

LES RÉGIMES AVALANCHEUX DES CHIC-CHOCS, QUÉBEC, GASPÉSIE,  
DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Par  
Francis Desaulniers

Essai présenté au Centre universitaire de formation  
en environnement et développement durable en vue  
de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Monsieur Alexandre Langlois

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT  
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Juin 2015

## SOMMAIRE

Mots clés : avalanches, prédiction avalancheuse, changements climatiques, Chic-Chocs, Gaspésie, dendrochronologie, étude statistique, modèle de réanalyses climatiques, *North American Regional Reanalysis*, gestion de risque, milieu montagnard

Le présent travail tente d'établir un lien statistique entre la variabilité climatique observée depuis les dernières années et les enregistrements d'évènements avalancheux sur le territoire des Chic-Chocs. Les changements de température observés peuvent à terme modifier considérablement les patrons de manteaux neigeux annuels, venant ainsi bouleverser les prédictions avalancheuses. L'objectif principal est donc de déterminer comment les changements climatiques, aux niveaux des vents, de la température et des précipitations, viendront modifier les régimes avalancheux en place, sur un horizon de 100 ans.

Pour y parvenir, la couverture de données météorologiques est assurée principalement par le modèle de réanalyses climatiques du *North American Regional Reanalysis*. Ces dernières seront traitées en fonction des informations de température, de vent et de précipitations, soit les trois éléments majeurs étudiés au niveau de la prédiction avalancheuse. Puisque le modèle *North American Regional Reanalysis* n'est disponible qu'à partir de 1979, l'étude statistique s'effectue entre 1979 et 2013 inclusivement. En ce qui concerne les données d'avalanches, ces dernières proviennent de la littérature de 1979 à 1999, ainsi que des enregistrements d'Avalanche Québec pour la période de 2002 à 2013. Ces deux sources sont employées, car elles constituent pratiquement les deux seules traitant de ce sujet spécifique dans l'est du Canada, pour l'échelle temporelle souhaitée.

À partir de la mise en commun de ces analyses, il est possible de conclure que la température tend effectivement à augmenter, et ce, spécialement lors des dernières années. Cela se traduit donc par une évolution croissante du nombre probable d'avalanches de neige humide au cours des prochaines décennies. En ce qui concerne le paramètre de vent, ce dernier semble demeurer stable, tant au niveau de sa vitesse et de sa direction. Enfin, pour les précipitations, les données étudiées présentent une anomalie à partir de l'année 1997, ce qui rend toute interprétation éminemment ardue. Toutefois, puisque la température présente des signes d'augmentation, il est logique d'établir que les épisodes de neige se feront plus rares, au profit des épisodes de pluie et de neige fondue.

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier chacune des personnes m'ayant aidé, appuyé et encouragé de quelque manière que ce soit au long de l'accomplissement de ce travail. C'est grâce à chacun d'entre vous que cet essai a pu être réalisé. Premièrement, merci à toute l'équipe de Dominic Boucher à Avalanche Québec pour leur accueil, leurs conseils, leur grande aide ainsi que leur soutien, tant sur le terrain qu'au niveau du partage de données. Aussi, je remercie la SÉPAQ, le Secrétariat national de recherche et sauvetage du Canada, le Conseil de recherches en sciences naturelles et génie (CRSNG) ainsi que la Fondation canadienne pour l'innovation (FCI) pour leurs appuis financiers. Un merci particulier à mes collègues du Groupe de Recherche Interdisciplinaire sur les Milieux Polaires (GRIMP) de l'Université de Sherbrooke, plus spécialement Kevin Côté et Jean-Benoît Madore pour les conseils pratiques, l'acquisition et le traitement de données. Je tiens à souligner le travail exemplaire de mon directeur d'essai, Alexandre Langlois, qui a su alimenter mes réflexions et interrogations, me conseiller de même que me garder motivé pendant toute la période de recherche et de rédaction ; j'en garde un souvenir des plus enrichissant. Enfin, merci à ma copine Pascale pour son support exceptionnel et son encouragement constant. Le fait de pouvoir échanger et partager avec toi mes bons coups comme les moins bons durant cette session m'a permis de garder le moral et d'employer judicieusement toute mon énergie. Merci.

## TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
1. CADRE THÉORIQUE.....	3
1.1 Mécanique des avalanches et types.....	3
1.2 Terrain d'étude.....	5
1.2.1 Environnement naturel.....	5
1.2.2 Environnement humain.....	7
2. QUESTION DE RECHERCHE ET HYPOTHÈSES.....	9
3. MÉTHODOLOGIE.....	11
3.1 Collecte et analyse des données climatiques.....	11
3.1.1 Données de réanalyses NARR.....	11
3.1.2 Température.....	12
3.1.3 Vents.....	13
3.1.4 Précipitations.....	13
3.1.5 Cycles <i>El Niño</i> et NAO.....	14
3.2 Validation du modèle climatique.....	14
3.3 Collecte et analyse des données avalancheuses historiques.....	16
3.3.1 Données dendrochronologiques.....	16
3.3.2 Évènements recensés localement par Avalanche Québec.....	16
4. RÉSULTATS.....	18
4.1 Étude climatologique.....	18
4.1.1 Température de l'air et humidité relative.....	18
4.1.2 Vents.....	25
4.1.3 Précipitations.....	28
4.1.4 Cycles <i>El Niño</i> et NAO.....	36
4.1.5 Validation des données avec infos Météo Chic-Chocs.....	39

4.2	Validation et étude des statistiques avalanches	41
4.2.1	Données de 1979 à 1999	41
4.2.2	Données d'Avalanche Québec	44
5.	INTERPRÉTATION ET SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	48
5.1	Tendances de température	48
5.2	Tendances de vents	49
5.3	Tendances de précipitations	50
5.4	Tendances 2100	51
5.5	Évènements globaux et occurrence avalancheuse	54
6.	PORTÉE SCIENTIFIQUE ET RECOMMANDATIONS	56
6.1	Travaux futurs	56
6.2	Suivi avalancheux	57
	CONCLUSION	59
	RÉFÉRENCES	60
	BIBLIOGRAPHIE	64
	ANNEXE - Tableau d'analyse des précipitations et de la température	66

## LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1.1	Localisation géographique des monts Chic-Chocs .....	6
Figure 1.2	Principaux couloirs avalancheux de la Gaspésie .....	7
Figure 3.1	Localisation des stations météorologiques locales .....	15
Figure 4.1	Évolution de la température hivernale de l'air à 0, 500 et 1000m.....	19
Figure 4.2	Évolution de la température hivernale de l'air de 1999 à 2013 .....	20
Figure 4.3	Nombre de jours hivernaux où la température moyenne est supérieure à 0°C.....	21
Figure 4.4	Nombre de jours hivernaux où la température moyenne est supérieure à 0°C, de 1999 à 2013 .....	22
Figure 4.5	Évolution annuelle des minimums et des maximums de température journalière.....	23
Figure 4.6	Évolution annuelle des minimums et des maximums de température journalière, de 1999 à 2013 .....	24
Figure 4.7	Provenance des vents dominants .....	25
Figure 4.8	Provenance des vents dominants, de 1999 à 2013 .....	25
Figure 4.9	Évolution du maximum et de la moyenne des vents .....	26
Figure 4.10	Évolution du maximum et de la moyenne des vents, de 1999 à 2013 .....	27
Figure 4.11	Nombre d'enregistrements annuels de vents forts.....	27
Figure 4.12	Nombre d'enregistrements annuels de vents forts, de 1999 à 2013 .....	27
Figure 4.13	Évolution de l'équivalent en eau tombé par hiver annuellement .....	28
Figure 4.14	Évolution de l'équivalent en eau tombé par hiver annuellement, de 1999 à 2013 .....	29
Figure 4.15	Évolution du nombre de jours de précipitations de neige probables .....	30
Figure 4.16	Évolution du nombre de jours de précipitations de neige probables, de 1999 à 2013.....	31
Figure 4.17	Évolution du nombre de jours de précipitations de pluie probables.....	33
Figure 4.18	Évolution du nombre de jours de précipitations de pluie probables, de 1999 à 2013 .....	34
Figure 4.19	Évolution du nombre de jours de précipitations de neige fondue probables .....	35
Figure 4.20	Évolution du nombre de jours de précipitations de neige fondue probables, de 1999 à 2013 .....	36

Figure 4.21	Évolution de l'indice El Niño de 1979 à 2013.....	37
Figure 4.22	Évolution de l'indice hivernal NAO.....	38
Figure 4.23	Évolution de l'amplitude de l'indice NAO hivernal.....	38
Figure 4.24	Relation entre les données minimales et maximales du modèle NARR et de la station Le Gîte .....	39
Figure 4.25	Relation entre les données minimales et maximales du modèle NARR et de la station Cap-Seize.....	40
Figure 4.26	Relation entre les données de précipitations journalières du modèle NARR et des stations météo locales .....	40
Figure 4.27	Évolution du nombre d'avalanches / an répertorié par AQ, entre 2002 et 2013 .....	44
Figure 5.1	Comparaison entre les cycles El Niño et NAO avec les années d'occurrence ciblées par Germain et autres, 2008.....	54
Figure 5.2	Comparaison entre les cycles El Niño et NAO avec les années d'occurrence ciblées par AQ .....	55
Tableau 1.1	Les types d'avalanches et leurs propriétés.....	4
Tableau 4.1	Types d'évènements avalancheux annuels, de 2002 à 2013.....	45
Tableau 4.2	Versants impliqués dans des départs avalancheux, de 2002 à 2013 .....	46
Tableau 5.1	Évolution de tendances des paramètres de température .....	48
Tableau 5.2	Évolution des tendances de vents .....	49
Tableau 5.3	Évolution des tendances de précipitations .....	50
Tableau 5.4	Projection 2100 des paramètres de température .....	51
Tableau 5.5	Projection 2100 des paramètres de vents.....	53

## LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

AQ	Avalanche Québec
E	Est
m	Mètres
mm	Millimètres
N	Nord
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NARR	<i>North American Regional Reanalysis</i>
NE	Nord-est
NO	Nord-ouest
O	Ouest
R <sup>2</sup>	Coefficient de détermination
S	Sud
SE	Sud-est
SO	Sud-ouest
WE	Équivalent en eau ( <i>Water equivalent</i> )

## LEXIQUE

Couche faible de neige	Couche de neige instable, dont les propriétés physiques la rendent favorable aux départs avalanches (Tremper, 2008).
Dendrochronologie	Méthode d'étude de cernes des arbres, permettant le suivi de divers phénomènes locaux et régionaux. Présente une résolution temporelle annuelle, dont les résultats peuvent aisément être traités statistiquement. (Germain et Voiculescu, 2007)
Givre de profondeur	Forme de cristaux à facettes plus larges, formés généralement à la base de manteaux neigeux peu épais, suite à des épisodes de températures froides. Le givre de profondeur constitue une couche faible potentielle. (Jamieson et Geldsetzer, 1996)
Givre de surface	Le givre de surface est formé suite à la sublimation de la vapeur d'eau de l'air en cristaux de glaces sur la surface du manteau neigeux. Lorsque ces derniers sont ensevelis sous les chutes de neige subséquentes, le givre de surface persiste et forme une fine couche faible, favorable au déclenchement d'avalanche. (Jamieson et Johnston, 1992)
Neige à facettes/cristaux à facettes	Cristaux de neige à forme particulière, présentant une cohésion très faible et donc des couches faibles. (Jamieson et Johnston, 1992)
Sports d'aventure	Pratiques sportives impliquant un certain niveau de risque et de nouveauté, où les standards de confort humains sont mis en plan (Barry, 2007).

## INTRODUCTION

Les changements climatiques observés depuis les dernières décennies mènent à d'importants bouleversements, notamment au niveau des patrons météorologiques et des cycles climatiques. Ces changements se traduisent par une hausse globale des températures atmosphériques et océaniques, particulièrement dans les milieux polaires (Kaufman et autres, 2009). Même si le phénomène a longtemps été remis en question, il est aujourd'hui évident que ce réchauffement est bien réel avec une augmentation moyenne de plus de 0,8 degré Celsius depuis 1850 (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2013). Un tel réchauffement présente des répercussions importantes sur la cryosphère ainsi que sur les paramètres naturels retrouvés au sein des grands domaines bioclimatiques.

Pour l'ensemble de la cryosphère, des patrons d'anomalies négatives ont été observés dans le couvert spatial de neige (Derksen et Brown, 2012), de glace de mer (Stroeve et autres, 2011) et des bilans de masse glaciaires (Gardner et autres, 2011). Plus particulièrement, des changements au niveau des propriétés géophysiques de la neige sont observables (teneur en eau, densité, température, taille de grains), menant à des changements importants dans la stabilité du manteau neigeux (Exner et Jamieson, 2008). En terrain avalancheux, ces changements peuvent promouvoir le déclenchement d'avalanches et leur occurrence en général, mais très peu de données existent à ce sujet. Les conditions spécifiques provoquant les événements avalancheux sont variées, rendant leur prédiction ardue (Tremper, 2008). De plus, le réchauffement actuellement observé modifie considérablement les bases sur lesquelles s'appuie la prédiction avalancheuse (indices de stabilité) via des processus thermodynamiques (métamorphisme) et dynamiques (percolation d'eau, transport par le vent). Les conséquences d'une potentielle augmentation de l'occurrence avalancheuse sont l'augmentation de victimes, et la destruction d'infrastructures qui mèneront à des coûts économiques et sociaux élevés.

Ainsi, cette étude porte spécifiquement sur l'impact de la variabilité climatique sur la récurrence avalancheuse. Le terrain d'étude est celui du massif des Chic-Chocs, situé en Gaspésie, dans l'est du Québec. Ce milieu particulier constitue, dans un premier temps, un emplacement géographique où les phénomènes avalancheux sont fréquents. De plus, c'est un territoire où les activités humaines sont bien implantées avec une augmentation constante du tourisme de montagne (Germain et autres, 2008). Depuis 1825, les avalanches au Québec auraient causé 69 décès et 56 blessés. De ces accidents, 21 d'entre eux seraient liés à des activités sportives. Plus récemment, en 2000, deux décès ont aussi eu lieu à une semaine d'intervalle sur le territoire des Chic-Chocs (Héту et autres, 2008). Par conséquent, l'étude de données historiques rendra possible l'intégration d'une perspective de prévention et de gestion de risques.

L'objectif principal de la recherche est donc de quantifier l'impact des changements climatiques observés depuis les 34 dernières années (1979-2013) sur l'occurrence avalancheuse dans les Chic-Chocs. Pour y parvenir, quatre objectifs spécifiques ont été établis :

- Reconstruire un historique climatique grâce aux données de réanalyses climatiques du *North American Region Reanalysis (NARR)*, de 1979 à 2013 pour la région des Chic-Chocs;
- Reconstruire un historique des épisodes avalancheux grâce aux données du centre d'observation d'Avalanche Québec (AQ) situé dans les Chic-Chocs et de la littérature, de 1979 à 2013;
- Corréler statistiquement des variables climatiques à l'occurrence avalancheuse et ses caractéristiques de 1979 à 2013;
- Quantifier la tendance future de l'occurrence avalancheuse en lien avec le réchauffement sur l'horizon 2100 en extrapolant statistiquement la tendance 1979-2013 pour évaluer les conditions climatiques qui favorisent l'occurrence avalancheuse.

Ce travail se réalisera à l'aide d'articles de littérature, tant en ce qui concerne le milieu d'étude que les phénomènes avalancheux de manière plus large. Une attention particulière sera portée aux sources bibliographiques afin que celles-ci soient, autant que possible, revues par les pairs, proprement à la démarche scientifique. Pour ce faire, les articles employés proviendront de revues et de journaux reconnus au sein du milieu scientifique de même que dans leurs domaines de spécialisation respectifs. Leur date de publication sera aussi prise en considération dans le but d'employer des informations le plus à jour possible. Toutefois, puisque certains sujets, tels que les différents types d'avalanches et leur caractérisation n'ont pas évolué avec le temps, certaines sources plus anciennes seront employées. De plus, l'emploi de données du modèle NARR seront tirées du *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)*. Certaines données employées surtout à des fins de validations des données NARR seront quant à elles obtenues auprès du Ministère du développement durable, de l'environnement et de la lutte aux changements climatiques (MDDELCC), par l'entremise d'une demande officielle au Service de l'information sur le milieu atmosphérique, Direction du suivi de l'état de l'environnement.

## **1. CADRE THÉORIQUE**

La section qui suit permet d'établir les bases des éléments principaux abordés par le présent travail, c'est-à-dire la mécanique des avalanches et la description du milieu d'étude. Pour ce qui est de la mécanique des avalanches, les causes principales de déclenchement et le fonctionnement de ces phénomènes naturels sont abordés. Puis, la description du milieu établit un portrait de l'environnement naturel et anthropique de la réserve faunique des Chic-Chocs.

### **1.1 Mécanique des avalanches et types**

La succession des épisodes de chutes de neige au cours d'un hiver mène à une accumulation en couches distinctes verticalement. Ces couches qui forment le manteau neigeux sont influencées par l'évolution des conditions météorologiques au moment de leur mise en place, mais aussi tout au long de la saison. Les grains de neige retrouvés dans ces différentes couches possèdent, eux aussi, des caractéristiques distinctes impliquant des niveaux de cohésion différents. C'est donc lorsqu'une faiblesse est ressentie au niveau de la structure du manteau neigeux que des avalanches sont déclenchées (Lachapelle, 1966). L'épaisseur du manteau neigeux est donc importante à considérer, car une telle variable influe directement sur la stabilité, dû au poids de la neige. Ainsi, le simple phénomène de précipitation, solide ou liquide, peut venir surcharger le manteau et déclencher des avalanches. Le tableau 1.1 de la page suivante décrit bien chacun des types d'avalanches, en fonction de la structure de neige impliquée.

En plus des conditions météorologiques, la pente constitue aussi un élément important à considérer lors de l'étude de ce phénomène. En pente trop faible, la friction des couches de neige demeurera plus forte que la force gravitaire, laissant le manteau neigeux immobile. Sur des pentes plus raides, le manteau neigeux peut décrocher beaucoup plus facilement, empêchant du même coup une accumulation importante. C'est donc dans les pentes présentant une inclinaison entre 30° et 50° que les avalanches surviennent le plus souvent. Les statistiques démontrent cependant que la plus grande majorité des événements avalancheux se produisent dans des pentes entre 35° et 45°. (Tremper, 2008)

Il existe cependant d'autres facteurs météorologiques influençant le déclenchement tels le vent, les chutes de corniches, le rayonnement solaire, la température atmosphérique ainsi que les chutes de glace. De plus, des déclencheurs liés à l'activité humaine sont aussi à considérer. En effet, le simple poids d'un skieur en mouvement permet de surcharger ponctuellement le manteau neigeux qui, lorsqu'appliqué sur couche faible, peut causer des départs d'avalanche (Tremper, 2008).

Tableau 1.1 Les types d'avalanches et leurs propriétés (tiré de : Côté, 2014)

Type d'avalanche	Propriétés
Avalanche de neige <b>sèche sans cohésion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Couches de neige de surface (poudreuse);</li> <li>• Zone de départ est un point précis souvent près d'une structure rocheuse sur pente raide (&gt; 35°);</li> <li>• Avalanche s'élargit au fil de sa descente;</li> <li>• Fréquente à haute altitude lorsque des précipitations tombent sur une croûte.</li> </ul>
Avalanche de neige <b>mouillée sans cohésion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mêmes caractéristiques principales que le type d'avalanche précédent;</li> <li>• Neige mouillée a une plus grande densité ce qui la rend plus destructrice que l'avalanche de neige sèche;</li> <li>• Souvent déclenchées en fin de saison lors de la fonte ou lors d'épisodes de pluie ou de radiation solaire intense.</li> </ul>
Avalanche de <b>plaques de neige mouillée</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plaque de neige cohésive qui se détache en bloc;</li> <li>• Présence d'une couche fragile sous la plaque de neige favorisant le déclenchement en bloc;</li> <li>• Descente de l'avalanche suit le relief du terrain;</li> <li>• Souvent déclenchées en fin de saison.</li> </ul>
Avalanche de <b>plaques de neige de tempête</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Causés par une couche de neige fraîche surchargeant une couche supérieure fragile du couvert neigeux;</li> <li>• Densité de la plaque de neige parfois faible, mais la taille de celle-ci peut être très grande ce qui la rend destructrice;</li> <li>• Changements morphologiques des grains de neige qui tombent et dans les conditions météorologiques peuvent provoquer ce type d'avalanches;</li> <li>• Stabilité rapidement retrouvée après l'épisode de tempête (24 à 36h suivant la température).</li> </ul>
Avalanche de <b>plaques à vent</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Causé par une couche très cohésive de neige transportée par le vent surchargeant une couche fragile;</li> <li>• Cristaux de neige scindés puis enchevêtrés;</li> <li>• Plaques à vent formées sur les pentes sous le vent et où il y a un transport de neige latéral;</li> <li>• Taille des plaques à vent est fonction de la durée et de la vitesse des vents.</li> </ul>
Avalanche de <b>plaques persistantes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plaque de neige cohésive perdant petit à petit ses liaisons avec une couche de neige inférieure fragile;</li> <li>• Couche fragile est ensevelie plus profondément au fil du temps, ce qui augmente le potentiel destructeur de la plaque;</li> <li>• Propagation de la plaque est grande ce qui résulte en une possibilité de déclenchement à partir d'un terrain plat;</li> <li>• Avalanches de plaques persistantes se produisent souvent par cycles de faible ou de forte activité.</li> </ul>
Avalanche de <b>plaques persistantes profondes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plaque de neige cohésive perdant petit à petit ses liaisons avec une couche de neige inférieure fragile;</li> <li>• Couche fragile est souvent formée en début de saison et est ensevelie très profondément dans le couvert neigeux;</li> <li>• Type d'avalanche fréquent en milieu alpin de haute altitude;</li> <li>• Type d'avalanche qui nécessite une lourde surcharge pour se déclencher, mais qui peut être entraîné par des avalanches de surface plus superficielles.</li> </ul>
Chute de <b>corniches</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Survient lorsqu'une accumulation de neige importante par le vent sur une rupture abrupte du terrain se déclenche;</li> <li>• Les corniches se forment souvent durant des tempêtes où la température est élevée, ce qui favorise la cohésion de la neige;</li> <li>• Lors de leur chute, elles peuvent provoquer une avalanche en raison de la surcharge rapide de neige apportée sur le terrain inférieur.</li> </ul>

## **1.2 Terrain d'étude**

Cette section consiste en une description du milieu physique et humain de la réserve faunique des Chic-Chocs et de la péninsule gaspésienne. La topographie locale, la climatologie ainsi que l'environnement sont décrits dans le milieu physique, alors que le milieu humain abordera l'historique de la réserve des Chic-Chocs et son rôle central pour le tourisme régional, en plus des principales activités socio-économiques pratiquées dans la région. Il sera ensuite possible de mieux contextualiser les problématiques spécifiques liées aux événements avalancheux.

### **1.2.1 Environnement naturel**

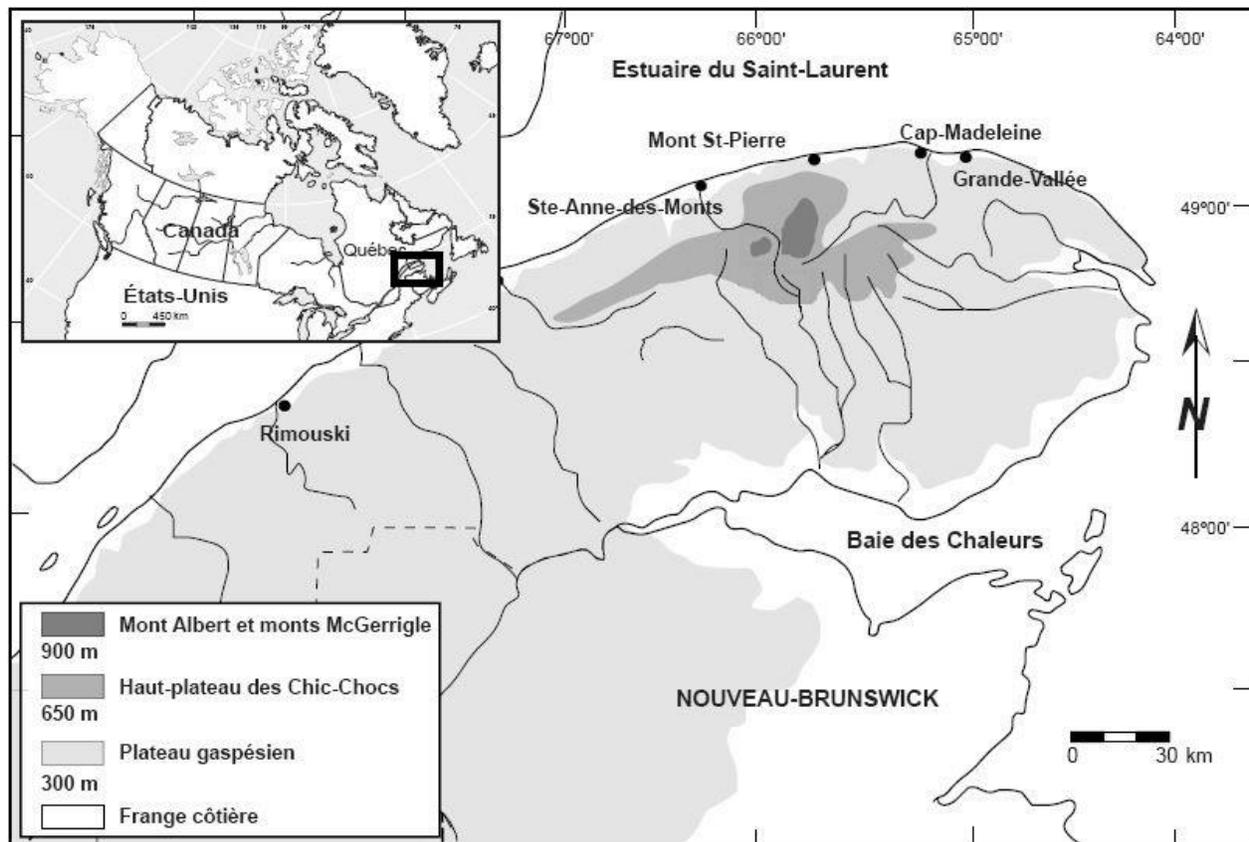
Les Chic-Chocs correspondent au prolongement de la chaîne de montagnes des Appalaches. Cette chaîne de montagnes datant du paléozoïque s'étend en Amérique du Nord de Terre-Neuve jusqu'aux États-Unis, dans l'État de l'Alabama. Au Québec, le substrat appalachien est retrouvé en Estrie, en Beauce, dans la région du Bas-du-Fleuve ainsi qu'en Gaspésie. Les roches qui le constituent sont d'origine sédimentaire et de type plissées, résultant de deux orogénèses distinctes, soit l'orogénèse taconique ainsi que l'orogénèse acadien. (Landry et Mercier, 1992)

Ce complexe montagnard de l'Est canadien se retrouve sur une péninsule, c'est-à-dire que d'importantes masses d'eau sont retrouvées en périphérie. Les Chic-Chocs sont bordés au nord et au nord-ouest par l'estuaire du Saint-Laurent, à l'est par le golfe du Saint-Laurent et l'océan Atlantique, alors qu'au sud se situe la Baie-des-Chaleurs (De Koninck et autres, 2006). Il sera abordé plus loin que ces masses d'eau, en plus du relief local, constituent d'importants éléments qui viennent influencer le climat local particulier.

Pour ce qui est du relief, les processus d'érosion qui suivirent la mise en place des Appalaches ont laissé au sein du milieu trois niveaux de plateaux principaux. La figure 1 illustre bien ces différents plateaux retrouvés dans la région gaspésienne. Les Chic-Chocs y sont représentés par le gris moyennement foncé, soit à partir de 650 mètres (m) d'altitude. Suite au réchauffement de la dernière ère de glaciation de l'hémisphère nord, il y a de cela environ 10 000 ans, le retrait des grandes calottes glaciaires a libéré sur le territoire des Chic-Chocs d'importants sillons dans la roche en place. Aujourd'hui appelées vallées glaciaires, ces formes morphologiques caractérisent l'ensemble des Chic-Chocs, avoisinant des sommets atteignant plus de 1 000 m en certains endroits. (Germain et Voiculescu, 2007)

Cette topographie accidentée influence aussi directement sur la végétation établie. En effet, le gradient altitudinal permet une répartition de la végétation en fonction de l'altitude, plus précisément en trois strates (Germain et autres, 2008). La première située à moins de 600 m d'altitude est principalement composée de populations de sapins baumiers et de bouleaux blancs alors que la deuxième, située entre 600 et 1 000 m représente une forêt subalpine, où dominent le sapin baumier, l'épinette blanche ainsi que

l'épinette noire (Labelle et Richard, 1984). Au-delà de cette zone, il est même possible de retrouver des îlots de toundra alpine, où une végétation éparses et de petits arbustes parviennent à subsister (Payette et Boudreau, 1984).



**Figure 1.1 Localisation géographique des monts Chic-Chocs** (tiré de : Germain et Voiculescu, 2007)

Dans les plus hautes altitudes, soit au-delà de la limite forestière, subsiste une espèce bien particulière au sud de la province. Les massifs des monts Chic-Chocs abritent encore aujourd'hui une population de caribou de la Gaspésie. Cette dernière est classée comme espèce en voie de disparition et, depuis 2001, la population et son habitat sont désignés comme vulnérables par le gouvernement du Québec (Québec. FAPAQ, 2004). Des efforts de conservation et d'aménagement sont donc mis de l'avant afin de préserver leur présence au sein de cet écosystème (Québec. RNQ, 2013).

La topographie spécifique en plus de la proximité avec les grandes masses d'eau du St-Laurent et de l'Atlantique contribuent au phénomène d'inversion thermique, ce qui confère au milieu un climat très contrasté. En un même mois d'hiver par exemple, tant les vagues de grand froid, les tempêtes de neige et les blizzards que les redoux, les fortes pluies et les épisodes de pluies verglaçantes sont susceptibles de subvenir (Fortin et autres, 2011). Un tel climat, conjugué au relief accidenté associé aux vallées glaciaires, contribue grandement à un manteau neigeux instable, favorable à la formation d'avalanches.

### 1.2.2 Environnement humain

La présence humaine au sein du milieu particulier des Chic-Chocs donne à cette recherche tout son sens. En effet, la notion de risque abordée ici est celle que représentent les avalanches sur les pertes de vies humaines, mais aussi au niveau de l'économie et des infrastructures. Toutefois, l'établissement de l'activité anthropique sur le territoire s'est effectué de manière relativement organisée et c'est en 1949 que la réserve faunique des Chic-Chocs est créée. Dès lors, on vise à établir une zone tampon adjacente au parc de la Gaspésie, de manière à optimiser le territoire et ses ressources. La faune et la flore ont ainsi pu être préservées, et l'activité touristique y a été développée. Le parc s'étend sur une superficie de 1 129 kilomètres carrés et un total de 43 lacs et plusieurs rivières et petits cours d'eau s'y retrouvent. Puisqu'il s'agit d'un milieu naturel d'exception où se conjuguent montagnes, forêts et lacs, des activités de plein air telles que la randonnée pédestre, équestre ou en motoneige, la chasse et la pêche ainsi que le ski d'aventure et la raquette ont pu y être développés. Finalement, l'activité forestière est aussi présente sur le territoire de la réserve des Chic-Chocs, ainsi qu'aux alentours. (Sépaq, 2015)

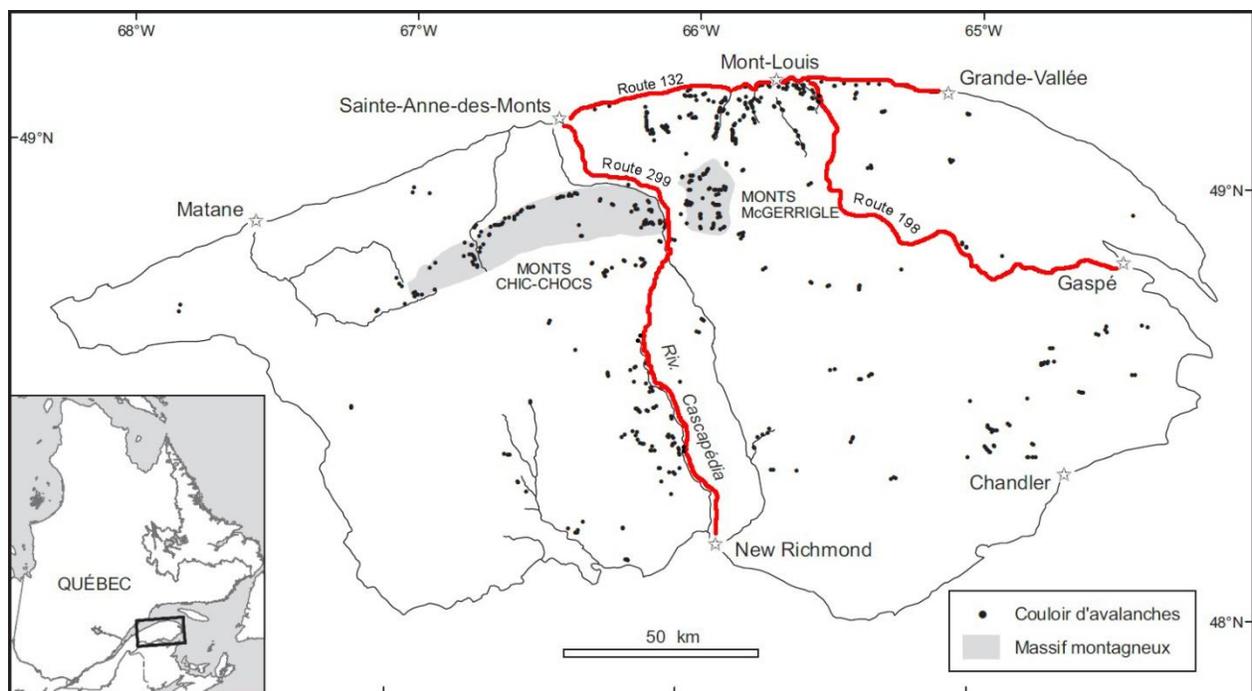


Figure 1.2 Principaux couloirs avalancheux de la Gaspésie (inspiré de : Héту, 2007)

Pour y accéder, une voie d'accès principale subsiste en provenance des centres urbains de Montréal et de Québec. Il s'agit de la route nationale 132, bordée d'une part par le fleuve Saint-Laurent, et d'autre part par le plateau gaspésien et les collines appalachiennes. On y retrouve aussi la route 299, qui traverse la péninsule gaspésienne et le parc des Chic-Chocs, de Sainte-Anne-des-Monts jusqu'à New Richmond, dans la Baie-des-Chaleurs. Au nord-est se retrouve la route 198 qui relie Mont-Louis à Gaspé, en passant par

Murdochville. La figure 2 identifie les principaux couloirs avalancheux de la Gaspésie, dont la plupart se situent en bordure du fleuve St-Laurent, soit le long de la route 132, et dans la région des monts Chic-Chocs où traverse la route 299. À noter que seulement le segment de la route 132 entre Sainte-Anne-des-Monts et Grande-Vallée est mis en évidence ici, car il s'agit de la portion la plus pertinente par rapport aux risques d'avalanches.

Chaque année, ces infrastructures routières essentielles sont soumises à des événements avalancheux. Selon le directeur général de AQ, il ne serait pas rare que plus de 50 avalanches par année parviennent à recouvrir entièrement ou partiellement les routes 132 et 198 (Boucher, 2015). Par exemple, pour les hivers 2012-2013 et 2013-2014, 35 et 53 avalanches ont affecté les artères principales (Haroun, 2014). En plus du danger pour les automobilistes, le service routier peut donc être interrompu pendant des jours entiers (Héту, 2007) affectant ainsi les activités locales telles que le tourisme et la foresterie, provoquant des pertes ou des ralentissements économiques.

## 2. QUESTION DE RECHERCHE ET HYPOTHÈSES

Suite aux objectifs identifiés dans l'introduction, une question de recherche principale peut être ressortie : quel est l'impact de la variabilité climatique observée depuis les trente-cinq dernières années sur l'occurrence avalancheuse dans les Chic-Chocs? L'axe principal de recherche est donc articulé autour de cette interrogation qui vise d'une part à étudier l'évolution climatique et d'autre part à évaluer l'évolution des épisodes avalancheux de la région dans une perspective de gestion de risque par rapport aux activités humaines.

Afin d'orienter le travail et de s'assurer que les objectifs principaux secondaires seront tous couverts, cette section comporte une série d'hypothèses de recherche. En premier lieu, deux études ressortent par rapport à la tendance de l'occurrence avalancheuse dans une perspective de changements climatiques. La première, dont le titre très révélateur consiste en *Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate : the French Alps over the 2020-2050 and 2070-2100 periods*, a été réalisée conjointement par l'Institut national de sciences appliquées de Lyon (INSA), l'Université de Grenoble ainsi que le Centre d'études de la neige de Météo-France. Elle porte sur une étude statistique réalisée dans les Alpes françaises, dans laquelle ont été corrélées des données climatiques et avalancheuses (Castebrunet et autres, 2014). Une telle étude est intéressante, car elle emploie sensiblement les mêmes bases que celles employées dans ce projet, soit qu'il ne s'agisse que d'une analyse statistique, alliant des données d'observation d'avalanche et des données fournies par un modèle de réanalyses météorologiques.

Des tendances à long terme ont pu en être établies pour trois niveaux d'altitudes distinctes, soit la basse altitude (0 à 1 800 m), la moyenne altitude (1 800 à 2 400 m) et la haute altitude (2 400 m et plus). Puisque le présent projet étudie spécifiquement la région des Chic-Chocs et que l'altitude n'y dépasse pas les 1 100 m, il importe de se concentrer sur les informations portant sur la basse altitude soit entre 0 et 1 100 m. Selon les chercheurs, les données statistiques démontrent un réchauffement climatique évident, qui induit une diminution de l'apport neigeux annuel en basse altitude. De ce fait, une baisse de 20 à 30 % est prédite quant aux événements avalancheux en basse altitude, toutes tailles confondues (Castebrunet et autres, 2014). Suivant ces informations, une première hypothèse à poser serait que :

- A. l'occurrence avalancheuse sous la limite des arbres dans les Chic-Chocs diminuerait au cours des 100 prochaines années, suite à une hausse des températures et à une baisse prédite de l'apport neigeux annuel.

La seconde étude qui sera soulignée est orientée directement sur le territoire des Chic-Chocs et de la péninsule gaspésienne. Issue d'une collaboration entre les chercheurs Daniel Germain (Université de Moncton), Louise Filion (Centre d'études nordiques, Université Laval) et Bernard Héту (Centre d'études nordiques, Université du Québec à Rimouski), cette étude présente un portrait des événements

d'amplitude majeure au sein de 12 couloirs avalancheux subalpins des Chic-Chocs, entre 1895 et 1999. Les données ont été recueillies grâce à la dendrochronologie ainsi qu'à l'étude de données météorologiques passées, enregistrées aux stations du Cap-Madeleine et de Grande-Vallée. Ainsi, des corrélations statistiques ont été effectuées afin de déterminer les conditions météorologiques critiques favorisant l'occurrence avalancheuse, de quoi a découlé la mise sur pied d'un indice d'activité avalancheuse régional. (Germain et autres, 2008)

Suivant les résultats ressortis, les conditions météorologiques favorables aux avalanches seraient en hausse, c'est-à-dire que de plus en plus d'évènements de redoux ont été enregistrés. Ces évènements mènent à la création de couches instables au sein du manteau neigeux encourageant le déclenchement d'avalanches. De plus, suivant les données dendrochronologiques, une hausse d'évènements majeurs déclenchés entre 1 100 et 800 m d'altitude est aussi enregistrée et peut être corrélée aux conditions météorologiques (Germain et autres, 2008). Subséquemment, une seconde hypothèse de recherche serait que :

- B. l'occurrence avalancheuse en milieu alpin dans les Chic-Chocs augmenterait au cours des 100 prochaines années, suite à une augmentation d'évènements météo favorisant l'instabilité du manteau neigeux.

Une troisième hypothèse provient du couplage de ces études, en prenant pour compte que le climat se réchauffe effectivement et qu'il y aura moins d'accumulation de neige annuellement. Cependant, ce manteau neigeux soumis à des régimes climatiques plus doux pourrait voir ses caractéristiques morphologiques changées, notamment suite à une augmentation de son contenu en eau et à la modification des processus de métamorphisme. Ainsi, cette dernière hypothèse est que :

- C. les avalanches de neige humide seront de plus en plus fréquentes.

### **3. MÉTHODOLOGIE**

La présente section permet de mettre en lumière les étapes de recherche et les méthodes employées pour l'accomplissement de ce travail. Les prochaines sous-sections sont organisées de manière à représenter les étapes chronologiques de réalisation afin de répondre à tous les objectifs identifiés. L'aspect des données climatiques est abordé en premier, pour faire suite aux données avalanches. Puis, les méthodes statistiques employées pour effectuer les corrélations seront décrites, pour enfin terminer avec les méthodes de projection sur l'horizon 2100.

#### **3.1 Collecte et analyse des données climatiques**

Cette étape demeure cruciale dans l'étude avalancheuse, car elle fournit les éléments de base quant à la prédiction de ces événements. Les conditions météorologiques passées et actuelles correspondent au plus grand facteur de déclenchement d'avalanches (Tremper, 2008). Parmi les paramètres disponibles, les plus importants demeurent les précipitations, la température et le vent (vitesse et direction) (Castebrunet et autres, 2014). La méthode d'analyse de chacun de ces paramètres sera décrite ci-après, selon leur pertinence et leurs similarités. Toutefois, le modèle fournissant ces données météorologiques, soit le *North American Region Reanalysis* (NARR), sera décrit pour bien comprendre son fonctionnement et pour illustrer en quoi il constitue une ressource adéquate pour l'étude des avalanches.

##### **3.1.1 Données de réanalyses NARR**

Tel que susmentionné, les données climatiques employées aux fins de ce travail incluent plusieurs variables. Ces données doivent avoir été enregistrées de manière systématique, et ce, depuis assez longtemps pour permettre l'établissement de courbes de tendances, afin que ces dernières soient employées à des fins de projections. Les stations météorologiques locales permettraient certes de fournir la plupart des informations nécessaires, mais puisqu'il s'agit d'enregistrements spatialement ponctuels, il sera plus difficile de les extrapoler à l'ensemble de la région d'étude (Langlois et autres, 2009). Une telle opération devient d'autant plus difficile lorsque le terrain comporte des disparités importantes au niveau de sa morphologie, tel qu'il est retrouvé dans les Chic-Chocs.

Ainsi, pour répondre à ces critères particuliers et représenter la réalité d'une manière la plus précise possible, les réanalyses climatiques NARR sont employées. Ces données consistent en une combinaison de modèle de prévisions météorologiques et d'observations en stations, ce qui permet de produire des archives riches en informations en temps réel depuis 1979 (Côté, s.d.). Grâce à ces données passées, il est ensuite possible d'établir des tendances climatiques, en fonction des paramètres que l'on veut étudier.

Le modèle NARR présente une résolution spatiale de 32x32 km. Sa résolution temporelle, quant à elle, couvre les données à partir de janvier 1979 jusqu'à septembre 2013, à raison de huit fois par jour, donc

toutes les trois heures. Ces données peuvent ensuite être obtenues en fonction d'une altitude donnée. Le présent travail se concentrera sur les altitudes du niveau de la mer (0), de 500 et de 1 000 m. Il importe de considérer cette division altitudinale, car l'activité avalancheuse parvient rarement sous la limite des 500 m (Germain et autres, 2008). Sauf en certains endroits où des signes de perturbations subsistent (feu de forêt, éboulis rocheux, coupe forestière, etc.), la végétation y demeure trop importante pour permettre la progression ou l'activité notable d'avalanches.

L'emphase est aussi mise sur la période où la couverture neigeuse est présente, soit les mois de novembre, décembre, janvier, février, mars et avril. Tel que confirmé avec un technicien en avalanche de AQ, grâce à qui certaines des données avalancheuses employées dans ce travail ont été acquises, il s'agit d'autant plus de la période temporelle la plus pertinente à employer (Janssen, 2015).

### **3.1.2 Température**

La température correspond à une variable importante en ce sens où elle détermine la phase des précipitations. De plus, de par ses fluctuations, la température atmosphérique influence directement le couvert neigeux, c'est-à-dire qu'elle peut en venir à changer, voire même perturber l'équilibre des couches de neige accumulées en modifiant le gradient de température et les processus de ventilation menant à la formation de givre de profondeur. Les variations importantes de température peuvent aussi mener à la formation de croûtes de glace, ou de couches de fonte et de regel qui sont problématiques au niveau de la stabilité (Hétu, 2007).

Cette variable est donc étudiée ici sous plusieurs aspects, afin d'en faire ressortir l'évolution au cours des 34 dernières années. Premièrement, l'évolution journalière est analysée selon les trois altitudes préalablement mentionnées. Ces informations permettent de quantifier la présence et la tendance du réchauffement dans les Chic-Chocs, desquelles des courbes de tendances, sur un horizon de 100 ans pourront être établies. Puis, afin d'obtenir une vision plus précise du réchauffement atmosphérique, le nombre de jours hivernaux où la température moyenne dépasse les 0°C est présenté. Ces études sont effectuées pour les périodes temporelles de 1974 à 2013 et de 1999 à 2013, pour tenter d'établir si des changements au niveau des tendances plus récentes peuvent être observés.

Suite à ces analyses, des années présentant des enregistrements exceptionnels, par exemple beaucoup plus haut ou beaucoup plus bas que la moyenne, pourront être identifiées. Ces données sont ensuite comparées aux cycles *El Niño* et aux analyses du *North Atlantic oscillation* (NAO). De telles études complémentaires permettent d'expliquer en partie les épisodes exceptionnels, puis de déterminer à quel point ces patrons atmosphériques globaux influencent le climat local, et donc l'occurrence avalancheuse dans les Chic-Chocs.

### 3.1.3 Vents

Le vent constitue aussi un élément très important à considérer. Le transport de neige mène à l'accumulation dans les dépressions et sur les corniches (Mott et autres, 2010), tout en compactant celle-ci pour former les « plaques à vent ». Ces plaques constituent un important facteur de déclenchement, car elles viennent surcharger le manteau neigeux (Tremper, 2008).

Les caractéristiques par rapport au vent qui sont étudiées dans les sections suivantes se limitent à la vitesse et la direction. Puisque la direction dans lequel les vents dominants soufflent peut provoquer de l'accumulation sur les versants opposés, cette étape permet de prévoir si ces patrons changeront d'ici les prochaines années. Puis, la vitesse moyenne des vents en général est analysée dans le but de déterminer les tendances de créations de plaques à vents pour le futur. À noter que les données fournies par le modèle NARR représentent des informations de vent prises à 10 m du niveau de la mer uniquement. L'évolution de ce paramètre ne s'effectue donc pas en altitude dans le présent travail.

### 3.1.4 Précipitations

Selon Castebrunet et autres (2014), l'intensité des précipitations influence grandement la stabilité du manteau neigeux. Tout dépendants de l'intensité et de la durée des épisodes de précipitations, les risques associés peuvent être plus ou moins grands (Davis, 1999). Par exemple, une précipitation importante et soudaine a plus de chances de déclencher une avalanche qu'une précipitation de moindre importance.

Cependant, les impacts des précipitations sur le manteau neigeux dépendent aussi sur la phase de précipitation. Ce travail se penche donc aussi sur les transitions de phases en fonction des données de température. Pour simplifier le travail, la transition est assumée à 0°C. De manière purement théorique et superficielle, cela désignerait une précipitation de pluie, et inversement solide dans le cas où la température serait sous les 0°C. Cependant, les précipitations de neige mouillée et de verglas sont toutes aussi importantes à recenser, mais demeurent plus difficilement identifiable sans observations directes (Langlois et autres, 2014).

Certaines méthodes semi-empiriques de paramétrisation de phase peuvent être utilisées, notamment celle de Ding et autres (2014), qui décrit une marche à suivre pour permettre la différenciation entre les précipitations de neige, de pluie et des autres. Même si une certaine marge d'erreur subsiste toujours, les valeurs critiques à prendre en considération pour caractériser les types de précipitations sont celles du 0°C, en dessous de laquelle il s'agit probablement d'un événement de neige et celle du +8°C, au-dessus de laquelle il s'agit probablement d'un événement de pluie. Puis, afin de couvrir la plage commune entre ces événements de pluie et de neige, une catégorie de « neige fondue » est à considérer entre -1,6°C et +9,6°C. Au-delà de -10 et de +10°C, les précipitations sont jugées comme pratiquement certaines comme étant soit

des événements de pluie ou de neige, dépendamment si la température est au-dessus ou en dessous du point de congélation. (Ding et autres, 2014)

De cette manière, il est possible d'effectuer une étude de tendance de types de précipitations, en fonction des valeurs critiques de température susmentionnées. Plus spécifiquement, il est important de déceler si plus de précipitations de chaque type (neige, pluie ou neige mouillée) sont à prévoir sur l'horizon de 100 ans. En effet, une plus grande quantité de précipitations de neige annuelles présente un impact différent qu'une augmentation des épisodes de pluie ou de neige mouillée sur le manteau neigeux et donc, sur la dynamique avalancheuse dans les environnements montagnards (Davis, 1999).

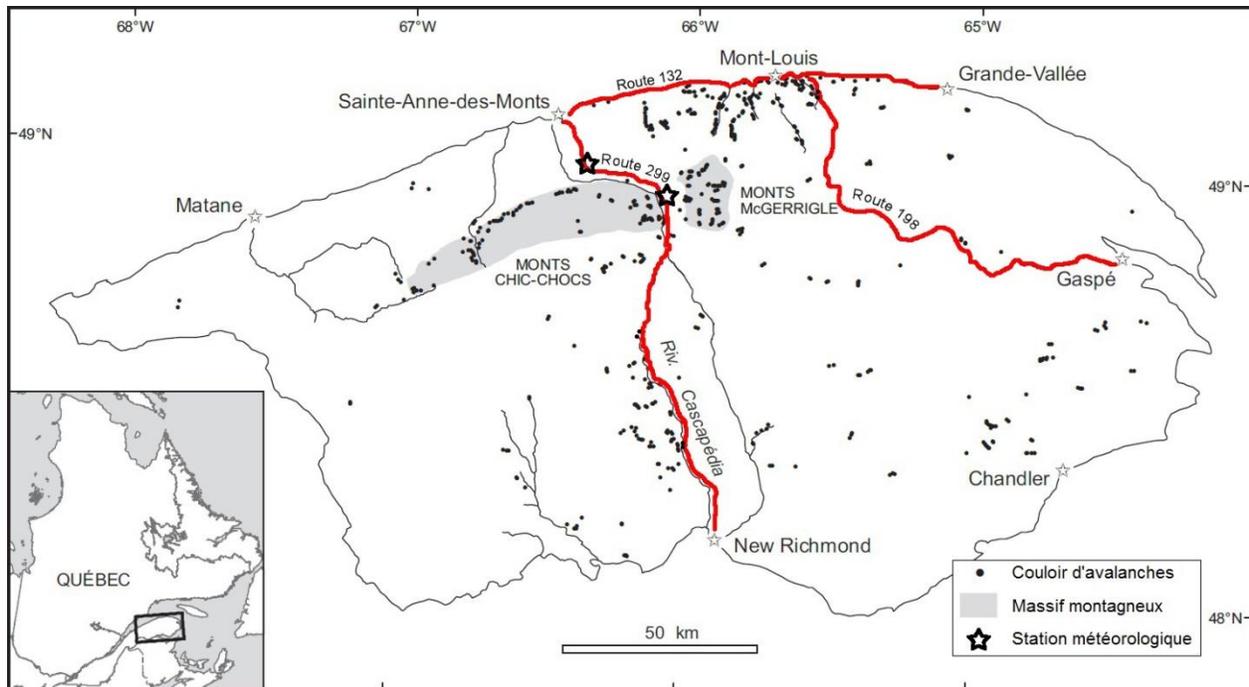
### **3.1.5 Cycles *El Niño* et NAO**

Dans le but d'obtenir un portrait le plus complet possible des causes de déclenchement d'avalanches dans les Chic-Chocs, d'autres paramètres, sont aussi observés. Ce travail analysera donc le comportement du phénomène *El Niño* ainsi que le North American Oscillation (NAO) qui ont une influence sur le régime de température, notamment au niveau de l'hémisphère nord (NCDC, 2015). Ainsi, ces données permettront d'établir si les conditions liées à ces grands phénomènes peuvent être liées à l'occurrence avalancheuse, ou du moins au portrait d'évolution des températures dans les Chic-Chocs.

## **3.2 Validation du modèle climatique**

Puisque les données climatiques présentées ci-avant sont issues d'un modèle de réanalyse, il importe tout de même de les comparer avec les données réelles enregistrées sur le terrain. Pour se faire, des données météorologiques du Ministère du développement durable, de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) provenant de stations locales seront employées. Deux stations en particulier seront employées, soit celle de Cap-Seize et celle du Gîte, toutes deux situées sur le territoire ou en périphérie très près du parc national des Chic-Chocs. Leurs altitudes respectives sont de 255 et de 244 m (Figure 3.1). La station de Cap-Seize est celle située le plus au nord de la route 299 et se retrouve juste avant l'entrée du parc national de la Gaspésie. Pour ce qui est de la station du Gîte, cette dernière se retrouve près du Gîte du Mont-Albert, dans une vallée entre les Chic-Chocs et les monts McGerrigle.

Toutefois, les données du MDDELCC de ces deux stations n'ont pas été enregistrées de manière constante depuis 1979. Pour la station de Cap-Seize, les données disponibles utiles sont disponibles de janvier 1979 à décembre 1994 et de novembre 1999 à décembre 2013. Les données qui y sont fournies correspondent à la température minimale et maximale, les précipitations de pluie, de neige ou totales, ainsi que l'occurrence de brouillard, de brume, de giboulée, de grêle, d'orage et tonnerre, de poudrière, et de vents violents (>62 km/h), le tout sur une base journalière.



**Figure 3.1 Localisation des stations météorologiques locales** (inspiré de Hétu, 2007)

En revanche, pour la station du Gîte, uniquement les données de janvier à avril 1995 sont disponibles. Les données de températures minimales et maximales journalières y sont disponibles alors que les données de précipitations de pluie, de neige ou totales le sont pour avril seulement. Les autres variables énumérées pour la station de Cap-Seize demeurent inconnues. Ainsi, les données NARR qui pourront être validées avec celles des stations météo sont celles des températures maximales et minimales journalières et celles des précipitations totales journalières. Il aurait été pertinent de valider aussi les données de vent, mais ces dernières demeurent insuffisantes parmi les enregistrements historiques disponibles.

Grâce à ces paramètres, il sera possible, lors de l'analyse de comparaison avec les données du système NARR à la section 4.1.5, de ressortir les coefficients de détermination ( $R^2$ ) pour la température (minimums et maximums journaliers) ainsi que celles du total de précipitations journalier. Uniquement le total journalier est pris en compte, car il semble subsister certaines erreurs quant à l'entrée de données, par exemple lorsque des millimètres (mm) sont comptés comme des centimètres sans aucune conversion, rendant la comparaison avec les données NARR difficile. Tout de même, il sera possible de déterminer s'il y aura eu ou non précipitations pour les jours étudiés, permettant ainsi de distinguer une certaine corrélation.

### **3.3 Collecte et analyse des données avalanches historiques**

Suite à l'analyse de l'évolution climatique, les années où le nombre d'évènements avalancheux et leur taille ont été plus importants sont analysées. Puisque ces données ne sont pas archivées de manière systématique, il importe de se référer à plusieurs sources différentes. Deux principales sont employées, soit l'étude du professeur Daniel Germain (2008) cité à la section 2, consistant en un travail empirique basée sur la dendrochronologie, ainsi que les données enregistrées par AQ directement sur le terrain.

#### **3.3.1 Données dendrochronologiques**

La dendrochronologie est une science qui permet d'étudier les cernes de croissance des arbres afin d'y déceler des perturbations physiques. Ces dernières peuvent entre autres être associées aux avalanches, en ce sens où la force appliquée par la neige peut perturber la croissance normale de l'arbre. Ces perturbations se traduisent en des déformations appliquées aux dendrites de l'arbre, qui peuvent ensuite être répertoriées et compilées en fonction des années. (Germain et autres, 2008)

Grâce à la dendrochronologie, dix années de fortes activités avalancheuses ont pu être recensées entre 1979 et 1999. Ainsi, les années 1981, 1984, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1994 et 1995 sont identifiées comme ayant été particulièrement actives en terme d'avalanches. Ces dix années sont donc spécialement visées pour la suite de ce travail, en plus des autres recensées par AQ. En plus des analyses dendrochronologiques, des comparaisons ont pu être effectuées avec les données climatiques, ce qui a permis de confirmer l'occurrence d'évènements exceptionnels, favorisant l'instabilité du manteau neigeux. Un total de cinq scénarios climatiques propices ont été décelés, soit des chutes de neige totales supérieures à la moyenne, une fréquence importante de tempêtes de neige, l'occurrence d'évènements de pluie majeurs formant des croûtes à facettes, des séquences de pluie gelée et de forts vents ainsi que la présence de facettes et de gel des couches profondes (Germain et autres, 2008). Pour les années suivant 1999, ces conditions spécifiques devront être ressorties afin d'effectuer la comparaison avec les données avalancheuses.

Pour comparer les données ressorties de cet article, un tableau synthèse est disponible en annexe I, où sont représentées les valeurs de précipitations et de nombre de jours où la température dépassait 0°C. Ces données correspondent à celles issues du modèle NARR, qui sont comparées aux scénarios établis par l'étude de Germain et autres (2008) à la sous-section 4.2.

#### **3.3.2 Évènements recensés localement par Avalanche Québec**

Le suivi avalancheux au Québec demeure subjectif, car son principal intrant consiste en des observations humaines non systématiques. Puisque le territoire avalancheux des Chic-Chocs n'est pas suivi sur son ensemble quotidiennement, ces données demeurent sporadiques et ne sont basées que sur des observations

plus ou moins précises. De ce fait, l'emphase est accordée aux évènements majeurs, plus facilement identifiables, ainsi qu'aux périodes où le nombre d'évènements rapportés est plus important que la moyenne.

La source de ces données consiste en une série de bulletins d'avalanche publiés par AQ, entre 2002 et 2013. Ces bulletins couvrent généralement les mois de décembre, janvier, février, mars et avril. Même si certaines années présentent en plus une couverture des mois de novembre, ces derniers ne seront pas pris en compte afin de se baser sur une échelle temporelle équivalente d'une année à l'autre. Ces derniers seront donc tous parcourus et analysés afin d'identifier les périodes plus actives.

Les critères retenus seront 1) le nombre d'avalanches répertorié, 2) le type, ainsi que 3) l'orientation des versants. Ces données pourront ensuite être comparées aux données météorologiques, notamment en ce qui concerne l'orientation du vent ainsi que les fluctuations de températures, pour déterminer si les tendances climatiques sont aussi ressenties au niveau de l'occurrence avalancheuse. Puis, les données de taille d'avalanche et de la présence ou non de victime(s) dans les évènements seront ressortis. Ceux-ci permettront une meilleure interprétation du risque associé en plus de mettre en perspective l'importance de la sensibilisation en sécurité d'avalanche auprès des adeptes de sports d'aventure.

## 4. RÉSULTATS

Suivant la méthodologie présentée à la section précédente, les résultats seront présentés en fonction des deux premières questions de recherche, soit de (1) reconstruire un historique climatique grâce aux données de réanalyses climatiques du *North American Regional Reanalysis*, de 1979 à aujourd'hui et de (2) reconstruire un historique des épisodes avalancheux grâce aux données du centre d'observation situé dans les Chic-Chocs (AQ) et de la littérature, de 1979 à aujourd'hui. La section est donc divisée en deux parties distinctes, à commencer par l'étude climatologique, suivie de l'étude des statistiques avalancheuses.

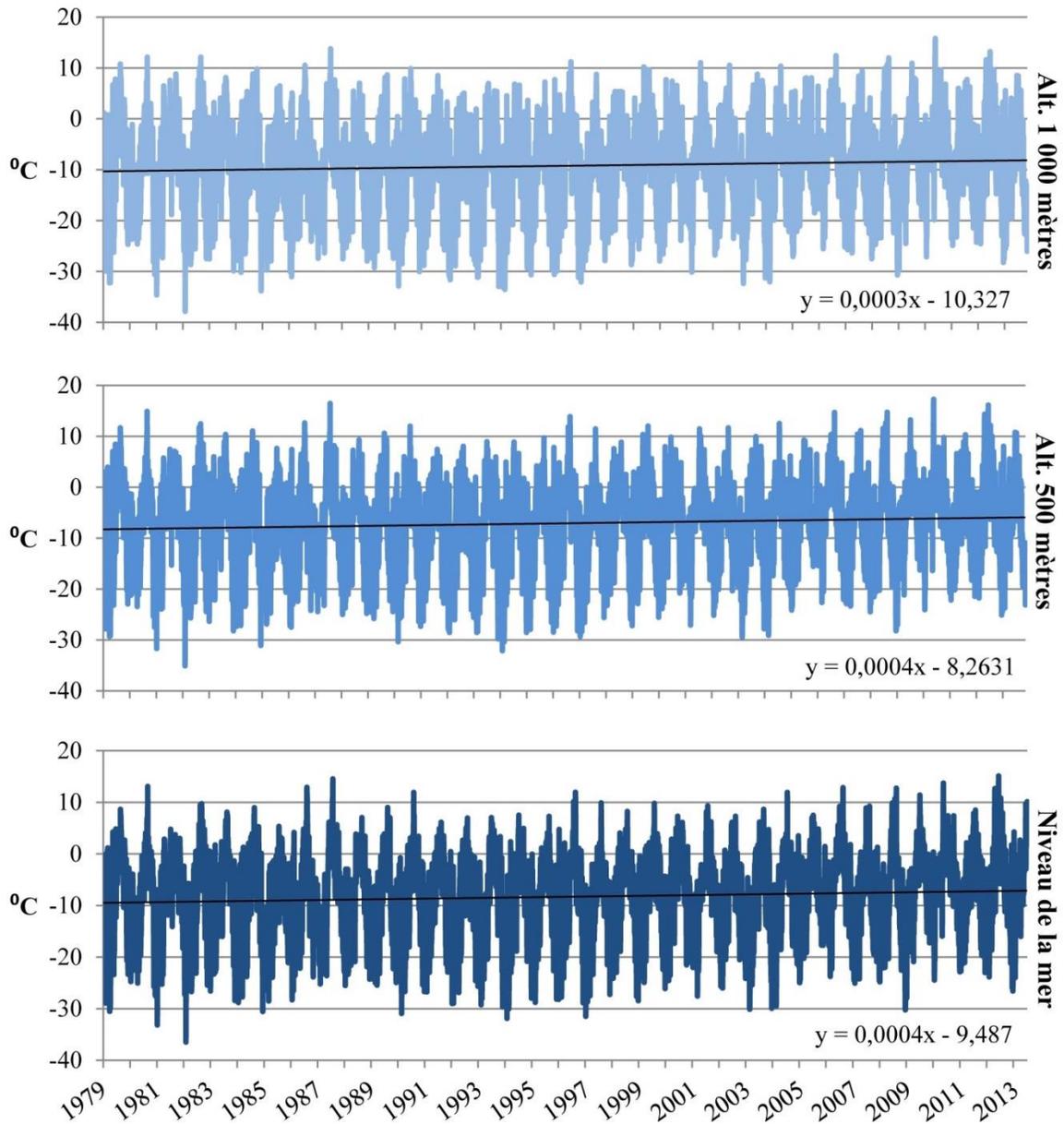
### 4.1 Étude climatologique

La présente étude climatologique s'effectue en fonction des variables critiques identifiées dans la méthodologie. Les tendances de 1979 à 2013 et de 1999 à 2013 seront analysées. La première, de 1979 à 2013, servira à établir une tendance plus globale, alors que celle de 1999 à 2013 servira à déterminer si les tendances s'accroissent depuis les dernières années. Il est important de rappeler que seulement les données hivernales sont étudiées ici, soit celles du 1<sup>er</sup> novembre au 30 avril de chaque année. Les données étudiées seront : la température de l'air et l'humidité relative, les vents ainsi que les précipitations.

#### 4.1.1 Température de l'air et humidité relative

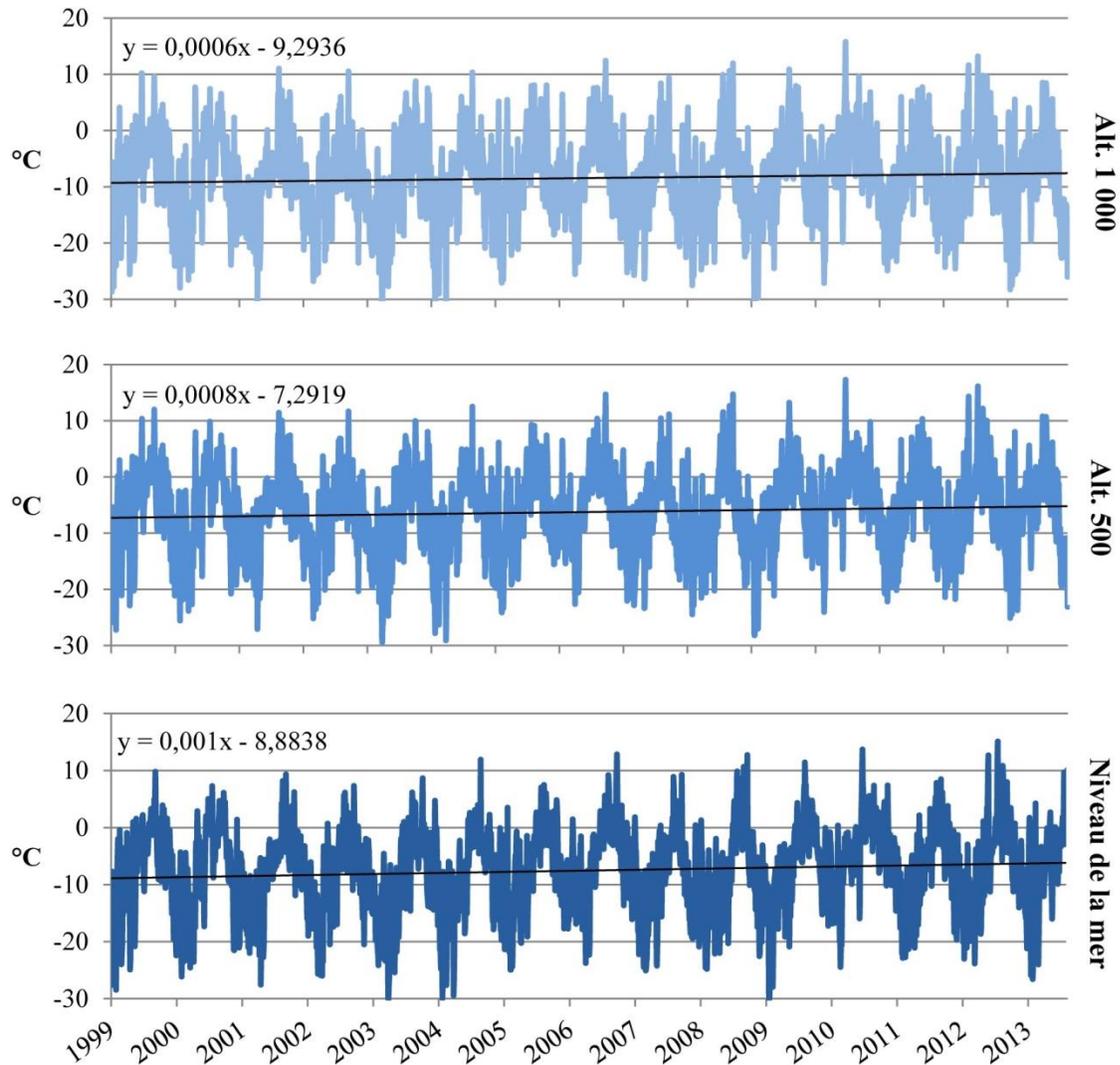
Tout d'abord, l'étude de la température s'effectue en trois temps, en fonction de l'altitude. Les températures enregistrées aux altitudes correspondantes à 0 (niveau de la mer), 500 et 1 000 m sont ici présentées en fonction des moyennes journalières. Puis, le nombre de jours hivernaux où la température moyenne est supérieure à 0°C est analysé et des tendances linéaires permettent une caractérisation de premier ordre sur les scénarios de stabilité future du manteau neigeux des Chic-Chocs. L'évolution des minimums et des maximums annuels est ensuite présentée, pour enfin terminer avec l'évolution de l'humidité atmosphérique relative.

Tel que représenté sur la figure 4.1, à chacune des altitudes établies, une augmentation progressive, mais relativement faible est observée, avec peu de différences au niveau des différentes altitudes, soit à 1 000, 500 et 0 m respectivement. À la lumière de ces observations, il est aussi possible d'affirmer que depuis les 34 dernières années, la température moyenne a augmenté de seulement 0,01°C, et ce, à chacune des altitudes observées. Cette augmentation demeure donc pratiquement nulle et par conséquent négligeable.



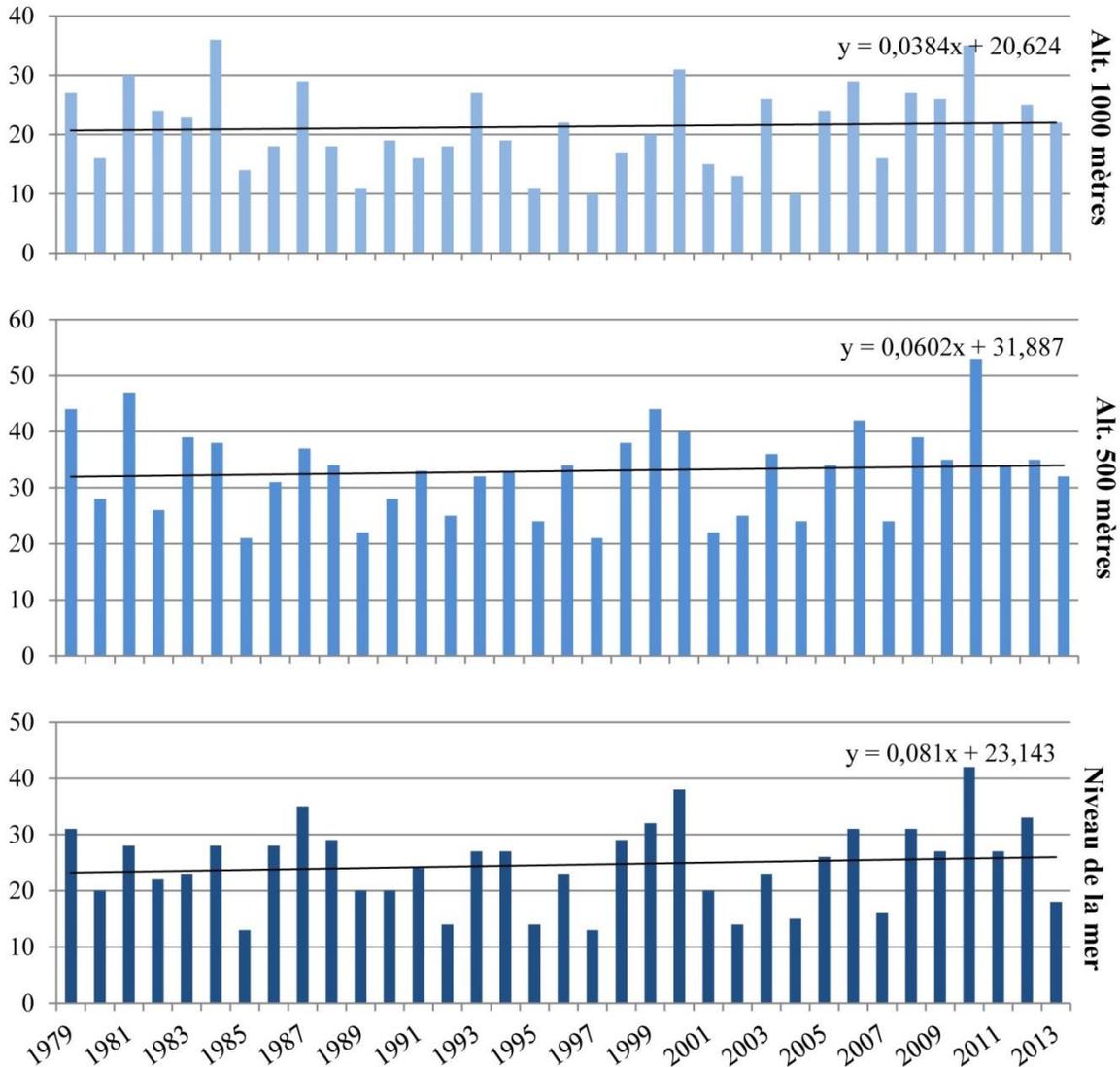
**Figure 4.1** Évolution de la température hivernale de l'air à 0, 500 et 1000m (données de : NCEP-NARR, 2015)

Puis, ces mêmes tendances sont étudiées de 1999 à 2013, afin de déterminer de manière plus précise si un réchauffement plus prononcé est enregistré sur cette courte période. La figure suivante illustre donc les mêmes données, mais sur un horizon plus récent.



**Figure 4.2** Évolution de la température hivernale de l'air, de 1999 à 2013 (données de : NCEP-NARR, 2015)

En effet, pour chacune des altitudes ciblées, de légères accentuations de réchauffement hivernal sont ressenties. Pour les altitudes de 500 et de 1 000 m, cette accentuation est plus rapide (0,03 et 0,02 °C respectivement), alors qu'au niveau de la mer, la pente est passée de 0,0004 à 0,001 correspondant à un réchauffement de 0,03°C également. Cependant, ces chiffres ne permettent pas d'établir avec certitude un réchauffement, étant donné les ambiguïtés de NARR par rapport au réchauffement observé.



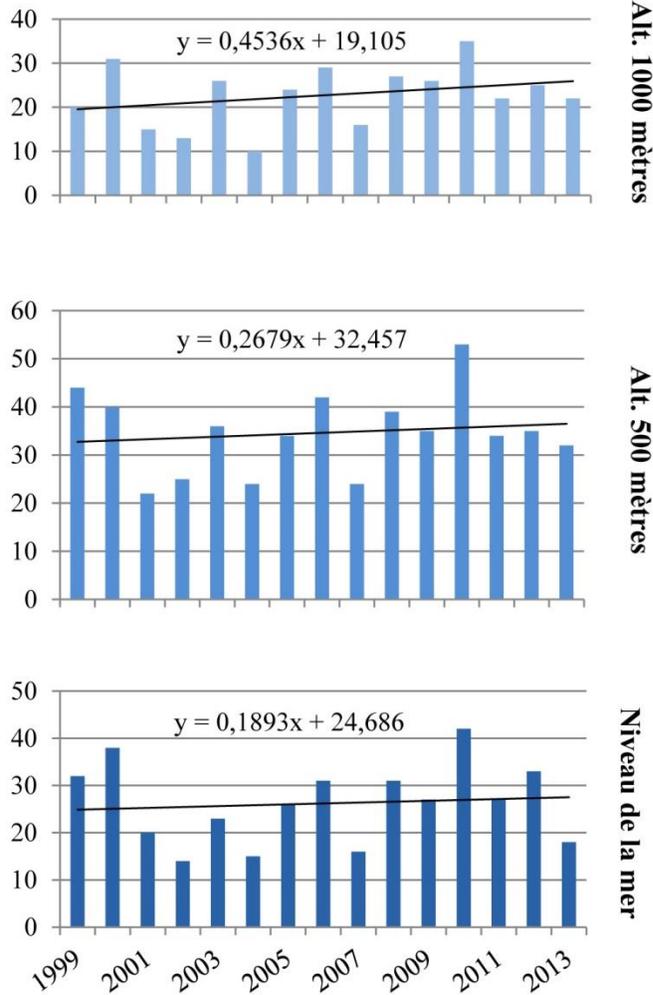
**Figure 4.3** Nombre de jours hivernaux où la température moyenne est supérieure à 0°C (données de : NCEP-NARR, 2015)

La série d'histogrammes ci-dessus démontre l'évolution du nombre de jours hivernaux de fonte (i.e. où la température moyenne dépasse 0°C), en fonction des différentes altitudes. Ces informations sont importantes pour l'étude des phénomènes avalancheux, car un réchauffement soudain peut contribuer fortement à la déstabilisation du manteau neigeux en créant une ou plusieurs couches de gel au fil d'un même hiver (Tremper, 2008).

Suite à l'observation des données de la figure 4.3, il est possible d'affirmer qu'une augmentation du nombre de jours dépassant 0°C augmente, et ceci à un rythme plus rapide pour le niveau de la mer. En effet, entre 1979 et 2013, le nombre de jours où la température moyenne journalière a dépassé 0°C a augmenté de 2,8 jours au niveau de la mer, de 2 jours à 500 m et de 1,3 jour à 1 000 m. Avec les figures

4.1 et 4.2, il est possible de conclure que le réchauffement est légèrement plus rapide pour les basses altitudes, un fait important dans le contexte de prédiction d'avalanche sous la limite des arbres.

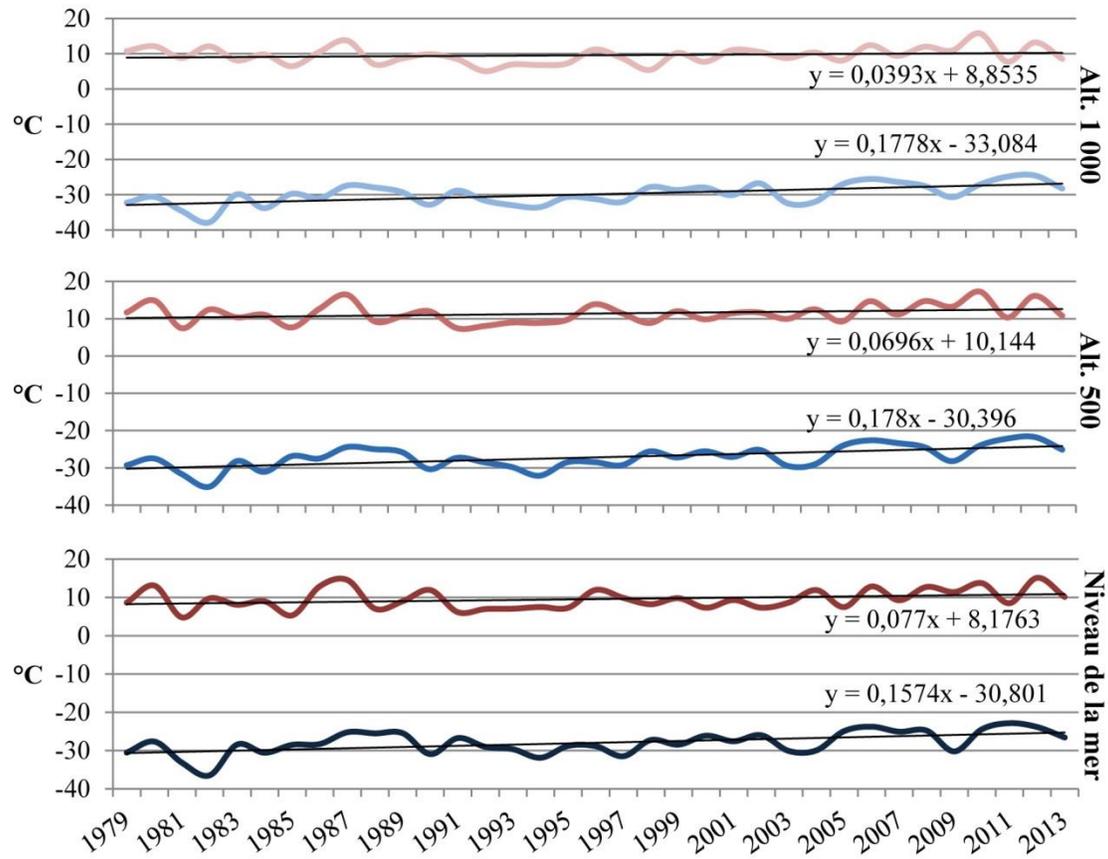
Concernant les tendances récentes de 1999 à 2013, ces dernières sont représentées sur la figure 4.4. Pour chacune des altitudes, une accentuation de la croissance est enregistrée par rapport à la tendance globale



de 1979-2013. Toutefois, ce n'est pas au niveau de la mer que cette accentuation est la plus forte, mais plutôt à 1 000 m. En effet, le gain de fonte représente 6,4 jours (1 semaine) depuis 1999 alors qu'un gain de 9,1 jours (1 semaine et demie) et 15,4 jours (> 2 semaines) sont observés à 500 et 1 000 m respectivement. Ceci suggère donc un réchauffement accru en altitude depuis 1999, contrairement à ce que la tendance 1979-2013 suggère. Cette observation de réchauffement est donc beaucoup plus significative que les températures mesurées sur les figures 4.2 et 4.3.

À des fins de complémentarité, l'évolution des maximums et des minimums de température permettent d'identifier certes les tendances globales, mais aussi de cibler certaines années où ces valeurs se sont avérées exceptionnelles. Ces dernières sont illustrées à la figure 4.5 et ont été calculées de manière annuelle, c'est-à-dire en fonction des valeurs moyennes annuelles des températures maximales et minimales depuis 1979.

**Figure 4.4** Nombre de jours hivernaux où la température moyenne est supérieure à 0°C, de 1999 à 2013 (données de : NCEP-NARR, 2015)

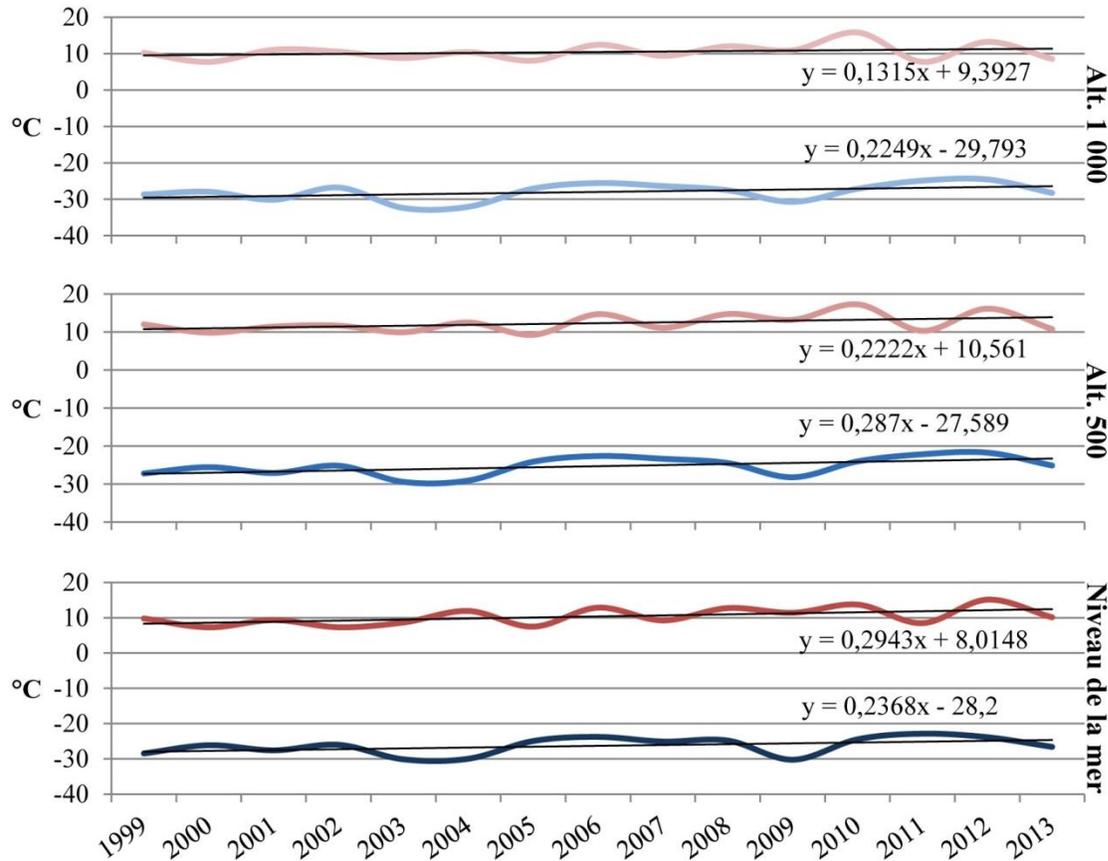


**Figure 4.5** Évolution annuelle des minimums et maximums de température journalière (données de : NCEP-NARR, 2015)

Les années où des maximums plus élevés ont été enregistrés sont 1982, 1987, 1990, 1996, 2006, 2010 et 2012. Quant aux années où des minimums plus marqués ont été répertoriés, elles correspondent à 1982, 1990, 1994, 1997, 2004, 2004 et 2009. Pour ce qui est des pentes de tendances observées, elles se traduisent par des augmentations plus importantes au niveau des valeurs minimales de température, et ce, toutes altitudes confondues. De telles valeurs se traduisent en des augmentations de plus de 6°C des températures minimales sur 34 ans aux altitudes élevées, et à un peu plus de 5°C pour le niveau de la mer. Pour les valeurs maximales, ces dernières démontrent aussi une évolution positive, cependant plus faible. Au niveau de la mer, ces augmentations représentent un peu plus de 2°C des températures maximales sur 34 ans, alors qu'à 1 000 m, cela correspond à un peu plus de 1°C sur 34 ans, ce qui reste négligeable dans notre contexte. Il est cependant intéressant de constater que le réchauffement des températures minimales est plus important à 500 et 1000m, en accord avec l'analyse du nombre de jours où les températures surpassent 0°C.

Ces mêmes données observées sur l'horizon récent de 1999 à 2013 permettent d'établir de nouvelles tendances intéressantes. Ces dernières sont présentées à la figure 4.6. Chacune des valeurs de pente

observées ici est plus élevée qu'au graphique précédent, traduisant à nouveau un réchauffement global accentué entre 1999 et 2013. Effectivement, pour les valeurs de températures minimales, elles augmentent de 3,1 à 4°C pour 14 années représentées, alors que les valeurs maximales augmentent de 1,8 à 4,1°C.



**Figure 4.6** Évolution annuelle des minimums et maximums de température journalière, de 1999 à 2013 (données de : NCEP-NARR, 2015)

Le réchauffement des températures minimales s'est donc accéléré en moyenne d'environ 8 % depuis 1999 par rapport à la tendance 1979-2013, alors que le réchauffement des températures maximales s'est accéléré de 15 %. Il est donc permis de croire que le réchauffement s'accélère, particulièrement à 500 et 1000m et que le nombre de jours de fonte est en croissance soutenue depuis 1979. De tels changements sont observés sur l'ensemble du profil montagneux et se sont accentués entre les années 1999 et 2013. Au niveau de la mer, les deux périodes temporelles observées démontrent qu'il s'agit de la zone où les maximums tendent à évoluer de manière plus importante. Dans le cas des minimums, c'est à 500 m d'altitudes qu'ils démontrent une tendance positive plus marquée.

#### 4.1.2 Vents

Le paramètre du vent constitue aussi un élément important dans l'étude avalancheuse puisque, tel que mentionné auparavant, il s'agit d'un facteur ayant un fort potentiel de déclenchement. L'étude qui suit est effectuée en fonction des huit directions géographiques principales, soit nord (N), nord-est (NE), est (E), sud-est (SE), sud (S), sud-ouest (SO), ouest (O) et nord-ouest (NO). En premier lieu, les vents dominants sont présentés, suivis des moyennes de vitesse annuelles des différentes directions. De cette manière, il devient possible d'établir l'orientation des versants les plus à risques de chargement par le vent. Puis, l'évolution de la différence entre le maximum journalier de vitesse et la moyenne est présentée, pour déterminer certaines instabilités potentielles à ce niveau.

Tel que représenté sur la figure 4.7, les vents dominants sur la péninsule gaspésienne proviennent majoritairement du nord et du nord-ouest. Ces données ont été acquises en compilant les moyennes journalières hivernales de 1979 à 2013 inclusivement. Alors d'emblée, il est possible d'affirmer que le manteau neigeux des versants orientés sud et sud-est serait plus propice au chargement par le vent et donc, plus favorable au déclenchement d'avalanches. La même étude sur la période temporelle de 1999 à 2013 révèle pratiquement les mêmes résultats, tel que démontré sur la figure 4.8.

Néanmoins, ces données seules ne transmettent que très peu de données par rapport à l'évolution du risque avalancheux dans les Chic-Chocs; c'est pourquoi il importe d'étudier l'évolution de la vitesse des vents dans le temps. Ainsi, plus le vent est fort, plus son potentiel de transport augmente, résultant en une affectation sur la récurrence avalancheuse (Tremper, 2008).

À la figure 4.9, les maximums ainsi que les moyennes mensuelles hivernales sont présentés. Ce tableau emploie les données de moyennes journalières, à raison d'une seule fois par jour, ce qui fait que les variations intrajournalières ne sont pas prises en compte. Ainsi, les pointes maximales journalières de vents demeurent inconnues, puisque ces dernières sont incluses dans les moyennes. Ces données permettent tout de même de tirer des tendances globales des enregistrements.

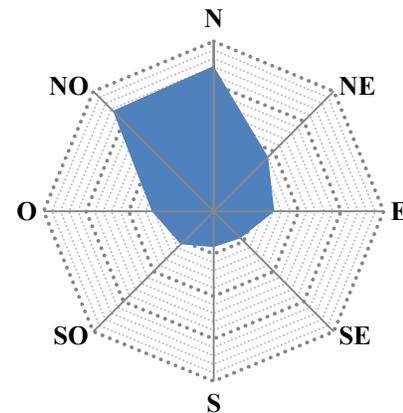


Figure 4.7 Provenance des vents dominants, de 1979 à 2013 (données de : NCEP-

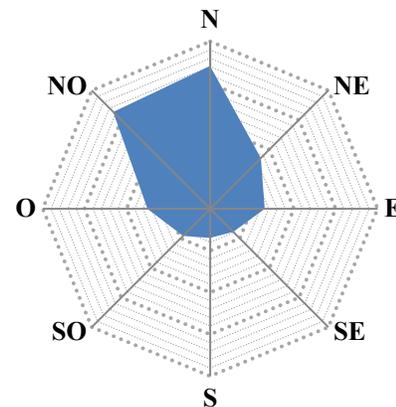
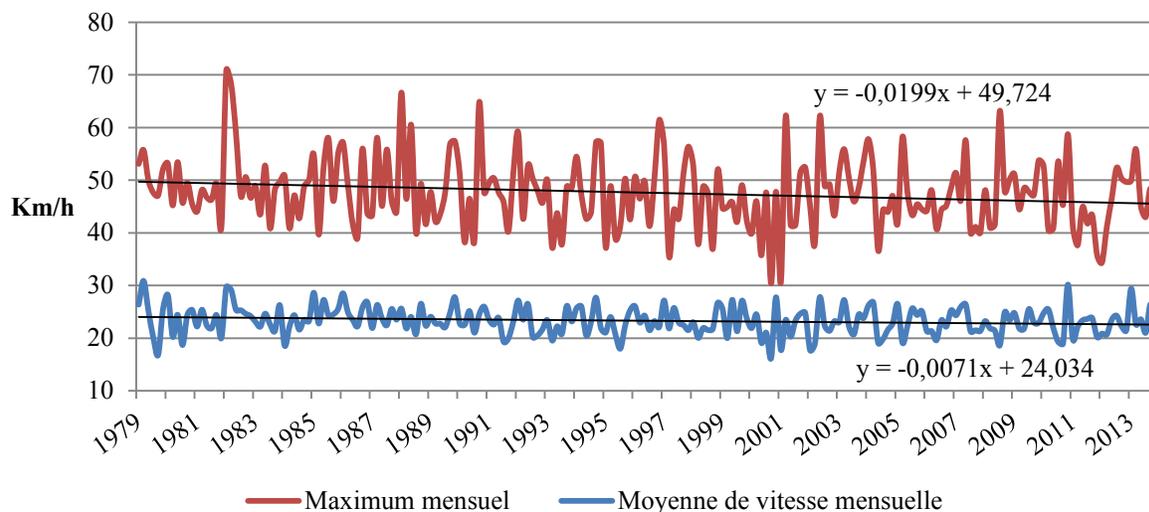


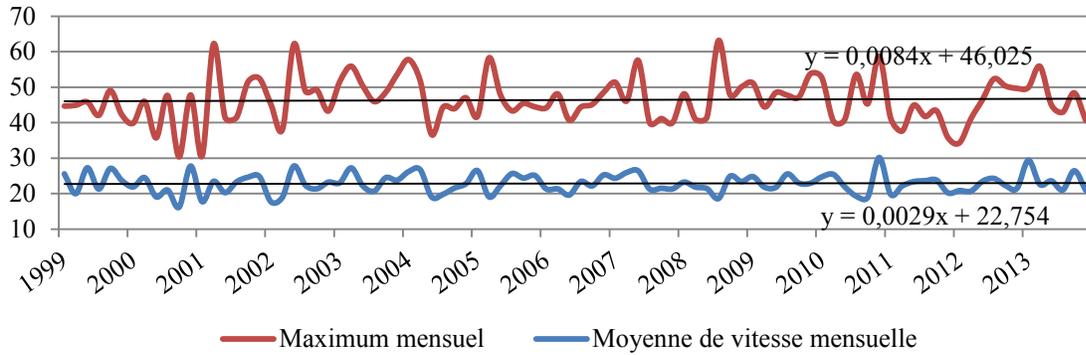
Figure 4.8 Provenance des vents dominants, de 1999 à 2013 (données de : NCEP-NARR, 2015)



**Figure 4.9** Évolution du maximum et de la moyenne des vents (données de : NCEP-NARR, 2015)

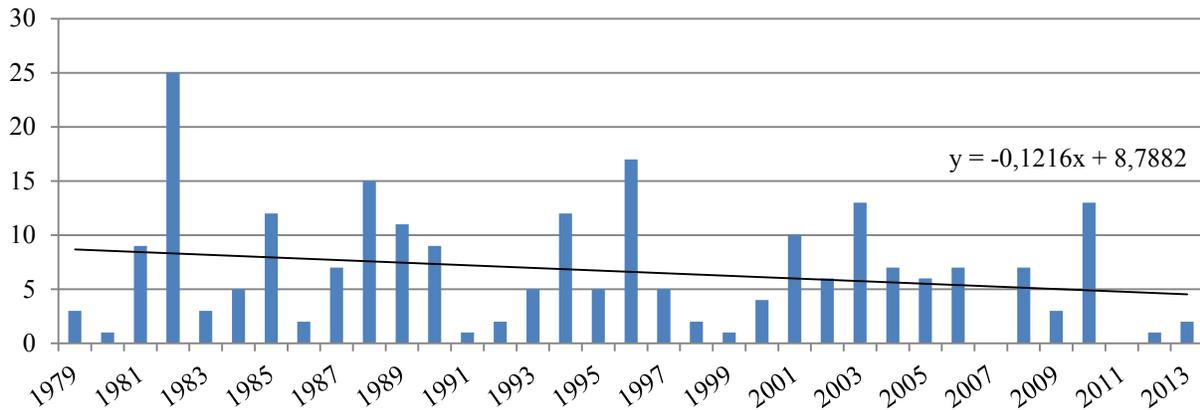
L'observation de ces éléments permet d'établir que tant les maximums et les moyennes mensuelles de vitesse de vent tendent à diminuer depuis 1979. La tendance linéaire des maximums mensuels démontre une pente négative de 0,0199, alors que celle de la moyenne mensuelle présente une pente moins prononcée de 0,0071. Les tendances montrent donc une diminution générale des vents, tant au niveau de la moyenne qu'au niveau des maximums. Il reste à savoir si la diminution des vents observée est suffisante pour diminuer le chargement des pentes sous le vent, et donc potentiellement mener à une réduction du nombre d'avalanches issues de l'effondrement de corniches. Il sera tout de même vu plus loin, section 4.2, si les pointes maximales peuvent être associées à des redoux de températures. Selon Germain et autres (2008), lorsque les pointes dépassent les 62 km/h, il s'agirait d'un scénario fortement favorable au déclenchement d'avalanches.

Entre 1999 et 2013, ces mêmes données présentent des tendances différentes. Tel que représenté sur la figure suivante, les pentes du maximum et de la moyenne de vitesse de vent mensuelle semblent plus constantes que sur l'horizon temporel compris entre 1979 et 2013. Ces dernières semblent même présenter de légères tendances positives. Pour ce qui est de la moyenne mensuelle, elle n'a augmenté que de 0,04 km/h pour ces 14 années. Il semble donc que les vents se soient stabilisés légèrement depuis les dernières années.

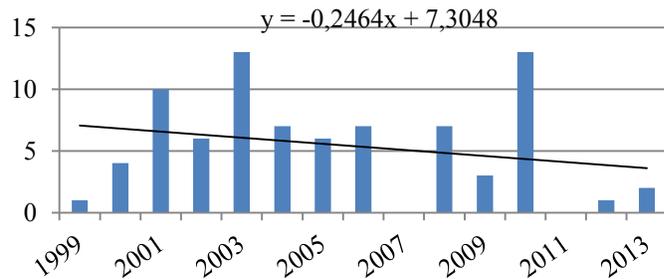


**Figure 4.10** Évolution du maximum et de la moyenne des vents, de 1999 à 2013 (données de : NCEP-NARR, 2015)

Enfin, pour avoir une vision plus fine de l'évolution des épisodes de vents forts retrouvés dans les Chic-Chocs, la figure 4.11 illustre le nombre annuel d'enregistrements de vents forts, dépassant les 62 km/h. Ces informations ont été obtenues suivant la résolution temporelle du modèle NARR de 8 fois par jour. Ainsi, un enregistrement illustré sur le graphique ci-dessous représente une période temporelle de trois heures, durant lesquelles la moyenne de vent dépassait la valeur des 62 km/h.



**Figure 4.11** Nombre d'enregistrements annuels de vents forts (données de : NCEP-NARR, 2015)



**Figure 4.12** Nombre d'enregistrements de vents forts, de 1999 à 2013 (données de : NCEP-NARR, 2015)

La lecture de ce graphique permet entre autres de déterminer les années où un plus grand nombre d'épisodes de vents forts ont été notés, en plus d'en établir la tendance évolutive à travers le temps. Suivant celles préalablement identifiées à la figure 4.12, cette tendance-ci présente une pente négative encore plus prononcée, avec une

valeur de 0,1216. Clairement, depuis les 34 dernières années, les épisodes de vents forts ont diminué. Cette tendance s'accroît même en comparaison avec l'horizon 1999-2013. La figure suivante démontre qu'un indice de pente de -0,2464, se traduisant par une baisse de 3,5 enregistrements de vents forts par année sur le territoire des Chic-Chocs.

### 4.1.3 Précipitations

En ce qui concerne les précipitations, le paramètre est étudié en fonction d'un apport assumé homogène sur le territoire, indépendamment de l'altitude. Les apports liés au transport par le vent ne sont pas non plus pris en compte pour cette analyse, mais peuvent être mis en contexte suivant l'évolution de la force et direction des vents de la section précédente. Les données sont aussi présentées en fonction de l'altitude, soit aux zones du niveau de la mer (0), de 500 et de 1 000 m. Il s'agit ici de comparer le nombre d'événements de pluie, de neige et de neige fondue encourus chaque hiver. Ces résultats sont ensuite couplés avec ceux des vents puisque l'ajout de ce paramètre favorise le gel de surface (Germain et autres, 2008). L'ensemble des données analysées ici pour chaque altitude est basé sur une moyenne de température journalière, soit la moyenne des 8 enregistrements quotidiens fournis par NARR.

La figure 4.13 illustre donc l'évolution des précipitations encourues chaque année sur le territoire des Chic-Chocs. Tel que présenté, le WE (équivalent en eau) est exprimé en mm (hauteur d'eau) et ne tient pas compte des épisodes de fontes, d'accumulation par le vent, ni du tassement lié au poids de la neige. Il ne s'agit donc pas d'une mesure empirique, mais bien théorique, en ce sens où uniquement la hauteur d'eau totale annuelle y est représentée.

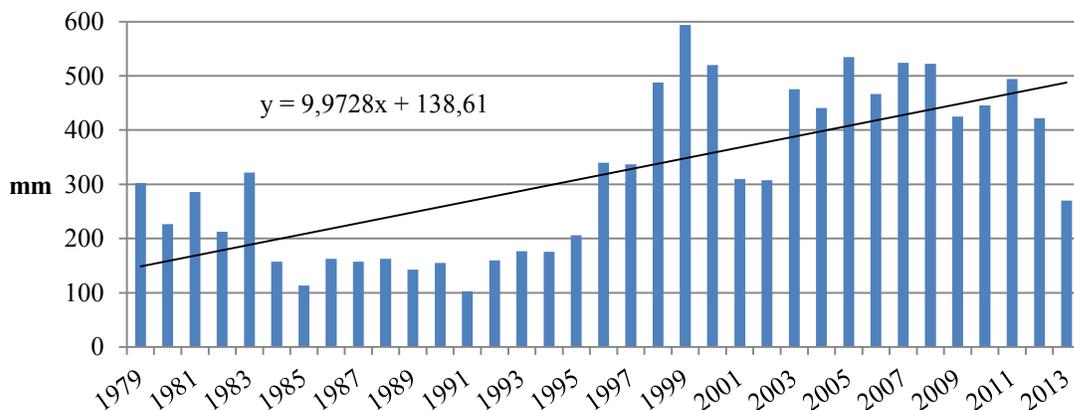
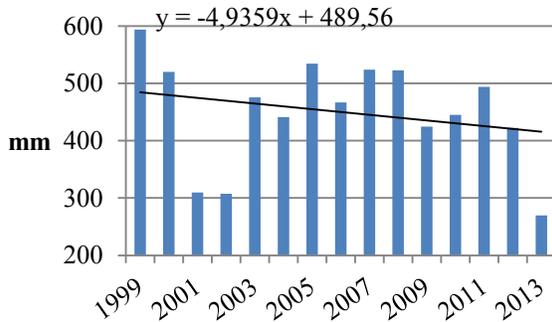


Figure 4.13 Évolution de l'équivalent en eau tombé par hiver annuel (données de : NCEP-NARR, 2015)

Ces informations semblent démontrer qu'à partir de 1998, la quantité de précipitations augmente de manière importante. La tendance de précipitations élevées se conserve d'autant plus pour les années qui suivent, où plus de 400 mm en WE est enregistré, sauf pour les années 2001, 2002 et 2013. Pour les

années ayant connu le plus de précipitations (au-delà de 500 mm), ces dernières correspondent à 1999, 2000, 2005, 2007 et 2008. Il sera vu plus loin que le modèle employé peut en effet présenter certaines lacunes concernant les précipitations.



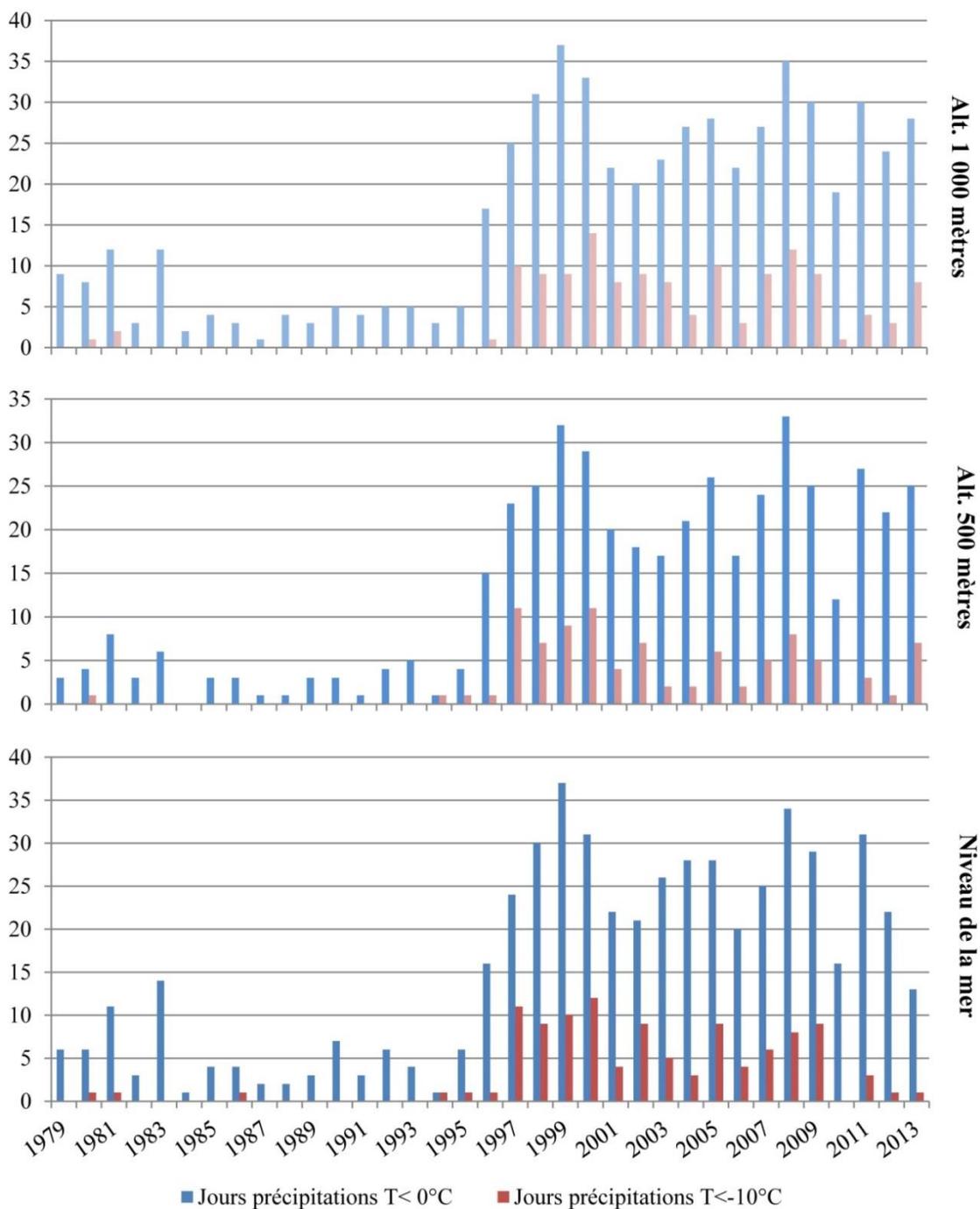
**Figure 4.14** Évolution de l'équivalent en eau tombé par hiver annuellement, de 1999 à 2013 (données de : NCEP-NARR, 2015)

Ainsi, pour dresser un portrait plus récent des précipitations dans les Chic-Chocs, l'évolution du WE pour les années de 1999 à 2013 est présentée à la figure ci-contre. Cette dernière démontre qu'une progression négative faible est encourue pour ces années, en comparaison avec une progression positive forte entre 1979 et 2013. Les indices de pente associés à ces plages temporelles se traduisent par une augmentation de près de 340 mm entre 1979 et 2013, alors qu'entre 1999 et

2013, une baisse de 69 mm est présentée. Ces données pourraient suggérer une augmentation de l'occurrence avalancheuse à partir de 2000 (plus de précipitations par rapport à 1979-2000). Cependant, AQ a démarré ses activités de prévisions en 2002, et donc il devient impossible de conclure cette hypothèse.

Puisque le modèle employé ne permet pas de donner le type de précipitations enregistré, la méthode employée pour acquérir ce genre d'information est directement inspirée de l'étude de Ding et autres (2014), cité à la section 3.1.4. Ainsi, le type de précipitations ressorti pour le nombre de jours annuels des graphiques de la présente section demeure incertain. Les informations présentées relatent exclusivement le nombre de jours où il y avait précipitations et où la température correspondait à des températures spécifiques, en fonction des valeurs suggérées par Ding et autres (2014).

De plus, un jour de précipitation correspond à un total quotidien de plus de 4 mm de WE, soit plus de 0,5 mm enregistré chaque trois heures quotidiennement. Cette valeur demeure objective en ce sens où elle n'a été fixée que dans le cadre de ce travail. Le WE, étant une valeur très précise, ne parvient jamais totalement à 0 mm, selon le modèle NARR. Or, il est évident qu'il ne tombe pas continuellement de précipitations sur le territoire. De cette manière, en ne sélectionnant que les valeurs au-dessus de 0,5 mm par trois heures, les enregistrements les plus faibles sont ainsi éliminés. Les mêmes graphiques présentés pourraient donc être produits en fonction de valeurs de WE plus élevées pour faire ressortir les événements de plus forte accumulation pouvant avoir un effet sur le déclenchement d'avalanche. Cependant, ces données sont présentées plus loin, à la section 4.1.4, puisqu'elles sont fournies par les stations météorologiques locales des Chic-Chocs.



**Figure 4.15** Évolution du nombre de jours de précipitations de neige probables (données de : NCEP-NARR, 2015)

La figure 4.15 démontre la probabilité d'occurrence de précipitations neigeuses en fonction des paramètres susmentionnés. Les années qui ressortent le plus à cet égard sont celles de 1981, 1983, 1997, 1998, 1999, 2000, 2008 et 2011. Ces dernières présentent des probabilités d'occurrence sensiblement plus élevées que leurs années voisines. L'observation de ces informations permet d'établir clairement qu'à

partir de 1997, beaucoup plus de précipitations avaient lieu lorsque les températures étaient inférieures à 0°C, mais aussi inférieures à -10°C.

Cette différence demeure tout de même curieuse, car il serait peu probable qu'en 4 ans, les précipitations neigeuses aient presque quadruplé. Puisque deux plateaux de données distincts sont donc présents sur ces graphiques, des droites de tendances n'y sont pas ressorties. Tel qu'indiqué dans l'article de Langlois et autres (2009), c'est au niveau des données de précipitations que le modèle NARR semble présenter le plus de marge d'erreur. De plus, il semble que depuis 1997, certains changements au niveau des paramètres d'entrée du modèle ont été faits, afin d'en améliorer la précision (Mesinger et autres, 2006). Ainsi, les données obtenues ne devraient être employées qu'à titre approximatif, sans toutefois établir de conclusions en ce qui concerne les données absolues et les tendances.

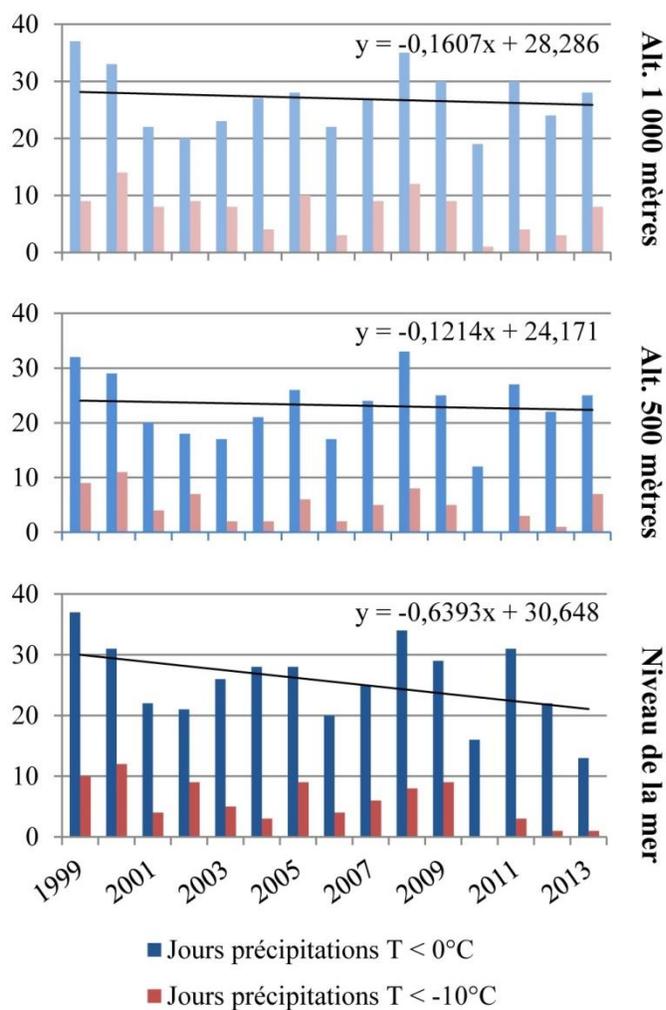


Figure 4.16 Évolution du nombre de jours de précipitations de neige probable, de 1999 à 2013 (données de : NCEP-NARR, 2015)

Il sera aussi intéressant de déterminer, grâce aux observations météorologiques des stations des Chic-Chocs, si ces occurrences représentent bel et bien des quantités de précipitations totales plus importantes. En effet, il serait possible qu'il neige plus souvent qu'avant 1997, mais en plus petites quantités, ce qui influencerait la probabilité de départs d'avalanches de manière différente. Un patron cyclique d'occurrence semble aussi être en place, mais des observations sur une période temporelle plus importante seraient nécessaires pour le confirmer.

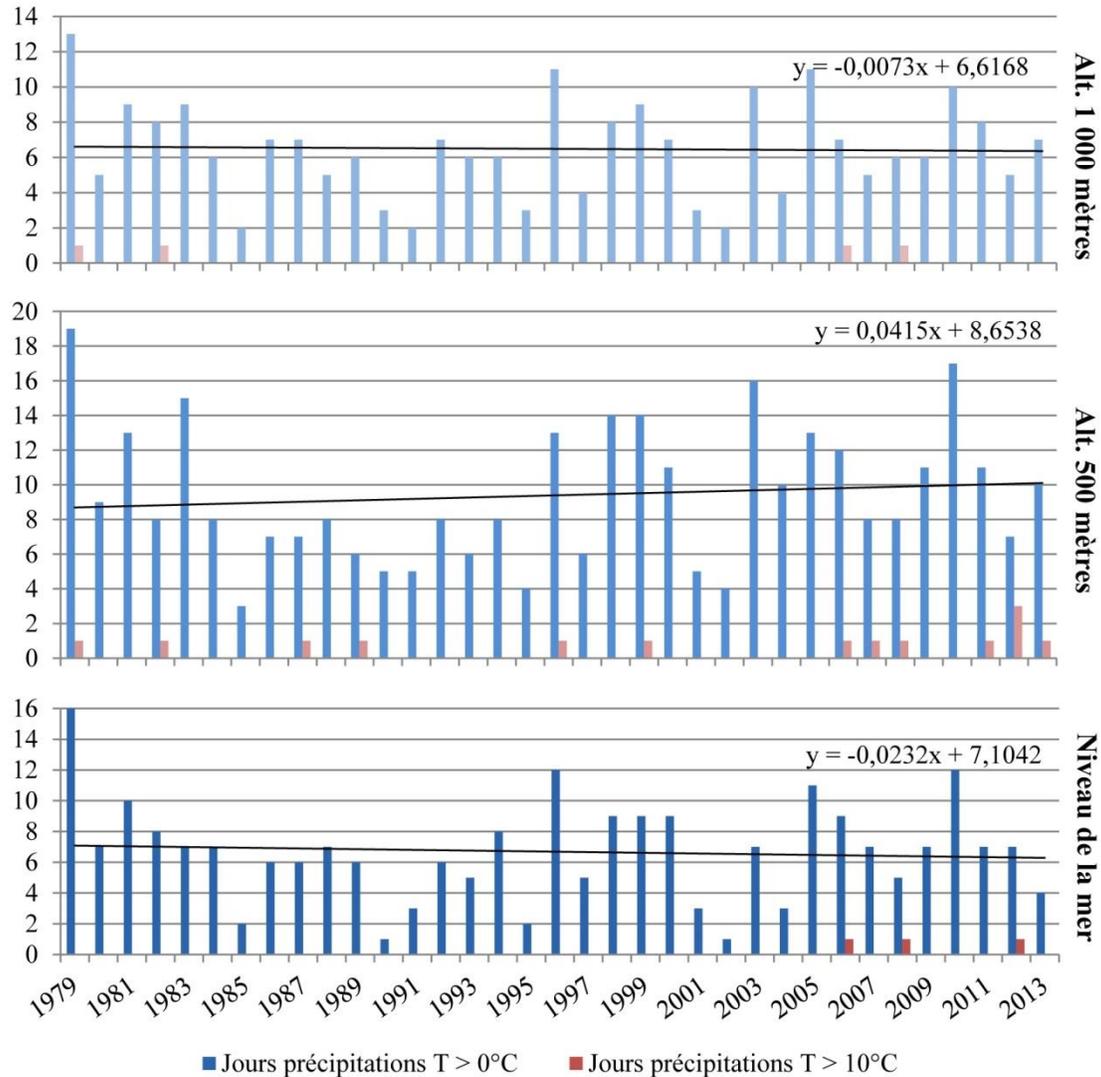
Entre 1999 et 2013, tel que représenté sur le graphique 4.16, les tendances de précipitations neigeuses progressent en diminuant à chacune des altitudes. Les gradients de pente qui y sont présentés pour les jours où il y avait précipitation en dessous de 0°C se traduisent par des diminutions moyennes de 9, 1,7 et de 2,2 jours en 14 ans pour les altitudes respectives du niveau de la mer, de 500 et de 1 000 m.

Pour améliorer la lecture du graphique, les tendances du nombre de jours où il y avait précipitation en dessous de 10°C n'y sont pas représentées. Ces dernières ont tout de même été calculées et elles correspondent respectivement à -0,5393, -0,3107 et -0,3821 pour le niveau de la mer, 500 m et 1 000 m d'altitude respectivement. Ces valeurs quant à elles représentent des pertes moyennes totales de 7,6, 4,3 et 5,3 jours de précipitations sous les -10°C sur ces 14 années.

À la figure 4.17 de la page suivante, les mêmes observations ont tenté d'être retirées grâce à des paramètres de températures différents, afin de déceler l'occurrence des épisodes de pluie probables. Ainsi, les températures employées pour le tri des données sont celles supérieures à 0°C, de même que celles supérieures à 10°C. La même variable critique de 0,5 mm de WE a aussi été prise en compte. En comparaison avec la figure 4.15, les données où la température est plus grande que 0°C présentent une évolution moins évidente. Plutôt que de démontrer une tendance positive ou négative, ces données semblent plus répondre à une évolution cyclique où les valeurs les plus faibles (les creux) se font ressentir tous les cinq ans. Un élément qui demeure surprenant suite à l'observation du graphique est que l'altitude 500 semble être plus propice aux précipitations liquides (pluie). À cette altitude, la pente semble d'autant plus présenter une tendance légèrement positive, en comparaison avec les altitudes de 0 et de 1 000 m, où les tendances semblent négatives, voire même pratiquement nulles.

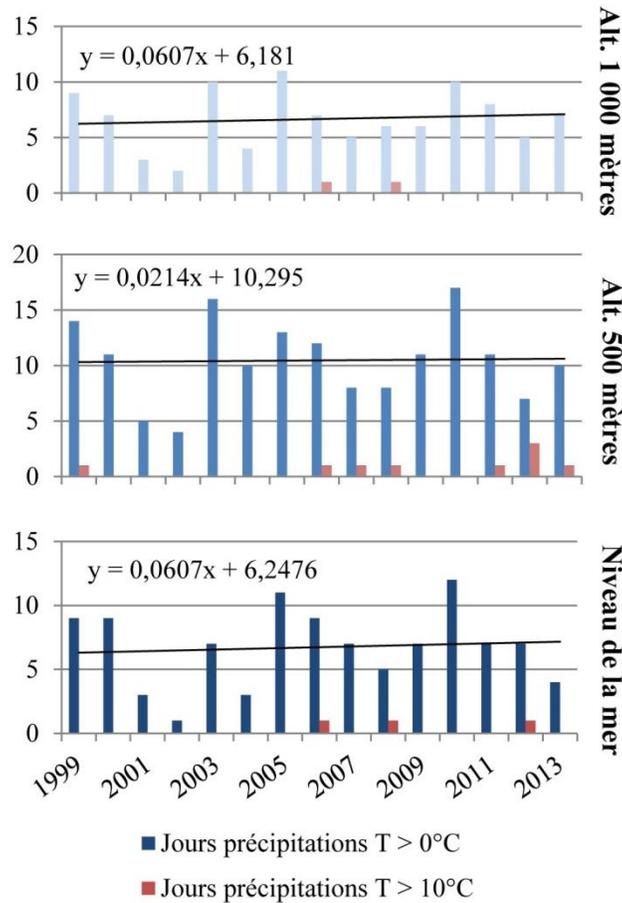
Toutefois, en ce qui concerne les jours de précipitations où la température dépasse les 10°C, leur occurrence semble augmenter sensiblement depuis 2007, et ce, spécialement aux altitudes de 0 et de 500 m. Entre 2007 et 2013 au niveau de la mer (0 m), trois jours ont été enregistrés alors qu'aucun n'est répertorié depuis 1979. À 500 m, 7 jours de précipitations où la température dépassait les 10°C sont enregistrés entre 2007 et 2013, dont deux de ces journées sont arrivées en 2012, alors que seulement 6 jours sont répertoriés entre 1979 et 2007.

À la lumière de ces informations, il demeure incertain si les jours de précipitations survenant au-dessus de 0°C augmentent à cause de l'apparence cyclique de l'évolution temporelle du paramètre. Certaines années ressortent tout de même en termes d'importance, soit celles de 1979, 1996, 2003, 2005 et 2010. Puis, en ce qui concerne le nombre de jours annuel où il y a eu précipitations au-dessus de 10°C, les données démontrent une recrudescence du phénomène, menant à une évolution positive du phénomène. Il demeure tout de même important de souligner que le nombre de journées annuelles de précipitations au-dessus de 10°C demeure relativement faible, soit entre 1 et 2.



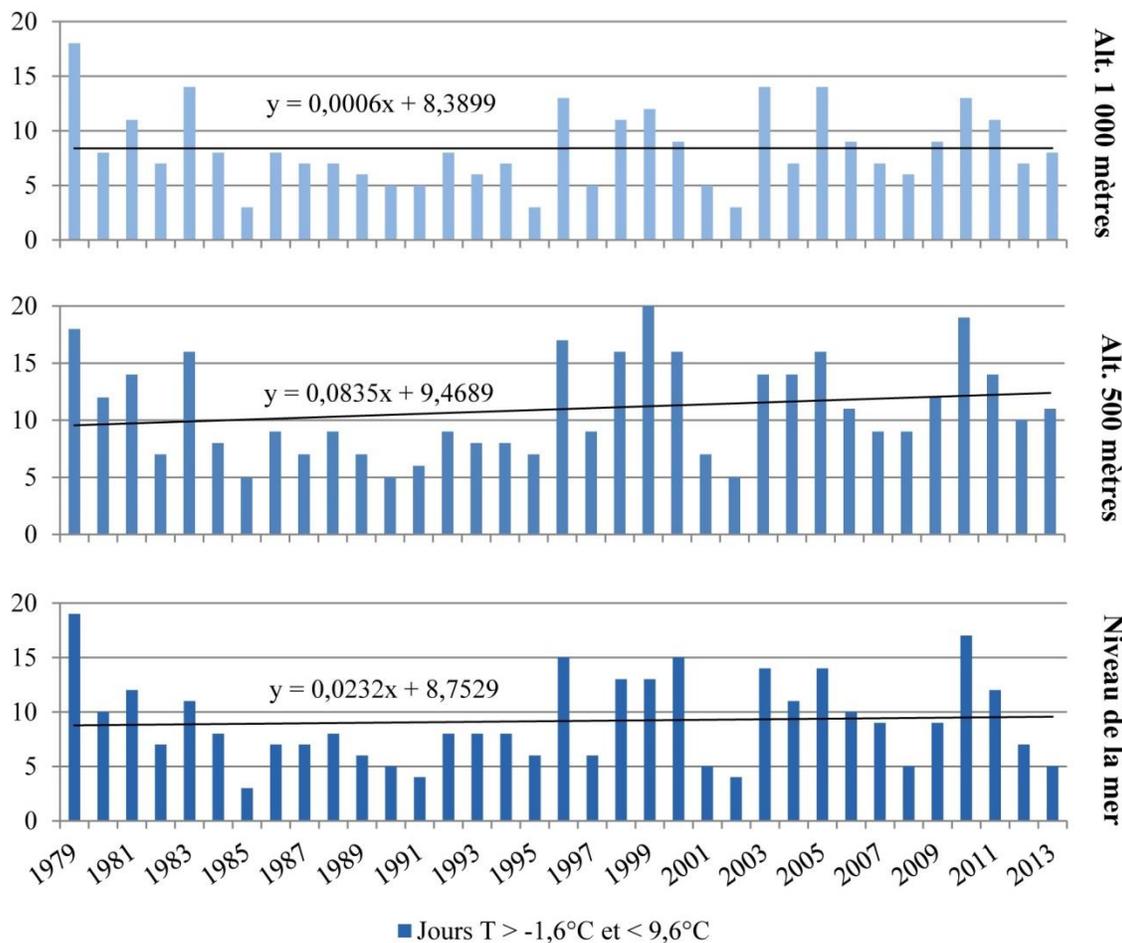
**Figure 4.17** Évolution du nombre de jours de précipitations de pluie probables (données de : NCEP-NARR, 2015)

Il est intéressant d'observer ces tendances sur l'horizon 1999 à 2013 afin de déterminer si ces dernières sont stables ou si elles semblent évoluer dans le temps. Tel que représenté sur le graphique suivant, au niveau de la mer et à 1 000 m d'altitude, il semble y avoir de plus en plus de jours de précipitations où la température dépasse la barre du 0°C. À 500 m toutefois, la tendance présente un signe de stabilisation, c'est-à-dire qu'elle demeure tout de même positive, mais diminue faiblement. Ainsi, pour le niveau de la mer, 500 et 1 000 m. d'altitude, le nombre jours de pluie probable est passé respectivement de -0,8, +1,4 et -0,2 en 34 ans à +0,8, +0,3 et +0,8 en 14 ans. Ces données demeurent très faibles et donc aucune conclusion tangible n'est tirée de ces données.



**Figure 4.18** Évolution du nombre de jours de précipitations de pluie probable, de 1999 à 2013 (données de : NCEP-NARR, 2015)

Puis, en suivant les paramètres suggérés par Ding et autres (2014), le graphique de la figure 4.19 a pu être constitué. Les jours de précipitations (plus de 4 mm par jour) où la température se situait entre -1,6°C et 9,6°C y sont représentés. Entre ces températures, la phase exacte des précipitations demeure incertaine, dépendant de plusieurs facteurs météorologiques qui ne sont pas pris en compte ici. Toutefois, ces données plus précises sont abordées à la section 4.1.4, où les données météorologiques des stations locales sont présentées.

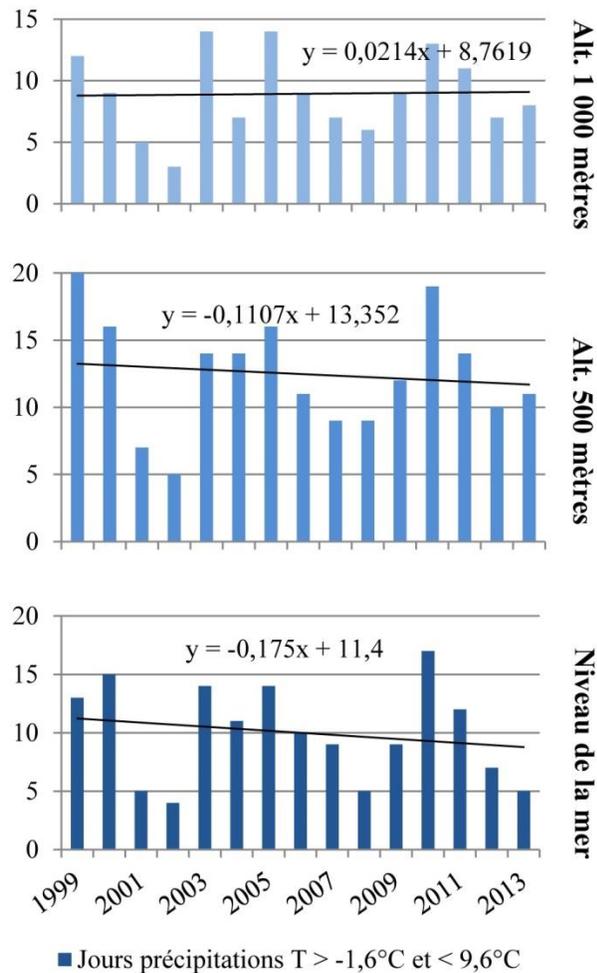


**Figure 4.19** Évolution du nombre de jours de précipitations de neige fondue probables (données de : NCEP-NARR, 2015)

Les données représentées ci-haut sont très semblables à celles de la figure 4.17 puisqu'elles semblent suivre des cycles au cinq ans et présentent des courbes de tendance quasi identiques. De telles tendances étaient prévisibles en ce sens où il est logique que la grande majorité des événements de précipitations survenus au-dessus de 0°C demeurent relativement près de cette valeur dans un contexte hivernal. Toutefois, les années qui ressortent sont un peu différentes; en plus de 1979, 1996, 2003, 2005 et 2010, les années 1983, 1999 et 2000 présentent aussi un plus grand nombre d'évènements, et ce, spécialement aux altitudes de 500 et de 1 000 m. Cette zone demeure critique dans l'observation et la prédiction avalancheuse dans les Chic-Chocs, car elle correspond à la zone de départ la plus favorable (Germain et Voiculescu, 2007).

Enfin, sur un horizon plus récent, certains changements au niveau de ces tendances sont observés. Le graphique suivant représente toujours le nombre de jours de précipitations lorsque la température se situait entre -1,6 et 9,6°C, mais sur l'horizon 1999 à 2013. Les informations qui y sont présentées permettent de

distinguer des tendances négatives à 500 m et au niveau de la mer, ainsi qu'une tendance légèrement



**Figure 4.20** Évolution du nombre de jours de précipitations de neige fondante probable, de 1999 à 2013 (données de : NCEP-NARR, 2015)

Alt. 1 000 mètres

Alt. 500 mètres

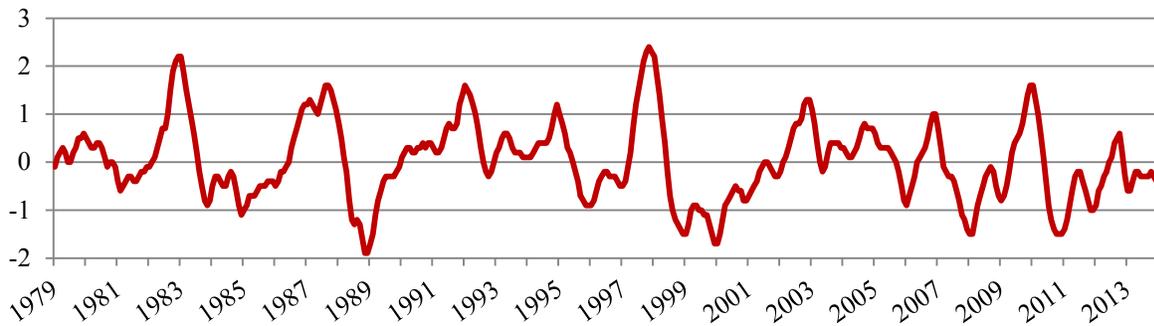
Niveau de la mer

positive à 1 000 m. En terme de nombre de jours, ces données se traduisent par des diminutions de 2,45 et de 1,6 jours de précipitations au niveau de la mer et à 500 m, alors qu'en plus haute altitude (1 000 m), cette valeur correspond à une augmentation de 0,3 jour en 14 ans.

#### 4.1.4 Cycles *El Niño* et NAO

À une échelle régionale, certains phénomènes atmosphériques pourraient potentiellement expliquer certaines tendances observées dans la section précédente et ainsi être liés à un changement de tendance d'occurrence avalancheuse. Parmi eux, les cycles *El Niño*, ainsi que les analyses du *North Atlantic Oscillation* (NAO) sont pertinents à considérer. En premier lieu, le phénomène *El Niño* provient d'un changement au niveau des vents alizés. Ces derniers soufflent généralement de l'est de manière constante. Lors d'un événement *El Niño*, ils se retrouvent momentanément atténués ou interrompus, se traduisant en un réchauffement considérable des eaux de surface de l'océan Pacifique Sud. Il en résulte ainsi des perturbations importantes sur plusieurs aspects environnementaux, notamment au niveau du climat, et ce, à l'échelle

mondiale (Trenberth, 1997). Au niveau de l'Amérique du Nord, les événements *El Niño* forts favorisent des climats plus doux, ce qui peut contribuer par exemple à un total d'accumulation de neige plus faible et des épisodes de redoux plus fréquents (PMEL, 2015). À l'inverse, lorsqu'*El Niño* est faible, on parle du phénomène de *La Niña*, qui engendre des températures plus froides que la normale. La figure 4.21 illustre l'évolution de l'indice océanique *Niño*, représentant les épisodes *El Niño* et *La Niña*, de 1979 à 2013, incluant tous les mois de l'année, plutôt qu'uniquement ceux d'hiver.

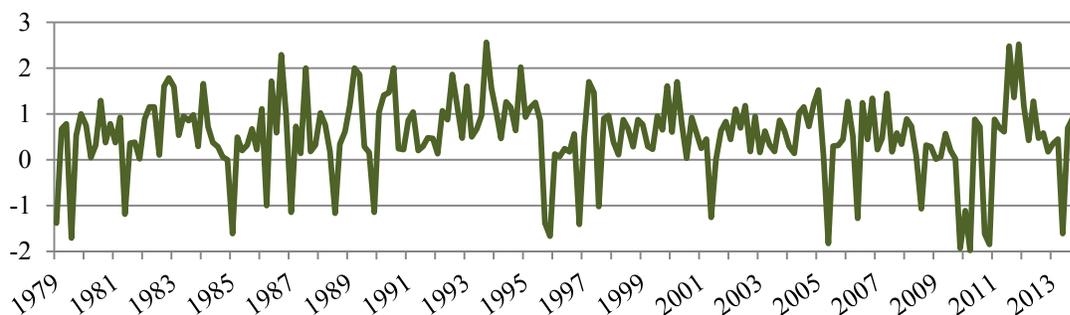


**Figure 4.21** Évolution de l'indice *El Niño* de 1979 à 2013 (données de : CPC, 2015)

Les pointes où les enregistrements sont les plus élevés correspondent à des années *El Niño*, et les plus basses à *La Niña*. Ainsi, les années qui ressortent correspondent à 1982, 1987, 1992, 1995, 1998, 2003, 2007 et 2010. Inversement, les épisodes de *La Niña* correspondent à 1984, 1985, 1989, 1996, 1999, 2000, 2001, 2006, 2008, 2009, 2011 et 2012. Au niveau de la récurrence cyclique du phénomène, ce paramètre semble demeurer stable, soit à des intervalles de 3 à 5 ans pour *El Niño*. Certes certaines années où les températures des Chic-Chocs ont été plus chaudes peuvent être associées au phénomène, par exemple pour les années 1983 et 1997 où les *El Niño* les plus forts du 20<sup>e</sup> siècle ont été enregistrés, mais le réchauffement atmosphérique global n'y semble pas lié. La raison en est que pour la même période temporelle, *El Niño* démontre une régression négative, comparativement à la tendance positive des températures journalières. De plus, certaines années, par exemple celles de 1988-1989 et 1999-2000, des épisodes marqués de *La Niña* ont été enregistrés, alors que les hivers ont présenté un nombre très élevé de jours où la température moyenne était plus grande que 0°C.

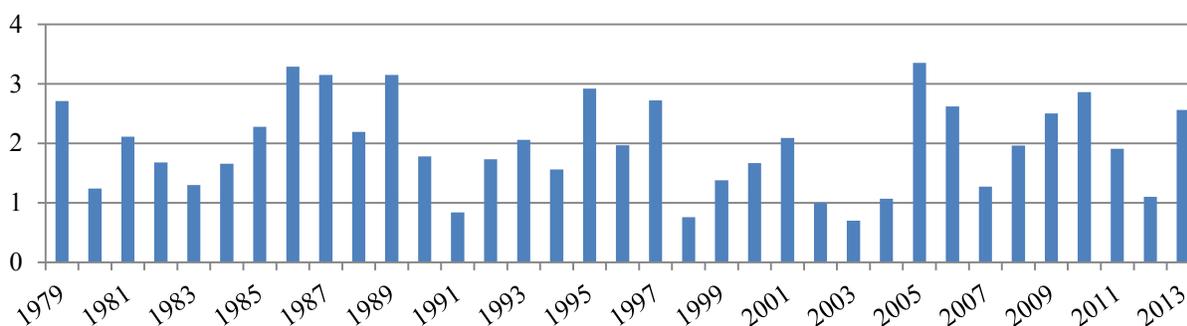
En ce qui concerne l'analyse NAO, ces données traduisent les cycles d'oscillation des grands courants atmosphériques de l'anticyclone des Açores et de la dépression islandaise (NCAR, 2015). Leurs mouvements complémentaires constituent un important élément à considérer en ce qui concerne l'étude du climat de la zone de l'Atlantique Nord. Il est important dans le cadre de la présente étude de prendre en compte cet élément puisque la péninsule gaspésienne demeure exposée à de telles influences, de par sa proximité avec l'océan Atlantique.

Les données présentées plus bas constituent uniquement les données hivernales, afin de mieux discerner les épisodes exceptionnels survenant lors de la saison froide. Tel que représenté sur la figure 4.22, cet élément semble s'opérer en fonction de cycles beaucoup plus courts que ceux d'*El Niño*, témoignant de l'instabilité atmosphérique qui subsiste dans région de l'Atlantique Nord. Dans ce cas aussi, un indice positif plus fort est associé à des températures plus douces, et inversement avec un indice négatif (NCDC, 2015).



**Figure 4.22** Évolution de l'indice hivernal NAO (données de : NCDC, 2015)

L'analyse de ce graphique permet d'établir certaines années où l'indice NAO est plus fort, soit supérieur à 2, c'est-à-dire les années 1986, 1994 et 2012. Pour les années plus froides, soit celles où l'indice est plus faible que -1, elles correspondent à 1979, 1981, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1995, 1997, 2001, 2005, 2006, 2008, 2010 et 2013. Parmi ces années, celles qui ressortent un peu plus encore sont celles de 2005 et 2010, où un indice avoisinant les -2 est enregistré. Toutefois, puisque chaque hiver peut présenter tant des valeurs faibles que des valeurs élevées, il importe d'observer l'amplitude intrasaisonnière (maximum – minimum) pour déterminer les années où les plus grandes variations ont été enregistrées. Ces informations, représentées à la figure 4.23, déterminent les années où le climat était plus instable.



**Figure 4.23** Évolution de l'amplitude de l'indice NAO hivernal (données de : NCDC, 2015)

Suivant ces données, les années ayant enregistré les plus grandes amplitudes, soit de plus de 2,5, sont celles de 1979, 1986, 1987, 1989, 1995, 1997, 2005, 2006, 2010 et 2013. Il est intéressant de noter que ces années correspondent toutes aux années où l'indice NAO le plus faible a été enregistré. Uniquement les années 1981, 1985, 1988, 2001 et 2008 ont présenté des températures globalement plus faibles et plus stables.

Couplées aux observations des cycles *El Niño*, les années où le phénomène était observé, en plus d'avoir enregistré un indice NAO plus faible et une amplitude plus forte, les années qui ressortent sont celles de

1987, 1995 et 2010. Pour ce qui est de *La Niña*, les années présentant ces mêmes caractéristiques sont celles de 1989 et de 2006. Les autres années de *La Niña* présentant des températures plus froides, mais globalement plus stables sont celles de 1985, 2001 et 2008. À la lumière de ces informations, il est intéressant de noter qu'à chacune des années où El Nino était plus fort, une plus grande amplitude de même qu'un indice NAO plus faible était enregistré.

#### 4.1.5 Validation des données avec infos Météo Chic-Chocs

Les informations qui suivent au cours de cette section cherchent à établir la relation entre les données à plus large échelle issues du modèle NARR et les données enregistrées ponctuellement par les stations météorologiques régionales. Tel que mentionné dans la section 3, les deux stations employées se retrouvent soit directement dans le parc national ou en bordure de ce dernier, à des altitudes relativement faibles. De cette manière, les données extrêmes enregistrées dans les sommets par exemple ne sont pas prises en compte.

Premièrement, les données de températures sont présentées, en fonction des minimums et des maximums enregistrés. Les graphiques des figures 4.25 et 4.26 représentent donc la relation entre les données NARR et celles des stations du Gîte et de Cap-Seize. Pour la station du Gîte, les données considérées sont celles de janvier à avril 1995, alors que celles pour la station de Cap-Seize, la période de janvier à avril 2010 est retenue. Cette année est ciblée particulièrement, car des valeurs exceptionnelles y ont été notées lors de l'analyse des données NARR. Les coefficients de détermination qui y sont associés sont, pour chacune des variables et chacune des stations, supérieurs à 0,8 et des pentes avoisinant 1 sont observées, témoignant d'une très forte relation entre les données. À ce niveau, il convient d'affirmer que les données de réanalyse du modèle NARR correspondent très bien à la réalité dans un contexte régional.

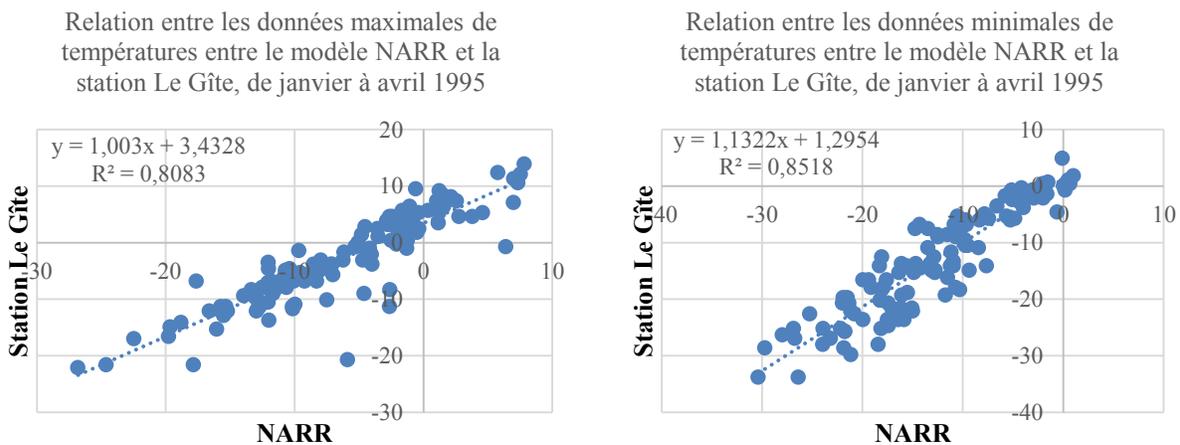
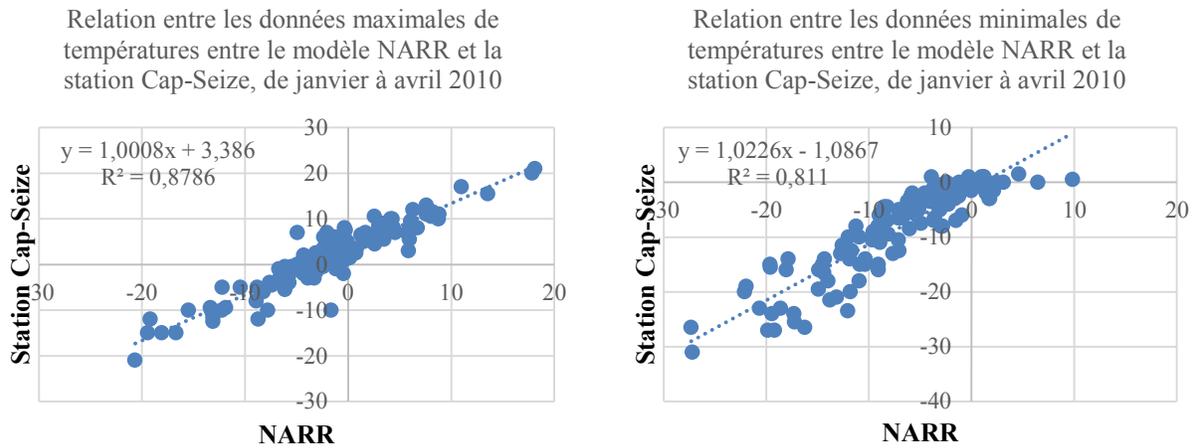
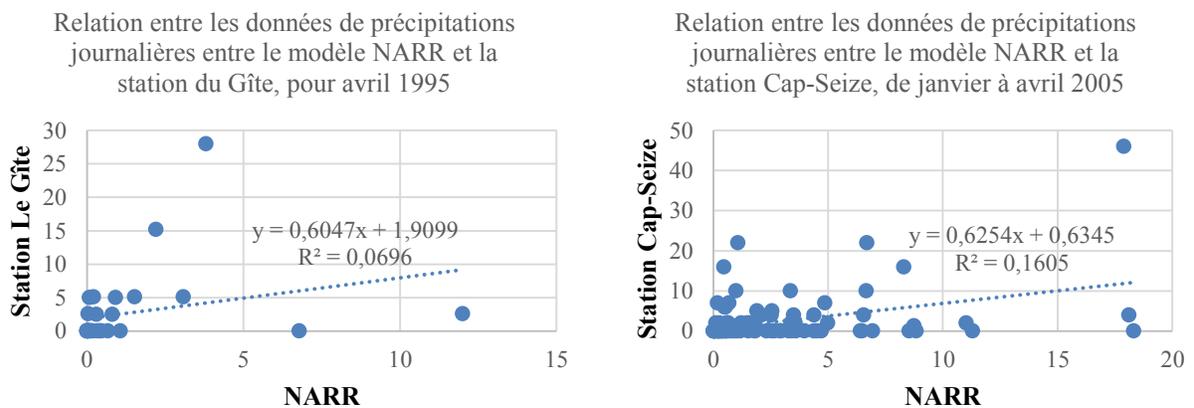


Figure 4.24 Relation entre les données minimales et maximales du modèle NARR et de la station Le Gîte



**Figure 4.25** Relation entre les données minimales et maximales du modèle NARR et de la station Cap-Seize

La figure 4.27 illustre le même type de relation, mais pour les données de précipitations. Ces dernières sont prises pour le mois d’avril 1995 à la station du Gîte, et de janvier à avril 2005 pour la station de Cap-Seize. Uniquement le mois d’avril 1995 est considéré pour la station du Gîte, puisque les données ne sont pas disponibles pour les autres mois. L’année 2005 ciblée pour la station de Cap-Seize correspond à celle avec les valeurs NARR les plus élevées, disponibles aussi dans les données locales. Les deux graphiques démontrent des  $R^2$  assez faibles, soit de 0,07 et de 0,16 pour les stations du Gîte et de Cap-Seize respectivement. Un tel résultat s’explique certainement en partie par le relief accidenté à l’étude, couvert par le modèle NARR sur les 1 024 km<sup>2</sup>. De plus, tel que stipulé ci-avant, une certaine marge d’erreur subsiste quant à l’enregistrement des données de hauteur de précipitation dans les stations, mais les résultats démontrés dans le présent document sont similaires à d’autres projets du même type de l’équipe de Sherbrooke dans l’Ouest canadien, avec un autre modèle climatique : GEM (Langlois, 2015).



**Figure 4.26** Relations entre les données de précipitations journalières du modèle NARR et des stations météo locales

## **4.2 Validation et étude des statistiques avalanches**

L'étude des statistiques avalanches permet de répondre à la question de recherche no. 2. En effet, au cours de cette section, un historique d'évènements avalancheux sera présenté, en fonction de deux sources d'informations distinctes. La première se base sur l'étude dendrochronologique de Germain et autres (2008), appliquée sur le territoire des Chic-Chocs. Cette étude constitue l'un des travaux les plus récents sur le sujet concernant le territoire à l'étude, en plus de fournir une couverture temporelle de 1979 à 1999. L'étude remonte même jusqu'en 1895, mais il est impertinent ici de remonter plus loin que 1979, à cause des données fournies par le modèle NARR. La seconde source comprend les données recensées par AQ, entre 2002 et 2013, sous forme de bulletins de neige publiés par l'organisme, disponibles sur le site Internet de l'organisme. L'emploi de ces deux sources différentes provient du fait qu'il n'existe pas de source en continu qui couvre la plage temporelle visée. De cette manière, uniquement les années 2000 et 2001 ne seront pas couvertes, ce qui permettra tout de même de dresser un portrait global sur les observations d'avalanches.

De plus, les valeurs de comparaison pour ce qui est des moyennes seront calculées de 1979 à 1996, et de 1997 à 2013. La raison en est qu'à partir de 1997, tel que spécifié à la section 4.1.3, un changement drastique en terme de quantité de précipitation est à considérer. Dans le but d'uniformiser les valeurs et les comparer avec des moyennes plus représentatives, la période temporelle à l'étude sera donc divisée en deux.

### **4.2.1 Données de 1979 à 1999**

Entre 1979 et 1999, un total de dix années présentant une activité avalancheuse accrue peuvent être identifiées. Ces dernières sont identifiées à la section 3.3.1 et sont caractérisées ci-après, en fonction des résultats obtenus par Germain et autres (2008) ainsi que les données NARR. Les données NARR préconisées pour cette partie de l'analyse seront celles de 500 et de 1 000 m d'altitudes, puisqu'il s'agit des altitudes où les départs avalancheux ont plus de chance de survenir. Toutefois, puisque les données de vent ne sont disponibles qu'au niveau de la mer à 10 m du sol, les données en altitude demeureront inconnues. Une certaine marge d'erreur est donc à considérer ici puisque les vents en altitude sont généralement plus élevés qu'à un niveau plus faible.

Un total de quatre scénarios est noté par l'article employé, soit une recrudescence d'évènements de pluie majeurs formant des croûtes à facettes, un facettement des couches profondes, des séquences de pluie qui gèle et de vents forts ainsi que des chutes totales de neige supérieures à la moyenne. L'année 1994 est aussi caractérisée par une forte activité avalancheuse, mais la cause climatique spécifique demeure

inconnue en fonction des données et méthodes employées pour l'étude de 2008. Tel que stipulé à la section 3.3.1, l'annexe I comprend un tableau synthèse des données NARR qui permettent la comparaison avec les données de Germain et autres (2008). Grâce à cela, les années particulières sont plus facilement comparables avec l'ensemble des autres années.

Ainsi, à partir de 1979, la première année à être identifiée est celle de 1981. En fonction de l'article en question, une recrudescence d'évènements de pluie majeurs formant des croûtes à facettes serait en cause pour une activité plus importante. En analysant les données NARR, pour cette année particulière, les minimums et maximums de température ne semblent pas présenter de valeurs spécialement élevées. Toutefois, en observant l'occurrence des précipitations de neige fondante probable et de pluie probable, ces valeurs semblent en effet être relativement élevées. Un total de 13 jours de pluie est noté pour l'altitude 500, versus une moyenne de 8 jours. À 1 000 m, 9 jours de pluie sont enregistrés pour une moyenne de 6 jours. Même tendance au niveau du nombre de jours où la température moyenne est supérieure à 0°C, la valeur y est la deuxième plus élevée à l'altitude 500 et demeure aussi assez élevée à l'altitude 1 000. Comparativement à la moyenne, un total de 47 jours dont la température moyenne journalière dépassait les 0°C est enregistré à 500 m, relativement à une moyenne entre 1979 et 1996 d'environ 32 jours. Pour l'altitude 1 000, ce chiffre correspond à 30 jours, en comparaison à une moyenne de 21 jours.

La seconde année identifiée est celle de 1984, où des évènements de pluie majeurs sont aussi en cause, favorisant la formation de croûtes à facettes. Là aussi, des valeurs élevées d'occurrence de jours où la moyenne de température dépasse 0°C sont notées. À 500 m, 38 jours sont notés au cours des mois d'hiver et à 1 000 m, cette valeur correspond à 36 jours. Ces valeurs sont encore une fois au-dessus des moyennes calculées entre 1979 et 1996. Par contre, au niveau des précipitations de pluie et de neige fondue, tant à 500 qu'à 1 000 m, les valeurs sont pratiquement équivalentes aux moyennes calculées, sauf pour le nombre de jours de neige fondue à 500 m, où la valeur est à deux points sous la moyenne.

L'activité avalancheuse notable de l'année 1987 serait, quant à elle, liée au facettement des couches profondes. L'analyse actuelle effectuée avec les données NARR ne permet cependant pas de mettre en relation ce scénario avalancheux. En effet, les couches profondes sont mises en place généralement en début de saison, ce qui nécessiterait une étude spécifique intrasaisonnière par année. Cette dernière ne sera pas effectuée dans le cadre du présent travail, mais un tel élément fera certainement partie des recommandations associées.

Pour ce qui est de l'année 1988, l'article de 2008 souligne des séquences de pluie qui gèle et de vents forts, qui a mené à une activité avalancheuse plus importante dans les Chic-Chocs. En observant les données NARR à l'échelle mensuelle, l'année en question comprend en effet deux pointes maximales au-

delà de 60 km/h. Au niveau des précipitations, il est difficile de confirmer la justesse des données NARR, puisqu'en fonction du tableau à l'annexe I, toutes les données de pluie et de neige fondante sont en dessous ou égales aux moyennes calculées entre 1979 et 1996. Il en va de même pour le nombre de jours où la température moyenne dépasse 0°C, à l'exception de l'altitude 500, où un dépassement de la moyenne totale par deux points est noté. Une étude à échelle plus fine, telle qu'appliquée lors du travail de Germain et autres (2008), permettrait certainement de mieux discerner les différentes séquences associées aux départs avalancheux, mais, pour l'instant, les données NARR ne permettent pas de le confirmer clairement.

En 1989, ce sont encore une fois les événements de pluie majeurs formant des croûtes à facettes qui sont en cause. Ce qui étonne en observant les données NARR, c'est que toutes les données de précipitations et de température demeurent considérablement en dessous des valeurs moyennes et ce, toutes altitudes confondues. Ici aussi, une analyse plus précise des données NARR pourrait être éventuellement réalisée afin de mieux discerner les cycles de précipitation et de température (i.e. paramétrisation de la phase de précipitation).

Pour les années de 1990 à 1992, les séquences de pluie qui gèle et de forts vents sont en cause. Ces années seront donc traitées ensemble. En observant les données de précipitation du tableau de l'annexe I, il est aussi surprenant de constater que presque toutes les valeurs sont inférieures ou égales aux moyennes totales, à l'exception du nombre de jours où la température moyenne dépassait 0°C à 500 m en 1991 et du nombre de jours de pluie en 1992. En regardant les statistiques de vent, les années 1990 et 1992 présentent en effet des pointes maximales relativement élevées, soit entre 60 et 65 km/h, mais les données moyennes ne semblent pas différer considérablement des autres années. Ainsi, il importerait d'observer les données de vent aux altitudes plus élevées afin de dresser un meilleur portrait des zones à départs avalancheux.

Tel que mentionné plus haut, les causes avalancheuses pour l'année 1994 sont inconnues selon Germain et autres (2008). Les données de précipitations sont aussi étonnantes, en ce sens où les précipitations totales semblent relativement faibles pour cette année. Même scénario au niveau des jours de pluie, de neige fondue, de neige ainsi que ceux où il faisait au-dessus de 0°C; ces valeurs demeurent relativement faibles comparées aux moyennes.

La dernière année identifiée par l'étude de Germain et autres (2008) est celle de 1995, où des chutes de neige supérieures à la moyenne ont été enregistrées. En observant les données de précipitation de NARR, les précipitations neigeuses probables demeurent assez faibles aux deux altitudes, soit à 4 et 5 jours pour 500 et 1 000 m respectivement. Toutefois, en observant le WE total tombé durant cet hiver particulier, une valeur de près de 200 mm d'eau y est attribuée, ce qui correspond à la sixième année en importance, depuis 1979. Il importe de rappeler ici que ces données semblent présenter une anomalie d'enregistrement

puisqu'à partir de 1997, le WE annuel moyen passe de 197,7 (1979 à 1996) à 445,6 mm (1997 à 2013). Il pourrait donc être intéressant de valider ces données avec d'autres modèles de réanalyses climatiques.

De plus, les données NARR ne présentent pas la hauteur de neige tombée, ce qui fait qu'il est aussi possible qu'il n'ait pas eu beaucoup d'épisodes de précipitations, mais que ces derniers aient été plus importants en termes d'épaisseur de neige. À ce sujet, il aurait été intéressant de valider le tout avec les données météorologiques locales, mais ces dernières ne sont pas disponibles en fonction des stations mentionnées à la section 4.1.6. Il pourrait donc être pertinent pour les recherches futures de pousser l'analyse des données disponibles avec un plus grand nombre de stations météorologiques de la région des Chic-Chocs.

#### 4.2.2 Données d'Avalanche Québec

La section qui suit présente les enregistrements tenus par AQ sur le territoire des Chic-Chocs. Ces enregistrements sont présentés sous forme de bulletins de neige et recensent des données sur la couverture neige, les conditions météorologiques ainsi que l'activité avalancheuse rapportée suite à des visites de terrain. Les bulletins sont disponibles sur le site Internet de AQ jusqu'en 2010 (Avalanche Québec, 2015). Les années précédentes ont été obtenues grâce à M Jean-Pierre Gagnon, prévisionniste en chef pour AQ. Ces dernières sont la plupart du temps effectuées par l'équipe en poste à AQ, mais certaines sont aussi rapportées par des touristes et/ou des pratiquants de sports d'aventure. Le fait qu'il ne s'agisse pas d'enregistrements systématiques, mais bien de résultats d'observation, parfois effectués par des individus non initiés aux avalanches, peut venir biaiser les résultats réels. De ce fait, bon nombre de bulletins d'avalanche signalent une certaine activité avalancheuse, sans toutefois rien préciser d'autre, tels que le nombre d'avalanches et leur taille. Dû à un manque d'information trop important, ces observations ne sont pas prises en comptes dans l'analyse. Ainsi, les totaux d'avalanches seront tout de même présentés, mais devront être interprétés qu'à titre indicatif.

Tel que représenté sur le graphique ci-contre, il est difficile de conclure sur l'évolution de l'occurrence vu la grande variabilité interannuelle sur un plan statistique, L'occurrence annuelle tend cependant à augmenter de manière significative depuis 2002. La pente de 0,4021 se traduit par une augmentation d'environ 4 observations d'avalanches

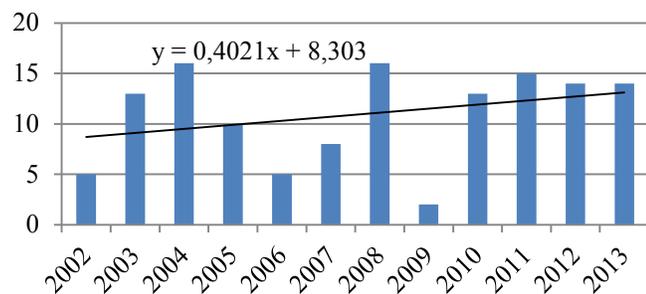


Figure 4.27 Évolution du nombre d'avalanches / an répertorié par AQ, entre 2002 et 2013

annuelles de plus en 11 ans. Même si ce chiffre ne demeure qu'objectif et variable à cause de l'incertitude

liée aux données disponibles, cette hausse de tendance peut tout de même se traduire soit par en effet un nombre plus grand d'évènements avalancheux dans les Chic-Chocs, mais aussi par une présence accrue d'AQ sur le terrain. Une telle tendance peut aussi être associée à un plus grand nombre de pratiquants de sports d'aventure étant sensibilisés et mieux informés quant aux phénomènes avalancheux.

De manière plus spécifique, le tableau 4.1 illustre les différents types d'avalanches qui ont été observés par année, en fonction des observations répertoriées. Un total de huit types d'avalanches est identifié en fonction des causes de déclenchements, en plus d'une catégorie dont les causes sont inconnues. En fonction de ces données, les années présentant un plus grand nombre d'évènements enregistrés sont couplées ci-après avec les données de réanalyse NARR. Ces années dites « exceptionnelles », où 15 évènements avalancheux ou plus sont répertoriés, sont celles de 2004, 2008 et 2011. Il est intéressant de noter ici que pour les années 2008 et 2011, des épisodes de *La Niña* étaient aussi notés. Parmi les causes connues, les avalanches de plaques à vent sont définitivement les plus récurrentes, avec une proportion de 41,2 % de tous les évènements enregistrés.

**Tableau 4.1** Types d'évènements avalancheux annuels, de 2002 à 2013

Années	Corniches	Départs ponctuels	Neige humide	Neige liquéfiée	Nouvelle neige	Plaque	Skieur	Inconnu	Total général
2002	3					2			5
2003	2		4		1	1	2	3	13
2004		3	2		1	3		7	16
2005	1				1	7	1		10
2006	1		2					2	5
2007	1				2	5			8
2008	2	1			1	7	4	1	16
2009						1		1	2
2010			2			7	1	3	13
2011			2		3	7		3	15
2012	1					7		6	14
2013	1		2	1		7		3	14
<b>Total général</b>	<b>12</b>	<b>4</b>	<b>14</b>	<b>1</b>	<b>9</b>	<b>54</b>	<b>8</b>	<b>29</b>	<b>131</b>

Pour l'année 2004, hors mis les départs inconnus, les avalanches de plaques et à départs ponctuels prédominent. En termes de précipitations, cette année particulière semble en effet présenter une quantité de précipitations de neige importante, en comparaison à la moyenne, ce qui peut en partie expliquer l'importance des avalanches à départs ponctuels. Pour ce qui est des données de vents, ces dernières ne

révèlent pas de maximums importants. Les avalanches de plaques ont donc pu être causées par des vents plus soutenus que forts.

En 2008, un total de 16 avalanches a aussi été enregistré, dont 7 évènements sont liés aux plaques à vent et 4 ont été déclenchées par des skieurs. Malgré les épisodes de neige probables élevés, soit de 33 et 35 jours pour les altitudes respectives de 500 et de 1 000 m, comparés à des moyennes de 23 et 27 jours, peu de départs ponctuels et d'avalanches liées à des accumulations de nouvelle neige ont été enregistrés. Ainsi, le vent serait encore une fois plus en cause que les précipitations. Il s'agit aussi de l'année où plus de skieurs ont été responsables de départs avalancheux. En effet, 50 % des déclenchements par des skieurs y ont eu lieu.

Concernant l'année 2011, ce sont encore une fois les avalanches de plaques qui dominent, suivies par celles causées par des accumulations de nouvelle neige. En effet, en observant les données de précipitations, ces dernières se situent au-dessus des moyennes calculées entre 1997 et 2013, soit à 27 et 30 jours pour des moyennes de 23 et 27 aux altitudes respectives de 500 et de 1 000 m. Même au niveau du WE total, l'année de 2011 arrive en 6<sup>e</sup> position en terme d'importance. En fonction des données fournies par AQ, il s'agit d'autant plus de l'année où le plus d'évènements avalancheux liés à de la nouvelle neige est enregistré.

**Tableau 4.2 Versants impliqués dans des départs avalancheux, de 2002 à 2013**

Années	E	N	NE	NO	S	SE	SO	Inconnu	Total général
2002					1	2		2	5
2003					1	5		7	13
2004		1			3	6		6	16
2005					2	4		4	10
2006						3		2	5
2007	1					4		3	8
2008	1	1					9	5	16
2009			1					1	2
2010				1		7		5	13
2011	1	1	1			4	2	6	15
2012	3	2	1		2	5		1	14
2013		4	1		1	5	2	1	14
<b>Total général</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>10</b>	<b>54</b>	<b>4</b>	<b>43</b>	<b>131</b>

Au niveau des données d'orientation de versants avalancheux, ces dernières sont présentées au tableau suivant. Tel qu'il est aisé de le constater, le versant sud-est (SE) domine largement les autres, avec une proportion de plus de 40 % du total des évènements recensés. Ces informations concordent parfaitement avec les données NARR, en ce sens où il est démontré aux figures 4.7 et 4.8 que les vents dominants

proviennent du nord-ouest. En deuxième position, le versant S demeure aussi important, avec 13,1 % du total des évènements, soit 10 avalanches entre 2002 et 2013. Toujours selon la figure 4.7, cette information concorde aussi avec la direction des vents dominants. Un élément qui permettrait toutefois d'expliquer la ressemblance des données d'avalanche du versant S comparé au versant N par exemple, où 9 évènements ont été recensés, est celui de la catégorie des versants inconnus. Tel que présenté dans le tableau 4.2, cette variable correspond en effet à près de 33 % des évènements totaux.

## 5. INTERPRÉTATION ET SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

La section suivante présente un récapitulatif des éléments climatiques obtenus par l'entremise des données NARR et de leur tendance dans le temps. Ainsi, l'analyse synthèse permet de répondre au quatrième objectif de recherche, soit celui de quantifier la tendance future de l'occurrence avalancheuse en lien avec le réchauffement sur l'horizon 2100 en extrapolant statistiquement la tendance 1979-2013 pour évaluer les conditions climatiques qui favorisent l'occurrence avalancheuse. Quatre sous-sections sont présentées, soit celle de l'évolution de la tendance des paramètres de température, l'évolution des tendances de vents, l'évolution des tendances de précipitations ainsi que les tendances sur l'horizon 2100. Les trois premières sous-sections illustrent trois éléments constituant les principaux déterminants de l'activité avalancheuse.

### 5.1 Tendances de température

Le tableau suivant illustre l'évolution des tendances des paramètres liés à la température. Le premier paramètre observé est celui de la température en continu (donné 8 fois par jour), tel que présenté au tableau 4.1. Pour chacune des altitudes et pour les deux périodes temporelles étudiées, soit de 1979 à 2013 et de 1999 à 2013, des progressions positives sont enregistrées, malgré le fait qu'elles soient toutes négligeables. En effet, ces variations qui varient entre 0,008 et 0,01°C demeurent trop faibles pour être prises en compte.

**Tableau 5.1 Évolution de tendances des paramètres de température**

	Température de l'air (°C)		Nombre de jours où la température moyenne est supérieure à de 0°C		Minimums et maximums journaliers (°C)			
	1979- 2013	1999- 2013	1979-2013	1999-2013	1979-2013		1999-2013	
					Min.	Max.	Min.	Max.
<b>0 m</b>	+ 0,01	+ 0,01	+ 2,8	+ 2,6	+ 5,35	+ 2,6	+ 3,3	+ 4,1
<b>500 m</b>	+ 0,01	+ 0,001	+ 2,1	+ 3,8	+ 6,1	+ 2,4	+ 4	+ 3,1
<b>1000 m</b>	+ 0,01	+ 0,008	+ 1,3	+ 6,4	+ 6,1	+ 1,3	+ 3,2	+ 1,8

Dans le cas du paramètre du nombre de jours où la température moyenne est supérieure à 0°C, les valeurs sont plus significatives. En 34 ans, l'évolution la plus importante est enregistrée au niveau de la mer, où une augmentation de 2,8 jours est notée. Ce qui étonne suite à la lecture de ces données est que ces tendances semblent augmenter considérablement entre 1999 et 2013. Au niveau de la mer, une légère diminution de 0,2 jour est enregistrée, alors qu'aux autres altitudes, des augmentations de 1,7 et de 5,1

jours sont notées à 500 et 1 000 m respectivement. À 1 000 m, c'est donc l'équivalent de presque une semaine qui s'est ajouté en ce qui concerne les températures qui passent au-dessus du point de congélation. Ainsi, même si la température globale n'augmente pas sensiblement, le nombre de jours où la température moyenne dépasse 0°C augmente considérablement, et ce, spécialement depuis les dernières années.

Dans le cas de l'évolution des minimums et des maximums, ces derniers sont tous en évolution positive pour les deux périodes temporelles observées et à toutes les altitudes. Suivant les tendances à long terme, soit entre 1979 et 2013, les minimums tendent à augmenter de manière plus notable que les maximums. En effet, ces augmentations correspondent à 5,35°C au niveau de la mer et à 6,1°C à 500 et 1 000 m en 34 ans. Dans le cas des maximums, sur la même échelle de temps, ces valeurs varient entre 2,6 et 1,3°C. Ces informations démontrent donc que la température intrajournalière semble se stabiliser, en ce sens où la différence de l'évolution entre le maximum et le minimum diminue.

Sur une échelle de temps récente plus courte, soit de 1999 à 2013, l'écart entre les tendances des maximums et les minimums diminue. Les maximums présentent toujours des tendances un peu plus faibles que les minimums, à l'exception du niveau de la mer, où l'évolution des maximums journaliers est plus importante de 1,2°C en comparaison avec les minimums. Toutefois, l'évolution des températures maximales est plus importante à toutes les altitudes suite à l'observation des années plus récentes. Il est donc possible d'affirmer que les maximums de températures atteints quotidiennement sont en augmentation plus rapide au cours des dernières années, et ce, malgré des évolutions de températures moyennes quasi négligeables. De plus, de manière générale, l'amplitude journalière diminue, ce qui peut influencer le comportement du manteau neigeux en ce qui concerne les événements avalancheux.

## 5.2 Tendances de vents

Tableau 5.2 Évolution des tendances de vents

Les données présentées au tableau 5.2 sont tirées des informations des figures 4.9 à 4.12. Au niveau de la vitesse des vents, des variations très faibles, voire négligeables sont enregistrées. Effectivement, des variations inférieures à 1 km/h sont notées, tant en ce qui concerne les maximums que les moyennes.

	Vitesse des vents (km/h)		Nombre d'épisodes de vents forts	
	1979-2013	1999-2013	1979-2013	1999-2013
<b>Max.</b>	- 0,7	+ 0,1	- 4,1	- 3,5
<b>Moy.</b>	- 0,24	+ 0,04		

Il en est toutefois autrement pour l'évolution du nombre d'épisodes de vents forts. Il est pertinent de rappeler ici qu'un épisode correspond à la moyenne de vitesse des vents d'une période temporelle de 3 heures. Entre 1979 et 2013, le nombre d'épisodes de vents forts a diminué de 4,1, alors qu'entre 1999 et

2013, cette valeur a diminué de 3,5. À la lumière de ces informations, il est possible d'affirmer que la vitesse moyenne des vents et des maximums enregistrés ne présente pas de signes d'évolution notables, mais que le nombre d'épisodes de vents forts tend à diminuer peu à peu. Les versants les plus à risques demeurent ceux qui sont orientés sud et sud-est, puisque ces derniers sont situés sous les vents dominants, qui ne semblent pas non plus présenter de signes d'évolution quelconques, tel que représenté sur les figures 4.7 et 4.8.

### 5.3 Tendances de précipitations

Le tableau 5.3 illustre l'évolution des précipitations dans les Chic-Chocs et sont tirées des figures 4.13 à 4.19. Tel que discuté à la section précédente, très peu de conclusions pourront être tirées de ces données, spécialement sur un horizon long terme, puisqu'elles semblent présenter d'importantes anomalies, notamment quant au WE tombé ainsi qu'au niveau du nombre de jours de précipitations de neige probable. Ainsi, l'emphase sera attribuée à l'horizon 1999-2013, puisque les données semblent y être plus constantes. Des recherches approfondies demeureront néanmoins essentielles quant aux précipitations réelles reçues sur le territoire afin de dresser des tendances plus fiables.

**Tableau 5.3 Évolution des tendances de précipitations**

	Nombre de jours de précipitations de neige probable	Nombre de jours de précipitations de pluie probable		Nombre de jours de précipitations de neige fondante probable		Équivalent en eau tombé annuellement (mm)	
	1999-2013	1979-2013	1999-2013	1979-2013	1999-2013	1979-2013	1999-2013
<b>0 m.</b>	- 7,6	- 0,8	+ 0,8	+ 0,8	- 2,5		
<b>500 m.</b>	- 4,3	+ 1,4	+ 0,3	+ 2,8	- 1,6	+ 340*	- 69
<b>1000 m.</b>	- 5,3	- 0,2	+ 0,8	+ 0,02	+ 0,3		

\* Donnée incertaine, étant donné la trop grande différence entre les années de 1979 à 1996 et de 1997 à 2013

Parmi le total des jours où des précipitations ont été notées, des tendances négatives semblent se dessiner sur l'horizon 1999 à 2013 quant aux apports neigeux. Les données illustrent des pertes variant entre 7,6 et 4,3 jours de neige par années en 14 ans en fonction des altitudes, ce qui demeure considérable. Pour ce qui

est des jours de pluie, ces derniers présentent des tendances positives très faibles sur le même horizon temporel. En effet, une journée n'est même pas gagnée en 14 ans, ce qui se traduit en une variation négligeable. Pour les jours de neige fondante, ces derniers ont aussi diminué en 14 ans aux altitudes du niveau de la mer et de 500 m de 1,6 à 2,5 jours. À 1 000 m cependant, une augmentation de 0,3 jour est notée, mais demeure ici aussi trop faible pour être prise en compte.

Puis, pour ce qui est du WE tombé annuellement, une diminution de 69 mm est notée en 14 ans. C'est donc dire que le territoire des Chic-Chocs tendrait avec les années à recevoir de moins en moins de précipitations, tous types confondus. Ces données demeureraient toutefois à confirmer avec les informations localement enregistrées. La donnée de tendance de 1979 à 2013 de +340 mm qui est fournie ici représente la marge d'erreur potentielle fournie par les données NARR.

#### 5.4 Tendances 2100

Ici-bas sont présentés les mêmes tableaux qu'aux paragraphes précédents, auxquels est appliqué le coefficient de multiplication de l'année 2100, selon les pentes préalablement calculées. Le tout est réalisé tant en fonction des pentes calculées de 1979 à 2013 qu'avec les pentes de 1999 à 2013. Deux scénarios sont ainsi ressortis. Les tendances de précipitations n'y sont toutefois pas présentées, à cause de la trop grande incertitude qu'elles comportent. Le tableau 5.4 démontre donc les valeurs ressorties en ce qui concerne les paramètres de température.

**Tableau 5.4 Projection 2100 des paramètres de température**

	Température de l'air (°C)		Nombre de jours où la température moyenne est supérieure à de 0°C		Minimums et maximums journaliers (°C)			
	1979-2100	1999-2100	1979-2100	1999-2100	1979-2100		1999-2100	
					Min.	Max.	Min.	Max.
<b>0 m</b>	+ 0,05	+ 0,10	+ 9,80	+ 19,12	+ 19,05	+ 7,78	+ 28,65	+ 29,72
<b>500 m</b>	+ 0,05	+ 0,08	+ 7,28	+ 27,06	+ 21,54	+ 7,03	+ 34,73	+ 22,44
<b>1000 m</b>	+ 0,04	+ 0,06	+ 4,65	+ 45,81	+ 21,51	+ 3,97	+ 27,21	+ 13,28

Au niveau de la température globale, en suivant les tendances de 1979 à 2013, elle prévoit augmenter de 0,05°C au niveau de la mer et 500 m alors qu'à 1 000 m, la variation serait un peu plus faible, soit à 0,04°C. Puis, pour la tendance plus récente, des augmentations de 0,1, 0,08 et de 0,06°C sont prévues pour les altitudes respectives du niveau de la mer, de 500 et de 1 000m. L'ensemble de ces variations,

présentées de manière saisonnière, demeurerait trop faible pour présenter quelconque impact sur l'occurrence avalancheuse. Il importe donc de se pencher sur des données plus précises.

Ainsi, le paramètre qui suit est celui du nombre de jours où la température moyenne est supérieure à 0°C. Suite à l'observation de ces données, il est étonnant de voir à quel point les tendances de 1999 à 2013 sont beaucoup plus marquées que celles basées sur 1979 à 2013. En effet, de 1999 à 2100, des augmentations de 19, 27 et 45 jours sont prévues pour les altitudes de 0, 500 et 1 000 m respectivement. Ainsi, aux plus hautes altitudes (500 et 1 000 m), soit où les départs avalancheux ont lieu, c'est environ l'équivalent d'un mois ou plus par hiver qui verra ses températures moyennes journalières passer au-dessus du point de congélation. Suivant ces informations, un impact sera certainement ressenti au niveau des précipitations, qui seront à tout le moins plus humides. Possiblement qu'une moins grande quantité de neige tombera aussi annuellement, au bénéfice des épisodes de pluie.

De cette manière, il se pourrait qu'ultimement, moins d'avalanches soient répertoriées sur le territoire dû à un manque de couvert neigeux. Toutefois, entre temps, il est possible que les types d'avalanches changent graduellement, vers des événements de neige humide. Ces derniers sont d'autant plus destructeurs, à cause de leur masse importante, ce qui pourrait mener à des dommages importants aux infrastructures routières notamment.

Puis, au niveau des minimums et des maximums, les tendances semblent toutes prévoir des hausses, et ce, spécialement en ce qui concerne les minimums. Effectivement, en prenant en compte les deux tendances ressorties, ces hausses se situent entre 19 et 22°C de 1979 à 2100 et entre 27 et 35°C de 1999 à 2100 selon les altitudes. Pour ce qui est des maximums, leur évolution est beaucoup plus faible suivant la tendance de 1979 à 2100 et revient assez élevée avec celle de 1999 à 2100. La tendance 1979 à 2100 révèle des températures journalières plus stables, où la différence entre le maximum et le minimum sera atténuée, ce qui pourra faciliter l'étude avalancheuse. Cependant, en observant les données de 1999 à 2100, cette différence semble augmenter considérablement, en ce sens où les minimums et les maximums progressent de manière plus semblable.

En n'observant que les droites de tendances, les valeurs ressorties demeurent peu probables, en fonction des connaissances actuelles et des données prédites par d'autres études. Par exemple, le rapport du GIEC (2013) prévoit une hausse d'environ 2 à 5°C, ce qui correspond tout de même à une hausse progressive, mais moins soudaine. Quoi qu'il en soit, il est clair que le rythme auquel s'effectue ce réchauffement demeure à déterminer, et c'est en fonction de ce dernier qu'évolueront les cycles avalancheux. Il est donc important de continuer de répertorier les événements sur place, en plus que de mettre une emphase sur les paramètres climatiques environnants.

Ensuite, au tableau 5.5 sont présentées les données de vent en fonction des mêmes tendances projetées jusqu'en 2100. Le premier paramètre observé est celui de la vitesse des vents, en fonction de la moyenne journalière et du maximum enregistré. La tendance 1979 à 2100 révèle des valeurs légèrement négatives, où les maximums journaliers diminueront d'un peu plus de 2 km/h. Pour ce qui est de la moyenne, elle semble diminuer de manière trop faible pour que les impacts soient notables au niveau des avalanches. Puis, pour la tendance 1999 à 2100, de très légères augmentations sont notées, mais puisqu'elles sont de l'ordre de moins de 1 km/h, elles demeurent elles aussi négligeables.

**Tableau 5.5 Projection 2100 des paramètres de vents**

	Vitesse des vents (km/h)		Nombre d'épisodes de vents forts	
	1979-2100	1999-2100	1979-2100	1999-2100
<b>Max.</b>	- 2,41	+ 0,85	- 14,71	- 24,89
<b>Moy.</b>	- 0,86	+ 0,29		

Enfin, pour les épisodes de vents forts, ils démontrent des signes de diminution au niveau des deux tendances ressorties. Rappelons ici qu'un épisode correspond à une période de trois heures consécutives dans une journée, où la moyenne des vents était supérieure à 62 km/h. pour la période de 1979 à 2100, une diminution de presque 15 épisodes est prévue, alors que de 1999 à 2100, la tendance s'accroît avec une baisse de pratiquement 25 par hiver. De cette manière, puisque la moyenne semble demeurer stable, mais que les maximums diminuent, il est possible d'affirmer que le chargement par le vent s'effectuera de manière plus progressive, puisque les « coups de vent » se feront plus rares.

Les plaques à vent risquent donc de demeurer un phénomène majeur lié au déclenchement avalancheux, surtout sur les versants sud et sud-est. La direction des vents ne semble en effet pas évoluer avec les années. Cependant, le tout ne sera possible que s'il tombe assez de neige annuellement et que cette dernière sera assez légère et non-cohésive pour pouvoir être transportée par le vent. Tel que vu au tableau 5.4, puisqu'en suivant les tendances de température il est fort possible que moins de neige tombe dans les Chic-Chocs. Le fait qu'il y ait moins de neige accumulée limiterait la quantité à être soufflée pour former les plaques à vent. De plus, si la neige tombée est trop humide, donc lourde, elle ne pourra pas être transportée par le vent, spécialement si les pointes maximales tendent à diminuer.

Ainsi, par rapport aux hypothèses émises à la section 2, il semble plus probable que le type d'avalanche auquel l'environnement sera confronté tendra de plus en plus vers des avalanches de neige humide plutôt

que sèche, dû aux tendances à la hausse des températures. Puis, tout dépendant de la vitesse à laquelle ce changement s'effectuera, le couvert neigeux pourra diminuer d'année en année, menant éventuellement à une baisse annuelle d'enregistrements d'avalanche. Cependant, le moment critique demeure celui où des avalanches de neige humide seront plus fréquentes, puisque ces dernières représentent un danger notable dû à leurs caractéristiques propres.

Dans une perspective de gestion intégrée des risques avalancheux, il importe donc de porter une attention particulière à ces paramètres au fil des prochaines années. Tel que démontré par les tableaux précédents, certains changements sont à prévoir au niveau de la température et des vents, venant ainsi impacter sur le comportement avalancheux de la région. En ayant une meilleure connaissance de ces changements environnementaux, il sera de ce fait plus facile de proposer des méthodes de gestion efficaces et adaptées au contexte.

### 5.5 Évènements globaux et occurrence avalancheuse

Les évènements globaux présentés à la section 4.1.4, soit ceux des cycles d'*El Niño* et NAO, sont mis en relation ici, premièrement avec les évènements majeurs recensés par Germain (2008) puis, avec les années où un nombre plus important d'évènements avalancheux ont été répertoriés par AQ. Au niveau des évènements majeurs, ces derniers ne semblent pas survenir en fonction de ces cycles globaux distincts. En effet, tel que démontré sur la figure 5.6, sur les dix années d'avalanches répertoriées, cinq d'entre elles surviennent lors d'épisodes *La Niña*, trois lors d'épisodes *El Niño* et deux lorsque l'indice *Niño* est neutre. Une légère différence de proportions permet d'identifier les années *La Niña* comme étant plus probables,

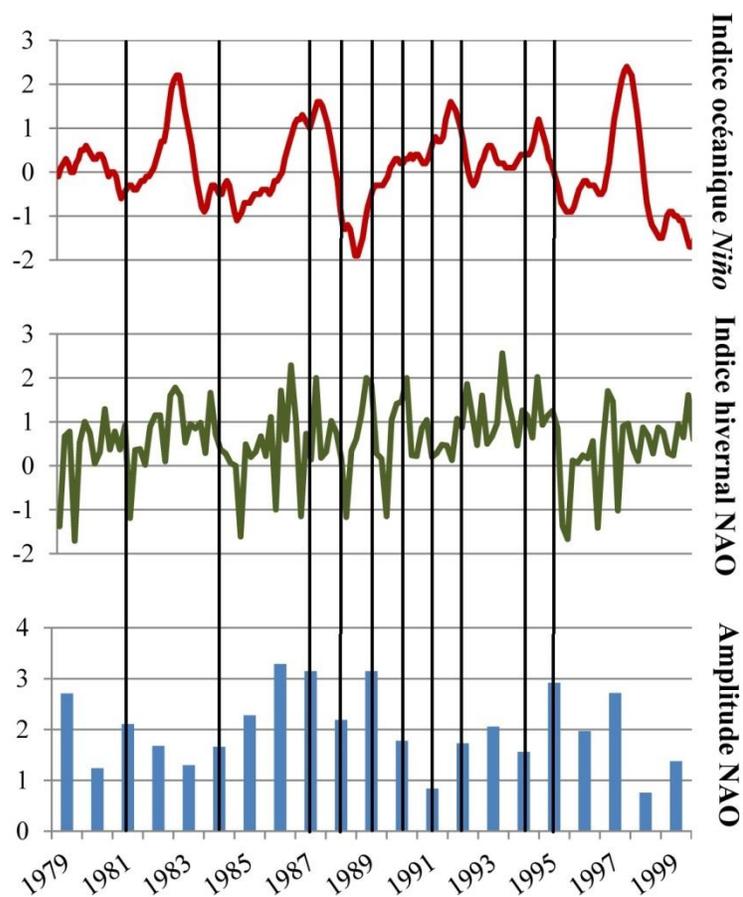


Figure 5.1 Comparaison entre les cycles *El Niño* et NAO avec les années d'occurrence ciblées par Germain et autres (2008)

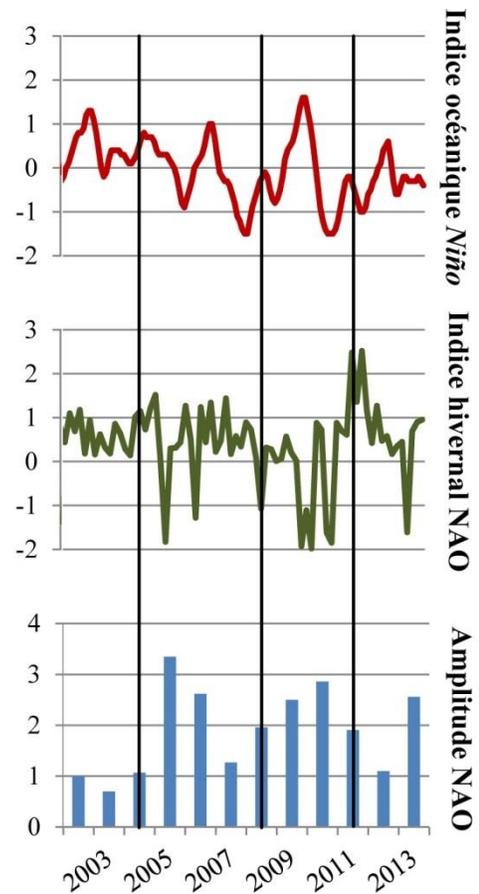
mais ces résultats ne semblent pas systématiques. Cette légère différence peut possiblement s'expliquer par le fait que les années de *La Niña* présentent des hivers plus froids dans l'hémisphère nord, favorisant ainsi les précipitations neigeuses (PMEL, 2015).

Au niveau des cycles NAO, quatre années d'avalanches sur les dix identifiées surviennent lorsque l'indice est très bas, soit de -1 et moins. Trois d'entre elles surviennent lorsque cet indice est fort, soit de 2 et trois autres lorsque l'indice est neutre. Ces différences entre les données ne permettent donc pas d'établir clairement si un indice NAO faible ou fort influe sur l'occurrence avalancheuse.

Toutefois, 5 de ces années ont présenté une amplitude NAO supérieure à 2 points. Puisque cet élément influence les températures du Nord-est américain et qu'il fluctue beaucoup plus qu'*El Niño* au cours d'un même hiver, il est pertinent d'établir que les années à plus grande amplitude ont présenté des températures saisonnières plus instables. Rappelons qu'un indice NAO fort induit des températures plus chaudes et inversement pour ce qui est d'un indice faible (NCAR, 2015). Ainsi, ces épisodes de plus chaud à plus froid ou de plus froid à plus chaud ont pu contribuer à la déstabilisation du manteau neigeux, engendrant des événements de grande envergure.

Pour ce qui est de la figure 5.7, elle cible les années de 2002 à 2013, soit celles couvertes par les données fournies par Avalanches Québec. En observant la courbe de l'indice océanique *Niño*, il est possible de déterminer que les années exceptionnelles, soit où un plus grand nombre d'avalanches a été enregistré, semblent survenir lorsque l'indice est neutre. Les cycles avalancheux semblent donc indépendants des cycles *El Niño*, si l'on ne se fie qu'à ces données.

En observant les cycles NAO, seulement l'année 2011 présente un indice élevé. Les années 2004 et 2008, quant à elles, présentent plutôt des indices neutres. En ce qui concerne les amplitudes hivernales NAO, pour les trois années ciblées par les données d'AQ, elles se situent entre 1 et 2 points, soit des valeurs moyennes à faibles. Encore ici, il demeure difficile d'établir un lien clair entre ces grands cycles atmosphériques et les conditions particulières retrouvées dans les Chic-Chocs.



**Figure 5.2** Comparaison entre les cycles *El Niño* et NAO avec les années d'occurrence ciblées par AQ

## **6. PORTÉE SCIENTIFIQUE ET RECOMMANDATIONS**

Les informations qui suivent présentent une série d'éléments à modifier et à améliorer en lien avec les travaux futurs à réaliser dans le domaine, ainsi qu'au niveau du monitoring avalancheux dans les Chic-Chocs. Ces éléments découlent donc du cadre théorique dans lequel s'est inséré ce travail et permettront éventuellement de contribuer à l'amélioration la gestion du risque avalancheux dans les Chic-Chocs.

### **6.1 Travaux futurs**

Une première recommandation à faire est celle d'effectuer les études de tendances des paramètres climatiques sur une période temporelle plus longue. Les tendances ressorties présenteront un niveau de confiance plus élevé, en plus de permettre de déceler les cycles d'occurrence, s'il y en a. Ainsi, puisque le modèle NARR ne remonte pas plus loin que 1979, il serait pertinent de continuer dans les années futures le monitoring des données qui y sont compilées.

Au niveau des données de vent qui ont été employées au cours du présent travail, il serait aussi pertinent, pour les travaux futurs, d'observer les enregistrements à toutes les altitudes, plutôt qu'uniquement au niveau de la mer +10 m. En effet, les vents en altitudes, tel que ceux retrouvés dans les sommets et les zones de départs avalancheux soufflent généralement avec une force beaucoup plus importante qu'en basse altitude. C'est pourquoi il serait intéressant d'observer leurs tendances puisqu'ils constituent un élément majeur dans le déclenchement avalancheux des Chic-Chocs, tel que représenté à la section 4.2.2.

Puis, afin de compléter les informations fournies par ce travail, la température devrait être étudiée plus en profondeur, par exemple en ajoutant les maximums atteints par jour. En effet, pour ce paramètre, le présent travail n'est basé que sur les moyennes quotidiennes, ce qui ne permet pas d'identifier de variations intrajournalières. Puisque les avalanches peuvent survenir suite à des variations climatiques soudaines, l'étude de paramètre à une échelle plus fine permettrait de mieux déceler ces conditions environnantes particulières, favorables au déclenchement avalancheux.

Pour affiner les résultats et permettre de déceler les variations journalières de manière plus précise, il serait aussi pertinent d'effectuer les études de précipitations à toutes les altitudes, avec des précipitomètres, ou encore des capteurs de visibilité qui fournissent un taux de précipitation de même que leur type. Selon Ding et autres (2014), il serait pertinent d'y intégrer le paramètre de l'humidité relative de l'air couplé avec l'altitude. Puisque toutes les précipitations ne peuvent pas être recensées partout sur le territoire dû au relief et à l'étendue du milieu, les phases (pluie, neige, neige fondue, etc.) pourraient ainsi être déterminées à plus grande échelle, et ce, sans prise de données directes sur le terrain. Les données fournies par NARR pourraient satisfaire à cet élément. Ainsi, le type de précipitations demeure un élément primaire dans l'étude d'occurrence d'avalanche dans la mesure où cette information présente un fort

potentiel d'influence sur le manteau neigeux. Si un nombre maximal d'informations sont disponibles concernant ce paramètre, plus facile sera la prédiction avalancheuse par la suite.

Au niveau du tri des données, cette étape a été réalisée en fonction des années, puis par mois pour ne conserver que les mois hivernaux par année, soit de janvier à avril et de novembre à décembre. Cependant, il aurait été judicieux de plutôt les classer par hiver, pour ainsi obtenir des périodes de temps en continu, soit de novembre à avril. Ces données auraient permis de clarifier et d'uniformiser les résultats en lien avec tant les données d'AQ qu'avec les informations recueillies dans la littérature.

## **6.2 Suivi avalancheux**

Le présent travail a employé les principales sources d'informations existantes sur les événements avalancheux dans les Chic-Chocs, soit le travail de Germain et autres (2008), couvrant les années 1979 à 1999 ainsi que les enregistrements tenus par AQ depuis 2002 jusqu'à aujourd'hui. Du fait que l'occurrence avalancheuse demeure un phénomène éminemment complexe, il est toujours difficile de retirer des tendances évidentes, spécialement en étudiant des données globales, telles que celles fournies par le modèle NARR.

De ce fait, dû à la globalité des paramètres climatiques et des enregistrements avalancheux parfois imprécis, il serait essentiel de développer un modèle de monitoring pour les Chic-Chocs. Ce modèle devra présenter des données de manière plus systématique, afin d'accroître la fiabilité des résultats. Les enregistrements seraient ainsi facilités, mais seraient aussi plus facilement traitables ensuite pour les recherches futures. Cependant, la réalité de financement et de personnel disponible limite le suivi plus soutenu.

De plus, il pourrait être pertinent de continuer le monitoring avalancheux pour ainsi tenter de ressortir des relations plus évidentes avec un nombre de données et d'années couvertes plus grand. En effet, il aurait été pertinent d'obtenir des informations sur l'année 2000, puisque tel que documenté dans l'étude de Hétu et autres (2008), il s'agit de la dernière année la plus fatale dans les Chic-Chocs, où deux individus y ont perdu la vie dans des événements distincts l'un de l'autre. Actuellement, mis à part les données météorologiques du modèle NARR et du MDDELCC, très peu d'informations subsistent quant aux conditions particulières qui étaient en place lors de cette année.

En ce sens, des travaux pourraient être réalisés en fonction des années spécifiques identifiées préalablement, soit celles où des événements majeurs ont eu lieu, ou encore celles où un nombre important d'événements a été recensé. Ces études intra-annuelles permettront une meilleure compréhension des causes de déclenchement et pourront être mises en contexte avec les données climatiques locales. De plus,

si elles sont réalisées au fur et à mesure, par exemple sous forme de bilans annuels, de l'information globale sera accessible beaucoup plus rapidement au niveau des cycles climatiques et avalancheux.

## CONCLUSION

En conclusion, cette étude a permis de reconstruire l'historique climatique grâce aux données de réanalyses climatiques NARR et l'historique avalancheux des Chic-Chocs à l'aide des données de la littérature et d'AQ. Les corrélations statistiques présentées à la section 4 ont donc permis de lier l'occurrence avalancheuse aux informations météorologiques, pour ainsi tenter de déterminer les évolutions futures des comportements avalancheux dans les Chic-Chocs. À la section 5, les tendances ressorties ont été extrapolées sur l'horizon 2100 afin de déceler des indices sur le comportement avalancheux futur sur le territoire. En outre, il n'en demeure pas moins que les avalanches constituent un phénomène éminemment complexe, qui nécessite et nécessitera un suivi sérieux, spécialement dans un contexte de changements climatiques.

Suivant les résultats obtenus pour les variables jugées comme étant les plus influentes sur le déclenchement avalancheux, il a été démontré que la température présente en effet une tendance au réchauffement de 1979 à 2013, et que cette tendance s'accroît entre 1999 et 2013. Pour le vent, ce dernier semble demeurer relativement stable au niveau de tous les horizons observés, et ce, même si les pointes maximales tendent à diminuer sensiblement, spécialement en observant la période de 1999 à 2100. En ce qui concerne les précipitations, les données en tant que telles demeurent difficiles à analyser à cause d'une anomalie apparente à partir de 1997. À ce sujet, il serait pertinent d'effectuer de plus amples recherches pour permettre d'établir clairement les tendances de précipitations, plus spécialement à savoir si le WE hivernal tend à changer avec le temps. Puisque la température semble augmenter de manière générale, il est donc logique d'établir que les épisodes de pluie hivernaux tendront à augmenter, ce qui viendra modifier considérablement les régimes avalancheux en place.

C'est donc en continuant de déployer des efforts dans le suivi avalancheux ainsi qu'en développant des modèles de réanalyses climatiques toujours plus précis que la gestion des avalanches dans les Chic-Chocs sera facilitée. De ce fait, des infrastructures et des moyens pourront être mis en place afin de protéger tant l'humain et ses activités que les écosystèmes en place. Dans un contexte de changements climatiques, il demeure primordial de saisir l'impact des évolutions des paramètres météorologiques au sein de notre environnement. C'est de cette manière que pourront être préservées l'intégrité du paysage de même que la sécurité de tous.

## RÉFÉRENCES

- Avalanche Québec (2015). Bulletins d'avalanche pour les Chic-Chocs. In Avalanche Québec. *Bulletins d'avalanche, Français, Archives*. <http://www.centreamavalanche.qc.ca/conditions/avalanche-bulletins/fr/archives> (Page consultée le 19 mai 2015).
- Barry, C. (2007). Tourisme d'aventure : De quoi parle-t-on au juste? In Réseau Veille Tourisme. *Veille, Analyste*. <http://veilletourisme.ca/2007/09/17/tourisme-d%E2%80%99aventure-de-quoi-parle-t-on-au-juste/> (Page consultée le 19 mai 2015).
- Boucher, D. (2015). Discussion à propos de statistiques affichées dans le cadre du ISSW 2014. Communication orale. *Stage de terrain dans les Chic-Chocs*, 20 janvier 2015, Vallée du Diable, Mont-Albert, Réserve faunique des Chic-Chocs, Gaspésie.
- Castebrunet, H., Eckert, N., Giraud, G., Durand, Y. et Morin, S. (2014). Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate: the French Alps over the 2020-2050 and 2070-2100 periods. *The Cryosphere Discussions*, vol. 8, p. 581-640.
- Climate Prediction Centre (CPC) (2015). Cold & Warm Episodes by Season, Changes to the Oceanic Niño Index (ONI). In NOAA. *Climate & Weather Linkage, El Niño/Southern Oscillation*. [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml) (Page consultée le 13 mars 2015).
- Côté, H. (s.d.). Que sont les réanalyses? In OURANOS. *Foire aux questions*. <http://www.ouranos.ca/fr/faq/fiche6Fr.php> (Page consultée le 4 février 2015).
- Côté, K. (2014). *Évaluation du potentiel de simulation numérique des modèles SNOWPACK et Alpine3D à partir de données météorologiques in situ et de réanalyse dans une optique de prévision du risque d'avalanche en régions montagneuses canadiennes*. Séminaire de mémoire de maîtrise en sciences, cheminement recherche en géomatique, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 34 p.
- Davis, R.E., Elder, K., Howlett, D. et Bouzaglou, E. (1999). Relating storm and weather factors to dry slab avalanche activity at Alta, Utah, and Mammoth Mountain, California, using classification and regression trees. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 30, n° 1-3, p. 79-89.
- De Koninck, R., Dorval, G., Charlier, J. et Charlier-V., D. (2006). *Le Grand Atlas du Canada et du monde*. 2<sup>e</sup> édition, Bruxelles, Belgique, ERPI De Boeck, 201 pages.
- Derksen, C. et Brown, R. (2012). Spring snow cover extent reductions in the 2008-2012 period exceeding climate model projections. *Geophysical Research Letters*, vol. 39. <http://www.see.ed.ac.uk/~shs/Climate%20change/Climate%20model%20results/2012GL053387.pdf> (Page consultée le 17 février 2015).
- Ding, B., Yang, K., Qin, J., Wang, L., Chen, Y. et He, X. (2014). The dependence of precipitation types on surface elevation and meteorological conditions and its parameterization. *Journal of Hydrology*, vol. 513, p. 154-163.
- Exner, T. et Jamieson, B. (2008). Can solar warming contribute to dry slab avalanches? *Avalanche.ca Journal*, vol. 1, p. 1-5.

- Fortin, G., Héту, B. et Germain, D. (2011). Climat hivernal et régimes avalancheux dans les corridors routiers de la Gaspésie septentrionale (Québec, Canada). *Climatologie*, vol. 8, p. 9-25.
- Gardner, A. S., Moholdt, G., Wouters, B., Wolken, G. J., Burgess, D. O., Sharp, M. J., Cogley, G., Braun, C. et Labine, C. (2011). Sharply increased mass loss from glaciers and ice caps in the Canadian Arctic Archipelago. *Nature*, vol. 473, p. 357-360.
- Germain, D. et Voiculescu, M. (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., Filion, L., Héту, B. (2008). Snow avalanche regime and climatic conditions in the Chic-Choc Range, Eastern Canada. *Climatic Change*, vol. 92, n° 1-2, p. 141-167.
- GIEC (2013). Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley]. In Cambridge University Press, *Cambridge*, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique.
- Haroun, T. (2014). Problèmes d'avalanches sur les routes. In Graffici. *Dossiers et communiqués*. <http://www.graffici.ca/nouvelles/problemes-avalanches-sur-les-routes-3150/> (Page consultée le 10 février 2015).
- Héту, 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, n° 2-3, p. 165-180.
- Jamieson, B. et Geldsetzer, T. (1996). *Avalanche Accidents in Canada, Volume 4 : 1984-1996*. 1<sup>re</sup> édition, Revelstoke, BC, Canadian Avalanche Association, 202 p. (Avalanche-Canada-Accidents).
- Jamieson, J. et Johnston, C. (1992). Snowpack characteristics associated with avalanche accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 29, n° 5, p. 862-866.
- Janssen, L. (2015). Discussion sur l'étude et le recensement avalancheux. Communication orale. *Stage de terrain dans les Chic-Chocs*, 19 janvier 2015, Centre d'avalanche de la Haute-Gaspésie (900, route du Parc), Sainte-Anne-des-Monts.
- Kaufman, D. S., Schneider, D. P., McKay, N. P., Ammann, C. M., Bradley, R. S., Briffa, K. R., Miller, G. H., Otto-Bliesner, B. L., Overpeck, J. T. et Vinther, B. M. (2009). Recent Warming Reverses Long-Term Arctic Cooling. *Science*, vol. 325, p. 1236-1239.
- Labelle, C. et Richard, P. J. H. (1984). Histoire postglaciaire de la végétation dans la région de Mont-Saint-Pierre, Gaspésie, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 38, n° 3, p. 257-274.
- Lachapelle, E. (1966). Avalanche Forecasting – A Modern Synthesis. *International symposium on scientific aspects of snow and ice*. IASH, n° 69, p. 350-356.
- Landry, B. et Mercier, M. (1992). *Notions de géologie*. 3<sup>e</sup> édition, Mont-Royal, Québec, Modulo Éditeur, 565 pages.

- Langlois, A. (2015). Improving snow stability prediction through improved microstructure simulations. In Langlois, A., *Canadian Avalanche Association Spring meetings*, Penticton, BC, 4 au 8 mai 2015. Revelstoke, BC, Canadian Avalanche Association.
- Langlois, A., Brucker, L., Kohn, J., Royer, A., Derksen, C., Cliché, P., Picard, G., Willement, J.M. et Fily, M. (2009). Simulation of snow water equivalent (SWE) using thermodynamic snow models in Québec, Canada. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 10, pages 1447 à 1463.
- Mesinger, F., DiMego, G., Kalnay, E., Mitchell, K., Shafran, P. C., Ebisuzaki, W., Jović, D., Woollen, J., Rogers, E., Berbery, E. H., Ek, M. B., Fan, Y., Grumbine, R., Higgins, W., Li, H., Lin, Y., Manikin, G., Parrish, D. et Shi, W. (2006). North American Regional Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 87, n° 3, p. 343-360.
- Mott, R., Schirmer, M., Bavay, M., Grünwald, T. et Lehning, M. (2010). Understanding snow-transport processes shaping the mountain snow-cover. *The Cryosphere*, vol. 4, n° 4, p. 545-559.
- National Center for Atmospheric Research (NCAR) (2015). Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) Index (PC-Based). In NCAR. *The Climate Data Guide*. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-pc-based> (Page consultée le 17 mars 2015).
- National Centers for Environmental Prediction North American Reanalysis (NCEP-NARR) (2015). In NOAA, *Inventory, NCEP North American Regional Reanalysis (NARR)*. <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/treanl/> (Page consultée le 23 avril 2015).
- National Climatic Data Center (NCDC) (2015). North Atlantic Oscillation (NAO). In NOAA. *Climate Monitoring, Teleconnections*. <http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/nao/> (Page consultée le 13 mars 2015).
- Pacific Marine Environmental Laboratory (PMEL) (2015). Impacts of El Niño and benefits of El Niño prediction. In NOAA. *Tropical Atmosphere Ocean project, El Niño*. <http://www.pmel.noaa.gov/tao/elnino/impacts.html> (Page consultée le 13 mars 2015).
- Payette, S. et Boudreau, F. (1984). Évolution postglaciaire des hauts sommets alpins et subalpins de la Gaspésie. *Revue canadienne des sciences et de la Terre*, vol. 21, n° 3, p. 319-335.
- Québec. Ressources naturelles Québec (RNQ) (2013). *Plan d'aménagement forestier de l'aire de fréquentation du caribou de la Gaspésie (3<sup>e</sup> édition), 2013-2018*. Québec, RNQ, 29 p.
- Québec. Société de la faune et des parcs du Québec (FAPAQ). (2004). *Plan de rétablissement du caribou de la Gaspésie (2002-2012) (Rangifer tarandus caribou)*. Québec, FAPAQ, 51 p.
- Société des établissements de plein air du Québec (Sépaq) (2015). Historique. In Sépaq. *Portrait*. <http://www.sepaq.com/rf/chc/portrait.dot> (Page consultée le 13 janvier 2015).
- Stroeve, J. C., Serreze, M. C., Holland, M. M., Kay, J. E., Malanik, J. et Barrett, A. P. (2011). The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis. *Climatic Change*, vol. 110, p. 1005-1027.
- Tremper, B. (2008). *Staying Alive in Avalanche Terrain*. 2<sup>nd</sup> edition, Seattle, WA, The Mountaineers Books, 318 pages. (How-to/Winter Backcountry)

Trenberth, K. E. (1997). The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 78, n°12, p. 2771-2777.

## BIBLIOGRAPHIE

- Bartelt, P. et Lehning, M. (2002). A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning, Part I: numerical model. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 35, n° 3, p. 123-145.
- Bellaire, S. et Jamieson, B. (2013). Forecasting the formation of critical snow layers using a coupled snow cover and weather model. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 94, p. 37-44.
- Bellaire, S. et Schweizer, J. (2011). Measuring spatial variations of weak layer and slab properties with regard to snow slope stability. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 65, n° 2, p. 234-241.
- Colbeck, S. (1982). An overview of seasonal snow metamorphism. *Reviews of Geophysics*, vol. 20, n° 1, p. 45-61.
- Colbeck, S. (1985). Temperature dependence of the equilibrium form of ice. *Journal of Crystal Growth*, vol. 72, p. 726-732.
- Cordy, P., McClung, D.M., Hawkins, C.J., Tweedy, J. et Weick, T. (2009). Computer assisted avalanche prediction using electronic weather sensor data. *Cold Region Science and Technology*, vol. 59, n° 2-3, p. 227-233.
- Douville, H., Royer, J. F. et Mahfouf, J. F. (1995). A new snow parameterization for the Meteo-France climate model. Part I: validation in stand-alone experiments. *Climate Dynamis*, vol. 12, n° 1, p. 21-35.
- Durand, Y., Giraud, G., Brun, E., Mérindol, L. et Martin, E. (1999). A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, vol. 45, n° 151, p. 469-484.
- Francis, J. A. et Hunter, E. (2006). New Insight Into the Disappearing Arctic Sea Ice. *EOS*, vol. 87, n° 46, p. 509-524.
- Gardner, A.S., Moholdt, G., Wouters, B., Wolken, G.J., Burgess, D.O., Sharp, M.J., Cogley, J.G., Braun, C. et Labine, C. (2011). Sharply increased mass loss from glaciers and ice caps in the Canadian Arctic Archipelago. *Nature*, vol. 473, p. 357-360.
- Guisan, A. et Zimmermann, N.E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological modelling*, vol. 135, n° 2-3, p. 147-186.
- Hägeli, P. et McClung, D.M. (2003). Avalanche characteristics of a transitional snow climate—Columbia Mountains, British Columbia, Canada. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 37, n° 3, p. 255-276.
- Jamieson, B. et Stethem, C. (2002). Snow avalanche hazards and management in Canada: challenges and progress. *Natural Hazards*, vol. 25, p. 35-53.
- Jamieson, J. et Johnston, C. (1992). Snowpack characteristics associated with avalanche accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 29, n° 5, p. 862-866.

- Jamieson, J. et Johnston, C. (1998). Refinements to the stability index for skier-triggered dry-slab avalanches. *Annals of Glaciology*, vol. 26, p. 296-302.
- Langlois, A., Royer, A., Montpetit, B., Picard, G., Brucker, L., Arnaud, L., Harvey-Collard, P., Fily, M. et Goïta, K. (2010). On the relationship between snow grain morphology and in-situ near infrared calibrated reflectance photographs. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 61, n° 1, p. 34-42.
- Mailhot, J., Bélair, S., Charron, M., Doyle, C., Joe, P., Abrahamowicz, M., Bernier, N. B., Denis, B., Erfani, A., Frenette, R., Giguère, A., Isaac, G. A., McLennan, N., McTaggart-Cowan, R., Milbrandt, J. et Tong, L. (2010). Environment Canada's Experimental Numerical Weather Prediction Systems for the Vancouver 2010 Winter Olympic and Paralympic Games. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 91, n° 8, p. 1073-1085.
- Schirmer, M., Lehning, M. et Schweizer, J. (2009). Statistical forecasting of regional avalanche danger using simulated snow-cover data. *Journal of Glaciology*, vol. 55, n° 193, p. 761-768.
- Schirmer, M., Schweizer, J. et Lehning, M. (2009). Statistical evaluation of local to regional snowpack stability using simulated snow-cover data. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 62, n° 2, p. 110-118.
- Schweizer, J. et Jamieson, J. (2003). Snowpack properties for snow profile analysis. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 37, n° 3, p. 233-241.
- Schweizer, J. (2014). On recent advances in applied snow and avalanche research. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 97, p. 57-59.
- Wang, L., MacKay, M. et Brown, R. (2013). Application of satellite data for evaluating the cold climate performance of the Canadian Regional Climate model over Québec, Canada. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 15, p. 614-630.

## ANNEXE - TABLEAU D'ANALYSE DES PRÉCIPITATIONS ET DE LA TEMPÉRATURE

Années	Alt. 500				Alt. 1000			
	Jours neige 0°C	Jour pluie 0°C	Jour neige fondue	Nb. Jours T moy. > 0°C	Jours neige 0°C	Jour pluie 0°C	Jour neige fondue	Nb. Jours T moy. > 0°C
1979	3	19	18	44	9	13	18	27
1980	4	9	12	28	8	5	8	16
1981	8	13	14	47	12	9	11	30
1982	3	8	7	26	3	8	7	24
1983	6	15	16	39	12	9	14	23
1984	0	8	8	38	2	6	8	36
1985	3	3	5	21	4	2	3	14
1986	3	7	9	31	3	7	8	18
1987	1	7	7	37	1	7	7	29
1988	1	8	9	34	4	5	7	18
1989	3	6	7	22	3	6	6	11
1990	3	5	5	28	5	3	5	19
1991	1	5	6	33	4	2	5	16
1992	4	8	9	25	5	7	8	18
1993	5	6	8	32	5	6	6	27
1994	1	8	8	33	3	6	7	19
1995	4	4	7	24	5	3	3	11
1996	15	13	17	34	17	11	13	22
<b>Moyennes</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>32</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>21</b>
1997	23	6	9	21	25	4	5	10
1998	25	14	16	38	31	8	11	17
1999	32	14	20	44	37	9	12	20
2000	29	11	16	40	33	7	9	31
2001	20	5	7	22	22	3	5	15
2002	18	4	5	25	20	2	3	13
2003	17	16	14	36	23	10	14	26
2004	21	10	14	24	27	4	7	10
2005	26	13	16	34	28	11	14	24
2006	17	12	11	42	22	7	9	29
2007	24	8	9	24	27	5	7	16
2008	33	8	9	39	35	6	6	27
2009	25	11	12	35	30	6	9	26
2010	12	17	19	53	19	10	13	35
2011	27	11	14	34	30	8	11	22
2012	22	7	10	35	24	5	7	25

<b>2013</b>	25	10	11	32	28	7	8	22
<b>Moyennes</b>	<b>23</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>34</b>	<b>27</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>22</b>