

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ANALYSE MULTIRISQUE DES ALÉAS D'ÉCROULEMENT DES CARAPACES
DE GLACE ET D'AVALANCHE DE NEIGE SUR LE SITE D'AQUA VELVA
EN BORDURE DE LA ROUTE 132,
GASPÉSIE SEPTENTRIONALE, QUÉBEC

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR
MARIE-HÉLÈNE GRAVELINE

DÉCEMBRE 2012

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

J'aimerais, d'abord et avant tout, remercier mon directeur de maîtrise et mentor, Daniel Germain. Années après années, tu as su m'inspirer et m'orienter dans cette sphère de la géographie qui me passionne tant : la géomorphologie dynamique. Tu as toujours su rallumer l'étincelle de la motivation aux moments les plus désespérants. Merci. Sans toi, ce projet n'aurait jamais vu le jour ni la fin.

J'aimerais ensuite remercier Guillaume Fortin, Francis Gauthier et Bernard Héту pour leur précieuse collaboration sans laquelle ce projet ne serait pas ce qu'il est aujourd'hui. Je remercie aussi le Ministère des Transports du Québec, particulièrement le centre de services de Sainte-Anne-des-Monts pour leur collaboration et leur gentillesse. Un gros merci à mes collègues, Thibault Roquefort et Jean-Philippe Martin, pour leur précieuse aide sur le terrain, leurs bras forts et leur enthousiasme infini.

Je tiens également à remercier le Conseil de recherche en science naturelle et génie du Canada (CRSNG) et le Fond de recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) pour leur soutien financier qui m'a permis de me dévouer à temps plein à ce projet. Je remercie aussi le personnel de soutien du département de géographie de l'UQÀM pour l'aide apportée dans tous les petits détails qui ont entouré ce projet depuis deux ans.

Je tiens finalement à remercier ma famille et mes amis pour leur constant support. Vos encouragements, conseils et petites attentions qui ont grandement contribué à adoucir ce long processus solitaire. Mention toute spéciale à Jeanseb Roux, propriétaire des soins palliatifs Heartbreak hôtel.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	ix
RÉSUMÉ	x
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
RÉGION ET SITE D'ÉTUDE.....	5
1.1. Région d'étude	5
1.1.1. Localisation.....	5
1.1.2. Climat régional	6
1.1.3. Végétation.....	7
1.1.4. Contexte géologique	7
1.1.5. Contexte géomorphologique.....	8
1.1.5.1. Talus d'éboulis actifs.....	8
1.1.5.2. Couloirs à carapace de glace.....	9
1.1.6.1. Mesures de surveillance et de prévention	12
1.1.6.2. Mesures d'intervention et rapidité de rétablissement	13
1.2 Site d'Aqua Velva.....	14
CHAPITRE II	
MÉTHODOLOGIE	22
2.1. Choix du site d'étude et cartographie.....	22
2.2. Sources de données et traitements.....	23
2.2.1. Base de données du Ministère des Transports du Québec.....	23
2.2.2. Données dendrogéomorphologiques.....	24

2.2.3. Données météorologiques.....	26
2.2.3.1. Écroulements des carapaces de glace	27
2.2.3.2. Occurrence des avalanches de neige.....	29
2.2.3.3. Analyse multi-aléas.....	32
2.2.4. Autres données.....	32
CHAPITRE III	
RÉSULTATS.....	33
3.1. Activité géomorphologique du couloir d'Aqua Velva	33
3.1.1. Évènements recensés entre 1987 et 2011	33
3.1.2. Activité enregistrée dans les cernes de croissance des arbres	34
3.1.2.1. Grandes périodes d'activité	34
3.1.2.2. Événements majeurs	36
3.2. Écroulements des carapaces de glace.....	37
3.2.1. Dynamique de démantèlement.....	37
3.2.2. Fréquence et occurrence des interventions dans le secteur 60.....	38
3.2.3. Conditions météorologiques de démantèlement	39
3.2.3.1. Rôle de la température	39
3.2.3.2. Rôle de la pluie	40
3.2.4. Période d'activité	43
3.3. Avalanches de neige	47
3.3.1. Dynamique avalancheuse	47
3.3.2. Fréquence et occurrence des interventions dans le secteur 60.....	49
3.3.3. Conditions météorologiques propices au déclenchement des avalanches.....	50
3.3.3.1. Rôle des précipitations.....	50
3.3.3.2. Rôle des cycles de gel-dégel (CGD).....	51
3.3.4. Période d'activité	53
3.4. Dynamique multi-aléas	57

3.4.1. Historique des interventions multi-aléas.....	57
3.4.2. Période d'activité combinée.....	58
CHAPITRE IV	
DISCUSSION	63
4.1. Hausse d'activité géomorphologique.....	63
4.2. Fréquence des chutes de blocs de glace et des avalanches.....	66
4.3. Dynamique temporelle des chutes de blocs de glace.....	68
4.3.1. Les degrés-jours cumulés (DJ) comme indicateur de déclenchement.....	69
4.3.2. Considérations méthodologiques.....	71
4.4. Dynamique temporelle des avalanches de neige.....	71
4.4.1. Régime avalancheux de tempête.....	72
4.4.2. Régime avalancheux printanier et régime lié aux chutes de blocs de glace.....	74
4.4.3. L'épaisseur du couvert de neige, une variable déterminante.....	75
CONCLUSION	77
RÉFÉRENCES	81

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1. Secteurs d'inventaire du Ministère des Transports du Québec (Héту, 2007).....	5
1.2. Montage photo : route nationale 132 (MobilUQ, 2008).....	11
1.3. Localisation du couloir d'Aqua Velva. (Google maps, 2011.).....	14
1.4. Montage photo (2011) : A) couloir d'Aqua Velva à partir de la route 132 ; B) centre du couloir à environ 160 m de hauteur ; C) centre du couloir à environ 80 m.	15
1.5. Profil longitudinal du couloir d'Aqua Velva.	16
1.6. Croquis du couloir d'Aqua Velva et localisation des chenaux secondaires.....	17
1.7. Montage photo : A) écroulement d'une carapace de glace ayant provoqué la destruction partielle du muret de protection et; B) dépôt d'un écroulement de glace de paroi chargé de débris rocheux contenu par le muret de protection. (Gauthier, 2008).....	18
1.8. Montage Photo (2011) : A) vue du mur de protection à partir du centre de la route 132 ; B) vue du mur et du fossé d'accumulation face à l'ouest et ; C) vue du mur et du ponceau à partir de la base du talus.....	19
1.9. Montage photo : A) dépôt d'avalanche recouvrant l'accotement de la route nationale 132 près de La Martre (secteur 60), le 31 mars 2006 (Héту, 2007), B) fossé d'accumulation rempli de débris rocheux en 2003 ou 2004 (Daniel Germain) et; C) avalanche de neige ayant presque atteint la route à la fin du mois de mars 2010 (Daniel Germain).	20

3.1.	Montage photo : A) dépôt de blocs de glace en bordure du couloir d'Aqua Velva dans les années 80 (MTQ) et; B) avalanche contenant des blocs de glace obstruant partiellement la route nationale 132 près de La Martre (secteur 60), le 24 avril 1991 (Hétu, 2007).	34
3.2.	Pourcentage d'arbres vivants cicatrisés et/ou présentant des séquences de bois de réaction et/ou des cernes étroits entre 1900 et 2011.	35
3.3.	Pourcentage cumulé des arbres vivants cicatrisés et/ou présentant des séquences de bois de réaction et/ou des cernes étroits entre 1900 et 2011.	35
3.4.	Répartition annuelle (A) et mensuelle (B) des interventions (manuelles et mécanisées) liées aux blocs de glace et répertoriées par le MTQ dans le secteur 60 pour les années d'intervention.....	39
3.5.	A) Évolution des températures journalières moyennes, maximales et minimales (pour les années d'interventions) et fréquence des interventions du MTQ dans le secteur 60, distribuées en fonction des jours julien, le 1 ^{er} mars étant le 60 ^e jour julien ; B) Évolution des degrés-jours positifs moyens, maximaux et minimaux en date du 1 ^{er} mars (pour les années d'interventions) et fréquence des interventions du MTQ dans le secteur 60, distribuée en fonction des jours julien, le 1 ^{er} mars étant le 60 ^e jour julien.....	40
3.6.	Phases d'activité d'écroulement des carapaces de glace d'Aqua Velva déterminées par la distribution historique des probabilités d'occurrence selon les degrés-jours cumulés au 1 ^{er} mars entre 1935 et 2011, excluant 1975.....	43
3.7	Répartition temporelle des phases d'activité selon les dates basées sur les probabilités historiques d'occurrence (1937 à 2011).....	47
3.8.	Répartition annuelle (A) et mensuelle (B) des interventions (manuelles et mécanisées) liées aux avalanches de neige et répertoriées par le MTQ dans le secteur 60.	49
3.9.	Nombre de cycles gels-dégels pour les mois de janvier à avril entre 1970 et 2011 et moyenne annuelle.	52

3.10.	Épaisseur du couvert neigeux (cm) pour la phase de fin de la période potentiellement avalancheuse entre 1937 et 2011, excluant 1951, 1953, 1963 et 2008.....	56
3.11.	Montage photo : A) Couloir d'Aqua Velva dominé par une carapace de glace; B) Avalanche provoquée par la chute d'un bloc de glace, le 31 mars 2006 ; C) Gros plan de la paroi avant la chute du bloc de glace (comparer les photographies A, B et C) et ; D) Chute des derniers blocs de glace vers la fin du mois d'avril 2006. Tiré de Hétu (2007).....	59
3.12.	Superposition des probabilités d'écroulement des carapaces de glace (%) et du ratio moyen entre le couvert neigeux résiduel et les précipitations totales cumulées (%) pour les dates d'activité de démantèlement.	60
3.13.	Calendrier de la période d'activité d'écroulement des carapaces de glace (jours), de ses probabilités d'occurrence (%) et du ratio moyen du couvert neigeux résiduel par rapport aux précipitations solides cumulées (%) entre 1937 et 2011.	61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1.1. Normales climatiques de la station de Cap-Madeleine pour la période 1971-2000	6
2.1. Informations sur la station météorologique de Cap-Chat entre 1934 et 2011	27
2.2. Densité du couvert de neige pour la région de Mount Seymour (C.-B.) ...	30
3.1. Nombre d'intervention, précipitations liquides et normales climatiques	42
3.2. Caractéristiques liées aux précipitations liquides enregistrées le jour, la veille et l'avant-veille des interventions	42
3.3. Caractéristiques des phases d'activité basées sur les données météorologiques historiques de 1935 à 2011, excluant 1975	45
3.4. Durée des trois phases d'activité basées sur les probabilités historiques d'occurrence pour la période 1935 à 2011, excluant 1975	45
3.5. Dates de début et de fin des trois phases d'activité basées sur les probabilités historiques d'occurrence pour la période 1935 à 2011, excluant 1975.....	45
3.6. Comparaison entre les journées potentiellement avalancheuses	54
3.7. Caractéristique moyenne de la période de fonte et de ses variables.....	55
3.8. Dates de début et de fin de la période de couvert neigeux potentiellement avalancheux entre 1937 et 2011.....	55
4.1. Moyennes des précipitations neigeuses cumulées (cm) pour les journées avalancheuses répertoriées par le MTQ entre les mois de janvier et avril	72

RÉSUMÉ

Les aléas géomorphologiques liés à la dynamique des versants constituent un risque important pour les infrastructures routières du nord de la Gaspésie. Chaque année, des avalanches de neige et des blocs de glace issus du démantèlement des carapaces atteignent la route 132, causant des interruptions de circulation, des dommages aux aménagements et parfois même des accidents.

La présente étude a pour objectif d'analyser les variations de l'activité géomorphologique sur le site d'Aqua Velva ; de circonscrire les conditions météorologiques favorables au déclenchement des avalanches de neige et des chutes de blocs de glace et ; d'en déterminer les périodes individuelles et combinées d'activité pour le site d'étude. Les résultats découlent de l'analyse croisée des inventaires du Ministère des Transports du Québec liées à ces deux aléas entre 1987 et 2011 et des données météorologiques d'Environnement Canada, complété par des analyses dendrogéomorphologiques.

Les anomalies de croissances des arbres échantillonnés témoignent d'une augmentation considérable de l'activité géomorphologique liée à la dynamique des versants sur le site d'Aqua Velva à partir de la fin des années 80.

D'après les résultats obtenus, il ressort que la température est le facteur déterminant dans le démantèlement des carapaces de glace. L'approche par degrés-jours cumulés a permis d'identifier une période d'activité d'une durée moyenne 45 jours s'étalant entre le 21 avril et le 5 juin.

La dynamique avalancheuse sur le site d'étude est plutôt soumise à l'effet des précipitations. Elle répond à trois régimes avalancheux distincts : un régime de tempête lié à de fortes précipitations neigeuses sur une courte période de temps (24, 48 ou 72h); un régime printanier de fonte lié à la pluie et un régime printanier causé par la chute de blocs de glace. Alors que les épisodes de tempête se concentrent surtout en février, le manteau neigeux dans le couloir d'Aqua Velva est susceptible de subsister jusqu'à tard au printemps engendrant un risque avalancheux ou multi-aléa jusqu'à la mi-mai.

Mots clés : avalanches – carapaces de glace – multi-aléas – climat – dendrogéomorphologie – risque naturel – Gaspésie – Québec

INTRODUCTION

De par leur proximité avec le relief montagneux, plusieurs routes de la Gaspésie septentrionale sont exposées à de nombreux aléas géomorphologiques liés à la dynamique des versants (Hétu, 2007 ; Fortin *et al.*, 2011a). En effet, des matériaux en provenance des versants atteignent fréquemment le réseau routier, interrompant la circulation pour une durée variable, voire même provoquant à l'occasion des accidents. Par conséquent, ces aléas sont susceptibles d'affecter tant l'intégrité physique des individus, des infrastructures et des aménagements que le bon fonctionnement des collectivités avoisinantes.

Les mouvements gravitaires rapides sont une problématique connue et étudiée depuis longtemps en Gaspésie. De multiples processus géomorphologiques (e.g. coulées sèches, coulées de débris, coulées de pierres glacées, avalanches de neige, chutes de blocs de glace, etc.) ont effectivement été observés sur les talus gaspésiens (Hétu, 1986, 1991, 1995 ; Hétu et Vandelac, 1989 ; Hétu *et al.*, 1994). L'écroulement des carapaces de glace et les avalanches de neige font partie des phénomènes problématiques les plus récurrents dans la zone côtière septentrionale.

On retrouve en Gaspésie plusieurs centaines de couloirs d'avalanche principalement localisés dans quatre zones soit les monts Chic-Chocs (incluant le Mont-Albert), les monts McGerrigle, la vallée de la Cascapédia et; l'escarpement littoral et les basses vallées de la région de Mont-Louis (Veillette et Cloutier, 1993 ; Hétu, 2007). Par ailleurs, seulement dans la zone littorale, la Gaspésie septentrionale compte plus de 90 glaces de paroi, dont 60 se forment annuellement sur les versants qui surplombent les routes 132 et 198 (Gauthier, 2008).

Les chutes de blocs de glace sur la portion nord de la route 132 sont un phénomène bien connu. Seuls quelques auteurs ont cependant abordé la problématique des carapaces de glace de manière spécifique. Le premier, Groleau (1994), a suivi l'évolution d'une carapace de glace dans la vallée de Mont-Saint-Pierre. Son étude a permis de montrer la nature dévastatrice et érosive de l'écroulement des carapaces de glaces. Plus récemment, en 2004, Bianchi a effectué le suivi d'une carapace de la région de Chiesa Valmalenco dans les Alpes italiennes. Ces deux auteurs ont mis en lumière une genèse des glaces de parois qui s'amorce dès les premiers gels automnaux. Les travaux de Girard et Héту (1994) ont, quant à eux, établi la fréquence de démantèlement des carapaces de glace en bordure de la route 132 à partir des données du Ministère des Transports du Québec (MTQ). Ils ont par ailleurs mis en évidence le caractère saisonnier de ces phénomènes et établi des liens précis entre l'occurrence de ceux-ci et certaines variables climatiques, dont le nombre de cycles gélivaux. Enfin, l'étude de Gauthier (2008) s'est attardée à la mécanique de formation et de démantèlement des carapaces de glace. Cela a permis d'identifier de manière plus précise les conditions météorologiques favorables à l'écroulement glaces de parois.

Les avalanches de neige sont elles aussi des processus récurrents en Gaspésie (Gaumond et Hamelin, 1960 ; Germain et Voiculescu, 2007). Outre les quelques rares mentions écrites dans les journaux et rapportant des accidents (Héту *et al.*, 2011), le premier article scientifique indiquant la présence de couloirs d'avalanche en Gaspésie a été publié en 1959 (Gaumond et Hamelin, 1960 ; Héту 2007 ; Fortin *et al.*, 2011a). Les premières études portant précisément sur les avalanches n'ont cependant été effectuées qu'à partir des années 1980 (Héту, 2007). Plusieurs travaux ont été réalisés sur la répartition, la fréquence et les impacts de l'activité avalancheuse dans les milieux montagneux du centre de la Gaspésie (Girard et Héту, 1989 ; Larocque *et al.*, 2001 ; Talbot, 2002 ; Boucher *et al.*, 2003 ; Germain, 2005 ; Royer et Lemieux, 2006 ; Germain et Voiculescu, 2007 ; Lemieux, 2007 ; Germain *et al.*, 2009, 2010) ainsi que

dans la zone littorale nord gaspésienne (Héту, 1986, 1990, 1991, 1995 ; Héту et Vandelac, 1989 ; Dubé *et al.*, 2004 ; Germain, 2005 ; Germain *et al.*, 2005 ; Héту, 2007 ; Germain *et al.*, 2009).

Peu d'études se sont toutefois attardées à circonscrire les conditions météorologiques liées à l'activité avalancheuse dans la zone côtière. À l'exception de l'étude de Dubé *et al.* (2004), qui a souligné que les années dont l'activité avalancheuse est élevée sont caractérisées par des chutes de neige supérieures à la moyenne, seulement trois études ont porté sur le sujet (Fortin *et al.*, 2011a). La première, celle de Héту (2007) a permis de mettre en lumière une activité avalancheuse qui répond à deux régimes distincts : un régime printanier lié à la fonte, à la pluie et à l'écroulement des carapaces de glace se formant sur les parois rocheuses en amont des couloirs et un régime hivernal associé aux tempêtes de neige. Cette dernière étude a, par ailleurs, établi pour la première fois un lien d'influence entre deux processus géomorphologiques sur un même talus, à savoir le démantèlement des carapaces de glace et les avalanches de neige. La seconde étude, plus spéculative, a permis de différencier les scénarios météorologiques liés aux avalanches de grandes envergures (Germain *et al.*, 2009). Enfin, l'analyse du climat hivernal (normales et extrêmes) en lien avec la banque de données du MTQ sur les avalanches de neige a permis à Fortin *et al.* (2011a) d'approfondir les scénarios avalancheux établis par Héту en 2007 (Fortin *et al.*, 2011a).

Jusqu'à présent, aucune étude connue ne s'est attardée à circonscrire l'extension temporelle de l'activité d'écroulement des carapaces de glace et des avalanches de neige de manière précise ou en termes de dates. En effet, on constate un manque important de connaissances quant à la probabilité d'occurrence dans le temps de ces processus géomorphologiques à forte capacité de destruction.

De plus, les chutes de blocs de glace et les avalanches de neige n'ont jamais été étudiées conjointement dans le cadre d'un site précis. En effet, les aléas issus des

versants raides, aussi complexes et différents soient-ils les uns des autres ont toujours été abordés individuellement. Or, des observations récentes au long de la route nationale 132 confirment la présence de processus distincts (chutes de blocs de glace et avalanches de neige) au sein d'un même couloir (Hétu, 2007). Il apparaît donc important de s'attarder à la dynamique individuelle de chacun de ces processus, mais aussi aux effets de synergie entre ceux-ci et leur équilibre avec le milieu. À titre d'exemple, les travaux de surcharge ou de surcreusement des versants par l'homme sont responsables de 40 % des glissements de terrain de la dernière décennie dans les basses terres argileuses du Québec (MTQ, 2005). À cet égard, on conviendra de la pertinence et de la nécessité de tendre vers une approche multi-aléas pour cerner la dynamique des versants et de porter une attention particulière à certains facteurs naturels et anthropiques pouvant affecter son équilibre.

Ainsi, la présente étude se propose d'effectuer, comme objectif principal, l'analyse multi-aléas du couloir d'Aqua Velva en bordure de la route 132 en Gaspésie septentrionale. Les quatre objectifs secondaires poursuivis sont: 1) analyser les variations de l'activité géomorphologique sur le site d'Aqua Velva ; 2) cibler les conditions météorologiques favorables au démantèlement des carapaces de glace et à l'occurrence des avalanches de neige dans le couloir à l'étude; 3) circonscrire les fenêtres temporelles d'activité les plus probables de ces deux processus en termes de dates et; 4) identifier la période d'activité commune reflétant la dynamique multi-aléas du couloir. Par comparaison aux études antérieures, l'approche envisagée permettra d'une part, de définir les interactions temporelles entre les processus et, d'autre part, de contribuer à une meilleure planification des infrastructures routières dans un contexte de réduction de la vulnérabilité.

CHAPITRE I

RÉGION ET SITE D'ÉTUDE

1.1. Région d'étude

1.1.1. Localisation

La région étudiée est celle de la frange côtière du nord de la Gaspésie, plus précisément dans la Municipalité régionale de comté (MRC) de la Haute-Gaspésie. Elle comprend un segment de la route 132 délimité à l'est et à l'ouest par les municipalités de Sainte-Anne-des-Monts et de Grande-Vallée. Afin de mieux circonscrire le territoire, la segmentation d'inventaire des avalanches de neige du Ministère des Transports du Québec (MTQ) sera employée. Celle-ci divise la portion étudiée de la route 132 en 12 secteurs, représentés sur la figure 1.1 (Hétu, 2007).

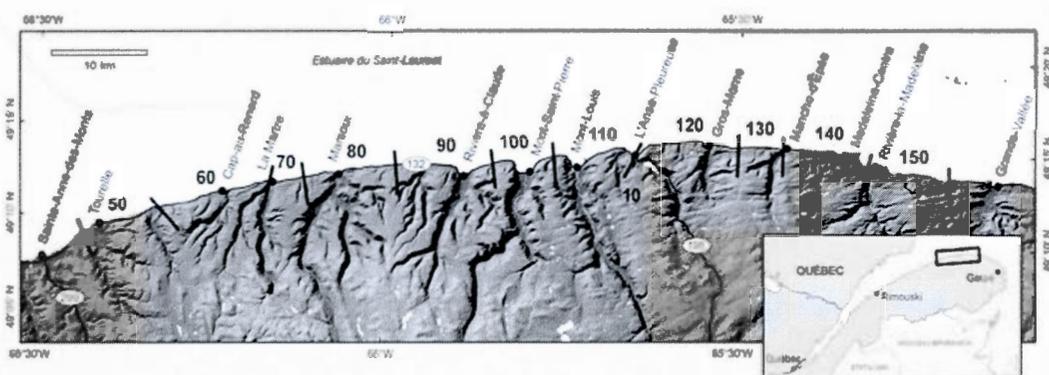


Figure 1.1. Secteurs d'inventaire du Ministère des Transports du Québec (Hétu, 2007).

1.1.2. Climat régional

Par sa position de moyenne latitude (49°N) et son contexte physiographique unissant montagne et golfe du Saint-Laurent, le nord de la Gaspésie est caractérisé par un climat très contrasté dans lequel se combinent les influences maritimes, continentales et orographiques (Gagnon, 1970 ; Hétu, 2007). Classifié comme étant un climat de type tempéré à hiver froid, ses principales caractéristiques enregistrées à la station météorologique de Cap-Madeleine (49°14' N, 65°19' W, atl. : 2 m) sont résumées dans le tableau 1.1.

Le régime climatique de la Gaspésie septentrionale présente une température moyenne annuelle approximative de 3,1 °C avec un minimum mensuel de -15,6 °C en janvier et un maximum mensuel de 20,6 °C en juillet (Environnement Canada, 2012b, Normales climatiques au Canada, 1971 à 2000). Les précipitations moyennes annuelles totalisent 796,2 mm dont 30 à 40 % tombe sous forme de neige entre les mois d'octobre et d'avril. Notons que les mois de décembre, janvier, février et mars reçoivent en moyenne entre 1,8 et

Tableau 1.1
Normales climatiques de la station de Cap-Madeleine
pour la période 1971-2000*

	Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin
Température moyenne (°C) quotidienne	-7,1	-11,4	-10,3	-4,8	1,4	7,4	13
Température minimale (°C) quotidienne	-10,5	-15,6	-14,4	-9	-2,1	3,2	8,5
Température maximale (°C) quotidienne	-3,6	-7,2	-6,1	-0,7	4,8	11,6	17,5
Précipitations totales (EE mm)	85,3	56,9	45,3	64	56,6	59,6	69,8
Pluie (EE mm)	16,4	5,8	1,8	6,7	30,2	58,2	69,8
Neige (cm)	68,9	51,1	43,5	57,3	26,4	1,4	0,0

* Tiré de : Environnement Canada, 2012b

16,4 mm de précipitations liquides lors de redoux hivernaux (Environnement Canada, 2012b). Ainsi, tous les mois d'hiver peuvent connaître d'importantes tempêtes de neiges, des blizzards et des vagues de froids ainsi que des épisodes de redoux et de pluies (Fortin *et al.*, 2011a). Ces conditions instables et le rythme surprenant avec lequel ces situations se succèdent, entraînent la formation d'un manteau neigeux complexe sur lequel peu d'information existe dû à l'absence d'un programme de suivi des propriétés physiques du couvert nival au Québec (Fortin *et al.*, 2011a).

La région est aussi agitée par des vents, principalement en provenance du nord-ouest et de l'est, et dont la fréquence et l'intensité sont élevées (Hétu et Vandelac, 1989). Ceux-ci soufflent souvent en rafales et peuvent dépasser les 100 km/h lors d'épisodes de blizzards causant une déflation éolienne intense sur les talus d'éboulis (Hétu, 1992).

1.1.3. Végétation

Le fond des vallées et la portion inférieure des versants de la zone littorale nord-gaspésienne est dominée par l'érablière à bouleau jaune (Labelle et Richard, 1984). Elle est ensuite suivie de la sapinière à bouleau jaune jusqu'à une altitude de 300 m (Germain *et al.*, 2005). À l'exception des grands talus d'éboulis, la plupart des versants qui bordent la zone côtière sont couverts par une végétation arborescente de forte densité.

1.1.4. Contexte géologique

La portion septentrionale de la Gaspésie fait partie de la zone de Humber liée à l'orogénèse des Appalaches (Brisebois et Brun, 1994 ; Pelletier, 1997). Sa lithologie

est principalement constituée de roches sédimentaires de la formation de Cloridorme telles que des schistes argileux finement stratifiés, des grauwackes, des calcaires, des dolomies et des conglomérats (Hétu et Gray, 1985 ; Pelletier, 1997 ; Brisebois et Nadeau, 2003). Ceux-ci ont été déposés à l'Ordovicien inférieur puis déformés lors de la phase orogénique taconienne à l'Ordovicien supérieur (McGerrigle, 1959 ; Enos, 1969 ; Biron, 1971). Ces roches très friables sont recoupées par un abondant réseau de fractures dans lequel des résurgences d'eaux souterraines viennent imprégner les parois rocheuses à plusieurs endroits (Hétu et Vandelac, 1989 ; Walkinshaw et Santi, 1996 ; Brisebois et Nadeau, 2003 ; Gauthier, 2008).

1.1.5. Contexte géomorphologique

Le relief régional est constitué d'un imposant plateau forestier, majoritairement situé entre 300 et 400 m d'altitude et bordé par un important escarpement littoral. Celui-ci est entaillé de vallées étroites et encaissées qui laissent peu d'espace au réseau routier. Les talus de la frange côtière sont animés d'une activité géomorphologique intense. En effet, plusieurs études et observations sur le terrain confirment la présence d'avalanches de neige, de chute de blocs de glace, d'éboulis et de coulées de débris constituant un risque pour le réseau routier. Dans la région côtière étudiée, les pentes dites actives, soit celles soumises à l'activité d'un ou plusieurs aléas, se divisent en deux catégories : les talus d'éboulis et les étroits couloirs à carapace de glace (Hétu, 2007).

1.1.5.1. Talus d'éboulis actifs

Les talus d'éboulis situés dans la zone littorale étudiée ont un dénivelé, mesuré entre la base de la paroi et le pied du versant, oscillant entre 50 et 300 m (Hétu et Gray, 1980 ; Hétu et Vandelac, 1989 ; Hétu, 1991). Leur pente moyenne passe de 37

à 42° à proximité de la paroi à moins de 30° dans la portion inférieure du talus (Hétu, 2007). L'extension latérale des talus d'éboulis varie fortement de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. Ils sont principalement localisés sur la côte entre l'Anse-Pleureuse et Manche-d'Épée ainsi qu'en bordure de la baie de Mont-Saint-Pierre (fig. 1.1). Les talus d'éboulis actifs sont, en général, passablement dénudés de végétation, et ce, de la paroi jusqu'à la base du versant. Il faut cependant noter l'existence de talus arbustifs et de zones d'éboulis vif permettant l'activation de certains processus comme les avalanches de neige.

1.1.5.2. Couloirs à carapace de glace

Les talus d'éboulis actifs sont peu fréquents dans le secteur à l'ouest de Rivière-à-Claude (fig. 1.1). Les processus se déclenchent alors au sein d'étroits couloirs enclavés par la végétation forestière. La largeur de ces couloirs est généralement ≤ 20 m et leur longueur varie entre 50 et 250 m (Hétu, 2007). Leur inclinaison fluctue entre $\sim 30^\circ$ et un peu plus de 37° . Cette mesure exclue la paroi rocheuse qui est beaucoup plus abrupte. Ces couloirs, qui sont façonnés par des processus morphogéniques différents, sont animés d'une dynamique particulière et plusieurs d'entre eux débouchent directement sur la route nationale 132 (Groleau, 1994 ; Jacob, 2001 ; Hétu, 2007). En effet, en plus des avalanches de neige, des chutes de bloc de glace et des coulées de débris y ont été observées et ceux-ci représentent un risque pour la route (Hétu et *al.*, 1994 ; Hétu, 2007).

Chaque hiver, les parois qui surplombent les couloirs exposés au nord se couvrent d'importantes carapaces de glace causées par le gel de l'eau hydrogéologique. Au printemps, ces carapaces s'écroulent et libèrent des blocs de glace d'un diamètre pouvant atteindre de deux à trois mètres, lesquels dégringolent la pente en glissant et en bondissant (Hétu, 2007).

1.1.6. Route 132

La route nationale 132 constitue l'artère principale du réseau routier du nord de la Gaspésie. Son débit journalier moyen annuel oscille entre 1 et 499 véhicules, près des localités les moins peuplées, et de 600 à 2000 véhicules dans la section près de Sainte-Anne-des-Monts (Transport Québec, 2004). Selon le Plan de transport de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine du MTQ en 2004, les débits de circulation auraient augmenté en moyenne de 1 % sur la rive nord de la péninsule entre 1988 et 1999, et ce, malgré la baisse démographique. Il prévoit aussi une hausse de 9 % du nombre de ménages d'ici 2021, ce qui pourrait faire augmenter considérablement le nombre d'automobiles sur le réseau routier (Transport Québec, 2004).

Par leur position de proximité avec des escarpements raides de forte dénivellation, les routes de la Gaspésie septentrionale sont fortement exposées à une multitude de processus géomorphologiques liés à la dynamique des versants (Girard et Héту, 1994 ; Héту et al., 1994 ; Héту, 2007). En effet, dans la portion entre Sainte-Anne-des-Monts et Manche-d'Épée, la route est enclavée entre le littoral et les versants sur près de 80 % de sa longueur (Gauthier, 2008) (fig. 1.2). De ce fait, les usagers de la route 132 se retrouvent exposés tant aux aléas liés à la dynamique littorale qu'à ceux liés aux mouvements gravitaires. De part l'utilisation de véhicules motorisés, la durée d'exposition des usagers à ces aléas demeure restreinte. Cependant, quoique l'exposition physique soit limitée, le risque d'accident reste réel. En effet, dans le cas de l'activité avalancheuse, la probabilité qu'un véhicule soit directement frappé par une avalanche en mouvement est relativement faible (McClung, 1999 ; Héту, 2007). Toutefois, les avalanches ont causé la mort d'au moins six personnes entre 1935 et 2006 en Gaspésie (Héту, 2007). Par ailleurs, les dépôts compacts d'avalanches obstruant la route constituent un risque important même après l'événement et surtout lorsque celui-ci se déroule la nuit ou lorsque la visibilité est réduite.



Figure 1.2. Montage photo : route nationale 132 (MobilUQ, 2008).

Caractérisées par un aménagement territorial en chapelet, les municipalités de la région de la Haute-Gaspésie sont enclavées entre le relief montagneux et le littoral, toutes reliées par la route nationale 132. Cet aménagement, quoique contraint par les conditions physiques du milieu, peut engendrer un isolement partiel des habitants ainsi qu'une dépendance aux centres. En effet, Sainte-Anne-des-Monts, la municipalité la plus peuplée de la région concentre la majeure partie des services publics essentiels (hôpital, cliniques médicales, etc.). En cas d'urgence, les habitants doivent nécessairement emprunter la route 132 pour se rendre à Sainte-Anne-des-Monts. Il en est de même pour les véhicules d'urgences telles que les ambulances, les camions de pompiers et les voitures de la Sûreté du Québec ainsi que pour les

véhicules nécessaires à la réparation des lignes électriques et les véhicules de livraison de denrées alimentaires et d'énergie telle que le gaz naturel, qui doivent utiliser la route 132 pour atteindre leurs destinations.

1.1.6.1. Mesures de surveillance et de prévention

La surveillance des routes 132 et 198 est assurée par le Ministère des Transports du Québec (MTQ), plus précisément par le Centre de services de Sainte-Anne-des-Monts. La surveillance est effectuée par une patrouille spéciale, nommée Patrouille de roches, qui circule à longueur d'année, 24 heures sur 24. Les patrouilleurs ont une connaissance importante du milieu qu'ils surveillent et restent attentifs aux conditions météorologiques de déclenchement des aléas issus de la dynamique des versants. Ils peuvent ainsi porter une attention particulière aux secteurs les plus à risque. En totalisant 106,1 km de long (Fortin *et al.*, 2011a), le territoire à surveiller apparaît toutefois considérable, particulièrement à certains moments de l'année, ce qui empêche toute surveillance en continu

Lorsque les conditions l'exigent, la route peut être fermée de manière préventive, et ce, pour des délais allant d'une heure à une nuit entière. Quoique l'alerte soit donnée, le lieu précis où l'événement peut se produire est très difficile à déterminer. De plus, les conditions de déclenchement des aléas sont très complexes et restent actuellement peu connues ou documentées. La marge d'erreur étant très grande, la fermeture de la route comme mesure de prévention apparaît inadéquate compte tenu de la grande incertitude quant à d'une part l'occurrence des aléas et, d'autre part, le ou les secteurs affectés par ce ou ces aléas.

L'enclavement de la route 132 rend impossible pour les autorités de dévier la circulation automobile vers des routes alternatives. Les contraintes physiques du milieu empêchent aussi la construction de nouvelles routes dans la région. Ainsi, la

dépendance à la route 132 pour toutes formes de déplacements entre les municipalités est presque totale et augmente de manière considérable le degré de vulnérabilité régional. En effet, l'absence de routes alternatives créé une problématique importante dans l'accessibilité des services essentiels et l'acheminement des ressources.

1.1.6.2. Mesures d'intervention et rapidité de rétablissement

L'intervention suite à un incident issu de l'activité d'un aléa gravitaire (blocage de la route, bris d'infrastructures, etc.) est aussi sous la responsabilité du MTQ. Lorsque les conditions météorologiques de déclenchement sont réunies, les patrouilleurs entrent en état d'alerte et sont prêts à intervenir. Ceux-ci sont d'ailleurs en communication avec des entrepreneurs privés disponibles pour dégager la route, le cas échéant.

Suite à un événement, il est du ressort de la Patrouille de roche de localiser, d'inventorier et de déloger les débris de versants obstruant la chaussée. Tout dépendant de la dimension du ou des débris ou du volume de la masse à dégager, l'opération s'effectue généralement dans un délai d'une à deux heures lorsque l'utilisation d'équipement mécanique est nécessaire. En général, lorsqu'une intervention mécanisée est requise, c'est que les débris sont indélogeables manuellement par « une équipe de deux à trois ouvriers munis de pics, de pelles, de câbles et d'une camionnette » (Gauthier, 2008, p. 31). Lors de ces situations, les patrouilleurs font appel à de la machinerie lourde (pelle mécanique, « bulldozer », etc.) sur le lieu de l'incident. Les interventions manuelles sont quant à elles effectuées dans des délais très rapides qui dépendent essentiellement du temps de déplacement de la patrouille en fonction vers le lieu de l'incident. Dans le cas d'un événement de grande envergure, le délai d'intervention peut atteindre deux jours.

Lorsqu'un incident endommage une partie de la route, des mesures sont prévues pour la réparer le plus rapidement possible. À cet effet, des réserves de pierres et d'autres matériaux granulaires sont entreposés à proximité. Normalement, entre cinq et six heures sont nécessaires pour rouvrir une voie. Celle-ci est entre autres utilisée pour la circulation des véhicules d'urgence.

1.2 Site d'Aqua Velva

La recherche effectuée dans le cadre de cette maîtrise porte plus précisément sur le couloir d'Aqua Velva. Celui-ci est situé en bordure du secteur 60 (fig. 1.1), entre les localités de Ruisseau-Castor à l'ouest et Cap-au-Renard à l'est ($49^{\circ}11'1''$ N; $66^{\circ}17'12''$ O) (fig. 1.3).

Ce couloir à carapace de glace est d'une longueur de 200 m et d'une largeur moyenne de 7,3 m (fig. 1.4). Exposé au nord, il a une pente moyenne de $34,8^{\circ}$ (fig. 1.5). Le couloir est surplombé d'une paroi rocheuse, surnommée Aqua Velva par les adeptes de l'escalade de glace. Celle-ci est d'une hauteur de 60 m et d'une inclinaison de 55° dans sa partie inférieure (30 premiers mètres) et de 90° dans sa partie



Figure 1.3. Localisation du couloir d'Aqua Velva. (Google maps, 2011.)



Figure 1.4. Montage photo (2011) : A) couloir d'Aqua Velva à partir de la route 132 ; B) centre du couloir à environ 160 m de hauteur ; C) centre du couloir à environ 80 m.

supérieure. La paroi se couvre chaque hiver d'une épaisse carapace de glace (~ 4500 m³) qui fait d'elle un site reconnu pour l'escalade de glace (Gauthier, 2008).

Sur les 60 premiers mètres de hauteur à partir de la base du talus, la végétation de la bordure est se compose principalement d'érables à sucre [*Acer saccharum* Marsh.] et de sapins baumiers [*Abies balsamea* (L.) Mill.]. Le sous-couvert forestier est surtout constitué de fougères. Alors qu'aucun arbre mature n'est observable entre 60 et 120 m, on commence à observer des bouleaux blancs [*Betula papyrifera* Marsh.] à partir de 120 m. À cette altitude, la flore de sous-bois est dominée par de

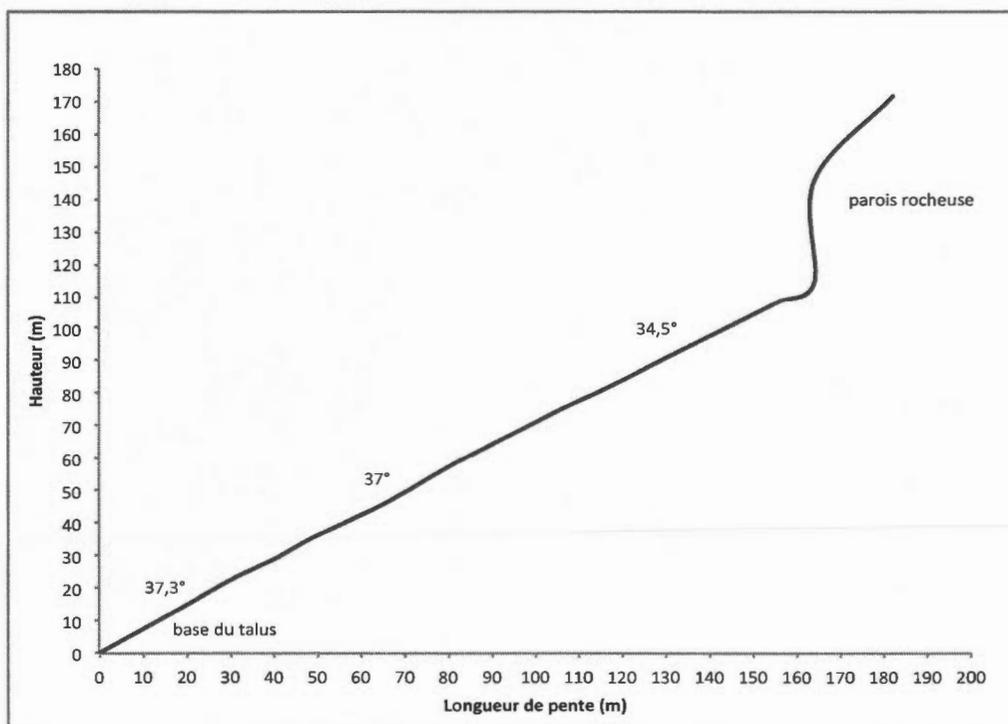


Figure 1.5. Profil longitudinal du couloir d'Aqua Velva.

jeunes pousses d'érables. La présence de conifère augmente considérablement à partir de 150 m pour arriver à une canopée fermée à 80 % entre 180 et 200 m. L'espèce dominante reste cependant l'érable. Notons qu'à cette altitude, le sol est surtout constitué de graviers et de petits galets de schiste.

Les versants adjacents au couloir d'Aqua Velva sont marqués de cinq chenaux secondaires qui témoignent de l'activité géomorphologique passée et/ou parallèle au couloir principal (fig. 1.6). Quatre de ceux-ci se situent sur la bordure est du couloir (CS1, CS2, CS3 et CS4). De longueur variant entre trois et 55 m et d'une largeur moyenne de 1,5 m, ces chenaux sont caractérisés par la présence de blocs rocheux décimétriques et d'un grand nombre d'arbres cicatrisés. La plupart de ceux-ci rejoignent le chenal principal. Le cinquième chenal secondaire (CS5) est localisé sur la bordure ouest du couloir. D'une longueur de 80 m, il borde le chenal principal dans

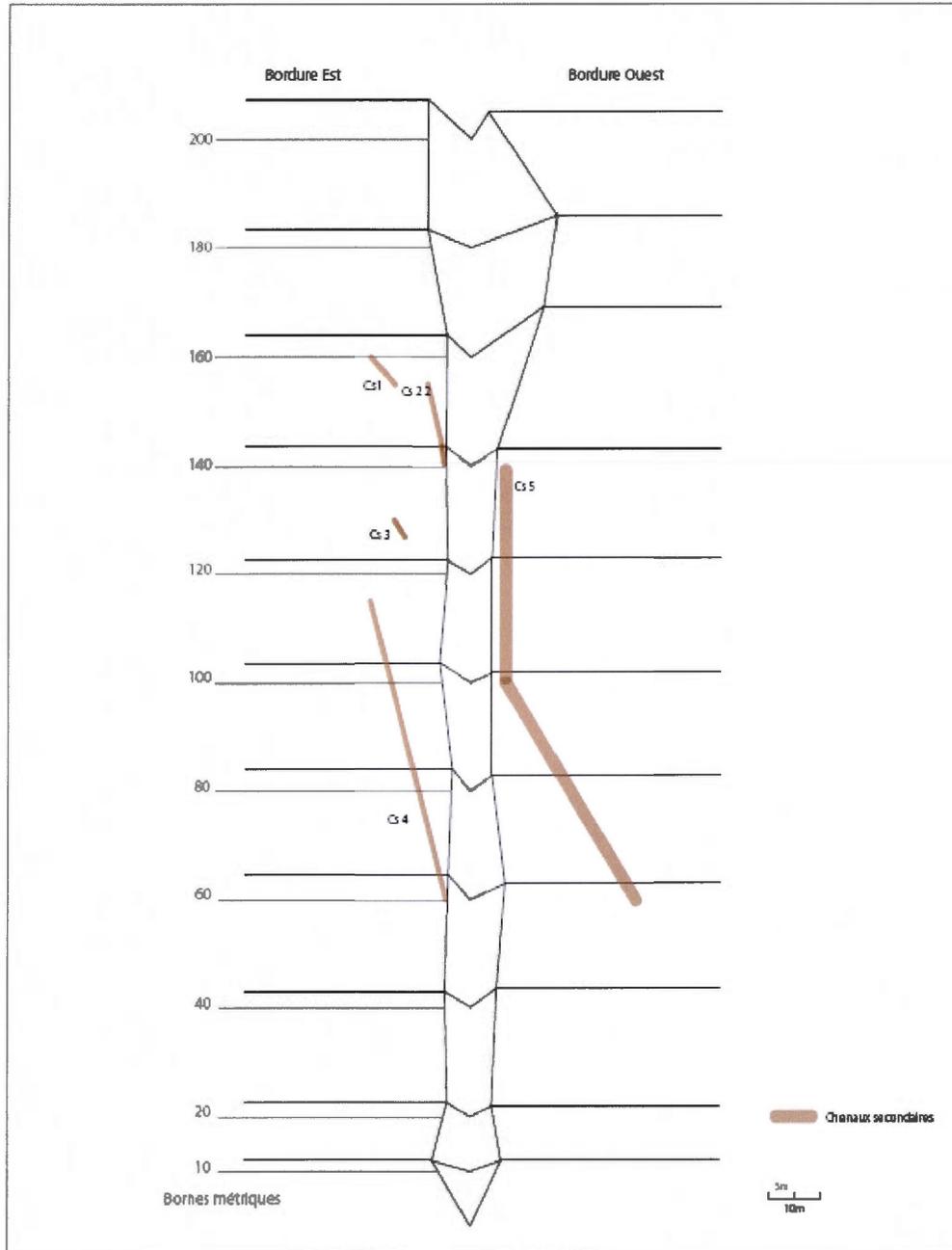


Figure 1.6. Croquis du couloir d'Aqua Velva et localisation des chenaux secondaires.

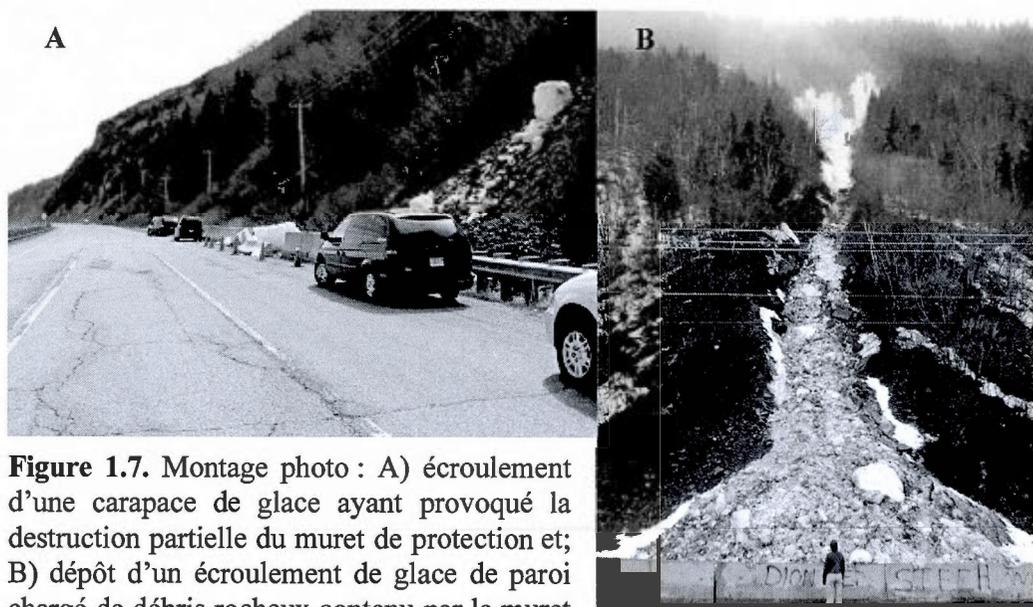


Figure 1.7. Montage photo : A) écoulement d'une carapace de glace ayant provoqué la destruction partielle du muret de protection et; B) dépôt d'un écoulement de glace de paroi chargé de débris rocheux contenu par le muret de protection. (Gauthier, 2008).

ces 45 premiers mètres pour ensuite bifurquer vers l'ouest, où il disparaît dans la végétation forestière. Les blocs décamétriques y sont beaucoup moins présents que dans les autres chenaux. Il est plutôt caractérisé par un sol forestier épais, colonisé par de jeunes érables ainsi que par une importante niche d'arrachement liée à l'inclinaison de la pente. Sa largeur moyenne est toutefois plus élevée avec 3,5 m.

On décèle dans le couloir d'Aqua Velva une grande activité géomorphologique liée à la dynamique du versant dont la présence de plusieurs aléas tels que des avalanches de neige, des coulées de débris, des chutes de blocs de glace et des éboulis rocheux (fig. 1.7). En réponse au risque récurrent lié à l'importante activité géomorphologique du couloir d'Aqua Velva, un mur de protection et un fossé d'accumulation ont aussi été aménagés entre la base du couloir et la route. Cette intervention aurait été effectuée il y a environ 15 ans, soit entre 1995 et 2000. Le mur de type New Jersey est constitué de dix blocs de béton (glissières) raccordés par des ancrages. D'une longueur de 41 m, il est situé à 6 m de distance de l'accotement de la

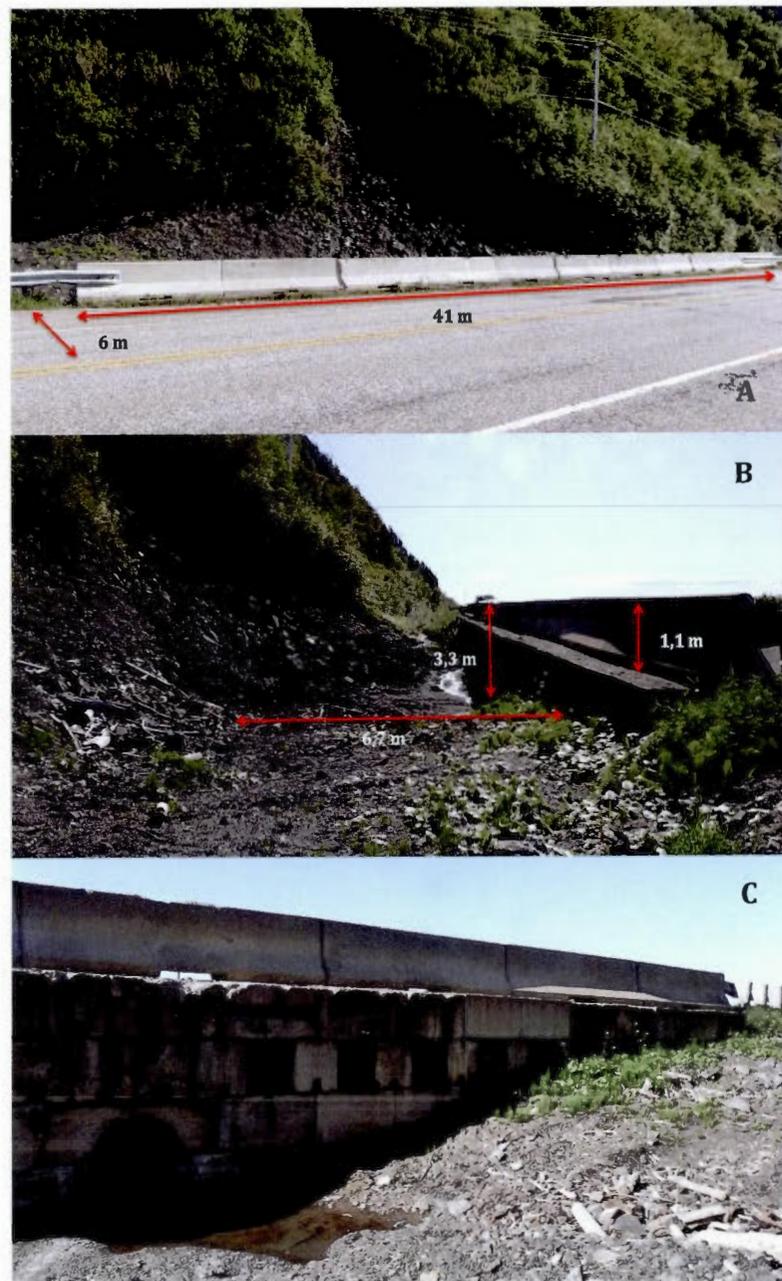


Figure 1.8. Montage Photo (2011) : A) vue du mur de protection à partir du centre de la route 132 ; B) vue du mur et du fossé d'accumulation face à l'ouest et ; C) vue du mur et du ponceau à partir de la base du talus.

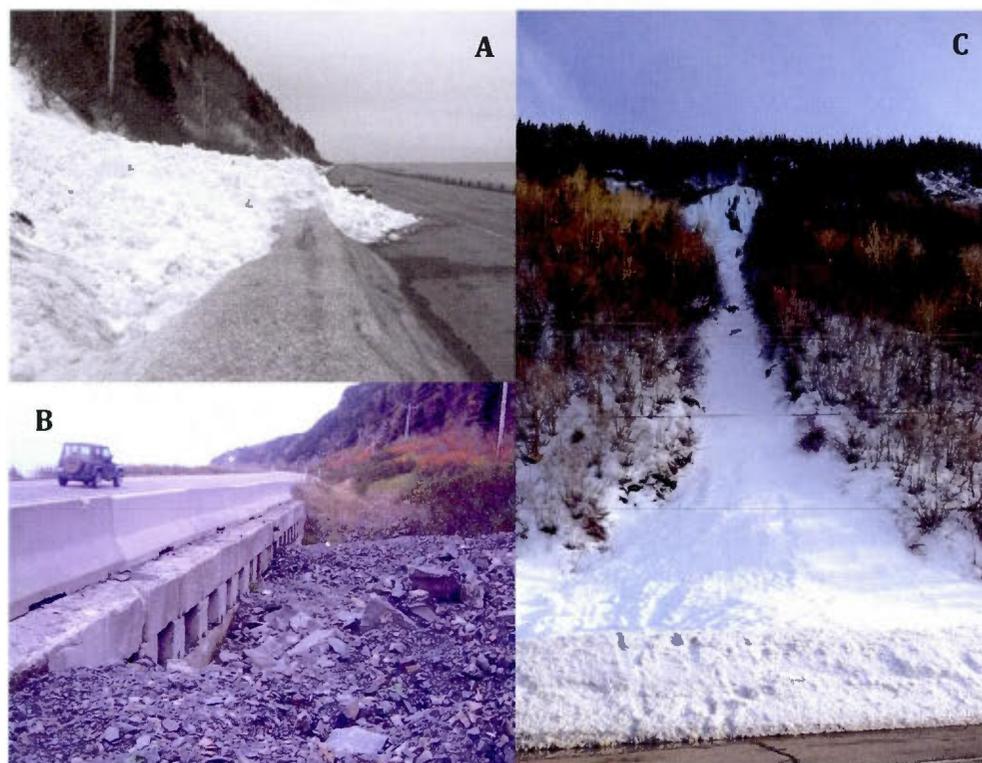


Figure 1.9. Montage photo : A) dépôt d'avalanche recouvrant l'accotement de la route nationale 132 près de La Martre (secteur 60), le 31 mars 2006 (Héту, 2007), B) fossé d'accumulation rempli de débris rocheux en 2003 ou 2004 (Daniel Germain) et; C) avalanche de neige ayant presque atteint la route à la fin du mois de mars 2010 (Daniel Germain).

route (fig. 1.8). Une distance de 6,7 m le sépare de la base du versant et à ce niveau, le mur est d'une hauteur de 3,3 m soit 1,1 m plus élevé que le niveau de la route (fig. 1.8). Il est de plus séparé du talus par un fossé artificiel dans lequel un ponceau assure l'écoulement des matières liquides vers le littoral (fig. 1.9).

Le mur de béton ne nécessite aucun entretien régulier. Le fossé et le ponceau doivent cependant être nettoyés sur une base annuelle (fig. 1.9B). En hiver, un nettoyage du fossé est aussi nécessaire après un ou plusieurs épisodes avalancheux afin de libérer les dépôts neigeux. Lorsque cette opération n'est pas effectuée, les dépôts d'avalanches qui obstruent le fossé empêchent la neige des avalanches

subséquentes de s'y accumuler, leur permettant ainsi d'atteindre la route plus facilement (fig. 1.9A). Notons que les coûts associés au nettoyage du fossé et du ponceau sont en moyenne de 4000 à 5000 dollars par année.

Malgré la présence du mur, du fossé et du ponceau, le risque qu'une avalanche, qu'un bloc de glace ou de roche ou encore qu'une coulée de débris se rende jusqu'à la route 132 demeure considérable. En effet, le mur suffit généralement à contenir les blocs de glaces et de roche, mais le volume des écroulements dépasse parfois la capacité des infrastructures de protection (Gauthier, 2008). Des avalanches atteignant la route ont aussi été fréquemment observées dans le passé. Selon certains employés et ex-employés du MTQ, il est possible qu'un de ces aléas entraîne la fermeture totale ou partielle de la route. Ils sont aussi susceptibles de causer des accidents et/ou d'endommager le mur de protection.

Le mur de protection situé au pied du couloir d'Aqua Velva aurait d'ailleurs été endommagé à quelques reprises depuis son installation. Le remplacement de certaines glissières de sécurité (blocs de béton) aurait été effectué au moins deux reprises. Le remplacement d'une glissière de sécurité engendre des coûts de 600 dollars soit, 6000 à 7000 dollars pour le remplacement du mur en entier.

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE

2.1. Choix du site d'étude et cartographie

Tel que mentionné, le couloir d'Aqua Velva et le secteur 60 de la route 132 constituent une zone reconnue comme étant très active sur le plan géomorphologique, et ce, tant par les chercheurs ayant travaillé dans la région que par les employés du Ministère des Transports du Québec qui en assurent la protection. Par ailleurs, très peu d'études ont directement porté sur la dynamique des aléas géomorphologiques de versants dans les couloirs à carapace de glace de la Gaspésie septentrionale. Le manque d'information sur ce type de versant et l'important niveau d'activité du couloir d'Aqua Velva ont ainsi suscité l'intérêt pour cette recherche. L'analyse liée à la présente étude a débuté en 2011.

Le couloir à carapace de glace a tout d'abord été parcouru dans sa totalité afin d'observer, recenser et mesurer les différentes caractéristiques du site. Le couloir a ainsi été mesuré à l'aide de transects de 10 m et de 20 m. L'inclinaison du couloir ainsi que celle de la paroi a aussi été mesurée pour chaque transect. Les mesures GSP n'offrant pas la précision désirée, la cartographie du couloir a été réalisée à l'aide d'un télémètre et d'un ruban à mesurer. Les chenaux secondaires ont eux aussi fait l'objet d'une cartographie. La cartographie du site a ensuite été réalisée à l'aide du logiciel Adobe Illustrator.

2.2. Sources de données et traitements

2.2.1. Base de données du Ministère des Transports du Québec

Devant l'importante et récurrente problématique des mouvements gravitaires menaçant les routes 132 et 198, le Ministère des Transports du Québec a créé en 1987 un groupe spécial de patrouilleurs nommé Patrouille de roche (Hétu, 2007 ; Gauthier, 2008). Cette unité a pour mandat de circuler jour et nuit sur les routes 132 et 198 afin de localiser, inventorier et déloger les débris de versants obstruant la chaussée. La zone d'inventaire a ainsi été segmentée en 12 tronçons numérotés, de longueur variant entre 4,1 et 11,8 km (moyenne de 8,8 km) (Hétu, 2007), pour une longueur totale de 106,1 km (Hétu, 2007 ; Fortin *et al.*, 2011a) (fig. 1.1).

Les patrouilleurs doivent remplir une fiche pour chaque débris délogé comprenant certaines caractéristiques : la date et l'heure de l'observation, le numéro du secteur, la nature du matériel (roche, glace, terre, neige), le nombre et la dimension des blocs de pierre ou de glace, le type d'intervention effectué (manuelle ou mécanisée) ainsi qu'une estimation de l'heure du mouvement gravitaire (Hétu, 2007 ; Gauthier, 2008). Depuis 2000, ces fiches sont entrées dans une base de données informatique. Toutefois, pour des raisons inconnues des employés du MTQ, les données de 2001 sont manquantes (Gauthier, 2008). Il en va de même pour les données d'avalanches de neige dont aucune n'est disponible avant 2000.

Les informations notées sur ces fiches sont nécessairement limitées. Dans le cas des avalanches, les fiches ne comportent aucune donnée sur le type d'avalanche, le volume de neige mobilisé et la distance parcourue. Toutefois, elles tiennent compte de l'origine de l'avalanche (anthropique ou naturelle) et si son dépôt a bloqué la route de manière partielle ou totale. Évidemment, les avalanches de petite taille dont l'extension spatiale n'atteint pas la route ne sont pas inventoriées (Hétu et Gray,

1980 ; Hétu et Vandelac, 1989 ; Hétu, 1991 ; Hétu, 2007). Seules les grosses avalanches à fréquence moindre sont donc enregistrées.

Tel que confirmé par le personnel du MTQ, le couloir le plus actif et problématique, sinon le seul, du secteur 60 est celui d'Aqua Velva. La localisation exacte (coordonnées géographiques) de chaque prise de données n'étant pas effectuée par la patrouille, aucune distinction entre les différents couloirs d'un même secteur n'est possible. Ainsi, malgré la présence d'autres couloirs de moindre importance dans le secteur 60, nous considérerons toutes les données de ce secteur comme étant lié au couloir d'Aqua Velva. Les données issues de la base de données du MTQ ont été traitées afin de faire ressortir les principales caractéristiques des différentes interventions effectuées (nombre total et type d'intervention, moyenne annuelle, mensuelle et saisonnière, etc.). Ces analyses ont permis de préciser la fréquence et l'occurrence temporelle des interventions liées aux écroulements de carapace de glace et aux avalanches de neiges dans le couloir d'Aqua Velva.

2.2.2. Données dendrogéomorphologiques

Au total, 51 sapin baumier [*Abies balsamea* (L.) Mill.] ont été échantillonnés sur la bordure est du couloir. Le choix de cette espèce s'explique par son importance sur le site, sa facilité d'échantillonnage et sa grande sensibilité aux forçages mécaniques internes (Ouellet, 2010). Le sapin baumier est en effet reconnu comme un indicateur présentant une haute résolution dendrochronologique pour la reconstitution spatiotemporelle de processus géomorphologiques (Strunk, 1997). Les échantillons ont tous été prélevés à l'été (juin) 2011 sous forme sections (25 échantillons) ou de carottes (26 échantillons).

Les arbres échantillonnés ont été sélectionnés suite à l'observation de blessures mécaniques externes (cicatrices d'impact) ainsi que par la présence de

source d'impact à proximité (blocs de roches et débris rocheux sur la partie amont du tronc). Lorsque la blessure semblait avoir été causée par un arbre tombé ou une inclinaison trop prononcée, l'arbre cicatrisé était automatiquement rejeté de l'échantillonnage. Pour ces raisons, aucun arbre n'a été prélevé sur la bordure ouest du couloir, car celle-ci présentait une inclinaison de loin supérieure à celle du couloir et de la bordure est. De ce fait, la probabilité d'intervention d'agents étrangers aux aléas étudiés a été considérée trop élevée. Tous les sapins baumiers présentant les caractéristiques désirées, et situés sur la bordure est, à moins de 20-30 mètres du couloir, ont été échantillonnés.

Après avoir séché, les échantillons ont été sablés et poncés afin de faire ressortir les cernes de croissance et leurs anomalies. Suite à leur préparation, les échantillons ont été pointés et datés individuellement à l'aide d'un binoculaire. La datation a été effectuée en calculant le nombre de cernes à partir du cœur sur un minimum de deux rayons. Plusieurs types d'anomalies de croissance ont été reconnus comme des indicateurs de mouvements gravitaires, soit les cicatrices d'impact, les séquences de bois de réaction et les canaux résinifères traumatiques (Shroder, 1978 ; Stoffel et Bollshweiler, 2008 ; Germain, Filion et Héty, 2009 ; Germain *et al.*, 2009 ; Ouellet, 2010). Seules les cicatrices d'impact, les séquences de bois de réaction et les séquences de réduction significative de croissance (cernes étroits) ont été considérées dans le cadre de cette étude.

Les cicatrices se présentent comme des lésions plus ou moins profondes dans l'écorce et le cambium et sont généralement causées par l'impact d'un projectile tel qu'un bloc rocheux ou de glace. Les différentes cicatrices observées dans les cernes de croissance des sections transversales ont été datées puis inventoriées. Le bois de réaction est un bois de couleur plus sombre qui se forme suite la contrainte d'un forçage mécanique du tronc comme la déstabilisation de la position verticale de l'arbre. Ce dernier produit alors du bois de réaction, ou du bois de compression dans

le cas des conifères, afin de se redresser. Chaque cerne de bois de réaction des échantillons a été daté, répertorié et regroupé en séquences. Les réductions de croissance se distinguent par leur couleur généralement plus pâle et leur largeur inférieur à la moyenne. Leur formation peut découler soit de conditions météorologiques difficiles (faibles précipitations, basses températures estivales, etc.) ou d'un déséquilibre dans l'environnement immédiat de l'arbre tel que l'effet d'un processus géomorphologique.

L'année de vie la plus ancienne des échantillons a permis de déterminer le nombre d'arbres échantillonnés qui étaient vivants pour chaque année entre 1900 et 2011. Le nombre d'arbres cicatrisés et/ou présentant des séquences de bois de réaction et/ou de cernes étroits a ensuite pu être mis en relation avec le nombre d'arbres vivants aux années de cicatrisation et de début de formation de bois de réaction et de cernes étroits.

2.2.3. Données météorologiques

Les données météorologiques utilisées dans le cadre de cette étude proviennent principalement de la station d'Environnement Canada de Cap-Chat, située à environ 15 km de Sainte-Anne-des-Monts (tabl. 2.1). L'absence de données entre 1983 et 1993 à cette station a toutefois conduit à l'utilisation des données de la station de Sainte-Anne-des-Monts (49°08' N, 66°28' O, alt. 15,2). Les normales climatiques ne permettant pas de traduire la grande variabilité du climat sur la frange côtière de la Gaspésie, les données météorologiques quotidiennes de températures (moyennes, maximales et minimales) ainsi que celles de précipitations (liquides, solides et totales) ont été utilisées sur une base journalière. Notons que les précipitations totales correspondent à la somme des précipitations liquides (mm) et de l'équivalent en eau (mm EE) des chutes de neige.

Tableau 2.1
Informations sur la station météorologique de Cap-Chat entre 1934 et 2011

Période	1934 - 1974 ¹	1974 -1983 ²	1993 - 1996 ³	1996 - 2011 ⁴
Lieu	Cap-Chat	Cap-Chat Delval	Cap-Chat (AUT)	Cap-Chat
Latitude	49°05' N	49°06' N	49°05' N	49°06'33 N
Longitude	66°45' O	66°42' O	66°44' O	66°39'16 O
Altitude (m)	36,6	30,5	35,3	5,0
Identification climat	7051040	7051041	70510M0	705S002
Identification OMM				71428
Identification TC				WGS

* D'après Environnement Canada, 2012

¹ 1934 à novembre 1974; ² décembre 1974 à mai 1983; ³ 1993 à septembre 1996; ⁴ octobre 1996 à 2011

La station de Cap-Chat ne procurant que l'équivalent en eau des précipitations, il fût difficile de cerner l'impact des précipitations liquides et solides sur le déclenchement des aléas géomorphologiques étudiés. Par ailleurs, le climat nord-gaspésien étant très variable, il est fort probable que les précipitations passent d'un état solide à liquide (et vice-versa) au cours d'une même journée (Hétu et Vandelac, 1989 ; Fortin *et al.*, 2011a). Ainsi, afin de faciliter l'analyse des données météorologiques, lorsque la température minimale journalière est demeurée sous le point de congélation, les précipitations ont été considérées comme étant solides.

2.2.3.1. Écroulements des carapaces de glace

L'analyse des températures moyennes et des précipitations liquides sur une base mensuelle et saisonnière, c'est-à-dire de mars à juin inclusivement, et leur mise en relation avec les événements inventoriés par le MTQ a permis de spécifier le rôle

de la température et de la pluie dans le démantèlement de la carapace de glace d'Aqua Velva. Ces analyses ont été exécutées sur 13 ans, soit les années 1987, 1989 à 1992, 2000, 2003, 2005, 2006 et 2008 à 2011.

La période d'activité de cet aléa a été déterminée par le calcul des degrés-jours (DJ) cumulés depuis le 1^{er} mars (°C). Ces derniers se rapportent à la somme des températures journalières moyennes supérieures à 0°C à partir du 1^{er} mars pour chacune des années étudiées. Le choix du 1^{er} mars comme seuil de départ est lié au fait qu'il constitue le début de la période de fonte des carapaces de glace (Gauthier, 2008). Cette méthode d'analyse se base en partie sur la méthodologie développée par Gauthier (2008) mettant en relation le nombre de degrés-jours cumulés depuis le 1^{er} mars et les événements de chute de blocs de glace répertoriés par le MTQ.

Après avoir ciblé le nombre de degrés-jours cumulés pour chaque événement, il a été possible de calculer leurs probabilités d'occurrence pour chaque tranche de cinq degrés-jours. L'observation des tendances liées aux probabilités d'occurrence a permis de circonscrire trois phases distinctes d'écroulement. La probabilité d'occurrence historique des seuils de degrés-jours limitant ces phases ont ensuite été observés dans les données de températures moyennes pour les 76 années (1935 à 2011, excluant 1975 compte tenu d'un manque important de données). Les jours julien correspondant à ces seuils ont ensuite été répertoriés dans les données historiques. Notons que dans le cadre de cette manipulation, le premier jour julien a été considéré comme étant le 1^{er} mars. Les dates concordants aux jours julien les plus probables d'être les seuils de début et de fin de chaque phase ont ensuite été observée. Leur probabilité d'occurrence respective a ensuite été calculée. L'ensemble de ces étapes a permis de circonscrire dans le temps, en termes de date, les périodes temporelles d'activité d'écroulement des carapaces de glace.

2.2.3.2. Occurrence des avalanches de neige

Dans le cas des conditions météorologiques liées à l'activité avalancheuse, les analyses ont été réalisées sur une période de 10 ans (2000 à 2011). Principalement basées sur la méthodologie de Fortin *et al.* (2011a), elles ont plus précisément portées sur les aspects suivant: 1) la distribution statistique des précipitations hivernales au cours de la saison froide, c'est-à-dire de décembre de l'année précédente à avril de l'année suivante (DJFMA), selon des classes de 5 cm; 2) le cumul des précipitations solides et liquides pour des pas de temps de 24, 48 et 72 heures et ; 3) la fréquence des cycles de gel-dégel (CGD) correspondant au passage d'une température minimale $\leq 0^{\circ}\text{C}$ à une température maximale supérieure à 0°C au cours d'une même journée et ; 4) la quantité des précipitations reçues sur une base mensuelle au cours des cinq années étudiées (2002-03, 2004-05, 2005-06, 2008-09 et 2010-11).

La période d'activité des avalanches de neige a été déterminée de façon bimodale, soit en fonction des deux régimes avalancheux principaux (régime de tempête et printanier) observés dans le couloir d'Aqua Velva. La période d'activité liée au régime de tempête a été déterminée à l'aide du cumul des précipitations solides (cm) sur 24, 48 et 72 h et leur regroupement en trois classes (> 15 classe 1 ≤ 25 cm, > 25 classe 2 ≤ 35 cm, > 35 cm, classe 3). La fréquence et la distribution de ces classes ont ensuite été observées dans les données météorologiques de 2000 à 2011.

La période d'activité liée au régime printanier a, quant à elle, été déterminée par le calcul de l'épaisseur du couvert de neige sur 71 ans, soit de 1937 à 2011, excluant 1951, 1953, 1963 et 2008 par manque de données. Les stations météorologiques avoisinantes ne fournissant pas de données de neige au sol, l'épaisseur du couvert neigeux a donc été estimée en soustrayant les précipitations solides cumulées (cm) et l'épaisseur du couvert de neige fondue (M) (cm). Cela

induit donc que chaque centimètre de neige précipité a été considéré comme ayant contribué au couvert neigeux. L'épaisseur du couvert neigeux fondu (M) a été calculée selon le modèle simple proposé par Rango et Martinec (1995) qui se base sur les degrés-jours de fontes (DJF) cumulés comme indicateur de l'ampleur de la fonte printanière :

$$M = aT \quad (1)$$

où a représente le coefficient de degrés-jours de fonte (DJF) en cm/degrés-jour et T représente les DJF en °C /jour. Le coefficient de degrés-jours de fonte (a) a été déterminé selon l'équation proposée par ces mêmes auteurs pour les milieux ouverts :

$$a[\text{cm } ^\circ\text{C}^{-1}\text{d}^{-1}] = 1.96 \frac{\rho_s}{\rho_w} - 0.239 \quad (2)$$

où ρ_s représente la densité de la neige et ρ_w représente la densité de l'eau. Ne connaissant pas la densité du couvert de neige propre au couloir d'Aqua Velva ni la densité de ceux des milieux côtiers gaspésiens, les données de densité de la neige de Fortin et al. (2011b) pour la région du Mount Seymour (contexte maritime) en Colombie-Britannique ont été employées (tabl. 2.2).

Tableau 2.2
Densité du couvert de neige pour la région de Mount Seymour (C.-B.)

Mois	Densité moyenne (kg/m^3)
Mars	435
Avril	455
Mai	520

* (D'après Fortin *et al.*, 2011b)

Ces mêmes auteurs proposent des densités pour la péninsule gaspésienne, mais leur prélèvement ayant été effectué en Gaspésie centrale, nous avons préféré utiliser celles du Mount Seymour compte tenu de son contexte maritime similaire à la frange nord de la Gaspésie. Ces données correspondent aussi à la valeur maximale de densité (mai) de 500 kg/m^3 pour les milieux maritimes de la Norvège (Larsen, 2000).

Les degrés-jours de fonte (T) ($^{\circ}\text{C}/\text{jour}$) ont été calculés à partir du début de la période de fonte intermittente (p), soit la première période de six jours consécutifs où la température moyenne journalière est supérieure à 0°C (Yagouti *et al.*, 2008). Cela induit nécessairement qu'aucune fonte antérieure à cette période n'a été considérée. L'épaisseur journalière du couvert de neige a été calculée en soustrayant les précipitations solides cumulées (cm) par l'épaisseur cumulée du couvert de neige fondue (M) (cm). Le taux de fonte (cm/jour) a ensuite été calculé en divisant la somme annuelle des précipitations solides (cm) par le nombre de jours de la période de fonte intermittente (p).

Il est important de noter que le calcul de l'épaisseur du couvert de neige tel qu'employé dans cette étude ne permet pas de prendre en compte de nombreuses variables. L'orientation du terrain, l'exposition et la radiation solaire, les cycles de gel-dégel et la stratigraphie du manteau neigeux, la déflation par le vent et l'impact des aléas géomorphologiques tels que les avalanches sont tous des éléments qui jouent un rôle à divers degrés dans la dynamique de fonte d'un couvert de neige et ne sont pas considérés dans toute leur complexité dans le modèle proposé et utilisé. Par ailleurs, dû au manque de continuité dans les données météorologiques, cette méthode a été effectuée à partir des données de précipitations solides et de température moyenne de deux stations différentes, soit les stations de Cap-Chat (1937 à 1982 et 1998 à 2011) et de Sainte-Anne-des-Monts (1983 à 1997).

2.2.3.3. Analyse multi-aléas

Outre les données employées pour la détermination des périodes d'activités d'écroulement des carapaces de glace et d'occurrence des avalanches de neige, seules les données de précipitations solides et totales ont été utilisées dans cette section. Celles-ci ont servi au calcul du ratio journalier (%) entre le couvert neigeux (épaisseur cumulée en cm) et les précipitations totales cumulées (EE mm). Ce ratio a permis de représenter le pourcentage des précipitations totales cumulées restant sur le site d'étude et de le superposer aux périodes d'activité de chute de blocs de glace.

2.2.4. Autres données

Afin de compléter les résultats issus de l'analyse de la base de données du MTQ, des données météorologiques d'Environnement Canada et des données dendrogéomorphologiques, des informations supplémentaires ont été collectées auprès de certains responsables de l'entretien des routes du Centre de service de Sainte-Anne-des-Monts du MTQ. Ces personnes ressources ont permis de spécifier plusieurs détails concernant le déroulement des opérations de la Patrouille de roche, l'état général du réseau routier ainsi que certaines infrastructures de protection. Ces données ont été employées à l'évaluation de la résilience et la vulnérabilité du milieu étudié.

CHAPITRE III

RÉSULTATS

3.1. Activité géomorphologique du couloir d'Aqua Velva

L'activité géomorphologique du couloir d'Aqua Velva et le risque qu'elle engendre pour la route 132, située directement à la base du versant est connue depuis longtemps. En effet, des sept parois de glace répertoriées sur le tronçon 60 par Gauthier (2008) et des nombreux couloirs d'avalanche observés dans ce même secteur, le site d'Aqua Velva est reconnu par le MTQ comme étant le plus actif.

3.1.1. Évènements recensés entre 1987 et 2011

Un total de 112 interventions liées aux aléas géomorphologiques de versant ont été répertoriés par le MTQ dans le secteur 60 entre 1987 et 2000. De ceux-ci, 58 % étaient liées aux éboulis rocheux, 26,8 % aux chutes de blocs de glace et 15,2 % aux avalanches de neige. À lui seul, le secteur 60 concentre près de la moitié (49,6 %) des interventions effectuées dans la zone entre Sainte-Anne-des-Monts et Rivière-à-Claude (secteurs 50 à 90 ; fig. 1.1) entre 2000 et 2011. Le secteur 60 constitue, selon les employés et ex-employés du Centre de services de Sainte-Anne-des-Monts que nous avons consultés, l'une des « pires places » et nécessite d'être continuellement vérifié. Le niveau d'activité géomorphologique du couloir a été suffisamment élevé dans le passé (fig. 1.8) pour justifier non seulement l'éloignement de la route du

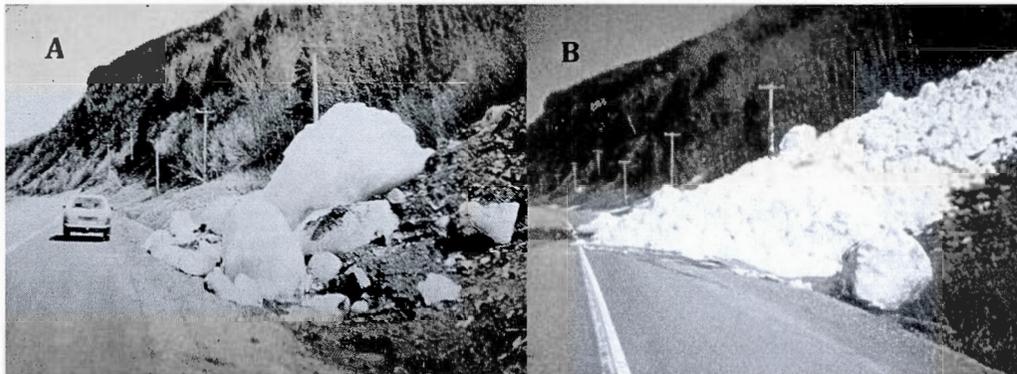


Figure 3.1. Montage photo : A) dépôt de blocs de glace en bordure du couloir d'Aqua Velva dans les années 80 (MTQ) et; B) avalanche contenant des blocs de glace obstruant partiellement la route nationale 132 près de La Martre (secteur 60), le 24 avril 1991 (Hétu, 2007).

versant lors de sa reconstruction en 1983 mais aussi la mise en place d'un mur de protection à la base du talus dans les années 90.

3.1.2. Activité enregistrée dans les cernes de croissance des arbres

L'analyse dendrochronologique des échantillons prélevés sur le site du couloir d'Aqua Velva a permis d'observer le niveau d'activité géomorphologique du couloir sur une période de 111 ans, soit entre 1900 et 2011. L'observation de cicatrices d'impacts ou d'anomalies de croissance (bois de réaction et réduction de croissance) dans les cernes des arbres a permis de mettre en relief les principales périodes d'activité ainsi que les événements géomorphologiques majeurs qui y sont liés.

3.1.2.1. Grandes périodes d'activité

En observant le pourcentage d'arbres vivants cicatrisés pour chaque année entre 1900 et 2011 (fig. 3.2), on remarque que ceux-ci se concentrent surtout à partir

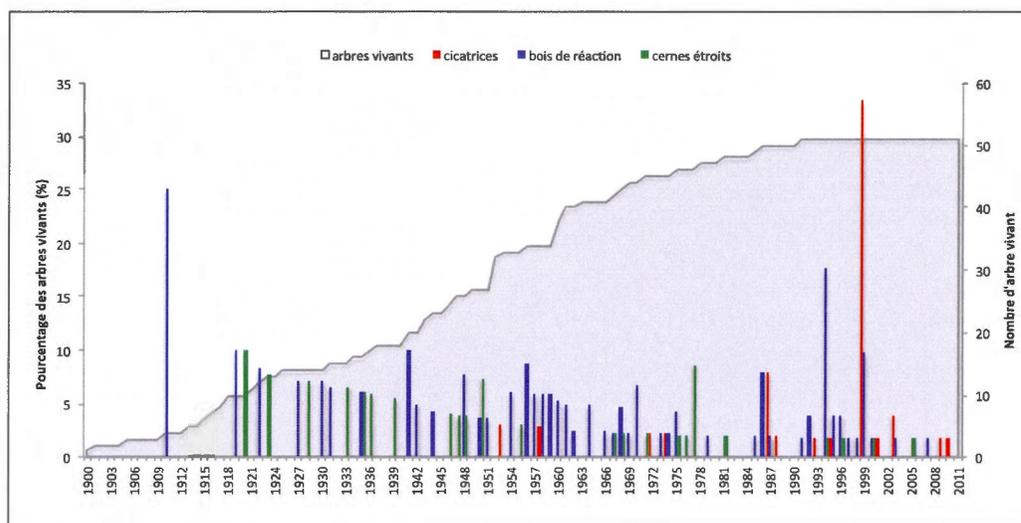


Figure 3.2. Pourcentage d'arbres vivants cicatrisés et/ou présentant des séquences de bois de réaction et/ou des cernes étroits entre 1900 et 2011.

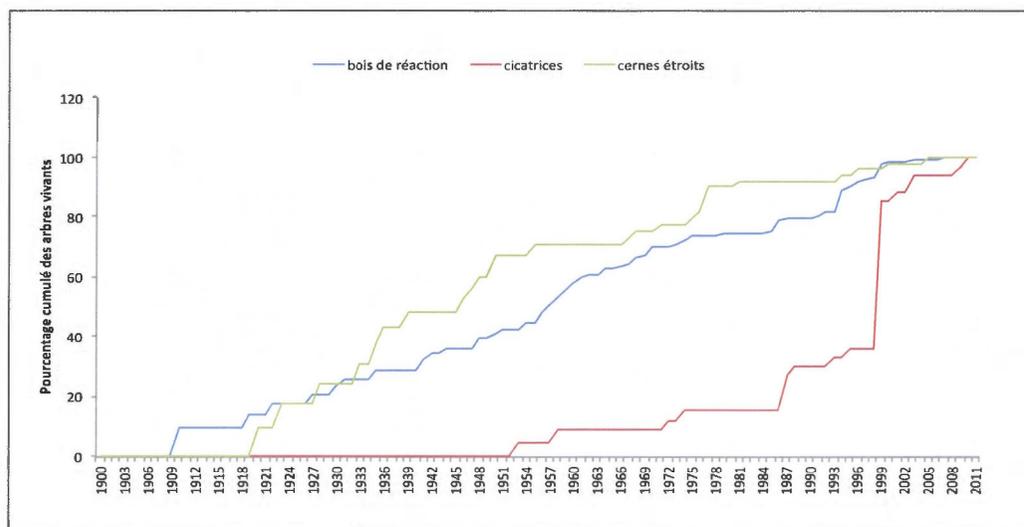


Figure 3.3. Pourcentage cumulé des arbres vivants cicatrisés et/ou présentant des séquences de bois de réaction et/ou des cernes étroits entre 1900 et 2011.

de la fin des années 80. En effet, près de 75 % de ceux-ci présentent des cicatrices d'impacts datées à partir de 1987. Par ailleurs, la présence de cicatrices antérieures à cette période reste sporadique (fig.3.3). À l'opposé, la formation de bois de réaction est plutôt demeurée constante dans le temps. On observe toutefois deux périodes lors desquelles celle-ci est plus active : 1955-1962 et 1993-2000 (fig.3.3). Ces deux périodes de huit ans concentrent à elles seules 32,5 % des séquences de bois de réaction observée (respectivement 15,9 % et 16,6 %). Enfin, trois périodes de création de réduction significative de croissance ont été observées (fig.3.3). La première concentre près de la moitié des cernes étroits (48,5 %) en 20 ans soit de 1919 à 1940. Les deux autres regroupent chacune près de 20 % de la formation de cernes étroits sur respectivement cinq et huit ans (1945-1950 et 1965-1977).

3.1.2.2. Événements majeurs

L'observation des cicatrices d'impacts répertoriées dans les cernes de croissance révèle l'existence d'un épisode important d'activité géomorphologique sur le talus d'Aqua Velva. En effet, on remarque que 49,4 % des arbres vivants en 1999 présentent une cicatrice la même année (fig 3.2). Notons que ce nombre comprend uniquement les arbres sectionnés (25 arbres sur 51). Ainsi, un peu plus de la moitié des arbres échantillonnés, sur lesquels de nombreuses cicatrices avaient été observées de visu, ne sont pas considérés dans ce ratio. Par ailleurs, on observe aussi un événement important en 1987-1988 regroupant près de 15 % des arbres vivants cicatrises au cours de ces mêmes années. Le même signal s'observe dans la formation de bois de réaction. En effet, on observe qu'un peu plus de 20 % des arbres échantillonnés présentent des séquences de bois de réaction après 1990. De celles-ci, 16,6 % sont survenues entre 1994 et 2000. On remarque cependant que la formation de cernes étroits n'affiche pas la même tendance.

En conclusion, on constate une concentration considérable des arbres vivants présentant des cicatrices d'impact et/ou du bois de réaction entre 1987 et 2011, indiquant une hausse de l'activité géomorphologique dans le couloir d'Aqua Velva à partir de la fin des années 80. Les analyses montrent aussi un pic important d'activité en 1999, révélant un événement géomorphologique majeur s'étant déroulé au cours de cette même année.

3.2. Écroulements des carapaces de glace

3.2.1. Dynamique de démantèlement

Chaque hiver, la paroi d'Aqua Velva se couvre d'une épaisse carapace de glace ($\sim 4500 \text{ m}^3$) (Gauthier, 2008). Dans le nord de la Gaspésie, on distingue deux types de glace de paroi basés sur des critères hydrologiques : 1) les glaces de paroi formées à partir des écoulements intermittents et ; 2) celles formées par des écoulements persistants (Gauthier, 2008). Alors que les premières, comme la paroi d'Aqua Velva, sont appelées carapaces de glace, les secondes sont plutôt considérées comme des cascades de glace.

L'eau permettant la genèse des carapaces de glace est issue de la résurgence des écoulements hypodermiques au sommet ou au sein des falaises rocheuses, et sa disponibilité est directement dépendante des précipitations (Gauthier, 2008). Des résurgences d'eau souterraine peuvent cependant contribuer à la formation des glaces de paroi. La congélation de l'eau hypodermique s'entame dès les premiers gels automnaux créant les premiers ancrages de glace (Gauthier, 2008 ; Bianchi, 2004). Ces derniers doivent d'ailleurs être bien solides pour supporter la charge des masses de glace qui s'accumule sur la paroi. Le volume des carapaces de glace est très variable et dépendra de la source. En ce sens, le prolongement des écoulements hivernaux contribue à la formation de carapaces volumineuses.

Au printemps, l'augmentation des températures entraîne la déstabilisation des ancrages de glace et cause l'écoulement des carapaces. Celles-ci peuvent libérer des blocs pouvant atteindre plus de dix mètres cubes, lesquels sont susceptibles de parcourir une distance de près de 250 m avant de s'immobiliser (Groleau, 1994 ; Gauthier, 2008). En milieu forestier, ces blocs peuvent heurter et abattre les arbres. La récurrence annuelle de ce phénomène maintient un couloir exempt d'une végétation arborescente dense (Groleau, 1994 ; Gauthier, 2008). Ainsi, ce type de mouvement de masse peut engendrer des conséquences considérables sur la dynamique écologique et sédimentaire des versants, en plus de constituer un risque important pour les infrastructures à proximité. En effet, chaque printemps, des blocs de glace issus de la carapace d'aqua Velva dévalent le versant et risquent de parvenir jusqu'à la route 132.

3.2.2. Fréquence et occurrence des interventions dans le secteur 60

Un total de 30 interventions lié au démantèlement des carapaces de glace a été inventorié par le MTQ dans le secteur 60 de la route 132 entre 1987 et 2011, représentant 27 % des interventions totales dans ce secteur. De ces 30 événements, près de la moitié a entraîné une intervention mécanisée mais aucun n'a causé d'accident auprès des automobilistes.

Entre 1987 et 2011, 13 années ont nécessité des interventions liées aux écroulements des carapaces de glace (fig. 3.4). La majorité des années ne diffère guère de la moyenne de deux interventions par années (une intervention manuelle et une mécanisée). En revanche, les années 1991, 2008 et 2010 se situent largement au-dessus de la moyenne avec respectivement 6, 5 et 5 interventions. Notons que 53,8 % des années au cours desquelles le MTQ a enregistré une activité n'a connu qu'une seule journée active. Rappelons aussi que les données de 2001 étaient manquantes. La

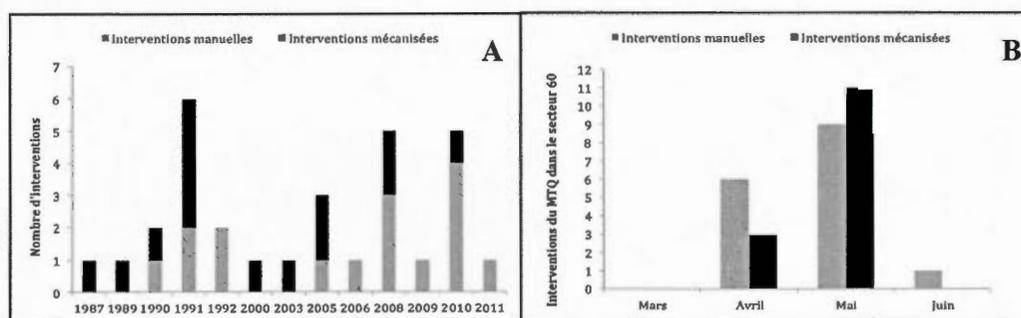


Figure 3.4. Répartition annuelle (A) et mensuelle (B) des interventions (manuelles et mécanisées) liées aux blocs de glace et répertoriées par le MTQ dans le secteur 60 pour les années d'intervention.

période d'activité des chutes de bloc de glace peut s'étendre des mois de mars à juin. Cependant, les mois d'avril et de mai concentrent 97 % des interventions totales et le mois de mai en concentre à lui seul 63 % (fig. 3.4).

3.2.3. Conditions météorologiques de démantèlement

3.2.3.1. Rôle de la température

Selon Gauthier (2008), c'est lorsque la température moyenne journalière passe au-dessus du point de fusion de la glace que les premiers effondrements printaniers se déclenchent. Ceux-ci s'intensifient lorsque la température se maintient au-dessus de 0°C. Le faible nombre d'écroulements enregistrés dans le secteur 60 ne permet cependant pas d'établir les critères de température liés aux premiers événements. En revanche, dans la moitié des cas, les interventions se sont produites lorsque la température moyenne journalière se situait entre 4 et 7°C.

Plusieurs jours avec une température au-dessus de 0°C sont nécessaires au détachement des premiers blocs de glace (Gauthier, 2008). Dans le cas de la paroi d'Aqua Velva, en moyenne 17 jours caractérisés par une température supérieure à

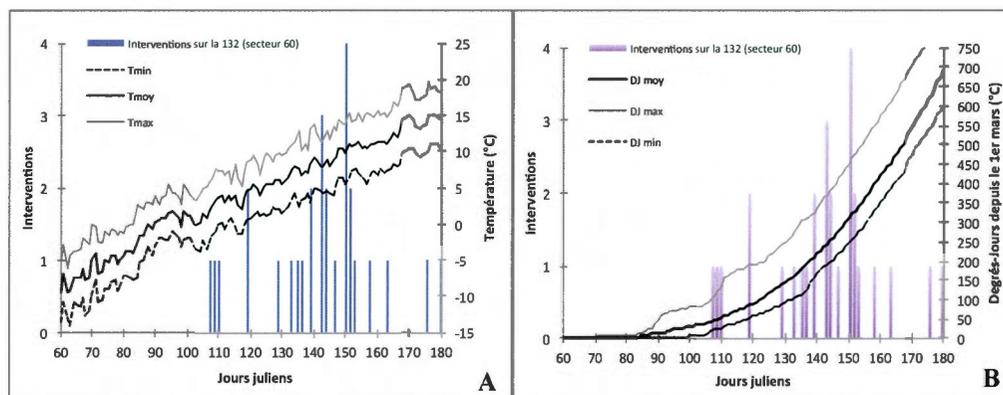


Figure 3.5. A) Évolution des températures journalières moyennes, maximales et minimales (pour les années d'interventions) et fréquence des interventions du MTQ dans le secteur 60, distribuées en fonction des jours juliens, le 1^{er} mars étant le 60^e jour julien ; B) Évolution des degrés-jours positifs moyens, maximaux et minimaux en date du 1^{er} mars (pour les années d'interventions) et fréquence des interventions du MTQ dans le secteur 60, distribuée en fonction des jours juliens, le 1^{er} mars étant le 60^e jour julien.

0°C se sont écoulés avant une première intervention. De plus, dans 66 % des cas, les interventions se sont produites au cours des années dont la température journalière moyenne est restée supérieure à 0°C pendant 9 à 22 jours consécutifs.

Les conditions climatiques étant très variables d'une année à l'autre, l'utilisation de la température comme seul facteur d'instabilité demeure un choix risqué. Le calcul des degrés-jours cumulés depuis le 1^{er} mars s'avère ici une méthode alternative intéressante qui sera abordée subséquemment (Gauthier, 2008).

3.2.3.2. Rôle de la pluie

Quoique nous sachions que la présence d'eau sous forme liquide peut accélérer la fonte de la neige et de la glace, l'influence de la pluie demeure et reste complexe à circonscrire. D'après les observations de Gauthier (2008) sur quelques parois, la fonte

de la glace semble effectivement s'intensifier lors des journées pluvieuses. Les printemps marqués par des interventions du MTQ dans le secteur 60 semblent correspondre à cette tendance. En effet, les précipitations liquides moyennes des mois de mars, avril, mai et juin des années d'écroulement se situent largement au-dessus des normales climatiques (tab. 3.1), particulièrement le mois d'avril avec 47,2 mm de plus (≥ 1 SD). Sur les 13 années caractérisées par des interventions, 11 ont un total saisonnier de pluie supérieur à la moyenne de 164,9 mm. Parmi celles-ci, les années d'événement entre 2000 et 2011 sont largement au-dessus de la normale avec un total saisonnier moyen de 361,3 mm (219 % de plus que la normale, ≥ 1 SD).

L'observation des données de pluie à des pas de temps de 24 h, 48 h et 72 h permet de confirmer l'action de la pluie sur le démantèlement de la carapace de glace Aqua Velva (tabl. 3.1.2). En effet, 17 des 27 journées d'écroulement (63 %) ont connu des précipitations liquides (moyenne de 3,6 mm). De plus, 22 des 27 cas (81,5 %) sont marquées par des précipitations liquides enregistrées dans des délais de 48 h avant les événements. En moyenne, ces journées ont reçu 6,9 mm de pluie cumulée. Enfin, 88,9 % des cas sont caractérisés par des précipitations pluvieuses moyennes de 10,3 mm cumulées sur 72 h avant les interventions (tabl. 3.1).

Quoique ces analyses mettent en évidence le rôle de pluie sur le démantèlement de la carapace de glace Aqua Velva, elles ne permettent pas de circonscrire les détails de son importance tel que son impact réel sur les ancrages de glace ou sur la dynamique d'écroulement. Elles ne permettent pas non plus de déterminer le rôle des précipitations pluvieuses sur les périodes d'activité.

Tableau 3.1
Nombre d'intervention, précipitations liquides** et normales climatiques

Années*	nb d'intervention	mars	avril	mai	juin	total saisonnier	moyenne mensuelle
1987	1	1,8	51,2	55,5	79,3	187,8	47,0
1989	1	16,8	39,4	67,1	61,6	184,9	46,2
1990	2	19,7	18,7	52,9	63,8	155,1	38,8
1991	6	17,2	13,3	53,9	48,6	133,0	33,3
1992	2	14,8	76,0	24,8	82,2	197,8	49,5
2000	1	52,8	118,7	115,0	115,6	402,1	100,5
2003	1	32,6	72,6	123,2	56,0	284,4	71,1
2005	3	13,0	197,8	43,4	227,2	481,4	120,4
2006	1	25,8	101,9	111,1	131,0	369,8	92,5
2008	5	3,6	82,8	75,4	165,2	327,0	81,8
2009	1	38,1	81,0	118	135,3	372,4	93,1
2010	5	14,2	67,8	56,6	88,5	227,1	56,8
2011	1	44,0	84,4	158,6	139,0	426,0	106,5
Total	30						
Moyenne	2	22,6	77,4	81,2	107,2	288,4	
Normales climatiques***		6,7	30,2	58,2	69,8	164,9	41,2

* Années lors desquelles des interventions du MTQ ont été enregistrées

** À partir des données climatiques de la station de Sainte-Anne-des-Monts

*** À partir des données climatiques de la station de Cap-Madeleine

Tableau 3.2
Caractéristiques liées aux précipitations liquides enregistrées le jour, la veille et l'avant-veille des interventions

Caractéristiques	24 h	48 h	72 h
Moyenne des précipitations liquides (mm)*	2,3	5,6	9,1
Moyenne des précipitations liquides (mm) pour <i>n</i>	3,6	6,9	10,3
Nombre de jours d'intervention ayant enregistré de la pluie (<i>n</i>)	17,0	22,0	24,0
% des jours d'intervention total	63,0	81,5	88,9

* Enregistrées à Sainte-Anne-des-Monts pour les journées d'écroulement

3.2.4. Période d'activité

La méthode de Gauthier (2008) sur le calcul des degrés-jours cumulés depuis le 1^{er} mars a été employé pour observer l'évolution temporelle de la température et circonscrire les différentes phases d'activité. Leur analyse révèle que l'activité de démantèlement des carapaces de glace de la paroi Aqua Velva s'effectue en trois phases (fig. 3.6).

Une accumulation de 40 degrés-jours est nécessaire au déclenchement de la première phase d'activité. Celle-ci s'échelonne entre 40 et 100 degrés-jours cumulés depuis le 1^{er} mars et regroupe 53,3 % des probabilités d'occurrence d'événement (fig. 3.6). L'augmentation rapide des probabilités (de 0 à 53 %) montre une mise en activité rapide et intense du démantèlement des carapaces de glace. En effet, un peu

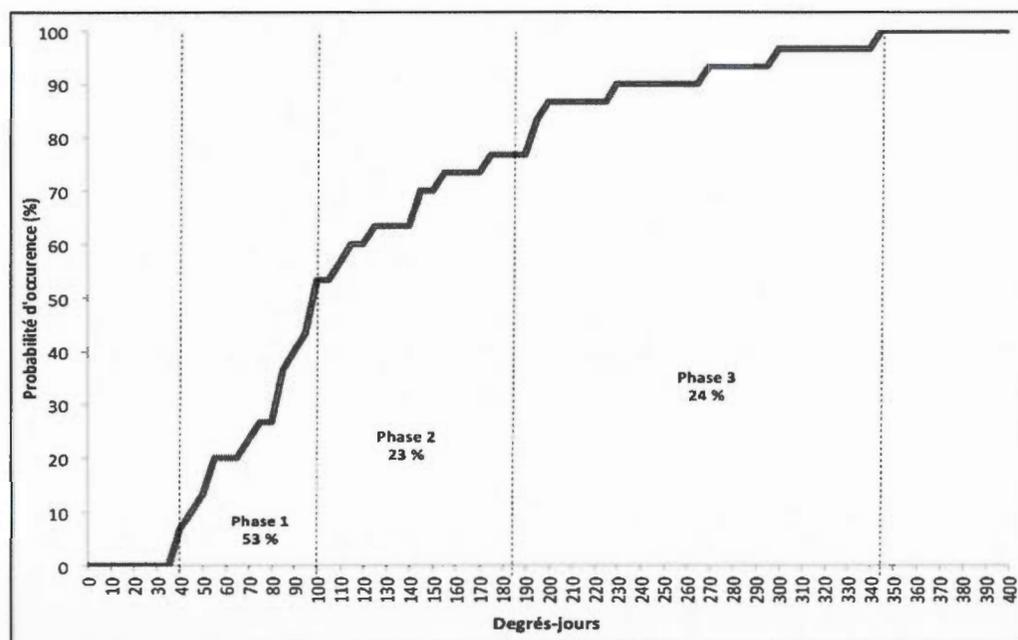


Figure 3.6. Phases d'activité d'écroulement des carapaces de glace d'Aqua Velva déterminées par la distribution historique des probabilités d'occurrence selon les degrés-jours cumulés au 1^{er} mars entre 1935 et 2011, excluant 1975.

plus de la moitié des événements se sont produits dans un intervalle de 70 degrés-jours, quoiqu'aucun événement n'ait été répertorié avec une accumulation de moins de 40 degrés-jours.

Selon les données historiques pour la période de 1935 à 2011, l'intervalle des degrés-jours de la phase 1 correspond en moyenne au 111^e et 126^e jour-julien (± 1 écart type dans 76,3 % et 80,3 % des cas, le 60^e jour-julien étant le 1^{er} mars), soit du 21 avril au 6 mai (tabl. 3.3). La durée moyenne est de 16 jours, mais elle peut s'étendre entre 8 et 29 jours. L'observation des durées historiques de la phase 1 montre qu'elle est susceptible de s'échelonner entre 13 et 19 jours au total (63,2 % des cas) (tabl. 3.4). Toutefois, dans 18,4 % des cas, la phase 1 a eu une durée de 19 jours. L'observation des dates de début et de fin des phases d'activité révèle que dans 48,7 % des cas, la phase 1 débute entre le 20 et le 27 avril pour se terminer entre le 4 et le 9 mai (tabl. 3.5). Des événements sont toutefois susceptibles de se produire avant ces dates tel celui du 7 avril 2010, lequel a d'ailleurs nécessité une intervention mécanisée.

La deuxième phase d'activité s'étale entre 100 et 185 degrés-jours cumulés depuis le 1^{er} mars. Cet intervalle comprend 23,3 % des probabilités d'occurrence d'événement dans le couloir d'Aqua Velva entre 1987 et 2011 (fig. 3.6). Elle inclut une proportion d'événements moindre que la phase 1 et son niveau d'activité est par le fait même moins constant.

En se basant sur les données historiques, la phase 2 s'étend en moyenne entre le 126^e et le 139^e jour-julien (± 1 écart type dans 80,3 % et 77,6 % des cas, le 60^e jour-julien étant le 1^{er} mars), soit du 6 au 19 mai (tabl. 3.3). La durée moyenne est de 14 jours, mais peut s'étendre entre 9 et 21 jours. Cependant, il y a 76,3 % de probabilité que la phase 2 dure de 12 à 16 jours (23,7 % pour une durée de 15 jours) (tabl. 3.4). Par ailleurs, elle débute majoritairement entre le 4 et le 9 mai (48,7 % des cas) et s'achève entre le 12 et le 22 mai (69,7 % des cas) (tabl. 3.5).

Tableau 3.3

Caractéristiques des phases d'activité basées sur les données météorologiques historiques de 1935 à 2011, excluant 1975

Phase	1	2	3	Période totale
Degrés-jour	40 à 100	100 à 185	185 à 345	40 à 345
Jours-julien*	111 à 126	126 à 139	139 à 156	111 et 156
Jours calendaires	21 avril au 6 mai	6 mai au 19 mai	19 mai au 5 juin	21 avril au 5 juin
Nb de jours moyen	16	14	18	45
Nb de jours max	29	21	25	62
Nb de jours min	8	9	6	33

* Le 1er mars étant le 60^e jour-julien.

Tableau 3.4

Durée des trois phases d'activité basées sur les probabilités historiques d'occurrence pour la période 1935 à 2011, excluant 1975

Phase	Durée (jours)	Probabilité (%)
1	entre 13 et 19	63,2
2	entre 12 et 16	76,3
3	entre 15 et 19	71,1
Période totale	entre 40 et 50	72,4

Tableau 3.5

Dates de début et de fin des trois phases d'activité basées sur les probabilités historiques d'occurrence pour la période 1935 à 2011, excluant 1975.

Phase	Début	Probabilité (%)	Fin	Probabilité (%)
1	entre le 20 et le 27 avr.	48,7	entre le 4 et le 9 mai	48,7
2	entre le 4 et le 9 mai	48,7	entre le 12 et le 22 mai	69,7
3	entre le 12 et le 22 mai	69,7	entre le 30 mai et le 8 juin	73,7
Période totale	entre le 20 et le 27 avr.	48,7	entre le 30 mai et le 8 juin	73,7

La dernière phase prend place entre 185 et 345 degrés-jours. Tel qu'illustré dans la figure 3.6, la fréquence des événements y est beaucoup moins importante et surtout peu constante (23,3 % des événements sur 160 degrés-jours), traduisant une activité tardive plus isolée. Cela correspond au détachement de blocs résiduels.

Selon les données historiques, la phase 3 coïncide en moyenne avec la période comprise entre le 139^e et le 156^e jour-julien (± 1 écart type dans 77,6 % et 73,7 % des cas, le 60^e jour-julien étant le 1^{er} mars), soit du 19 mai au 5 juin (tabl. 3.3). La durée moyenne est de 18 jours (minimum 6, maximum 25), mais dans 71,1 % des cas, elle atteint de 15 à 19 jours (tabl. 3.4). Notons qu'entre 1937 et 2011, la phase 3 a duré 17 jours dans 19,7 % des cas. Elle s'entame généralement entre le 12 et le 22 mai (69,7 % des cas) pour se terminer entre le 30 mai et le 8 juin (73,7 % des cas) (tabl. 3.5).

En conclusion, la période d'activité de démantèlement de la carapace de glace d'Aqua Velva se déroule entre 40 et 345 degrés-jours cumulés depuis le 1^{er} mars et est constituée de trois phases (fig. 3.6). La première phase est caractérisée par une activité accrue, la seconde d'une activité intermédiaire et la troisième d'une activité résiduelle.

Au total, la période d'activité s'étale en moyenne entre le 40^e et le 345^e jour-julien soit du 21 avril au 5 juin. Elle est d'une durée moyenne de 45 jours, mais peut durer de 33 à 62 jours. Les données historiques montrent cependant que dans 72,4 % des cas, la période totale d'activité dure entre 40 et 50 jours. Tel qu'illustrée à la figure 3.4, elle débute entre le 20 et 27 avril pour prendre fin entre le 30 mai et 8 juin. Notons toutefois que des observations sur d'autres carapaces de glace en Gaspésie septentrionale montrent que la période d'activité totale peut s'étendre jusqu'à 74 jours (Gauthier, 2008).

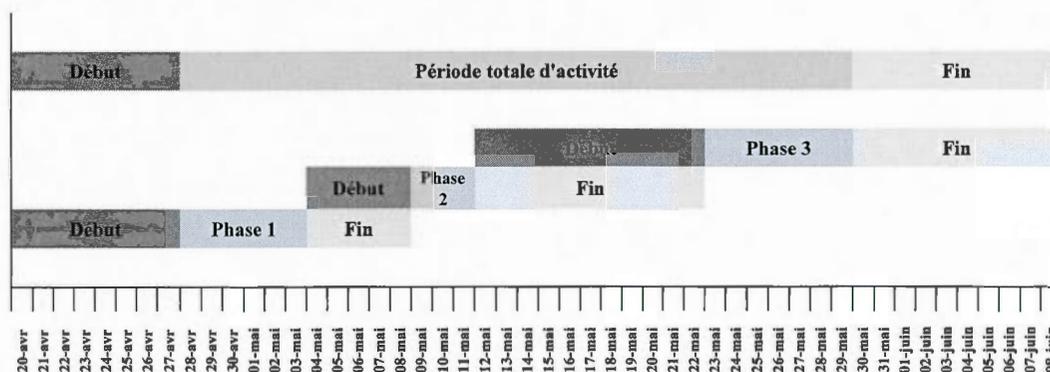


Figure 3.7 Répartition temporelle des phases d'activité selon les dates basées sur les probabilités historiques d'occurrence (1937 à 2011).

3.3. Avalanches de neige

3.3.1. Dynamique avalancheuse

De par son relief imposant et son climat caractérisé par d'importantes précipitations neigeuses, la Gaspésie septentrionale est l'une des principales zones à risque d'avalanche au Québec (Atlas du Bas-Saint-Laurent, 1998 ; Hétu et Bergeron, 2004 ; Hétu et Brown, 2006 ; Hétu 2007). Dans la zone littorale, des masses de neige issues de l'activité avalancheuse recouvrent chaque hiver certaines portions de la route 132 de manière partielle ou totale, interrompant la circulation ou causant parfois des accidents (Hétu, 2007).

Selon Hétu (2007), qui a observé et étudié le phénomène des avalanches sur la frange littorale, la longueur générale des avalanches les plus importantes et qui, par le fait même, rejoignent la route 132, atteint entre 50 et 250 m. Les volumes de neige mobilisés sont, quant à eux, évalués entre 200 et plus de 5000 m³. Ces lourdes masses de neige en mouvement ont la puissance nécessaire pour « ensevelir une voiture, détruire un camion ou raser un pan de forêt de quelques centaines de mètres carrés » (Hétu, 2007, p. 172 ; Dubé *et al.*, 2004).

Les couloirs à carapaces, comme celui d'Aqua Velva, connaissent des régimes avalancheux particuliers à leur environnement. Ceux-ci sont intrinsèquement liés à un mode d'enneigement spécifique et caractérisés par une capacité à conserver un épais manteau neigeux (Fortin *et al.*, 2011a). De ce fait, ces couloirs peuvent réagir tant aux précipitations solides (régime avalancheux de tempête) que liquides (*rain-on-snow events*) (Fortin *et al.*, 2011a ; Germain *et al.*, 2009). En plus de ces deux régimes avalancheux, on distingue des avalanches de fonte liées à des températures printanières élevées, aux fréquents épisodes de pluie ainsi que celles déclenchées par l'écroulement des carapaces de glace se formant chaque hiver sur les parois surplombant les couloirs. Ce dernier type de régime avalancheux sera abordé subséquemment dans la section 2.4 de ce chapitre. Quoique chacun de ces régimes ait été observé dans le passé, le nombre réduit d'événements répertoriés rend difficile leur hiérarchisation. Par ailleurs, en raison des conditions météorologiques changeantes sur la frange côtière gaspésienne, d'autres scénarios plus complexes demeurent possibles (Héту, 2007 ; Germain *et al.*, 2005, 2009).

Le régime printanier est familier aux couloirs à carapaces de glace grâce à leur exposition nord qui permet aux manteaux neigeux de subsister jusqu'à tard au printemps (i.e. fin du mois de mai), lorsque les précipitations liquides deviennent fréquentes (Héту, 2007). C'est toutefois le régime de tempête qui prédomine par sa fréquence élevée. En effet, ce régime est caractérisé par d'importantes précipitations de neige, principal facteur explicatif du déclenchement des avalanches. Mentionnons que ce n'est pas tant la quantité de précipitations hivernales qui constitue un facteur déterminant que la répartition des chutes de neige (Loup et Lovie, 1966 ; Héту, 2007 ; Germain *et al.*, 2009). Ainsi une importante précipitation neigeuse (tempête) sur une courte période de temps (24, 48 ou 72 h) aura une probabilité plus élevée de déclencher une avalanche. Ce scénario se manifeste dans les données du MTQ entre 1987 et 2011, alors que 16 des 18 avalanches ayant atteint la route 132 se sont

produites durant les mois de février et mars, suite à des précipitations solides moyennes de 17 cm sur 72 h.

Contrairement aux talus d'éboulis, les couloirs à carapaces de glace confinent les avalanches dans leurs étroits couloirs (Hétu, 2007). Sur les versants exposés au nord, le peu d'ensoleillement contribue au fait que les avalanches puissent se déclencher le jour comme la nuit.

3.3.2. Fréquence et occurrence des interventions dans le secteur 60

On dénombre un total de 17 interventions répertoriées dans le secteur 60 de la route 132 liées aux avalanches de neige entre 2000 et 2011, correspondant à 15,3 % du nombre total d'interventions. Par ailleurs, 94 % des avalanches répertoriées par le MTQ ont nécessité une intervention mécanisée. Une seule a cependant bloqué les deux voies de la route et aucune n'a causé d'accident.

Pour cette même période, six hivers sont marqués d'une activité avalancheuse enregistrée par le MTQ soit les hivers 2002-03, 2004-05, 2005-06, 2008-09 et 2010-11 (fig. 3.8). De ceux-ci, les hivers 2004-05, 2005-06 et 2008-09 sont caractérisés par

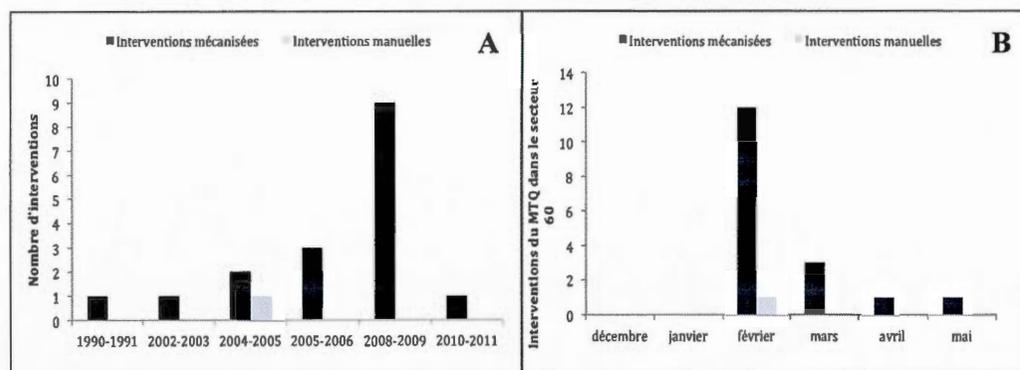


Figure 3.8. Répartition annuelle (A) et mensuelle (B) des interventions (manuelles et mécanisées) liées aux avalanches de neige et répertoriées par le MTQ dans le secteur 60.

une activité supérieure à la moyenne de trois interventions saisonnières. Notons qu'avec ses neuf interventions, l'hiver 2008-2009 se situe largement au-dessus de la moyenne. Les interventions répertoriées par le MTQ s'étendent de février à mai, mais on constate une activité accrue au mois de février avec 75,5 % des interventions totales et 76,4 % des interventions mécanisées (fig. 3.8).

Notons cependant que les données entre 1993 et 1999 sont inexistantes. Il est donc fortement probable que ces années soient marquées d'une activité avalancheuse et que le nombre total d'interventions sur des dépôts d'avalanches soit supérieur à celui mentionné. En effet, l'intervention du 24 avril 1991 répertoriée par Hétu (2007) n'est pas incluse dans la base de données du MTQ. Il est aussi important de rappeler que seules les avalanches atteignant la route ont été répertoriées par le MTQ, excluant ainsi les avalanches de plus faible intensité.

3.3.3. Conditions météorologiques propices au déclenchement des avalanches

3.3.3.1. Rôle des précipitations

Les précipitations jouent un rôle de premier plan dans le déclenchement des avalanches dans la zone côtière. Le secteur 60 n'échappe pas à cette tendance. Tel que mentionné, les régimes avalancheux qui caractérisent les couloirs à carapaces de glace sont très sensibles aux précipitations tant liquides que solides. Ainsi, on y distingue deux principaux régimes avalancheux liés aux précipitations : 1) le régime de tempête et ; 2) le régime printanier.

Le régime de tempête est lié aux importantes précipitations neigeuses à des pas de temps de 24, 48 et 72 heures. Sur neuf journées avalancheuses répertoriées par le MTQ entre 2000 et 2011, un peu plus de la moitié a enregistré des précipitations solides la veille (48 h) ou l'avant-veille (72 h). De plus, 66,7 % des journées avalancheuses ont cumulé de la neige dans des délais de 72 h les précédant. Ce

nombre s'élève cependant à 75 % si l'on considère uniquement les journées d'événements s'étant déroulées entre les mois de janvier et d'avril. En moyenne, les journées avalancheuses répertoriées lors de cette même période ont cumulé 8,9 cm de neige sur 24 h, 13,5 sur 48 h et 14,9 sur 72 h.

Le régime avalancheux printanier est, quant à lui, principalement lié aux précipitations liquides. Un seul cas semble être lié à ce type de régime dans le secteur 60, soit la journée avalancheuse du 4 mai 2011. En observant les données météorologiques, on remarque qu'au cours des trois jours précédents cette date, les températures minimales sont demeurées positives et que 27 mm de pluie ont été enregistrés. Au total, 30 mm de pluie sont tombés au cours des 72 heures précédant l'événement.

Or, tel que mentionné, les couloirs à carapace de glace exposés au nord, comme celui d'Aqua Velva, sont susceptibles de conserver leur manteau neigeux jusque tard au printemps. D'importantes précipitations liquides peuvent entraîner la liquéfaction des masses de neige résiduelles et engendrer des avalanches de neige mouillées ou liquéfiées. Appelé *rain-on-snow events* (Hétu, 2007 ; Germain *et al.*, 2009), il est fort probable que ce soit ce type d'événement qui se soit produit le 4 mai 2011.

3.3.3.2. Rôle des cycles de gel-dégel (CGD)

La deuxième variable climatique considérée est le nombre de cycles gel-dégel (CGD) enregistrés durant les mois d'hiver, c'est-à-dire de décembre à avril inclusivement (DJFMA). Entre 1970 et 2011, chaque hiver a connu une moyenne de 45 CGD, exprimant bien la grande variabilité climatique du littoral nord-gaspésien (fig. 3.6). Quoique les CGD soient principalement concentrés lors des mois de mars (27,5 %) et d'avril (39,9 %), tous les mois d'hiver sont marqués de redoux (CGD). La

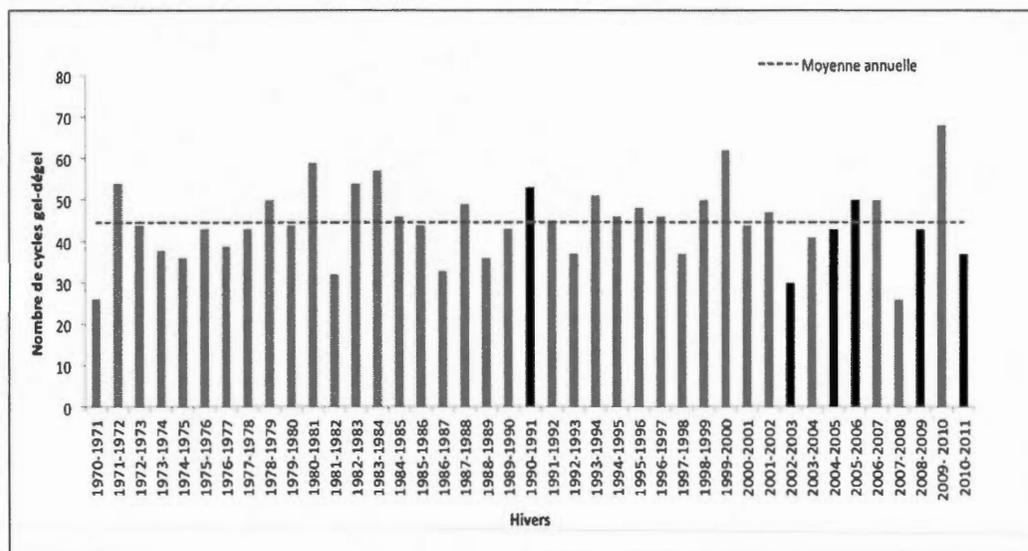


Figure 3.9. Nombre de cycles gels-dégels pour les mois de janvier à avril entre 1970 et 2011 et moyenne annuelle.

plupart des hivers avalancheux ne dépassent pas la moyenne. Seuls les hivers 1990-91 et 2005-06 se situent au-dessus de cette dernière avec respectivement 53 et 50 CGD. Les différences sont surtout notables lors des mois de mars et d'avril.

Dans le couloir d'Aqua Velva, trois dates d'interventions répertoriées par le MTQ ont connu des CGD dans les 72 heures précédant le déclenchement des avalanches : le 9 mars 2005 (un CGD le jour même), le 31 mars 2006 (un CGD 72 heures avant) et le 28 février 2009 (trois CDG dans les 72 h précédent l'événement). Quoiqu'il soit évident que les CGD peuvent avoir un impact considérable sur la stratigraphie du manteau neigeux, leur rôle réel dans le déclenchement des avalanches demeure difficile à cerner. Le faible nombre de données dans le secteur 60 rend encore plus ardu cette tâche.

3.3.4. Période d'activité

L'analyse de la fréquence et de l'occurrence temporelle des avalanches répertoriées par le MTQ liée à celle des conditions climatiques propices au déclenchement des avalanches ont permis de déterminer que l'activité avalancheuse du secteur 60 est principalement liée à un régime de tempête.

Ainsi, afin de caractériser la période d'activité liée à ce régime, des classes de neige cumulée sur 24, 48 et 72 heures ont été déterminées : classe 1 : $> 15 \text{ cm} - \leq 25 \text{ cm}$; classe 2 : $> 25 \text{ cm} - \leq 35 \text{ cm}$ et; classe 3 : $> 35 \text{ cm}$. Puis, leur fréquence lors des années 2000-2011 a été observée. Cette classification a permis de faire ressortir un certain nombre de « journées potentiellement avalancheuses » (JPA), soit les journées dont les précipitations solides enregistrées correspondent à celles des classes d'analyse (tabl. 3.6). On observe ainsi que malgré qu'un grand nombre de JPA soit associé aux deux premières classes de précipitations, aucune de celles-ci n'a été enregistrée comme étant active par le MTQ (0 % de probabilité). Cependant, on observe que plusieurs JPA de la troisième classe sont effectivement liées à une activité avalancheuse, notée par le MTQ, et ce, à des pas de temps de 24, 48 et 72 h.

En effet, sur les 13 JPA ayant enregistré plus de 35 cm de neige au cours d'une période de 72 heures, deux présentent une activité avalancheuse répertoriée (deux avalanches chacune), correspondant à une probabilité d'occurrence de 15,4 % (tabl. 3.6). Lorsqu'on se limite aux précipitations cumulées sur 48 heures, la probabilité augmente à 28,6 % puisque deux des sept JPA ont enregistré des avalanches réelles. Dans le cas des journées mêmes (24 h), la moitié des JPA sont caractérisées par des avalanches (50 % de probabilité) (tableau. 3.6).

Cela indique que d'une part, d'importantes quantités précipitations neigeuses ($> 35 \text{ cm}$) augmentent de manière significative la probabilité d'occurrence des avalanches, et d'autre part, que la période sur laquelle la neige s'accumule joue un

Tableau 3.6
Comparaison entre les journées potentiellement avalancheuses

Classes de précipitations	24 h			48 h			72 h		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Nombre de JPA*	11	4	2	31	10	7	56	16	13
Nombre de JAR**	0	0	1	0	0	2	0	0	2
Probabilité (%)	0	0	50	0	0	28,6	0	0	15,4

* Journée potentiellement avalancheuse (JPA)

** Journées avalancheuses répertoriées (JAR) par le MTQ dans le secteur 60 entre 2000 et 2011.

rôle déterminant. En effet, la probabilité d'occurrence double lorsqu'on passe de 72 à 48 h et de 48 à 24 h. Ainsi, plus la quantité de neige est importante plus le risque est élevé et ; plus la neige s'accumule sur une courte période, plus le risque augmente.

L'observation des JPA entre 2000 et 2011 permet d'analyser la distribution mensuelle, saisonnière et annuelle des fortes précipitations neigeuses (> 35 cm). Au cours de cette période, 76,9 % des journées ayant cumulé plus de 35 cm de neige sur 24, 48 et 72 heures se concentrent lors des mois de janvier à mars. Notons toutefois que la majorité de celles-ci (69,2 %) ont eu lieu en février et en mars et, que 23 % se retrouvent en avril. En moyenne, on note une seule journée par année avec plus de 35 cm de neige. Toutefois, pour la dernière décennie, la totalité des JPA observées est concentrée entre 2004 et 2008.

Le manque de données sur les événements liés au régime avalancheux printanier et leurs conditions météorologiques d'occurrence rend difficile la détermination précise (en termes de dates) d'une période d'activité. Cependant, outre les précipitations liquides qui jouent un rôle déterminant dans le déclenchement des

Tableau 3.7
Caractéristique moyenne de la période de fonte et de ses variables

55

Caractéristiques	Moyenne*
Neige cumulée (cm)*	184,6
DJF (°C)*	315,2
JJ début*	107
JJ fin	155
Date début fonte	17-avr
Date fin fonte	04-juin
Période de fonte (jours)	49
Taux de fonte (cm/jour)	5

* Moyenne calculée sur 71 ans, précipitations solides cumulées à partir du 1er décembre, Degrés-jours de fonte (DJF), 1er jour julien (JJ) correspond au 1er janvier.

Tableau 3.8
Dates de début et de fin de la période de couvert neigeux potentiellement avalancheux entre 1937 et 2011*

Date	Début	Fin
moyenne	01-janv	28-mai
minimum	05-déc	16-avr
maximum	27-févr	23-juin
Intervalle	16-déc - 05-janv	14-mai - 15-juin
Probabilité d'occurrence (%) **	63,4	87,3

* Excluant les années 1951, 1953, 1963 et 2008 par manque de données

** Probabilité d'occurrence pour les intervalles de début et de fin de la période

avalanches printanières, l'une des conditions essentielles à l'occurrence des avalanches est la présence d'un couvert de neige suffisant.

L'utilisation du modèle de degrés-jours de fonte (DJF) a permis de calculer l'épaisseur du couvert neigeux journalier de 1937 à 2011, excluant 1951, 1953, 1963 et 2008 compte tenu d'un manque de données. L'extension temporelle du couvert neigeux printanier a ainsi pu être estimée. Les principales caractéristiques de la

période de fonte et des variables utilisées pour le calcul du manteau neigeux résiduel sont présentées dans le tableau 3.10.

Malgré le fait qu'un couvert de neige résiduel puisse persister jusqu'au 4 juin, cela ne signifie pas que son épaisseur soit suffisante au déclenchement des avalanches. Un seuil de plus de 50 cm d'épaisseur a été déterminé afin de discriminer les couverts neigeux dits « potentiellement avalancheux » des couverts neigeux résiduels qui ne présentent aucun risque. Le seuil de 50 cm a été déterminé subjectivement suite à l'estimation visuelle de l'épaisseur de neige nécessaire pour remplir les interstices entre les débris présents dans le couloir. La distribution de ces couverts potentiellement avalancheux a ensuite été observée sur une base historique (1937 à 2011) afin d'en dégager les périodes temporelles qui y sont associées et leur probabilité d'occurrence respective. En moyenne, la période débute le 1^{er} janvier pour se terminer le 28 mai (tabl. 3.8). Cependant, dans 63,4 % des cas, elle a débute entre le 16 décembre et le 5 janvier et se termine, dans 87,3 % des cas entre le 14 mai et 15 juin. Au plus tôt, la période de couvert neigeux de plus de 50 cm d'épaisseur s'est entamée le 5 décembre pour prendre fin au plus tard à la mi-juin.

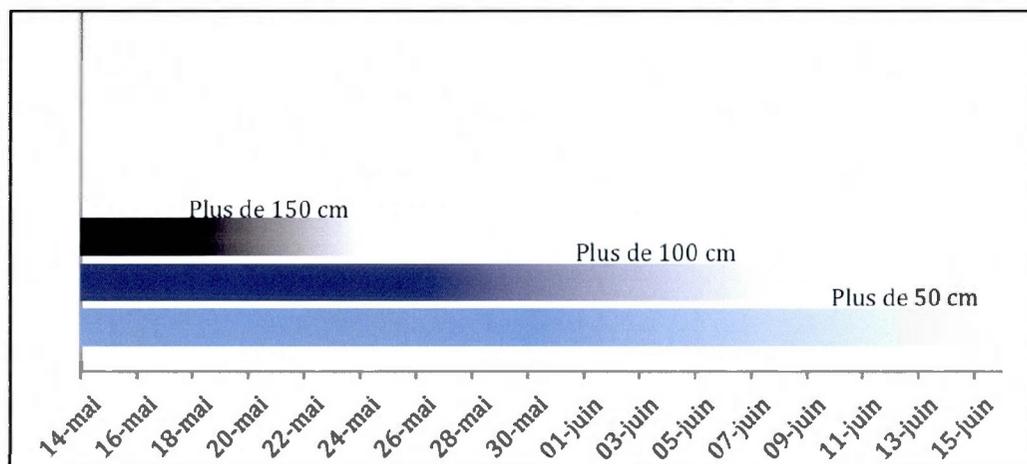


Figure 3.10. Épaisseur du couvert neigeux (cm) pour la phase de fin de la période potentiellement avalancheuse entre 1937 et 2011, excluant 1951, 1953, 1963 et 2008.

Pour la période de fin dont la probabilité d'occurrence était de 87,3 % (14 mai au 15 juin), les couverts neigeux journaliers ont été classifiés en trois catégories d'épaisseur : > 50 cm, > 100 cm et > 150 cm. Pour cette période, 75,8 % des jours dont le couvert neigeux était toujours existant aurait conservé un couvert neigeux d'une épaisseur supérieur à 100 cm jusqu'au 7 juin (fig. 3.10). Pour la même période, 30,3 % des jours seraient caractérisés par un manteau neigeux de plus de 150 cm d'épaisseur et celui-ci aurait persisté jusqu'au 23 mai.

3.4. Dynamique multi-aléas

3.4.1. Historique des interventions multi-aléas

Peu d'études ou d'observations existent sur les événements multi-aléas liés à la dynamique des versants en Gaspésie. Plusieurs indices laissent toutefois présager l'existence d'une activité simultanée ou combinée de plusieurs aléas telle que la présence de blocs de glace retrouvés dans des dépôts avalancheux en bordure de la route 132 (Hétu, 2007). Le fait que ces événements se soient tous produits lors des mois d'avril et de mai, période correspondant à celle du démantèlement des carapaces de glace, vient appuyer cette hypothèse.

Par ailleurs, ce type d'activité multi-aléas a été confirmé de visu dans le couloir d'Aqua Velva (fig. 3.8). En effet, selon Hétu (2007), un bloc de glace de neuf m³ aurait déclenché une importante avalanche de neige humide le 31 mars 2006. Cet incident témoigne de l'existence d'un lien de cause à effet entre ces processus lors de certaines périodes. En ce sens, le démantèlement des carapaces de glace peut non seulement être considéré comme une cause du déclenchement des avalanches printanières, mais aussi être associé à un type de régime avalancheux distinct voire influencer la probabilité d'occurrence de ces dernières lors de période précise.

3.4.2. Période d'activité combinée

La faible quantité de données ne permet pas de rendre compte de la complexité de la dynamique multi-aléas présente dans le couloir d'Aqua Velva. Cependant, l'étude individuelle des aléas d'écroulement des carapaces de glace et d'avalanches de neige et de leur période d'activité respective permet une première tentative d'analyse combinée.

Selon les résultats exposés dans la section 3.2.4, la période moyenne d'activité de démantèlement des carapaces de glace est estimée comme débutant le 21 avril pour se terminer le 5 juin. Comme pour le régime avalancheux printanier, outre l'élément déclencheur (fortes précipitations liquides ou dans le cas des carapaces de glaces, le détachement de blocs), la première prédisposition permettant le déclenchement d'une avalanche est la présence d'un couvert neigeux d'une épaisseur suffisante. Or, tel que mentionné, les épaisseurs du manteau neigeux calculées à la section 3.3.3 ne tiennent pas compte de multiples paramètres tels que la radiation solaire. Celles-ci sont aussi basées sur une densité neigeuse extérieure à la région. Ainsi, nous avons préféré ne pas les utiliser en tant que seuils. Par contre, la présence ou l'absence d'un couvert neigeux a été observée pour les dates de l'activité d'écroulement de la carapace de glace d'Aqua Velva. Puis, pour chaque date limite des trois phases d'activités de démantèlement, le ratio entre le couvert de neige (cm) et les précipitations totales cumulées (EE mm) a été déterminé afin de mettre en relief le pourcentage résiduel, sur une base journalière, de la neige précipitée au cours de l'hiver.

En date du 21 avril, laquelle constitue le début de la première phase d'activité de démantèlement, la totalité des 71 années étudiées est caractérisée par un couvert de neige. Pour cette date, le ratio entre le couvert de neige résiduel et les précipitations

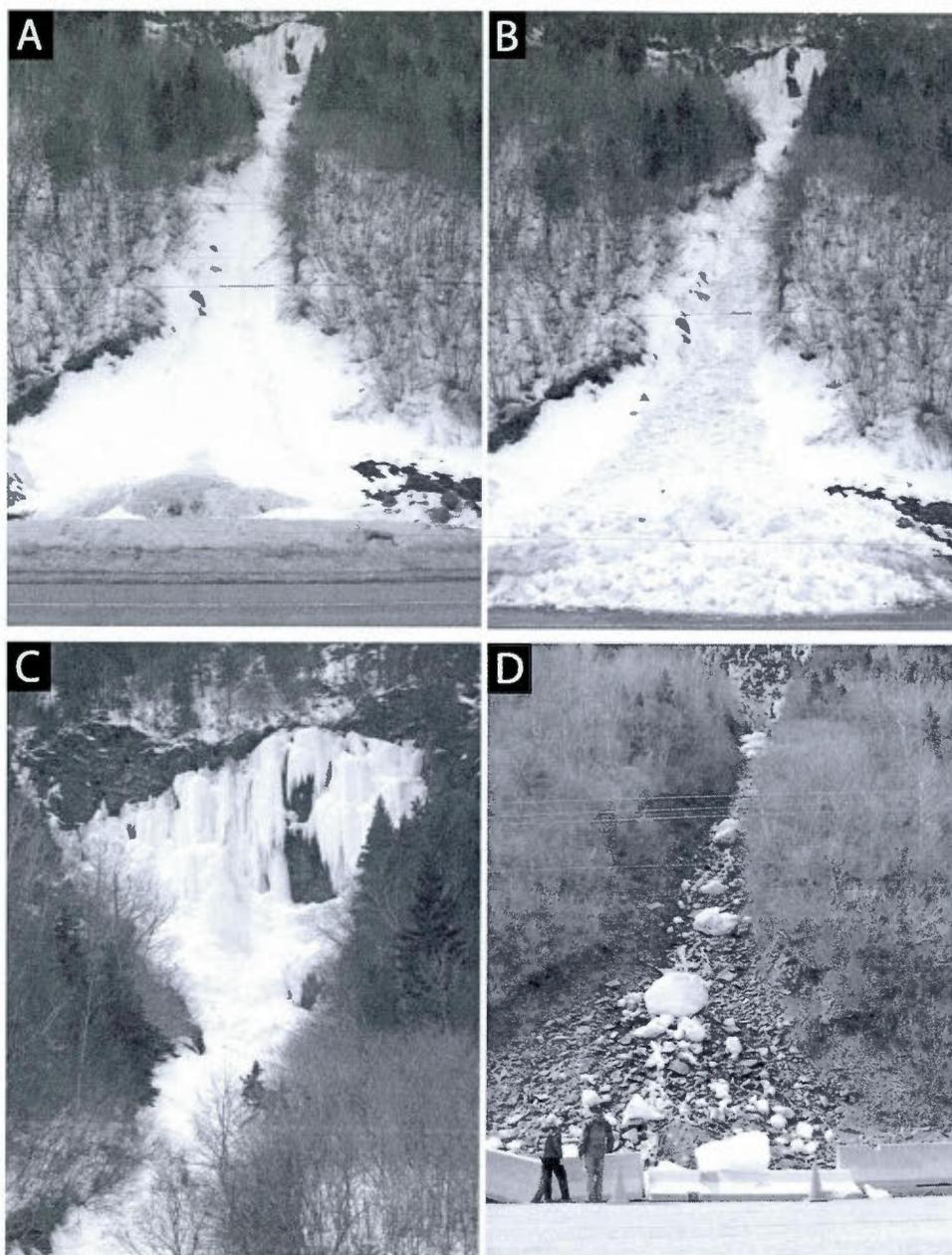


Figure 3.11. Montage photo : **A)** Couloir d'Aqua Velva dominé par une carapace de glace; **B)** Avalanche provoquée par la chute d'un bloc de glace, le 31 mars 2006 ; **C)** Gros plan de la paroi avant la chute du bloc de glace (comparer les photographies A, B et C) et ; **D)** Chute des derniers blocs de glace vers la fin du mois d'avril 2006. Tiré de Héту (2007).

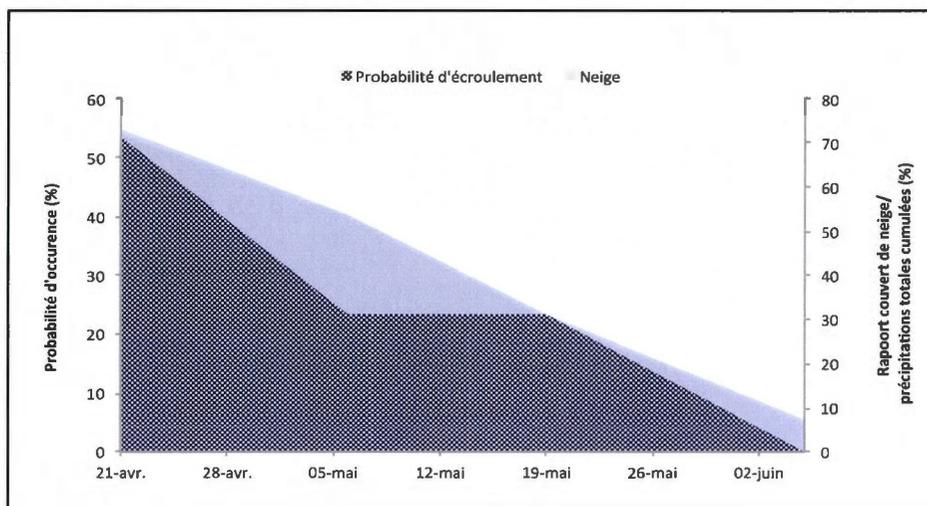


Figure 3.12. Superposition des probabilités d’écroulement des carapaces de glace (%) et du ratio moyen entre le couvert neigeux résiduel et les précipitations totales cumulées (%) pour les dates d’activité de démantèlement.

totales cumulées est de 72,7 % (fig. 3.12). Cela indique que durant cette phase d’écroulement qui, par ailleurs, est la plus active avec 53,3 % de probabilité d’occurrence, presque la totalité des précipitations cumulées sont encore présentes dans le couloir (fig. 3.12). Le risque qu’un événement multi-aléas se produise lors de cette période (21 avril au 6 mai) est donc très probable puisque l’activité de chute de blocs de glace y est très élevé et qu’un fort pourcentage des précipitations totales cumulées se trouve toujours dans le couloir. De plus, la probabilité de déclenchement des avalanches de neige se trouve accentuée suite à d’importantes précipitations liquides, surtout si celles-ci sont concentrées dans un délai inférieur à 72 heures.

En date du 6 mai, soit la date de début de la deuxième phase d’activité de démantèlement près de la totalité des années (98,6 %) avait toujours un manteau neigeux. Pour cette même date le ratio entre le couvert de neige résiduel et les précipitations solides cumulées est de 54 % (fig. 3.12). Ainsi, plus de la moitié des

précipitations cumulées sont toujours présentes sur le site d'étude. Quoique la probabilité d'activité de démantèlement soit moins importante que lors de la phase 1 (23,3 %), le risque qu'un bloc de glace déclenche une avalanche lors de la phase 2 (6 au 19 mai) demeure présent (fig. 3.13).

En date du 19 mai, correspondant au début de la troisième et dernière phase d'activité de chute de blocs de glace, 64 des 71 (90,1 %) années étudiées sont caractérisées par la présence d'un manteau neigeux. Le ratio moyen journalier entre le manteau neigeux et la neige précipitée cumulée est à ce moment de 31,2 % (fig. 3.12). Cela indique qu'à cette date, le tiers des précipitations totales cumulées a subsisté dans le couloir. Bien que la probabilité d'occurrence de chute de blocs de glace soit la même que pour la phase 2 (23,3 %), la quantité de neige toujours présente est alors bien moindre (fig. 3.13). Le risque d'un épisode multi-aléas durant cette période (19 mai au 5 juin) est donc possible, mais peu probable. Il faut aussi considérer que l'activité de la phase 3 est surtout liée au détachement des blocs de glace résiduels dont la dimension est souvent moins élevée et dont le potentiel de

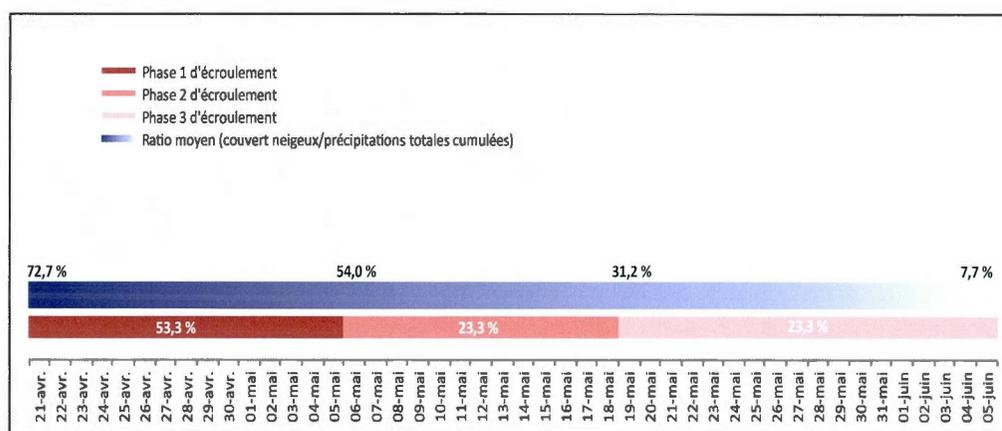


Figure 3.13. Calendrier de la période d'activité d'écroulement des carapaces de glace (jours), de ses probabilités d'occurrence (%) et du ratio moyen du couvert neigeux résiduel par rapport aux précipitations solides cumulées (%) entre 1937 et 2011.

déclenchement d'une avalanche est réduit compte tenu aussi d'un manteau neigeux résiduel de faible épaisseur.

Enfin, lors du 5 juin, qui délimite la fin de la période d'activité de démantèlement des carapaces de glace, près de 46,5 % des années avaient toujours un couvert neigeux. Cependant, le ratio entre le couvert de neige et les précipitations totales cumulées n'atteint que 7,7 % (fig. 3.12). Quoique la chute d'un bloc résiduel reste possible, la probabilité que celui-ci déclenche une avalanche est très faible. En effet, même si un bloc de glace chutait dans le couloir, le couvert de neige résiduel y serait tellement mince et bien ancré compte tenu de la forte rugosité du couloir (i.e. présence de blocs) qu'il serait impossible de déclencher une avalanche.

CHAPITRE IV

DISCUSSION

4.1. Hausse d'activité géomorphologique

À la lumière des résultats dendrogéomorphologiques exposés, on observe une intensification de l'activité des processus géomorphologiques dans le couloir d'Aqua Velva à partir de la fin des années 80. On dénombre plusieurs causes potentielles de ce changement d'intensité. En effet, la région a connu plusieurs événements météorologiques extrêmes au cours des années 1990-2000 tels que les pluies diluviennes d'août et septembre 2005 suite aux ouragans Katrina et Rita qui se sont succédées à trois semaines d'intervalle et ; la tempête du 7 au 9 août 2007 lors de laquelle le volume de pluie enregistré se retrouve parmi les plus importants événements de pluies abondantes mesurées au Québec (Environnement Canada, 2008). Les processus géomorphologiques de versant étant intrinsèquement liés aux conditions météorologiques, il est fort probable que la hausse d'activité enregistrée dans les cernes de croissance des arbres ait été causée, ou du moins aggravée, par ces épisodes climatiques extrêmes. En ce sens, les arbres constituent de bons témoins des processus géomorphologiques agissants dans leur environnement immédiat. La résolution annuelle des analyses dendrogéomorphologiques effectuées dans le cadre de cette étude ne permet toutefois pas la distinction entre les différents processus actifs dans le couloir. En revanche, ces derniers témoignent vraisemblablement d'une recrudescence manifeste de l'activité géomorphologique dans le couloir ou/et d'une déstabilisation liée à une modification du niveau de base et de la pente d'équilibre

suite à un ou des événements extrêmes. Aucun événement de ce type n'est cependant observable au cours de l'année 1999, n'offrant aucune explication d'ordre météorologique aux nombreuses cicatrices datées de cette même année.

Cependant, les signaux enregistrés par les arbres échantillonnés sur le site d'étude concordent de manière très significative avec la période d'installation du mur de protection à la base du versant. Considérant que ce dernier a été construit entre 1995 et 2000, il est possible que cette intervention ait agi comme élément déclencheur ou comme facteur aggravant de cet accroissement d'activité.

Mis en place pour répondre à un risque récurrent lié à différents aléas géomorphologiques de versants (avalanches de neige, éboulis rocheux, écroulement des carapaces de glace et coulées de débris), le mur a nécessité une certaine transformation physique du milieu. En effet, selon certains ex-employés du Centre de service du MTQ à Sainte-Anne-des-Monts, lors de l'installation du mur, le versant a dû être légèrement surcreusé sur une distance d'environ dix mètres à partir de la route. Or, comme pour les glissements de terrain, l'excavation ou le déblai de matériaux à la base d'un couloir en modifie les conditions d'équilibre en accentuant son inclinaison et/ou sa hauteur (MTQ, 2005).

Ce type d'intervention peut ainsi agir comme facteur déclencheur ou aggravant en diminuant le coefficient de sécurité du talus qui en indique le niveau de stabilité. De ce fait, l'état d'équilibre du talus par rapport aux forces gravitaires se retrouve transformé. Les débris situés en amont de la partie modifiée se retrouvent alors déstabilisés puis chutent, entamant un mouvement de rétrogression. Les débris situés en amont de ceux qui se sont écroulés se retrouvent à leur tour déstabilisés puis s'affaissent jusqu'à ce que la paroi rocheuse située en amont soit atteinte ou la roche mère située sous les dépôts. La déstabilisation des strates rocheuses de la paroi est alors susceptible de s'entamer et contribuera au recul longitudinal du couloir. De surcroît, ce phénomène entraîne la mobilisation de grandes quantités de matériaux et

contribue à la déstabilisation de la frange forestière sur le pourtour du couloir. Or, les réseaux racinaires des arbres contribuent de manière directe à la stabilité des dépôts de versant. En effet, alors que le système racinaire des arbres entraîne un renforcement mécanique du sol, le poids des arbres produit une surcharge de la pente qui en renforce la stabilité (Garczynski, 1976). Dans ce contexte, les bordures du couloir sur lesquelles on retrouve de moins en moins d'arbres matures se retrouvent plus sensibles à l'érosion et à l'effet de la gravité. En ce sens, le couloir aura aussi tendance à s'éroder de manière latérale.

De surcroît, l'identification des interventions de nature anthropique comme cause de déstabilisation versant est commune au Québec. En effet, plus de 40 % des glissements de terrain survenus lors des dernières décennies et inventoriés par le MTQ résultent d'interventions anthropiques inappropriées, lesquelles nuisent à la stabilité des talus (MTQ, 2005). Les interventions susceptibles de compromettre l'équilibre d'un talus prennent diverses formes : surcharge au sommet du talus, déblais ou excavation à la base du talus et concentration d'eau vers la pente (MTQ, 2005). Ces travaux, qui peuvent parfois sembler mineurs, requièrent les conseils d'un ingénieur en géotechnique et/ou d'un géomorphologue avant leur exécution, ou doivent être simplement proscrits.

Les actions anthropiques peuvent aider à réduire la vulnérabilité d'un milieu à risque. Que ce soit par l'installation par d'infrastructures de protection, par la mise en place de système de surveillance, par la détermination de mesures de prévention ou par la mise en action de protocoles d'interventions, nos actions sont essentielles au maintien de la sécurité de nos réseaux routiers. La dynamique qui anime les couloirs à carapaces de glace représente cependant des systèmes complexes dans lesquels de multiples éléments interviennent et sur lesquels peu d'informations existent à l'heure actuelle. En effet, La complexité de la dynamique tant individuelle que combinée des aléas géomorphologiques de versant rend difficile sa compréhension globale.

D'autant plus que malgré les études passées et en cours, peu d'information existe pour contribuer à leur caractérisation. Ainsi, lorsqu'une intervention pouvant modifier de manière considérable l'équilibre d'un versant se révèle nécessaire, elle est souvent effectuée avec une compréhension partielle sa dynamique globale.

4.2. Fréquence des chutes de blocs de glace et des avalanches

Le secteur du couloir d'Aqua Velva (secteur 60) est une zone très active sur le plan géomorphologique. Près de la moitié des interventions répertoriées entre 1987 à 2011 sont liées au démantèlement des carapaces de glace et aux avalanches de neige. À cela s'ajoutent aussi les avalanches s'étant produites avant l'an 2000 et qui ne figuraient pas dans les inventaires du MTQ.

À la lumière des résultats exposés, le démantèlement des carapaces de glace semble une problématique pour le réseau routier avec une récurrence quasi-annuelle (i.e. 13 années sur 18). Ce type d'activité figure aussi au deuxième rang des aléas géomorphologiques les plus fréquents dans le secteur, après les chutes de pierres. Cependant, certains paramètres pouvant influencer de manière significative la fréquence et l'intensité des chutes de blocs de glace depuis la paroi d'Aqua Velva n'ont pas été considérés dans la présente étude.

Le premier facteur est le volume de la carapace de glace, lequel est lui-même influencé par de nombreux éléments. En effet, la dimension de la glace de paroi est intrinsèquement liée à l'apport en eau qu'elle reçoit. Le prolongement du ruissellement durant l'hiver, que ce soit par une abondance des précipitations liquides à l'automne ou un enneigement supérieur à la moyenne en décembre, contribue à la disponibilité en eau lors de cette période (Bartlet *et al.*, 2004 ; Bayard *et al.*, 2005 ; Gruber et Haerberli, 2007 ; Sutinen *et al.*, 2008 ; Gauthier, 2008). La mise en place d'un couvert de neige hâtif retardera aussi le gel des écoulements. Ainsi, la continuité

de l'apport en eau vers les parois rocheuses au cours des mois d'hiver contribuera à la formation de carapaces de glace volumineuses. Or, les caractéristiques du ruissellement ainsi que celle du couvert de neige n'ont pas pu être considérées, par manque de données, ou dû aux contraintes de temps.

Parmi les autres facteurs pouvant influencer le risque associé à la chute de blocs de glace, on retrouve la prédisposition géomorphologique du versant. En effet, une carapace hautement perchée en amont d'une pente raide favorise le transport des blocs de glace sur de longues distances. Ceux-ci sont donc plus susceptibles d'atteindre la route 132. Tel est le cas de la paroi Aqua Velva. L'objectif de la présente étude n'étant pas de quantifier la fréquence et l'intensité des chutes de blocs de glace, la distance de parcours et le degré de la pente n'ont toutefois pas été pris en considération. De surcroît, certaines caractéristiques mériteraient aussi d'être intégrées dans les fiches d'inventaires afin d'offrir plus de détails sur les interventions répertoriées. Pour les blocs de glace obstruant la chaussée, leur dimension et leur emplacement à partir de la base du talus devraient être méthodiquement pris en note.

Tel qu'observé par Héту (2007) pour les couloirs de la frange littorale, la distribution des avalanches dans le couloir d'Aqua Velva est très variable d'une année à l'autre (i.e. 6 années actives entre 2000 et 2011). Par comparaison avec les autres types d'aléa, les avalanches de neige sont le processus qui a exigé le plus haut taux d'interventions mécanisées (i.e. dans 88,2 % des cas). La période réduite d'inventaire des interventions du MTQ liées aux avalanches (i.e. 2000 à 2010), et le faible nombre d'interventions répertoriées durant celle-ci (i.e. 17 interventions), rend difficile l'analyse fréquentielle des avalanches dans ce couloir.

Or, certaines informations complémentaires se révèlent nécessaires à une meilleure compréhension de la fréquence et de l'intensité des avalanches dans le secteur 60. Une estimation du volume de neige mobilisé (m^3), l'extension spatiale du dépôt à partir de la base du talus (m) et la composition du dépôt (neige sèche, neige

mouillée, présence de blocs de glace ou de roches, etc.) sont des données essentielles qui devraient être recueillies de manière systématique lors des inventaires.

Au final, le niveau de détail des informations recueillies par la Patrouille de roche lors de leur intervention mériterait d'être augmenté. En effet, tous les débris ou dépôts obstruant la route 132 devaient être inventoriés systématiquement, et ce, peu importe leur taille, leur volume et le type d'intervention requis. Les fiches d'inventaires devraient aussi être informatisées de manière méthodique et les données devraient être normalisées entre elles. Cela contribuerait fortement à augmenter la qualité des données résultant de l'inventaire et profiterait grandement aux études futures.

4.3. Dynamique temporelle des chutes de blocs de glace

Comme pour Gauthier (2008), qui a étudié quelques parois de glace sur la frange littorale gaspésienne, le facteur déterminant dans le démantèlement de la carapace de glace d'Aqua Velva est la température. En effet, la stabilité des carapaces dépend intimement de la capacité de cohésion de cette dernière sur la paroi rocheuse, laquelle est sensible aux importantes accumulations de chaleur (Gauthier, 2008). Ainsi, la période de fonte s'entame lorsque la température de l'air s'élève au-dessus du point de congélation et les premières journées chaudes (température maximale > 0°C) entraînent une fusion de la glace et une altération de sa texture, qui elle-même, contribue à accélérer la fonte (Gauthier, 2008).

L'augmentation des températures et des précipitations liquides entraînent aussi l'accélération de la fonte du couvert de neige et contribue à la reprise des écoulements souterrains, hypodermiques, et de surface (Maeno et Nishimura, 1979 ; Stadler *et al.*, 1997 ; Marks *et al.*, 1998 ; Bartelt *et al.*, 2004 ; Bayard *et al.*, 2005 ; Gruber et Haeberli, 2007 ; Sutiten *et al.*, 2008 ; Gauthier, 2008), lesquels parviennent

jusqu'aux glaces de paroi et en amplifient la fonte (Hodge, 1974 ; Marks *et al.*, 1998 ; Petrenko et Whitworth, 1999 ; Gadd, 2003 ; Huggel *et al.*, 2005 ; Gauthier, 2008).

4.3.1. Les degrés-jours cumulés (DJ) comme indicateur de déclenchement

Tel que mentionné, le déclenchement des chutes de blocs de glace est intrinsèquement lié à l'accumulation de chaleur découlant de l'augmentation des températures au printemps. Les degrés-jours cumulés en sont de bons indicateurs (Gauthier, 2008).

À la lumière des analyses effectuées, la dynamique d'écroulement de la paroi de glace étudiée se délimite par trois seuils de degrés-jours cumulés depuis le 1^{er} mars :

- I. activité intense dès l'accumulation de 40 DJ ;
- II. activité constante après 100 DJ cumulés ;
- III. activité résiduelle et isolée après une accumulation de 185 DJ

Les seuils de degrés-jours cumulés qui limitent les différentes phases d'activité du site d'étude concordent relativement bien avec les observations de Gauthier (2008). En effet, selon ce dernier, la période active des couloirs sur la frange côtière gaspésienne serait caractérisée par une augmentation des interventions autour de 25 DJ, une période d'activité accrue (au de 70 DJ) et une période d'activité résiduelle après 200 DJ.

En lien avec les seuils de degrés-jours exposés, la dynamique d'écroulement de la paroi de glace d'Aqua Velva semble être un phénomène saisonnier (printemps) qui s'effectue en trois phases d'intensité :

- I. fréquence élevée des chutes de blocs de glace concentrée sur une courte période (fin avril à début mai) ;
- II. fréquence soutenue des interventions répartie sur une durée moyenne (début mai à fin mai)

III. basse fréquence des chutes de blocs sur une longue durée (fin avril à début juin).

La première et la dernière phase correspondent respectivement au détachement généralisé des carapaces dû à la fonte des ancrages de glace et à la chute des blocs résiduels. La seconde phase correspond quant à elle à une activité d'écroulement de type intermédiaire. Ces résultats sont comparables à ceux de Gauthier (2008). Toutefois, ce dernier souligne la présence d'une phase liée à la fonte, à la métamorphose et à la déstabilisation de la glace de paroi qui se concrétise par l'ouverture de fissures dans la paroi et la chute isolée de petits blocs. Aucune activité de ce type n'a pu être observée dans les données d'interventions dans le secteur 60.

Selon Gauthier (2008), la période d'écroulement des carapaces de glace de la zone côtière gaspésienne dure en moyenne 72 jours, débutant en général à la fin du mois d'avril et se terminant vers la fin du mois de mai. La période estimée pour la glace de paroi d'Aqua Velva est similaire. Elle semble toutefois s'entamer plus tardivement (i.e. la fin du mois d'avril). En revanche, sa durée est plus courte (entre 40 et 50 jours au total). Cela s'explique en partie par l'absence de données de faible magnitude. En effet, rappelons que seules les chutes de blocs de glace atteignant la route sont inventoriées par le MTQ, excluant tous les événements de faible magnitude. L'intégration de ces événements de faible amplitude dans les analyses permettrait certainement de raffiner le niveau de détail des résultats obtenus et possiblement, d'identifier une phase semblable à celle de Gauthier (2008). Par ailleurs, Gauthier (2008) ne reconnaît aucune phase intermédiaire qui pourtant se révèle très claire dans l'analyse des probabilités d'occurrences liées aux interventions dans le secteur 60.

4.3.2. Considérations méthodologiques

Il est important de mentionner que le faible nombre de données d'interventions ne permet pas d'évaluer la variabilité interannuelle du nombre de degrés-jours nécessaire pour une première intervention. Ainsi, cette méthode, couplé au suivi quotidien des températures peut s'avérer plus judicieuse. La mise en application de cette méthodologie en intégrant un plus grand nombre de données d'événement devra être effectuée afin de préciser les limites des périodes d'activités ainsi que les probabilités d'occurrence de ces dernières. Les résultats obtenus pour la paroi d'Aqua Velva grâce à la méthode basée sur les degrés-jours mériteraient aussi d'être appliquée à d'autres couloirs à carapace de glace afin de raffiner les seuils de la période d'activité.

4.4. Dynamique temporelle des avalanches de neige

Les résultats montrent que trois régimes avalancheux distincts sont présents dans le couloir à carapace de glace d'Aqua Velva : 1) un régime de tempête modulé par de fortes précipitations solides en peu de temps qui entraîne un effet de surcharge ; 2) un régime printanier (*rain-on-snow-event*) associé à la déstabilisation du couvert de neige par d'importantes précipitations liquides et ; 3) un régime associé à la chute de blocs de glace qui vient affecter un couvert neigeux que la fonte a rendu instable. Le régime printanier de fonte proposé par Héту (2007) est ici divisé en deux régimes distincts, lesquels sont différenciés par des causes de déclenchement des avalanches différentes (i.e. fortes précipitations liquides et chutes de blocs de glace).

Contrairement aux résultats de Héту (2007) qui montrent que les avalanches atteignant le réseau routier répondent principalement à un régime printanier lié à la fonte, l'activité avalancheuse du couloir d'Aqua Velva semble surtout modulée par l'effet des tempêtes hivernales (régime avalancheux de tempête). Cependant, tel

qu'établis par certains chercheurs, ce type de couloir est susceptible d'être influencé tant par les précipitations solides que liquides (régime printanier) (Hétu, 2007 ; Fortin *et al.*, 2011a). S'ajoutent à ces deux régimes avalancheux, les avalanches causées par le démantèlement des carapaces de glace.

4.4.1. Régime avalancheux de tempête

Le premier facteur d'occurrence des avalanches dans le couloir d'Aqua Velva est l'apport considérable de nouvelle neige issue d'importantes précipitations (Hétu, 2007). Le rôle de la quantité et de l'intensité des précipitations solides dans l'augmentation de la probabilité d'occurrence des avalanches a d'ailleurs été souligné par plusieurs chercheurs (Perla, 1970 ; Bigras et Hébert, 1982 ; Ward, 1984 ; Bakkehoi, 1987 ; Conway et Wilbour, 1999 ; Höller, 1999 ; Birkeland *et al.*, 2001 ; Reardon *et al.*, 2004 ; McClung et Schaerer, 2006 ; Jomelli *et al.*, 2007 ; Hétu, 2007 ; Germain *et al.*, 2009 ; Fortin *et al.*, 2011a).

En effet, Dubé *et al.* (2004) avait déjà énoncé l'importance du rôle des précipitations neigeuses dans le déclenchement des avalanches en mettant en relation les années avalancheuses avec les années de précipitations solides supérieures à la normale. Hétu (2007) mentionne que ce lien d'influence est aussi en rapport avec le

Tableau 4.1
Moyennes des précipitations neigeuses cumulées (cm) pour les journées avalancheuses répertoriées par le MTQ entre les mois de janvier et avril

Variabes (heures)	Aqua Velva*	Littoral nord-gaspésien**
24	8,9	7,5
48	13,5	15,0
72	14,9	16,0

* Pour le secteur 60 de la route 132

** D'après Fortin *et al.*, 2011a

nombre de tempêtes enregistrées durant ces mêmes années, confirmant les conclusions de Loup et Lovie (1966) sur l'importance de la distribution des chutes de neige et non seulement la quantité de neige précipitée. Les résultats exposés dans la présente étude confirment ces mêmes conclusions et concordent avec ceux de Fortin *et al.* (2011a) qui émettent les constats suivants : 1) la probabilité d'occurrence des avalanches de neige augmente de manière significative lorsque de fortes chutes de neige sont enregistrées et; 2) que les délais d'accumulation de neige jouent un rôle déterminant puisque la probabilité d'occurrence double lorsqu'on passe de 72 à 48 h, et de 48 à 24 h.

Les résultats de nos analyses sur les données météorologiques associées aux journées avalancheuses répertoriées par le MTQ montrent que 66,7 % de celles-ci ont cumulé en moyenne 14,9 cm de neige dans un délai de 72 h. Ces quantités sont comparables aux seuils de précipitation pour le déclenchement des avalanches dans l'ensemble de la zone littorale nord-gaspésienne proposés par Fortin *et al.* (2011a) (tabl. 4.1). Quoiqu'un peu plus faibles, les moyennes de précipitations neigeuses dans le couloir d'Aqua Velva n'englobent que très peu d'événements par comparaison à celles de Fortin *et al.*, qui, par ailleurs, couvraient les mois de janvier à mai.

Alors que Héту (2007) souligne que la saison avalancheuse peut durer jusqu'à sept mois, soit d'octobre à mai, les données historiques pour la période de 1937 à 2011 montrent que les journées ayant enregistré de fortes précipitations solides, i.e. plus de 35 cm de neige, sur 24, 48, et 72 h, se répartissent majoritairement entre les mois de janvier et mars (76,9 %) avec une concentration particulière lors des mois de février et mars.

4.4.2. Régime avalancheux printanier et régime lié aux chutes de blocs de glace

Le rôle de la pluie comme facteur de déclenchement des avalanches de neige est lui aussi bien connu (Ward, 1984 ; Butler, 1986 ; Conway et Raymond, 1993 ; Conway, 2004 ; McClung et Schaerer, 2006 ; Hétu, 2007 ; Germain *et al.*, 2009 ; Fortin *et al.*, 2011a). Toutefois, le faible nombre d'événements caractérisés par de fortes précipitations liquides dans les 72 h avant événement (i.e. un événement), ne permet pas de circonscrire précisément le rôle de la pluie dans la dynamique avalancheuse du couloir d'Aqua Velva. L'influence des chutes de bloc de glace sur le déclenchement des avalanches a, quant à elle, été mentionnée par Hétu (2007). Ce dernier mentionne notamment la présence de blocs de glace au sein de dépôts avalancheux. L'introduction des chutes de blocs de glace comme éléments déclencheurs des avalanches de neige et l'établissement d'un type de régime avalancheux propre à ceux-ci, constituent une première.

Quoique des avalanches liées au régime printanier et aux chutes de bloc de glace aient été observées au minimum une fois chacune dans le secteur 60 (le 4 mai 2011 et le 31 mars 2006), le nombre limité d'événements inventoriés (seulement deux) ne permet pas leur hiérarchisation. Quoiqu'il en soit, il est évident que les avalanches liées aux régimes de tempête prédominent dans le secteur 60 en raison de leur fréquence élevée.

Le faible nombre d'avalanches associées à ces deux types de régime ayant été répertoriés par le MTQ ne permet pas d'en spécifier les périodes d'activité. Toutefois, tel que mentionné par plusieurs chercheurs, les couloirs à carapace de glace à exposition nord sont susceptibles de conserver un manteau neigeux jusque tard au printemps. En effet, les couverts de neige de la frange littorale gaspésienne peuvent rester au sol plus de 200 jours annuellement (Germain et Voiculescu, 2007). Certaines années, il peut subsister jusqu'à la fin du mois de mai (Hétu, 2007). Les résultats de cette étude confirment ce fait en montrant que le manteau neigeux du

couloir d'Aqua Velva peut s'attarder jusqu'au début juin et conserver à l'occasion une épaisseur suffisante pour le déclenchement d'avalanches jusqu'à la mi-mai.

Or, tel qu'exposé par Hétu (2007) et tel qu'indiquées par les normales climatiques, les précipitations liquides sont courantes à cette période de l'année. De plus, cette période correspond spécifiquement au démantèlement des carapaces de glace qui s'échelonne, pour la paroi d'Aqua Velva, principalement du 21 avril au 5 juin avec une concentration de l'activité à la fin avril, voire le début du mois de mai.

Il faut toutefois mentionner que les manteaux neigeux qui subsistent aussi tard au printemps perdent de leur potentiel avalancheux. En effet, lors de la saison de fonte, l'albédo du couvert de neige diminue en réponse à la saturation importante en eau et à l'augmentation de la concentration en poussières et en débris de surface (Warren et Wiscombe, 1980 ; Conway *et al.*, 1996 ; Fontaine *et al.*, 2002). La température de l'air aura aussi tendance à augmenter et contribuera à accroître le taux de fonte dans les zones dégagées. Ainsi, non seulement le manteau neigeux aura tendance à fondre plus rapidement dû à l'augmentation des températures et à la perte d'albédo, mais il gagnera en eau, en débris rocheux et donc en densité. Ces changements dans la composition et la densité du couvert nival réduisent sa mobilité. De ce fait, ce type de manteau sera moins susceptible d'être à l'origine d'une avalanche de neige.

4.4.3. L'épaisseur du couvert de neige, une variable déterminante

L'extension temporelle du couvert de neige au printemps et son épaisseur journalière est un facteur à considérer dans le cadre d'études futures. Surtout employée dans le cadre d'études hydrologiques pour le calcul de la quantité d'eaux de ruissellement issue de la fonte des neiges au printemps, l'approche par degrés-jours peut s'avérer efficace pour la mesure des volumes de neiges fondus sur des périodes

tant périodiques que saisonnières. Or, celle-ci ne semble pas appropriée au calcul de la fonte neigeuse à l'échelle journalière ou horaire ainsi que pour des zones de petites dimensions (Rango et Martinec, 1995). L'utilisation de cette méthode à cet effet, doit, pour être efficace et représentative de la réalité, être effectuée en combinaison avec un modèle de ruissellement des eaux de fontes. La méthode des degrés-jours de fontes pourrait aussi être grandement raffinée en intégrant comme variable la radiation solaire si de telles données sont disponibles (Rango et Martinec, 1995). Ce paramètre prend encore plus d'importance dans le contexte d'un couloir à exposition nord comme celui d'Aqua Velva compte tenu de sa faible exposition aux radiations solaires.

Par ailleurs, afin d'augmenter le niveau de précision de cette méthode, les facteurs appropriés doivent être utilisés dans le calcul basé sur les degrés-jours de fonte. Tel que mentionné dans le chapitre II, aucune donnée sur la densité du couvert de neige sur la frange côtière gaspésienne n'est disponible, obligeant l'utilisation de données extérieure à la région d'étude. Ce biais s'observe aisément dans les résultats d'épaisseurs de neige, lesquels sont très élevés et peu représentatifs de la réalité complexe de la Gaspésie septentrionale. Ainsi, cette méthode offre un potentiel intéressant afin de calculer les épaisseurs périodiques ou mensuelles des couverts neigeux, mais mériterait d'être employée avec des données réelles sur les densités de neige de la région d'étude.

CONCLUSION

La sécurité des routes de la Gaspésie septentrionale dépend intrinsèquement de notre capacité à comprendre la dynamique, les conditions de déclenchement ainsi que l'extension spatiotemporelle liée à l'activité géomorphologique des versants raides en zone côtière. En effet, ces connaissances sont fondamentales dans la gestion du risque auquel sont exposées nos infrastructures routières dans une optique de réduction de la vulnérabilité.

Or, à la lueur des résultats de cette étude, il apparaît que l'activité des aléas géomorphologiques liés à la dynamique des versants se soit intensifiée depuis la fin des années 80. Quoique la région ait connu des épisodes météorologiques extrêmes, cet accroissement serait vraisemblablement lié à l'installation du mur de protection et au creusement d'une dépression de captage au pied du versant au cours de cette même période. Une attention particulière devrait ainsi être portée quant à la considération de la dynamique géomorphologique globale du couloir d'Aqua Velva lors d'interventions anthropiques pouvant déstabiliser son équilibre déjà précaire. La dynamique géomorphologique des versants étant fort complexe, l'emploi d'un expert en géotechnique ou en géomorphologie prend ici toute son importance afin de limiter l'impact de nos interventions sur le milieu naturel et d'éviter d'aggraver le risque qui en découle.

Les chutes de blocs de glace issus de la paroi d'Aqua Velva sont des phénomènes annuels qui se concentrent principalement lors des mois d'avril et de mai. Quoique l'impact des précipitations liquides soit évident sur la dynamique de démantèlement, la variable climatique jouant le rôle le plus déterminant dans le déclenchement de ce phénomène demeure la température (accumulation de chaleur

sur plusieurs jours). De ce fait, les degrés-jours cumulés constituent un bon indicateur et leur analyse a permis de circonscrire la dynamique temporelle du phénomène de démantèlement des carapaces de glace du couloir d'Aqua Velva.

Ce démantèlement s'effectue en trois phases distinctes mais complémentaires. La première concentre plus de la moitié des interventions sur une période moyenne de 16 jours, plus précisément entre le 21 avril et le 6 mai. La seconde phase concentre près du quart des interventions sur une période de 14 jours, s'échelonnant entre le 6 et le 19 mai. Quoique la durée de cette phase soit similaire à la première, le nombre d'interventions qui y est lié est largement inférieur ; ce qui permet de l'associer à un degré d'activité plus faible. Enfin, la troisième et dernière phase concentre le dernier quart des interventions une période de 18 jours en moyenne. Celle-ci s'étale du 19 mai au 5 juin. La fréquence des interventions s'étend sur une plage plus étendue de degrés-jours cumulés depuis le 1^{er} mars, confirmant qu'une activité plus variable et liée au détachement des blocs résiduels. Au total, la période d'activité des chutes de blocs de glace s'échelonne en moyenne sur 45 jours, soit du 21 avril au 5 juin.

Or, la variabilité des dates d'écroulement et la variabilité interannuelle du nombre de DJ nécessaire aux interventions demeurent très élevées. Un suivi sur une plus longue période et sur un territoire plus vaste ainsi qu'une meilleure compréhension des échanges thermiques entre les carapaces de glace et leur environnement se révèlent nécessaires afin de mieux saisir toute la complexité qui lie ces phénomènes aux conditions météorologiques. L'écroulement des carapaces de glace demeure à ce jour un aléa complexe qui mérite d'être plus longuement examiné.

Les avalanches de neige dans le couloir d'Aqua Velva sont des phénomènes fréquents, mais dont la variabilité interannuelle est importante. Elles se produisent généralement lors des mois de février à mai avec une importante concentration en février. Ce type d'aléa est aussi associé à un important taux d'interventions mécanisées, révélant son caractère de haute intensité.

Le déclenchement avalanches de neige peut être influencé par plusieurs facteurs dont la fréquence des cycles de gel-dégel qui modifient la stratigraphie du couvert de neige. Ce sont toutefois les précipitations (solides et liquides) qui jouent un rôle prédominant dans la dynamique avalancheuse. Or, on observe que les avalanches de neige dans le couloir étudié répondent à trois régimes distincts : un régime de tempête lié à de fortes précipitations neigeuses sur une courte période de temps (24, 48 ou 72h); un régime printanier de fonte associé à la déstabilisation du couvert nival par la pluie et ; un régime printanier lié aux chutes de blocs de glace comme agent déclencheur. Ce dernier type est d'ailleurs à l'origine d'événements de type multi-aléas.

L'observation des précipitations solides associées aux interventions de la dernière décennie dans les données historiques a permis de confirmer l'importance des tempêtes de neige dans le déclenchement des avalanches, mais aussi d'en observer leur distribution. Ces épisodes de fortes précipitations neigeuses se concentrent généralement entre les mois de janvier à mars avec une forte majorité en février.

Le nombre très limité d'interventions caractérisées par des épisodes de pluie n'a pas permis l'utilisation de la même approche dans l'identification de la période d'activité liée au régime avalancheux printanier. Toutefois, l'analyse de l'extension temporelle du couvert de neige et de son épaisseur suffisante pour le déclenchement des avalanches, jusque tard au printemps (fin mai – début juin), augmente la probabilité des événements dits multi-aléas. Quoique peu d'interventions de ce type aient été répertoriées, les événements multi-aléas issus du déclenchement d'avalanches par la chute de blocs de glace représentent une dynamique à ne pas négliger.

Il est cependant évident que l'étude de deux aléas aussi complexes, de leur dynamique commune ainsi que de leurs périodes d'activité respectives et combinées,

dans un temps aussi limité ne permet pas l'atteinte d'un niveau d'analyse similaire aux autres études effectuées dans la région. L'augmentation de l'étendue spatiale et temporelle de celle-ci se révèle donc nécessaire à une meilleure compréhension de ces effets de synergie. Il faut aussi noter que, dû à toutes les considérations méthodologiques exposées, nous ne pouvons assurer que les dates et les différents seuils présentés dans le cadre de cette étude soient indiscutables. Leur utilisation doit donc se faire avec prudence et diligence.

La route nationale 132 étant directement située au pied du couloir d'Aqua Velva, elle se retrouve vulnérable face aux aléas gravitaires actifs dans ce dernier. Aussi, on observe que malgré la présence d'un mur, certaines mesures de protection supplémentaires se révéleraient nécessaires afin de bien la protéger telles que l'augmentation de la hauteur du mur et l'entretien constant du fossé lors de la période accrue d'activité avalancheuse. Par ailleurs, dû aux contraintes physiques du milieu naturel qui empêche toute transformation de son tracé ainsi que l'utilisation de routes alternatives, la dépendance régionale envers la route 132 est quasi totale et ce, pour toutes formes de déplacements, incluant ceux des services d'urgences. Néanmoins, le milieu fait preuve d'une bonne résilience globale grâce aux différentes mesures de surveillance, de prévention, d'intervention et de rétablissement prévues par le MTQ et ce, malgré les limites budgétaires.

Les aléas d'écroulement des carapaces de glace et d'avalanches de neige, leur dynamique commune, la vulnérabilité et la résilience du milieu ainsi que l'impact anthropique sur la dynamique des versants gaspésiens demeurent au final des problématiques qui méritent d'être plus approfondies. Au Québec, le développement d'approches de gestion multirisque est de plus en plus valorisé. Le manque de compréhension des aléas géomorphologiques de versant sur le plan individuel demeure toutefois considérable et devra être comblé afin d'aspirer à une gestion multirisque efficiente à long terme.

RÉFÉRENCES

- Bakkehoi, S. 1987. «Snow avalanche prediction using a probabilistic method». *Avalanche Formation, Movement and Effects*, no 162, p. 549-556.
- Bartlet, P., O. Buser et S.A. Sokratov. 2004. «A nonequilibrium treatment of heat and mass transfer in alpine snowcovers». *Cold Regions Science and Technology*, vol. 39, p. 219-421.
- Bayard, D., M. Stähli, A. Parriaux et H. Flühler. 2005. «The influence of seasonally frozen soil on the snow melt runoff at two alpine snowcovers». *Journal of Hydrology*, vol. 309, no 1-4, p. 66-84.
- Bianchi, A. 2004. «Frozen waterfalls: How they develop, how they collapse». *Union Internationale des Associations de Guide de Montagne (IFMGA-IVBV-UIAGM)*, Décembre 2004, 23 p.
- Bigras, P. et A. Hébert. 1982. «Vers un système météorologique de prévision des avalanches, mont Washington, New Hampshire». Université de Sherbrooke.
- Birkeland, K.W., C.J. Mock et J.J. Shinker. 2001. «Avalanches extremes and atmospheric circulation pathens». *Annals of Glaciology*, vol. 32, no 1, p. 135-140.
- Biron, S. 1971. *Géologie de la rive sud du St-Laurent de Cap-Chat à Gros-Morne, Compté Gaspé-Nord*, Ministère des Richesses naturelles, Québec, DP-240, 9 p., carte.
- Boucher, D., L. Filion et B. Hétu. 2003. «Reconstitution dendrochronologique et fréquence des grosses avalanches de neige dans un couloir subalpin du mont Hog's Back, Gaspésie centrale (Québec)». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 57, no 2-3, p. 159-168.
- Brisebois, D., et J. Brun. 1994. «La plate-forme du St-Laurent et les Appalaches». In *Géologie du Québec*, p. 95-120. Québec : Publications du Québec.
- Brisebois, D., et J. Nadeau. 2003. *Géologie de la Gaspésie et du Bas-Saint-Laurent (SNRC 22A, 22B, 22C, 22G, 22H, 21N et 21O)*. Ministère des Ressources Naturelles, de la Faune et des Parcs (MRNFP), Québec. DV 2003-08, échelle 1/250 000.
- Butler, D.R. 1986. «Snow-avalanche hazards in Glacier National Park, Montana : meteorological and climatological aspects». *Physical Geography*, vol. 7, p. 72-87.

- Conway, H. 2004. «Storm Lewis : a rain-on-snow event on the Milford road, New-Zealand». In *Proceedings of the International Snow Science Workshop 2004*, Jackson Hole, Wyoming, p. 557-564.
- Conway, H., et C.F. Raymond. 1993. «Snow stability during rain». *Journal of Glaciology*, vol. 30, no 133, p. 635-642.
- Conway, H., A. Gades et C.F. Raymond. 1996. «Albedo of dirty conditions of melt». *Water Ressources Research*, vol 32, no 6, p. 1713-1718.
- Conway, H., et C. Wilbour. 1999. «Evolution of snow slope stability during storms». *Cold Regions Science and Technology*, vol. 30, no 1-3, p. 67-77.
- Dubé, S., L. Filion et B. Héту. 2004. «Tree-ring reconstruction of high-magnitude snow avalanches in the Northern Gaspé Peninsula, Québec, Canada». *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, vol. 36, no 4, p. 555-564.
- Enos, P.C. 1969. «Cloridorme Formation, middle Ordovician flysch, Northern Gaspé peninsula, Quebec». *Geological Society of America*, Special paper 117, 66 p.
- Environnement Canada. 2012a. «Données climatiques en ligne», in Archives nationales d'information et de données climatologiques, [En ligne]. http://www.climat.meteo.gc.ca/climateData/canada_f.html. Page consultée le 16 juillet 2011.
- _____. 2012b. «Normales et moyennes climatiques au Canada 1971-2000», in Archives nationales d'information et de données climatologiques, [En ligne]. http://www.climat.meteo.gc.ca/climate_normals/index_f.html. Page consultée le 15 février 2011.
- _____. 2008. *Pluies diluviennes des 8 et 9 août, Rivière-au-Renard, Québec. Analyse et interprétation de données météorologiques et climatologiques*. Environnement Canada, Unité Suivi et adaptation du climat, Section Sciences atmosphériques et enjeux environnementaux SMC - Région du Québec.
- Fontaine, T.A., T.S. Cruickshank, J.G. Arnold et R.H. Hotchkiss. 2002. «Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT)». *Journal of Hydrology*, vol. 262, no 1-4, p. 209-223.
- Fortin, G., et B. Héту. 2009. «Les extrêmes météorologiques hivernaux et leurs impacts sur la couverture neigeuse dans les monts Chic-Chocs, Gaspésie, Québec». *Geographia*

- Technica*, numéro spécial, p. 181-186.
- Fortin, G., B. Héту et D. Germain. 2011a. «Climat hivernal et régimes avalancheux dans les corridors routiers de la Gaspésie septentrionale (Québec, Canada)». *Climatologie*, vol. 8, p. 9-25.
- _____. 2011b. «Can we detect climate changes for the Chic-Chocs mountains ?». Alpine research workshop, 1-3 avril, Bretton Woods, New Hampshire.
- Gadd, W. 2003. *Ice & Mixed climbing : Modern Technique*. The Mountainers Books : Seattle, 192 p.
- Gagnon, R.M., 1970. *Climat des Chic-Chocs*. Ministère des Richesses Naturelles, Québec, Rapport MP36, 103 p.
- Garczynski, F. 1976. «Effets des coupes rases forestières sur la stabilité des pentes naturelles». *Revue Forestière Française*, vol. 28, no 3, p. 205-207.
- Gaumond, M., et L.-É. Hamelin. 1960. «Note de périglaciaire comparé des monts Washington et Jacques-Cartier». *Cahiers de Géographie de Québec*, vol. 4, no 7, p. 217-218.
- Gauthier, F. 2008. «Les glaces de paroi : formation, écoulement et impact géomorphologique». Mémoire de maîtrise, Centre Eau, Terre, Environnement, Québec, Institut national de recherche scientifique.
- Germain, D. 2005. «Dynamique des avalanches de neige en Gaspésie, Québec, Canada». Thèse de doctorat, Québec, Université Laval.
- Germain, D., L. Filion et B. Héту. 2005. «Snow avalanche activity caused by natural and man-made forest disturbances, northern Gaspé Peninsula, Québec, Canada». *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 42, no 12, p. 2103-2116.
- Germain, D., et M. Voiculescu. 2007. «Les avalanches de neige dans les Chic-Chocs (Canada) et les Carpates Méridionales (Roumanie) – Bilan des connaissances et perspectives futures». *Revista de geomorfologie*, vol. 9, p. 17-31.
- Germain, D., L. Filion et B. Héту. 2009. «Snow avalanche regime and climatic conditions in the Chic-Choc Range, eastern Canada». *Climatic Change*, vol. 92, no 1-2, p. 141-167.
- Germain D., B. Héту et L. Filion. 2010. «Tree-ring based reconstruction of past snow avalanche events and risk assessment in Northern Gaspé Peninsula (Québec,

- Canada)». In *Tree Ring and Natural Hazards : A State-of-the-Art*, sous la dir. de M. Stoffel, M. Bollschweiler, D. R. Butler et B. H. Luckman, p. 51-74. London : Springer.
- Girard, J.-F., et B. Hétu. 1989. «Le mont Albert, Parc de la Gaspésie : inventaire des avalanches et cartographie des zones à risque». Québec, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche du Québec.
- _____. 1994. *Les mouvements de masse en Gaspésie septentrionale*. Montréal : Hydro-Québec, 45 p.
- Groleau, M. 1994. «Impacts géomorphologiques et écologiques des chutes de glace de paroi sur l'évolution d'un versant forestier, Mont-Saint-Pierre, Gaspésie septentrionale». Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Québec, Université Laval.
- Gruber, S., et W. Haeberli. 2007. «Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change». *Journal of Geophysical Research*, vol. 112. Fo2S18, p. 1-10.
- Hétu, B. 1986. «L'influence du contexte géomorphologique quaternaire sur la dynamique postglaciaire des versants raides de la Gaspésie septentrionale». Thèse de doctorat, Département de géographie, Québec, Université de Montréal.
- Hétu, B. 1990. «Évolution récente d'un talus d'éboulis en milieu forestier, Gaspésie, Québec». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 44, no 2, p. 199-215.
- Hétu, B. 1991. «Éboulis stratifiés actifs près de Manche-d'Épée, Gaspésie (Québec, Canada)». *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 35, p. 439-461.
- Hétu, B. 1992. «Coarse cliff-top aeolian sedimentation in Northern Gaspésie (Québec, Canada)». *Earth Surface Processes and Landforms*, vol.17, no 1, p. 95-108.
- Hétu, B. 1995. «Le litage des éboulis stratifiés cryonivaux en Gaspésie (Québec, Canada) : rôle de la sédimentation nivéo-éolienne et des transits supranivaux». *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 6, no 2, p. 147-171.
- Hétu, B. 2007. «Les conditions météorologiques propices au déclenchement des avalanches de neige dans les corridors routiers du nord de la Gaspésie, Québec, Canada». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 61, no 2-3, p. 165-180.

- Hétu, B., et J.T. Gray. 1980. «Évolution postglaciaire des versants de la région de Mont-Louis, Gaspésie, Québec». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 34, no 2, p. 187-208.
- _____. 1985. «Le modelé glaciaire du centre de la Gaspésie septentrionale». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 39, no 1, p. 47-66.
- Hétu, B., et P. Vandelac. 1989. «La dynamique des éboulis schisteux au cours de l'hiver, Gaspésie septentrionale, Québec». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 43, no 3, p. 389-406.
- Hétu, B., J.-F. Girard et J. Boisjoly. 1994. «Les risques naturels reliés à la dynamique des versants dans le nord de la Gaspésie : zone littorale et mont Albert». *Bulletin de l'Association québécoise pour l'étude du Quaternaire*, vol. 20, p. 9-15.
- Hétu, B., et K. Brown. 2006. «Inventaire des avalanches mortelles au Québec depuis 1825». *Avalanche.ca*, vol. 79, p. 56-59.
- Hétu, B., K. Brown et D. Germain. 2011. «Les victimes d'avalanche au Québec entre 1825 et 2009». *Le Géographe canadien*, vol. 55, no 3, p. 273-287.
- Hodge, S.M. 1974. «Variations in sliding of a temperate glacier». *Journal of Glaciology*, vol. 13, no 69, p. 349-369.
- Höllner, P. 1999. «Weather and avalanches in Austria». *The Avalanche Review*, vol. 17, no 10.
- Huggel, C., W. Haeberli, A. Kräab, A. Polkvoj, I. Galushkin et S. Evans. 2005. «The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus : assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 5, no 2, p. 173-187.
- Jacob, N. 2001. «Fréquence, intensité et déclenchement des coulées de débris en milieu forestier, Gaspésie septentrionale, Québec». Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Québec, Université Laval.
- Jomelli, V., C. Delval, D. Grancher, S. Escande, D. Brunstein, B. Hétu, L. Filion et P. Pech. 2007. «Probabilistic analysis of recent snow avalanche activity and weather in the French Alps». *Cold Regions Science and Technology*, vol. 47, no 1-2, p. 180-192.

- Labelle, C., et P.J.H. Richard. 1984. «Histoire postglaciaire de la végétation dans la région de Mont-St-Pierre, Gaspésie, Québec». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 38, no 3, p. 257-274.
- Larocque, S., B. Héту et L. Fillion. 2001. «Geomorphic and dendroecological impacts of slushflows in Central Gaspé Peninsula (Québec, Canada)». *Geografiska Annaler*, vol. 83-A, p. 191-201.
- Larsen, J.O. 2000. «Design criteria for avalanche supporting structures exposed to snow creep forces in maritime climate». In *Snow Engineering: Recent Advances & Developments* : sous la dir. de E. Hjorth-Hansen, I Holand, S. Loset et H. Norem, Proceedings of the Fourth International Conference on Snow Engineering (19-21 June 2000), p. 109-111, Trondheim, Norway : Taylor & Francis.
- Lemieux, S. 2007. «Cartographie et classification du terrain à potentiel avalancheux des Chic-Chocs, Québec, Canada, à l'aide d'un système d'information géographique». Mémoire de maîtrise, Département de géomatique appliquée, Sherbrooke, Université de Sherbrooke.
- Loup, J., et C. Lovie. 1966. «Sur la fréquence des avalanches en haute Tarentaise». *Revue de Géographie alpine*, vol. 55, no 4, p. 587-604.
- Maeno, N., et K. Nishimura. 1979. «Fluidization of snow». *Cold Regions Science and Technology*, vol. 1, no 2, p. 109-120.
- Marks, D., J. Kimball, D. Tingey et T. Link. 1998. «The sensitivity of snowmelt processes to climate conditions and forest cover during rain-on-snow : a case of study of the 1996 Pacific Northwest flood». *Hydrological Processes*, vol. 12, p. 1569-1587.
- McClung, D.M. 1999. «The encounter probability for mountain slope hazards». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 36, no 6, p. 1195-1196.
- McClung, D.M., et P. Schaerer. 2006. *The Avalanche Handbook*. The Mountainers Books : Seattle, 342 p.
- McGerrigle, H.W. 1952. «Pleistocene glaciation of Gaspé Peninsula». *Transactions of the Royal Society of Canada*, vol. 46, no 3, p. 37-51.
- Ministère de la Sécurité Publique du Québec (MSP). 2008. *Concepts de base en sécurité civile*. Québec, Québec, Ministère de la sécurité publique du Québec, document de recherche.

- Ministère des Transports du Québec (MTQ). 2004. *Plan de transport de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine*. Rimouski, Ministère des Transports du Québec, Direction du Bas-Saint-Laurent-Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine.
- _____. 2005. *Cartographie des zones exposées aux glissements de terrain dans les dépôts meubles*. Saguenay-Lac-Saint-Jean, Ministère des Transports du Québec.
- Ouellet, M.-A. 2010. «Écoulement hyperconcentré et risque associé : une analyse dendrogéomorphologique d'un cône de déjection en milieu forestier, Gaspésie septentrionale, Québec». Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Montréal, Université du Québec à Montréal.
- Pelletier, M. 1997. «Distribution des glaces de paroi en Gaspésie septentrionale dans le secteur compris entre Tourelle et vallée de Manche-d'Épée». Mémoire de baccalauréat, Département de géographie, Rimouski, Université du Québec à Rimouski.
- Perla, R.I. 1970. «On contributory factors in avalanche hazard evaluation». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 7, no 4, p. 414-419.
- Petrenko, V.F. et R. W. Whitworth. 1999. *Physics of ice*. New York : Oxford University Press.
- Rango, A. et J. Martinec. 1995. «Revisiting the degree day method for snowmelt computations». *Water Resources Bulletin*, vol. 31, no 4, p. 657-669.
- Readon, B.A., D.B Fagre et R.W. Steiner. 2004. «Natural avalanches and transportation : a case of study from Galcier National Park, Montana, U.S.A.» In *Proceedings of the International Snow Science Workshop 2004*, Jackson Hole, Wyoming, p. 582-597.
- Royer, A., et S. Lemieux. 2006. «Mapping and classification of potential avalanche sites in the Chic-Chocs Mountains, Québec, Canada, using geographic information systems», in *Proceedings of the International Snow Science Workshop 2006*, Telluride, p. 91-98.
- Shroder Jr, J.F. 1978. «Dendrogeomorphology : review and new techniques of tree-ring dating». *Progress in Physical Geography*, vol. 4, no 2, p. 161-188.
- Staldler, D., H. Flühler et P.-E. Jansson. 1997. «Modelling vertical and lateral water flow in frozen and sloped soil plots». *Cold Regions Science and Technology*, vol. 26, no 3, p. 181-194.

- Stoffel, M., et M. Bollschweiler. 2008. «Tree-ring analysis in natural hazards research – An overview». *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 8, no 2, p. 187-202.
- Strunk, H. 1997. «Dating of geomorphological processes using dendrogeomorphological methods». *Catena*, vol. 31, no 1-2, p. 137-151.
- Sutinen, R., P. Hänninen et A. Venäläinen. 2008. «Effect of mild winter events on soil water content beneath snowpack». *Cold Regions Science and Technology*, vol. 51, no 1, p. 56-57.
- Talbot, M.-J. 2002. «Caractérisation des couloirs d'avalanches dans le secteur du mont Logan, Est du Québec, et étude des facteurs contrôlant leur distribution spatiale». Mémoire de baccalauréat, Département de géographie, Rimouski, Université du Québec à Rimouski.
- Tierney, K., et M. Bruneau. 2007. «Conceptualizing and Measuring Resilience: A key to Disaster Loss Reduction», *TR News*, May-June 2007, p. 14-17.
- Transport Québec. 2004. *Plan de transport de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeline*. Québec, Ministère des Transports du Québec.
- _____. 2005. *Atlas des zones et sites d'avalanches de neige sur les routes 132 et 198 en Haute-Gaspésie*. Québec, Ministère des Transports du Québec.
- Veillette, J., et M. Cloutier. 1993. *Géologie des formations en surface, Gaspésie, Québec*. Commission géologique du Canada, Ottawa, Carte 1804A, échelle 1/250 000.
- Walkinshaw, J.L., et P.M. Santi. 1996. «Shales and other degradable material». In *Landslides: Investigation and Mitigation*, sous la dir. de K.A. Turner et R. L. Schuster, Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247. Washington : National Academy Press.
- Ward, R.G.W. 1984. «Avalanche prediction in Scotland : II. Development of a predictive model». *Applied Geography*, vol. 4, no 2, p. 109-133.
- Warren, S.G., et W.J. Wiscombe. 1980. «A model for the spectral albedo of snow, II, snow containing atmospheric aerosols». *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 37, no 12, p. 2734-2745.
- Yagouti, A., Boulet, G., Vincent, L., Vescovi, L. et E. Mekis. 2008. «Observed changes in daily temperature and precipitation indices for southern Québec, 1960-2005». *Atmosphere-Ocean*, vol. 46, no 2, p. 243-256.