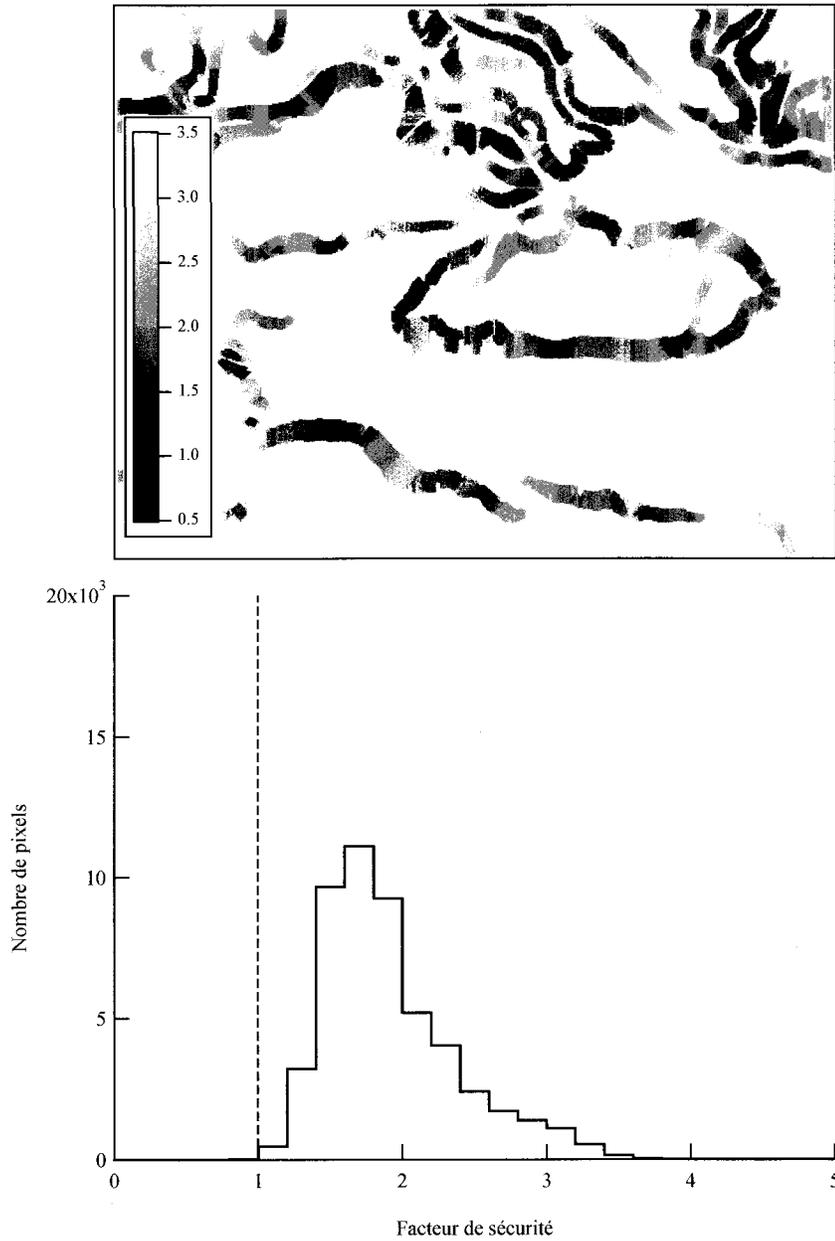


Figure 5.10 : Carte des facteurs de sécurité obtenus pour une valeur du facteur  $m$  égale à 0.25 en utilisant la pente globale, et histogramme de fréquence des facteurs de sécurité, secteur des Bouleaux. La ligne pointillée représente la valeur unitaire du facteur de sécurité. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

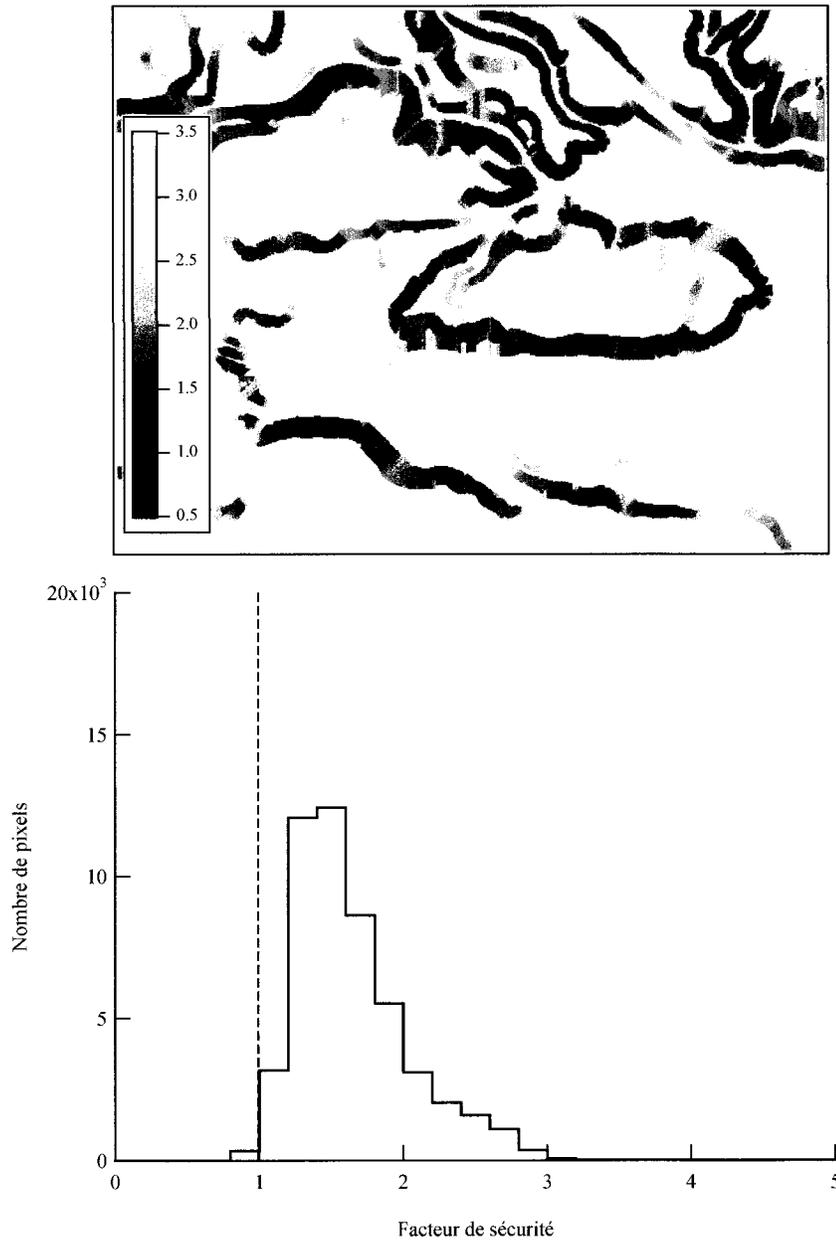


Figure 5.11 : Carte des facteurs de sécurité obtenus pour une valeur du facteur  $m$  égale à 0.50 en utilisant la pente globale, et histogramme de fréquence des facteurs de sécurité, secteur des Bouleaux. La ligne pointillée représente la valeur unitaire du facteur de sécurité. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

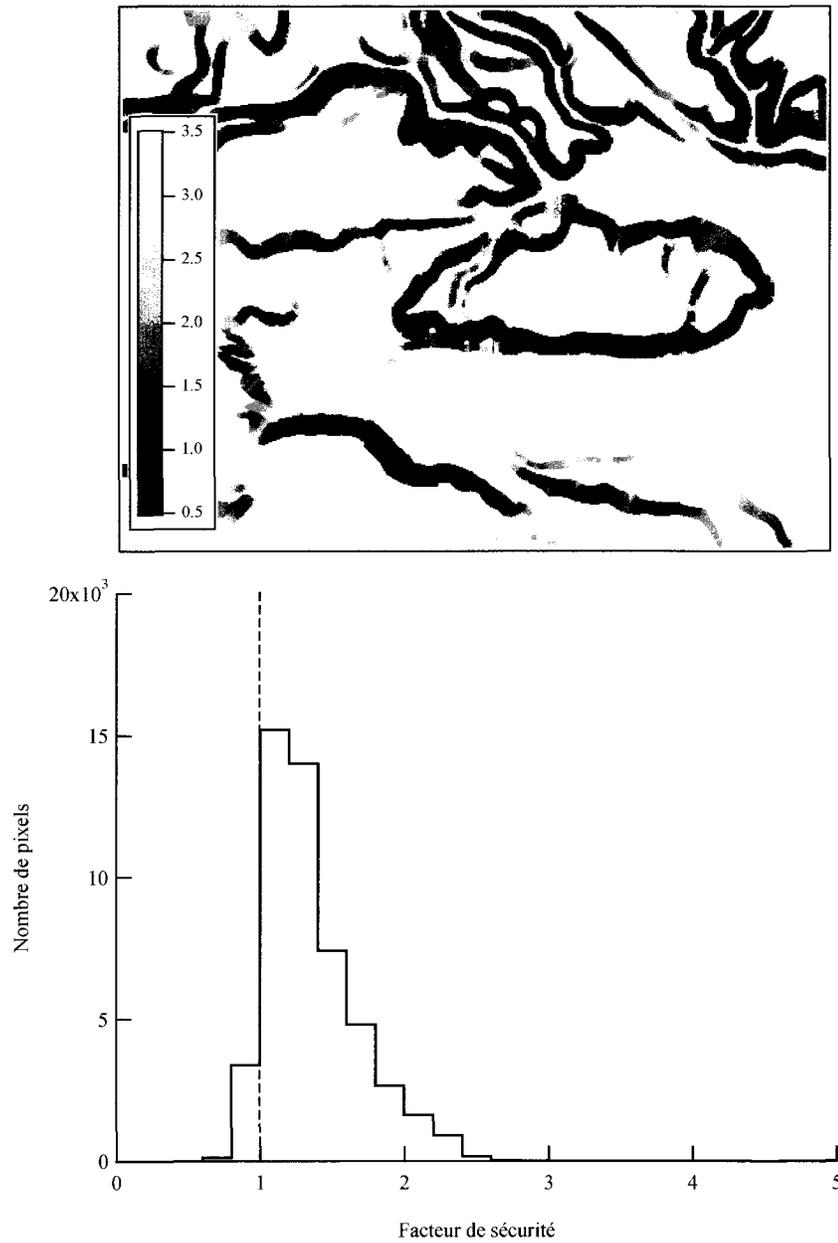


Figure 5.12 : Carte des facteurs de sécurité obtenus pour une valeur du facteur  $m$  égale à 0.75 en utilisant la pente globale, et histogramme de fréquence des facteurs de sécurité, secteur des Bouleaux. La ligne pointillée représente la valeur unitaire du facteur de sécurité. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

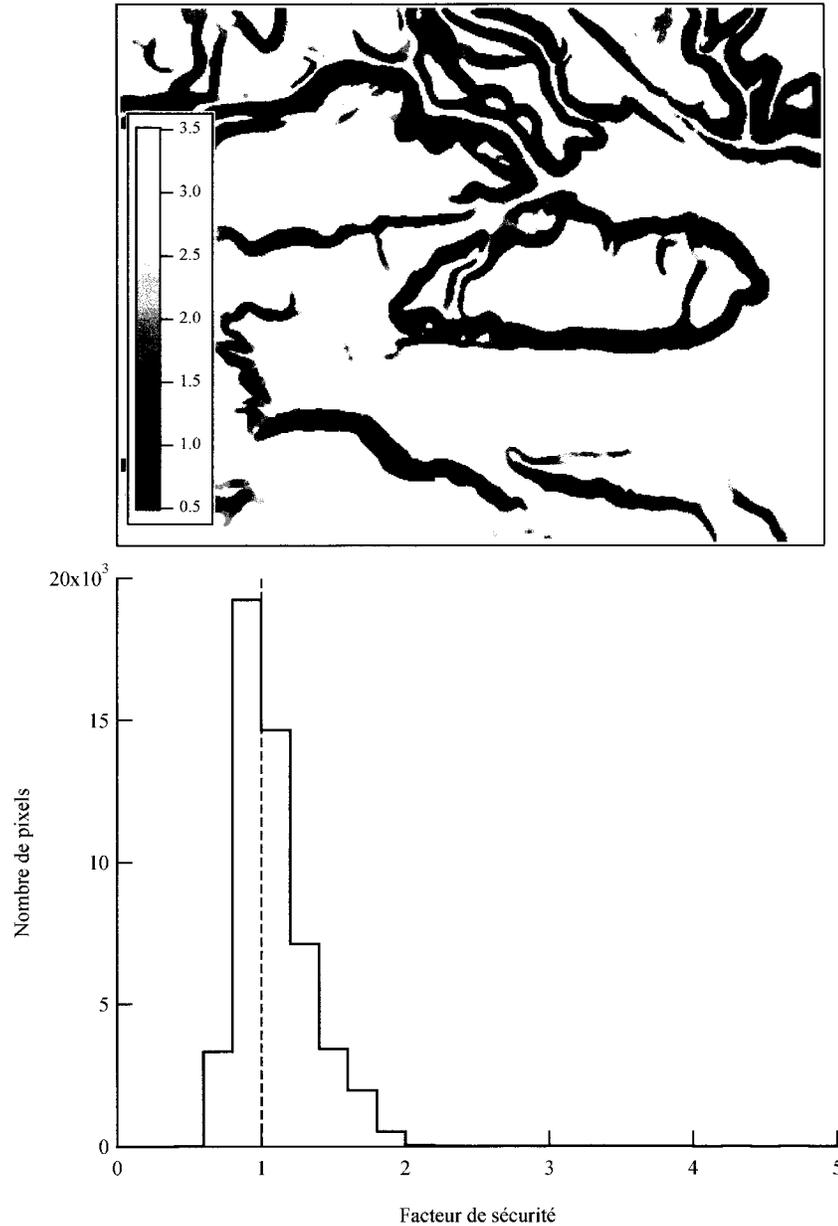


Figure 5.13 : Carte des facteurs de sécurité obtenus pour une valeur du facteur  $m$  égale à 1.00 en utilisant la pente globale, et histogramme de fréquence des facteurs de sécurité, secteur des Bouleaux. La ligne pointillée représente la valeur unitaire du facteur de sécurité. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

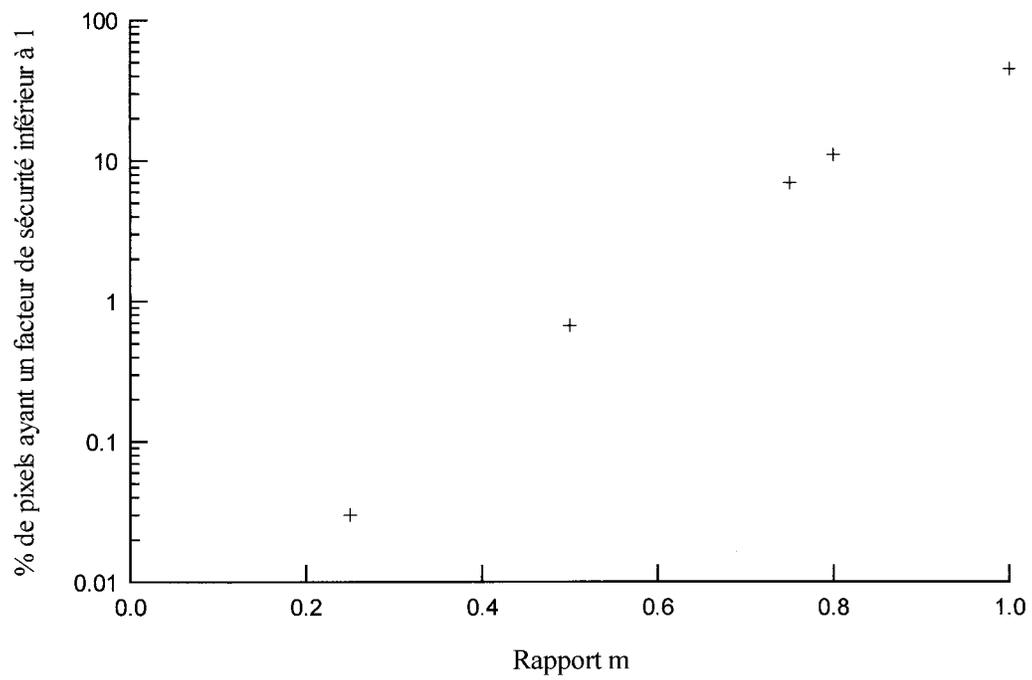


Figure 5.14 : Variation du pourcentage de pixels ayant un facteur de sécurité inférieur à un en fonction du rapport  $m$ , secteur des Bouleaux.

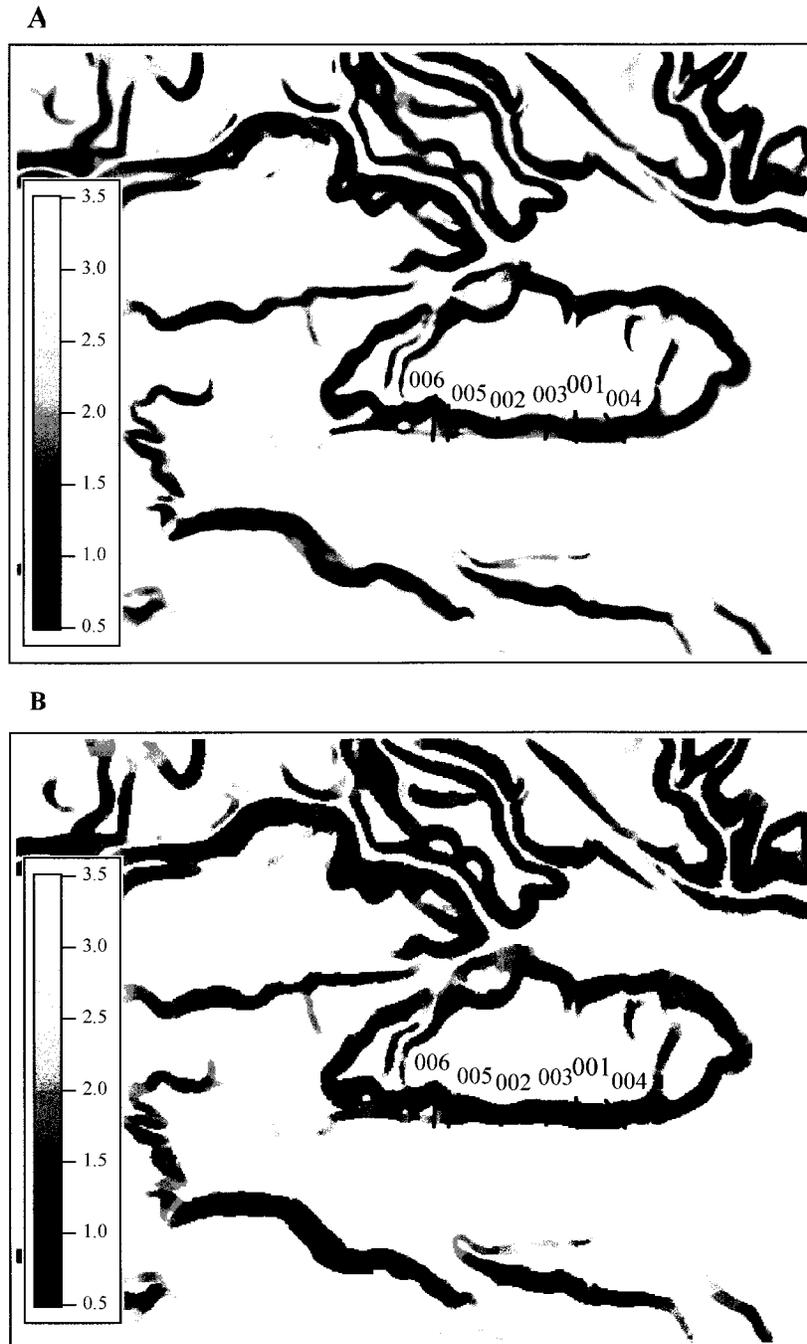


Figure 5.15 : Profils d'arpentage superposés aux cartes des facteurs de sécurité calculés avec des valeurs de pentes locales (A) et de pentes globales (B), secteur des Bouleaux. Les dimensions du secteur sont d'environ 1100 x 850 m.

## **CHAPITRE 6 : ÉVALUATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA « GLISSEMENT DE TERRAIN » PAR LA MÉTHODE DES INDICES DE SURFACE**

Dans ce chapitre, une nouvelle approche d'évaluation et de cartographie quantitative de l'aléa est proposée pour les talus argileux du secteur de Ville de La Baie. Cette approche repose sur le cadre général d'analyse du risque présenté à la figure 2.1. Pour ce faire, seulement quelques composantes du cadre général sont considérées dans l'analyse selon les données disponibles pour le secteur d'étude. Ces données sont issues des connaissances régionales d'ingénieurs du MTQ et de chercheurs du CGQ sur les caractéristiques quantitatives, principalement géométriques, des talus et des glissements de terrain du secteur.

### **6.1 Cadre général**

La procédure générale d'évaluation de l'aléa et du risque de glissement de terrain repose sur la prise en compte d'une série de composantes présentées dans la revue de littérature (chapitre 1), notamment le danger, les facteurs discriminants de l'instabilité, l'aléa, les éléments exposés, la vulnérabilité, et le risque. La relation entre ces différentes composantes a été illustrée à la figure 2.1. La procédure suggérée dans ce chapitre repose sur ce cadre général d'analyse (figure 6.1).

La première étape de cette procédure consiste à identifier et à caractériser le danger ainsi que les facteurs discriminants de l'instabilité à l'intérieur du secteur d'étude (sections 6.2 et 6.3). Pour ce faire, certaines caractéristiques géométriques, géologiques et géomorphologiques des glissements de terrain et des talus sont décrites de façon quantitative. Dans le secteur de Ville de La Baie, celles-ci ont été caractérisées suite à des travaux de terrain réalisés par le ministère des transports du Québec (MTQ) et le Centre géoscientifique de Québec (CGQ) entre 1996 et 2000.

La deuxième étape consiste à évaluer et à cartographier l'aléa « glissement de terrain » à partir des caractéristiques décrites à l'étape précédente (section 6.4). L'aléa est évalué en terme de probabilité en tenant compte, d'une part, des composantes spatiale et temporelle, et d'autre part, des phases de rupture et de post-rupture des glissements de terrain. La probabilité spatiale de rupture est obtenue à partir d'un indice de surface normalisant la surface affectée par les glissements de terrain à la surface totale des talus argileux. La probabilité de post-rupture est évaluée à partir des données disponibles sur l'étalement des débris à la base des talus. Deux approches d'évaluation de l'aléa sont suivies; la première évalue l'aléa global pour l'ensemble des talus de la région, tandis que la seconde évalue l'aléa spécifiquement pour différentes classes de pente.

Les étapes suivantes (sections 6.5 et 6.6) ont pour objectif de présenter un exemple d'application de l'évaluation de l'aléa. Finalement, et comme exercice d'application, le risque que représentent les glissements de terrain est évalué en tenant compte de la présence des éléments exposés au pied des talus. Les niveaux de risques ainsi obtenus sont comparés à certains critères d'acceptabilité proposés dans la littérature.

## **6.2 Caractérisation du danger à l'intérieur du secteur d'étude**

### **6.2.1 Typologie**

Dans cette étude, la méthode d'évaluation de l'aléa est développée pour les glissements de terrain les plus fréquents dans le secteur de Ville de La Baie, c'est-à-dire les glissements superficiels.

Une description de la typologie des glissements de terrain superficiels rencontrés dans le secteur d'étude a été présentée à la section 3.3 de ce travail; cette section ne revient donc pas sur ce sujet.

## **6.2.2 Intensité**

L'intensité est définie par une série de paramètres qui déterminent la capacité du phénomène de glissement de terrain à causer des dommages (Hungry, 1997). Selon le type de glissement de terrain, plusieurs paramètres d'intensité peuvent être considérés tels que la vitesse du mouvement, les pressions d'impact des débris, la distance d'étalement des débris, la distance de rétrogression, l'épaisseur des débris, etc. La prise en compte de ces paramètres permet d'évaluer l'aléa « glissement de terrain » pour différents niveaux d'intensité du phénomène.

La procédure proposée tient compte de deux paramètres d'intensité : la superficie des glissements de terrain et la distance d'étalement des débris à la base des talus. Ces paramètres sont décrits aux sections suivantes.

### **6.2.2.1 Superficie des glissements de terrain**

La superficie des glissements de terrain peut être utilisée pour caractériser l'intensité du phénomène lors de la phase de rupture. Pour la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, la superficie de plusieurs glissements de terrain superficiels s'étant produits dans cette région a été mesurée. Cette information a permis de produire le graphique de la fréquence et de la fréquence cumulée de la superficie des glissements de terrain, présenté à la figure 6.2 (Perret et Bégin, 1997).

Pour évaluer l'aléa « glissement de terrain », deux superficies distinctes sont retenues afin de tenir compte de la variabilité du phénomène, c'est-à-dire 100 m<sup>2</sup> et 350 m<sup>2</sup>. La première inclut 50% des glissements de terrain pour lesquels des mesures ont été prises, tandis que la seconde inclut 90% des glissements et correspond à la superficie « quasi-maximale » des glissements de terrain observés dans la région.

### **6.2.2.2 Étalement des débris et rétrogression**

La distance d'étalement des débris des glissements de terrain peut être utilisée pour caractériser l'intensité du phénomène, associée cette fois-ci à la phase de post-rupture. Dans le cas des glissements superficiels à l'intérieur du secteur d'étude, la rétrogression est quasi-inexistante.

Par contre, l'étalement des débris à la base des talus est notable dans le secteur. Ce phénomène est relativement complexe à caractériser puisqu'il dépend à la fois des propriétés physiques des matériaux mobilisés, de la géométrie des talus et de la zone d'étalement. Dans cette étude, seule une caractéristique géométrique est utilisée pour décrire la distance d'étalement des débris à la base des talus, la hauteur. Cet étalement, en fonction de la hauteur, a été mesuré pour une centaine de glissements de terrain situés dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Perret et Bégin, 1997). Cette information a permis d'obtenir la fréquence, la fréquence cumulée et la fréquence cumulée inverse de la distance d'étalement des débris exprimées en fonction de la hauteur des talus (figure 6.3).

La figure 6.3 montre que la fréquence d'étalement des débris diminue en fonction de la distance par rapport à la base des talus pour atteindre une valeur presque nulle à une distance de deux fois la hauteur des talus.

### **6.3 Caractérisation des facteurs discriminants de l'instabilité dans le secteur d'étude**

La détermination des facteurs discriminants de l'instabilité consiste à sélectionner parmi plusieurs données disponibles celles qui sont vraiment déterminantes pour la stabilité des talus. Ces facteurs sont classifiés en facteurs révélateurs, prédisposants et aggravants ou déclencheurs. La caractérisation de ces trois types de facteur à l'intérieur du secteur de Ville de La Baie est présentée dans les sections qui suivent.

#### **6.3.1 Facteurs révélateurs**

À l'échelle régionale, les facteurs révélateurs de l'instabilité correspondent généralement aux cicatrices d'anciens glissements de terrain observés à l'intérieur de la région considérée. Pour le secteur de Ville de La Baie, la distribution spatiale et la fréquence des glissements de terrain historiques observés dans les dépôts argileux sont présentées à la section 6.3.1.1.

Le contexte géomorphologique des talus ayant été affectés par des glissements de terrain peut être caractérisé par deux paramètres de forme, la hauteur et la pente des talus. Pour Ville de La Baie, ces paramètres sont caractérisés à la section 6.3.1.2.

#### **6.3.1.1 Localisation et fréquence des glissements de terrain historiques**

Pour le secteur sud du secteur de Ville de La Baie, une interprétation stéréoscopique multodate de photographies aériennes disponibles pour différentes années comprises entre 1927 et 2000 a été réalisée (Perret, 1999; document interne CGQ) afin de cartographier les glissements de terrain (figure 3.6). Le nombre de glissement de terrain identifié pour chacune des années est présenté au tableau 6.1. Pour certaines années telles que 1964, 1976 et 1996, le nombre de glissements de terrain identifié est relativement élevé.

Selon les experts du MTQ et de la CGQ, et les observations des inspecteurs municipaux, le nombre de glissements pouvant être attribué aux années n'ayant pas fait l'objet de photo-interprétation serait de l'ordre de deux. À partir de cette information et des données présentées au tableau 6.1, le nombre annuel de glissement de terrain entre 1927 et 2000 est porté en graphique (figure 6.4). À partir de ces données, la moyenne annuelle de glissement de terrain pour le secteur sud du secteur de Ville de La Baie est estimée à quatre.

#### **6.3.1.2 Pente et hauteur des talus déstabilisés**

Les talus ayant été affectés par des glissements de terrain peuvent être caractérisés par un couple hauteur-pente correspondant à la géométrie du talus avant la rupture. En pratique,

ces deux paramètres sont obtenus au voisinage immédiat du talus affecté par le glissement, pour des sections jugées représentatives du talus avant la rupture.

La figure 6.5 illustre les valeurs de hauteur et de pente des glissements de terrain non rétrogressif et peu profonds observés dans le secteur de Ville de La Baie (Perret et Bégin, 1997). Les observations de terrain indiquent que dans ce secteur, aucun talus de pente inférieure à  $22^\circ$  et de hauteur inférieure à 5 m n'a été affecté par un glissement de terrain déclenché par un phénomène naturel.

Les informations de la figure 6.5 permettent de calculer la fréquence et la fréquence cumulée du nombre de glissements de terrain en fonction de la pente et de la hauteur des talus. La figure 6.6 illustre celles calculées en fonction de la pente. Celles calculées en fonction de la hauteur ne sont pas présentées puisqu'elles ne seront pas utilisées dans les calculs de l'aléa. La figure 6.6 permet de constater que le nombre de glissements de terrain observé augmente avec la pente jusqu'à une valeur maximale de  $34^\circ$  environ. À partir de cette valeur, la diminution s'explique simplement par le fait que les talus de pente plus forte sont de moins en moins nombreux puisqu'ils sont de moins en moins stables et sont donc moins observés sur le terrain.

### **6.3.2 Facteurs prédisposants**

Les facteurs prédisposants sont des caractéristiques de la région qui déterminent le comportement des talus. Pour le secteur de Ville de la Baie, la géologie et la géométrie des talus sont les facteurs prédisposants à l'instabilité considérés dans cette étude.

Dans le secteur d'étude, ce sont les dépôts argileux qui sont les plus susceptibles d'être affectés par des glissements de terrain superficiels. Pour cette raison, seulement les talus argileux sont considérés dans la procédure d'évaluation de l'aléa.

La figure 6.5 a montré que les glissements de terrain affectent les talus ayant des conditions géométriques particulières. Ainsi, la géométrie, c'est-à-dire la pente et la

hauteur des talus, représente aussi un facteur prédisposant à l'instabilité dans le secteur de Ville de La Baie.

### **6.3.2.1 Localisation et superficie des talus argileux**

Dans le secteur d'étude, les talus composés de matériaux argileux qui possèdent une pente supérieure à 22° et une hauteur supérieure à 5 mètres sont considérés potentiellement instables. Ces conditions d'instabilité ont été établies suite à l'inventaire des glissements de terrain réalisé par le GGQ après les événements de juillet 1996 (figure 6.5).

Les limites des talus potentiellement instables du secteur de Ville de La Baie ont été identifiées manuellement à partir de cartes topographiques à l'échelle 1: 1 000 et 1: 2 000 pour lesquelles l'équidistance entre les courbes de niveau est de 2 m (données communiquées par le MTQ, 2000). Ces limites ont ensuite été numérisées à l'aide d'un logiciel de dessin assisté par ordinateur (DAO) et importées à l'intérieur d'un SIG. La figure 6.7 illustre les limites des talus potentiellement instables du secteur sud du secteur de Ville de La Baie.

Les limites des talus potentiellement instables identifiées à la figure 6.7 définissent des polygones dont l'aire peut être calculée automatiquement. Pour le secteur de Ville de La Baie, l'ensemble des talus occupe une superficie, en projection horizontale, d'environ 8.79 km<sup>2</sup>.

### **6.3.2.2 Pente globale et hauteur des talus**

La caractérisation du contexte géomorphologique des talus affectés par les glissements de terrain du secteur d'étude, réalisée à la section 6.3.2.1, a montré que la géométrie des talus (pente et hauteur) représente un facteur prédisposant à l'instabilité. De plus, les travaux de Lebus et Rissman (1983) et l'expertise du MTQ montrent aussi que la stabilité des talus argileux au Québec peut être appréciée à l'échelle régionale en ne considérant

que la pente et la hauteur des talus. Ces paramètres sont caractérisés à l'intérieur du secteur d'étude.

La superficie en projection horizontale occupée pour différentes valeurs de pente ou de hauteur peut être calculée à partir des cartes de la pente globale et de la hauteur totale des talus obtenues par des analyses morphométriques au chapitre 4 (figures 4.16 et 4.17). Pour cela, le nombre de pixels appartenant à chaque valeur de pente ou de hauteur est multiplié par la superficie unitaire d'un pixel, qui est ici de 4 m<sup>2</sup>. La distribution de la superficie des talus en fonction de ces paramètres peut alors être obtenue. La distribution de la superficie des talus en fonction de la pente globale est présentée à la figure 6.8. Celle de la hauteur n'est pas présentée puisqu'elle n'est pas utilisée dans les calculs de l'aléa.

Cette distribution calculée à partir des données du secteur des Bouleaux reflète la morphologie de ce secteur. Il est également raisonnable d'utiliser cette distribution, pour l'ensemble du secteur de Ville de La Baie puisque la physiographie de ces deux secteurs est à peu près comparable.

### **6.3.3 Facteurs déclencheurs**

Dans la région d'étude, les principaux facteurs déclencheurs de glissement de terrain superficiels sont les pluies intenses et la fonte nivale, et dans une bien moindre mesure, les séismes. Les facteurs hydro-météorologiques augmentent les pressions d'eau dans le sol, diminuant ainsi sa résistance au cisaillement. Un grand nombre de données sur ces agents déclencheurs est nécessaire pour établir un lien entre ces derniers et l'initiation de la rupture. Ces relations de cause à effet sont très difficiles à établir comme l'ont montré Cartier et Pouget (1988), surtout dans un environnement climatique de type nordique où les fontes nivales, le dégel du sol en surface et les précipitations printanières peuvent interférer. L'impact des séismes est un peu plus facile à modéliser (voir par exemple van Westen, 1993). Cependant, comme le rôle des séismes est a priori marginal par rapport au rôle des facteurs hydro-météorologiques, il n'est sans doute pas vraiment utile d'en tenir

compte ici. Pour ces raisons, nous ne considérons donc pas les facteurs de déclenchement dans la quantification de l'aléa.

## 6.4 Évaluation et cartographie de l'aléa

### 6.4.1 Méthodologie

La procédure d'évaluation quantitative de l'aléa « glissement de terrain » proposée ici consiste à déterminer la probabilité qu'un glissement de terrain se produise pour une période de temps donnée et pour un secteur donné.

Cette procédure tient compte des phases de rupture et de post-rupture du glissement de terrain. Les calculs de probabilité se divisent donc en deux principales composantes (figure 6.9); la probabilité qu'une rupture se produise ( $P_r$ ), et la probabilité que les débris atteignent une distance  $d$  à la base des talus ( $P_{p-r}$ ). La combinaison de ces deux composantes donne l'expression générale de l'aléa ( $A$ ) suivante (par exemple Hungr, 1997) :

$$A = P_r \times P_{p-r} \quad (\text{expression 6.1})$$

Dans cette expression, ainsi que dans les expressions qui suivent, la multiplication est utilisée puisque les termes sont conditionnels l'un à l'autre, ce qui correspond à une opération logique de type « et ». Les valeurs de probabilité associées aux phases de rupture et de post-rupture, et par le fait même celles de l'aléa, peuvent varier entre zéro et un ( $0 \leq P \leq 1$ ), où zéro représente un événement impossible et un représente un événement certain.

#### 6.4.1.1 Phase de rupture ( $P_r$ )

L'évaluation de la probabilité associée à la phase de rupture est basée sur la proportion de la superficie des talus affectée par les glissements de terrain à l'intérieur du secteur considéré. Cette probabilité est calculée par un indice de surface qui normalise la superficie des talus affectée par les glissements de terrain à la superficie totale des talus de la région pour une période de temps donnée. Il est à noter que dans ce cas et dans les cas suivants, le terme talus fait référence aux talus dits « potentiellement instables » tel que décrit à la section 6.3.2.1.

La probabilité associée à la phase de rupture est calculée selon l'expression suivante :

$$P_r = \left( \frac{S_{GT}}{S_{TOT}} \right) \times \left( \frac{N_{GT}}{N_{an}} \right) \quad (\text{expression 6.2})$$

où :

$S_{GT}$  : superficie unitaire d'un glissement de terrain;

$S_{TOT}$  : superficie totale en projection horizontale des talus du secteur considéré;

$N_{GT}$  : nombre de glissements de terrain observé pour une période de temps considérée;

$N_{an}$  : période de temps considérée.

Le premier terme de l'expression 6.2 ( $S_{GT}/S_{TOT}$ ), l'indice de surface, correspond à la composante spatiale de la probabilité de rupture. Dans ce terme, la superficie des glissements de terrain permet de tenir compte de l'intensité du phénomène associé à la phase de rupture tandis que la superficie totale des talus permet de considérer leur représentativité à l'intérieur du secteur considéré.

Le second terme de l'expression 6.2 ( $N_{GT}/N_{an}$ ) correspond à la composante temporelle de la probabilité de rupture.

Par contre, l'expression 6.2 ne tient pas compte explicitement de la récurrence dans le temps d'un glissement de terrain d'une intensité donnée. Même si, par la suite, les calculs se font en utilisant deux superficies différentes, on fait l'hypothèse que la probabilité

temporelle qu'un glissement de terrain se produise est identique quelle que soit sa superficie. L'utilisation de deux superficies différentes ne sert en fait qu'à donner une idée de la plage de probabilités dans laquelle se situe l'aléa pour le type de glissement de terrain retenu.

#### **6.4.1.2 Phase de post-rupture ( $P_{p-r}$ )**

La probabilité associée à la phase de post-rupture fait référence à l'occurrence spatiale du phénomène de glissement de terrain à la base des talus. Cette probabilité correspond, dans cette étude, à la probabilité que l'étalement des débris d'un glissement de terrain atteigne une certaine distance à la base des talus. Elle ne tient pas compte de l'évolution de l'épaisseur des débris en fonction de la distance au pied du talus.

Pour le secteur de Ville de La Baie, la probabilité associée à la phase de post-rupture est obtenue à partir du graphique de la fréquence du rapport de la distance d'étalement des débris à la hauteur des talus ( $D/H$ ) présenté à la figure 6.3. La probabilité que les débris atteignent différentes distances à la base des talus est estimée à partir de l'inverse de la fréquence cumulée. Cette probabilité diminue rapidement en s'éloignant de la base des talus pour atteindre une valeur presque nulle à une distance égale à deux fois la hauteur des talus.

Pour estimer la probabilité associée à la phase de post-rupture, la portion de terrain comprise entre le pied du talus et une distance égale à deux fois la hauteur du talus est scindée en quatre bandes de terrain distinctes. Les limites de ces bandes et leurs valeurs de probabilité de post-rupture sont présentées au tableau 6.2 et illustrées à la figure 6.10. La probabilité que les débris atteignent une certaine distance au pied du talus a été évaluée pour les quatre bandes de terrain en utilisant la valeur maximale de la limite la plus près du talus. Pour la bande située directement à la base des talus, la probabilité associée à la phase de post-rupture ( $P_{p-r}$ ) est de un puisque l'hypothèse est faite que tous les débris des glissements de terrain se rendent au moins à la base des talus. Dans ce cas,  $A=P_r$ .

Les valeurs de probabilité de post-rupture associées aux quatre bandes de terrain peuvent être cartographiées à la base des talus en fonction de la distance par rapport aux talus. Puisque cette distance est exprimée en fonction de la hauteur des talus, les limites des bandes sont identifiées à l'intérieur du secteur des Bouleaux pour lequel la carte des hauteurs totales des talus est disponible (figure 4.17). Ces limites sont identifiées par un module de calcul greffé au SIG (Perret et Larocque, 2000; document interne, CGQ). Pour ce faire, à chaque point d'arrivée des chemins de plus grande pente, le chemin est poursuivi dans la même direction de pixel en pixel. La distance parcourue, évaluée en nombre de pixel, dépend de la hauteur associée au chemin de plus grande pente considéré. L'ensemble des extensions des chemins de plus grande pente forment les bandes de terrain à la base des talus. Les résultats obtenus pour la butte des Bouleaux, située à l'intérieur du secteur des Bouleaux, sont illustrés à la figure 6.11. Chacune des bandes de terrain correspond à des polygones pour lesquels une valeur de probabilité associée à la phase de post-rupture a été attribuée.

#### 6.4.1.3 Évaluation de l'aléa en intégrant les phases de rupture et de post-rupture

L'aléa « glissement de terrain » est évalué en combinant les probabilités associées aux phases de rupture et de post-rupture selon l'expression suivante :

$$P = \left[ \left( \frac{S_{GT}}{S_{TOT}} \right) \times \left( \frac{N_{GT}}{N_{an}} \right) \right] \times [P_{p-r}] \quad \text{expression 6.3}$$

À partir de cette équation, deux procédures d'évaluation de l'aléa sont proposées :

1. Aléa global.
2. Aléa spécifique par classes de pente.

#### 6.4.2 Aléa global

La première procédure évalue l'aléa en considérant tous les glissements de terrain et l'ensemble des talus du secteur d'étude, quel que soit leur pente. Cette procédure fournit donc une indication de l'aléa global pour l'ensemble du secteur d'étude.

#### 6.4.2.1 Probabilité de rupture

La probabilité associée à la phase de rupture est calculée par l'expression 6.2. Les données utilisées dans cette expression (sections 6.2 et 6.3) sont les suivantes :

Nombre de glissement de terrain ( $N_{GT}$ ) =	196
Nombre total d'années considérées ( $N_{an}$ ) =	51
Superficie, en projection horizontale, des talus ( $S_{TOT}$ ) =	8.79 km <sup>2</sup>
Superficie d'un glissement de terrain ( $S_{GT}$ ) =	100 m <sup>2</sup> , 350 m <sup>2</sup>

La probabilité de rupture est évaluée pour deux superficies de glissement de terrain de façon à tenir compte de l'intensité du danger associée à la phase de rupture. En utilisant des superficies de glissement de terrain de 100 et 350 m<sup>2</sup>, les probabilités annuelles de rupture obtenues pour le secteur de Ville de La Baie sont respectivement de  $4.3 \times 10^{-5}$  et  $2.0 \times 10^{-4}$ .

#### 6.4.2.2 Probabilité de post-rupture

Les probabilités associées à la phase de post-rupture correspondent à celles évaluées pour les quatre bandes de terrain situées à la base des talus, telles qu'identifiées à la section 6.4.1.2 (figure 6.11).

#### 6.4.2.3 Aléa global

Les résultats des calculs de l'aléa global obtenus pour les talus et les quatre bandes sont présentés au tableau 6.3. En considérant une superficie de glissement de terrain de 100 m<sup>2</sup>, les valeurs d'aléa global diminuent progressivement en s'éloignant de la base des

talus en prenant des valeurs comprises entre de  $4.3 \times 10^{-5}$  et  $0.4 \times 10^{-5}$ . Pour une superficie de  $350 \text{ m}^2$ , l'aléa global varie de  $2 \times 10^{-4}$  à  $0.2 \times 10^{-4}$  en s'éloignant du pied du talus. Ces variations de l'aléa global en fonction de la distance par rapport à la base des talus et de la superficie des glissements de terrain sont illustrées à la figure 6.12.

#### **6.4.2.4 Cartographie de l'aléa global**

L'aléa global évalué à la section précédente en considérant une superficie de glissement de terrain de  $350 \text{ m}^2$  est cartographié au niveau de la butte des Bouleaux. Il est cartographié pour les talus d'une part, et pour les quatre bandes de terrain situées à la base des talus d'autre part (figure 6.13).

Cette figure illustre la diminution de l'aléa global en s'éloignant de la base des talus. Par contre, et par définition, l'aléa est constant même si la pente des talus varie à l'intérieur même des talus. Par conséquent, l'aléa est surestimé dans les secteurs où la pente est faible et sous-estimé dans le cas contraire.

#### **6.4.3 Aléa spécifique par classes de pente**

Puisque la stabilité des talus du secteur de Ville de La Baie est contrôlée en grande partie par leur pente, cette procédure évalue l'aléa en fonction de cette caractéristique géométrique des talus. L'aléa spécifique est évalué pour cinq classes de pente dont les limites sont présentées au tableau 6.4.

Pour évaluer l'aléa spécifique, la probabilité associée à la phase de rupture est d'abord calculée pour chacune des classes de pente. Les résultats sont ensuite combinés aux probabilités associées à la phase de post-rupture de façon à évaluer l'aléa spécifique. Les résultats sont ensuite cartographiés à l'aide des SIG.

##### **6.4.3.1 Probabilité de rupture**

Pour chacune des classes de pente, la probabilité associée à la phase de rupture est évaluée en considérant le nombre de glissements de terrain appartenant à chaque classe de pente et la représentativité de ces classes à l'intérieur du secteur d'étude. L'expression utilisée pour évaluer cette probabilité pour chaque classe de pente, tirée de l'expression générale 6.2, est la suivante :

$$P_{ri} = \left( \frac{S_{GT}}{S_{DBi}} \right) \times \left( \frac{S_{DBi}}{S_{LBi}} \right) \times \left( \frac{N_{GTi}}{N_{an}} \right) \quad \text{expression 6.4}$$

où :

- $i$  : classe de pente;
- $P_{ri}$  : probabilité de rupture associée à la classe  $i$ ;
- $S_{DBi}$  : superficie en projection horizontale des talus occupée par la classe  $i$  à l'intérieur du secteur des Bouleaux;
- $S_{LBi}$  : superficie en projection horizontale des talus occupée par la classe  $i$  à l'intérieur du secteur sud du secteur de Ville de La Baie;
- $N_{GTi}$  : nombre de glissements de terrain appartenant à la classe  $i$  répertoriés pendant la période  $N_{an}$ .

Selon l'expression 6.4, deux paramètres doivent être évalués pour chacune des classes de pente, c'est-à-dire le nombre de glissements de terrain appartenant à la classe considérée et la superficie des talus occupée par cette classe.

#### Nombre de glissement de terrain appartenant à la classe $i$ ( $N_{GTi}$ )

Le nombre de glissements de terrain appartenant à chaque classe de pente ( $N_{GTi}$ ) est obtenu à partir du graphique de la fréquence et de la fréquence cumulée du nombre de glissements en fonction de la pente (figure 6.6). À partir de la courbe de la fréquence cumulée,  $N_{GTi}$  est estimé par l'expression suivante :

$$N_{GTi} = [\Delta f_{ci}]_N \times N_{TOT} \quad \text{(expression 6.5)}$$

où :

$[\Delta f_{ci}]_N$  : variation de la fréquence cumulée du nombre de glissement de terrain en fonction de la pente pour une classe de pente  $i$ ;

$N_{TOT}$  : nombre total de glissement de terrain observé à l'intérieur de la région d'étude pour le nombre d'années considérées.

Le nombre de glissement de terrain évalué pour les cinq classes de pente est présenté au tableau 6.5.

Superficie en projection horizontale des talus occupée par la classe  $i$  ( $S_{DBi}$  et  $S_{LBi}$ )

La superficie des talus occupée en projection horizontale par chacune des classes de pente pour le secteur des Bouleaux ( $S_{DBi}$ ) est obtenue à partir du graphique de la fréquence et de la fréquence cumulée de la superficie des talus en fonction de la pente (figure 6.8).  $S_{DBi}$  est estimée par l'expression suivante à partir de la courbe de la fréquence cumulée:

$$S_{DBi} = [\Delta f_{ci}]_S \times S_{TOT\ DB} \quad (\text{expression 6.6})$$

où :

$[\Delta f_{ci}]_S$  : variation de la fréquence cumulée de la superficie des talus occupée en fonction de la pente pour une classe de pente  $i$ ;

$S_{TOT\ DB}$  : superficie totale des talus en projection horizontale des talus du secteur des Bouleaux ( $0.18 \text{ km}^2$ ).

La superficie des talus occupée pour chacune des classes de pente pour le secteur de Ville de La Baie est calculée selon l'expression suivante, en faisant l'hypothèse que la distribution observée pour le secteur Des Bouleaux est identique sur l'ensemble du secteur sud de Ville de La Baie :

$$S_{LBi} = \left( \frac{S_{DBi}}{S_{TOT\ DB}} \right) \times S_{TOT\ LB} \quad \text{expression 6.7}$$

$S_{TOTLB}$  : superficie totale des talus en projection horizontale des talus du secteur sud du secteur de Ville de La Baie (8.79 km<sup>2</sup>).

Les superficies des talus occupées par les cinq classes de pente pour le secteur des Bouleaux et le secteur de Ville de La Baie sont présentées au tableau 6.5.

À partir des données du tableau 6.5, la probabilité de rupture est calculée pour les cinq classes de pente par l'expression 6.4 en considérant deux superficies de glissement de terrain : 100 m<sup>2</sup> et 350 m<sup>2</sup>. Les résultats, présentés au tableau 6.6 et à la figure 6.14, montrent une augmentation de la probabilité de rupture lorsque la pente des talus est de plus en plus forte. Ces données sont cartographiées à la figure 6.15.

#### **6.4.3.2 Probabilité de post-rupture**

Les probabilités associées à la phase de post-rupture sont identiques à celles indiquées à la figure 6.11 (section 6.4.1.2), puisque la pente du talus n'est pas considérée.

#### **6.4.3.3 Aléa spécifique**

Pour évaluer l'aléa spécifique par classes de pente, chacune des valeurs de probabilité de rupture correspondantes aux différentes classes de pente sont multipliées par les probabilités de post-rupture associées aux quatre bandes de terrain situées à la base des talus. L'aléa spécifique est donc fonction de la pente, ainsi que de la distance relative à la base des talus. Les résultats obtenus en considérant une superficie de glissement de terrain de 100 m<sup>2</sup> sont présentés au tableau 6.7, tandis que le tableau 6.8 présente ceux calculés pour une superficie de 350 m<sup>2</sup>.

Les figures 6.16 et 6.17 illustrent la variation l'aléa spécifique évalué avec des superficies de glissement de terrain de 100 m<sup>2</sup> et 350 m<sup>2</sup>. La ligne pointillée représente les résultats obtenus pour l'aléa global tel que défini à la section 6.4.2.3. Ces deux figures indiquent

que la procédure établie pour calculer l'aléa global surestime l'aléa au niveau des talus de faible pente et le sous-estime pour les talus de forte pente.

#### **6.4.3.4 Cartographie de l'aléa spécifique**

Les valeurs d'aléa spécifique obtenues à la section précédente peuvent être cartographiées à l'intérieur du secteur des Bouleaux en fonction de la pente des talus et de la distance par rapport à leur base. D'un point de vue pratique, la carte des pentes globales est d'abord superposée à la carte des quatre bandes de terrain situées à la base des talus. Ensuite, les limites entre les classes de pente sont prolongées à la base des talus de façon manuelle en formant des polygones (figure 6.18). À l'intérieur des polygones, une valeur de probabilité de rupture est attribuée et correspond à celle de la classe de pente située vis-à-vis des polygones considérés. Les quatre bandes de terrain représentent aussi des polygones ayant chacun une valeur de probabilité associée à la phase de post-rupture. Le croisement des polygones de probabilité de rupture et des polygones de probabilité de post-rupture définit des zones homogènes d'aléa spécifique à chaque classe de pente (figure 6.19).

### **6.5 Estimation du risque**

#### **6.5.1 Identification des éléments exposés**

Afin d'identifier les éléments exposés au danger à l'intérieur du secteur des Bouleaux, la carte cadastrale est superposée à celle des zones d'aléa considérées, c'est-à-dire les talus et les bandes de terrain situés à la base des talus (figure 6.20). Les éléments situés à l'intérieur de ces zones correspondent aux éléments exposés de façon directe au danger.

Pour une question de simplicité, l'exercice méthodologique proposé dans cette étude considère seulement la population comme élément exposé. Comme le secteur des Bouleaux est une zone résidentielle en périphérie de Ville de La Baie, c'est la population qui se retrouve dans des maisons unifamiliales qui est considérée. En moyenne, le nombre

de personne exposée au danger est estimé de une à quatre. Cet intervalle représente le nombre d'occupant possible d'une maison mais peut aussi représenter la variabilité temporelle (jour versus nuit) du nombre d'individu se trouvant à l'intérieur d'une maison.

### **6.5.2 Évaluation de la conséquence d'une rupture**

Selon Leroi (1996) et Leone et al. (1996), la vulnérabilité des éléments exposés aux glissements de terrain, qui correspond au degré de perte évalué entre zéro et un, dépend à la fois de l'intensité du phénomène, de la nature et du comportement de chaque élément. L'analyse de vulnérabilité implique de définir des fonctions d'endommagement pour les biens matériels, les personnes et les opérations (e.g. perturbation ou arrêt du trafic routier). Afin d'estimer le risque pour la région de Ville de La Baie, ce travail propose plutôt de considérer les conséquences du danger comme le proposent plusieurs études dont celles de Hungr (1997), Morgan (1997) et Whitman (1984). Cette approche simplifie grandement la procédure puisqu'il n'est pas nécessaire de définir formellement ces fonctions d'endommagement.

Comme les éléments exposés considérés dans le secteur sont des individus seulement, les conséquences sont évaluées en terme de décès. En vertu de la faible profondeur et de la superficie limitée des glissements superficiels caractérisant la région, les débris mobilisés ne pourraient affecter qu'une seule maison à la fois. Cette hypothèse s'appuie sur des cas concrets connus de la région (rue McNicoll, juillet 1996; Petit Saguenay, juillet 1996; St-Fulgence, avril, 1995). En émettant l'hypothèse que les débris ont suffisamment d'énergie pour causer le décès des résidents d'une maison, les conséquences associées à ce type de phénomène se traduisent par des pertes de vie estimées entre une à quatre personnes.

### **6.5.3 Estimation du risque**

Pour la région de Ville de La Baie, le risque est estimé en combinant l'aléa quantifié à la section 6.4 et les conséquences associées aux glissements de terrain dans le secteur. Ces informations sont reportées dans un repère aléa-conséquences pour chacune des quatre

bandes de terrain situées à la base des talus (figures 6.21 et 6.22). Les figures 6.21 et 6.22 illustrent les résultats obtenus en considérant des superficies de glissement de terrain respectivement égales à 100 m<sup>2</sup> et 350 m<sup>2</sup>.

## **6.6 Évaluation de l'acceptabilité du risque**

Les niveaux de risque peuvent être comparés à des critères d'acceptabilité du risque proposés dans la littérature. Ceux-ci permettent d'évaluer de façon approximative si un site particulier est approprié, en terme de sécurité, pour les utilisations actuelles ou pour réaliser des développements futurs.

### **6.6.1 Critères d'acceptabilité du risque**

Plusieurs critères d'acceptabilité du risque ont été proposés pour différents types de danger. Ces critères sont généralement définis dans un diagramme de la probabilité de rupture exprimée en fonction des conséquences du phénomène, tel que celui proposé par Whitman (1984) (figure 6.23). Dans ce graphique, l'auteur présente la probabilité annuelle de rupture associée à différents projets d'ingénierie en fonction des conséquences, et suggère des limites « acceptable » et « marginalement acceptable » du risque.

D'autres critères ont été spécifiquement définis pour les glissements de terrain au Canada. La figure 6.24 montre la limite d'acceptabilité du risque suggérée par Evans (1997) pour les coulées de débris et les chutes de roches. Morgan (1997) propose aussi des limites pour les glissements de terrain au Canada (figure 6.25). La zone hachurée représente la zone de tolérance séparant les limites de ce qui est « tolérable » de ce qui est « intolérable ». Lorsque les résultats se situent dans cette zone, le risque serait toléré si la réduction est impraticable ou si le coût de réduction est très élevé par rapport aux bénéfices obtenus (Morgan, 1997).

### **6.6.2 Le risque présenté par les glissements de terrain superficiels à Ville de La Baie est-il acceptable?**

Les critères d'acceptabilité du risque proposés par Morgan (1997) pour les glissements de terrain au Canada sont utilisés dans cette étude afin d'évaluer l'acceptabilité du risque estimé pour le secteur de Ville de La Baie. Pour ce faire, les données obtenues pour le secteur de Ville de La Baie sont placées sur le diagramme aléa-conséquences présenté par Morgan (1997) (figures 6.26 et 6.27).

#### Acceptabilité du risque pour l'aléa global :

Les figures 6.26 et 6.27 montrent que, selon les critères de Morgan (1997), le risque associé aux glissements de terrain superficiels serait, dans presque tous les cas, acceptable à la base des talus. Lorsque la superficie des glissements de terrain considérée est de 350 m<sup>2</sup>, le risque serait tolérable à la base des talus sur une distance égale à une demi-fois leur hauteur.

#### Acceptabilité du risque pour l'aléa spécifique :

Les tableaux 6.9 et 6.10 présentent un bilan de l'acceptabilité du risque à l'intérieur du secteur d'étude en fonction de la pente et de la distance par rapport à la base des talus (rapport D/H). Ces tableaux indiquent si le risque attribué aux talus et aux quatre bandes de terrain situées à leur base est acceptable, tolérable ou intolérable selon les critères de Morgan (1997).

En considérant une superficie de glissement de terrain de 100 m<sup>2</sup>, le risque est considéré acceptable lorsque la pente est inférieure à 34°. Pour des valeurs de pente plus élevées, le risque serait tolérable à l'exception des talus de pente supérieure à 38° pour lesquels le risque est estimé intolérable jusqu'à une distance inférieure à une fois la hauteur des talus.

Toujours selon les critères de Morgan (1997), le risque estimé à partir d'une superficie de glissement de terrain de 350 m<sup>2</sup> serait acceptable à la base des talus de pente inférieure à 30°. Pour les talus de pente comprise entre 30° et 34°, le risque serait tolérable jusqu'à une distance égale à une fois leur hauteur. Lorsque la pente est supérieure à 34°, le risque deviendrait intolérable au pied immédiat des talus.

La figure 6.28 présente un exemple de cartographie de l'acceptabilité du risque réalisé pour une section du secteur des Bouleaux.

Parmi les maisons exposées aux glissements de terrain apparaissant à la figure 6.28, la maison encerclée se situe à l'intérieur d'une zone pour laquelle le risque est considéré tolérable selon les critères de Morgan (1997). Cela signifierait que dans ce secteur, la réduction du risque est souhaitable mais pas nécessairement obligatoire. Or, une reconnaissance détaillée du site a permis de détecter des fissures de tension au sommet et des fissures de chevauchement au pied du talus (figure 5.6). Le talus est donc marginalement stable. Après une étude de stabilité détaillée, le talus a été reprofilé (figure 6.29) en adoucissant la pente.

L'aléa a été bien entendu calculé en utilisant la topographie du terrain avant que le talus ait été reprofilé.

Année	Nombre de glissement de terrain
1950	7
1964	25
1968	1
1969	4
1974	5
1975	13
1976	32
1980	3
1981	2
1996	22

Tableau 6.1 : Nombre de glissement de terrain identifié par photo-interprétation pour différentes années comprises entre 1950 et 2000; Ville de La Baie, secteur sud (Perret, 1999; document interne, CGQ).

D/H	$P_{p-r}$
0.0-0.5	1.0
0.5-1.0	0.7
1.0-1.5	0.3
1.5-2.0	0.1
> 2.0	0.0

Tableau 6.2 : Probabilité associée à la phase de post-rupture pour quatre bandes de terrain situées à la base des talus. Les limites de ces bandes correspondent à différents rapports de la distance d'étalement des débris à la hauteur des talus (D/H).

	D/H = 0.0-0.5	D/H = 0.5-1.0	D/H = 1.0-1.5	D/H = 1.5-2.0
$S_{GT} = 100 \text{ m}^2$	$4.3 \times 10^{-5}$	$3.1 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-5}$	$0.4 \times 10^{-5}$
$S_{GT} = 350 \text{ m}^2$	$2.0 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$0.6 \times 10^{-4}$	$0.2 \times 10^{-4}$

Tableau 6.3 : Aléa global pour les talus et les quatre bandes de terrain considérées, pour deux superficies de glissement de terrain (100 et 350 m<sup>2</sup>); Ville de La Baie, secteur sud.

<b>Classe (i)</b>	<b>Pente (°)</b>
1	22-26
2	26-30
3	30-34
4	34-38
5	38 et plus

Tableau 6.4 : Limites des cinq classes de pente (i) considérées dans l'évaluation de l'aléa spécifique.

<b>Classe de pente (°)</b>	<b>N<sub>GTi</sub> (km<sup>2</sup>)</b>	<b>S<sub>DBi</sub> (km<sup>2</sup>)</b>	<b>S<sub>LBi</sub> (km<sup>2</sup>)</b>
<b>14-22</b>	0	3.0x10 <sup>-2</sup>	1.81
<b>22-26</b>	16.48	0.06	3.79
<b>26-30</b>	40.45	0.06	3.41
<b>30-34</b>	63.31	0.02	1.34
<b>34-38</b>	50.16	3.7x10 <sup>-3</sup>	0.21
<b>38 et plus</b>	25.59	0.4 x10 <sup>-3</sup>	0.02

Tableau 6.5 : Nombre de glissements de terrain observé entre 1950 et 2000 (N<sub>GTi</sub>) et superficie des talus pour les secteurs des Bouleaux (S<sub>DBi</sub>) et de Ville de La Baie (S<sub>LBi</sub>) pour les cinq classes de pente considérées.

<b>Classe de pente (°)</b>	<b>Probabilité de rupture (S<sub>GT</sub>=100 m<sup>2</sup>)</b>	<b>Probabilité de rupture (S<sub>GT</sub>=350 m<sup>2</sup>)</b>
<b>22-26</b>	7.9 x 10 <sup>-6</sup>	2.8 x 10 <sup>-5</sup>
<b>26-30</b>	2.3 x 10 <sup>-5</sup>	8.0 x 10 <sup>-5</sup>
<b>30-34</b>	9.1 x 10 <sup>-5</sup>	3.2 x 10 <sup>-4</sup>
<b>34-38</b>	4.4 x 10 <sup>-4</sup>	1.5 x 10 <sup>-3</sup>
<b>38 et plus</b>	1.7 x 10 <sup>-3</sup>	6.0 x 10 <sup>-3</sup>

Tableau 6.6 : Probabilité de rupture calculée pour les cinq classes de pente considérées, et pour des superficies de glissement de terrain de 100 m<sup>2</sup> et 350 m<sup>2</sup>.

Pente (°)	D/H = 0.0-0.5	D/H = 0.5-1.0	D/H = 1.0-1.5	D/H = 1.5-2.0
<b>22-26</b>	$7.8 \times 10^{-6}$	$5.5 \times 10^{-6}$	$2.4 \times 10^{-6}$	$7.8 \times 10^{-7}$
<b>26-30</b>	$2.3 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-5}$	$6.9 \times 10^{-6}$	$2.3 \times 10^{-6}$
<b>30-34</b>	$9.1 \times 10^{-5}$	$6.4 \times 10^{-5}$	$2.7 \times 10^{-5}$	$9.1 \times 10^{-6}$
<b>34-38</b>	$4.4 \times 10^{-4}$	$3.1 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$4.4 \times 10^{-5}$
<b>38 et plus</b>	$1.7 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3}$	$5.1 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-4}$

Tableau 6.7 : Aléa spécifique des cinq classes de pente considérées en fonction du rapport D/H, évalué pour une superficie de glissement de terrain de 100 m<sup>2</sup>; Ville de La Baie, secteur sud.

Pente (°)	Talus et D/H = 0.0-0.5	D/H = 0.5-1.0	D/H = 1.0-1.5	D/H = 1.5-2.0
<b>22-26</b>	$2.7 \times 10^{-5}$	$1.9 \times 10^{-5}$	$8.3 \times 10^{-6}$	$2.8 \times 10^{-6}$
<b>26-30</b>	$8.0 \times 10^{-5}$	$5.6 \times 10^{-5}$	$2.4 \times 10^{-5}$	$8.0 \times 10^{-6}$
<b>30-34</b>	$3.2 \times 10^{-4}$	$2.2 \times 10^{-4}$	$9.6 \times 10^{-5}$	$3.1 \times 10^{-5}$
<b>34-38</b>	$1.5 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-3}$	$4.6 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$
<b>38 et plus</b>	$6.0 \times 10^{-3}$	$4.2 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-3}$	$6.0 \times 10^{-4}$

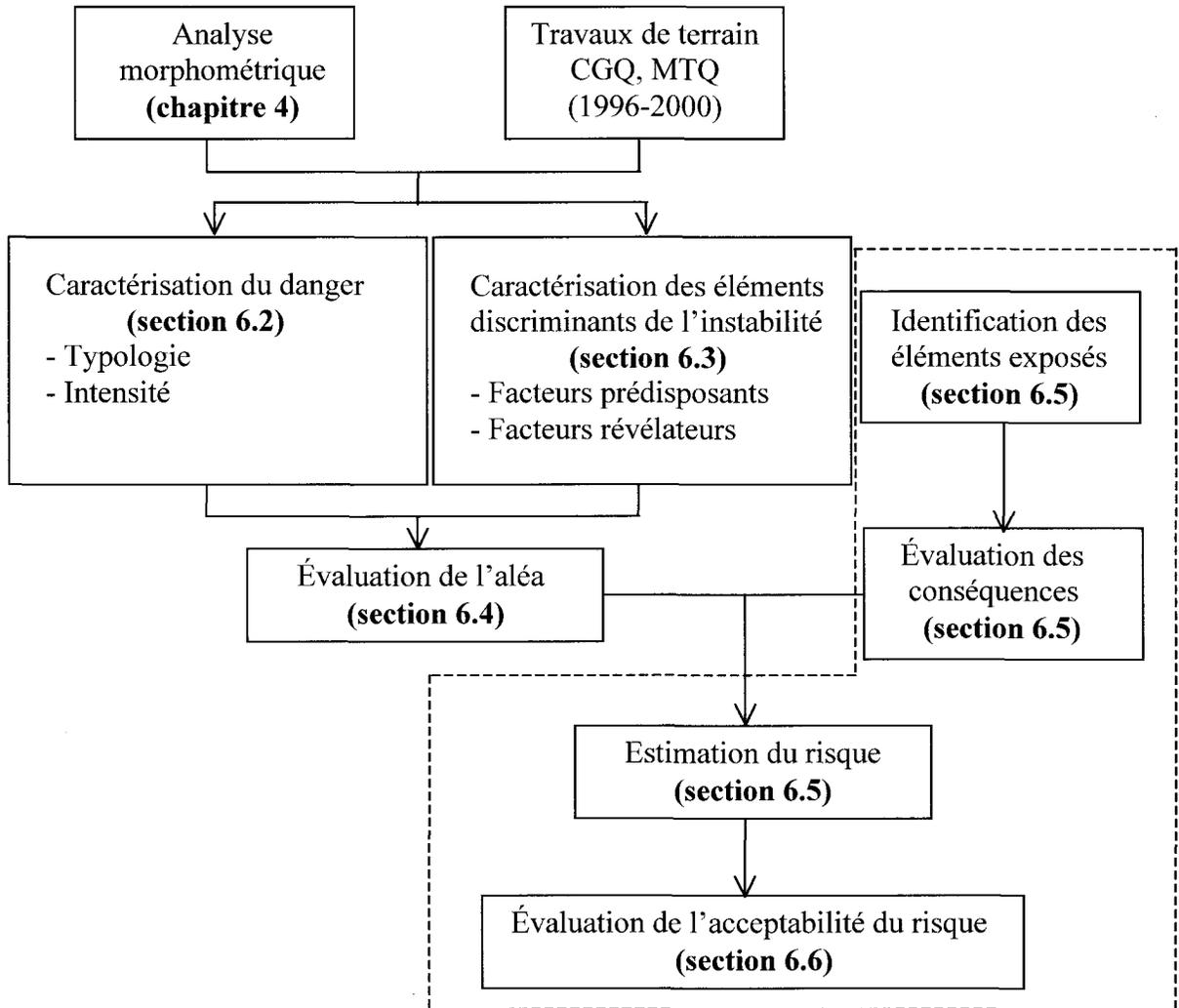
Tableau 6.8 : Aléa spécifique des cinq classes de pente considérées en fonction du rapport D/H, évalué en considérant une superficie de glissement de terrain de 350 m<sup>2</sup>; Ville de La Baie, secteur sud.

Pente (°)	D/H = 0.0-0.5	D/H = 0.5-1.0	D/H = 1.0-1.5	D/H = 1.5-2.0
<b>22-26</b>	Acceptable			
<b>26-30</b>	Acceptable			
<b>30-34</b>	Acceptable			
<b>34-38</b>	Tolérable			Acceptable
<b>38 et plus</b>	Intolérable		Tolérable	

Tableau 6.9 : Acceptabilité du risque de glissement de terrain pour les cinq classes de pente en fonction du rapport D/H, estimée en considérant une superficie de glissement de terrain de 100 m<sup>2</sup>; Ville de La Baie, secteur sud.

<b>Pente (°)</b>	<b>Talus et D/H = 0.0-0.5</b>	<b>D/H = 0.5-1.0</b>	<b>D/H = 1.0-1.5</b>	<b>D/H = 1.5-2.0</b>
<b>22-26</b>	Acceptable			
<b>26-30</b>	Acceptable			
<b>30-34</b>	Tolérable		Acceptable	
<b>34-38</b>	Intolérable		Tolérable	
<b>38 et plus</b>	Intolérable			Tolérable

Tableau 6.10 : Acceptabilité du risque de glissement de terrain pour les cinq classes de pente en fonction du rapport D/H, estimée en considérant une superficie de glissement de terrain de 350 m<sup>2</sup>; Ville de La Baie, secteur.



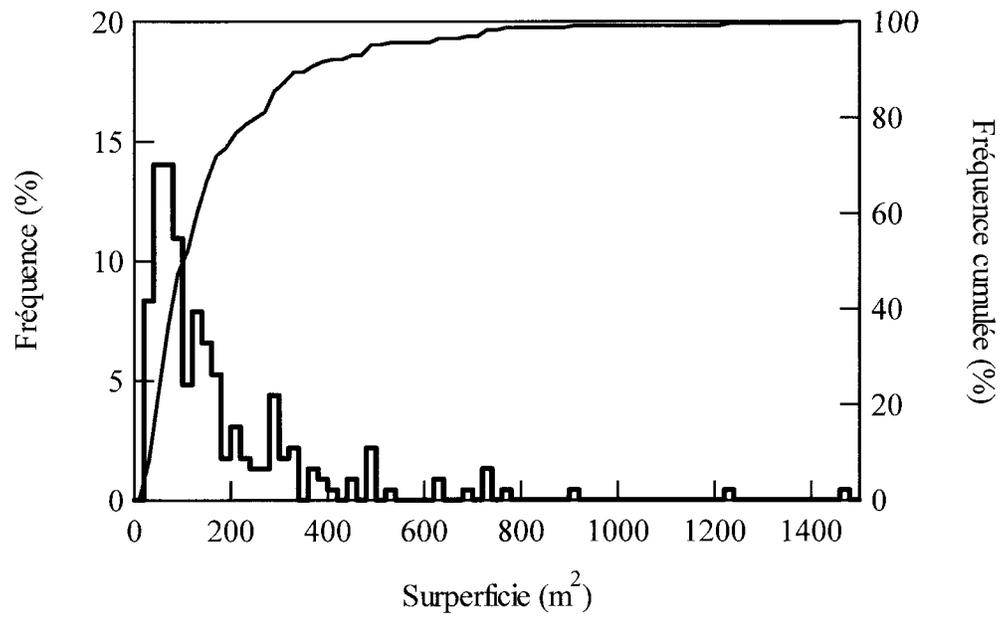


Figure 6.2 : Fréquence et fréquence cumulée de la superficie des glissements de terrain, Saguenay-Lac-Saint-Jean (d'après Perret et Bégin, 1997).

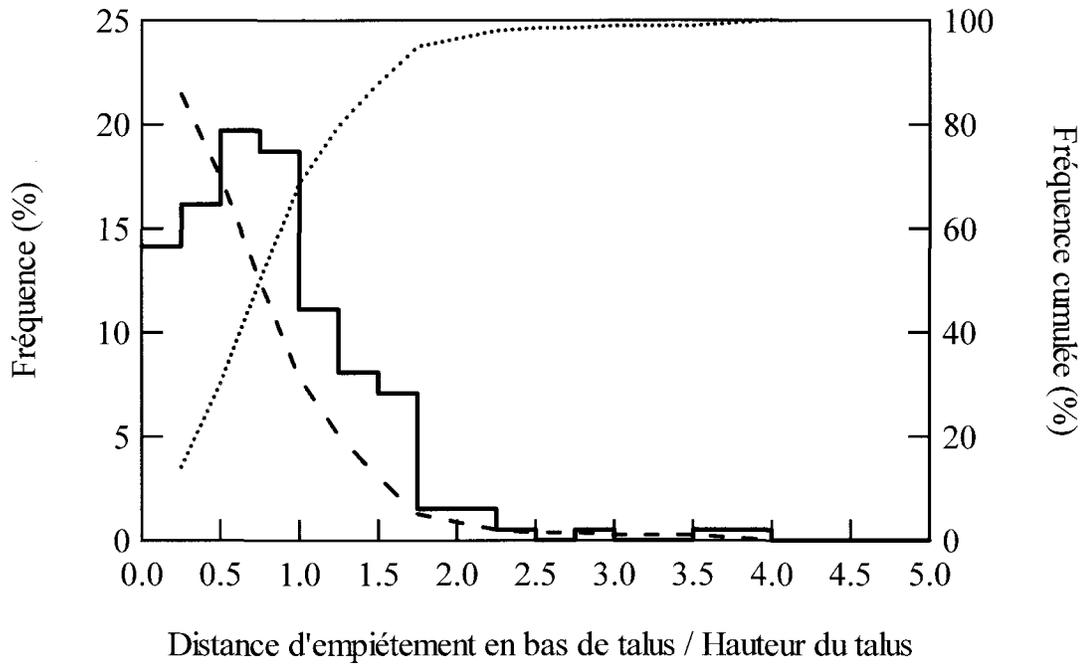


Figure 6.3 : Fréquence, fréquence cumulée (points) et fréquence cumulée inverse (tirets) du rapport de la distance d'étalement des débris à la hauteur des talus, Saguenay-Lac-Saint-Jean (d'après Perret et Bégin, 1997).

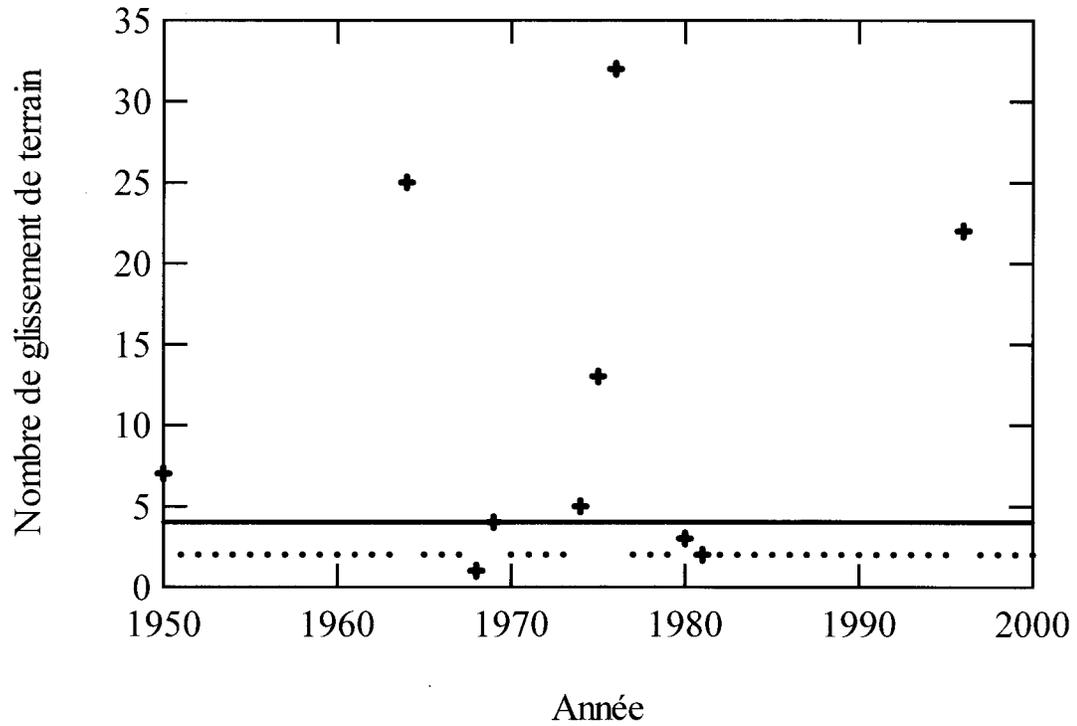


Figure 6.4 : Nombre de glissements de terrain observé pour les années comprises entre 1950 et 2000; Ville de La Baie, secteur sud. Les croix représentent les années pour lesquelles il y a eu une photo-interprétation. Les points représentent les années pour lesquelles il n'y a pas eu de photo-interprétation. La ligne continue représente la moyenne annuelle.

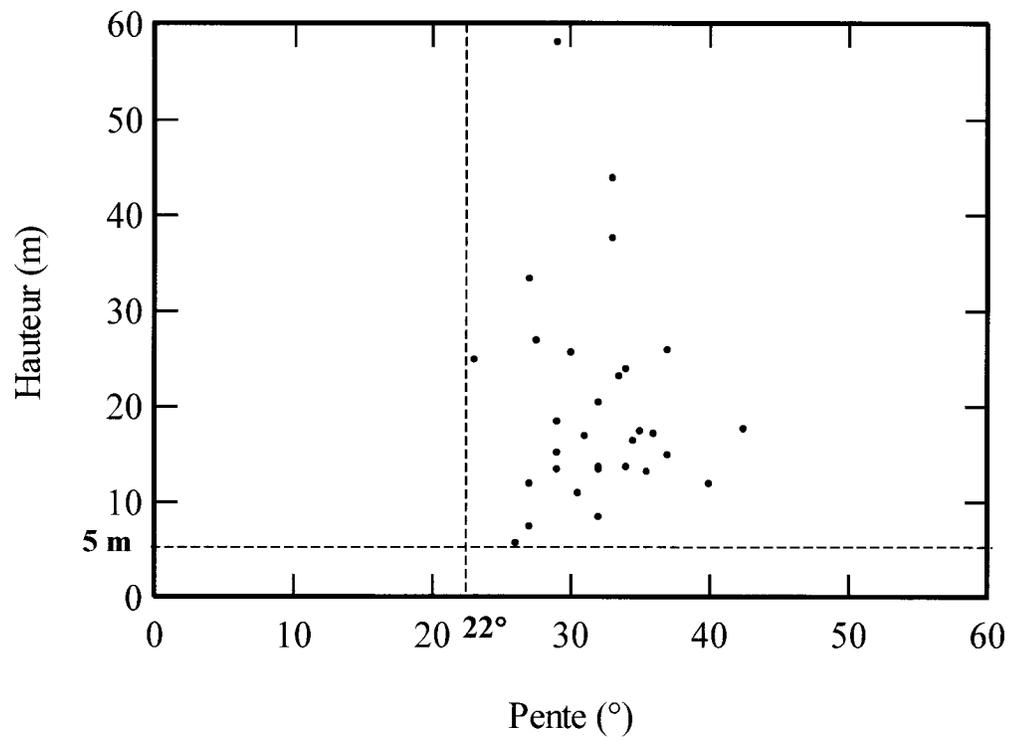


Figure 6.5 : Pente et hauteur des talus déstabilisés, Ville de La Baie (d'après Perret et Bégin, 1997).

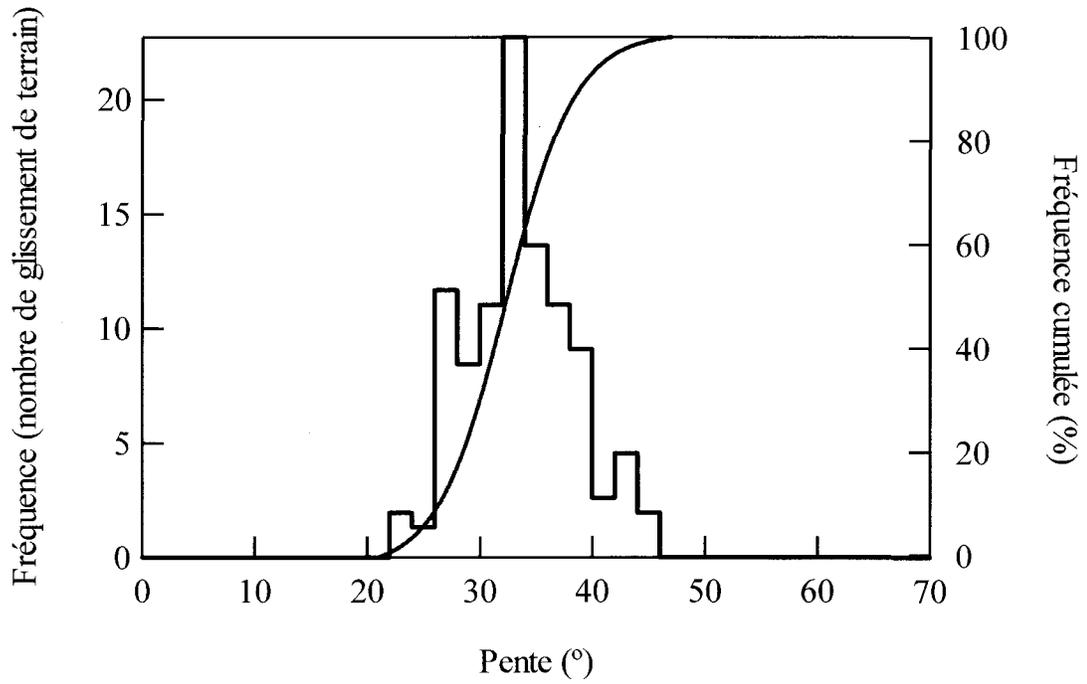


Figure 6.6 : Fréquence et fréquence cumulée (courbe lissée) du nombre de glissements de terrain en fonction de la pente globale des talus, Ville de La Baie (d'après Perret et Bégin, 1997).



Figure 6.7 : Carte des talus argileux dont la pente est supérieure à  $22^\circ$  et la hauteur supérieure à 5 m; Ville de La Baie, secteur sud (données communiquées par le MTQ, 2000).

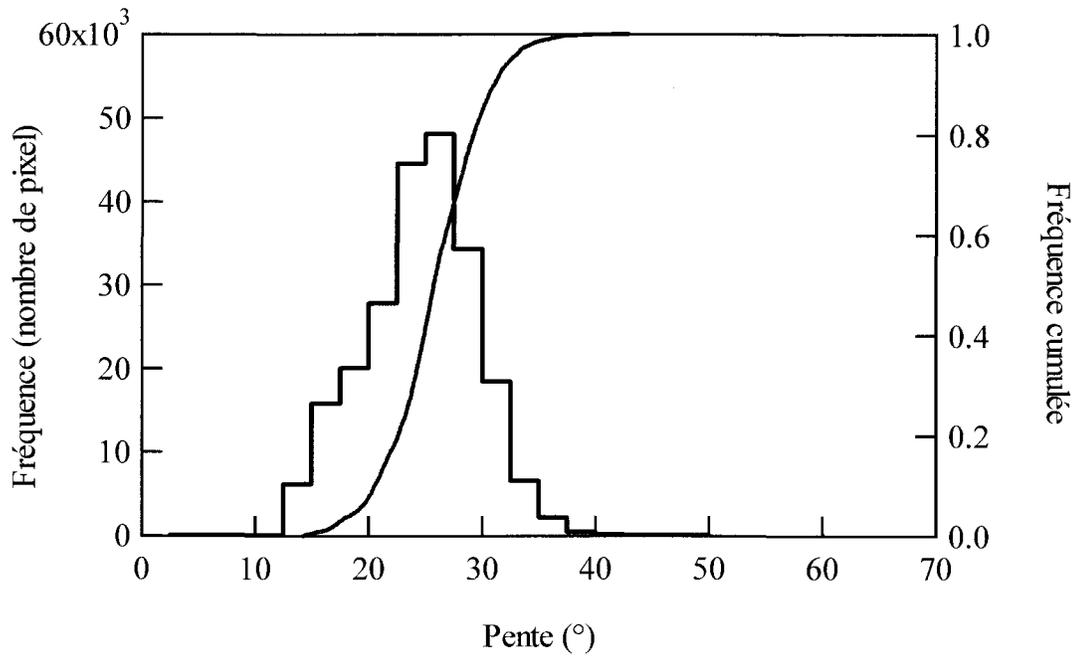


Figure 6.8 : Fréquence et fréquence cumulée (courbe lissée) de la superficie des talus en fonction de leur pente globale, secteur des Bouleaux.

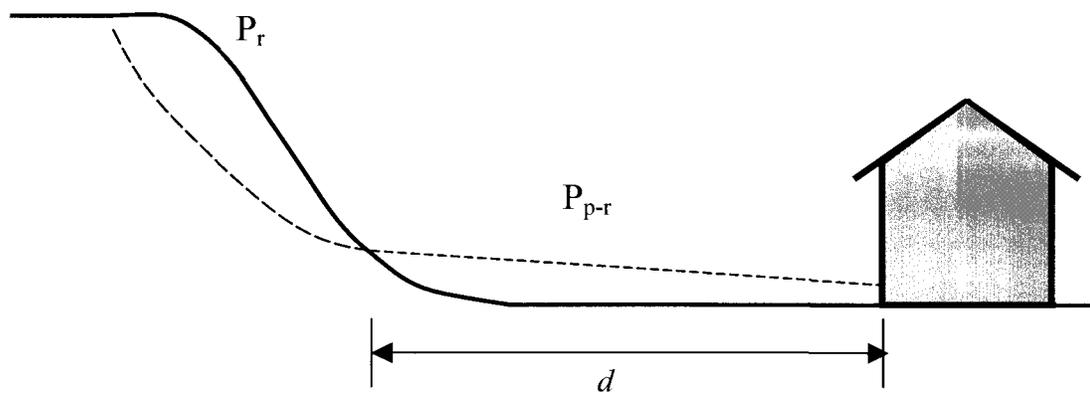


Figure 6.9 : Probabilité de rupture ( $P_r$ ) et probabilité de post-rupture ( $P_{p-r}$ ) associées à un glissement de terrain.

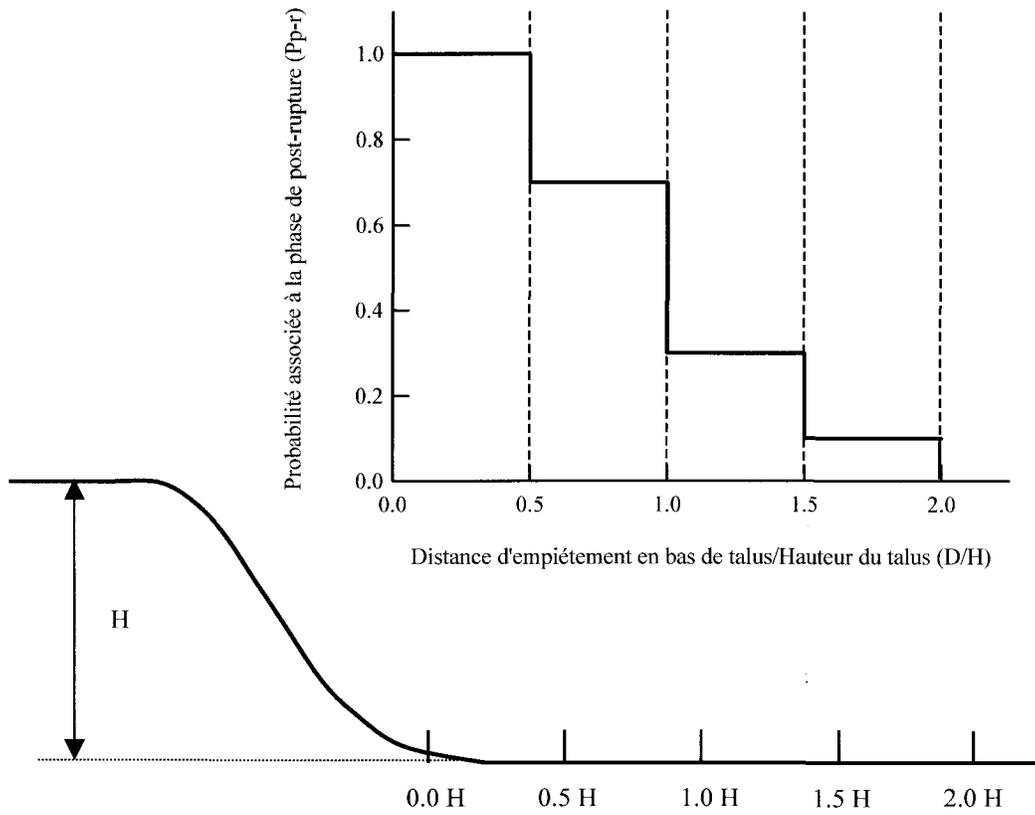


Figure 6.10 : Probabilité associée à la phase de post-rupture pour différents rapports de la distance d'étalement des débris à la hauteur des talus ( $D/H$ ).



Figure 6.11 : Carte des talus et des quatre bandes de terrain situées à leur base, et des valeurs de probabilité associées à la phase de post-rupture; butte des Bouleaux, secteur des Bouleaux.

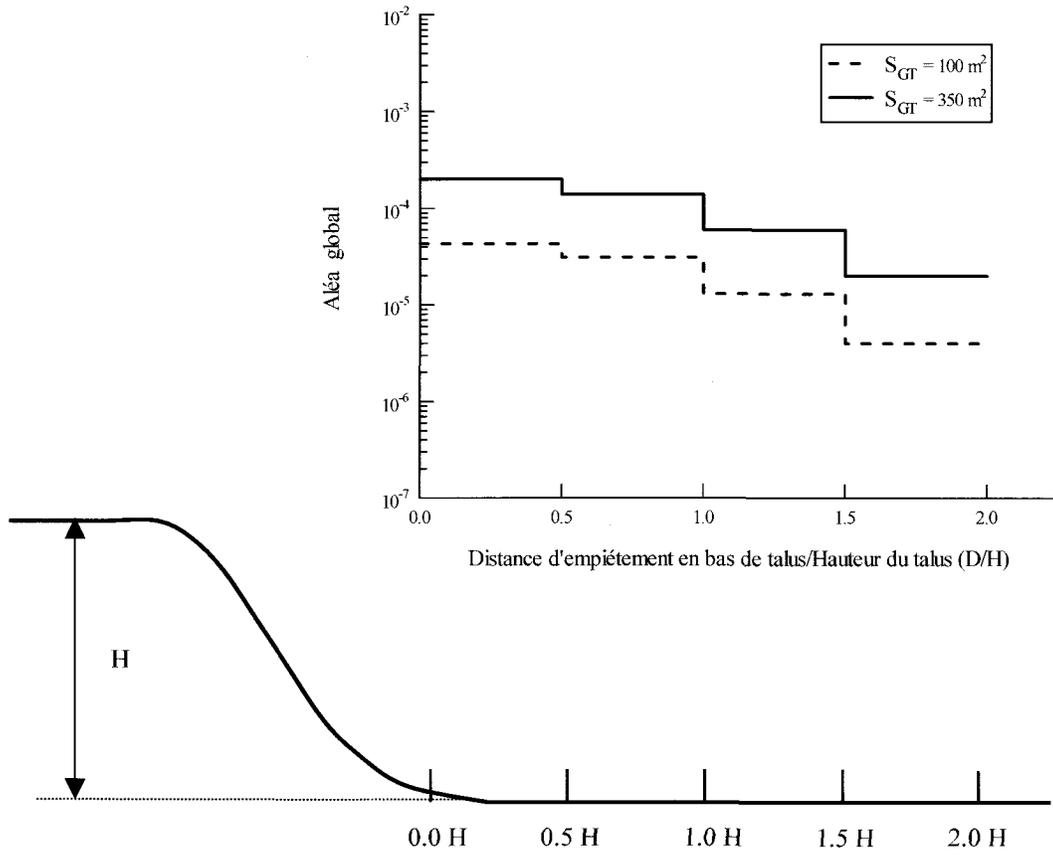


Figure 6.12 : Aléa global en fonction du rapport de la distance d'étalement des débris à la hauteur des talus (D/H), en considérant deux surfaces de glissement de terrain ( $S_{GT}$ ); Ville de La Baie, secteur sud.



Figure 6.13 : Carte de l'aléa global évalué en considérant une superficie de glissement de terrain de 350 m<sup>2</sup>; butte des Bouleaux, secteur des Bouleaux.

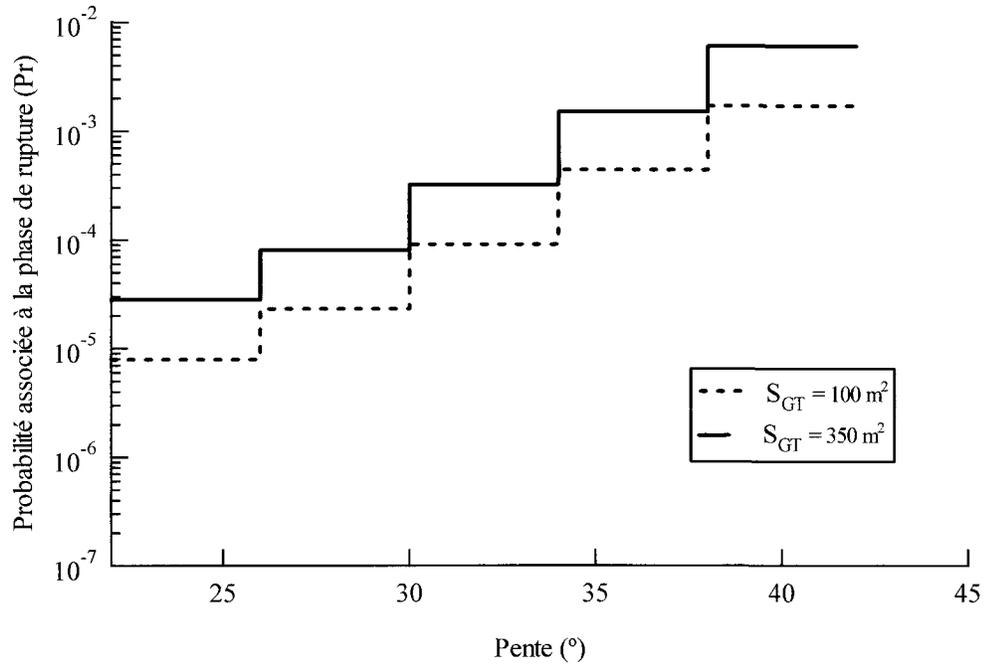


Figure 6.14 : Probabilité associée à la phase de rupture en fonction de la pente des talus, en considérant deux superficies de glissement de terrain ( $S_{GT}$ ); Ville de La Baie, secteur sud.



Figure 6.15 : Carte de la probabilité de rupture (aléa spécifique) calculée en utilisant une superficie de glissement de terrain de  $350 \text{ m}^2$ , secteur des Bouleaux. Du pâle au foncé, la probabilité de rupture passe de  $2.8 \times 10^{-5}$  à  $6.0 \times 10^{-3}$ . Les dimensions du secteur sont d'environ  $1100 \times 850 \text{ m}$ .

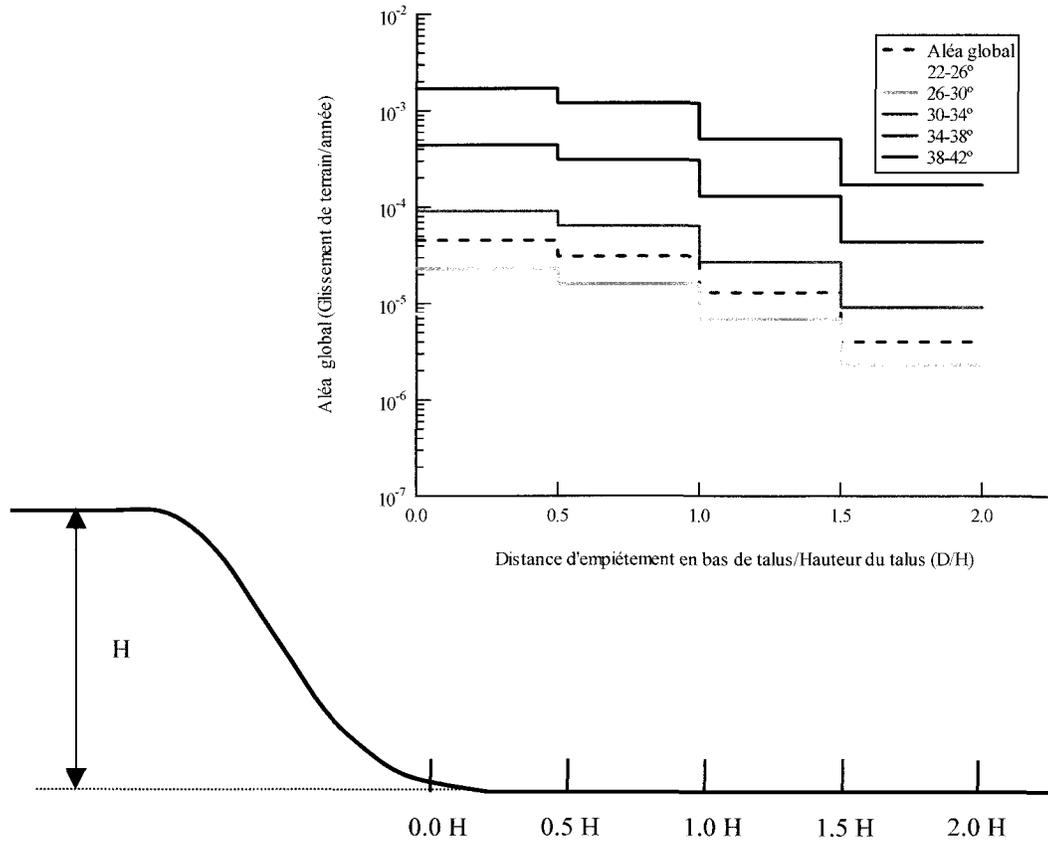


Figure 6.16 : Aléa spécifique, évalué en considérant une superficie de glissement de terrain de  $100 \text{ m}^2$ , en fonction de la pente des talus et du rapport D/H; Ville de La Baie, secteur sud.

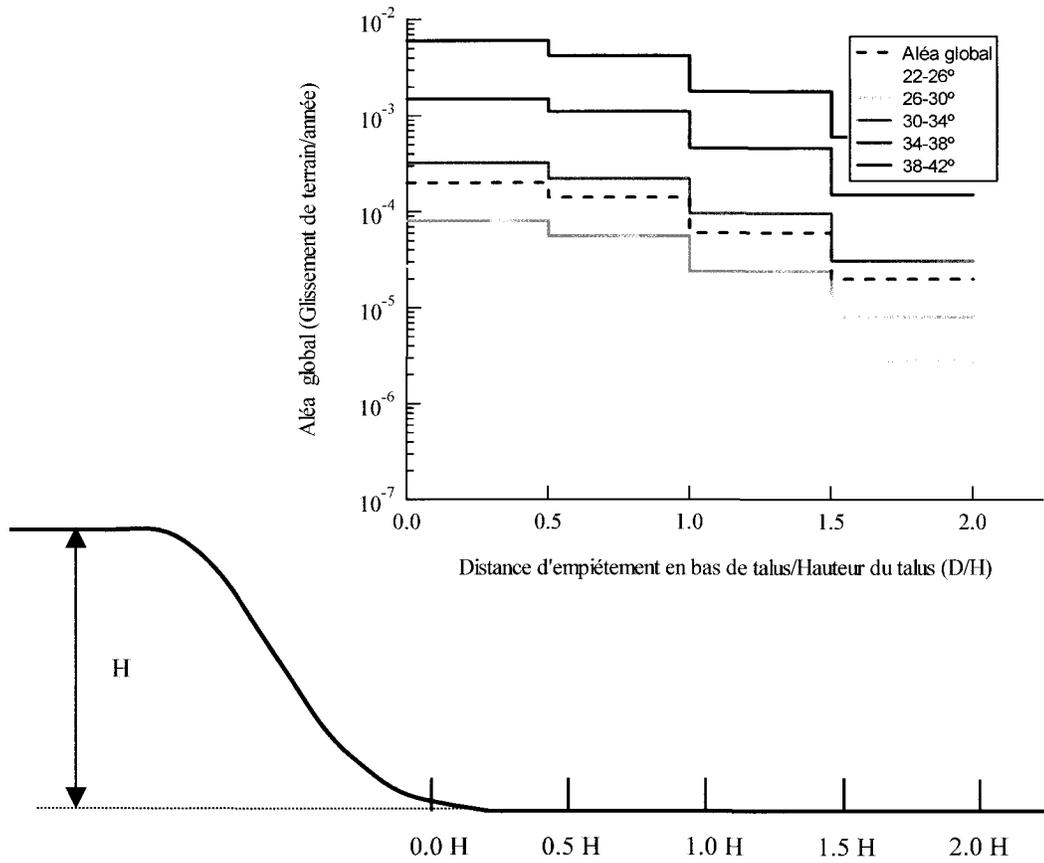


Figure 6.17 : Aléa spécifique, évalué en considérant une superficie de glissement de terrain de  $350 \text{ m}^2$ , en fonction de la pente des talus et du rapport D/H; Ville de La Baie, secteur sud.

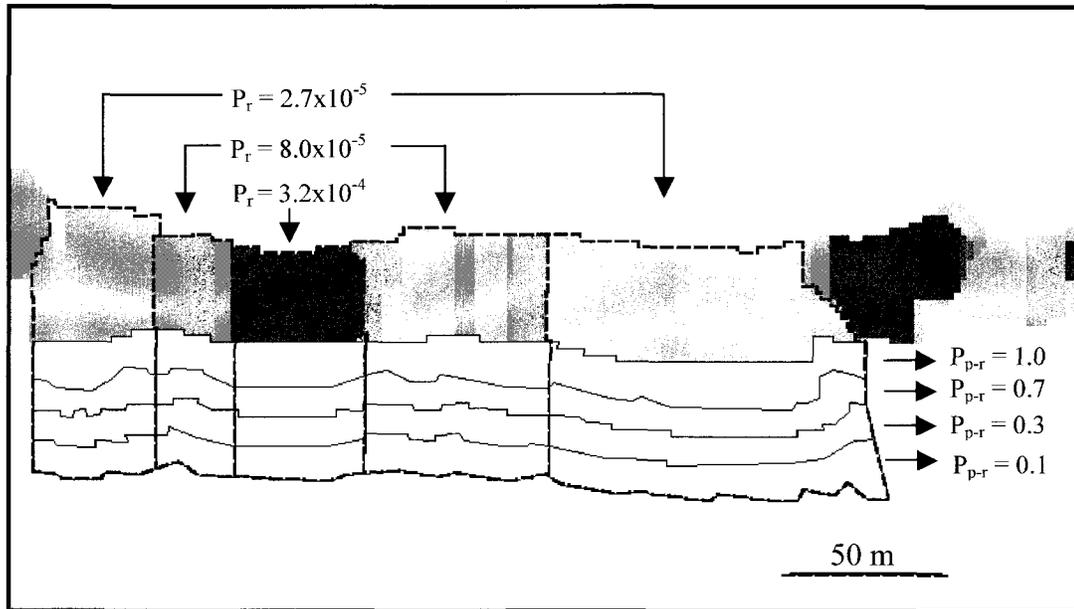


Figure 6.18 : Exemple de croisement des polygones de probabilité de rupture (tirets) en fonction de la pente et des polygones de probabilité de post-rupture; flanc sud de la butte des Bouleaux, secteur des Bouleaux. Les teintes grises au niveau des talus représentent les valeurs de pente globale regroupées en classes. Les teintes plus foncées sont associées aux valeurs plus élevées de pente.

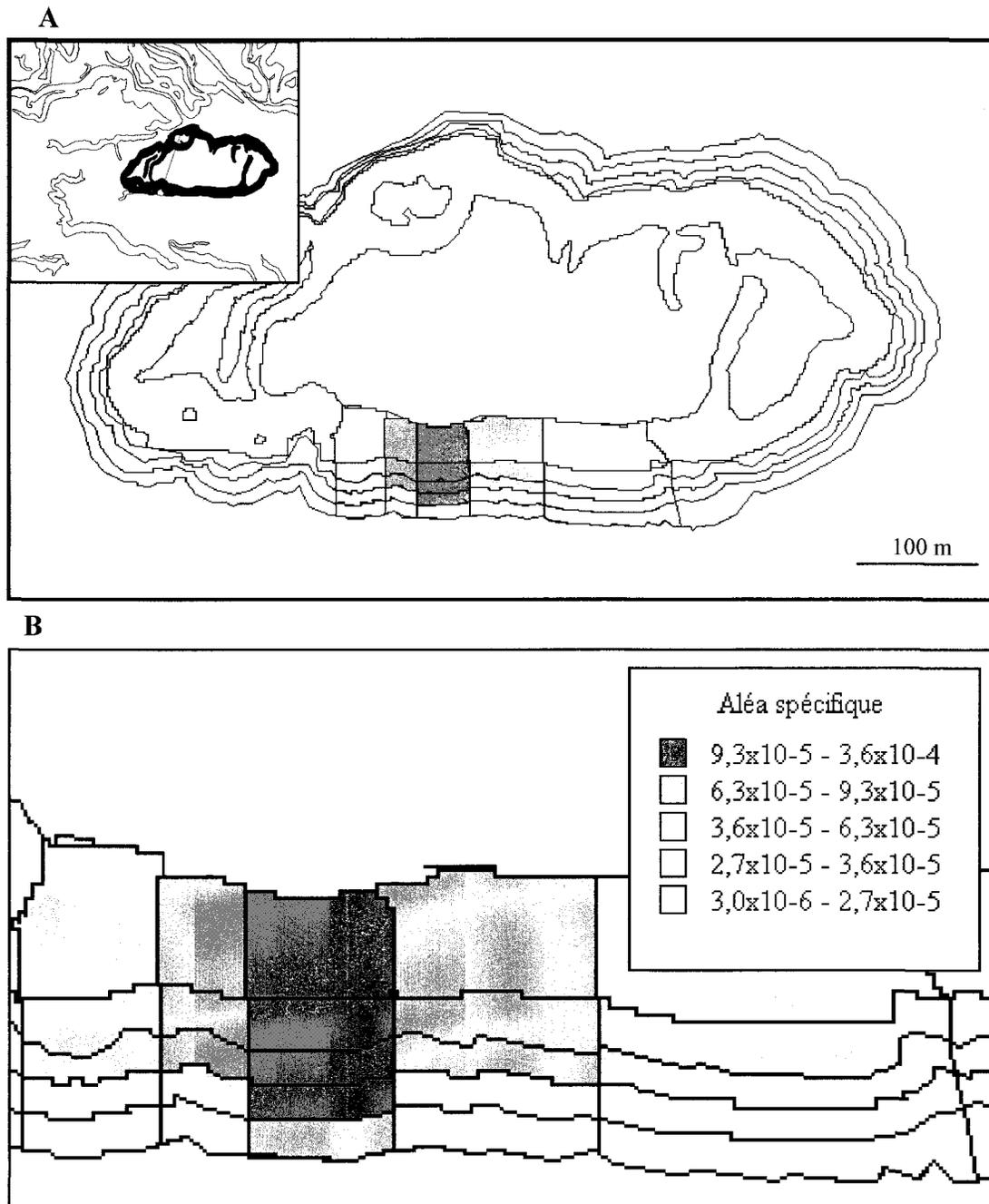


Figure 6.19 : Carte de l'aléa spécifique d'une partie du flanc sud de la butte des Bouleaux calculé en considérant une superficie de glissement de terrain de  $350 \text{ m}^2$ , secteur des Bouleaux. A : Butte des Bouleaux. B : Secteur de cartographie de la butte des Bouleaux.

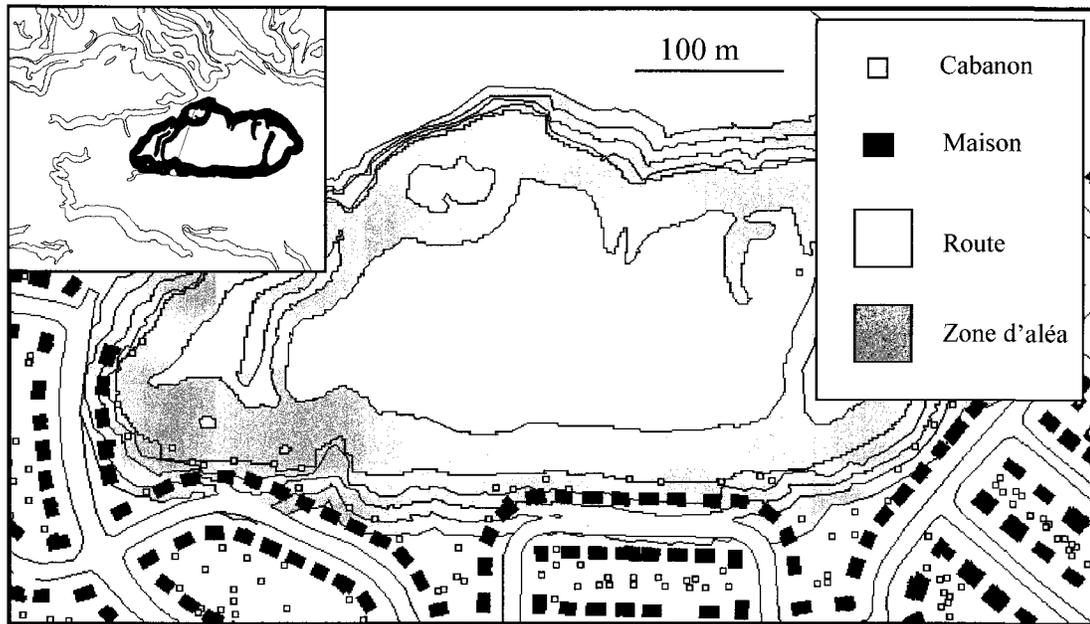


Figure 6.20 : Identification des éléments exposés au danger de glissement de terrain; butte des Bouleaux, secteur des Bouleaux. La carte cadastrale est superposée à la carte des zones d'aléa. Les éléments inclus dans les zones de teinte grise correspondent aux maisons exposées.

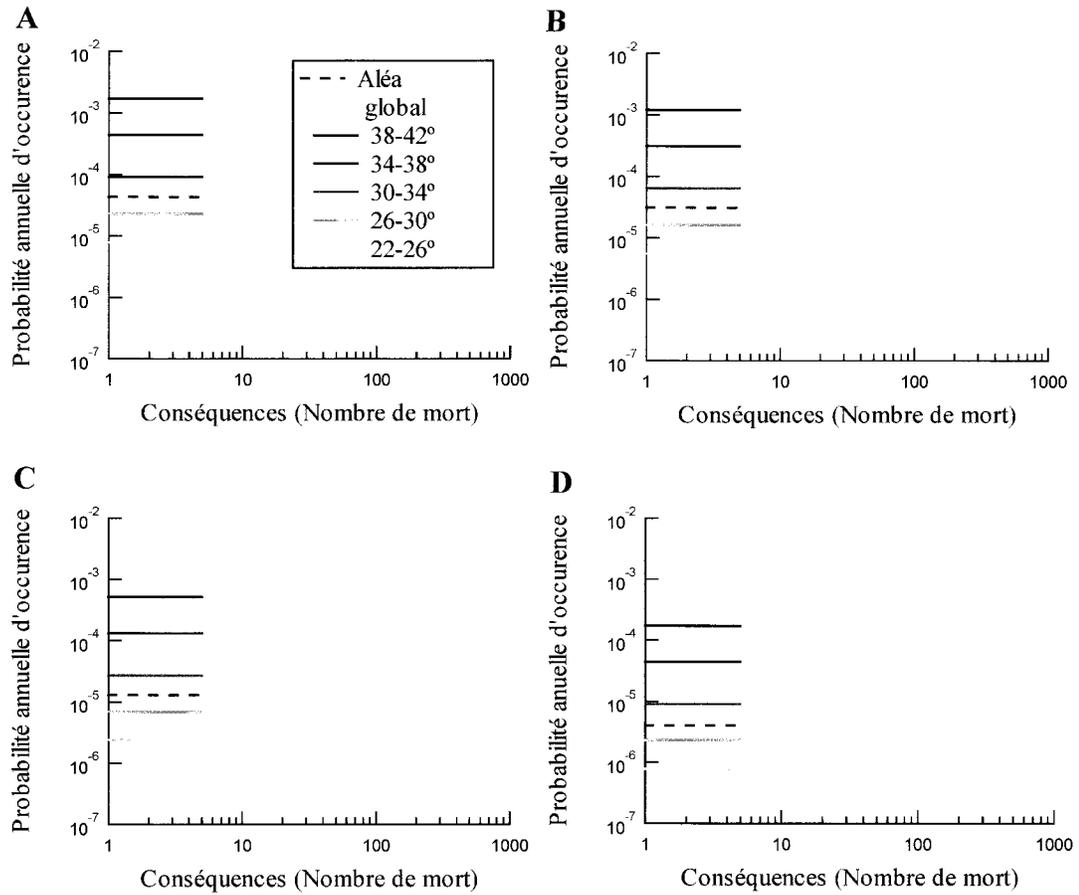


Figure 6.21 : Estimation du risque de glissement de terrain, en considérant une superficie de glissement de terrain de  $100 \text{ m}^2$ , pour les quatre bandes de terrain situées à la base des talus; Ville de La Baie, secteur sud. A : talus et  $0 < D/H \leq 0.5$ . B :  $0.5 < D/H \leq 1.0$ . C :  $1.0 < D/H \leq 1.5$ . D :  $1.5 < D/H \leq 2.0$ .

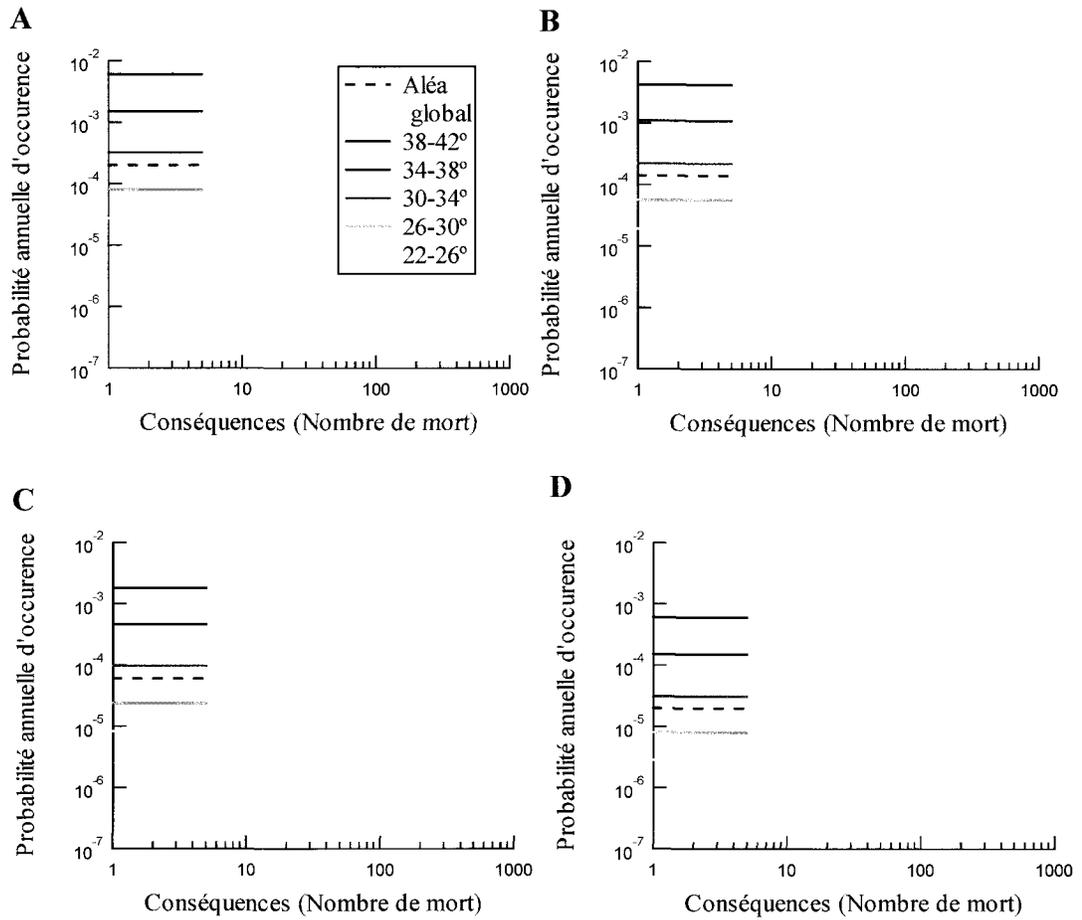


Figure 6.22 : Estimation du risque de glissement de terrain, en considérant une superficie de glissement de terrain de  $350 \text{ m}^2$ , pour les quatre bandes de terrain situées à la base des talus; Ville de La Baie, secteur sud. A : talus et  $0 < D/H \leq 0.5$ . B :  $0.5 < D/H \leq 1.0$ . C :  $1.0 < D/H \leq 1.5$ . D :  $1.5 < D/H \leq 2.0$ .

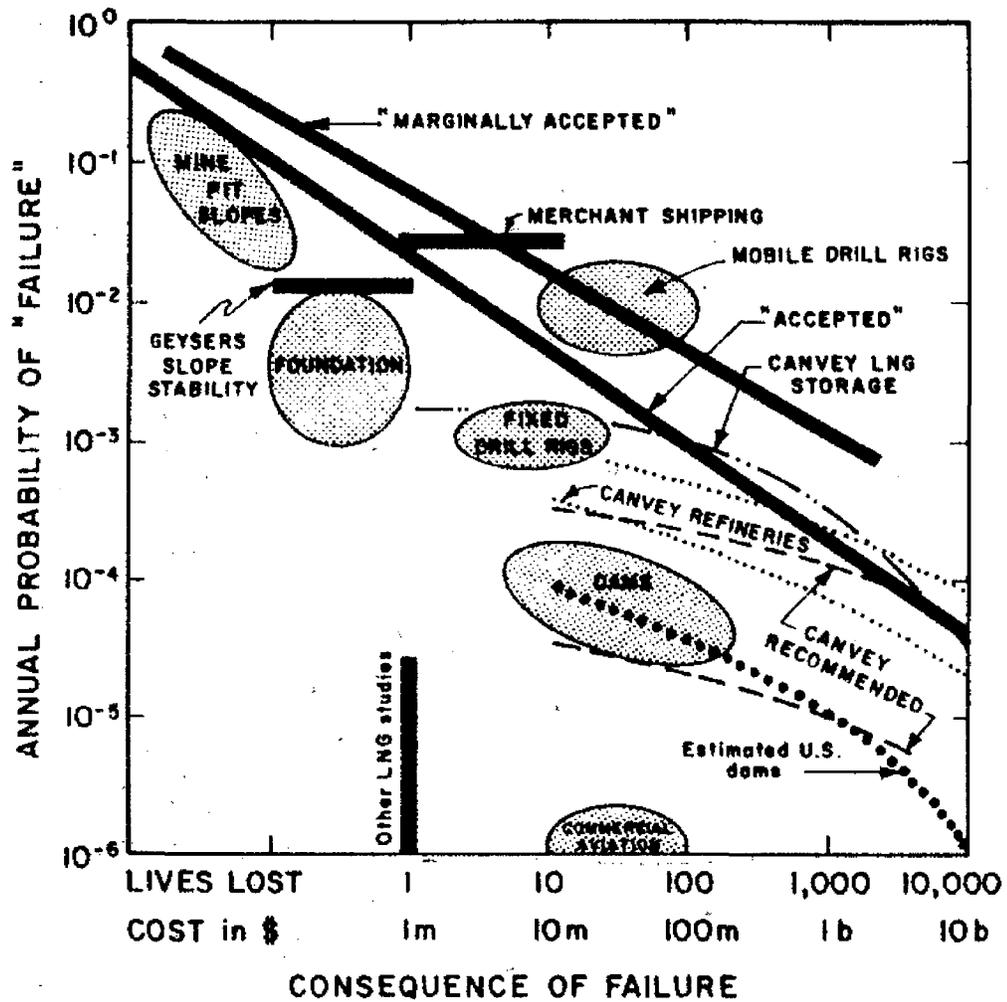


Figure 6.23 : Risque associé à la rupture de plusieurs ouvrages d'ingénierie, et limites d'acceptabilité du risque (tiré de Whitman, 1984).

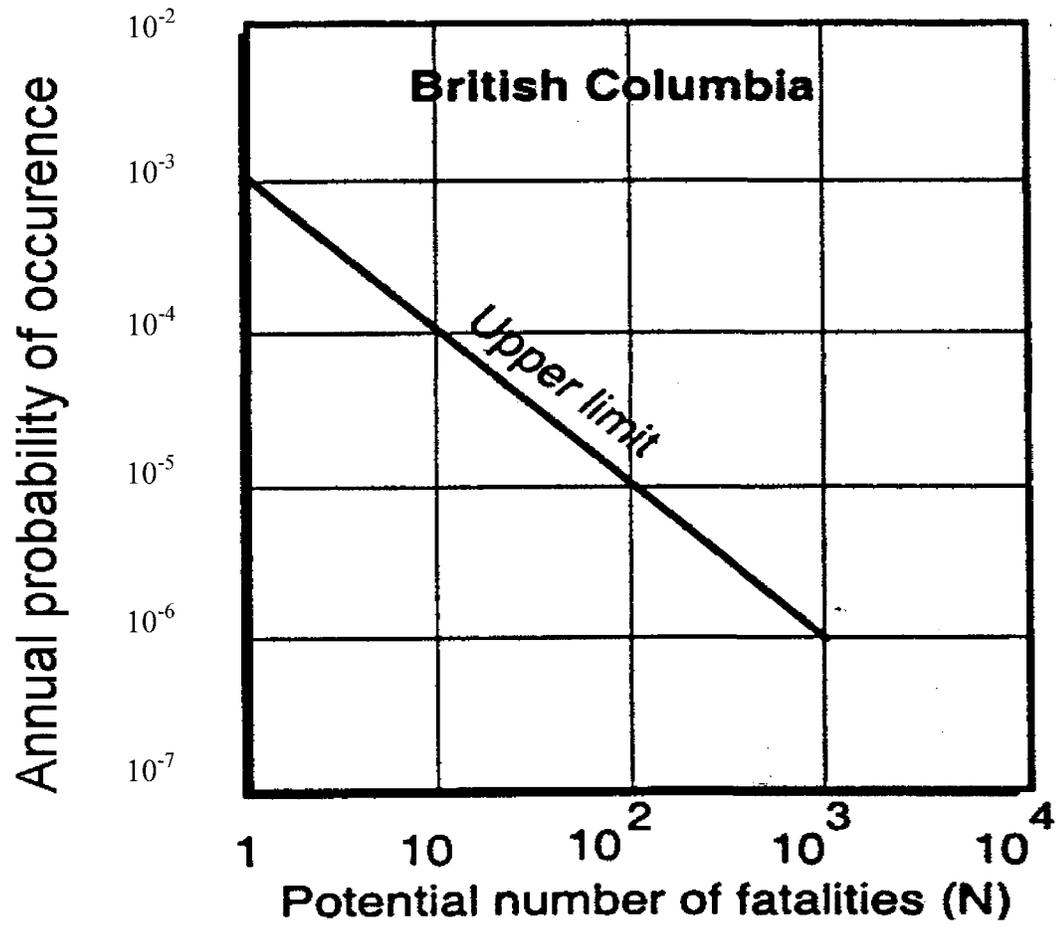


Figure 6.24 : Limite d'acceptabilité du risque de glissement de terrain au Canada suggérée par Evans (1997) pour la Colombie-Britannique.

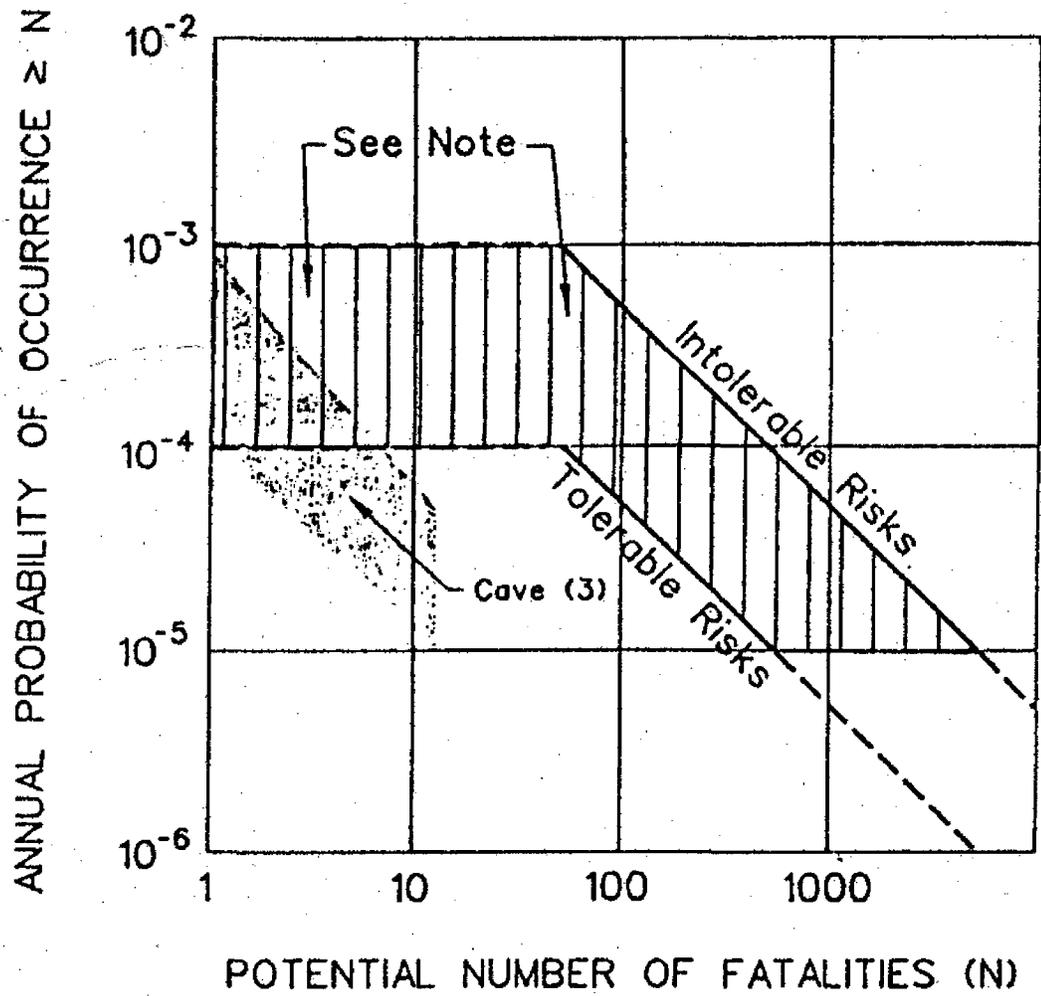


Figure 6.25 : Limites d'acceptabilité du risque de glissement de terrain suggérées par Morgan (1997) pour le Canada.

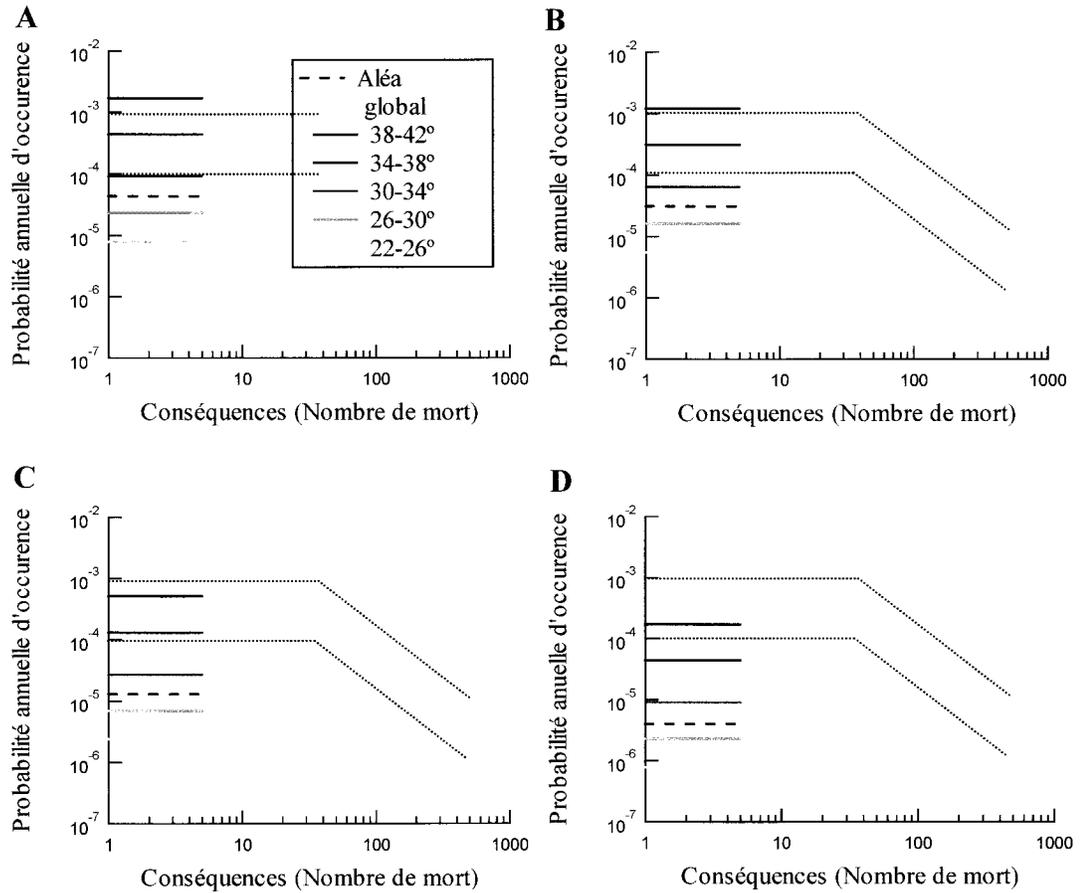


Figure 6.26 : Acceptabilité du risque en considérant une superficie de glissement de terrain de  $100 \text{ m}^2$  pour les talus et les quatre bandes de terrain situées à la base des talus; Ville de La Baie, secteur sud. Les lignes pointillées représentent les limites de Morgan (1997). A : talus et  $0 < D/H \leq 0.5$ . B :  $0.5 < D/H \leq 1.0$ . C :  $1.0 < D/H \leq 1.5$ . D :  $1.5 < D/H \leq 2.0$ .

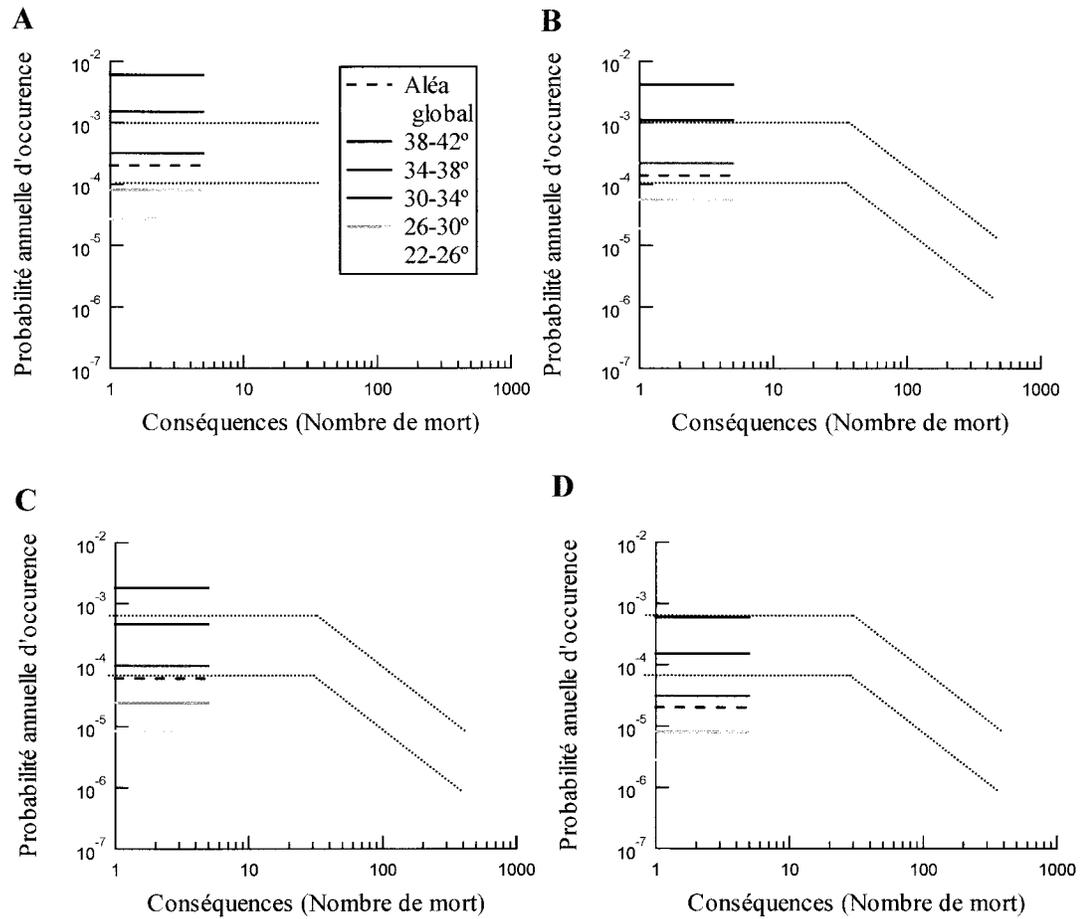


Figure 6.27 : Acceptabilité du risque en considérant une superficie de glissement de terrain de  $350 \text{ m}^2$  pour les talus, et les quatre bandes de terrain situées à la base des talus; Ville de La Baie, secteur sud. Les lignes pointillées représentent les limites de Morgan (1997). A : talus et  $0 < D/H \leq 0.5$ . B :  $0.5 < D/H \leq 1.0$ . C :  $1.0 < D/H \leq 1.5$ . D :  $1.5 < D/H \leq 2.0$ .

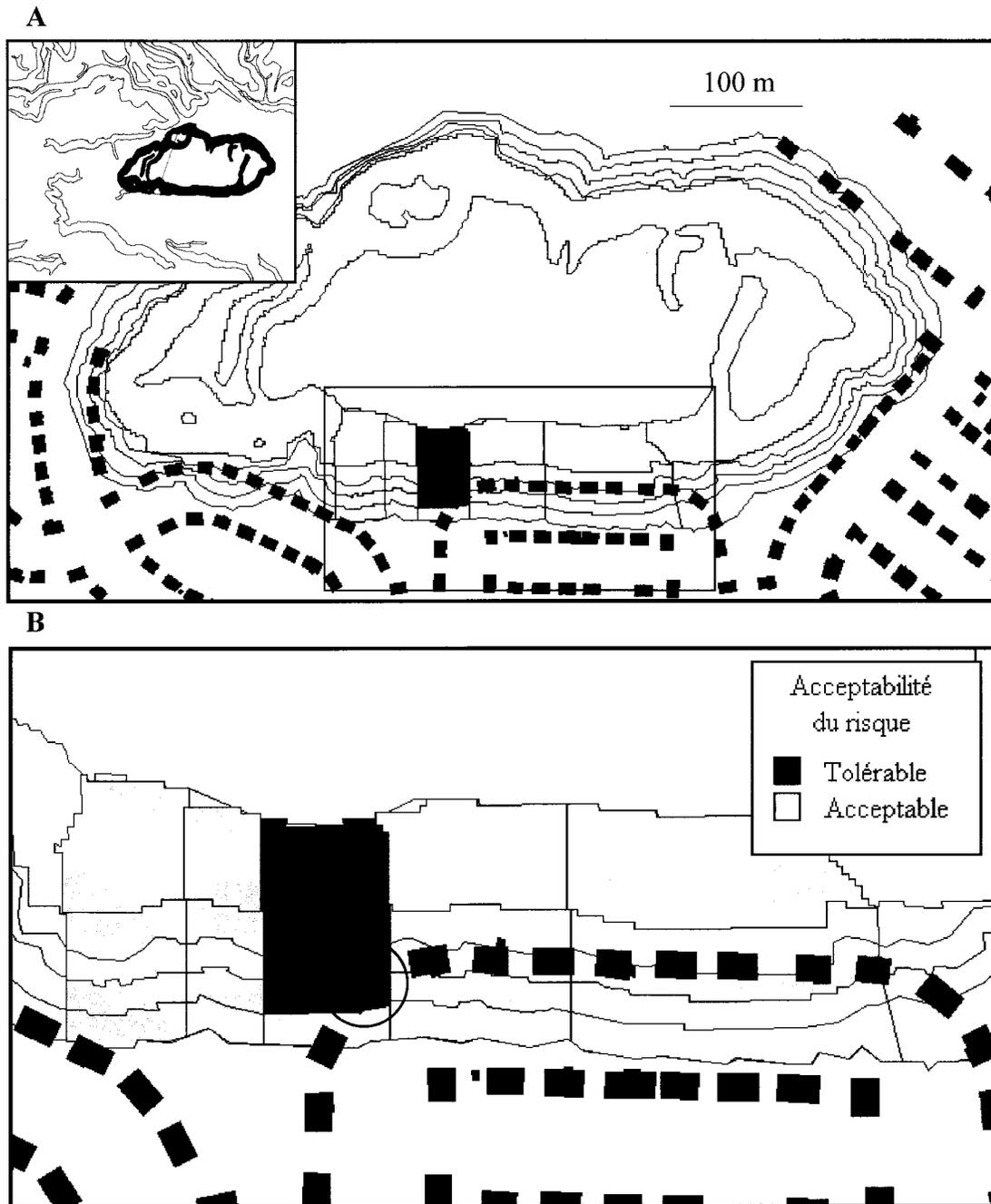


Figure 6.28 : Carte de l'acceptabilité du risque d'une partie du flanc sud de la butte des Bouleaux estimé en considérant une superficie de glissement de terrain de  $350 \text{ m}^2$ , secteur des Bouleaux. A : Butte des Bouleaux. B : Secteur de cartographie de la butte des Bouleaux.



Figure 6.29 : Rectification d'un talus instable du secteur des Bouleaux à l'arrière de la maison encerclée à la figure précédente, Ville de La Baie.

## **CHAPITRE 7 : DISCUSSION**

Ce chapitre présente les différents problèmes rencontrés tout au long de la démarche suivie pour évaluer l'aléa « glissement de terrain ». Tout d'abord, les erreurs associées à l'utilisation de MNA pour l'analyse de l'aléa sont discutées à la section 7.1. La section 7.2.1 traite des limites du modèle de la pente infinie. Enfin, les limites associées au modèle des indices de surface, tel que proposé dans le cadre de ce travail, sont présentées à la section 7.2.2.

### **7.1 Limites de l'analyse morphométrique**

Les analyses morphométriques ont permis d'extraire deux paramètres géométriques essentiels à l'évaluation de l'aléa, la pente et la hauteur des talus. En général, les résultats obtenus par analyse morphométrique, comme on l'a décrit au chapitre 4, se comparent bien aux valeurs mesurées sur le terrain, du moins au niveau des formes simples du relief. Cette méthode est tout de même limitée par :

- les artefacts produits par l'algorithme d'interpolation du modèle numérique d'altitude (MNA);
- la précision et la résolution du MNA;
- les procédures d'extraction des paramètres de forme.

Ces éléments représentent les principales causes d'erreur associées à l'intégration des SIG à l'évaluation de l'aléa « glissement de terrain »; ils sont décrits aux sections suivantes.

#### **7.1.1 Artefacts produits par la méthode d'interpolation**

La méthode d'interpolation par spline utilisée pour créer le MNA du secteur des Bouleaux produit des artefacts, d'une part en bordure des tuiles d'interpolation, et d'autre

part, au passage des courbes de niveau en terrain en pente très douce. Ces artefacts sont observés principalement dans les endroits à faible relief et sont considérés négligeables dans les zones de talus. Par conséquent, ces artefacts n'affectent probablement pas de façon significative les valeurs de pente et de hauteur calculées lors des opérations d'analyse morphométrique.

### **7.1.2 Précision et résolution du MNA**

Le MNA est produit à partir d'une carte hypsométrique dont les courbes de niveaux sont espacées de deux mètres. La précision estimée du MNA est donc de l'ordre du mètre en élévation. Une telle précision est absolument nécessaire pour identifier les talus du secteur des Bouleaux, et pour extraire des valeurs de pente globale et de hauteur totale représentatives de la réalité du terrain.

La résolution en plan du MNA est aussi un aspect à prendre en considération en analyse morphométrique puisque les éléments topographiques ayant une extension horizontale inférieure à la résolution du MNA ne sont pas détectés. Les talus du secteur des Bouleaux ont pu être détectés et caractérisés par des opérations d'analyse morphométrique puisque leur extension horizontale est généralement comprise entre 10 et 60 mètres, ce qui est nettement supérieur à la résolution du MNA qui est de 2x2 mètres. Par contre, plus la résolution est élevée, plus la taille du fichier est grande et par conséquent, le temps de calcul requis pour réaliser les analyses est important.

### **7.1.3 Procédures d'extraction des paramètres de forme**

Actuellement, aucune fonction n'est disponible dans les SIG existants pour extraire les valeurs de pente globale et de hauteur totale des talus. C'est pour cette raison qu'un algorithme a dû être développé pour caractériser ces paramètres de forme.

La procédure d'extraction simplifie les formes complexes du relief, ce qui peut engendrer des erreurs dans les valeurs de pente globale et de hauteur totale calculées. Les simplifications les plus importantes sont les suivantes :

- L'identification des talus est basée seulement sur le critère de la pente locale ( $14^\circ$ ).
- Les chemins de plus grande pente suivent des directions variant de  $45^\circ$  seulement, conformément à l'algorithme du D8 utilisé.
- Les chemins de plus grande pente sont sectionnés en plusieurs segments lorsque la direction varie de plus de  $45^\circ$ . Lorsque la forme des talus est complexe, les segmentations peuvent être multiples.
- La pente et la hauteur des talus sont calculées pour une géométrie de talus simplifiée à une surface rectiligne passant par le sommet et la base des talus.

## **7.2 Évaluation de l'aléa « glissement de terrain »**

Les résultats de l'évaluation de l'aléa « glissement de terrain » sont affectés par les erreurs commises lors de l'extraction des valeurs de pente et de hauteur obtenues par analyse morphométrique tel que décrit à la section 7.1.

### **7.2.1 Limites de l'analyse de l'aléa par le modèle de la pente infinie**

À l'intérieur du secteur des Bouleaux, les résultats concernant la stabilité obtenus par la méthode de la pente infinie indiquent qu'un grand nombre de pixels possèdent des facteurs de sécurité inférieurs à un. En effet, en utilisant les pentes définies localement et globalement, le pourcentage de pixels ayant un facteur de sécurité inférieur à un est de 13% et 11% respectivement. La valeur unitaire du facteur de sécurité correspond à un talus à l'équilibre limite. Pourtant, dans la presque totalité des endroits où le facteur de sécurité est inférieur à un, aucun signe d'instabilité n'est observé.

Le problème n'est pas spécifique à l'étude du secteur des Bouleaux, mais semble être caractéristique de l'ensemble des études décrites dans la littérature et utilisant cette approche.

C'est ce qu'obtiennent par exemple Van Westen et Terlien (1996) dans leur étude de stabilité par le modèle de la pente infinie, réalisée pour la ville de Manizales en Colombie. Ces auteurs observent qu'en utilisant un rapport élevé, mais représentatif, de l'épaisseur de la nappe phréatique à l'épaisseur de la masse de sol déstabilisée ( $m$ ) dans l'équation du facteur de sécurité, le pourcentage de pixels ayant un facteur de sécurité inférieur à un peut être extrêmement élevé. De plus, les auteurs concluent que pour certaines conditions normales de terrain, le nombre de pixels considérés instables est irréaliste pour la région considérée.

Pack et al. (1998) obtiennent aussi des facteurs de sécurité inférieurs à un en utilisant leur approche SINMAP (Stability INDEX Map), qui est basée sur le modèle de la pente infinie. Selon ces auteurs, en utilisant les paramètres les plus conservateurs, les facteurs de sécurité supérieurs à un indiquent les endroits inconditionnellement stables. Par contre, les zones où les facteurs de sécurité sont inférieurs à un sont considérés comme susceptibles d'être affectées par une rupture. Les auteurs ont utilisé leur approche pour évaluer la stabilité des talus d'un secteur au nord de la Colombie-Britannique. En utilisant les paramètres les plus conservateurs, une grande partie du secteur obtient des facteurs de sécurité inférieurs à un même si aucun signe d'instabilité n'est observé.

Puisque la valeur unitaire du facteur de sécurité correspond théoriquement à la limite inférieure de la stabilité, les facteurs de sécurité ne peuvent, à quelques erreurs près, être significativement inférieurs à un. C'est pourquoi une grande proportion de facteurs de sécurité inférieurs à un indique que le modèle de la pente infinie est mal adapté pour évaluer la stabilité à l'échelle régionale. Ce phénomène s'explique, en grande partie, par les hypothèses qui sont faites concernant :

- la géométrie des talus;

- le réseau d'écoulement dans les talus;
- la précision et la résolution du MNA.

### **7.2.1.1 Géométrie des talus**

Une des principales hypothèses associée au modèle de la pente infinie est celle concernant la géométrie des talus. La forme naturelle des talus est en effet assimilée à un plan incliné.

Lebuis et al. (1983) ont montré, à ce sujet, l'influence de la géométrie des talus sur leur stabilité (figure 7.1). Dans cette étude, les auteurs calculent le facteur de sécurité, à l'aide d'un modèle de rupture circulaire, pour cinq profils ayant des formes différentes, rectiligne, concave, convexe, concavo-convexe et convexo-concave. Pour réaliser les calculs, les paramètres géométriques et mécaniques utilisés (l'inclinaison moyenne, la pression interstitielle, la cohésion et l'angle de friction) sont identiques.

Les résultats montrent que la forme a une influence complexe sur le facteur de sécurité. Les facteurs de sécurité les plus faibles s'observent pour les talus convexo-concaves et les plus élevés pour les talus concavo-convexes. Cette différence s'explique par l'excès ou le déficit de la masse en pied de talus (rôle de butée) par rapport à un profil rectiligne. Comme les talus du secteur des Bouleaux sont caractérisés par une succession d'éperons et de creux (en général d'anciennes cicatrices de glissement de terrain), les facteurs de sécurité devraient être sous-estimés au niveau des éperons (convexo-concaves) et surestimés au niveau des dépressions (concavo-convexes). Cet écart de forme par rapport à un plan incliné explique donc probablement, du moins en partie, l'existence de facteurs de sécurité significativement inférieurs à un.

### **7.2.1.2 Réseau d'écoulement**

Une autre hypothèse majeure faite lorsqu'on utilise le modèle de la pente infinie concerne le réseau d'écoulement dans les talus. La nappe phréatique est supposée parallèle à la

surface du terrain qui est elle-même un plan incliné. Cette hypothèse faite sur le réseau d'écoulement limite sévèrement l'aptitude de ce modèle à prédire correctement les variations spatiales de la stabilité. En effet, le facteur de sécurité est surestimé dans les zones où la position de la nappe est plus en surface que celle assumée par le modèle, et sous-estimé dans le cas contraire.

De façon à tenir compte de ces variations, certains auteurs, tels que Van Westen et Terlien (1996), couplent un modèle hydrologique au modèle de la pente infinie pour évaluer la position de la nappe pour chacun des pixels de la région considérée. Ces modèles hydrologiques sont souvent très sophistiqués et nécessitent un grand nombre de paramètres dont les valeurs ne sont pas toujours bien connues. Le modèle de la pente infinie est un modèle qui simplifie la réalité, et il est peu probable que les résultats puissent être améliorés en y greffant ce genre d'approches complexes.

#### **7.2.1.3 Précision du MNA**

La précision des prédictions faites par le modèle de la pente infinie est pour le mieux égale à la précision du MNA. Ces éléments ont été discutés à la section 7.1.2.

### **7.2.2 Limites de l'analyse de l'aléa par la méthode des indices de surface**

La méthode des indices de surface a permis de quantifier l'aléa et d'estimer l'acceptabilité du risque pour l'ensemble du secteur d'étude en suivant une série d'étapes basées sur le cadre général d'analyse du risque (figure 2.1). Par contre, puisque l'analyse est réalisée à l'échelle régionale, plusieurs simplifications ont dû être faites à chacune des étapes de l'analyse. Par conséquent, la fiabilité des résultats obtenus est limitée par ces simplifications. Celles-ci sont discutées aux sections suivantes.

#### **7.2.2.1 Intensité**

Dans la méthode proposée, seulement deux paramètres sont utilisés pour quantifier l'intensité du phénomène :

- la superficie des glissements de terrain au niveau des talus;
- la distance d'étalement des débris à la base des talus.

Pour estimer la distance d'étalement, seule la hauteur du talus intervient. D'autres facteurs importants comme la pente, la position de la niche d'arrachement dans le talus, les propriétés mécaniques des matériaux à l'état intact et remanié, etc., ne sont pas pris en compte. Cela revient à dire que plus un talus est haut, plus les débris iront loin, ce qui n'est pas entièrement faux, mais incomplet.

### **7.2.2.2 Facteurs discriminants de l'instabilité**

#### **7.2.2.2.1 Facteurs révélateurs**

Un seul facteur révélateur a été considéré dans l'analyse de l'aléa, c'est-à-dire l'absence et la présence de glissements de terrain historiques.

Parmi les 51 années considérées lors de l'évaluation de l'aléa, seulement 10 ont fait l'objet d'une photo-interprétation afin d'identifier et de répertorier les glissements de terrain historiques. Pour les autres années, il a été admis, sur la base des informations disponibles régionalement, que deux glissements de terrain pouvaient se produire chaque année.

La durée sur laquelle l'inventaire des glissements a été fait (51 ans) est considérée suffisamment longue pour permettre d'avoir une évaluation globalement représentative de l'ensemble des fluctuations hydrométéorologiques qui peuvent être enregistrées sur ce territoire.

#### **7.2.2.2.2 Facteurs prédisposants**

De nombreux facteurs prédisposants ont été négligés dans l'analyse de l'aléa. Au niveau local, c'est-à-dire à l'échelle du site, l'analyse devrait bien entendu considérer l'ensemble des facteurs qui prédisposent à l'instabilité. À l'échelle régionale, on peut admettre que les facteurs prédisposants les plus critiques pour l'occurrence de glissements de terrain superficiels sont la pente et la hauteur global des talus, ainsi que la présence d'une croûte argileuse altérée et fissurée.

Deux facteurs prédisposants ont été considérés dans l'analyse de l'aléa :

- la géologie;
- la géométrie des talus.

La géométrie des talus, plus précisément la pente globale et la hauteur totale, a été caractérisée pour le secteur des Bouleaux uniquement. Afin d'extrapoler les résultats obtenus pour le secteur des Bouleaux à l'ensemble du secteur d'étude, il a fallu admettre que le secteur des Bouleaux est, d'un point de vue géomorphologique, représentatif du secteur sud de Ville de La Baie. Puisque les deux secteurs se situent à l'intérieur du même bassin sédimentaire, avec une histoire géologique a priori unique à l'échelle du bassin, cette hypothèse semble acceptable dans le cadre de ce travail.

#### **7.2.2.2.3 Facteurs déclencheurs**

Les facteurs déclencheurs n'ont pas été considérés dans l'analyse parce que la relation de cause à effet, par exemple entre les précipitations ou les séismes, et la stabilité sont très difficiles à établir.

#### **7.2.2.3 Aléa**

En phase de rupture, l'aléa est évalué seulement en fonction de la pente sans considérer la hauteur des talus. En effet, la hauteur n'intervient pas dans l'analyse si ce n'est dans la définition des talus potentiellement instables (hauteur supérieure à 5 m).

Pour la phase de post-rupture, à l'inverse, seules les hauteurs sont prises en compte indépendamment de la pente des talus.

C'est pour ces raisons que les niveaux d'aléa, tels qu'ils ont été quantifiés, ont une signification seulement à l'échelle du secteur de Ville de La Baie. Les valeurs obtenues donnent simplement au mieux une distribution comparative de l'aléa sur l'ensemble du territoire étudié mais ne peuvent pas être utilisées au niveau d'un talus donné.

Il est important par ailleurs de commenter les résultats présentés à la figure 6.2. La probabilité calculée à partir de l'expression 6.2 est en effet plus élevée pour les petits glissements de terrain que pour les grands, ce qui est en première analyse contraire à l'intuition. Les glissements de grandes dimensions sont plus rares que ceux de petites dimensions (Lebuis et al. 1983; Evans, 1997). D'un point de vue formel, l'expression 6.2 devrait intégrer un facteur de pondération tenant compte de la récurrence temporelle d'un événement d'une magnitude donnée. Or, pour les glissements superficiels observés dans la région d'étude, la variabilité en terme de superficie est très limitée comme le montre la figure 6.2. C'est pour cela que la fréquence d'occurrence dans le temps a été considérée identique pour ce type de glissement de terrain. Tel qu'indiqué à la section 6.4.1.1, ces valeurs calculées pour deux superficies donnent simplement une idée de la variation de la probabilité.

#### **7.2.2.4 Estimation du risque**

##### **7.2.2.4.1 Éléments exposés**

Les éléments exposés qui sont considérés dans l'analyse sont limités à la population occupant les maisons unifamiliales. Par contre, en réalité, d'autres éléments sont aussi

exposés aux glissements de terrain superficiels. C'est le cas entre autres, des rues, des cabanons, des lignes de transport électrique, etc.

#### **7.2.2.4.2 Conséquences de la rupture**

Dans cette étude, la vulnérabilité n'est pas estimée formellement, par exemple en identifiant des matrices dites de vulnérabilité ou des fonctions d'endommagement. L'approche suivie propose plutôt d'évaluer simplement les conséquences prévisibles du danger en se basant sur quelques cas de glissements de terrain semblables à ceux considérés dans cette étude, et ayant provoqué des dégâts ou ayant fait des victimes dans la région du Saguenay-Lac St-Jean (cas de la rue McNicoll, 1996; du Petit Saguenay, 1996; de St-Fulgence, 1995; de l'Anse St-Jean, 1928; D. Perret, 2000, communication personnelle). Dans le secteur d'étude, les conséquences envisagées pourraient ainsi correspondre aux décès des résidents d'une maison, c'est-à-dire de une à quatre personnes, en faisant l'hypothèse que les débris ont assez d'énergie pour endommager suffisamment les maisons, et faire des victimes. Il est par contre évident que la force d'impact des débris, et donc leur pouvoir destructeur, diminue avec la distance d'étalement en pied de talus. Cet aspect important n'est pas considéré dans cette étude, car on fait l'hypothèse que l'énergie reste la même quelle que soit la distance. Cette hypothèse simplificatrice est très pessimiste, et a pour conséquence de surestimer le risque, ceci d'autant plus que l'on s'éloigne de la base du talus.

#### **7.2.2.4.3 Risque**

Le risque est simplement estimé en croisant l'aléa et les conséquences qu'un glissement de terrain peut avoir à l'aide d'un diagramme aléa-conséquences (IUGS, 1997; Morgan, 1997). Le risque n'est donc pas exprimé sous une forme probabiliste, c'est-à-dire variant de 0 à 1. Il est à noter que, nonobstant toutes les hypothèses simplificatrices et les paramètres qui n'ont pas été pris en considération lors des différentes étapes de la méthodologie, le choix des valeurs retenues a toujours été fait du « côté sécuritaire ». Le niveau de risque ainsi estimé est donc probablement plus élevé qu'il ne l'est en réalité.

### 7.2.2.5 Acceptabilité du risque

Plusieurs critères d'acceptabilité du risque sont proposés dans la littérature. Ces critères varient selon la nature du phénomène considéré, et aussi selon les contextes sociétaux. Les critères d'acceptabilité du risque varient aussi beaucoup d'un auteur à l'autre et restent subjectifs.

Ils comportent des implications aux plans social, économique, environnemental, politique et légal (Morgan, 1997; Leroueil et Locat, 1998). Les critères d'acceptabilité sont donc influencés par le comportement et la perception sociale face au risque (Fell, 1994). Ainsi, pour appliquer de tels critères d'acceptabilité du risque de glissement de terrain, ces aspects doivent être reconnus et considérés dans l'évaluation de l'acceptabilité du risque d'une région donnée. Parmi les divers aspects concernant cette influence sociale sur l'acceptabilité du risque on mentionne, entre autres, que :

- la population accepte des niveaux de risque plus élevés quand le risque est volontaire, donc assumé (exemple : accidents de voiture), que lorsque le risque est involontaire, c'est-à-dire imposé, et pour lequel la population n'a pas de contrôle direct (Fell, 1994);
- l'acceptation du risque est plus grande pour les dangers naturels (exemples : glissements de terrain, inondations) que pour les ruptures de structures anthropiques (exemple : barrages) (Morgan, 1997);
- la population est plus tolérante aux risques existants qu'aux nouvelles situations (Morgan, 1997).

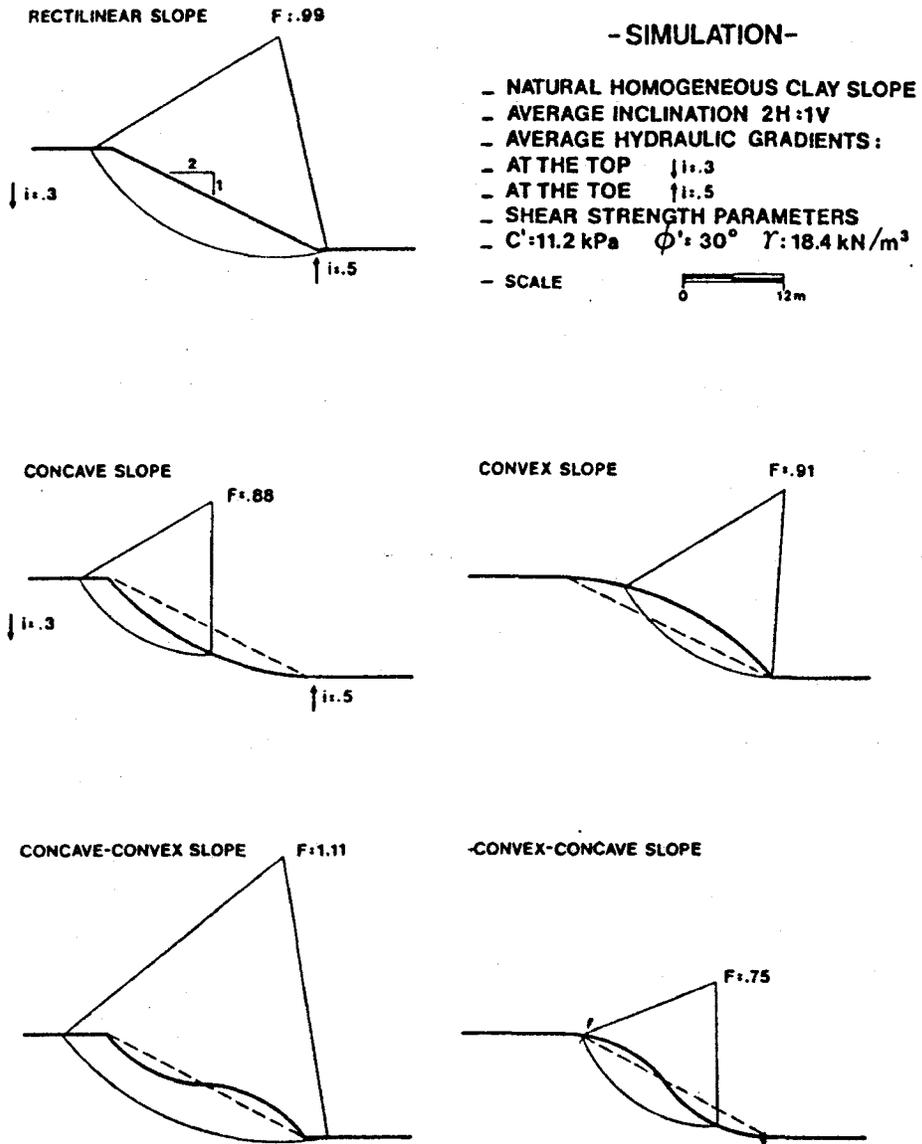


Figure 7.1 : Facteurs de sécurité calculés pour différentes géométries de talus (tiré de Lebus et al., 1983).

## CHAPITRE 8 : CONCLUSIONS

La gestion et la réduction des risques de glissement de terrain à l'échelle régionale sont généralement réalisées à l'aide d'une cartographie de l'aléa. Étant donnée la complexité des méthodes quantitatives, les méthodes d'évaluation de l'aléa sont principalement qualitatives à cette échelle. Les méthodes couramment employées sont donc incomplètes puisque toute politique de gestion des risques naturels devrait idéalement s'appuyer sur une évaluation quantitative en raison des implications socio-économiques qui y sont reliées. Par contre, avec le développement des systèmes d'information géographique (SIG), l'évaluation quantitative de l'aléa à l'échelle régionale semble de plus en plus envisageable par l'utilisation d'analyses morphologiques complexes du terrain naturel.

L'objectif de cette étude consistait à développer une méthode d'évaluation quantitative de l'aléa pour les glissements de terrain superficiels du secteur de Ville de La Baie, au Saguenay-Lac-Saint-Jean, en s'appuyant sur les fonctionnalités des SIG. L'utilisation de ces systèmes a permis principalement de caractériser, par analyse morphométrique, la pente globale et la hauteur totale des talus, lesquels constituent des caractéristiques géométriques essentielles à l'évaluation de l'aléa.

Le modèle d'analyse le plus couramment utilisé dans la littérature où l'on intègre les SIG à l'évaluation quantitative de l'aléa, est le modèle de la pente infinie. Ce même modèle a été appliqué au secteur d'étude en première partie de ce travail. L'importante proportion de facteurs de sécurité inférieurs à un, obtenue sur l'ensemble du secteur, a permis de montrer que le modèle de la pente infinie est mal adapté à l'évaluation régionale de l'aléa. Ces résultats ont été attribués aux hypothèses posées lors de l'application du modèle, entre autres, la géométrie des talus, le réseau d'écoulement dans les talus, ainsi que la précision et la résolution des données de base utilisées.

Dans cette étude, une méthode d'évaluation quantitative de l'aléa basée sur la notion d'indice de surface a été développée. L'indice de surface se définit comme le rapport de la surface affectée par les glissements de terrain à la surface totale considérée. Deux

procédures d'évaluation de l'aléa ont été proposées. La première évalue l'aléa global en considérant la totalité des glissements observés sur l'ensemble des talus argileux du secteur. Les résultats obtenus pour l'aléa global varient entre  $0.4 \times 10^{-5}$  et  $2.0 \times 10^{-4}$ . La seconde procédure évalue l'aléa spécifique en fonction de la pente des talus. Les résultats montrent alors une nette augmentation de l'aléa avec la pente, variant de  $2.8 \times 10^{-5}$  à  $6.0 \times 10^{-3}$ .

Le risque a ensuite été estimé en combinant l'aléa ainsi défini aux conséquences associées à la rupture d'un talus, évaluées entre un et quatre décès. Ces résultats ont été comparés au critère d'acceptabilité du risque proposé par Morgan (1997). Selon ce critère, le risque serait acceptable dans la majorité des zones considérées « potentiellement instables » à l'intérieur du secteur d'étude. Pour les zones où la pente est supérieure à  $30^\circ$  et inférieure à  $38^\circ$ , le risque serait à peu près tolérable. Par contre, les endroits pour lesquels la pente est supérieure à  $38^\circ$  présenteraient un risque intolérable, toujours selon le critère de Morgan (1997).

L'objectif initial de cette étude, à savoir l'élaboration d'une méthode permettant d'évaluer de façon quantitative l'aléa « glissement de terrain », a été atteint. L'apport des SIG à la quantification de l'aléa semble prometteur, particulièrement pour le traitement de grandes quantités de données cartographiques et pour la caractérisation des paramètres géométriques du terrain, comme les pentes globales et les hauteurs, un aspect essentiel à l'évaluation de l'aléa. Par contre, aucun algorithme permettant d'extraire ces paramètres n'est disponible actuellement dans les SIG commerciaux, et ceux développés dans le cadre de cette étude nécessiteraient d'être améliorés. En effet, ces algorithmes fournissent des résultats comparables aux mesures faites sur le terrain dans les endroits où la morphologie est simple, ce qui n'est pas toujours vrai au niveau des talus de formes complexes. Une autre contrainte majeure liée à l'utilisation des SIG reste la disponibilité de modèles numériques d'altitude (MNA) à haute précision et haute résolution. Ces données sont à la base de l'analyse morphométrique. De plus, plusieurs simplifications et hypothèses ont dû être faites à chacune des étapes de la méthode

d'évaluation de l'aléa proposée, ce qui affecte probablement la représentativité des résultats obtenus.

L'ensemble de ce travail est un exercice méthodologique qui a permis d'identifier les difficultés rencontrées lors de la cartographie quantitative de l'aléa à une échelle régionale ou semi-régionale. Seules les pentes des talus ont été considérées pour estimer l'aléa lors de la phase de rupture. Il serait intéressant de compléter cette approche en intégrant la hauteur des talus, et peut-être aussi d'autres paramètres de forme telles que les différentes courbures des talus.

Il est bon de rappeler que même si les SIG permettent de traiter rapidement une importante somme de données géoréférencées, l'efficacité de toute méthode d'évaluation de l'aléa à l'échelle régionale repose sur la qualité des données de base utilisées. De plus, ces données disponibles pour une région sont généralement fragmentaires et imparfaites, ce qui nécessite de faire appel à des hypothèses simplificatrices. Les méthodes utilisant les SIG ne permettent pas de se soustraire de ces contraintes affectant la qualité des résultats qui demeurent approximatifs. Ainsi, la méthode proposée dans ce travail est un exercice méthodologique qui ne peut se substituer, dans son état actuel, à des décisions raisonnées et aux jugements des spécialistes dans ce domaine.

**ANNEXE A**

**SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE, MODÈLES NUMÉRIQUES  
D'ALTITUDE ET ANALYSE MORPHOMÉTRIQUE**

## **A1 Les systèmes d'information géographique**

### **A1.1 Généralités**

Les systèmes d'information géographique (SIG) peuvent être considérés comme un ensemble de logiciels et de procédés conçus afin de permettre la cueillette, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et la représentation de données à référence spatiale (Goodchild et al., 1996). Les SIG permettent de résoudre des problèmes complexes de gestion et de planification du territoire. Ils permettent aussi de mieux comprendre un territoire particulier en combinant plusieurs couches d'information reliées à ce territoire (figure A1). Selon les domaines d'utilisation, les SIG sont aussi appelés « systèmes d'information à référence spatiale (SIRS) », ou encore « systèmes d'information sur le territoire (SIT) ».

Les premiers SIG expérimentaux datent du début des années 1960, mais le développement réel de ces systèmes s'est accéléré au cours des années 80 avec la disponibilité grandissante des ordinateurs personnels (Aronoff, 1989).

Les SIG combinent différents domaines technologiques et disciplines traditionnelles qui fournissent chacun une contribution technique à la construction des SIG tels que la géographie, la cartographie, la télédétection, la photogrammétrie, l'arpentage, la géodésie, les statistiques, la recherche opérationnelle, l'informatique et les mathématiques (Goodchild et al., 1996).

L'information à l'intérieur d'un SIG peut être représentée sous deux formes, des cartes et des tableaux. Par exemple, à la figure A2, la carte indique les provinces du Canada, et l'information reliée à cette carte (population et superficie) est donnée sous forme de tableau.

### **A1.2 Formats vectoriel et matriciel**

À l'intérieur d'un SIG, la conversion des éléments du monde réel en objets discrets géoréférencés se réalise selon deux principaux formats de données : le format vectoriel et le format matriciel (figure A3). Le format vectoriel utilise des objets géométriques (lignes, points, polygones) pour décrire la position et la forme des entités géographiques. La position de chaque entité est définie par des coordonnées d'un système de référence. Le format matriciel, aussi appelé format « raster », divise l'ensemble de la zone étudiée en une grille régulière de pixels, généralement de forme carrée. La localisation d'une entité géographique est définie par la rangée et la colonne que le pixel occupe.

D'une façon générale, le format matriciel informe sur ce qui se passe en tout points, tandis que le format vectoriel informe essentiellement sur l'endroit où il se passe quelque chose (Goodchild et al., 1996). Selon les éléments à représenter et la nature des opérations ou des analyses à effectuer, il peut être plus avantageux d'utiliser une représentation vectorielle ou matricielle. Par exemple, les opérations de nature topologique sont plus simples à effectuer en mode vectoriel, tandis que le mode matriciel est généralement préféré pour les analyses morphologiques des terrains.

## **A2 Les modèles numériques d'altitude**

Les modèles numériques d'altitude (MNA) sont une représentation numérique simplifiée de la surface topographique d'un territoire par un ensemble discret d'altitudes distribuées à la surface du terrain. Intégrés dans un SIG, les MNA jouent un rôle important en terme d'analyse spatiale, entre autre, pour déterminer des attributs de terrain tels que la pente et l'orientation.

Les MNA sont généralement présentés sous deux formats qui s'apparentent aux formats de représentation des données dans les SIG : le format matriciel (raster) et le format vectoriel (réseau triangulaire irrégulier). Dans un MNA en format matriciel, les valeurs d'altitude sont distribuées régulièrement sur une grille à maille le plus souvent carrée, correspondant à des pixels (figure A4). Les réseaux triangulaires irréguliers (RTI)

consistent en un ensemble de mesures d'altitude disposées de façon irrégulière sur la surface topographique, et interconnectées de façon à créer un réseau de facettes triangulaires (figure A5).

### **A2.1 Acquisition des données d'altitudes**

Les données d'altitude nécessaires à la production des MNA en format matriciel ou vectoriel peuvent être obtenues :

- par arpentage;
- par photogrammétrie;
- par acquisition directe aéroportée ou satellitaire (LIDAR, IKONOS, interférométrie RADAR, etc.).

### **A2.2 Production des MNA**

Les MNA sont produit par différentes techniques selon les sources de données présentées à la section précédente.

Dans le cas des données d'arpentage, la densité de points est en général trop faible pour qu'il soit possible de produire un MNA représentant correctement la surface topographique. Ces données servent généralement à compléter d'autres sources de données d'altitude.

La photogrammétrie permet, à partir de couplets stréréoscopiques de photographies aériennes (le plus souvent), d'extraire des courbes de niveau d'égale altitude. Une série de points cotés est attribuée le long de ces courbes. Ensuite, une technique d'interpolation spatiale des altitudes (par exemple voisinage naturel, krigeage, splines, etc.) est appliquée à l'ensemble de ces points afin de déterminer l'altitude pour chaque maille du MNA en format matriciel recherché.

Finalement, dans le troisième cas, le MNA peut-être obtenu par des algorithmes automatiques de traitement d'image qui sont appliqués sur des couples d'images numériques.

### **A2.3 Précision et résolution des MNA**

L'exactitude avec laquelle un MNA représente la surface topographique dépend de la précision et de la résolution qui lui sont attribuées.

En général, même si la précision d'un MNA ne peut pas être connue précisément, elle peut être évaluée globalement pour les données obtenues par photogramétrie en fonction de :

- l'échelle des courbes de niveau utilisées et de leur équidistance, et ou;
- l'échelle des images utilisées.

En effet, la précision du MNA est au mieux égale à celle des données de base utilisées pour le produire. La précision des données de base dépend des méthodes utilisées ainsi que de l'expérience des opérateurs dans l'acquisition de ces données.

La résolution du MNA, qui correspond à la taille des pixels, est importante dans la représentation d'éléments topographiques tels que les talus, les crêtes, les pics, les cols, etc. En effet, les éléments ayant une extension horizontale inférieure à la résolution ne sont pas représentés par le MNA.

## **A3 Quelques exemples d'analyse morphométrique**

### **A3.1 Généralités**

Dans les SIG, différentes opérations d'analyse morphométrique du terrain sont disponibles. Ces opérations permettent d'identifier et de caractériser certains paramètres

de forme (pente, orientation, courbures), et certaines unités de terrain (bassin de drainage, ligne de partage des eaux, etc.).

Pour réaliser ce type d'analyse, les MNA constituent l'information de base. Le choix du format du MNA à utiliser dépend des données de base, du niveau de détail recherché ainsi que du logiciel utilisé. La structure régulière des données d'altitude attribuée au format matriciel rend généralement les opérations d'analyse morphométrique plus faciles par rapport aux RTI.

Cette section traite de la caractérisation, en format matriciel, de trois paramètres courants en analyse morphométrique, la pente, l'orientation et le flux. La caractérisation de ces paramètres est basée sur des opérations de voisinage appliquées sur un MNA. Pour ce faire, une sous-matrice de dimension définie par l'utilisateur (par exemples : 3x3, 5x5, etc.), et centrée sur le pixel à évaluer, est appliquée de façon répétitive sur l'ensemble du MNA (figure A6). Toutes les valeurs d'altitude de la sous-matrice sont reliées au pixel central pour lequel le paramètre est évalué.

### **A3.2 Extraction de la pente**

La pente est définie comme le taux de changement d'altitude entre les pixels de la sous-matrice. Plusieurs algorithmes de calcul automatique de la pente sont proposés dans les différents logiciels de SIG. Des descriptions de ces algorithmes sont présentées dans la littérature, entre autres dans les travaux de Dunn et Hickey (1998), Florinsky (1998), Mitasova et Hofierka (1993), Skidmore (1989), Zevenbergen et Thorne (1987).

Certains algorithmes évaluent la pente entre le pixel central et les pixels avoisinants en calculant simplement la différence d'altitude entre ces deux pixels. Dans ce cas, l'hypothèse que la pente entre deux pixels adjacents est linéaire est faite. La pente entre deux pixels correspond donc au rapport de la différence d'altitude à la distance horizontale qui sépare le centre de ces deux pixels. La valeur de pente attribuée au pixel central correspond à la plus grande valeur calculée. C'est le cas de l'algorithme dit du D8

(Tarboton, 1997) pour lequel la pente est calculée entre le pixel central et les huit pixels entourant ce dernier (figure A7).

D'autres algorithmes, plus complexes, calculent la pente à partir d'une surface passant ou non par les points d'altitude de la sous-matrice. Un exemple de ce type de surface passant par les neuf points d'une sous-matrice de dimension 3x3 est présenté à la figure A8. La pente correspond à la dérivé première de l'altitude de l'équation associée à la surface. C'est ce que proposent Mitasova et Hofierka (1993) dans leur algorithme de calcul de la pente disponible dans le logiciel de SIG GRASS (Geographic Resources Analysis and Support System). C'est cette procédure qui a été utilisée dans cette étude pour calculer les pentes locales.

### **A3.3 Extraction de l'orientation et du flux**

L'orientation, tout comme le flux, correspond à la composante directionnelle de la pente, c'est-à-dire la direction de la pente la plus forte. Ces paramètres indiquent la direction que suivrait, sous l'action de la gravité, une bille placée à chacun des pixels. Dans une sous-matrice 3x3, l'orientation et le flux peuvent prendre par exemple huit directions dans le cas d'un algorithme de calcul de pente dit du D8 (figure A7). Un exemple de représentation du flux à l'intérieur d'une matrice est présenté à la figure A9.

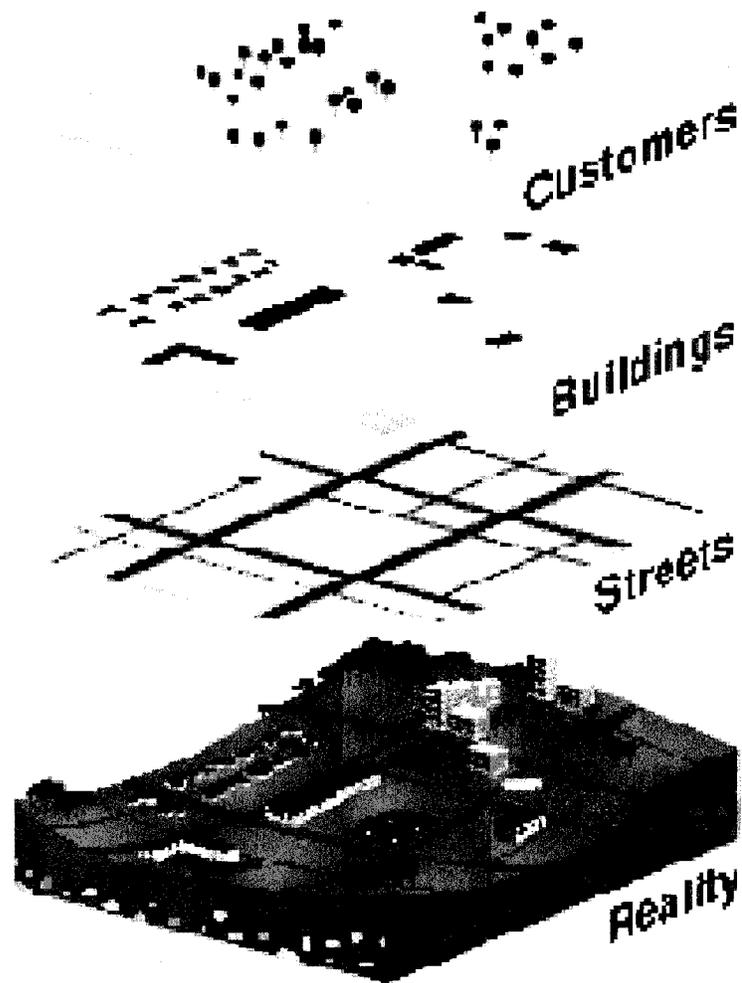


Figure A1 : Représentation de la réalité à l'aide de plusieurs couches d'information à l'intérieur d'un SIG (tiré de ESRI, Redlands, Californie, 2000-2001).

A



B

Nom de la province	Population (1994)	Superficie (km <sup>2</sup> )
Alberta	2 545 555	663 400
Colombie-Britannique	3 282 060	963 100
Manitoba	1 091 940	650 300
Nouveau-Brunswick	723 900	72 910
Terre-Neuve	568 475	413 200
Nouvelle-Écosse	899 940	57 440
Ontario	10 084 885	5 854
Île du Prince-Edward	129 765	1 510 000
Québec	6 895 965	650 200
Saskatchewan	988 930	465 000
Territoire du Yukon	27 795	1 380 000
Territoires du Nord-Ouest	57 650	2 178 000
Nunavut	0	988 200

Figure A2 : Représentation de l'information à l'intérieur d'un SIG. A : Carte. B : Tableau.

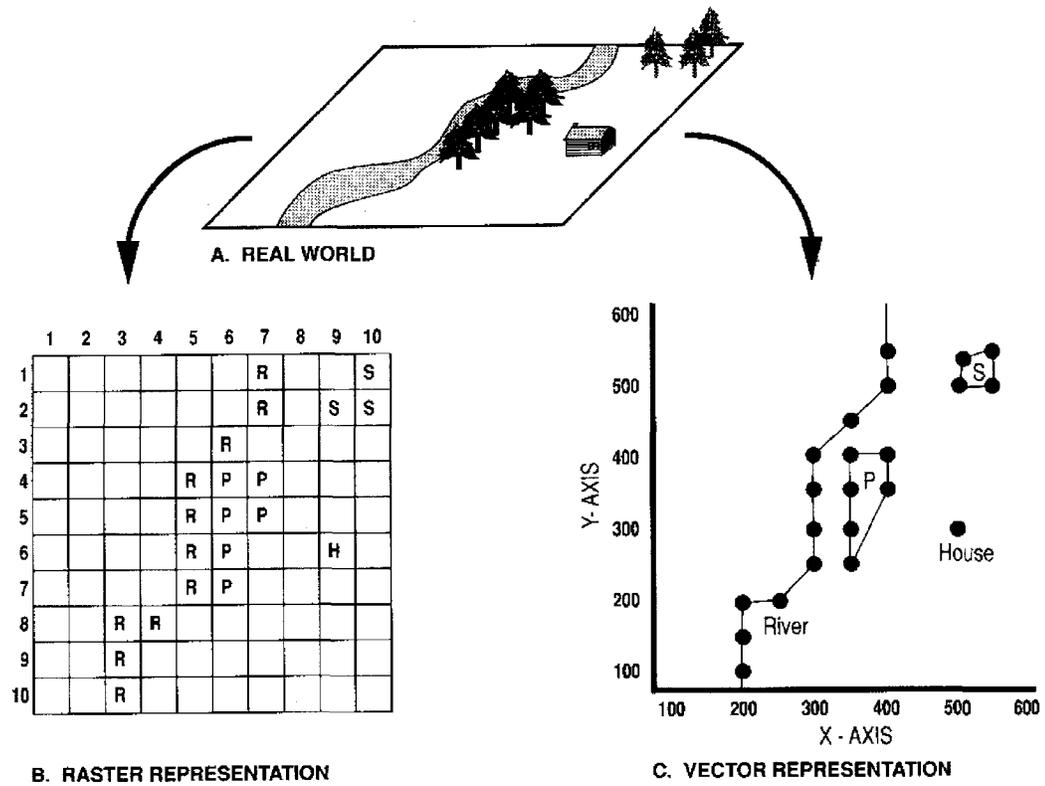


Figure A3 : Conversion des éléments du monde réel (A) en objets discrets géoréférencés selon le format matriciel (B), et selon le format vectoriel (C) (tiré de Goodchild et al., 1996).

6	9	9	11	12	12	12	12	9	6
9	15	16	18	21	21	19	20	15	8
10	18	22	25	26	26	25	25	20	11
11	19	27	29	30	31	29	28	23	14
11	20	28	33	35	34	34	31	25	13
12	22	29	34	37	37	35	32	24	13
12	22	29	33	35	36	34	29	24	14
9	17	25	29	34	34	32	28	23	13
7	13	18	22	27	27	26	23	18	11
5	8	10	14	15	16	14	12	11	6

Figure A4 : Exemple de MNA en format matriciel; chaque valeur de pixel correspond à l'altitude de l'élément de surface considéré.

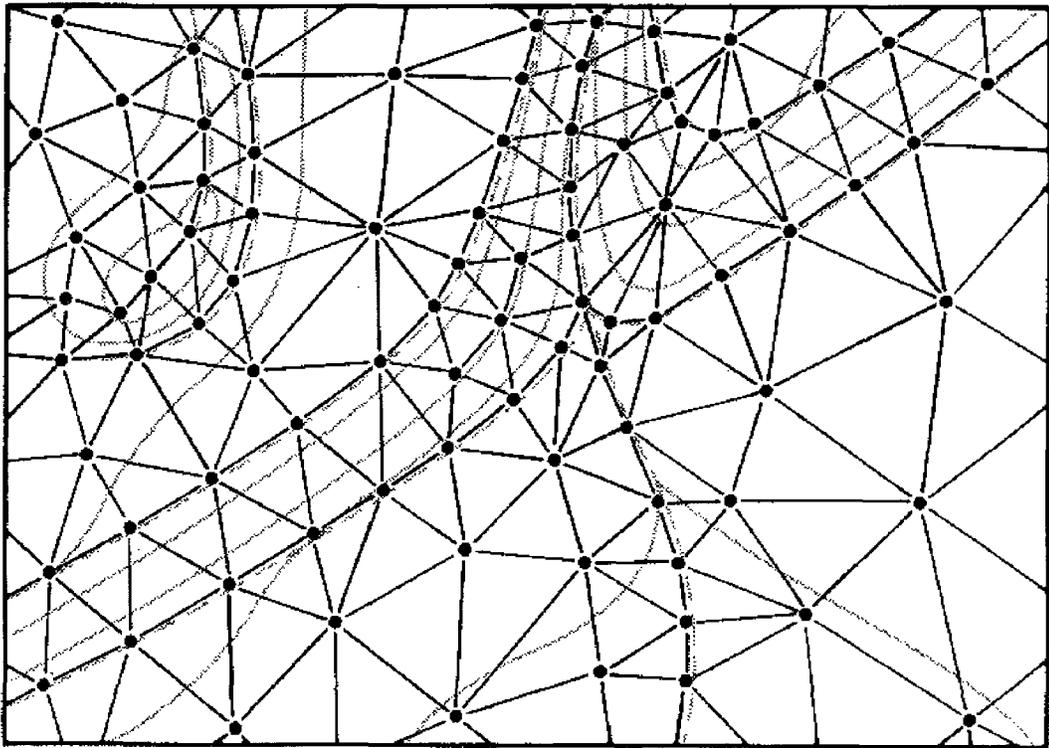


Figure A5 : Réseau triangulaire irrégulier (RTI) (tiré de Aronoff, 1989). Les points correspondent aux endroits où l'altitude est connue.

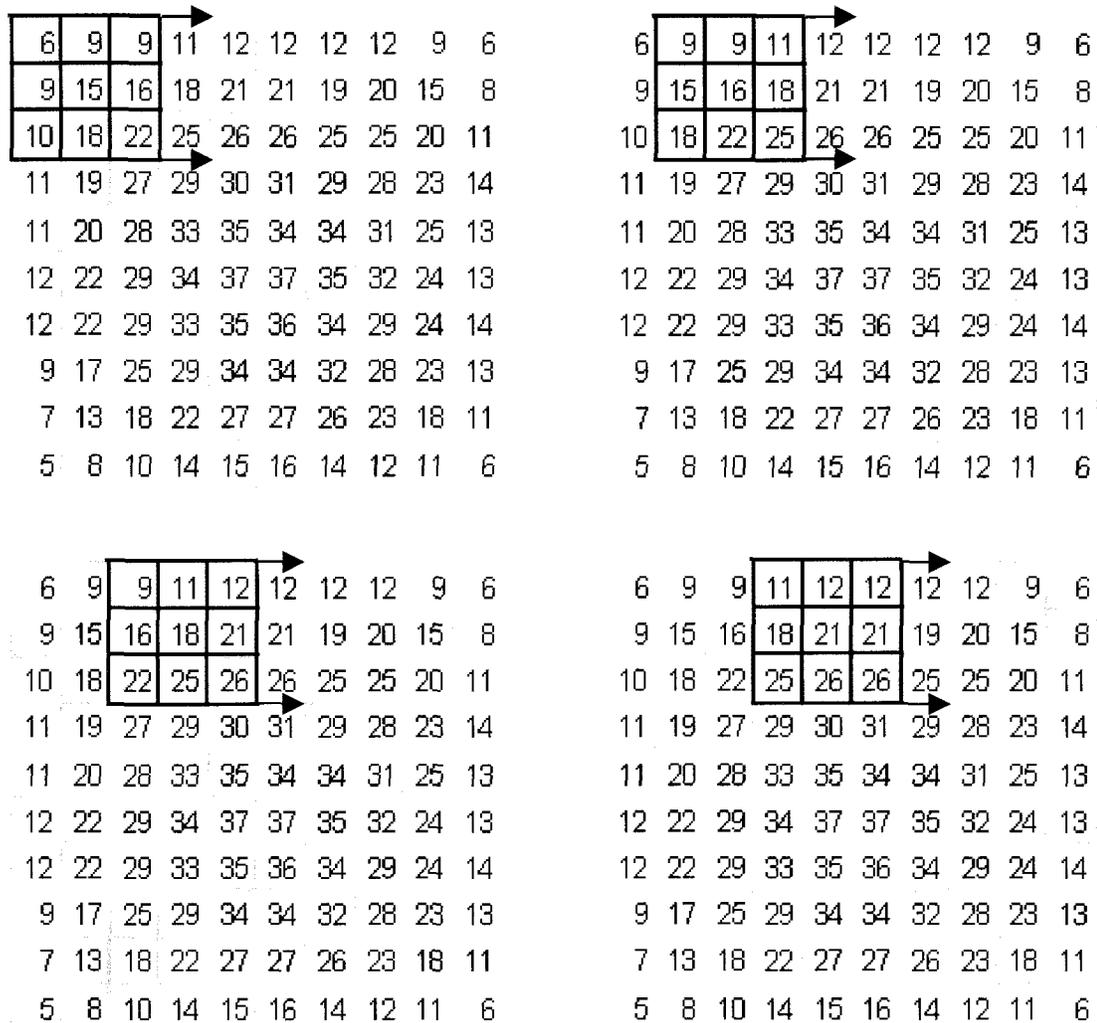


Figure A6 : Analyse de voisinage par une sous-matrice de dimension 3x3 se déplaçant sur l'ensemble d'un MNA.

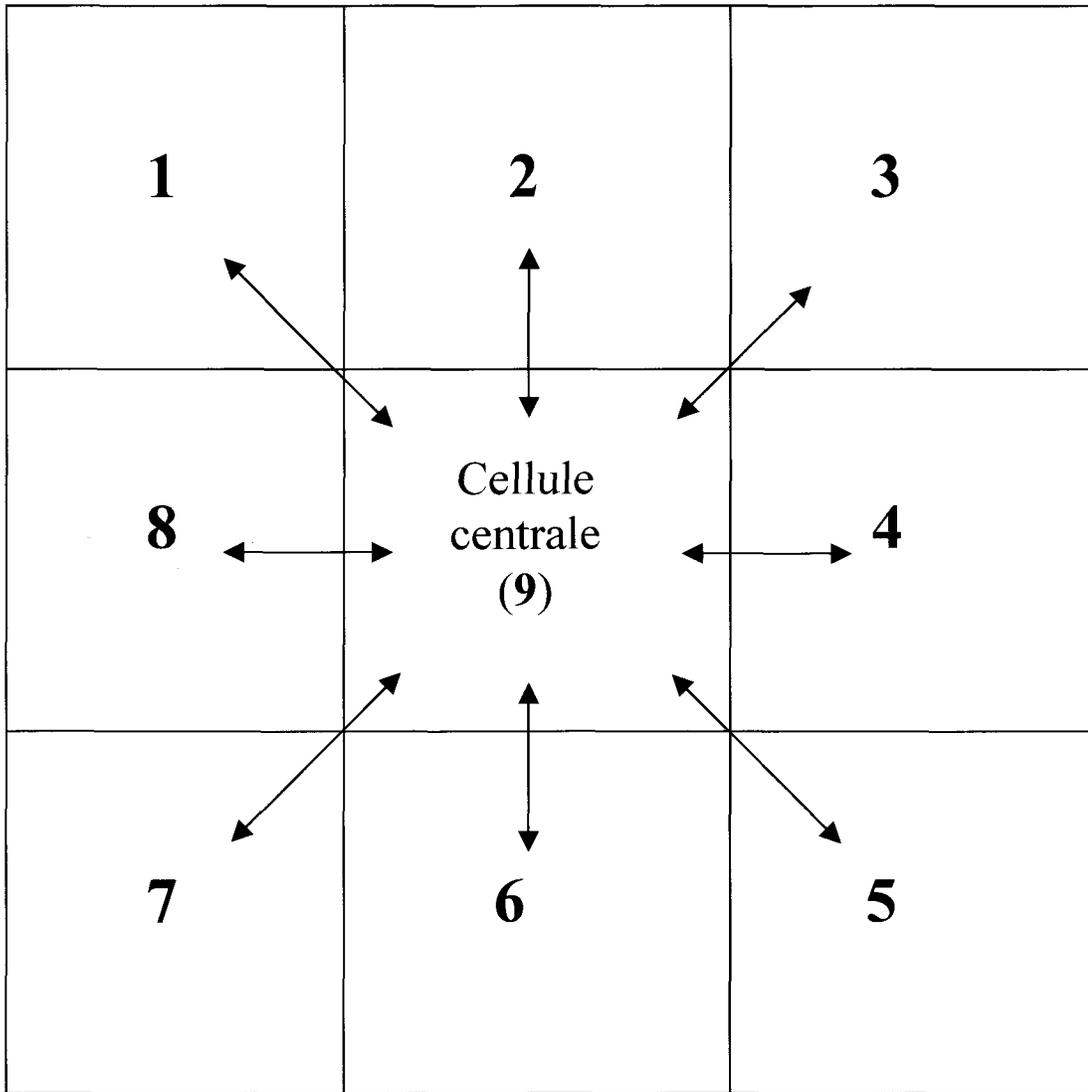


Figure A7 : Directions de calcul de la pente retenues par un algorithme dit du D8.

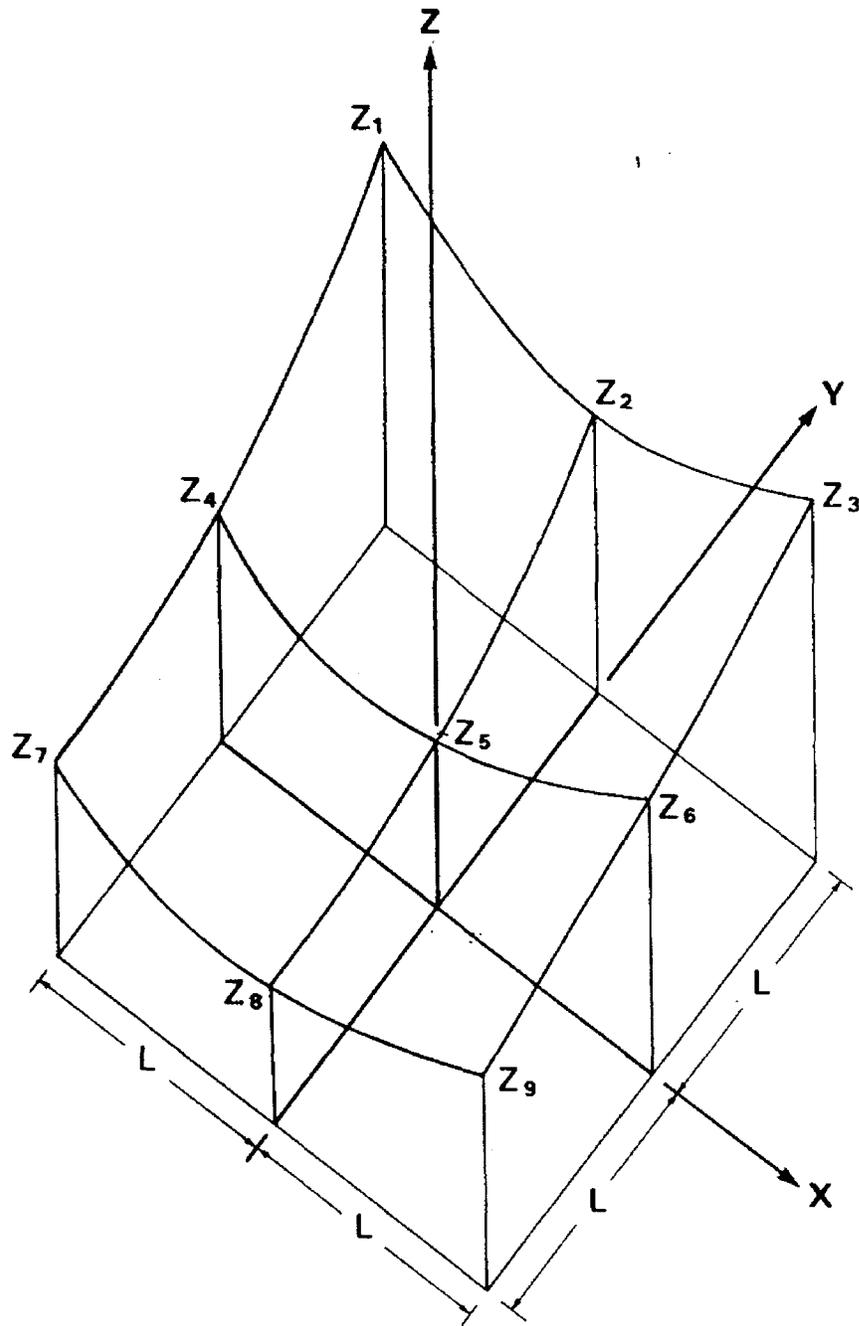


Figure A8 : Surface passant par les neuf points d'une sous-matrice d'altitude de dimension 3x3 (tiré de Zevenbergen et Thorne, 1987).

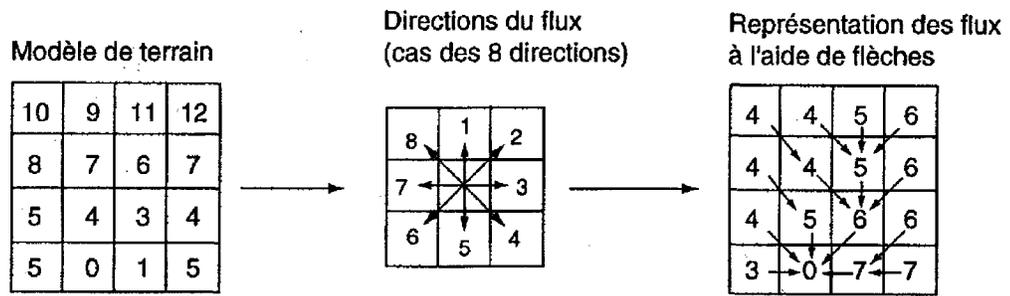


Figure A9 : Recherche des flux sur un MNA matriciel (tiré de Goodchild et al., 1996).

## LISTE DES RÉFÉRENCES

- Aleotti, P. et Chowdhury R.. 1999. Landslide hazard assessment : summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58 : 21-44.
- Aronoff, S. 1989. *Geographic Information Systems : A Management Perspective*. WDL Publications, 294 pp.
- Blaszczynski, J.S. 1997. Landform Characterization with Geographic Information Systems. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63 (2) : 183-191.
- Bouchard, R., Dion, D.J. et Tavenas, F. 1983. Origine de préconsolidation des argiles du Saguenay, Québec. *Revue canadienne de géotechnique*, 20 (2) : 315-328.
- Brunori, F., Casagli, N., Fiaschi, S., Garzonio, C.A. et Moretti, S. 1996. Landslide Hazard Mapping in Tuscany, Italy : An example of automatic evaluation. In: O. Slaymaker, (ed.). *Geomorphic hazards*, 55-67.
- Carrara, A., Cardinali, M. et Guzzetti, F. 1992. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. *International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences Journal*, 2 : 172-183.
- Cartier, P. et Pouget, G. 1988. Étude du comportement d'un remblai construit sur un versant instable, le remblai de Sallèdes (Puys-de-Dôme). Ministère de l'équipement et du logement, France. Laboratoire central des ponts et chaussées. Rapport de recherche 153, 126 pp.
- CFGI, 2000. Caractérisation et cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrain. Comité français de géologie de l'ingénieur, Laboratoire des ponts et chaussées, Paris, 91 pp.
- Cruden, D.M., Thomson, S., Bornhold, B.D., Chagnon, J.-Y, Locat, J., Evans, S.G., Heginbottom, J.A., Moran, K., Piper, D.J.W., Powell, R., Prior, D. et Quigley, R.M. (1989). Landslides: extent and economic significance in Canada. In E.E. Brabb and B.L. Harrod, eds., *Landslides: extent and economic significance*, Proc., 28<sup>th</sup> Int'l. Geol. Congr., Symp. on Landslides, Wash., D.C., 17 July, p. 1-23.
- Dikau, R., Brabb, E.E., Mark, R.K. et Pike, R.J. 1995. Morphometric landform analysis of New Mexico. In: *Advances in geomorphometry*. Proceedings of the Walter F. Wood Memorial Symposium, 101: 109-126.
- Dikau, R. et Sauer (eds.).1999. *GIS for Earth Surface Systems. Analysis and Modelling of the Natural Environment*. Gebrüder Borntraeger, Stuttgart, 197 pp.

- Dion, D.J. 1986. Levé géotechnique de la région de Jonquière – Chicoutimi – La Baie. Gouvernement du Québec. Ministère de l'énergie et des ressources. Rapport MB 86 – 51, 227 pp.
- Dunn, M. et Hickey, R. 1998. The effect of slope algorithms on slope estimates within GIS. *Cartographie*, 27 (1): 9-15.
- Einstein, H.H. 1988. Special lecture: Landslide risk evaluation procedure. In : Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Landslides, July 10-15, Lausanne, Switzerland. Bonnard, A.A. (éd.). Balkema, Rotterdam, 1075-1090.
- ESRI. 2000-2001. [www.GIS.com](http://www.GIS.com). Redlands, Californie. Etats-Unis.
- Evans, S.G. 1997. Fatal landslides and landslide risk in Canada. Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, 185-196.
- Fell, R. 1994. Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*, 31 : 261-272.
- Florinsky, I.V. 1998, Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Sciences*, 12 (1):47-61.
- Franklin, S.E. 1987. Geomorphometric processing of digital elevation models. *Computer and Geosciences*, 13 (6): 603-609.
- Goodchild, M.F., Kemp, K.K., Thériault, M. et Roche, Y. 1996. Systèmes d'information géographique. Notes de cours, LATIG, département de géographie. Université Laval, Sainte-Foy, Québec, 367pp.
- Graham, J. 1984. Methods of stability analysis. Chapter 6 in: Slope Instability. Brunsten, D. and Prior, D.B. (éds.) : 171-215.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. et Reichenbach, P. 1999. Landslide hazard evaluation : a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31 :181-216.
- Hungr, O. 1987. An extension of Bishop's Simplified method of slope stability analysis to three dimensions. *Géotechnique*, 37 : 113-117.
- Hungr, O. 1997. Some methods of landslide hazard intensity mapping. Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, 215-226.
- IUGS Working Group on Landslides, Committee on Risk Assessment. 1997. Quantitative risk assessment for slopes and landslides - The state of the art. Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, 3-12.

- Lafleur, J. et Lefebvre, G. (1980). Groundwater regime associated with slope stability in Champlain clay deposits. *Revue Canadienne de Géotechnique*, 17 : 44-53.
- Lasalle, P. et Tremblay, G. 1978. Dépôts meubles, Saguenay Lac Saint-Jean. Gouvernement du Québec. Ministère des richesses naturelles. Rapport géologique 191, 61 pp.
- Lebuis, J. R., Robert J.-M. et Rissman, P. 1983. Regional mapping of landslide hazard in Quebec. *Proceedings of the International Symposium on Slopes on Soft Clays*, Linköping, Swedish Geotechnical Institute. Rapport 17. 17: 205-262.
- Lefebvre, G. 1981. Analyse de deux pentes de déblai dans la région du Saguenay-Lac St-Jean. Département de génie civil, section géotechnique. Université de Sherbrooke. Rapport GEO-81-01, 101 pp.
- Leone, F., Asté, J.P. et Leroi, R. 1996. Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: working toward a better risk perception. In : Senneset (ed.). *Landslide, balkema*, Rotterdam, 263-269.
- Leroi, E. 1996. Landslide hazard – Risk maps at different scales: Objectives, tools and developments. In : Senneset (éd.). *Landslides*, Balkema. Rotterdam, 35-51.
- Leroueil, S. et Locat, J. 1998. Slope movements - Geotechnical characterization, risk assessment and mitigation. XI Danube-European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Porec, Croatia, 12 pp.
- Leroueil, S., Vaunat, J., Picarelli, L., Locat, J., Lee, H. et Faure, R. 1996. Geotechnical characterization of slope movements. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium On Landslides*, Trondheim, 53-74.
- Mejia-Navarro, M., Wohl, E.E. et Oaks, S.D. 1994. Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS : model for Glenwood Springs, Colorado. *Geomorphology*, 10 : 331-354.
- Miller, D.J. 1995. Coupling GIS with physical models to assess deep-seated landslide hazards. *Environmental & Engineering Geoscience*, 1(3) : 263-276.
- Ministère des transports du Québec. 1999. Gestion des risques de glissement de terrain liés aux pluies des 19 et 20 juillet 1996 au Saguenay-Lac-Saint-Jean. Bilan de la collaboration du Service de la géotechnique et de la géologie, Direction du laboratoire des chaussées, 57 pp.
- Mitasova, H. et Hofierka, J. 1993. Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. *Mathematical Geology*, 25 (6) : 657-668.

- Mitasova, H. et Mitas, L. 1993. Interpolation by regularized spline with tension: I. Theory and implementation. *Mathematical Geology*, 25 (6) : 641-655.
- Morgan, G.C. 1997. A regulatory perspective on slope hazards and associated risks to life. *Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment*, Honolulu, 285-295.
- Morgenstern, N.R. et Sangrey, D.A. 1978. Methods of stability analysis. Chapter 7 in: *Landslides: Analysis and Control*. Transportation Research Board. National Research Council, Washington, D.C., 155-171.
- Pack, R.T., Tarboton, D.G. et Goodwin, C.N. 1998. The SINMAP approach to terrain stability mapping. 8<sup>th</sup> Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, British-Colombia, Canada, 21-25 September.
- Paradis, S.J., Parent, M., Perret, D. et Bégin, C. 1999. Géologie des formations superficielles, Saint-Fulgence et La Baie, Québec; Commission géologique du Canada. Dossier public 3710, 2. Cartes couleurs à l'échelle 1:20 000, 22D. 07-200-0201 et 22D 07-200-0101.
- Perret, D., Demers, D. et Locat, J. 2001. River erosion and rainfall as triggering landslide factors in Eastern Canada lowlands. 3<sup>rd</sup> UNESCO International Symposium on water and risk, Canne.
- Perret, D. et Bégin, C. 1997. Inventaire des glissements de terrain associés aux fortes pluies de la mi-juillet 1996 – Région du Saguenay / Lac-Saint-Jean. Institut national de la recherche scientifique (INRS–Géoressources). Rapport remis au Bureau de reconstruction et de relance du Saguenay–Lac-Saint-Jean.
- Perret, D. et Larocque, H. 2000. Extraction automatique de paramètres de forme utiles à l'analyse de l'aléa <<glissement de terrain>> à partir de modèles numériques d'altitude. Rapport interne, Centre géoscientifique de Québec.
- Rissmann, P., Allard, J.D. et Lebuis, J. 1985. Zones exposées aux mouvements de terrain le long de la rivière Yamaska, entre Yamaska et Saint-Hyacinthe. Gouvernement du Québec. Ministère de l'énergie et des ressources. Rapport DV 83-04, 64 pp.
- Rubinstein, R.Y. 1981. *Simulation and the Monte Carlo method*. John Wiley and sons, New York, 278 pp.
- Skidmore, A.K. 1989. A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Systems*, 3 (4) : 323-334.
- Tarboton, D.G. 1997. A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33 (2): 309-319.

- Tech In Situ Inc. 1998. Investigation géotechnique, site de Ville de La Baie (Québec). Dossier 5009704.b tome 1. Rapport interne de sondage et essais de laboratoire pour le compte du ministère des transports du Québec, 11 pp.
- Van Westen, C.J. 1993. Application of Geographical Information Systems to Landslide Hazard Zonation. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, publication No. 15, Enschede, Netherlands, 245 pp.
- Van Westen, C.J. et Terlien, M.T.J. 1996. Deterministic landslide hazard analysis in GIS. A case study from Manizales (Colombia). *Earth Surface Processes and Landforms*, 21 : 853-868.
- Varnes, D.J. et IAEG Commission on Landslides and Other mass Movements on Slopes. 1984. *Landslide hazard zonation - A review of the Principles and Practice*. UNESCO, Paris.
- Vaunat, J., Leroueil, S. et Tavenas, F. 1992. Hazard and risk analysis of slope stability. Proceedings of the 1<sup>st</sup> Canadian Symposium on Geotechnique and natural Hazards, Vancouver, 1 : 397-404.
- Whitman, R.V. 1984. Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110 (2) : 145-188.
- Wu, T.H., Tang, W.H. et Einstein, H.H. 1996. Landslide hazard and risk assessment. Chapter 6 in : *Landslides : Investigation and Mitigation*, special report 247. Transportation Research Board. National Research Council, Washington, D.C., 106-118.
- Zevenbergen, L.W. et Thorne, C.L. 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface of Land Surface Topography*, 12: 47-56.