

Département de géomatique appliquée  
Faculté des lettres et sciences humaines  
Université de Sherbrooke

Sensibilité des simulations de neige du modèle SNOWPACK à la paramétrisation de la végétation  
dans la Réserve Faunique des Chic-Chocs

Maude Le Houillier-Viens

Essai en géomatique appliquée (GAE724) présenté pour l'obtention du grade de  
Maître ès sciences (M. Sc.), cheminement de type cours en géomatique

Mai 2016

©Maude Le Houillier-Viens

## Composition du jury

Sensibilité des simulations de neige du modèle SNOWPACK à la paramétrisation de la végétation  
dans la Réserve Faunique des Chic-Chocs  
Maude Le Houillier-Viens

Cet essai a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Alexandre Langlois, directeur de recherche  
(Département de géomatique appliquée, faculté des lettres et sciences humaines)

Alexandre Roy, autres membres du jury  
(Département de géomatique appliquée, faculté des lettres et sciences humaines)

## SOMMAIRE

Au Canada, les avalanches constituent le géorisque le plus dangereux en période hivernale. On enregistre annuellement d'importants coûts économiques et sociaux associés aux impacts de ce phénomène naturel. Par exemple, la fermeture de routes en cas de risque d'avalanche est estimée à 5 millions de dollars (Jamieson et Stethem, 2002). La prévision des avalanches est, de nos jours, la meilleure méthode afin d'éviter ces coûts. Au Canada, cela s'effectue de façon ponctuelle à l'aide de méthodes manuelles tel que le test de compression (CAA, 2014). Les modèles de simulation du couvert neigeux permettent d'étendre les prévisions à l'ensemble d'une région et ainsi, atteindre certains lieux difficilement accessibles pour l'homme. On tente actuellement d'adapter le modèle SNOWPACK aux conditions canadiennes et plusieurs études ont eu pour but d'améliorer les simulations produites par celui-ci. Cette étude vise donc également l'amélioration des simulations par l'intégration des paramètres de végétation. L'objectif de l'étude est de paramétrer, pour la première fois, le module de végétation de SNOWPACK avec les données récoltées dans la réserve faunique des Chic-Chocs. Nous pourrions ainsi évaluer l'impact de la végétation sur la modélisation du couvert nival. Nous avons donc, lors de sorties de terrain, recueillis les données de neige et de végétation au niveau de quatre sites d'étude. Nous avons par la suite réalisé les simulations avec SNOWPACK et comparer les résultats des simulations avec et sans végétation aux données de terrain. L'étude nous révèle que le modèle diminue la quantité de neige au sol ainsi que la densité du manteau neigeux en présence de végétation. De plus nous avons pu constater que l'inclusion du module de végétation permet d'obtenir des données qui se rapprochent davantage de ce qui a été observé sur le terrain.

## TABLE DES MATIERES

Sommaire .....	3
Table des figures.....	5
Table des Tableaux.....	6
1. Introduction.....	7
1.1. Mise en contexte et problématique.....	7
1.2. Objectifs et hypothèses.....	10
2. Cadre théorique .....	11
2.1. Modèle SNOWPACK .....	11
2.2. Interaction neige-végétation.....	12
2.2.1. Processus dynamiques .....	13
2.2.2. Processus thermodynamiques .....	14
2.3. Paramétrisation de la canopée dans SNOWPACK.....	16
2.4. Mécanique des avalanches dans les Chic-Chocs .....	19
3. Données et méthodes .....	21
3.1. Sites d'études .....	21
3.2. Manipulations.....	24
3.3. SNOWPACK.....	25
3.3.1. Intrants au modèle .....	25
3.3.2. Sorties du modèle.....	29
4. Résultats .....	30
4.1. Données de végétation .....	30
4.2. Simulations aux sites d'étude.....	33
4.3. Étude de sensibilité .....	40
5. Discussion et conclusion.....	45
Références.....	48

## TABLE DES FIGURES

Figure 1. Phénomène d'interception .....	13
Figure 2. Impact de la végétation sur l'albédo de la neige.....	15
Figure 3. Bilan des échanges en eau et en énergie .....	18
Figure 4 Sites d'études .....	21
Figure 5 Localisation des relevés de terrain, mont Champs-de-mars.....	22
Figure 6 Localisation des relevés de terrain, mont Hog's Back.....	23
Figure 7. Photographie hémisphérique puits de neige 1, Champs de mars - SLA.....	31
Figure 8. Photographie hémisphérique, puits de neige 2, Champs-de-mars - LA.....	31
Figure 9. Photographie hémisphérique, puits de neige 3, Hog's Back - SLA .....	32

## TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1. Ensemble des données météorologiques nécessaires à SNOWPACK et leur disponibilités aux stations météorologiques .....	26
Tableau 2. Données de végétation pour la paramétrisation du modèle SNOWPACK .....	30
Tableau 3. Données puits de neige 1, Champs-de-mars, SLA .....	34
Tableau 4. Données puits de neige 2, Champs-de-mars, LA .....	36
Tableau 5. Données puits de neige 3, Hog's Back, SLA .....	37
Tableau 6. Données puits de neige 4, Hog's Back, LA .....	38
Tableau 7. Épaisseur de neige en fonction de la densité du couvert végétal .....	40
Tableau 8. Différence entre les données d'épaisseur de neige mesurées sur le terrain et les simulations SNOWPACK en fonction de la densité du couvert végétal - (en vert, la valeur simulée la plus près des mesures) .....	41
Tableau 9. Température moyenne en fonction de la densité du couvert végétal.....	42
Tableau 10. Différence entre les données de température moyenne mesurées sur le terrain et les simulations SNOWPACK en fonction de la densité du couvert végétal - (en vert, la valeur simulée la plus près des mesures)..	42
Tableau 11. Densité moyenne en fonction de la densité du couvert végétal.....	43
Tableau 12. Différence entre les données de densité moyenne mesurées sur le terrain et les simulations SNOWPACK en fonction de la densité du couvert végétal - (en vert, la valeur simulée la plus près des mesures).	44

# 1. INTRODUCTION

## 1.1. MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

Chaque année, approximativement 1,5 million d'avalanches potentiellement dangereuses pour l'homme surviennent au Canada dont environ 5 % à des endroits accessibles par celui-ci (Stethem, 2003). Depuis les années 1990, on estime qu'en moyenne 12 personnes par année meurent des suites d'une avalanche, ce qui en fait la cause principale de décès reliée aux catastrophes naturelles hivernales au Canada (Ibid, 2003). Ce phénomène physique se définit comme une importante masse de neige en mouvement et peut être déclenché par une combinaison de plusieurs facteurs tels que les conditions météorologiques, la topographie ou encore par la pratique d'activités anthropiques (McClung et Schaerer, 1993). Au cours de l'hiver 2014-2015, le Canadian Avalanche Center a enregistré huit décès causés par les avalanches (CAC, 2015) et de ce nombre, sept sont associés à la pratique d'activités récréatives. Localement au Québec, 3 personnes sont décédées des suites d'une avalanche au Québec au cours des 10 dernières années (Ibid., 2015). Il s'agit donc du géorisque le plus dangereux en période hivernale en plus d'engendrer d'importants impacts économiques. Concrètement, les infrastructures endommagées ainsi que la fermeture de routes et de chemins de fer parfois inévitables peuvent ralentir les activités économiques. Au Canada, on estime à 5 millions de dollars le coût direct associé à la fermeture d'une route en cas de risque d'avalanche élevé (Jamieson et Stethem, 2002).

De nombreuses études ont été réalisées afin d'améliorer la compréhension et faciliter la gestion de ce phénomène. La prévision des avalanches est l'étape la plus importante pour tenter d'éviter ces importants coûts sociaux et économiques. Actuellement, les prévisions s'effectuent de façon ponctuelle lors de sorties de terrains. Les professionnels et prévisionnistes des parcs nationaux s'exposent au risque pour effectuer les relevés nécessaires à la caractérisation des couches de neige problématiques et à l'identification des zones à risques d'avalanche. La réalisation de tests de compression et l'analyse de la stratigraphie des couches de neige sont des méthodes éprouvées et fiables pour le calcul de l'indice de stabilité (CAA,

2014). Ces informations sont ensuite compilées et présentées dans un bulletin d'avalanche sur lequel les sportifs et professionnels se basent pour planifier leurs sorties. Toutefois, ces méthodes, en plus de représenter un danger, ne fournissent pas de résultats nécessairement représentatifs à l'échelle d'une région.

Les modèles de simulation du couvert neigeux représentent donc une alternative intéressante pour pallier à cette problématique. En effet, ces modèles permettent d'étendre les prévisions à l'ensemble d'une région et de simuler les processus hydrologiques et thermodynamiques qui s'y produisent (Lenning et al., 2002). Le modèle SNOWPACK, développé par l'Institut pour l'étude de la neige et des avalanches en Suisse - SLF, permet de simuler les propriétés géophysiques du couvert de neige pour ainsi calculer l'indice de stabilité. Cet indice, basé sur l'analyse de l'ensemble des caractéristiques du manteau neigeux a pour but d'établir la probabilité de déclenchement d'une avalanche. Le modèle est actuellement utilisé de façon opérationnelle en Suisse pour la prévision des avalanches puisqu'il existe un important réseau de stations météorologiques fournissant les données nécessaires à son fonctionnement. SNOWPACK a été adapté aux conditions canadiennes (Côté et al., 2016), mais ne peut être utilisé de façon opérationnelle en raison de la dispersion des stations météorologiques et du manque de données concernant les propriétés nivales et géophysiques (Bellaire et al., 2011; Smith et al., 2008).

Des études ont été réalisées afin de contribuer à l'amélioration des simulations du couvert neigeux pour l'implantation du modèle au Canada. Pour le calcul de l'indice de stabilité du couvert neigeux, le modèle SNOWPACK se base sur la microstructure de la neige. Schweizer et al., (2006) ont constaté qu'il était nécessaire de corriger la modélisation de la microstructure de la neige, notamment, la mesure de la taille des grains. En effet, des travaux précédents ont permis d'améliorer le calcul de l'indice de stabilité en ajoutant la taille de grain comme variable (Schirmer et al, 2010). L'Université de Sherbrooke a donc développé un outil qui permet de mesurer l'albédo de la neige qui est associé à la taille des grains et à leur forme, le InfraRed Integrating Sphere – IRIS (Montpetit et al., 2012). Avec les données IRIS, il devient ensuite

possible de calculer la surface spécifique des grains de neige et d'intégrer cette mesure dans SNOWPACK pour obtenir l'indice de stabilité (Madore et al., 2016). Ce travail a donc permis de consolider la modélisation de la microstructure et ainsi, d'améliorer la précision des simulations du manteau neigeux.

Afin de résoudre cette problématique de manque de données météorologiques, des modèles de prévision numérique peuvent être utilisés. Ces modèles permettent d'obtenir une meilleure spatialisation des conditions météorologiques. Une étude a donc été réalisée afin d'évaluer la précision des simulations du couvert neigeux par SNOWPACK lors de l'utilisation de données de réanalyses météorologiques. Les simulations réalisées ont été comparées avec les données recueillies sur le terrain (Côté, 2016). Cette étude a permis de conclure que les données du modèle numérique GEM-LAM offrent une précision suffisante pour combler le manque au niveau des données météorologiques.

La présente étude s'intègre donc dans cette même optique d'amélioration des simulations du manteau neigeux par le modèle SNOWPACK. Actuellement, les bulletins de prévision des avalanches sont émis pour trois milieux distincts en fonction de l'altitude, soit le milieu alpin, la ligne des arbres ainsi que sous la ligne des arbres. L'effet de la végétation reste encore mal compris et les professionnels des parcs nationaux doivent alors effectuer une caractérisation des couches de neige pour chacun de ces milieux. Par conséquent, la paramétrisation de la végétation par SNOWPACK sera évaluée dans la Réserve Faunique des Chic-Chocs, puisque la végétation n'a pas encore été prise en compte dans le programme d'avalanche du Groupe de recherche interdisciplinaire sur les milieux polaires (GRIMP). Cette évaluation permettra de mieux comprendre et valider l'impact de la végétation sur les propriétés de la neige en milieu montagneux et par conséquent, sa stabilité.

## 1.2. OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

L'objectif principal de cette étude est d'utiliser pour la première fois le module de végétation de SNOWPACK dans la réserve faunique des Chic-Chocs. Nous voulons évaluer l'effet de différentes conditions de canopée sur les propriétés géophysiques du manteau neigeux. Les objectifs secondaires suivants ont été définis afin d'atteindre l'objectif principal.

- Évaluer l'impact de la végétation sur l'épaisseur, la densité et la température du couvert nival;
- Comparer les simulations dans différentes conditions de canopées par rapport à une simulation sans le module de végétation;

En réponse aux objectifs définis, les hypothèses suivantes sont posées :

- L'inclusion du paramètre de végétation dans SNOWPACK diminuera l'épaisseur de neige par interception, tout en diminuant sa densité;
- L'inclusion du module végétation améliorera les simulations du couvert nival qui seront validées à partir des données terrain.

## 2. CADRE THÉORIQUE

Cette partie du document est une présentation générale des concepts sur lesquels portera l'étude. Tout d'abord, le fonctionnement général du modèle SNOWPACK sera présenté, puis les différents processus physiques qui se produisent entre la neige et la végétation seront expliqués. On observe des processus dynamiques qui concernent principalement les différentes forces et le mouvement de la neige ainsi que des processus thermodynamiques qui font référence aux échanges d'énergie. Ensuite, une section abordera la paramétrisation de ces processus dans le modèle SNOWPACK. Finalement, la dernière section portera sur le type de climat et son effet sur la mécanique des avalanches dans les Chic-Chocs.

### 2.1. MODÈLE SNOWPACK

Il est possible de définir 3 types de modèle de neige. Le premier type concerne les modèles simulant une seule couche de neige et le second type permet une simulation d'une complexité intermédiaire. Le troisième type de modèle permet de simuler l'ensemble des propriétés du couvert nival et est appelé modèle détaillé (Armstrong et Brun, 2008). L'augmentation de la complexité des modèles permet d'obtenir un profil vertical réparti sur plusieurs couches en fonction des propriétés géophysiques de la neige. Afin d'évaluer précisément les risques d'avalanche, il a été démontré qu'il est essentiel de modéliser l'ensemble des couches du manteau neigeux (Bartlett et Lehning, 2002). Deux modèles sont couramment utilisés pour la modélisation multicouche de l'évolution du couvert nival en milieu montagneux, CROCUS (Brun et al., 1992) et SNOWPACK (Bartlett et Lehning, 2002; Lehning, et al, 1998; Lehning et al., 2002). Ces deux modèles fonctionnent sensiblement de la même façon, ils permettent de simuler l'évolution du couvert neigeux et ses propriétés à travers le temps à l'aide des données météorologiques. Ils permettent donc d'intégrer l'impact de la morphologie des grains de neige sur les processus physiques qui régissent le couvert neigeux. De cette façon, il est possible de

reproduire de façon précise l'évolution du couvert nival tout au long de la saison (Vionnet *et al.*, 2012).

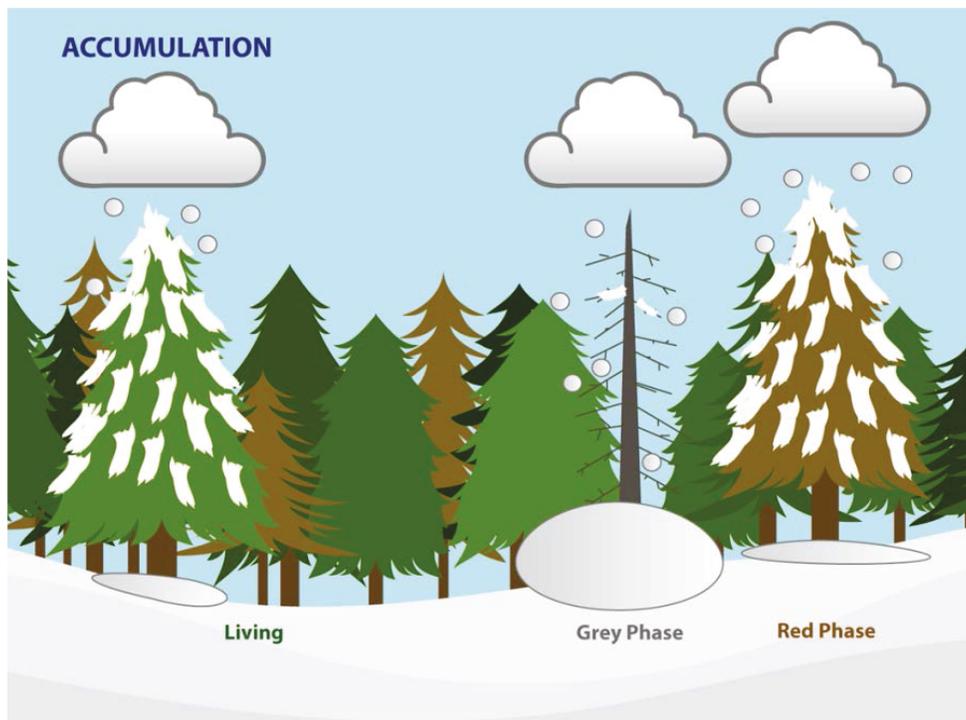
L'avantage du modèle SNOWPACK par rapport aux autres modèles multicouches est qu'il permet de simuler un nombre infini de couches. Il s'agit d'un modèle d'une grande complexité et est régi par plusieurs modules qui peuvent être adaptés à la région où les simulations sont effectuées. Il a été spécifiquement conçu pour aider à la prise de décision dans les régions présentant une problématique d'avalanche en Suisse. Les précipitations sont cumulées pour former les couches du manteau neigeux. Puis, des modules peuvent être ajoutés pour paramétrer les différents phénomènes dynamiques et thermodynamiques tels que l'apport ou le retrait de neige par le vent, le métamorphisme des grains de neige et dans le cas qui nous concerne, les effets de la végétation. Chacune des couches est définie en fonction de la proportion de glace, d'eau et d'air qu'elles contiennent. Ces informations servent à la modélisation de la structure verticale de la microstructure, ce qui permet ensuite de calculer l'indice de stabilité (Madore *et al.*, 2016). En somme, ce modèle permet de simuler et d'évaluer les processus complexes entrant dans la formation des avalanches avec beaucoup plus de précision que lorsque les tests sont effectués de façon ponctuelle (Côté, 2014).

## 2.2. INTERACTION NEIGE-VÉGÉTATION

Différentes études ont démontré que la végétation joue un rôle important au niveau des échanges d'énergie et de la quantité de précipitation qui touche le sol (Otterman *et al.*, 1988). De nombreux processus physiques affectent donc la constitution du manteau neigeux dans les zones forestières comparativement aux zones ouvertes (Gouttevin, 2015). On peut classer ces processus principalement dans deux catégories qui peuvent influencer la constitution du manteau neigeux soit 1) les processus dynamiques et 2) les processus thermodynamiques.

### 2.2.1. PROCESSUS DYNAMIQUES

Dans la catégorie des processus dynamiques, on retrouve tout ce qui concerne les mouvements de neige. Plus précisément, on parle de l'interception de la neige par la canopée. En effet, la neige interceptée peut ensuite fondre ou sublimer pouvant réduire l'accumulation de neige sous la végétation jusqu'à 60 % (Hardy et al., 1997; Hedstrom et Pomeroy, 1998). La figure ci-dessous, réalisée par le groupe de recherche en hydrologie terrestre de l'Université du Colorado présente ce phénomène d'interception par les arbres. L'accumulation de la neige au sol variera dépendamment de l'état de la végétation. Comme il est possible de remarquer sur l'image, lorsque l'arbre est mort (grey phase) il n'y aura pratiquement plus d'interception de la neige.



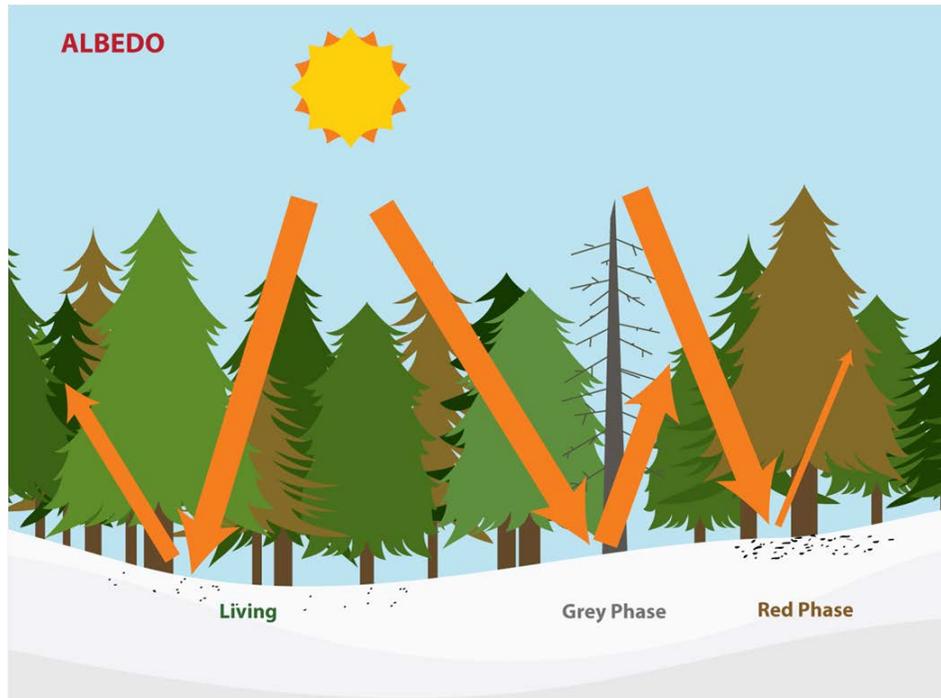
**FIGURE 1. PHÉNOMÈNE D'INTERCEPTION**

Source: Terrestrial hydrology research group, University of Colorado Boulder

Un autre phénomène appelé le déchargement affecte la quantité de neige que l'on retrouve au sol. Les arbres ont une capacité limitée à retenir la neige sur les branches et lorsque cette limite est atteinte la neige tombe au sol (Strasser et al., 2011). Cette capacité d'interception est proportionnelle à la densité d'arbres et à l'indice de surface foliaire. Les arbres font également office de protection en réduisant l'érosion par le vent (ablation de la neige). De plus, le type d'arbre ainsi que la position des branches peuvent également affecter la quantité de neige interceptée (Ibid, 2011). La végétation va donc influencer la météo en générale (température, albédo, etc..) ainsi que la distribution des précipitations.

### 2.2.2. PROCESSUS THERMODYNAMIQUES

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la végétation a un rôle important au niveau des échanges d'énergie. On remarque effectivement que l'ombrage créé par la canopée réduit la quantité d'énergie solaire atteignant le sol ce qui a pour effet de ralentir la fonte de la neige (rétroaction négative). La neige peut donc persister plus longtemps en milieu boisé qu'en milieu alpin. Inversement, le rayonnement émit par la végétation et absorbé par la neige augmente la fonte de la neige en ayant l'effet inverse (rétroaction positive), soit d'accélérer le processus de fonte (Strasser et al., 2011). Finalement, la chute de débris provenant des arbres modifie les propriétés optiques de la neige tout au long de la saison (albédo); la figure ci-dessous illustre clairement ce phénomène dont l'effet varie en fonction de l'état de la canopée. Cela a pour effet de modifier la signature spectrale de la neige et de modifier la quantité de rayonnement qui sera réfléchi, absorbé et transmis (Gouttevin, 2015). L'accumulation de matière végétale au sol augmente la quantité de rayonnement infrarouge qui sera absorbé par la neige et diminue l'albédo. Cela aura pour effet d'accélérer la fonte de la neige sous la végétation (ESA, 2016).



**FIGURE 2. IMPACT DE LA VÉGÉTATION SUR L'ALBÉDO DE LA NEIGE**

Source Terrestrial hydrology research group, University of Colorado Boulder

Dépendamment de la quantité de neige que l'on retrouve au sol, les processus physiques dominants ne seront pas les mêmes. En effet, plus il y aura de neige au sol, plus cette dernière prendra du temps avant de fondre en raison de l'effet d'ombrage abordé ci-haut. Selon Strasser et al. (2011), la présence d'une importante quantité de neige au sol diminue l'effet du rayonnement émis par la végétation. Contrairement, s'il y a peu de précipitation au cours de la saison et que l'on retrouve de faibles quantités de neige au sol, c'est le processus de sublimation qui prend le dessus. La sublimation se produit lorsque la quantité de rayonnement absorbé est plus élevée que la quantité de rayonnement émis. Cela permet de produire l'énergie nécessaire pour faire passer la neige de l'état solide directement à l'état gazeux. En effet, toujours selon Strasser et al. (2011), lorsqu'il y a peu de neige au sol, les rayonnements émis par la canopée affecteront plus intensément le manteau neigeux, provoquant ainsi sa fonte. C'est donc l'ensemble de ces processus que SNOWPACK modélise pour en appliquer les impacts sur la simulation du couvert neigeux.

### 2.3. PARAMÉTRISATION DE LA CANOPÉE DANS SNOWPACK

Rutter et al. (2009) ont établi que dans l'hémisphère nord, environ 19 % des zones couvertes de neige durant toute l'année sont des zones forestières. Avec le réchauffement climatique auquel nous faisons face actuellement, on remarque une augmentation d'arbres et d'arbustes à des altitudes plus élevées que ce qui était observé il y a quelques années (GIEC, 2013). Le paramètre de végétation constitue donc un élément clé dans cette adaptation du modèle aux conditions canadiennes.

Le module qui permet d'intégrer la végétation dans le modèle SNOWPACK est conçu pour être utilisé avec les forêts de conifères. Il a récemment été amélioré afin de permettre d'intégrer séparément les différents constituants de l'arbre soit : la canopée et le bois (constitué du tronc et des branches). Les recherches effectuées démontrent que les simulations sont plus précises avec ce module de végétation à deux couches (Gouttevin, 2015). Cela a comme principal effet d'atténuer l'impact de la diminution de la température de la végétation à la tombée de la nuit dans les simulations du couvert neigeux. Le module a pour objectif de calculer les différences de réponse thermique qui existent entre la canopée (feuillage ou épine) et la couche de bois (tronc et des branches). En effet, la couche de canopée est plus exposée à l'atmosphère et altère l'énergie qui la pénètre pour atteindre la couche de bois (Ibid, 2015)

Pour paramétrer la végétation dans SNOWPACK, il faut tout d'abord intégrer les paramètres d'interception appelés bilan de masse de la végétation. Ces paramètres d'interception sont les suivants: précipitations interceptées, quantité de précipitation interceptée qui sublime et quantité de neige qui fond et tombe sous forme d'eau sur le couvert nival (Gouttevin, 2015). Ensuite, le phénomène de déchargement de la neige est calculé et ajouté à la simulation lorsque la quantité interceptée excède la capacité d'interception réelle. Cela se produit lorsque la capacité d'interception est réduite en raison par exemple de précipitations de neige mouillée ou en raison d'une augmentation de la température de l'air. La neige devient ainsi plus lourde et la canopée n'est plus en mesure de la soutenir (Ibid, 2015).

Ensuite, il est nécessaire de paramétrer les éléments permettant de calculer le bilan énergétique de la végétation, c'est-à-dire, tout ce qui concerne les échanges d'énergie. Le module de végétation à deux couches permet ainsi d'intégrer l'inertie thermique par le calcul du flux de stockage de la biomasse ce qui rend plus précis le bilan énergétique simulé par SNOWPACK (Gouttevin, 2015). Les différents transferts au niveau du rayonnement sont également intégrés dans le modèle. Lors des simulations, SNOWPACK calculera la quantité d'ondes courtes et d'ondes longues qui sera réfléchi, transmise et émise entre les deux couches de la végétation et avec le couvert neigeux. Le rayonnement des ondes courtes nettes absorbées par la végétation est obtenu par la différence entre les rayonnements incidents, réfléchis et transmis vers le bas et la somme des rayonnements incidents, réfléchis et transmis vers le haut. La même procédure est appliquée pour le calcul du rayonnement d'ondes courtes nettes absorbé par le sol. On obtient le rayonnement des longues ondes absorbé par le sol et la végétation à l'aide de la température du sol, de la température de la végétation et du rayonnement thermique provenant du ciel. Le bilan énergétique de la végétation se traduit donc par la somme du rayonnement des ondes courtes et du rayonnement des ondes longues (Ibid, 2015).

La figure 3 représente clairement les processus dynamiques et thermodynamiques agissant entre la canopée et le manteau neigeux. Dans la partie de gauche, on remarque le phénomène d'interception de la neige par la canopée et la protection qu'offrent les arbres en réduisant la force des vents et donc le transport de la neige. Il est également possible de voir l'impact de la végétation sur l'équivalent en eau dans le couvert nival. À droite, l'interception des radiations solaires par la végétation est illustrée, de même que les ondes longues émises et transmises par le sol et la végétation.

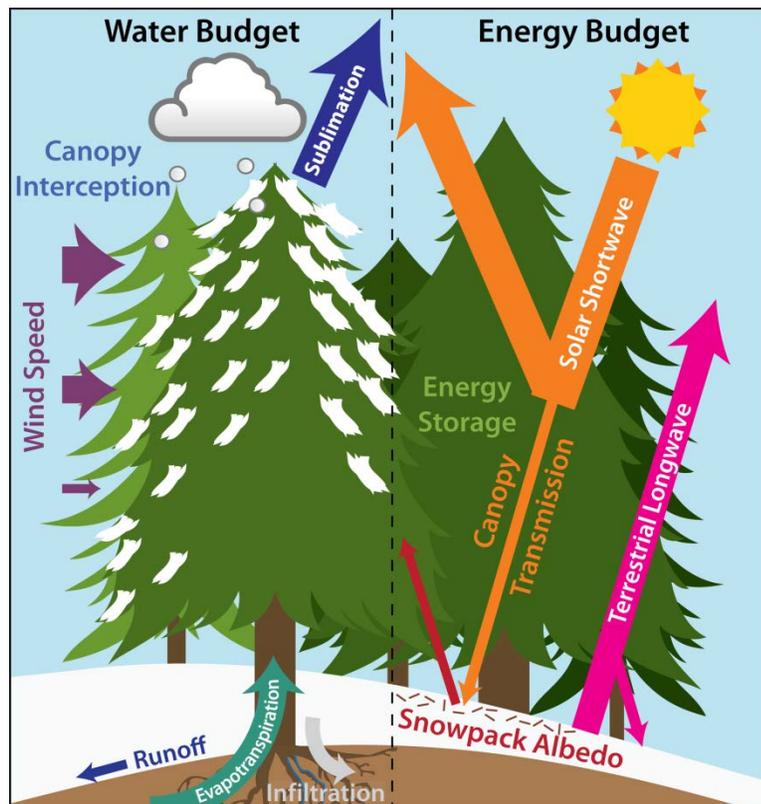


FIGURE 3. BILAN DES ÉCHANGES EN EAU ET EN ÉNERGIE

Source: Terrestrial hydrology research group, University of Colorado Boulder

Finalement, les paramètres de flux turbulents et de résistance aérodynamique sont calculés par SNOWPACK. Ces paramètres reposent sur les données météorologiques telles que la vitesse du vent, la température de l'air ainsi que sur la hauteur de la canopée (Gouttevin, 2015). L'ensemble de ces paramètres permet donc d'illustrer les différences au niveau des échanges d'énergie pour la couche de la canopée et la couche de tronc. Ces échanges d'énergie ont inévitablement un impact sur l'évolution du couvert nival et la formation d'avalanches. Concrètement, cela peut se traduire par une chute de neige spontanée par le déchargement des arbres, ce qui peut engendrer une surcharge et causer le déclenchement d'une avalanche. De plus, des variations dans la quantité d'eau dans le manteau neigeux en raison des radiations émises par la canopée peuvent également altérer la cohésion des différentes couches ayant par le fait même un impact sur la stabilité.

#### 2.4. MÉCANIQUE DES AVALANCHES DANS LES CHIC-CHOCS

Plusieurs études tendent à caractériser les différents types de climat dans les régions montagneuses et à définir le type de couvert neigeux que l'on y retrouve (Roch, 1949). C'est de cette façon que trois types de climat ont été identifiés : le climat côtier, le climat transitionnel et le climat continental. La réserve faunique des Chic-Chocs est caractérisée par un climat de type côtier, on y observe donc de fortes précipitations de neige et des températures généralement douces. Le climat côtier est également propice à des épisodes de pluies sur neige fréquents ce qui peut engendrer le déclenchement d'avalanche de neige mouillée et la formation de croûtes de glace (Lachapelle, 1966).

Le type de climat a un impact considérable sur la mécanique des avalanches dans une région donnée. En effet, le type et le déclenchement d'une avalanche dépendent de la cohésion dans le couvert nival. Ce dernier est composé de plusieurs couches de neige formées en fonction de des variations de température, les épisodes de précipitations (solide ou liquide) et les changements de pression et d'humidité (CAA, s.d.). Chaque épisode de précipitation apporte une couche de neige ayant des propriétés différentes ce qui implique également un niveau de cohésion différent. Le couvert nival est maintenu en place lorsqu'il existe un équilibre entre les forces de résistance et de traction. La surcharge du manteau neigeux ou une variation dans les conditions météorologiques peut nuire à cet équilibre et causer le déclenchement d'une avalanche (Lachapelle, 1966).

Le degré d'inclinaison de la pente affecte également le risque de déclenchement des avalanches. Il a été démontré que les avalanches se produisent généralement sur des pentes ayant une inclinaison variant entre 35° et 45° (Tremper, 2008). La réserve faunique des Chic-Chocs est caractérisée par un relief accidenté qui affecte la stabilité du couvert neigeux et engendre la formation d'avalanches. De plus, les fréquentes inversions thermiques et les masses d'air provenant des océans affectent également la stabilité du manteau neigeux (Germain, 2007). Les conditions climatiques et géomorphologiques que l'on retrouve dans cette

région montagneuse sont donc propices à la formation d'un manteau neigeux instable et favorisent le déclenchement d'avalanches.

Une récente étude concernant les régimes avalancheux dans la réserve faunique des Chic-Chocs démontre la présence, au fil des ans, de nombreux évènements de pluie sur neige. Ces pluies engendrent un métamorphisme de neige mouillée diminuant la cohésion entre les grains et favorisant la formation d'avalanches de neige humide, ce type d'avalanche étant le plus destructeur. On remarque également que de nombreuses avalanches sont déclenchées par l'accumulation de neige par le vent, spécialement sur les versants sud et sud-est (Desaulniers, 2015). Ce type d'avalanche se produit lorsqu'une quantité importante de neige est transportée par le vent et déposée sur une couche de neige fragile créant ainsi une surcharge (CAA, 2014). Il semblerait, selon les données d'Avalanche Québec, que depuis 2002, l'occurrence des avalanches de plaques à vent soit de plus en plus fréquente. En seconde position, on retrouve les avalanches de neige humide (Avalanche Québec, 2015)

### 3. DONNÉES ET MÉTHODES

#### 3.1. SITES D'ÉTUDES

Les données nécessaires à la validation des hypothèses ont été recueillies dans la réserve faunique des Chic-Chocs entre le 17 et le 22 janvier 2016. Il s'agit d'une zone protégée adjacente au parc National de la Gaspésie. Les monts Chic-Chocs sont situés à environ 30 km des côtes du St-Laurent et s'étendent sur une distance de près de 100 km (Commission de toponymie du Québec, 2012). Tel que mentionné précédemment, ces montagnes sont soumises à un climat de type côtier et reçoivent donc d'importante quantité de précipitations chaque année. Il s'agit d'un des seuls endroits où les avalanches présentent une problématique récurrente et doivent être surveillées, c'est pour cette raison que l'on y retrouve le seul centre d'avalanche de l'est Canada, le centre Avalanche Québec.

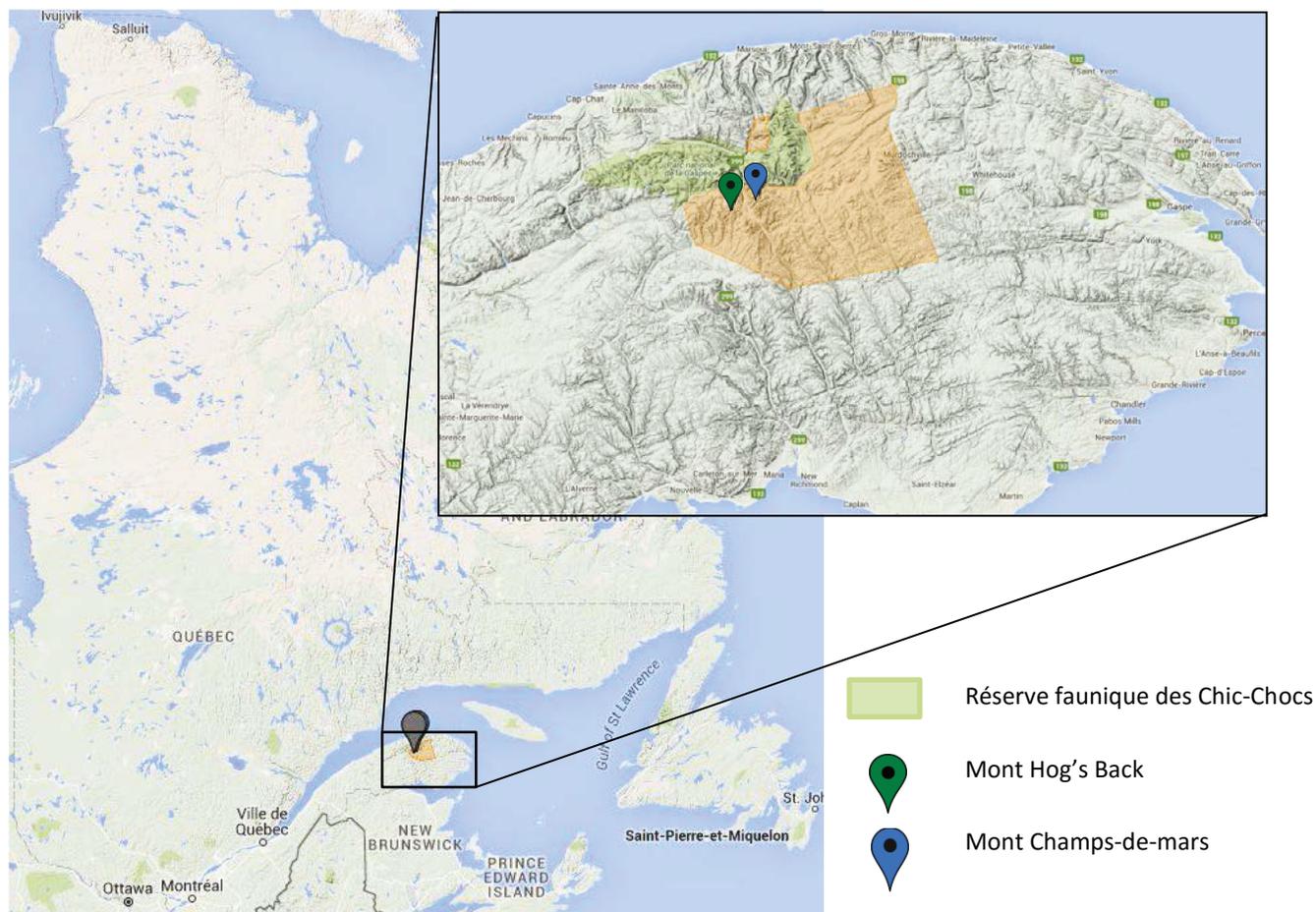


FIGURE 4. SITES D'ÉTUDES, GOOGLE MAP

Pour la présente étude, quatre sites ont été visités lors de sorties de terrain. En premier lieu, deux puits de neige ont été effectués sur le mont Champs-de-mars où nous avons ciblé des sites ayant des densités de végétation différentes. La couverture végétale était majoritairement composée de sapin baumier (Guitard et Fleury, 2004). Lors de cette sortie de terrain, nous avons un ciel couvert, de très faibles précipitations et très peu de vent. Le premier site, situé sous la ligne des arbres est localisé sur l'aspect sud à une altitude de 557 mètres. La pente est caractérisée par une inclinaison de 23 degrés et était recouverte de 70 cm de neige. Pour ce qui est du second site, situé sur le même aspect, il est à une altitude de 619 mètres où l'inclinaison est de 28 degrés. Pour ce site, la profondeur de la neige atteignait 40 cm.

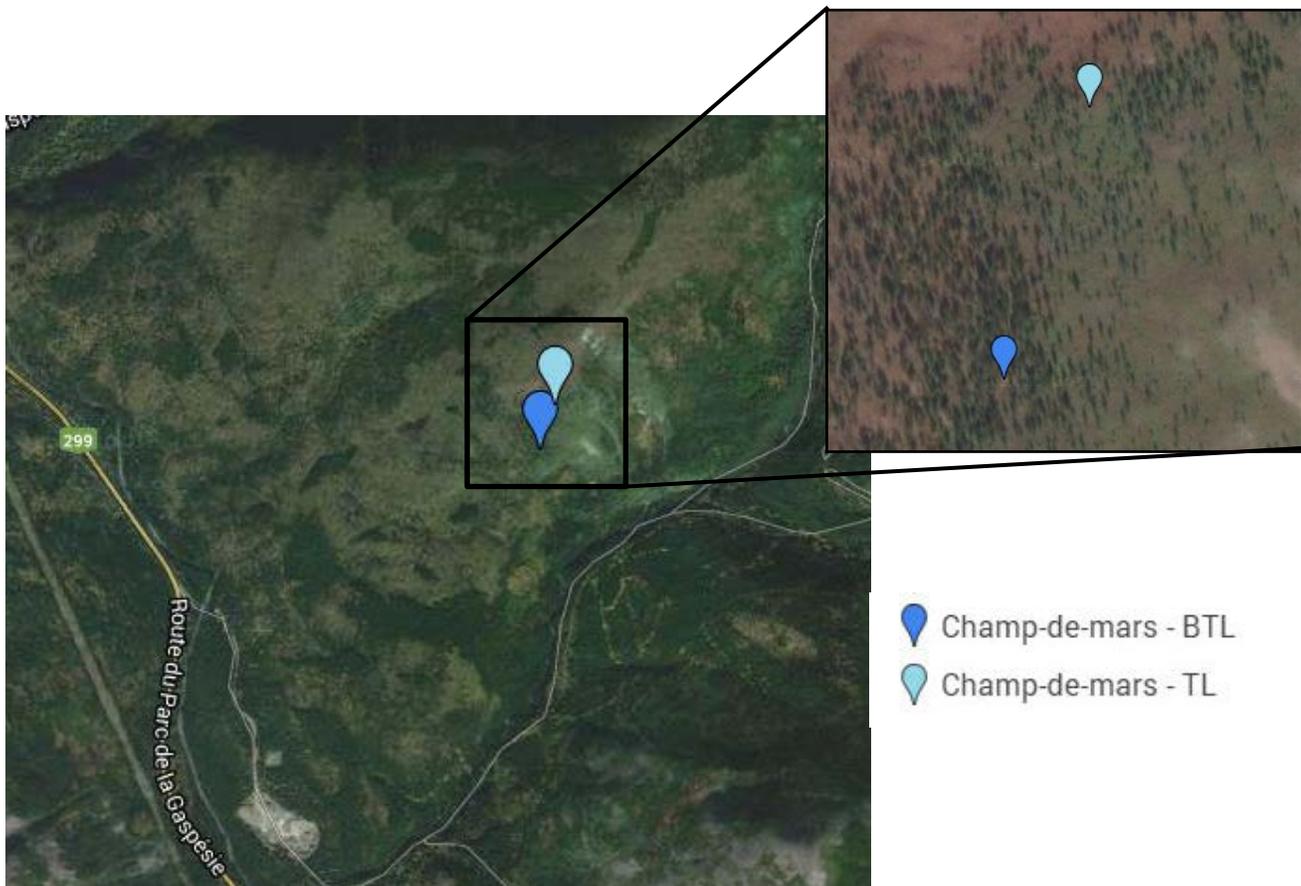


FIGURE 5. LOCALISATION DES RELEVÉS DE TERRAIN, MONT CHAMPS-DE-MARS, GOOGLE MAP

Lors de la deuxième journée, deux autres sites présentant des densités de végétation différentes ont été identifiés sur le mont Hog's Back où l'on retrouve un peuplement de résineux également dominé par le sapin baumier (Guitard et Fleury, 2004). Le premier site est localisé en bordure du sentier des bénévoles sous la ligne des arbres, où l'on retrouve davantage de végétation. Ce site se trouve sur l'aspect sud de la montagne et l'inclinaison de la pente est de 18 degrés. Les relevés ont été effectués à 9h56 et la profondeur de la neige atteignait 40 cm. Le deuxième site est, quant à lui, situé dans un champ de neige sur l'aspect sud-est à la sortie du sentier des bénévoles sur une pente de 35 degrés, à une altitude de 574 mètres. Les relevés ont été effectués à 11h10 et la profondeur de neige était de 95 cm. Lors de cette sortie, les vents provenaient principalement de l'ouest et les conditions météorologiques étaient globalement nuageuses avec de faibles précipitations. Une tempête a cependant eu lieu le mercredi 20 janvier laissant entre 30 et 40 cm de neige à la ligne des arbres. La carte ci-dessous démontre la localisation des deux relevés de terrain effectués sur le mont Hog's Back.

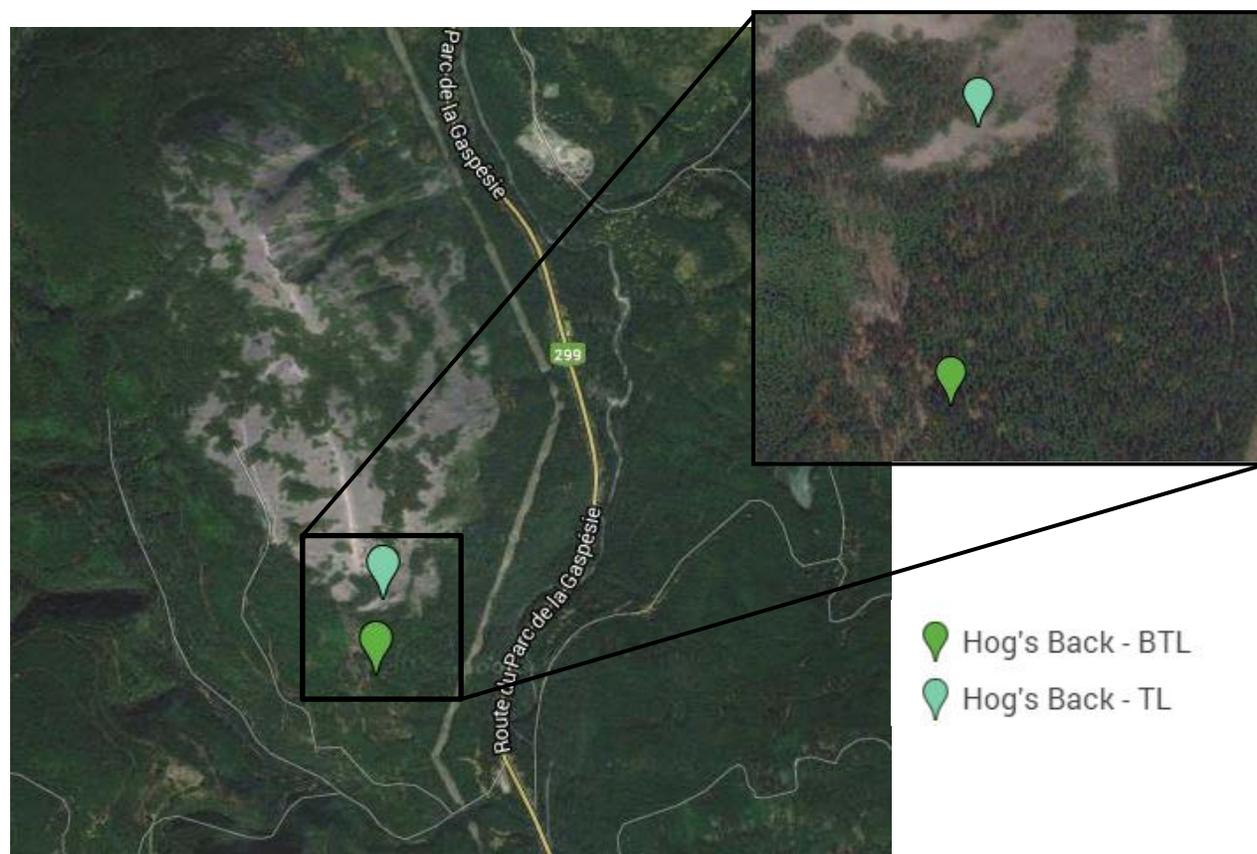


FIGURE 6. LOCALISATION DES RELEVÉS DE TERRAIN, MONT HOG'S BACK, GOOGLE MAP

### 3.2. MANIPULATIONS

Les manipulations décrites dans cette section ont été répétées pour chacun des sites d'études visités. Après avoir défini l'emplacement du puits de neige, un rayon de 10 m a été établi autour de ce dernier. Ce rayon a permis de définir la zone dans laquelle les données de végétation devaient être recueillies. L'ensemble des arbres présents dans la zone à l'étude ont tout d'abord été dénombrés. Puis, le diamètre à hauteur de poitrine a été mesuré pour les arbres de plus de 5 cm de diamètre. Ensuite, quatre arbres dont la hauteur était représentative de la végétation environnante ont été sélectionnés. Les angles ont été mesurés à l'aide d'un clinomètre à une distance d'environ 10 m; c'est à partir de ces informations que nous pourrions calculer la hauteur des arbres. Finalement, une photographie à l'aide d'un objectif hypergone a été prise afin de calculer l'indice de surface foliaire ainsi que la proportion de ciel bleu. En guise de données complémentaires, les températures de la canopée et du tronc ont été mesurées à l'aide d'un thermomètre infrarouge thermique pour chaque arbre présent dans la zone.

Plusieurs manipulations ont également été effectuées dans chacun des puits de neige réalisés. Tout d'abord, la stratigraphie des couches de neige a été définie et la densité a été mesurée à l'aide d'un couteau à densité triangulaire pour chacune des couches identifiées. Puis, la température a été mesurée à des résolutions verticales entre 2 et 5 cm pour l'ensemble du manteau neigeux. La taille de grain a été mesurée de deux façons différentes, soit avec l'appareil IRIS puis, manuellement avec une loupe. La méthode manuelle permet de définir par la même occasion le type de grain composant chaque couche alors que l'appareil IRIS permet de mesurer le diamètre optique des grains avec une relation utilisant la réflectance infrarouge à 1310 nm (Montpetit et al., 2012). Ensuite, la résistance des couches a été mesurée selon les normes de l'association canadienne des avalanches (CAA, 2014). Des mesures ont également été réalisées autour du puits de neige à l'aide de la sonde Avatech afin de comparer la stratigraphie et la résistance des couches avec ce qui a été observé manuellement. Cette sonde consiste en une tige insérée dans la neige au bout de laquelle un capteur piézomètre mesure la résistance de la neige à une résolution d'environ 1 mm. Finalement, des tests de compression

ont été effectués afin de vérifier la stabilité générale à l'intérieur du manteau neigeux et identifier la présence et profondeur des couches faibles.

### 3.3. SNOWPACK

#### 3.3.1. INTRANTS AU MODÈLE

Le modèle de simulation du manteau neigeux se base sur un ensemble de données météorologiques pour performer la modélisation. Un minimum de données est nécessaire au modèle SNOWPACK et ces dernières doivent être mise à jour à un maximum de trois heures d'intervalles. Ces données ont été recueillies, en partie, par les stations météo à proximité des sites d'études. Les données essentielles n'étant pas toutes disponibles aux stations, il a été nécessaire d'utiliser les données de réanalyses météorologique d'Environnement Canada. Le modèle GEM-LAM (Global Environmental Multiscale Model – Limited Area Model) possède une résolution spatiale de 2.5 km pour certaines zones du Canada. Ce modèle repose sur le Système à haute résolution de prévision déterministe et permet d'obtenir des données météorologiques représentatives au niveau local (Côté et al., 2016). Le tableau suivant démontre les données nécessaires à la réalisation des simulations ainsi que leur provenance.

TABLEAU 1. ENSEMBLE DES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES NÉCESSAIRES À SNOWPACK ET LEUR DISPONIBILITÉS AUX STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Données	Stations météorologiques		
	Données SNOWPACK	Camin	Caela
Date	X	X	X
Température de l'air	X	X	X
Humidité relative	X		X
Vitesse du vent	X	X	X
Direction du vent	X*	X	X
Longues ondes entrantes	X		
Longues ondes sortantes	X*		
Courtes ondes entrantes	X		
Courtes ondes sortantes	X*		
Température de surface	X*		
Température du sol	X*		
Précipitation	X		X
Hauteur du couvert	X*		X

\*Données complémentaires. Source : Madore, 2016.

Afin d'intégrer l'impact de la végétation sur le couvert neigeux dans les simulations de SNOWPACK, certaines données sont primordiales. La première étape consiste en la transformation des mesures d'angle effectuées sur le terrain afin d'obtenir la hauteur des arbres. Cette dernière a été obtenue à l'aide de la loi des sinus qui permet de trouver la mesure d'un côté d'un triangle en se basant sur la connaissance de deux angles et sur la longueur d'un côté (Lacroix. S., 2013).

Le volume de bois a été calculé à l'aide de la formule suivante

$$(PI \cdot DBH^2 \cdot H)/4$$

où DBH est le diamètre à hauteur poitrine et H la hauteur des arbres (Erdle, 2012). C'est à partir de cette valeur que SNOWPACK détermine l'intensité des processus thermodynamiques reliés à la végétation. La capacité d'interception est une autre variable de première importance pour analyser l'impact de la végétation sur l'évolution du manteau neigeux. Le modèle SNOWPACK utilise l'indice de surface foliaire (LAI) ou la fraction de ciel bleu pour calculer la capacité d'interception et évaluer la quantité de radiation solaire qui est absorbée et celle qui pénètre la végétation pour se rendre au sol (Gouttevin et al., 2015). L'indice de surface foliaire est défini comme la surface de sol couverte par le feuillage. Les méthodes les plus connues pour la mesure du LAI sont destructives pour la forêt et demandent beaucoup de temps puisqu'elles impliquent de couper des arbres. Pour les besoins de l'étude, nous avons utilisé la fraction de ciel bleu qui représente la proportion de ciel que l'on peut voir à travers les arbres (Rasmus et al., 2012). Ces données sont basées sur les photographies hémisphériques prises à l'aide de l'objectif hypergone. Nous avons utilisés le logiciel de traitement de photographie Photoshop afin de classifier l'image et obtenir la proportion de ciel bleu.

Pour effectuer les simulations, il a été nécessaire de paramétrer les fichiers .sno et .ini. Les études antérieures nous ont permis de prendre en considération un problème récurrent de sublimation dans les Chic-Chocs. Ce problème consiste en une diminution rapide de l'épaisseur de neige via une sublimation exagérée du manteau neigeux. Dans le but de diminuer ce biais et de permettre une analyse de l'effet du module de végétation sur le couvert neigeux, les vents ont été réduits de moitié. De plus, le vent était faible lors des sorties de terrain et les sites d'étude visités étaient pratiquement tous à l'abri du vent grâce aux arbres.

Dans le fichier .sno, les données suivantes ont été ajustées pour chaque site d'étude : hauteur moyenne des arbres en mètre, la fraction de ciel bleu, surface terrière de la canopée ( $m^2m^{-2}$ ), portion de neige non interceptée par la canopée (proportion de ciel bleu). Pour ce qui est du fichier .init, il suffit d'activer le module canopée dans le volet SNOWPACK. À noter que si le module de canopée est désactivé, les données entrées dans le fichier .sno ne seront pas prises en considération.

SNOWPACK a également besoin des données de sol pour effectuer ses simulations. Pour chacun des sites d'études, la pente, l'aspect et le type de sol ont été notés et intégrés au modèle. Ces informations sont pertinentes, car elles influencent l'évolution du manteau neigeux. En effet, la pente et le type de sol affectent l'écoulement de l'eau tout au long de l'hiver. L'orientation permet de calculer la quantité de radiations solaires touchant la surface de la neige et de quantifier le transport de la neige par les vents. Le modèle de simulation utilisera donc les données météorologiques qu'il mettra en relation avec les données de végétation et de sol afin de modéliser le manteau neigeux le plus précisément possible.

### 3.3.2. SORTIES DU MODÈLE

Le modèle SNOWPACK produit au final deux différents types de sorties. On retrouve les sorties associées directement au couvert neigeux tel que l'épaisseur de neige au sol et l'équivalent en eau qui sont produites dans un fichier ayant l'extension .met. Le second type de sortie concerne les données de profils tels que la densité et la température que l'on retrouve dans un fichier de type .sno. Au niveau des données de profils, chacune des couches est représentée selon la fraction d'eau, de glace et d'air qu'elles contiennent (Bartelt et Lehning, 2002). SNOWPACK effectue ses calculs sur une période de plusieurs mois à raison d'une modélisation avec un pas de temps de trois heures. Il est donc nécessaire d'extraire les données désirées correspondant à la date et l'heure à laquelle les visites de terrain ont été effectuées afin de réaliser l'étude de sensibilité. Le modèle produit beaucoup plus de données, mais ce travail se limitera à la validation de celles mentionnées ci-haut. Les simulations produites permettent de constater l'impact des échanges d'énergie et ainsi d'obtenir le bilan d'énergie de surface et le bilan de masse affectant la cohésion de la neige. Ces résultats seront ensuite comparés aux données recueillies aux différents sites d'études afin d'évaluer la précision des simulations.

## 4. RÉSULTATS

### 4.1. DONNÉES DE VÉGÉTATION

Les données de végétation recueillies sur le terrain et nécessaires à la paramétrisation du module de végétation dans SNOWPACK sont présentées dans cette section. Afin de définir les sites qui sont situés sous la ligne des arbres, l'acronyme SLA sera utilisé et pour les sites situés au niveau de la ligne des arbres, on utilisera LA. Le tableau 2 nous permet de constater la différence de densité du couvert forestier de chacun des sites d'étude visités. Le puits de neige 3 a été effectué dans une zone forestière dense, on remarque en effet que la fraction de ciel bleu est quasiment nulle avec 3,93 %. C'est au puits de neige 4 que l'on note le volume de bois le plus faible avec une fraction de ciel bleu de près de 95 %. Les puits de neige 1 et 2 sont situés entre ces deux extrêmes, avec respectivement 30,1 % et 76,97 % de fraction de ciel bleu.

TABLEAU 2. DONNÉES DE VÉGÉTATION POUR LA PARAMÉTRISATION DU MODÈLE SNOWPACK

Variables	SP1 - SLA	SP2 - LA	SP3 - SLA	SPA - LA
Volume de bois (m <sup>3</sup> /ha)	321,4	85,12	717,7	1,7
Indice de surface foliaire (%)	69,9	23,03	96,07	6,53
Fraction ciel bleu (%)	30,1	76,97	3,93	93,47
Hauteur moyenne (m)	10,76	12,46	10,4	11,58

Des photographies hémisphériques ont été prises aux puits de neige 1, 2 et 3. C'est à partir de ces photos que les données d'indice de surface foliaire (LAI) et de fraction de ciel bleu ont été calculées. Pour le puits de neige 4, la dispersion des arbres nous a empêché de prendre la photographie. Nous avons donc, à partir des données recueillies (nombre d'arbres dans le rayon et évaluation visuelle), estimé la fraction de ciel bleu.



**FIGURE 7. PHOTOGRAPHIE HÉMISPHERIQUE PUIITS DE NEIGE 1,  
CHAMPS DE MARS - SLA**



**FIGURE 8. PHOTOGRAPHIE HÉMISPHERIQUE, PUIITS DE NEIGE 2,  
CHAMPS-DE-MARS - LA**



**FIGURE 9. PHOTOGRAPHIE HÉMISPHERIQUE, PUIITS DE NEIGE 3, HOG'S  
BACK - SLA**

## 4.2. SIMULATIONS AUX SITES D'ÉTUDE

Dans la section qui suit, les données extraites des simulations sont présentées dans différents tableaux afin de faciliter la comparaison. On retrouve donc, tel que mentionné précédemment, deux puits de neige par site d'étude : 1) sous la ligne des arbres - SLA et 2) au niveau de la ligne des arbres - LA. Les données de température moyenne, de densité et d'épaisseur du manteau neigeux sont comparées à des simulations SNOWPACK. Cela nous permet de constater si le module de végétation du modèle arrive à simuler l'impact de la canopée sur les échanges d'énergie et processus dynamiques dans le couvert nival. Pour ce faire, les données des simulations avec le module de la canopée sont comparées avec les données récoltées sur le terrain ainsi qu'avec les données de simulation sans le module de végétation. Comme les puits de neige 1 et 2 ont été effectués à seulement 2 heures de décalage, les données des simulations utilisées pour l'analyse sont celles du 18 janvier à 16 h UTC. Pour les puits de neige 3 et 4, ce sont les données du 19 janvier, aussi à 16 h UTC qui ont servi à l'analyse. Une seule simulation a été performée sans la végétation ce qui implique que nous avons les mêmes données au niveau de la densité, de l'épaisseur de neige et de la température pour ces paires de puits (1-2 données de simulation du 18 janvier et 3-4 données de simulation du 19 janvier). L'utilisation d'une seule simulation est acceptable dans ce cas-ci comme aucune précipitation n'a été enregistrée entre les 2 journées, ni de variations extrêmes en températures de sorte que la neige simulée entre les 18 et 19 janvier reste inchangée pour un milieu ouvert. De plus, en raison de la résolution spatiale du modèle de données de réanalyses météorologiques, les données de précipitations et autres conditions météorologiques sont les mêmes pour l'ensemble des sites d'études. Seules les variables ajoutées pour le module de végétation font donc varier les données de simulation.

#### 4.2.1. Puits de neige 1, Champs-de-mars sous la ligne des arbres (SLA)

Le tableau suivant montre les données recueillies pour le puits de neige 1 réalisé dans la montagne Champs-de-mars sous le niveau de la ligne des arbres. Tout d’abord, pour l’épaisseur de neige, on peut remarquer que les résultats des simulations avec et sans le module de la végétation varient grandement par rapport aux données de terrain (tableau 3). Cela peut s’expliquer par le fait que le puits de neige a pu être réalisé à un endroit où le relief était non représentatif de la zone d’étude. En effet, on a mesuré près de 70 cm de neige au sol sur le site d’étude alors que le modèle a simulé 29,2 cm avec le module de végétation et 36,8 cm pour la simulation sans la végétation. Pour ce puits, le modèle simule une quantité inférieure de neige lorsqu’il comptabilise l’effet de la végétation, ce qui est attendu vu les processus d’interception/sublimation par la végétation. Une observation qualitative des photos de terrain permet en effet de voir une très grande variabilité dans l’épaisseur de neige, mais aucune moyenne n’a pu être calculée. Il est donc plausible d’affirmer que le modèle ici sous-estime la neige sur le milieu, avec ou sans végétation.

**TABEAU 3. DONNÉES PUIITS DE NEIGE 1, CHAMPS-DE-MARS, SLA**

Variables	Simulation avec Végétation (différence simulation – mesure terrain)	Simulation sans végétation (différence simulation – mesure terrain)	Données terrain
Épaisseur de neige (cm)	29,2 (-40,8)	36,86 (-33,14)	<b>70</b>
Température moyenne (°C)	-2,78 (+2,86)	-3,05 (+2,59)	<b>-5,64</b>
Densité moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	267,10 (+62,1)	267,90 (+62,9)	<b>205,00</b>

La température moyenne de la neige relevée sur le site d'étude est plus basse que ce qui a été produit par le modèle SNOWPACK. C'est au niveau de la simulation avec végétation que l'on retrouve la température moyenne la plus élevée puisque le modèle SNOWPACK prend en compte le forçage radiatif causé par la végétation qui réchauffe le manteau neigeux. Cependant, ce réchauffement est relativement faible, de l'ordre de 0.3 °C. En effet, la température mesurée sur le terrain était de -5,64 °C alors que SNOWPACK a simulé une température de -2,78 avec la végétation et -3,05 °C sans la végétation. Plusieurs phénomènes peuvent expliquer cet écart. Premièrement, la quantité de neige mesurée est plus importante et par conséquent, nous pouvons nous attendre à une température plus chaude. Cependant, comme le puits à neige a été creusé le matin, le manteau a pu garder plus longtemps sa température froide de la nuit alors qu'un couvert moins épais se réchaufferait plus rapidement avec la température de l'air. Pour ce qui est de la densité moyenne du manteau neigeux, on remarque que les simulations avec et sans végétation proposent pratiquement la même valeur soit respectivement 267,10 kg·m<sup>-3</sup> et 267,90 kg·m<sup>-3</sup>. La valeur simulée avec le module de végétation est légèrement inférieure à celle produite sans la végétation alors que la valeur obtenue sur le terrain est nettement plus basse et s'établit à 205 kg/m<sup>3</sup>. La densité dépend du type de cristaux qui composent le manteau neigeux et ceux-ci sont influencés par les conditions météorologiques et conditionnent la fraction d'air dans le manteau. Dans la simulation avec et/ou sans végétation, la différence est trop petite pour tenter de conclure sur l'effet de la végétation. Globalement, une température de l'air froide peut mener à du métamorphisme de gradient de température, menant à un grossissement de grains et à une diminution de la densité. Il est aussi plausible de dire que comme la température de la neige mesurée est plus froide, le gradient de température et les processus de métamorphisme sont plus importants menant ainsi à une densité plus faible. Bien qu'elle soit peu significative, cette situation est observée dans le tableau 3. Même s'il s'agit d'une affirmation intéressante, elle est difficilement vérifiable sans une analyse plus approfondie des équations régissant la densité à l'intérieur de SNOWPACK. Il est connu que la densité des neiges minces est surestimée par SNOWPACK (Langlois et al., 2012; Madore et al., 2016), et par conséquent le résultat ici n'est pas inconvenant.

#### 4.2.2. Puits de neige 2, Champs-de-mars, ligne des arbres (LA)

Les données pour le puits de neige 2 récolées sur la montagne Champs-de-mars au niveau de la ligne des arbres sont présentées dans le tableau 4 suivant. On remarque, encore une fois, une quantité de neige plus importante relevée sur le terrain que par rapport aux simulations, mais avec un écart beaucoup moins important démontrant ici la variabilité spatiale discutée plus haut. En effet, nous avons noté 40 cm de neige sur le site d'étude alors que SNOWPACK a simulé 32,5 cm de neige avec le module de végétation et 36,9 cm sans la végétation, une différence donc variant autour de 5 à 8 cm. C'est à nouveau pour la simulation avec végétation que l'on retrouve la quantité de neige la plus faible à cause de l'interception. La différence de température est légèrement moins marquée au niveau de ce puits de neige mais demeure moins froide au niveau des simulations compte tenu que le puits a été creusé quelques heures plus tard dans la journée (réchauffement de la neige mesurée). En effet, SNOWPACK a simulé une température de -2,82 °C avec le module de végétation et de -3,05 °C sans la végétation. Sur le terrain, la température moyenne était plutôt de -5,40 °C. Tout comme pour le puits de neige 1, la température simulée est plus élevée en milieu forestier.

TABLEAU 4. DONNÉES PUIITS DE NEIGE 2, CHAMPS-DE-MARS, LA

Variables	Simulation avec Végétation (différence simulation – mesure terrain)	Simulation sans végétation (différence simulation – mesure terrain)	Données terrain
Épaisseur de neige (cm)	32,46 (-7,54)	36,86 (-3,14)	<b>40</b>
Température moyenne (°C)	-2,82 (+2,58)	-3,05 (+2,35)	<b>-5,40</b>
Densité moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	260,10 (+24,1)	267,90 (+31,9)	<b>236,00</b>

La différence de densité entre les données de terrain et les simulations pour le puits de neige 2 est moins marquée que pour le puits de neige précédent. Pour la simulation avec le module de végétation, elle est de  $260,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  alors que la densité calculée au site d'étude est de  $236 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . L'écart entre la densité simulée avec végétation et sans végétation est plus grand qu'au puits précédent. L'ajout de la végétation réduit la densité, ou du moins, sa densification est plus lente. Ceci est lié au fait que sous la forêt, la neige est protégée de 2 facteurs qui contribuent à arrondir les grains de neige (i.e. augmenter la densité) : 1) l'éclairement solaire qui favorise l'évaporation et la sublimation et 2) le vent qui casse les grains.

#### 4.2.3. Puits de neige 3, Hog's Back, sous la ligne des arbres (SLA)

Le tableau suivant permet de comparer les données de terrains du puits de neige 3 effectuées sur le mont Hog's Back. Au niveau de l'épaisseur de neige, il est possible de constater que la simulation avec végétation propose à nouveau une quantité de neige moins importante que pour la simulation sans végétation ainsi que par rapport à ce qui a été mesuré sur le terrain. En effet, nous avons mesuré 40 cm de neige alors que SNOWPACK a modélisé 41,46 cm sans le module de la végétation et 29,5 cm avec la végétation, mais les causes restent les mêmes que pour les sites précédents.

TABLEAU 5. DONNÉES PUIITS DE NEIGE 3, HOG'S BACK, SLA

Variables	Simulation avec Végétation (différence simulation – mesure terrain)	Simulation sans végétation (différence simulation – mesure terrain)	Données terrain
Épaisseur de neige (cm)	29,5 (-10,5)	41,46 (+1,46)	<b>40</b>
Température moyenne (°C)	-2,77 (+1,82)	-2,67 (+1,92)	<b>-4,59</b>
Densité moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	245,64 (+33,64)	257,37 (+45,37)	<b>212,00</b>

La température moyenne est encore une fois légèrement plus chaude au niveau des simulations. Il est possible de remarquer que pour ce puits de neige, contrairement aux puits de neige 1 et 2, la température sous la végétation est plus froide (faiblement) que pour la simulation sans végétation. La différence entre la température relevée sur le terrain et celle modélisée par SNOWPACK avec le module de végétation est moins importante que pour les puits de neige précédents. Effectivement, le modèle a simulé une température de  $-2,77\text{ °C}$  avec la canopée et  $-2,67\text{ °C}$  sans ce module alors que la température moyenne mesurée sur le terrain était de  $-4,59\text{ °C}$ . La densité moyenne relevée sur le terrain au puits de neige 3 est encore une fois moins importante que ce qui a été simulé par SNOWPACK que ce soit avec ou sans la végétation. La densité calculée par le modèle est de  $245,64\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  avec le module de végétation et de  $257,37\text{ kg}/\text{m}^3$  sans la végétation alors que sur le terrain, nous avons obtenu une densité de  $212\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

#### 4.2.4. Puits de neige 4, Hog's Back, ligne des arbres (LA)

Au niveau du puits de neige 4, le même phénomène de variabilité spatiale se répète où l'épaisseur mesurée est plus élevée que simulée, la neige mesurée est plus froide alors que la densité mesurée est plus faible. Pour éviter les répétitions, le lecteur peut se référer au tableau 5 pour les données du puits 3.

TABLEAU 6. DONNÉES Puits DE NEIGE 4, HOG'S BACK, LA

Variables	Simulation avec Végétation (différence simulation – mesure terrain)	Simulation sans végétation (différence simulation – mesure terrain)	Données terrain
Épaisseur de neige (cm)	37,85 (-57,15)	41,46 (-53,54)	<b>95</b>
Température moyenne (°C)	-3,21 (+5,43)	-2,67 (+5,97)	<b>-8,64</b>
Densité moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	247,24 (+16,34)	257,37 (+26,37)	<b>231,00</b>

En somme, les résultats nous permettent de constater que les mesures d'épaisseur de neige sont sous-estimées par le modèle avec végétation. Étant donné la variabilité du relief des sites d'étude, nous ne disposons pas suffisamment de données de terrain pour valider l'effet d'interception modélisé par SNOWPACK. La température moyenne est, quant à elle, surestimée autant pour les simulations avec ou sans la végétation. C'est cependant au niveau des simulations avec végétation que la différence par rapport à ce qui a été relevé sur le terrain est la plus faible. La densité moyenne du manteau neigeux est également surestimée, mais encore une fois, les résultats des simulations avec le module de végétation ont un écart moindre avec ce que l'on a mesuré sur l'ensemble des sites d'étude.

### 4.3. ÉTUDE DE SENSIBILITÉ

Après l'observation des données, il est possible d'affirmer que les processus d'interception et de sublimation dominant au niveau des modélisations avec végétation. Comme nous pouvons l'observer au tableau 7, l'épaisseur de neige varie inversement proportionnellement en fonction de la densité du couvert forestier. Ceci est cohérent avec la théorie de Pomeroy et al. (2002) qui démontre bien que les zones forestières peuvent avoir une accumulation de neige moins importante que dans les zones ouvertes en raison des processus de sublimation et d'interception. Les simulations proposées par le modèle avec le module de végétation confirment cette théorie. Notons que le puits de neige 4, où nous avons la quantité de neige la plus importante, est celui présentant le moins d'arbres. Cependant, comme nous pouvons le remarquer dans le tableau 8, la simulation sans le module de végétation permet d'obtenir des données qui reflètent mieux la réalité. Les écarts entre les données mesurées et simulées sans la végétation sont effectivement moins importants que pour la simulation avec végétation.

TABLEAU 7. ÉPAISSEUR DE NEIGE EN FONCTION DE LA DENSITÉ DU COUVERT VÉGÉTAL  
(EN VERT, LA VALEUR SIMULÉE LA PLUS PRÈS DES MESURES)

Puits de neige	Épaisseur de neige (cm)			
	3	1	2	4
Fraction de ciel bleu	3.93	30.10	76.97	93,47
Simulation avec végétation	29,5	29,2	32,46	37,85
Simulation sans végétation	41,46	36,86	36,86	41,46
Données terrain	40	70	40	95

TABLEAU 8. DIFFÉRENCE ENTRE LES DONNÉES D'ÉPAISSEUR DE NEIGE MESURÉES SUR LE TERRAIN ET LES SIMULATIONS SNOWPACK EN FONCTION DE LA DENSITÉ DU COUVERT VÉGÉTAL - (EN VERT, LA VALEUR SIMULÉE LA PLUS PRÈS DES MESURES)

Puits de neige	Épaisseur de neige (cm)			
	3	1	2	4
Fraction de ciel bleu	3,93	30,10	76,97	93,47
Simulation avec végétation	-10,5	-40,8	-7,54	-57,2
Simulation sans végétation	-1,46	-33,14	-3,14	-53,5

Le tableau 9 nous permet de constater que la température simulée avec la végétation semble proportionnelle au volume d'arbres. En effet, plus la densité d'arbres est élevée, plus la température moyenne semble également plus élevée. Les relevés de terrain semblent également suivre cette tendance. Il existe deux principaux phénomènes qui peuvent influencer la température du couvert nival, l'effet d'ombrage qui protège la neige des radiations solaires et l'émission de longues ondes qui vont plutôt la réchauffer. SNOWPACK semble donc prendre en compte l'émissivité des ondes longues de la canopée vers le manteau neigeux, ce qui augmente inévitablement la température moyenne de ce dernier.

TABLEAU 9. TEMPÉRATURE MOYENNE EN FONCTION DE LA DENSITÉ DU COUVERT VÉGÉTAL  
(EN VERT, LA VALEUR SIMULÉE LA PLUS PRÈS DES MESURES)

Température moyenne (°C)				
Puits de neige	3	1	2	4
Fraction de ciel bleu	3.93	30.10	76.97	93,47
Simulation avec végétation	-2,77	-2,78	-2,82	-3,21
Simulation sans végétation	-2,67	-3,05	-3,05	-2,67
Données terrain	-4,59	-5,64	-5,40	-8,64

Le tableau 10 démontre que l'inclusion du module de végétation permet, dans la majorité des cas, de réduire l'écart de température entre les données simulées et les données mesurées sur le terrain. On remarque aussi que plus la végétation est dense plus l'écart de température est faible. Il est possible de supposer qu'à un certain seuil de densité d'arbres, le modèle est en mesure de simuler plus précisément les différents processus thermodynamiques.

TABLEAU 10. DIFFÉRENCE ENTRE LES DONNÉES DE TEMPÉRATURE MOYENNE MESURÉES SUR LE TERRAIN ET LES SIMULATIONS SNOWPACK EN FONCTION DE LA DENSITÉ DU COUVERT VÉGÉTAL - (EN VERT, LA VALEUR SIMULÉE LA PLUS PRÈS DES MESURES)

Température moyenne (°C)				
Puits de neige	3	1	2	4
Fraction de ciel bleu	3,93	30,10	76,97	93,47
Simulation avec végétation	1,82	2,86	2,58	5,43
Simulation sans végétation	1,92	2,59	3,05	5,97

Le tableau suivant montre la densité moyenne simulée et celle mesurée sur le terrain pour les puits de neige en fonction de la densité de la canopée. Comme nous l'avons constaté dans la section résultats, la densité simulée avec le module de végétation est inférieure à ce qui a été simulé sans la végétation pour l'ensemble des puits de neige. Cela est confirmé par les données mesurées sur le terrain, bien que celles-ci soit inférieure aux données produites par le modèle avec le module de canopée. Toutefois, aucune tendance par rapport au volume d'arbres ne peut être observée au niveau de la densité. On remarque une importante augmentation de la densité moyenne pour le puits de neige 1 alors que sur le terrain, c'est plutôt une diminution de densité qui caractérise le manteau neigeux. Nous n'avons pas suffisamment de données de terrain pour valider ces résultats en termes de propriétés géophysiques de couvert nival. Cependant, nous notons que le module de végétation simule mieux la densité pour les 4 puits.

**TABLEAU 11. DENSITÉ MOYENNE EN FONCTION DE LA DENSITÉ DU COUVERT VÉGÉTAL  
(EN VERT, LA VALEUR SIMULÉE LA PLUS PRÈS DES MESURES)**

Puits de neige	Densité moyenne (kg/m <sup>3</sup> )			
	3	1	2	4
Fraction de ciel bleu	3.93	30.10	76.97	93.47
Simulation avec végétation	245,64	267,10	260,10	247,24
Simulation sans végétation	257,37	267,90	267,90	257,37
Données terrain	212,00	205,00	236,00	231,00

En effet, le tableau 12 nous permet d'affirmer que la densité moyenne simulée avec le module de végétation réduit l'écart par rapport aux données recueillies sur le terrain. Globalement, les simulations avec végétation pour les sites ayant une densité de végétation moins importante (sites 2 et 4) semblent mieux performer que les sites ayant une densité de végétation plus importante. Le modèle semble donc avoir plus de difficulté à modéliser l'impact d'une végétation dense sur le manteau neigeux. Il faut mentionner que SNOWPACK est un modèle Suisse et que la modélisation de la densité est imprécise puisque les conditions météorologiques diffèrent largement au Canada.

TABLEAU 12. DIFFÉRENCE ENTRE LES DONNÉES DE DENSITÉ MOYENNE MESURÉES SUR LE TERRAIN ET LES SIMULATIONS SNOWPACK EN FONCTION DE LA DENSITÉ DU COUVERT VÉGÉTAL - (EN VERT, LA VALEUR SIMULÉE LA PLUS PRÈS DES MESURES)

Puits de neige	Densité moyenne (kg/m <sup>3</sup> )			
	3	1	2	4
Fraction de ciel bleu	3,93	30,10	76,97	93,47
Simulation avec végétation	-33,64	-62,10	-24,10	-16,24
Simulation sans végétation	-45,37	-62,90	-31,90	-26,37

## 5. DISCUSSION ET CONCLUSION

L'analyse des données de simulations et l'étude de sensibilité nous permettent d'établir certains constats. Tout d'abord, le modèle semble sous-estimer la quantité de neige au sol avec le module de végétation. Cela peut être lié aux processus d'interception et de sublimation engendrés par la canopée puisque chacune des valeurs simulées avec la végétation sont inférieure aux valeurs simulées sans la végétation. En effet, l'interception de la neige par les arbres et la sublimation de cette neige interceptée peut engendrer une diminution du couvert neigeux allant jusqu'à 60% de la quantité totale de neige tombée au cours de la saison (Hardy et al., 1997). Les simulations produites respectent donc ce que les recherches précédentes ont démontré. Nous n'avons cependant pas suffisamment de données pour valider ces résultats avec les données de terrains.

Les températures sont surestimées par le modèle bien que ces dernières démontrent que le couvert neigeux est plus chaud sous la canopée, ce qui est également démontré par les données de terrain. L'émission de longues ondes par la végétation est le phénomène dominant dans le processus de fonte de neige et impacte assurément la température du couvert nival (Gouttevin et al., 2015). L'écart entre les températures mesurées et les températures simulées avec végétation est plus faible que pour la simulation sans végétation. Aussi, nous avons pu constater que plus la densité d'arbres augmente, plus la température est élevée et plus l'écart entre la simulation et les données mesurées sur le terrain est réduit.

Au niveau de la densité, les résultats démontrent que cette dernière est plus faible sous la végétation. En effet, la canopée protège le couvert nival du vent et des radiations solaires qui causeraient une augmentation de la densité des couches de neige. Les densités simulées restent relativement trop élevées par rapport aux données de terrains, mais il est possible de conclure que le module de végétation permet de mieux modéliser la densité du manteau neigeux sous la végétation pour nos 4 puits. Selon ce que l'on a observé, l'écart entre la densité simulée avec le module végétation et les données de terrain est moins important que l'écart simulé sans le

module d'autant plus lorsque le volume d'arbres diminue. Tel que mentionné précédemment, SNOWPACK a tendance à surestimer la densité des couches de fond puisqu'il s'agit d'un modèle adapté pour conditions météorologiques Suisse. En résumé, les données simulées avec végétation nous permettent de constater que la quantité de neige tend à augmenter lorsque la quantité d'arbres diminue, la température à quant à elle à tendance à diminuer alors que la densité semble également augmenter.

L'inclusion du modèle de végétation devrait logiquement améliorer les prévisions de stabilité du couvert neigeux en ajustant la densité et la température et la quantité de neige au sol en fonction de la densité d'arbres. Cette étude nous permet de conclure sur la densité, mais plus de données spatialement distribuées auraient été nécessaires pour conclure sur les autres variables, et par conséquent sur la stabilité du manteau neigeux. Ces variables reposent sur une collecte rigoureuse de données permettant d'obtenir des résultats représentatifs du site à l'étude. Certaines données sont difficiles à mesurer précisément sur le terrain et la variabilité en termes de densité forestière implique qu'il est difficile d'élargir les prévisions à l'ensemble de la montagne. Cela augmente la marge d'erreur et les impacts de ces variables sur les échanges d'énergie peuvent engendrer la réalisation de simulations erronées. Nous sommes toutefois en mesure de confirmer les hypothèses définies préalablement. En effet, les simulations effectuées avec le module de la végétation réduisent la quantité de neige au sol dû à l'interception et diminuent également la densité moyenne du manteau neigeux. L'inclusion des paramètres de végétation permet donc d'améliorer la précision des simulations pour l'analyse du couvert nival sous la canopée. La validation de ces simulations avec des données récoltées sur le terrain permettront d'effectuer des prévisions d'avalanche encore plus précises.

Plusieurs éléments sont à considérer dans l'analyse des résultats de cette étude. Premièrement, seulement quatre échantillonnages ont été réalisés. Il aurait été pertinent de réaliser plusieurs puits de neige à des niveaux de densité de couvert forestier similaire afin d'observer si le comportement du modèle reste stable. Aussi, considérant la variabilité spatiale, avoir un plus grand nombre de sites d'étude nous aurait permis de confirmer les processus

d'interception et de sublimation modélisé par SNOWPACK. Il faut souligner que les mesures de végétation ont été collectées manuellement, ce qui implique également une possibilité de biais. Le fait d'avoir paramétré et d'avoir fait fonctionner le module de végétation est positif en soit. Cette étude nous a permis d'évaluer qualitativement le rôle de la canopée sur le couvert nival entre autres au niveau de la modélisation des neiges minces en milieu forestier. Le modèle répond effectivement à cet objectif bien qu'il reste du travail à faire afin de bien comprendre l'impact des variables de végétation dans les calculs effectués par SNOWPACK pour modéliser le manteau neigeux.

## RÉFÉRENCES

ACIA: Arctic Climate Impact Assessment. (2004). Impact of warming Arctic. Cambridge University Press. 146p.

Armstrong, R. and Brun, E.: (2008) Snow and climate: physical processes, surface energy exchange and modeling, Cambridge University Press, England, 256p.

Asner G, et al. (2003). Global synthesis of leaf area index observations : implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography*. vol. 12 p. 191-205

Avalanche Québec (2015). Bulletins d'avalanche pour les Chic-Chocs. *In* Avalanche Québec. *Bulletins d'avalanche*  
<http://www.centreavalanche.qc.ca/conditions/avalanche-bulletins/fr/archives>

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, p. 123–145.

Bellaire, S., Jamieson, J. B., et Fierz, C. (2011). Forcing the snow-cover model SNOWPACK with forecasted weather data. *The Cryosphere*. vol 5 no 4, 1115–1125.

Brun, E., David, P., Sudul, M., et Brunot, G. (1992). A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*. vol 38 no 128, p. 13–22.

CAA: Canadian Avalanche Association (2014). Observation guidelines and recording standards for weather, snowpack and avalanches. Canadian Avalanche Association, Revelstoke, Canada, 109p.

Canadian Avalanche Center. (2015). Annual report 2014-2015. 48 p.

Canadian Avalanche Association s.d. Avalanche online course. *in* Canadian Avalanche Centre, Canadian Avalanche Association, Revelstoke, Canada,  
<http://www.avalanche.ca/cac/training/online-course>.

Chalon, J. (2014). Neige. Encyclopaedia Universalis. En ligne.  
<http://www.universalis.fr/encyclopedie/neige>

Commission de toponymie du Québec (2012). Monts Chic-Chocs. Gouvernement du Québec, Québec, Canada, [http://www.toponymie.gouv.qc.ca/ct/ToposWeb/fiche.aspx?no\\_seq=13165](http://www.toponymie.gouv.qc.ca/ct/ToposWeb/fiche.aspx?no_seq=13165).

Côté, Kevin. (2015). Évaluation de la précision de simulations du couvert neigeux par SNOWPACK à partir de données météorologiques in situ et de prévision dans différents contextes climatiques des régions montagneuses canadiennes.

Côté, Kevin. (2014). Évaluation du potentiel de simulation numériques 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.

Erdle, Thom. (2012). Measurement of tree basal area volume. New Brunswick university. Forestry and geology. En ligne.  
<[http://ifmlab.for.unb.ca/People/Kershaw/Courses/For1001/Erdle\\_Version/TAE-BasalArea&Volume.pdf](http://ifmlab.for.unb.ca/People/Kershaw/Courses/For1001/Erdle_Version/TAE-BasalArea&Volume.pdf)>. Consulté le 31 mars

European space agency. (2014). Les propriétés optiques de la glace et de la neige. En ligne.  
<[https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_Global\\_FR/SEMLYHTWLUG\\_0.html](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_FR/SEMLYHTWLUG_0.html)> Consulté le 10 janvier

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, vol. 9, p.17–31.

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (2013). Climate change 2013 the Physical Science Basis. P.762-769

Gouttevin, I., Lehning, M., Jonas, T., Gustafsson, D. et Mölder, M. (2015). A two-layer canopy model with thermal inertia for an improved snowpack energy balance below needleleaf forest. *Geoscientific model development*. n° 8. p.2379-2395.

Guitard A., et Fleury M. (2004). Caractérisation de l'habitat de l'orignal et recommandations d'intervention forestières dans la réserve faunique des Chic-Chocs. Sépaq – Réserve faunique des Chic-Chocs, Ministère des Ressources naturelles, de la faune et des parcs.  
<http://biblio.uqar.ca/archives/30308955.pdf>

Gustafsson, David et Lenning, Michael. (2014). Computes interception of precipitation and radiation, and reduction of wind speed in a canopy layer above the snow or soil surface. Annotated code source. *SNOWPACK 3.3.0*.  
[http://models.slf.ch/docserver/snowpack/html/Canopy\\_8h\\_source.html](http://models.slf.ch/docserver/snowpack/html/Canopy_8h_source.html).

Hardy, J., Davis, R., Jordan, R., Li, X., Woodcock, C., Ni, W., and McKenzie J. (1997). : Snow ablation modeling at the stand scale in a boreal jack pine forest, *Journal of Geophysical Research*. Vol. 102, No D24, p.29.397– 29.9405.

Hedstrom and Pomeroy (1998) Measurements and modeling of snow interception in the boreal forest, *Hydrological Processes*. 12, 1611-1625.

Jamieson, B., et Stethem, C. (2002). Snow Avalanche Hazards and Management in Canada : Challenges and Progress. *Natural hazards*. vol 26, p. 35–53.

Jordan, R. (1991). A one-dimensional temperature model for a snow cover: Technical documentation for SNTHERM.89. CRREL Special Report, vol 91-16, p. 58.

LaChapelle, E. (1966). Avalanche Forecasting--a Modern Synthesis. IAHS, vol. 69, p.350–356.

Lehning, M., Bartelt, P., et Brown, B. (1998). A network of automatic weather and snow stations and supplementary model calculations providing snowpack information for avalanche warning. *Cold region Science and technology*. 30(1-30), p. 145-157

Lacroix, Sylvain. (2013). Arithmétique et algèbre; loi des sinus. En ligne. <<http://www.sylvainlacroix.ca/4cst.html>>. Consulté le 31 mars

Lehning, M., Bartelt, P., et Brown, B. (2002). A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part II. Snow microstructure. *Cold Regions Science and Technology*, vol 35, p. 147–167.

Link, Timothy E, and Danny Marks. (2014) Point Simulation of seasonal snow cover dynamics beneath boreal forest canopies. *Geophysical Research: Atmospheres* 104.D22.

Lopez-Moreno J. et Latron J. 2007. Influence of canopy density on snow distribution in a temperate mountain range. *Hydrological processes*. Vol. 22. P.117-162

Madore, Jean-Benoit. (2016). Amélioration de la modélisation de la taille de grain de neige du modèle multi-couches thermodynamique SNOWPACK: implication dans l'évaluation des risques d'avalanches. p. 6-8

McClung, D. M., et Schaerer, P. A. (1993). *The Avalanche Handbook*. Seattle: The Mountaineers.

B. Montpetit, A. Royer, A. Langlois, P. Cliche, A. Roy, N. Champollion, G. Picard, F. Domine, and R. Obbard. New short wave infrared albedo measurements for snow specific surface area retrieval. *J. Glaciol.* vol. 58, no. 211, pp. 941–952, Sep. 2012.

Otterman, J., Staenz, K., Itten, K., and Kukla, G. (1988). Dependence of snow melting and surface-atmosphere interactions on the forest structure, *Bound.-Layer. Meteorology*. Vol 45, No 1, p. 1–8

Pomeroy, J W., D M. Gray, N R. Hedstrom, and J R. Janowicz. (2002). Prediction of seasonal snow accumulation in cold climate forests. *Hydrological Processes*. p.16-18 (2002).

- Pope, G. et Treitz, P. (2013) Leaf area index (LAI) estimation in boreal mixwood forest of Ontario, Canada using light detection and ranging (LIDAR) and worldview-2 imagery. *Remote sensing*. vol. 5 p. 5040-5063.
- Rasmus, S., Gustafsson, D., Koivusalo, H., Laurén, A., Grelle, A., Kauppinen, O., Lagnvall, O., Lindroth, A., Rasmus K., Svensson, M. et Weslin P. (2012). Estimation of winter leaf area index and sky view fraction for snow modelling in boreal coniferous forest: consequences on snow mass and energy balance. *Hydrological process*. vol 27, p. 2876-2891
- Roch, A., (1949). Report on snow avalanche conditions in the U.S.A. western ski resorts from the 26th of January to the 24th of April, 1949. Internal Report 174, Eidg. Institut für Schnee und Law inenforschung, Davos, Suisse.
- Rutter, N., et al. (2009), Evaluation of forest snow processes models (SnowMIP2), *Journal of Geophysical Research*, 114, D06111, doi:10.1029/2008JD011063.
- Schirmer, M., Schweizer, J., et Lehning, M. (2010). Statistical evaluation of local to regional snowpack stability using simulated snow-cover data. *Cold Regions Science and Technology*. vol 64 no 2, p. 110–118
- Schweizer J., Bellaire, S., Fierz, C., Lehning, M., et Pielmeier, C. (2006). Evaluating and improving the stability predictions of the snow cover model SNOWPACK. *Cold Regions Science and Technology*. vol 46 no 1, p. 52–59
- Smith, M., Jamieson, B., et Fierz, C. (2008). Observation and modeling of a buried melt-freeze crust. University of Calgary. International Snow Science Workshop, p. 170–178.
- Strasser, U., Warscher, M. et Liston E. (2011). Modeling Snow-Canopy Processes on an Idealized Mountain. *Journal of Hydrometeorology* 12, n° 4. p.663-677.
- Tremper, B. (2008). *Staying Alive in Avalanche Terrain*. 2nd edition, Seattle, WA, The Mountaineers Books, 318 pages. (How-to/Winter Backcountry)
- Terrestrial hydrology research group. (2012). The impact of pine beetle infestation on snow accumulation and melt. University of Colorado – Boulder.  
<http://geode.colorado.edu/~small/foresthdro.html>
- Vionnet, V., Brun, E., Morin, S., Boone, a., Faroux, S., Le Moigne, P. et Willemet, J.-M. (2012). The detailed snowpack scheme Crocus and its implementation in SURFEX v7.2. *Geoscientific Model Development*. vol. 5, no. 3, p.773–791