

**PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE DU
SYSTÈME DE PRODUCTION AUTOMATISÉ
DE NEIGE (SPAN)**

**Chaire industrielle Hydro-Québec / CRSNG
en Hydrologie statistique**

Rapport de recherche R-834

Décembre 2005

**PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE DU SYSTÈME DE
PRODUCTION AUTOMATISÉ DE NEIGE (SPAN)**

par

**André St-Hilaire
Taha .B.M.J. Ouarda**

**Institut national de la recherche scientifique (INRS)
Centre Eau, Terre et Environnement
2800 rue Einstein, CP 7500 Sainte-Foy (Québec) G1V 4C7**

Rapport de recherche R-834

Décembre 2005

Référence

ST-HILAIRE A., T.B.M.J. OUARDA. 2005. Protocole d'échantillonnage du système de production automatisé de neige (SPAN). Rapport de recherche R-834, v+29 pages.

ÉQUIPE DE PROJET

CHARGÉ DE PROJET **INRS-Eau, Terre et Environnement**

André ST-HILAIRE

CHARGÉ DE PROJET **Domaine du Ski Mont-St-Bruno inc.**

Louis BEAUDRY

COLLABORATEUR **INRS-Eau, Terre et Environnement**

Taha B.M.J. OUARDA

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIÈRES	III
LISTE DES TABLEAUX	IV
LISTE DES FIGURES	V
1. INTRODUCTION	1
1.1. MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE	1
1.2. DESCRIPTION DES OBJECTIFS SPÉCIFIQUES DU PROJET	2
2.1. COMPOSANTES DU SYSTÈME DE PRODUCTION AUTOMATISÉE DE LA NEIGE (SPAN).	3
2.2. LE SYSTÈME DE CANONS ET DE TOURELLES.....	4
2.3. LES SYSTÈME DE PERCHES D'ENNEIGEMENT	4
2. PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE	5
3.1. ÉCHANTILLONNAGE DANS LE CONDITIONS OPÉRATIONNELLES.....	5
3.2. ÉCHANTILLONNAGE LORS D'EXPÉRIENCES CONTRÔLÉES.....	7
4. MÉTHODES D'ANALYSES STATISTIQUES	9
4.1 RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE.....	9
4.2 ANALYSE DE VARIANCE ET DE COVARIANCE (ANOVA/ANCOVA).....	10
4.3 ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP)	12
4.4 ANALYSE SPATIALE A L'AIDE DU VARIOGRAMME	14
5. INSTRUMENTS DE MESURE ASSOCIÉS AU PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE	15
5.1. SONDAS METEOROLOGIQUES	15
5.2. MESURES DES CARACTERISTIQUES DE LA NEIGE.	16
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	20
RÉFÉRENCES.....	22

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. ÉCHELLE DE MESURE QUALITATIVE DE DURETÉ DE LA NEIGE (DE QUERVAIN, 1948).	7
TABLEAU 2. CAPTEURS SERVANT AUX MESURES MÉTÉOROLOGIQUES	15

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. CAROTTIER DE TYPE ADIRONDACK. SOURCE : WWW.GENEQ.COM	16
FIGURE 2. EXEMPLE DE MANIPULATION DU PANDA.....	18

1. INTRODUCTION

1.1. Mise en contexte et problématique

L'industrie du ski est importante pour l'économie des pays nordiques. Au Québec, on comptait plus de 1 102 000 skieurs et planchistes en 2003 (Conseil canadien du ski, 2004). Évidemment, la quantité et la qualité de neige au sol sont une variable déterminante pour la viabilité de cette industrie. C'est pour cette raison que les centres de ski sont équipés de systèmes de production de neige. Comme partout ailleurs, les conditions climatiques canadiennes sont en mutation. À titre d'exemple, Zhang et al. (2000) ont étudié les tendances des températures saisonnières au Canada durant la seconde moitié du vingtième siècle. Ils ont observé des tendances significatives à la hausse pour le sud du pays durant l'hiver. Cette tendance a été confirmée par Benyahya et al. (2004) qui ont étudié les redoux à trois stations du Sud du Québec et ont observé une tendance à la hausse dans l'amplitude de ces événements au cours du 20^e siècle. Dans la même région, Gachon et al. (2005) ont démontré qu'il existe une tendance à la hausse des extrêmes de températures hivernaux (maximums et minimums) entre 1941 et 2000.

Ces tendances auront des répercussions importantes sur la quantité et la qualité de la production de neige sur les centres de ski. Il semble donc essentiel que l'industrie du ski puisse s'adapter à ces changements en optimisant la production de neige. Afin de répondre à ce défi, le Domaine du Ski Mont-Bruno Inc. a initié en 2001 un projet de recherche et développement en nivoculture. L'objectif principal de ce projet est d'obtenir, une production et une gestion optimale de la neige à l'aide d'une fabrication mécanique automatisée, en intégrant toutes les composantes des systèmes existants ou en développement en un seul système de production automatisée de la neige (SPAN). Les résultats de ce projet auront des répercussions importantes sur cette industrie du loisir. D'autres industries récréo-touristiques (moto-neige, festivals hivernaux) et agricoles (production maraîchère) pourraient aussi bénéficier des résultats de ce projet.

Comme dans bien d'autres centres, les équipements de production de neige détenus par le Domaine du Ski Mont-Bruno Inc. sont multiples et variés. De plus, le nombre de variables physiographiques, climatiques et opérationnelles qui influencent la production est élevé. La compagnie a répertorié 17 covariables influençant les conditions d'opération. Les variables permettant de déterminer la qualité de la production de neige sont aussi multiples.

Étant donné la complexité du problème lié à un contexte multivarié, il est devenu important que l'échantillonnage suive un protocole expérimental qui optimise les chances de dégager les conclusions sur l'efficacité des différentes composantes du système et de ses différents modes d'opération. Dans cette optique, le présent projet vise à établir un protocole d'échantillonnage pour les saisons 2005-2006 et 2006-2007 au Domaine du Ski Mont-Bruno Inc.

1.2 Description des objectifs spécifiques du projet

Les objectifs spécifiques poursuivis dans le cadre de ce projet sont :

- L'établissement d'un cadre d'échantillonnage.
- Une proposition d'acquisition d'équipement pour faire le suivi des conditions de neige et des conditions climatiques.
- Le développement d'un protocole détaillé de mesures qui sera suivi par les employés du centre.
- L'analyse statistique préliminaire des données recueillies.

Le présent rapport abordera les trois premiers objectifs spécifiques du projet. Le dernier objectif sera le sujet d'un rapport subséquent au terme de la première saison d'échantillonnage.

Le reste de ce rapport se divise en trois parties. La section 2 fait un bref rappel des équipements de production de neige disponibles au Domaine du Ski Mont-Bruno Inc et de leurs spécificités. La section 3 traitera du protocole d'échantillonnage préconisé tandis que la section 4 proposera un certain nombre de techniques et équipements de mesure.

2. LES CONSTITUANTES DU SYSTEME

Le présent chapitre passe en revue les différentes constituantes de SPAN. La première section rappelle la liste des composantes telles que décrites par Beaudry (2003). Les constituantes du système qui seront évaluées plus en détail dans le cadre du présent projet seront ensuite détaillées.

2.1 Composantes du Système de Production Automatisée de la Neige (SPAN).

Dans sa finalité, il est prévu que SPAN comporte dix composantes. Les composantes suivantes ont été adaptées de celles décrites par Beaudry (2003??) :

1. Les systèmes d'eau : cette composante inclut le bassin de rétention, le système de pompage et de filtration, les systèmes de refroidissement de pressurisation et les conduites.
2. Le système énergétique : les systèmes électriques et de pressurisation locale.
3. Le système de prise de données de neige : instruments de mesure, sondes et systèmes d'acquisition.
4. Le système de prise de données météorologiques : instruments de mesure et sondes (température de l'air et de la neige, humidité, vent, précipitations, épaisseur de neige au sol) et systèmes d'acquisition.
5. Le système de tourelles : Présentement, 24 tourelles sont installées servant de support aux infrastructures de production de neige sur le territoire du centre de ski du Mont St-Bruno. Chaque système de tourelle est muni d'un canon à neige dont la hauteur et l'angle peuvent être modifiés.
6. Le système de canons à neige : En plus des tourelles fixes, 26 canons mobiles sont aussi utilisés pour produire de la neige. Bien que la hauteur soit faible et constante, l'angle de projection peut être modifié.

7. Le système de perches : La troisième composante permettant la production de neige est la perche. Dans ces systèmes, la tête de production est située au sommet d'un mât de 7 à 9 m de haut qui peut être levé et abaissé. Cette composante ne fera pas partie des analyses en mode opérationnel décrites dans la prochaine section puisque les perches sont moins utilisées pour l'enneigement du centre.
8. Le système mobile de neige : unité de pompage, unité de compression, unité intégrée.
9. Les systèmes d'automatisation : conception, interfaces, capteurs, déclencheurs, communication
10. Le système de gestion : conception, analyse-programmation, acquisition, transmission et traitement des données, intégration et expérimentation-évaluation des systèmes.

Le présent projet se concentre sur une analyse comparative des performances des composantes 6 et 8 (les constituantes principales de production de neige) et ce, en fonction des variables météorologiques (composante 4). Les critères de performances seront établis par comparaison des mesures de quantité et de qualité de la neige prise durant la production (composante 3).

2.2 Le système de Canons et de tourelles

La station est propriétaire de différents types de canons à neige. Couture (2002) a produit une enquête technique dans laquelle sont répertoriés les principaux canons disponibles. Leurs caractéristiques sont décrites en détails dans ce rapport. L'inventaire des canons et tourelles utilisés par le Domaine de ski Mont-Bruno Inc. est donné en annexe.

2.3 Les système de perches d'enneigement

Les perches d'enneigement sont aussi incluses dans le système SPAN mais relativement peu utilisées en début de saison pour la fabrication de neige. On les retrouve en nombre plus restreint et sont généralement déployés en bas de pente. Pour ces raisons, l'analyse de la performance de ce type d'appareil sera limitée à une expérience contrôlée (voir section 3).

3. PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE

3.1 Échantillonnage dans le conditions opérationnelles

Étant donné que les principaux équipements faisant partie du SPAN sont utilisés de manière opérationnelle durant la saison de ski, il est important de tenter d'incorporer un protocole d'échantillonnage qui puisse permettre la comparaison des différentes composantes sans nuire à la production de neige. Pour ce faire, il convient de compenser le fait que le choix des sites et des périodes d'opération des composantes du système ne pourront pas toujours faire partie du protocole expérimental par de fréquentes mesures des variables d'intérêt durant les opérations. Trois catégories de variables devront être mesurées :

- 1) Les variables météorologiques : L'enregistrement de ces variables sera automatisé et des mesures seront prises en continu à une fréquence horaire au sommet et à la base du centre. Les variables météorologiques mesurées doivent inclure :
 - a) La température de l'air
 - b) La radiation solaire
 - c) Le vent (vitesse et direction)
 - d) La pression atmosphérique
 - e) L'humidité relative
 - f) Précipitation solides et liquides
- 2) Les variables de quantité et de qualité de neige produite. Les variables sélectionnées sont en accord avec les recommandations du « Working Group on Snow Classification » (Colbeck et al., 1990).

- a) L'épaisseur de neige au sol. Cette épaisseur sera prise à l'aide d'un carottier (voir section 4). Il faudra prendre plusieurs carottes de neige dans la zone de production. Deux transects à angle droit, avec un minimum de 5 mesures sont suggérées.
 - b) L'équivalent en eau de la neige au sol. Le même carottier permet d'obtenir cette information pour chaque carotte prélevée.
 - c) Température de l'air à 1,5 m de la surface neigeuse
 - d) Profil de température de la neige. Une mesure de température sera prise à la surface et à chaque intervalle de 5 cm dans la nouvelle couche et ensuite 20 cm jusqu'au sol.
 - e) La dureté de la neige. Deux techniques de mesure de la dureté peuvent être considérées :
 - 1) La mesure quantitative est souvent prise à l'aide de pénétromètres. Il s'agit de sondes qui mesurent la force de résistance à la pénétration. Les résultats de ces mesures sont souvent traduits en un index. Certaines sondes qui pourraient être utilisées sont décrites dans la section 5.
 - 2) La mesure qualitative est prise en essayant d'enfoncer dans la neige des objets de différents diamètres (Poing, doigts, crayon, lame de couteau). On attribut une dureté qualitative relative à l'aide de l'échelle décrite dans le tableau 3.
- 3) Les variables caractéristiques de fonctionnement de la composante utilisée :
- a) Le débit
 - b) La pression
 - c) Le modèle, le nombre de buses et de nucléateurs
 - d) La hauteur et l'angle d'élévation
 - e) L'emplacement (piste de ski, orientation)
 - f) La durée de l'enneigement

La fréquence des prises de mesure durant l'enneigement opérationnel devra être déterminée après discussion avec la direction de la station. Cette banque de données sera transférée aux chercheurs de l'INRS-ETE à la fin de la saison afin que l'on puisse procéder à une analyse statistique multivariée.

Tableau 1. Échelle de mesure qualitative de dureté de la neige (De Quervain, 1948).

Indice de dureté	Test manuel	Résistance équivalente à la pénétration (kg)	Symbole
Très bas	Poing	0-3	R1
Bas	4 doigts	3-15	R2
Moyen	1 doigt	15-35	R3
Élevé	Crayon	35-50	R4
Très élevé	Lame de couteau	>150	R5
Glace			R6

3.2 Échantillonnage lors d'expériences contrôlées.

La section 3.1 met en exergue le fait qu'il est difficile de contrôler les nombreuses variables qui risquent d'influencer la quantité et la qualité de neige produite par les différentes composantes du SPAN lorsque les mesures sont prises en mode opérationnel. Une approche complémentaire consiste à procéder à un certain nombre d'expériences contrôlées. Ces expériences ont pour objectif de permettre la comparaison de la performance de certaines composantes dans des conditions semblables. Les composantes qui nécessitent une telle comparaison seront installées dans des conditions similaires de production et ce, simultanément afin que les conditions météorologiques soient aussi identiques. Plusieurs variables caractéristiques des appareils et des sites seront aussi gardées constantes (angle de projection, hauteur, débit, pression d'air et d'eau), ce qui n'est pas toujours possible dans un cadre opérationnel.

Afin de capturer les forces et faiblesses des différentes composantes de production de neige du système, il est suggéré que ces expériences contrôlées soient effectuées. Les résultats de ces

tests optimaux pourront être comparés avec ceux obtenus à l'aide des mesures prises tout au cours de l'année dans un contexte opérationnel.

Entre autres, voici quelques unes des expériences contrôlées qu'il sera possible d'envisager à partir de la seconde moitié de février 2006 :

- Comparaison de la quantité et qualité de neige produite par une perche et un ventilateur Arnois
- Comparer l'efficacité de canons ayant des caractéristiques différentes de ceux utilisés en grand nombre en mode opérationnel :
 - Canon Boyd recyclé avec un tunnel rétréci
 - Canon Kid Wizard : petit enneigreur multi-buse
 - Nivis : canon sans compresseur avec système venturi
- Effet de la température de l'air sur la performance du nucléateur
 - Vérifier l'impact d'un refroidissement de l'air avant la sortie à l'aide des enneigeurs Lenko qui peuvent faire passer l'air dans le « water Box » pour la refroidir.

Ces expériences seront conduites de manière à ce que les facteurs qui sont difficilement contrôlés en période d'opération (pression, débit, etc.) sont gardés constants durant la période d'enneigement.

4. METHODES D'ANALYSE STATISTIQUE

Il est parfois difficile de déterminer a priori quelle sera la meilleure méthode d'analyse statistique des résultats. Toutefois, étant donné le caractère multivarié de l'étude qui sera entreprise, quelques approches jugées pertinentes sont résumées ici. Il ne s'agit pas ici de faire un inventaire exhaustif de toutes les méthodes d'analyse multivariée ni de décrire en détails leur fondement théorique, mais plutôt de donner un bref aperçu de certains outils statistiques qui pourront être utiles dans le cadre de cette étude.

4.1 Régression linéaire multiple

Une approche classique permettant de déterminer quelles sont les variables explicatives d'une variable de propriété de la neige est l'utilisation de la régression linéaire multiple. On suppose que la variable (e.g. équivalent en eau de la neige), peut être modélisée de la manière suivante :

$$y = b_0 + \beta x + \varepsilon \quad (1)$$

où y = vecteur $n \times 1$ des n résultats (ici, les moyennes de températures) ;

b_0 = vecteur $n \times 1$ contenant n fois une constante qu'on peut définir comme étant l'espérance de y sachant tous les paramètres nuls ;

x = matrice $n \times p$ contenant les p paramètres pour tous les n individus ;

β = vecteur $p \times 1$ contenant les effets de tous les p paramètres ;

ε = vecteur d'erreur $n \times 1$ aléatoire d'espérance 0.

Il faut noter qu'il est préférable de standardiser la matrice X (variables explicatives) pour mieux comparer l'effet des paramètres puisqu'ils ont des unités de mesure différentes. Les vecteurs b_0 et β sont estimés par la méthode des moindres carrés.

Avant de procéder à la régression, les corrélations (R) entre les variables explicatives peuvent être calculées. L'analyse de la matrice de corrélation permet de s'assurer que l'hypothèse de l'indépendance des variables explicatives est validée. Si un ou plusieurs R^2 sont élevés et significatifs, on peut éliminer la variable indépendante la plus fortement corrélée avec les autres variables indépendantes. On répète l'exercice jusqu'à ce qu'on ait des R^2 peu élevés. Il restera alors un nombre p' de variables explicatives inférieur au nombre initial.

La régression linéaire peut être calculée par la méthode pas à pas progressive (*stepwise forward*). On procède de la façon suivante :

- On calcule p' régressions (une avec chaque variable explicative) et on garde la variable qui donne le meilleur modèle (plus grande variance expliquée).
- On fait $(p'-1)$ régressions (avec la variable explicative qu'on a gardée et chacun des $(p'-1)$ restants) et on garde les deux paramètres qui donneraient le meilleur modèle.
- On répète jusqu'à ce qu'on ait des paramètres significativement différents de 0 tout en ayant un R^2 satisfaisant.

4.2 Analyse de variance et de covariance (ANOVA/ANCOVA).

L'analyse de variance à un facteur est utilisée afin de vérifier l'hypothèse H_0 : les moyennes de d'échantillons différents sont toutes égales.

Lorsqu'on a des données indépendantes normalement distribuées et de même variance, Une analyse de variance à un facteur (*one-way ANOVA*) peut être utilisée. Ce test compare la variance entre les échantillons avec les variances à l'intérieur des échantillons. Ce test calcule une statistique F :

$$SST = \sum_{i=1}^s (\bar{X}_{i.} - \bar{X}_{..})^2 \approx \chi_{(s-1)}^2 \quad (\text{variance inter-échantillons}) \quad (2)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{X}_{i.})^2 \approx \chi_{(N-s)}^2 \quad (\text{variance intra-échantillons}) \quad (3)$$

$$F = \frac{SST/(s-1)}{SSE/(N-s)} \approx F(s-1, N-s) \quad (\text{sous } H_0) \quad (4)$$

où N = nombre totale de données ; $\bar{X}_{..}$ = moyenne de toutes les données ;
 s = nombre d'échantillon ; $\bar{X}_i$ = moyenne de l'échantillon i ;
 n_i = nombre de données dans l'échantillon i .

Si toutes les moyennes théoriques sont égales et que les échantillons sont normalement distribués, F suit approximativement une distribution de Fisher de degrés de liberté $(s-1)$ et $(N-s)$. L'analyse de variance peut être généralisée au cas où plusieurs facteurs sont pris en considération.

Lorsque les données ne sont pas distribuées normalement, il est plus approprié d'utiliser un test non paramétrique. Ainsi, on peut utiliser un test les rangs sont comparées. Par exemple, le test de Kruskal-Wallis (Dickinson Gibbons, 1993), donne une statistique K calculée de la façon suivante :

$$K = \frac{\left[\frac{12}{N(N+1)} \times \sum_{i=1}^s \frac{R_i^2}{n_i} \right] - 3(N+1)}{1 - \frac{\sum_{j=1}^e d_j^3 - d_j}{N^3 - N}} \approx \chi^2_{(s-1)} \text{ (sous } H_0 \text{)} \quad (5)$$

où N = nombre total de données ;
 R_i = somme des rangs de l'échantillon i ;
 n_i = nombre de données de l'échantillon i ;
 s = nombre d'échantillons ;
 d_j = nombre de données ayant le rang j ;
 e = nombre total de rangs différents.

Note : Si on a aucune égalité de rang, le dénominateur égale 1.

Ce test est valable, pour toutes données qui proviennent d'une loi continue. Si toutes les moyennes théoriques sont égales, K suit approximativement une loi de khi-deux (χ^2) à $(s-1)$ degrés de liberté.

Si les analyses de variance (paramétriques ou non paramétriques) déterminent qu'il existe une inégalité dans les moyennes, on cherche alors à déterminer quels échantillons sont différents des autres en calculant des intervalles de confiance à l'aide de la procédure de Tukey-Kramer (Montgomery, 2001) qui ajuste la longueur de l'intervalle de confiance en fonction du seuil choisi et du nombre d'observations. Plus on a d'échantillons, plus les intervalles sont grands pour compenser l'étendue des échantillons. Ces intervalles sont calculés sur les rangs moyens.

L'analyse de variance à multiple facteurs (MANOVA) est une généralisation de l'ANOVA qui permet d'étudier plusieurs variables dépendantes (e.g. équivalent en eau de la neige et un indice de texture de la neige) pouvant être influencé par les facteurs ou covariables indépendantes. Au lieu de calculer une valeur de F avec l'équation (4), l'équivalent de cette statistique est calculée pour le cas multivarié.

L'analyse de covariance est une autre méthode de comparaison de moyennes pouvant être appliquée dans un cadre multivarié. Cette méthode permet d'expliquer la variation de la moyenne d'intérêt à l'aide d'une variable explicative quantitative continue en tenant compte de variables qualitatives ordinales (plusieurs classes ou catégories). Il s'agit d'une combinaison entre l'analyse de variance et la régression linéaire. L'ANCOVA permet de contrôler pour certaines covariables. Ce contrôle peut être représentée graphiquement par une translation de points sur une droite de régression vers une droite verticale où les points peuvent tous être comparés. Une statistique de test (F) peut alors être calculée comme dans le cas de l'ANOVA et comparée à une valeur critique pour un seuil de confiance donnée.

4.3 Analyse en composantes principales (ACP)

L'objectif de cette analyse est de regrouper les variables les plus reliées entre elles et de faire ressortir certaines variables reliées à ces groupes. Géométriquement, l'analyse en composantes principales correspond à trouver des lignes, plans ou hyperplans dans l'espace à K dimensions (correspondant aux K variables initiales). Ces lignes définissent le nouvel espace à V dimensions orthogonales et se nomme composantes principales. Chacune des composantes principales correspond à une combinaison linéaire des K variables initiales

Un premier regroupement des variables est possible en identifiant les coefficients de corrélation les plus élevés entre variables. Par la suite, l'analyse en composantes principales (ACP) qui permet de visualiser la corrélation entre k variables dans un espace réduit à p dimensions ($k < p$).

L'analyse en composantes principales (Anderson, 1971) est une méthode descriptive multidimensionnelle permettant d'obtenir une information détaillée d'une matrice de corrélation.

L'ACP utilise la matrice de variance-covariance (ou de corrélations) des données normalisées.

Une transformation linéaire orthogonale appliquée à la matrice des variables V :

$$U = \beta'V \quad (6)$$

La matrice de covariance de U , UU' est définie comme suit :

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_p \end{bmatrix}$$

où les λ_i , $i=1,2,\dots,p$ sont les p racines qui maximisent la variance de toutes les combinaisons linéaires décrites par U . Chaque colonne de U est appelée une composante principale de V , et est composée de la somme des projections des variables sur l'axe principal. U_1 est donc la combinaison linéaire des variables originales qui expliquent le maximum de variance. Par la suite, chaque U_i ($i=2,3,4,\dots$) est une autre combinaison orthogonale des variables originales et $Var(U_i) > Var(U_{i+1})$ (Haag et Wastreich, 2002).

4.4 Analyse spatiale à l'aide du variogramme

Si des profils de dureté ou de structure de la neige sont disponibles (voir section 5 pour les techniques d'échantillonnages suggérées), la structure spatiale de ces variables pourra être analysée à l'aide d'un variogramme, comme le suggèrent Birkeland et al. (2004). Cette approche est basée sur le principe que plus des points de mesure sont éloignés dans l'espace, moins ils risquent d'être corrélés. Le variogramme est une mesure de la discontinuité spatiale entre les points de mesure. Il permet de modéliser la structure spatiale à l'aide de fonctions mathématiques relativement simples qui peuvent ensuite être comparées. Les étapes de cette analyse se résument ainsi :

1. Transformer les mesures prises par un pénétromètre de manière à ce qu'elles s'approchent le plus possible d'une distribution normale.
2. Calculer le variogramme expérimental :

$$\hat{\gamma}(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [z(\mathbf{x}_i) - z(\mathbf{x}_i')]^2 \quad (7)$$

où N est le nombre total de paires de mesures $z(\mathbf{x})$ séparées par une distance $\mathbf{h}$.

3. Ajuster un modèle théorique à ce variogramme. Plusieurs modèles simples et éprouvés peuvent être utilisés (fonction linéaire, exponentielle, sphérique, gaussienne, etc.).
4. Comparer les modèles et les paramètres de ces modèles (effet de pépité, seuil, etc.) pour différents échantillons.

5. INSTRUMENTS DE MESURE ASSOCIES AU PROTOCOLE D'ECHANTILLONNAGE

Le protocole de la section 3 fait état d'un certain nombre de mesures essentielles à une analyse comparative. Il convient donc de décrire un peu plus en détail certains de ces appareils et leur fonctionnement.

5.1 Sondes météorologiques

Plusieurs données météorologiques doivent être mesurées en continu. Certains capteurs sont déjà en place à la station, tandis que d'autres devront être ajoutés. Deux stations météorologiques devraient être complétées, une près du sommet et une près de la base de la station de ski. Le tableau 4 donne la liste des senseurs nécessaires. À cet effet, le Domaine du Ski Mont-Bruno Inc. s'est porté acquéreur de deux stations « Wireless Vantage Pro ».

Tableau 2. Capteurs servant aux mesures météorologiques

Variable mesurée	Unités de mesure
Température de l'air et humidité relative	°C et %RH
Vent (vitesse et direction)	m/s et °
Pression atmosphérique	Pa
Précipitation solide	Cm
Radiation solaire	W/m ²

En plus des stations fixes, la température de l'air, le point de rosée, l'humidité relative et la vitesse du vent seront pris par un opérateur durant les périodes d'enneigement à chaque site de carottage de la neige. Ces mesures seront prises à l'aide d'une station météo portative Kestrel 4000.

5.2 Mesures des caractéristiques de la neige.

Plusieurs mesures de la neige ont été proposées dans la section 3.1. Parmi celles-ci, certaines nécessitent des instruments connus, alors que d'autres font appel à une instrumentation plus sophistiquée et par conséquent, moins couramment utilisée. La température de la neige pourra être prise à différentes profondeurs à l'aide d'une sonde électronique muni d'un fil suffisamment long.

Le carottage de la neige pourra être fait à l'aide d'un carottier de type Adirondack tel que présenté dans la figure 1. Ce carottier permet de mesurer l'épaisseur de la neige mais aussi son poids, qui est traduit en mesures d'équivalent en eau de la neige.

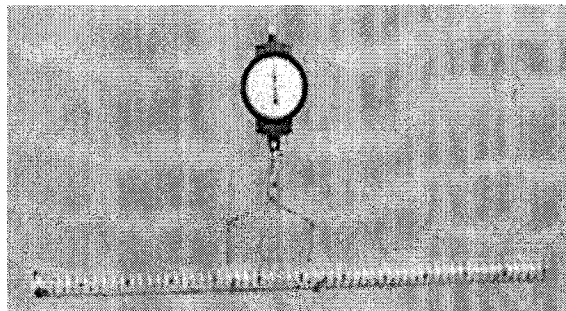


Figure 1. Carottier de type Adirondack. Source : www.Geneq.com

Plusieurs appareils peuvent mesurer la dureté de la neige. Les appareils de type mécanique mesurent la force de résistance à la pénétration d'une sonde. Le plus commun est connu sous le nom de Rammsonde suisse. Cette sonde a été développée par Bader dans les années 1930 (Pielmer, 2003). Il s'agit d'un cylindre de métal terminé par un cône. L'opérateur ajoute des poids à l'extrémité du cylindre et mesure la progression de la sonde dans la neige en fonction des

poids ajoutés. Certains auteurs ont critiqué cet appareil parce qu'il ne permet pas de mesurer les micro-variations dans la dureté de la neige. En effet, le diamètre de la Rammsonde est relativement grand (4 cm), ce qui ne permet pas une résolution spatiale très fine dans le profil de résistance (et par conséquent dans les mesures de dureté). Les mesures obtenues ne sont pas toujours faciles à relier aux propriétés mécaniques de la neige (Shapiro et al., 1997). Un pénétromètre similaire à la Rammsonde (i.e. une mesure de pénétration pour chaque coup de marteau) mais plus moderne (selon Peilmer, 2003) est aussi disponible en France. Il s'agit du PANDALP (Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté par ordinateur). Cet appareil peut être opéré par une seule personne et les données sont téléchargées sur un ordinateur (Figure 2). Il peut être loué sur une base hebdomadaire.



PANDALP



Figure 2. Exemple de manipulation du PANDALP

Plus récemment, Schneebeli et al. (1999) ont développé un micropénétromètre plus performant appelé « Snow Micropen ». Cet appareil permet aussi de mesurer la force de résistance à la pénétration. Il offre cependant des avantages marqués par rapport à la Rammsonde : 1) la force de résistance est mesurée par une pointe de 5 mm de diamètre, ce qui permet de mieux distinguer les microstructures; 2) La pénétration de la sonde est activée à l'aide d'un moteur électrique, ce qui évite les manipulations de poids; 3) Les données sont acquises à haute fréquence, ce qui fait que la distance entre les mesures est de l'ordre de 4 µm. Johnson et Schneebeli (1999) ont réussi à établir un lien entre certaines propriétés structurales de la neige et les mesures prises par cet instrument. Par exemple, la distance moyenne inter-structurale (e.g. entre les cristaux de neige) est donnée par :

$$L_n = \left(\frac{Z_p}{n_{pics}} A_s \right)^{1/3} \quad (8)$$

où L_n est la distance inter-structurale, Z_p est la distance de pénétration, A_s est la surface de la section du pénétromètre et n_{pics} est le nombre de pics enregistré par la sonde. Schneebeli et al.(1999) ont utilisé le même appareil pour développer un indice de texture de la neige. Les mesures de force prises par le Snow Micropen ont été utilisées pour estimer un indice (TI) correspondant au rapport entre le diamètre moyen des grains de neige (µm) et la densité (kg/m⁻³). Une régression linéaire simple permet d'estimer le TI à partir du coefficient de variation (CV) de la force mesurée pour des sections de longueur de 4 mm ($r^2=0.79$):

$$TI = 1,45 + 5,72CV \quad (9)$$

Birkeland et al. (2004) ont utilisé le Snow Micropen avec succès dans leur étude comparative de la structure spatiale de la force de résistance à la pénétration pour des sites au Montana (U.S.A.) et en Suisse.

Cet appareil peut être manoeuvré par une seule personne sur le terrain et les données sont téléchargées sur place avec un ordinateur portable. Un Snow MicroPen appareil serait disponible en location sur une base mensuelle.

6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le présent document propose des pistes de solution afin d'acquérir au cours des deux prochaines saisons hivernales, une base de données adéquate pour permettre une comparaison quantitative de la performance des composantes de production de neige du SPAN. Afin d'atteindre cet objectif, les recommandations devraient être adoptées :

- Compléter l'instrumentation des stations météorologiques existantes à la base et au sommet de la station.
- Planifier trois expériences contrôlées permettant de comparer les composantes du SPAN en mode « off line ».
- Planifier la prise de mesure en mode opérationnel. Cette planification doit se faire en quatre étapes :
 - Compléter l'inventaire des composantes opérationnelles
 - Finaliser la liste des variables d'intérêt. Si ces variables incluent des mesures de structure de la neige, s'assurer qu'un pénétromètre sera disponible au moins pour une partie de la saison.
 - Former le personnel en charge de la prise de données
 - S'entendre avec le personnel de la station sur le format des données qui seront transférées aux chercheurs de l'INRS-ETE.
 - Elaborer un échéancier de prise de mesures.

Certaines de ces recommandations, si elles sont acceptées, devront être mises en application rapidement. Ainsi, tout achat de capteurs météorologiques supplémentaires devra être fait le plus rapidement possible afin de tenir compte des délais de livraison. Il en va de même pour la

réserve d'un pénétromètre. La formation du personnel devra aussi se faire le plus tôt possible en saison.

L'ébauche de protocole d'échantillonnage suggéré dans ce rapport optimise les chances d'acquiescer une base de données fiable et suffisante pour procéder à une analyse statistique détaillée de la performance des différentes composantes de production de la neige. À la lumière des suggestions et recommandations présentées dans ce rapport, les instances administratives du Domaine de Ski Mont-Bruno Inc. seront en mesure de prendre une décision quant à la mise en application totale ou partielle des recommandations et, éventuellement, du protocole.

7. RÉFÉRENCES

Anderson, T.W. 1971. *An Introduction to Multivariate statistical analysis, second edition*, John Wiley and Sons.

Benyahya, L., A. St-Hilaire, A.-C. Favre, B. Bobée et M. Slivitzky (2004). Caractérisation statistique des redoux : Application à quatre stations de la province de Québec. INRS-ETE, rapport de recherche R-722, 52 pages.

Birkeland, K., K. Kronholm, S. Logan. (2004). A comparison of the spatial structure of the penetration resistance of snow layers in two different snow climates. *Proceedings of the International Symposium on Snow Monitoring and Avalanches*, Manali

Colbeck, S., E. Akitaya, R. Armstrong, H. Gulberg, J. Lafeuille, K. Lied, D. Mcclung and E. Morris. (1990). The International Classification for Seasonal Snow on the Ground. Report of Working Group on Snow Classification . 23 p.

Conseil Canadien du ski (2004). Profil des skieurs canadiens en 2003. rapport annuel, 19 pages.

Couture, M. (2002). Enquête technologique pour la fabrication de neige pour un micro-climat.

De Quarvain, (1948). *Das Korngefüge von Schnee*. Schweiz. Min. Petr. Mitt. 28(1): 12 p.

Dickinson Gibbons, J. Nonparametric Statistics: An Introduction. Sage University Paper 90. 85 pages.

Gachon, P., A. St-Hilaire, T. Ouarda, V.T.V. Nguyen, C. Lin, J. Milton, D. Chaumont, J. Goldstein, M. Hessami, T.D. Nguyen, F. Selva, M. Nadeau, P. Roy, D. Parishkura, n. Majo, M. choux, A. Bourque. 2005. A first evaluation of the strength and weaknesses of statistical downscaling methods for simulating extremes over various regions of eastern Canada. Sub-component, Climate Change Action Fund (CCAF), Environment Canada, Final Report, Montréal, Québec, Canada, 209 pages.

Haag I., Westrich B. 2002. Processes governing river water quality identified by principal component analysis. *Hydrological Processes*, in press.

Montgomery, Douglas C., *Design and Analysis of Experiments*, 5th edition p.96-97, John Wiley & Sons, inc. 2001.

Pielmer, C. (2003). Textural and mechanical variability in of mountain snowpacks. Thèse de doctorat, Université de Bern.

Shapiro, L. J.B. Johnson, M. Sturm, G. Blaisdell. (1997). Snow Mechanics: Review of the state of Knowledge and applications. CRREL Report 97-3. 35 p.

Schneebeli, M., C. Peilmeier, J. Johnson. (1999). Measuring snow microstructure and hardness using a high resolution penetrometer. Cold Reg. Sci. tech. 30(1-3):101-114.

Zhang, X., Vincent, L.A., Hogg, W.D. and Niitsoo, A. (2000): Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century. *Atmosphere-Ocean*, 38:395-429.

ANNEXE 1: Tableau de prises de mesure lors de l'échantillonnage en mode opérationnel

Date						
Heure du début de la production						
Canon/tourelle						
	Modèle, N/S					
	Pression					
	Débit					
	Hauteur					
	Angle d'élévation					
	Orientation p/r pente					
Mesures de neige						
	Heure					
		1	2	3	4	5
	Épaisseur					
	Densité					
	Température surface					
	Température à la base					

Micro-météo (Kestrel 4000).						
	Température air					
	Point de rosée (dew point)					
	Vitesse vent					
	Direction vent (approx.)					
	Pression					
	Humidité relative					

ANNEXE 2 : Inventaire des canons et tourelles utilisés à la station de ski Mont Bruno.

	Canon	Tourelle Mobile	Remarques	Modèle	compresseur		ventilateur
					HP	marque	HP
1	S-3	mobile	(Vieux compresseur) séparateur fuit	Boyne	15 hp	Hydrovane	15 hp
2	S-4	mobile	En Opération	Boyne	15 hp	Hydrovane	15 hp
3	S-7	mobile	En Opération/ Boyne Star Académie	Boyne	15 hp	Hydrovane	15 hp
4	S-8	mobile	Probleme avec le cœur du rad, il coule	Boyne	15 hp	Hydrovane	15 hp
5	S-9	mobile	En Opération	Island	10 hp	Hydrovane	10 hp
6	S-11	mobile	En Opérationl	Boyne	15 hp	Hydrovane	15 hp
7	S-13	mobile	En Opération/rad expérimental	Boyne	15 hp	Hydrovane	15 hp
8	S-15	mobile	En Opération/ Canon automatique	Wizzard Kid	5 hp	Hydrovane	7,5 hp
9	S-16	mobile	En opération	Boyne	15 hp	Hydrovane	20 hp
10	S-17	mobile	En opération	Boyne	15 hp	Hydrovane	15 hp
11	S-18	mobile	En Opération/ besoin d'être peinturé	Boyne	15 hp	Hydrovane	20 hp
12	Tr-24	17	Tourelle en opération	Island	5 hp	Hydrovane	10 hp
13	Tr-25	tour sud	Tourelle en opération	Island	5 hp	Hydrovane	10 hp
14	Tr-26	15	Tourelle en opération	Island	5 hp	Hydrovane	10 hp
15	Tr-27	18	Tourelle en opération	Island	5 hp	Hydrovane	10 hp
16	Tr-28	19	Tourelle en opération	Island	5 hp	Hydrovane	10 hp
17	L-29	6	Tourelle en opération	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp

	Canon	Tourelle Mobile	Remarques	Modèle	compresseur		ventilateur
					HP	marque	HP
18	L-30	8	Tourelle en opération	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
19	L-31	mobile	En opération	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
20	L-32	12	Tourelle en opération	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
21	L-34	25	Tourelle en opération	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
22	L-35	14	Test du moteur et reste à remonter le comp. à la tourelle	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
23	L-36	1	Tourelle en opération	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
24	L-37	mobile	En opération / Nouveau nucléateur (insert) / nouveau ring piston	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
25	L-38	4	Tourelle en opération	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
26	L-40	22	Tourelle en opération	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
27	L-41	9	Tourelle en opération	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
28	L-42	10	Tourelle en opération/ Une Buse de stripé ring 2	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
	L-43						
29	L-44	21	Tourelle en opération	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
30	L-45	custom	Custom Canon/ en opération	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
31	L-46	5	Tourelle en opération	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
32	L-47	2	En opération	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
33	L-48	7	Tourelle en opération	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
34	L-49	mobile	En opération/ Buses Hago - Ring 1, #20/ Ring 2, #12/ Ring 3, #20/ Ring 4, #30.	N.Wind	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
35	L-50	16	Tourelle en opération	950	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp

	Canon	Tourelle Mobile	Remarques	Modèle	compresseur		ventilateur
					HP	marque	HP
36	L-51	mobile	En opération	FA 2000	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
37	L-52	mobile	En opération	FA 4	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
38	L-53	20	Tourelle en opération	940	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
39	L-54	mobile	En opération/ Buses Hago - Ring 2, #30 x 22/ Ring 3, #70 x 15/ Ring 4, #20 x 8.	N.Wind	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
40	L-55	mobile	En opération	N.Wind	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
41	L-56	mobile	En opération/ Besoin de faire machiner pièce du moteur	N.Wind	7,5 hp	AtlasCopco	20 hp
42	L-57	3	Tourelle en opération	940	7,5 hp	AtlasCopco	20hp
43	L-58	mobile	Buse moitier/moitier	N.Wind	7,5 hp	AtlasCopco	20hp
44	L-59	mobile	En opération	N.Wind	7,5 hp	AtlasCopco	20hp
45	L-60	mobile	En opération	N.Wind	7,5 hp	AtlasCopco	20hp
46	L-61	mobile	En opération	N.Wind	7,5 hp	AtlasCopco	20hp
47	L-62	mobile	En opération	N.Wind	7,5 hp	AtlasCopco	20hp
48	L-63	mobile	En opération	N.Wind	7,5 hp	AtlasCopco	20hp
49	T-64	mobile	En opération	turbocristal	5hp	Hydrovane	35hp
50	S-65	Mobile	À reconditionner	Highland	5	Leroy Somer	10
51	S-66	Mobile	À reconditionner, pas de compresseur	Boyne	-	-	15
52	S-67	Mobile	À reconditionner	Highland	5	weg motors	10
53	S-68	Mobile	À reconditionner, pas de compresseur	Highland	-	-	10
54	S-69	Mobile	À reconditionner	Highland	5	Leroy Somer	10
55	S-70	Mobile	À reconditionner	Highland	5	us motors	10

	Canon	Tourelle Mobile	Remarques	Modèle	compresseur		ventilateur
					HP	marque	HP
56	S-71	Mobile	À reconditionner	Boyne	5	-	15
57	T-72	Mobile	À reconditionner, pas de compresseur	Turbocristal	5	N/D	10
58	T-73	Mobile	À reconditionner	Turbocristal	5	-	25
59	N-74	Mobile	Le Dijoncteur du heater ouvre toujours	Nivis	-	N/A	20
60	S-75	Mobile	Besoin d'une maintenance	Wizzard	10	us motors	15
61	S-76	Mobile	Besoin d'une maintenance	Wizzard	7.5	us motors	15
62	S-77	Mobile	Besoin d'une maintenance	Wizzard	10	us motors	15
63	S-78	Mobile	Besoin d'une maintenance/ Une buse de stripé ring # 1	Wizzard	10	us motors	20
64	S-79	Mobile	Besoin d'une maintenance	Wizzard	10	us motors	20
65	S-80	Mobile	Besoin d'une maintenance	Sil. Storm	10	us motors	20