

**ANALYSE DE LA QUANTITÉ ET DE LA
QUALITÉ DE NEIGE PRODUITE PAR LE
SYSTÈME DE PRODUCTION AUTOMATISÉ
DE NEIGE (SPAN)**

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

Rapport de recherche R-942

Juin 2007

**ANALYSE DE LA QUANTITÉ ET DE LA QUALITÉ DE NEIGE
PRODUITE PAR LE SYSTÈME DE PRODUCTION AUTOMATISÉ DE
NEIGE (SPAN)**

par

**André St-Hilaire
Simon Tardif**

**Institut national de la recherche scientifique (INRS)
Centre Eau, Terre et Environnement
490 De la Couronne, Québec, G1K 9A9**

Rapport de recherche R-942

Juin 2007

Référence

ST-HILAIRE A. et S. TARDIF. 2007. Analyse de la quantité et de la qualité de neige produite par le système de production automatisé de neige (SPAN). Rapport de recherche R-942, v+40 pages.

ÉQUIPE DE PROJET

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

André ST-HILAIRE

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

Louis BEAUDRY

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

Taha B.M.J. OUARDA

Simon TARDIF

Jimmy POULIN

COLLABORATEURS **Domaine du Ski Mont Bruno inc.**

Michel Couture

Jean Philippe Gauthier

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	IX
SOMMAIRE EXÉCUTIF	1
1. INTRODUCTION	3
1.1. MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE	3
1.2. DESCRIPTION DES OBJECTIFS SPÉCIFIQUES DU PROJET	3
2. MÉTHODOLOGIE.....	5
2.1 ÉCHANTILLONNAGE EN CONDITIONS OPÉRATIONNELLES	5
2.2 EXPÉRIENCE CONTRÔLÉE : 3 MARS 2006.....	6
2.3 MÉTHODES D'ANALYSES STATISTIQUES	9
3.0 RÉSULTATS	11
3.1 ÉCHANTILLONNAGE DURANT LA PRODUCTION DE NEIGE EN DÉBUT DE SAISON	11
3.2 EXPÉRIENCE CONTRÔLÉE	18
4.0 DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS	27
7. RÉFÉRENCES.....	33
ANNEXE 1. DISTRIBUTION SPATIALE DE LA NEIGE PRODUITE (DÉCEMBRE 2005)	35
ANNEXE 2. DONNÉES D'ÉQUIVALENT D'EAU EN NEIGE.....	41
ANNEXE 3. TEST A POSTERIORI DE LA DENSITÉ DE LA NEIGE PRODUITE.....	45
ANNEXE 4. RAPPORT D'ACTIVITÉS.....	47

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1.	APPAREILS DE PRODUCTION DE NEIGE UTILISÉS, LIEU DE PRODUCTION ET PÉRIODE D'ÉCHANTILLONNAGE DURANT LES OPÉRATIONS.....	6
TABLEAU 2.	APPAREILS DE PRODUCTION DE LA NEIGE UTILISÉS LORS DE L'EXPÉRIENCE CONTRÔLÉE.....	7
TABLEAU 3.	MESURES MÉTÉOROLOGIQUES PRISES DURANT LA PÉRIODE DE PRODUCTION DE NEIGE EN DÉCEMBRE 2005.....	12
TABLEAU 4.	VOLUME DE NEIGE ASSOCIÉ À CHAQUE CANON ET CHAQUE PISTE DURANT LA PÉRIODE DE PRODUCTION DE NEIGE DE DÉCEMBRE 2005.....	15
TABLEAU 5.	PÉRIMÈTRE ET SURFACE DE DIFFÉRENTS SEGMENTS DE PISTES IDENTIFIÉS DANS LA FIGURE 4.....	17
TABLEAU 6.	MESURES MÉTÉOROLOGIQUES DURANT L'EXPÉRIENCE CONTRÔLÉE.....	18
TABLEAU 7.	TAILLE DE L'ÉCHANTILLON POUR L'INTERPOLATION DES PROFONDEURS, PÉRIODE DE PRODUCTION ET VOLUME ESTIMÉ.....	19
TABLEAU 8.	DÉBITS MESURÉS POUR LES DIFFÉRENTS APPAREILS.....	23
TABLEAU 9.	DENSITÉ DE LA NEIGE PRODUITE.....	24
TABLEAU 10.	PROFILS DE TEMPÉRATURE DE LA NEIGE PRODUITE.....	25

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.	EXEMPLE D'INTERPOLATION DES PROFONDEURS DE NEIGE PRODUITE PAR KRIGEAGE ORDINAIRE.....	13
FIGURE 2.	EXEMPLE D'INTERPOLATION DES PROFONDEURS DE NEIGE PRODUITE À L'AIDE D'UNE TECHNIQUE DE LISSAGE PAR SPLINE CUBIQUE.....	14
FIGURE 3.	NUMÉROTATION DES SECTIONS DE PISTE UTILISÉES POUR CALCULER LES SUPERFICIES. POUR CHAQUE SEGMENT NUMÉROTÉ, LE PÉRIMÈTRE D'UN RECTANGLE ÉQUIVALENT A D'ABORD ÉTÉ ESTIMÉ, PUIS LA SUPERFICIE DE CE RECTANGLE A ÉTÉ CALCULÉE.....	16
FIGURE 4.	DISTRIBUTION SPATIALE DES PROFONDEURS DE NEIGE PRODUITES PAR LE CANON NIVIS.....	20
FIGURE 5.	DISTRIBUTION SPATIALE DES PROFONDEURS DE NEIGE PRODUITES PAR LA PERCHE HARNOIS.....	20
FIGURE 6.	DISTRIBUTION SPATIALE DES PROFONDEURS DE NEIGE PRODUITES PAR LE CANON BOYNE.....	21
FIGURE 7.	DISTRIBUTION SPATIALE DES PROFONDEURS DE NEIGE PRODUITES PAR LA TOURELLE.....	21
FIGURE 8.	DISTRIBUTION SPATIALE DES PROFONDEURS DE NEIGE PRODUITES PAR LE CANON KID WIZZARD.....	22
FIGURE 9.	DISTRIBUTION SPATIALE DES PROFONDEURS DE NEIGE PRODUITES PAR LE CANON LENKO 940.....	22
FIGURE 10.	DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE L'AIR DURANT L'AUTOMNE 2005.....	29
FIGURE 11.	DONNÉES DE VITESSE DU VENT DURANT L'AUTOMNE 2005.....	30

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Dans le cadre d'un projet recherche et développement en nivoculture initié par Le Domaine du ski Mont- Bruno Inc. en 2001, une étude comparative des certaines constituantes du Système de Production Automatisé de la Neige (SPAN) a été entreprise en 2005. Cette étude a pour objectifs la comparaison des taux de production de neige en mode opérationnel, l'estimation du volume total de neige, la comparaison des volumes de neige produits par différents appareils en fonction du débit et la comparaison de la qualité de la neige produite.

Pour ce faire, deux expériences séparées ont été complétées; la première durant la phase d'enneigement initial au début de la saison et la seconde lors d'une expérience contrôlée en mars 2006. Le volume de neige produit au début de l'année a été estimé à l'aide de deux techniques d'interpolation spatiale. Le volume total est estimé à 18 076 m³.

Les mesures de quantité et de qualité prises lors de l'expérience contrôlée ont permis de comparer la quantité et la qualité de la neige produite par les différentes composantes de fabrication de la neige du SPAN.

Les taux de production ont pu être calculé en divisant le volume de neige produite par chaque appareil par le temps de production. Le canon Lenko 940 a le taux de production le plus élevé (1,22 m³/min) tandis que le taux le plus faible a été enregistré pour la perche Harnois (0,13 m³/min).

Des mesures ponctuelles de débit ont été prises, mais se sont révélées peu fiables. Des mesures plus précises auraient permis d'estimer un rapport entre le volume d'eau utilisé et le volume de neige produite.

Les densités de neige ont été calculées et les moyennes ont varié entre 309,16 kg/m³ (Lenko 940) et 406,42 kg/m³ (Nivis 660). Les profils de la température de la neige ont révélé d'importantes différences entre les appareils. La température moyenne de la neige était -2,2 °C pour le Kid Wizzard alors qu'elle variait entre -6,6 et -10,7 °C pour les autres appareils.

Plusieurs recommandations pour des travaux futurs ont été faites. Parmi les mesures automatisées qui s'avéreraient utiles durant les opérations, les principales sont les temps d'opération de chaque appareil de production de neige et les débits utilisés par ces appareils. On recommande aussi de répéter les mesures de volume total de neige produite dans différentes conditions climatiques.

D'autres expériences contrôlées s'avèrent aussi nécessaires afin de confirmer les conclusions de ces premières expériences. Une instrumentation plus précise pour mesurer la qualité de la neige produite serait un atout pour ces expériences. Finalement, deux approches instrumentales sont suggérées afin de caractériser la structure granulométrique de la neige produite : l'utilisation d'un micro-pénétrromètre et/ou l'utilisation d'un scanner CT.

Un rapport d'activités couvrant la période de l'automne 2005 à l'automne 2006 est fourni en Annexe.

1. INTRODUCTION

1.1. Mise en contexte et problématique

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. Le Système de Production Automatisé de la Neige (SPAN) est complexe et intègre plusieurs composantes tels que les systèmes d'eau (bassin de rétention, le système de pompage etc.), le système énergétique, le système de prise de données de neige, le système de prise de données météorologiques, le système de tourelles (canons à neige sur tourelles), le système de canons à neige, le système de perches et les systèmes d'automatisation.

Dans le cadre de ce projet, la Chaire en hydrologie statistique a entrepris, en 2005, une étude comparative des certaines constituantes du SPAN. Dans un premier temps, l'emphase est mise sur l'analyse comparative des systèmes de production de neige (canons, perches et tourelles).

1.2 Description des objectifs spécifiques du projet

L'objectif général de cette étude consiste à comparer la quantité et la qualité de neige produite par différents systèmes de production de neige. La première saison d'échantillonnage a été complétée durant la saison 2005-2006. Conformément au protocole d'échantillonnage suggéré par St-Hilaire et Ouarda (2005), le suivi de la production de la neige a été fait en deux étapes :

- En situation opérationnelle, durant la période de production initiale de la neige avant l'ouverture de la station de ski.

- 1) En situation contrôlée, pour permettre une meilleure comparaison des instruments.

Les objectifs spécifiques de cette phase du projet sont :

- Comparer les taux de production de neige en mode opérationnel
- Estimer le volume total de neige produit en début de saison
- Comparer les volumes de neige produits par différents canons en fonction du débit durant une expérience contrôlée.
- Comparer la qualité de la neige produite en tenant par l'intermédiaire de mesures de densité et de température.

Cette première étude sur le terrain est basée sur un échantillonnage manuel. Cette approche permet, à coût moindre de vérifier quelles sont les variables parmi celles mesurées qui pourront éventuellement être échantillonnées automatiquement.

2. MÉTHODOLOGIE

Le protocole d'échantillonnage de St-Hilaire et Ouarda (2005) stipule que des mesures de quantité et de qualité de neige doivent être prises en temps réel durant la production de neige en début de saison (mode opérationnel) et durant une expérience contrôlée. En mode opérationnel, les mesures sont évidemment plus limitées afin d'éviter de nuire aux opérations de production. Des mesures plus détaillées ont été prises lors d'une expérience contrôlée dans la nuit du 2 au 3 mars 2006.

2.1 Échantillonnage en conditions opérationnelles

La production de neige pour la saison 2005-2006 a débuté en novembre 2005. L'échantillonnage a consisté essentiellement à mesurer les profondeurs de neige produite à l'aide d'une règle graduée en pieds et en pouces ($\pm 0,1$ po) enfoncée à plusieurs endroits le long de deux axes transversaux perpendiculaires qui couvraient la superficie du dôme de neige. La température de l'air et la vitesse du vent ont été mesurées durant la production. La longueur de la période de production a aussi été notée, ce qui permet d'estimer un taux de production pour chaque appareil. Il est important de noter que le même canon pouvait servir à la production de plusieurs buttes. Les dates d'échantillonnage et l'emplacement des tourelles et canons sont donnés dans le tableau 1.

Tableau 1. Appareils de production de neige utilisés, lieu de production et période d'échantillonnage durant les opérations.

Début		
Date	Pente	Tourelle/canon
06-12-05	7	T19
06-12-05	Sommet	T17
07-12-05	5	T16
12-12-05	5	T15
13-12-05	5	T14
21-12-05	5	T12
21-12-05	5-6	T10
21-12-05	4	C
21-12-05	5	T8
21-12-05	5	T9
21-12-05	4	C
21-12-05	5	T5
21-12-05	Butte Tony	C
21-12-05	En haut piste 10	C
21-12-05	Secteur remontée B	C
21-12-05	Remontée B et haut piste 10	C
21-12-05	En haut piste 10	C
21-12-05	Bas piste 10	C

En plus de la profondeur de neige, certaines variables météorologiques (température du thermomètre humide et vitesse du vent) ont été enregistrées à l'aide d'une station météo portative Kestrel 4000 durant la période de production.

2.2 Expérience contrôlée : 3 mars 2006

L'expérience contrôlée consistait en une étude comparative de la production de neige de différentes composantes du système de nivoculture. Six différents appareils ont été comparés

dans des conditions d’opération semblables, après la fermeture du centre dans la nuit du 2-3 mars 2006.

Les appareils testés comprenaient quatre canons différents, de même qu’une tourelle et une perche (tableau 2). À l’exception de la tourelle, dont la position est fixe, les appareils ont tous été déployés sur la même piste de ski (piste 4), du côté nord-ouest et orientés de façon à projeter la neige vers le sud, dans la piste 4. La tourelle utilisée pour l’expérience est la tourelle # 10, située à la jonction des pistes 4 et 5. Le canon de la tourelle a été orienté vers le sud et la neige produite s’accumulait dans la piste 5.

L’heure du début de la production de neige s’est étalée entre 00h09 (Boyne) et 00h54 (Kid Wizzard). La production s’est terminée entre 05h05 et 5h30 (tableau 2).

Tableau 2. Appareils de production de la neige utilisés lors de l’expérience contrôlée.

Appareil	Altitude (m)	Hauteur (m)	Élévation (°)	Heure du début de production	Heure de fin de production
Nivis 660	75	2,3	45	00h53	05h27
Perche Harnois	85		60°	00h56	05h16
Boyne	100		45	00h45	05h30
Tourelle avec Lenko 940	130	4	35	001h25	05h20
Kid Wizzard	140	1,8	45	01h15	05h05
Lenko 940	160		45	01h30	05h10

Les mesures prises durant la production peuvent être regroupées en trois catégories : mesures de quantité (profondeur de neige), mesures de qualité (densité et température) et paramètres d’opérations (débit et pression).

La principale mesure de quantité est la profondeur de la neige produite par chaque canon. Les mesures de profondeur ont été prises le long de deux axes transversaux perpendiculaires qui couvraient sur toute leur longueur l'axe principal et secondaire du dôme de neige produite. Une règle graduée au mm était insérée dans la neige à intervalles de distance réguliers et la profondeur ($\pm 0,1$ cm) était mesurée. Ces mesures permettent l'estimation du volume totale de neige produite sur une période donnée. Par la suite, un taux de production (m^3 /heure) a pu être calculé.

L'équivalent en eau de la neige (ÉEN) est la hauteur d'eau à laquelle correspond une profondeur de neige. Cette mesure permet de comparer la densité de la neige à différents endroits. La profondeur a aussi été mesurée aux points de mesure de l'ÉEN à l'aide d'un carotteur à neige et ce, pour un minimum de cinq points sur le dôme de neige produite par chaque appareil. La masse de la neige est mesurée à l'aide d'une pesée graduée en ÉEN. On peut reconvertir cette valeur en densité de la neige à l'aide de l'équation suivante :

$$\rho_n = \frac{\acute{E}EN \rho_{eau}}{H_n} \quad (1)$$

Où ρ_n et ρ_{eau} sont les densités de la neige et de l'eau respectivement et H_n est la profondeur de neige mesurée.

En plus de la densité de la neige, certaines mesures additionnelles de qualité de la neige ont été prises. La température de la neige a été mesurée à au moins deux profondeurs (près de la surface et près du fond) et parfois à trois profondeurs lorsque l'épaisseur du dôme le permettait.

Les paramètres d'opération mesurés incluent le débit d'eau acheminé à chaque canon. Ces valeurs ont été mesurées à l'aide d'un débitmètre branché temporairement aux conduites d'amenée d'eau pour chaque canon. Les mesures de débit ont été prises pour différentes conditions d'opérations (e.g. nombre d'anneaux de buses ouverts). À l'aide du débit et du volume de neige produit, il est possible de calculer un rapport entre le volume d'eau utilisé et le volume de neige produite :

$$R = \frac{V_n}{Q_{eau} T} \quad (2)$$

Où R est le rapport de volume (m^3 de neige/ m^3 d'eau), Q_{eau} est le débit d'eau utilisé par le canon et T est la période de production.

La pression à l'entrée des canons a aussi été notée durant les opérations pour chaque canon muni d'un manomètre fonctionnel. Finalement, les variations de plusieurs paramètres météorologiques ont été enregistrées. Ces mesures seront prises à l'aide d'une station météo portable Kestrel 4000 et incluent la vitesse du vent la température de l'air, (réelle et thermomètre humide ou « wet bulb ») la pression atmosphérique et l'humidité relative.

2.3 Méthodes d'analyses statistiques

L'estimation du volume de neige produit par chaque canon nécessite l'utilisation d'une méthode d'interpolation entre les points de mesure. Deux techniques d'interpolation ont été utilisées dans le cadre de cette étude. Lorsque le nombre de points était suffisant et qu'une structure de covariance spatiale était identifiable, l'interpolation a été faite par krigeage ordinaire. Cette approche nécessite le calcul d'un variogramme, qui est une mesure de la variance spatiale entre les points de mesure. St-Hilaire et Ouarda (2005) ont décrit cette méthode en détail. Après avoir modélisé la variation spatiale à l'aide du variogramme, il est possible d'estimer les profondeurs de neige sur une grille de points couvrant toute la région d'intérêt à l'aide d'une combinaison linéaire des profondeurs prises à des points de mesure dans le voisinage du point d'intérêt. La valeur estimée de $\chi(\mathbf{p}_0)$, identifiée à un endroit spécifique \mathbf{p}_0 (où il n'y a pas de valeurs mesurées), est donnée par l'équation de régression :

$$\chi(\mathbf{p}_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \chi(\mathbf{p}_i) \quad (3)$$

Dans l'équation (3), λ_i représente la pondération donnée à chaque estimation qui minimise la variance. Lorsque l'interpolation a été faite par krigeage, une carte de variance spatiale relative a aussi été produite afin d'évaluer l'incertitude de l'approche. De plus, on a procédé à une validation croisée. Cette validation utilise une procédure de rééchantillonnage de type « jack nife ». Il s'agit, pour chaque point de mesure, de procéder à un krigeage sans la mesure et de comparer l'estimation obtenue au point d'intérêt avec la mesure qui a été omise.

Lorsque le nombre de points de mesure ne permet pas l'utilisation du krigeage (surtout lors de l'échantillonnage durant les opérations) une technique de lissage spatial a été utilisée pour procéder à l'interpolation. Une spline cubique a permis d'interpoler les valeurs de profondeur de neige entre les points de mesure. Entre deux points x_i et x_{i+1} , la partie $S_i(x)$ d'une spline $S(x)$ d'ordre 3 (cubique) permettant l'interpolation sur une distance $\delta_i=[x_i ; x_{i+1}]$ est décrit par l'équation (4) :

$$S_i(x) = C_i^3(x - x_i)^3 + C_i^2(x - x_i)2 + C_i^1(x - x_i)^2 + C_i^0 \quad (4)$$

Où les C_i sont des coefficients d'ajustement. Le cas bi-dimensionnel (comme dans la présente étude) est une plus complexe à décrire mathématiquement et fait appel à deux fonctions d'interpolation qui permettent une interpolation calculée à l'aide de leur produit tensoriel.

L'analyse comparative de la moyenne de certaines variables a été réalisée à l'aide de l'analyse de variance à un facteur (One-way ANOVA) décrite par St-Hilaire et Ouarda (2005). Ce test statistique vérifie si la moyenne des échantillons est significativement différente. Au préalable, le test de Shapiro-Wilks a été utilisé pour vérifier si l'échantillon suit une loi normale. Le seuil de signification a été fixé à 0,05.

3. RÉSULTATS

Les résultats des deux programmes d'échantillonnage sont présentés séparément. Dans les deux cas, on débute par la présentation des conditions météorologiques, qui ont une influence certaine sur la quantité et la qualité de la neige produite. Par la suite, les estimations de quantité de neige produite sont présentées et finalement, dans le cas de l'expérience contrôlée, les variables de qualité de la neige ayant été mesurées sont décrites.

3.1 Échantillonnage durant la production de neige en début de saison

Les données météorologiques récoltées montrent la variabilité des conditions atmosphériques durant la production initiale de neige en décembre 2005 (tableau 3). Les températures de l'air ont varié entre -0,3 et -12,9 °C tandis que la vitesse du vent la plus faible était de 1,9 km/h, alors que la plus élevée atteignait 12,2 km/h. Les données recueillies sont ponctuelles et ne sont peut-être pas une représentation complète du climat de chaque journée. Cependant, le tableau 3 indique que la journée du 21 décembre a été la plus froide (moyenne = -7,4 °C) et la plus venteuse (moyenne = 10,5 km/h), tandis que le 12 décembre a été la journée la plus chaude (-2 °C) et la moins venteuse (2 km/h en moyenne).

Tableau 3. Mesures météorologiques prises durant la période de production de neige en décembre 2005.

Date	Heure	Temp, Thermomètre humide (°C)	Temp air (°C)	Vent (km/h)
2005-12-12	16:45	-4,1	-0,3	2
2005-12-12	16:50	-6,6	-5,2	2
2005-12-13	11:00	-6	-4	1,9
2005-12-13	11:30	5,2	-3,7	2
2005-12-13	19:00	-9,9	-7,2	2,7
2005-12-13	19:30	-4,3	-2,8	1,8
2005-12-14	19:17	-9,9	-7,2	2,7
2005-12-14	19:33	-8,4	-6,7	2,7
2005-12-14	19:37	-9,6	-8,4	2,7
2005-12-14	19:55	-9,6	-8,4	2,7
2005-12-14	20:21	-13,8	-12,9	4
2005-12-14	20:21	-13,8	-12,9	4
2005-12-14	21:25	-6,4	-5,3	1,3
2005-12-15	19:00	-11	-8,8	15
2005-12-15	19:35	-11,5	-9,6	12,2
2005-12-15	20:14	-8	-10	9,4
2005-12-15	20:14	-8	-6,9	7,4
2005-12-15	20:45	-8	-6,9	7,4
2005-12-21	18:35	-8,7	-6,1	15
2005-12-21	18:35	-8,7	-6,1	15
2005-12-21	19:40	-6,9	-4,8	2,9

Le volume de neige produite a été estimé à l'aide des techniques d'interpolation décrites dans le chapitre précédent. Pour chaque dôme de neige produite, un volume a été calculé. Les figures 1 et 2 donnent des exemples de volumes ainsi interpolés. Les figures associées aux autres dômes de neige produite en décembre 2005 sont données dans l'annexe 1. Les unités de mesures du

système impérial sont utilisées pour les graphiques, mais elles ont été converties en unités métriques pour le calcul du volume. Les volumes totaux produits par chaque canon pour chaque date d'échantillonnage sont donnés dans le tableau 4. En tenant compte uniquement des dômes échantillonnés, le volume total de neige produite est de 15 426,4 m³.

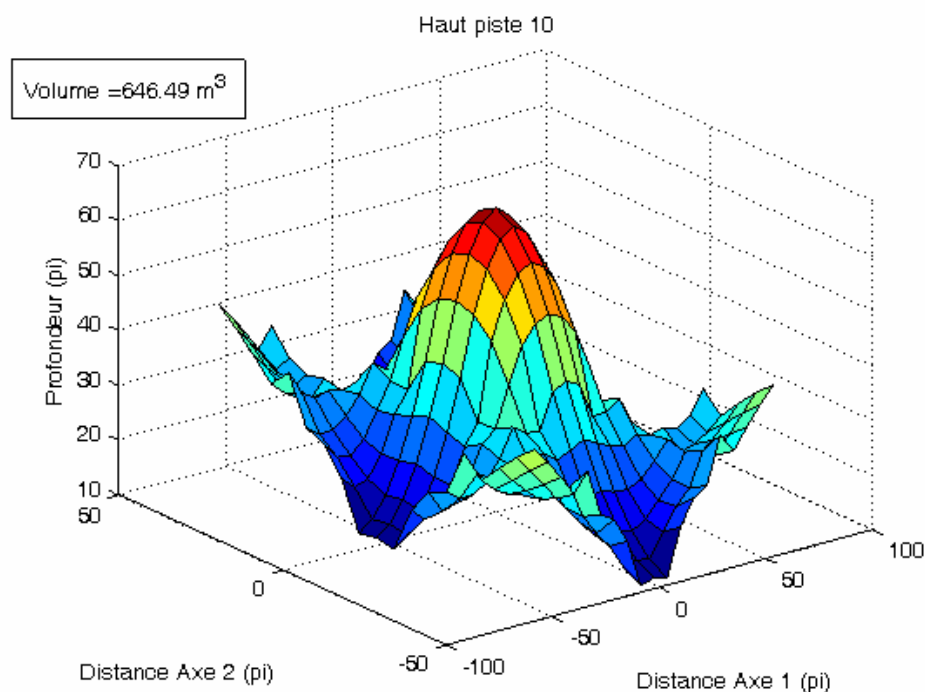


Figure 1. Exemple d'interpolation des profondeurs de neige produite par krigeage ordinaire.

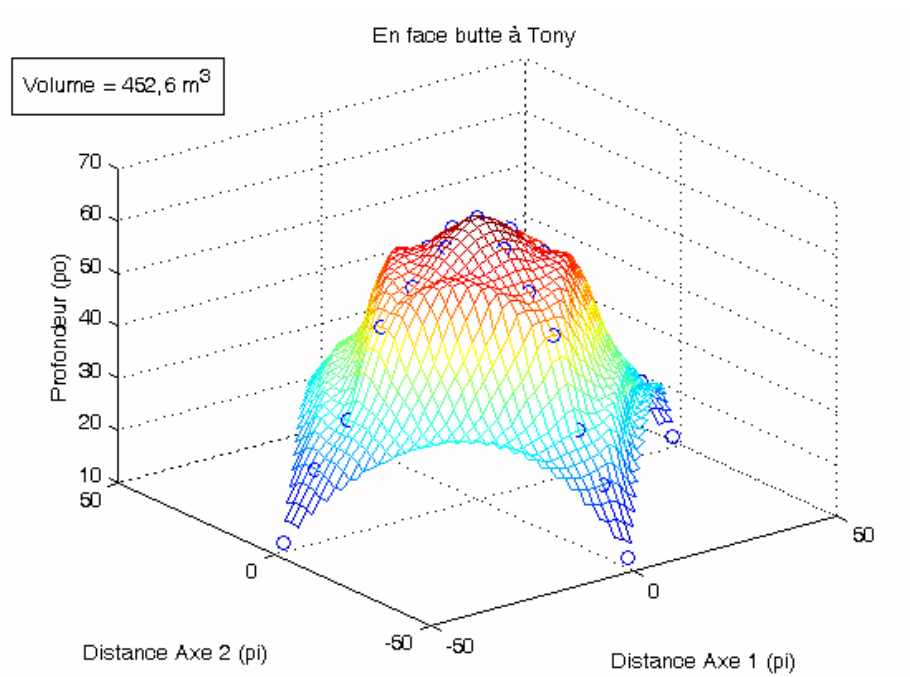


Figure 2. Exemple d'interpolation des profondeurs de neige produite à l'aide d'une technique de lissage par spline cubique.

Tableau 4. Volume de neige associé à chaque canon et chaque piste durant la période de production de neige de décembre 2005.

Tourelle/Canon	Volume
T5	410,30
5	1712,00
T8	358,30
T9	606,50
T10	1992,30
T12	1132,00
T14	2201,60
T15	357,60
T16	48,70
T17	594,90
T19	765,70
canon 1 RM 5	1347,90
Canon 2	451,00
canon 3 haut piste 10	160,20
Canon 4 en haut piste 10	2752,80
Canon 5 Remontée B	80,01
Canon 6 en face butte Tony	454,60
Total	15426,41

Il faut cependant tenir compte du fait que durant la production initiale de neige, un certain volume de neige soufflée par le vent se dépose entre les dômes. Les observations prises en décembre 2005 font état d'une couche de neige continue entre les dômes ayant une profondeur moyenne de 15 cm. La figure 3 et le tableau 5 donnent un aperçu de la superficie de chaque pente calculée à l'aide du logiciel ARCVIEW

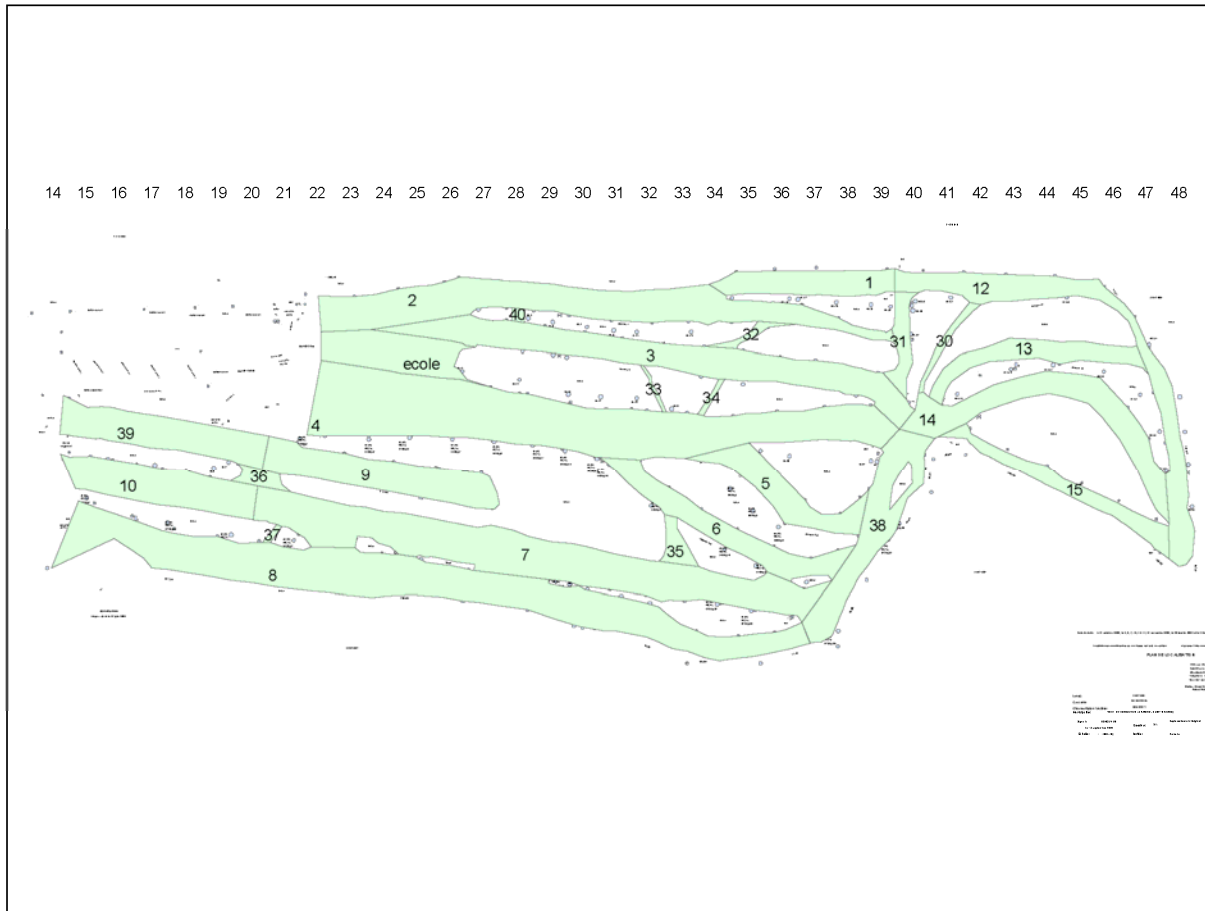


Figure 3. Numérotation des sections de piste utilisées pour calculer les superficies. Pour chaque segment numéroté, le périmètre d'un rectangle équivalent a d'abord été estimé, puis la superficie de ce rectangle a été calculée.

Tableau 5. Périmètre et surface de différents segments de pistes identifiés dans la figure 4.

Numéro du segment piste	Périmètre (m)	Surface (m ²)
1	364.83	3373.79
2	1109.55	13026.18
3	1036.60	11123.45
4	1156.73	22816.63
5	429.64	3722.30
6	561.37	4728.24
7	1147.13	17312.67
8	1483.01	21383.12
9	483.12	6107.00
10	411.86	5555.62
12	957.27	7807.29
13	464.24	3327.28
14	680.41	6666.86
15	515.70	3033.72
30	206.61	542.07
31	238.86	1313.50
32	182.00	412.38
33	102.30	158.70
34	86.72	173.27
35	142.75	786.52
36	137.92	620.58
37	50.79	101.37
38	586.29	5683.68
39	446.46	5537.84
40	46.78	133.83

Selon la figure 3 et le tableau 5, la superficie totale des pistes 4 et 5 est 26 534 m². La piste 10 (# 30 sur la figure 4) a une superficie de 542 m². Durant la production de neige au début de la saison, les buttes situées sur ces pistes couvraient une superficie d'environ 9411 m². (Voir Annexe 1). Si on attribut une profondeur moyenne de neige produite de 15 cm sur l'ensemble de la surface non couverte par les buttes, le volume de neige additionnel est estimé à 2650 m³. Le volume total de neige produite est donc estimé à 18 076 m³. (15426 m³+2650 m³).

3.2 Expérience contrôlée

Les variables météorologiques ont été mesurées à la base de quatre des six appareils avant ou immédiatement après le début de la production. Le tableau 3 présente la compilation des valeurs mesurées. La vitesse du vent sur la piste 4 a varié entre 2,2 et 2,6 m/s. L'humidité relative initiale était de l'ordre de 63%. Les températures de l'air mesurées ont varié entre -9,5°C et -8,4°C. L'écart entre la température de l'air et la température du thermomètre humide (« wet bulb ») variait beaucoup d'un site à l'autre (0,1°C pour la perche harnois et 2°C pour le kid Wizzard). Cet écart est une mesure indirecte de l'humidité de l'air. Un grand écart est associé à un air plus sec. Donc, l'écart le plus grand entre les deux températures (Kid Wizzard) devrait correspondre à la plus faible valeur d'humidité relative, ce qui n'est pas le cas. Cette différence est probablement due à la précision des senseurs de la station portable. Évidemment, la pression diminue en fonction de l'altitude de chaque appareil déployé sur la piste.

Tableau 6. Mesures météorologiques durant l'expérience contrôlée.

Canon	Heure	Vitesse du vent (m/s)	Humidité relative (%)	Pression (hPa)	Température de l'air (°C)	Température thermomètre humide (°C)
Nivis	01h00	2,6	63,5	1004,4	-8,8	-9,4
Perche	01h10	2,3	64,2	1002,4	-9,5	-9,6
Tourelle	01h30	2,8	62,2	999,6	-9,1	-10,4
Kid Wizzard	01h15	2,2	63,6	998,4	-8,4	-10,4

Les volumes de neige produits ont été calculés à partir des profondeurs de neige mesurées et à l'aide des méthodes d'interpolation décrites à la section précédente. Le nombre de points de mesures prises à chaque site était suffisant pour modéliser la structure de variance spatiale à l'aide d'un variogramme. Les volumes ont donc été estimés par krigeage. Étant donné que les mesures de profondeur ont été prises en succession, les volumes estimés sont associés à des périodes de production qui diffèrent d'un appareil à l'autre. Le tableau 6 présente la taille de l'échantillon et la période de production associée à chaque appareil. Le canon Lenko 940 a le taux de production le plus élevé (1,22 m³/min) tandis que le taux le plus faible a été enregistré pour la perche Harnois (0,13 m³/min) et le canon Nivis (0,19 m³/min). La tourelle, qui est équipée d'un canon Lenko 940 a obtenu un taux de production de 0,44 m³/min. Cependant, le volume produit par la tourelle a probablement été sous-estimé. En effet, les observations sur le terrain indiquent qu'une portion significative de la neige produite était projetée hors piste. Les figures 4 à 9 présentent l'interpolation spatiale des profondeurs de neige et les volumes estimés sont rapportés sur ces figures et dans le tableau 7. Il est important de noter que l'unité de l'axe vertical des figures 4 à 9 est le centimètre, alors que les axes horizontaux sont en mètres.

Tableau 7. Taille de l'échantillon pour l'interpolation des profondeurs, période de production et volume estimé.

Appareil	Nombre de points de mesure	Période de production de neige (minutes)	Volume (m ³)	Taux de production (m ³ /min)
Nivis 660	41	262	50,8	0,19
Perche Harnois	35	231	29,8	0,13
Boyne	35	249	58,7	0,24
Tourelle avec Lenko 940	45	187	82,4 ?	0,44
Kid Wizzard	42	241	108	0,45
Lenko 940	35	186	226	1,22

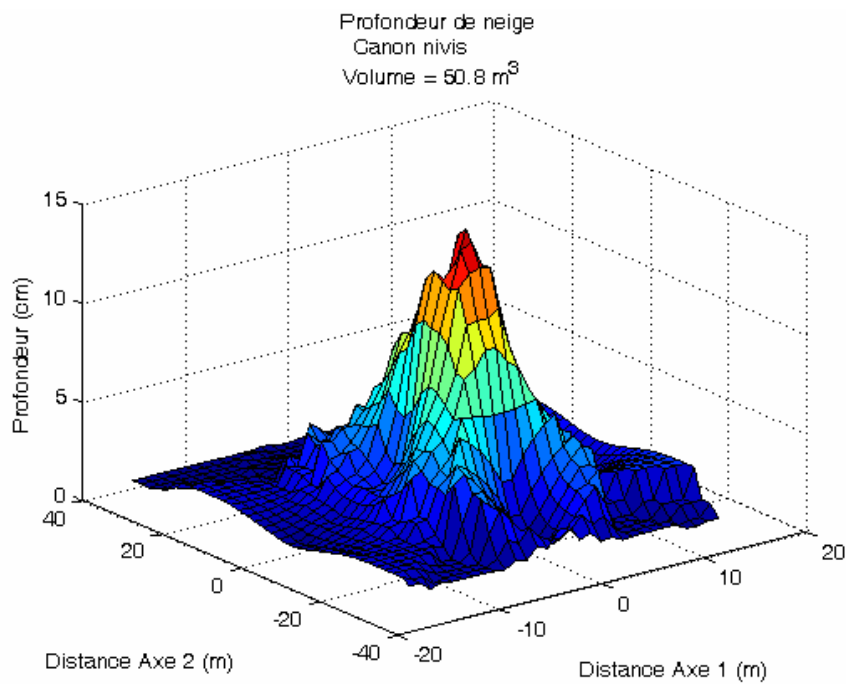


Figure 4. Distribution spatiale des profondeurs de neige produites par le canon Nivis.

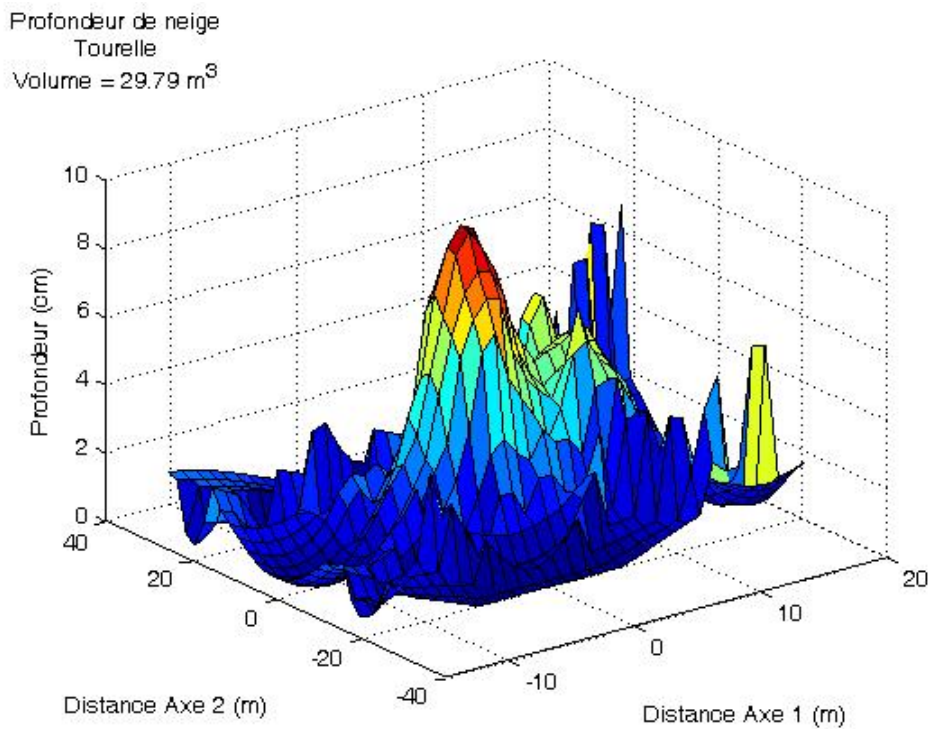


Figure 5. Distribution spatiale des profondeurs de neige produites par la perche Harnois.

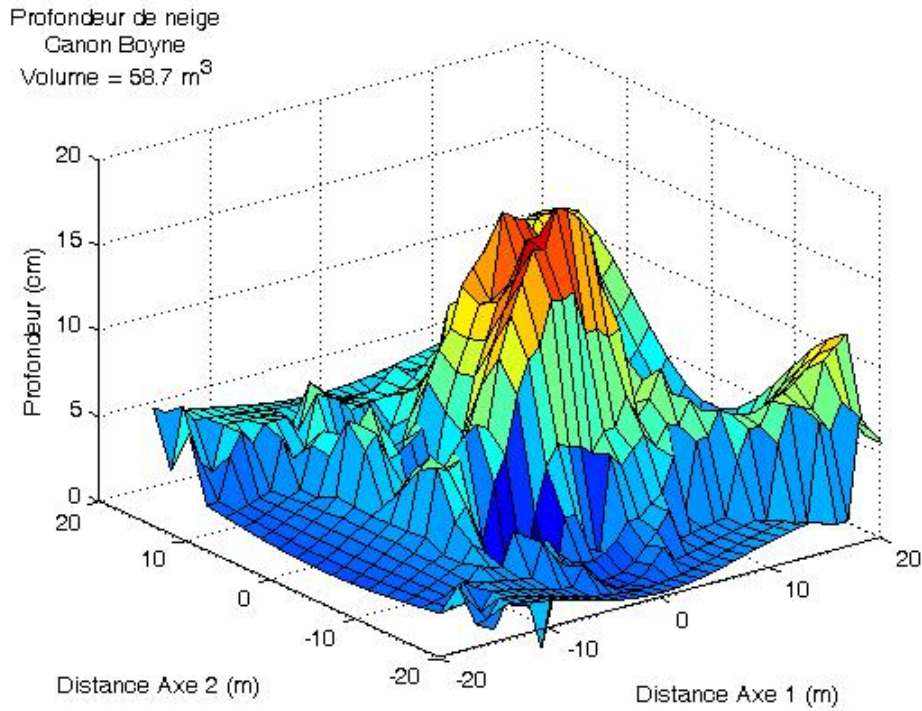


Figure 6. Distribution spatiale des profondeurs de neige produites par le canon Boyne

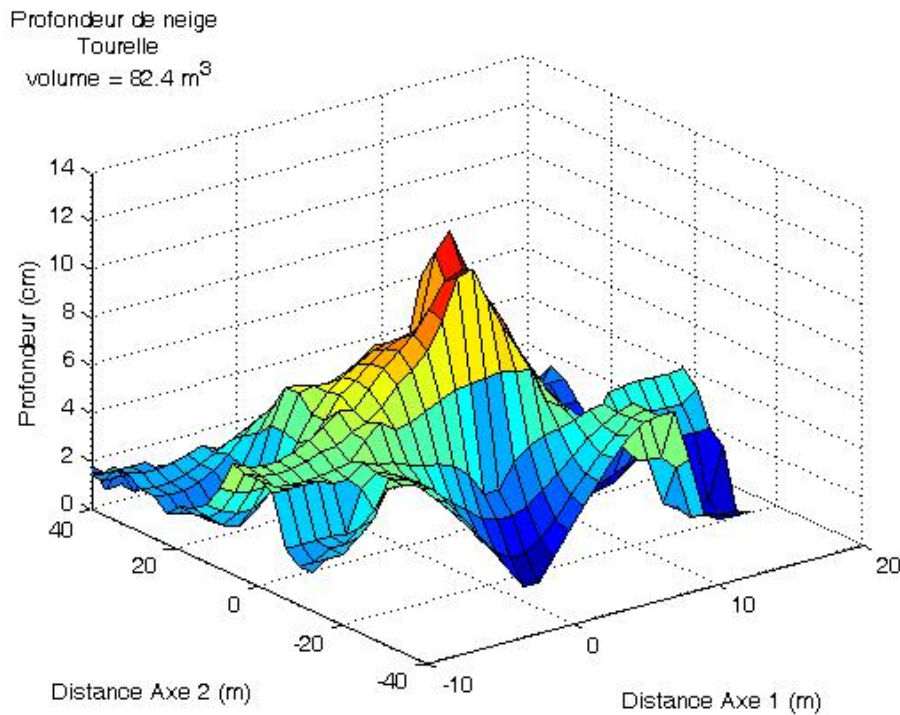


Figure 7. Distribution spatiale des profondeurs de neige produites par la tourelle.

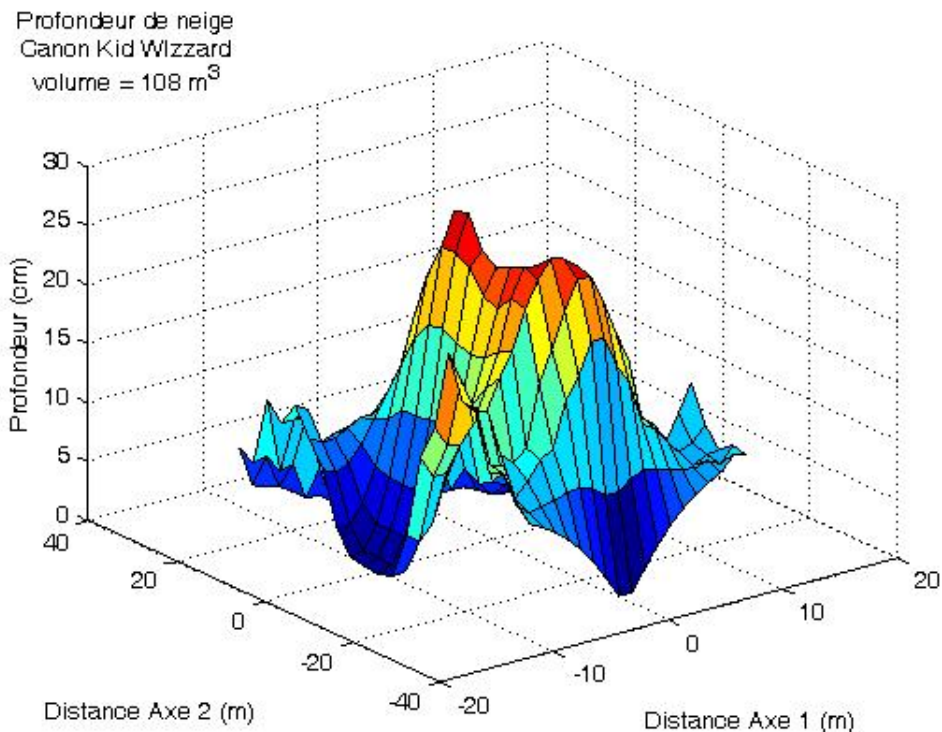


Figure 8. Distribution spatiale des profondeurs de neige produites par le canon Kid Wizzard.

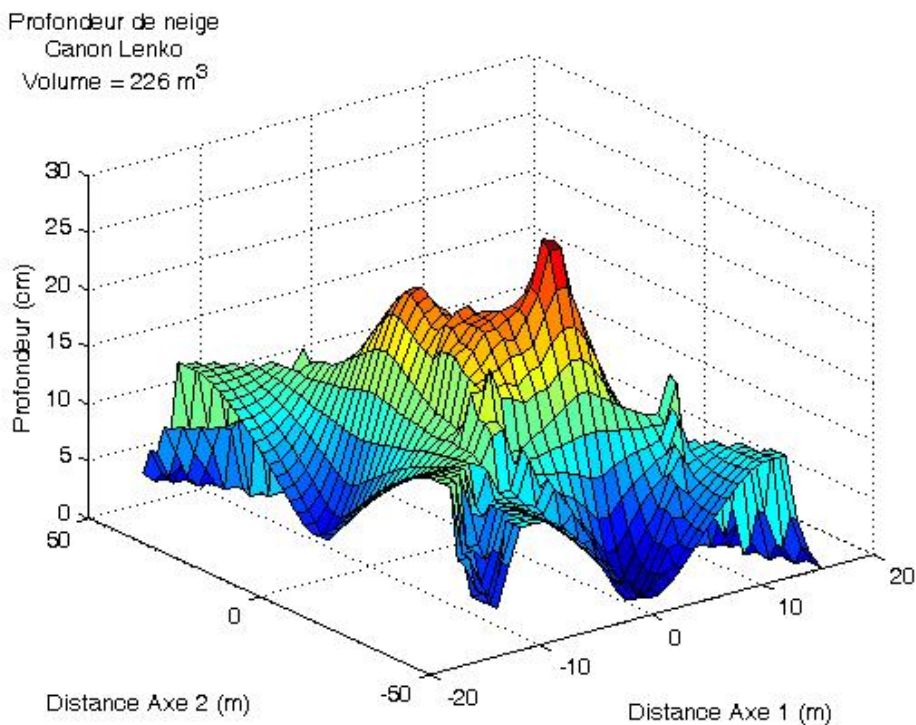


Figure 9. Distribution spatiale des profondeurs de neige produites par le canon Lenko 940.

Les débits d'eau utilisée pour produire la neige ont aussi été enregistrés (tableau 8). Ces débits nous permettent de calculer un rapport entre le volume de neige produite et le volume d'eau utilisé. L'appareil utilisé semblait donner des résultats très variables et la communication des résultats par radio a pu amener des erreurs dans les prises de données.

Tableau 8. Débits mesurés pour les différents appareils.

Canon	Débit (GPM)	Débit (l/min)	Temps de production (min)	Volume d'eau utilisé (m ³)	Volume de neige (m ³)	Rapport (m ³ neige / m ³ eau)	# buses ou anneaux ouverts
Nivis		195	262	51.1	50.8	0.99	
Perche		75	231	17.3	29.8	1.72	6 buses fines/10
Tourelle		180	187	33.6	82.4	2.44	3 anneaux
Lenko		250	186	46.5	226	4,86	3 anneaux
Lenko Théorique (160 PSI)	62	234,7	186	43,7	226	5,17	3 anneaux

Selon les données du tableau 8, les canons Kid wizzard et Lenko ont obtenu les rapports les plus élevés de volumes de neige par volume d'eau (8,55 et 4,86 respectivement). Seul le canon Nivis a obtenu un rapport inférieur à 1. Encore une fois, le rapport calculé pour la tourelle est probablement biaisé parce qu'une portion significative de la neige produite était hors piste et n'a pu être mesurée. Afin de comparer ces mesures aux spécifications du fabricant, le débit mesuré pour le canon Lenko a été remplacé par le débit fourni par le fabricant lorsque le canon opère à une pression de 160 PSI avec 3 anneaux ouverts (www.lenkosnow.com). Les calculs exécutés avec cette valeur théorique de débit (234,7 l/min) sont aussi donnés dans le tableau 8. On constate que, malgré les erreurs possibles de mesure sur le terrain, les valeurs théoriques et mesurées sont assez rapprochées (4,86 et 5,17 respectivement).

Les densités de neige ont été calculées à partir des mesures d'ÉÉN et à l'aide de l'équation 1. Le tableau 9 reproduit les densités moyennes de la neige produite par chaque appareil. Les mesures détaillées sont présentées dans l'annexe 2. Ces densités moyennes ont varié entre 309,16 kg/m³ (Lenko 940) et 406,42 kg/m³ (Nivis 660). Les valeurs typiques de densité de la neige cultivée varient entre 300 et 500 kg/m³, selon Fauve et al. (2002).

Tableau 9. Densité de la neige produite

	densité moyenne (kg/m ³)	Écart-type (kg/m ³)	N
Nivis 660	406,42	50,46	13
Perche	325,61	77,83	10
Boyne	313,67	90,83	6
kid wizzard	398,54	48,86	11
Tourelle	337,31	76,81	7
Lenko 940	309,16	103,42	8

Après avoir vérifié la normalité de la distribution des valeurs de densité ($W= 0,96$, $p = 0.16$), l'analyse de variance a confirmé que ces différences de densité sont statistiquement significatives ($F=3,25$, $p=0,017$). Un test a posteriori a été appliqué aux données afin d'identifier lesquels parmi les densités moyennes contribuent le plus à cette différence significative. L'annexe 3 donne les résultats du test (Duncan Multiple Range) qui démontre que c'est la faible densité de la neige produite par le canon Kid Wizzard qui contribue le plus à cette différence.

Les températures de la neige, qui ont été mesurées dans la partie la plus profonde du dôme, sont rapportées dans le tableau 10. Toutes les températures ont été mesurées vers la fin de la période de production, entre 04h58 et 05h30. Le risque que les variations de température mesurées soient causées par des variations temporelles de la température de l'air est ainsi minimisé, puisque toutes les mesures ont été prises dans un intervalle de 32 minutes. Les températures moyennes de la neige produite varient beaucoup selon les appareils. Ainsi, la température du Kid Wizzard est nettement plus élevée (-2,2 °C) que celles mesurées aux autres sites, pour lesquels la moyenne varie entre -6,6 et -10,7 °C.

Tableau 10. Profils de température de la neige produite.

Appareil	Température près de la surface (°C)	Température au milieu (°C)	Température près du fond (°C)	Moyenne (°C)	Écart (max-min) (°C)
Nivis 660	-11,1	-9,7	-9,1	-9,97	2
Perche Harnois	-12,6	-10,1	-9,3	-10,67	3,3
Boyne	-7,1	-7,15	-7,8	-7,35	0,7
Tourelle avec Lenko 940	-6,7	-5,7	-7,5	-6,63	1,8
Kid Wizzard	-2,9	-2,0	-1,7	-2,20	1,2
Lenko 940	-6,9	-6,6	-8,2	-7,23	1,6

4. DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

Cette première tentative d'échantillonnage comparatif de la quantité et de la qualité de neige produite a permis de dégager plusieurs conclusions importantes sur la méthodologie et sur les résultats.

Dans un premier temps les mesures prises en début de saison ont permis d'établir une méthodologie pour calculer le volume total de neige produite. Ce volume est estimé à plus de 18 000 m³. De plus, les volumes répertoriés à l'annexe 1 pour chaque tourelle permettent une comparaison des volumes produits par chaque unité, sans toutefois permettre de comparer les taux de production. La tourelle 14 a produit 2201 m³ de neige durant les opérations d'enneigement en début de saison, ce qui est le plus gros volume de neige associé à une tourelle durant cette période.

L'expérience de mesure manuelle durant les opérations en début de saison a permis de constater à quel point les conditions de production limitent la capacité de prendre des mesures manuelles. Les seules mesures quantitatives qui se sont avérées utilisables pour cette période sont les profondeurs de neige, à partir desquelles un volume total de neige a pu être estimé. Cette estimation totale pourrait être répétée à chaque début de saison afin de comparer la production d'une année à l'autre.

Cependant, il est évident que dans une optique d'optimisation du SPAN, il serait avantageux que certaines variables soient enregistrées automatiquement. À titre d'exemple, un enregistrement des heures de départ et d'arrêt de chaque canon ou tourelle aurait permis de calculer un taux de production pour chaque composante. Si les mesures de débit étaient prises automatiquement, il serait aussi possible de calculer un rapport de volume d'eau utilisée par rapport au volume de neige produite semblable à ceux calculés dans le tableau 8.

Les mesures de qualité de neige produites sont plus difficilement automatisées. La densité de la neige demeure la mesure de qualité la plus facile à mesurer. Afin d'obtenir des mesures plus fiables, il serait pertinent que le centre se dote d'une balance portative avec tarage et calage

automatique. La mesure de la température de la neige peut aussi être prise rapidement et peut donner certaines indications sur sa capacité isolante. On pourrait envisager le déploiement de chaîne de thermographes avant le début de la production de neige afin que la température soit mesurée à intervalles réguliers à différentes profondeurs durant la production.

Finalement, il demeure primordial de faire le suivi de l'évolution des conditions météorologiques durant la production de neige. À cet effet, deux stations météorologiques *Wireless Vantage Pro* ont été installées au pied et au sommet du centre. Les données de ses deux stations sont récupérées régulièrement. Ces données vont permettre l'établissement d'une climatologie locale et pourront être utilisées en mode opérationnel. Un exemple des séries chronologiques obtenues jusqu'à présent est donné dans les figures 10 et 11.

La prise de données en mode opérationnel devrait idéalement continuer durant plusieurs saisons afin de permettre un échantillonnage qui couvre toute la gamme des conditions climatiques et opérationnelles possibles.

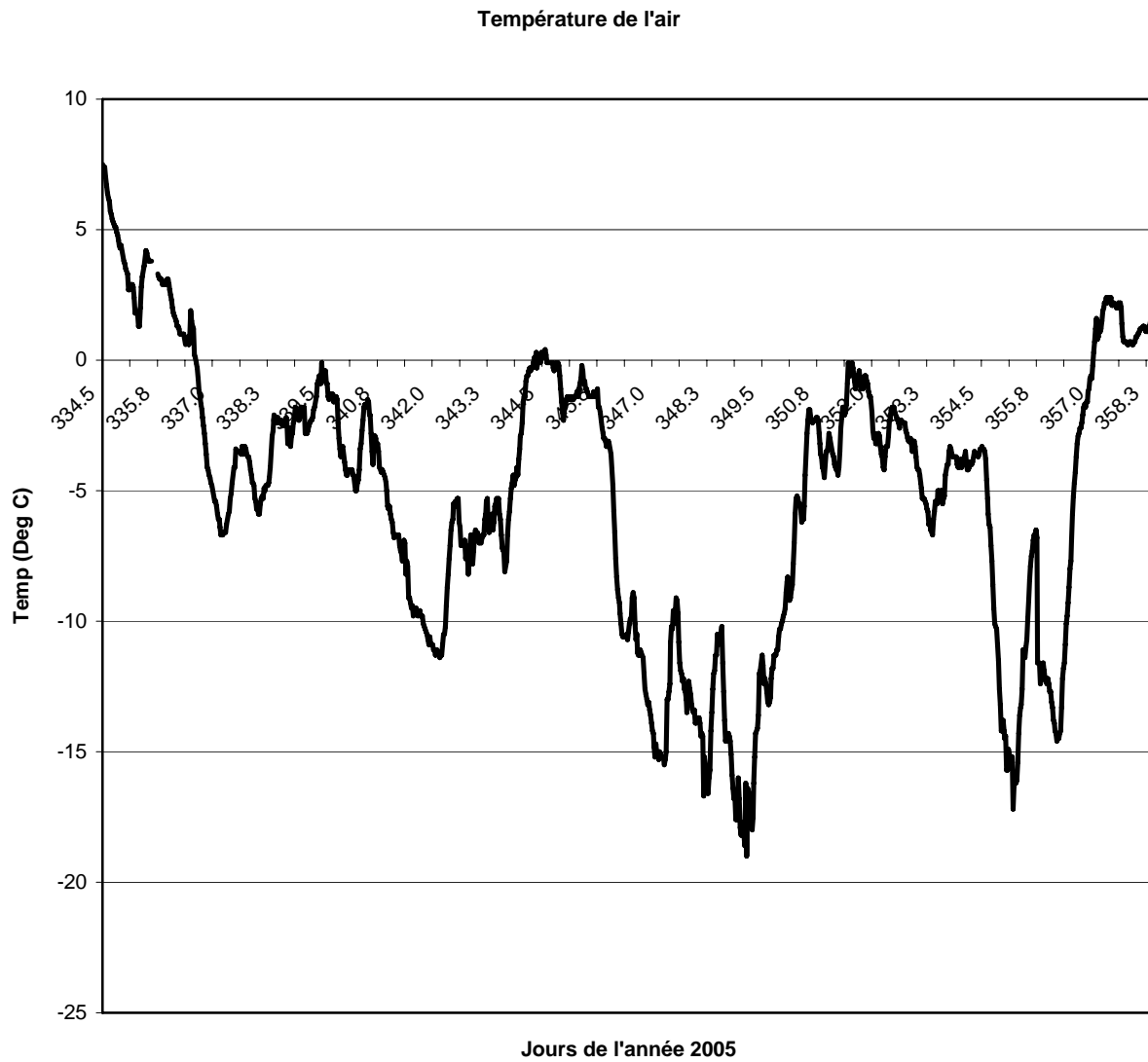


Figure 10. Données de température de l'air durant l'automne 2005.

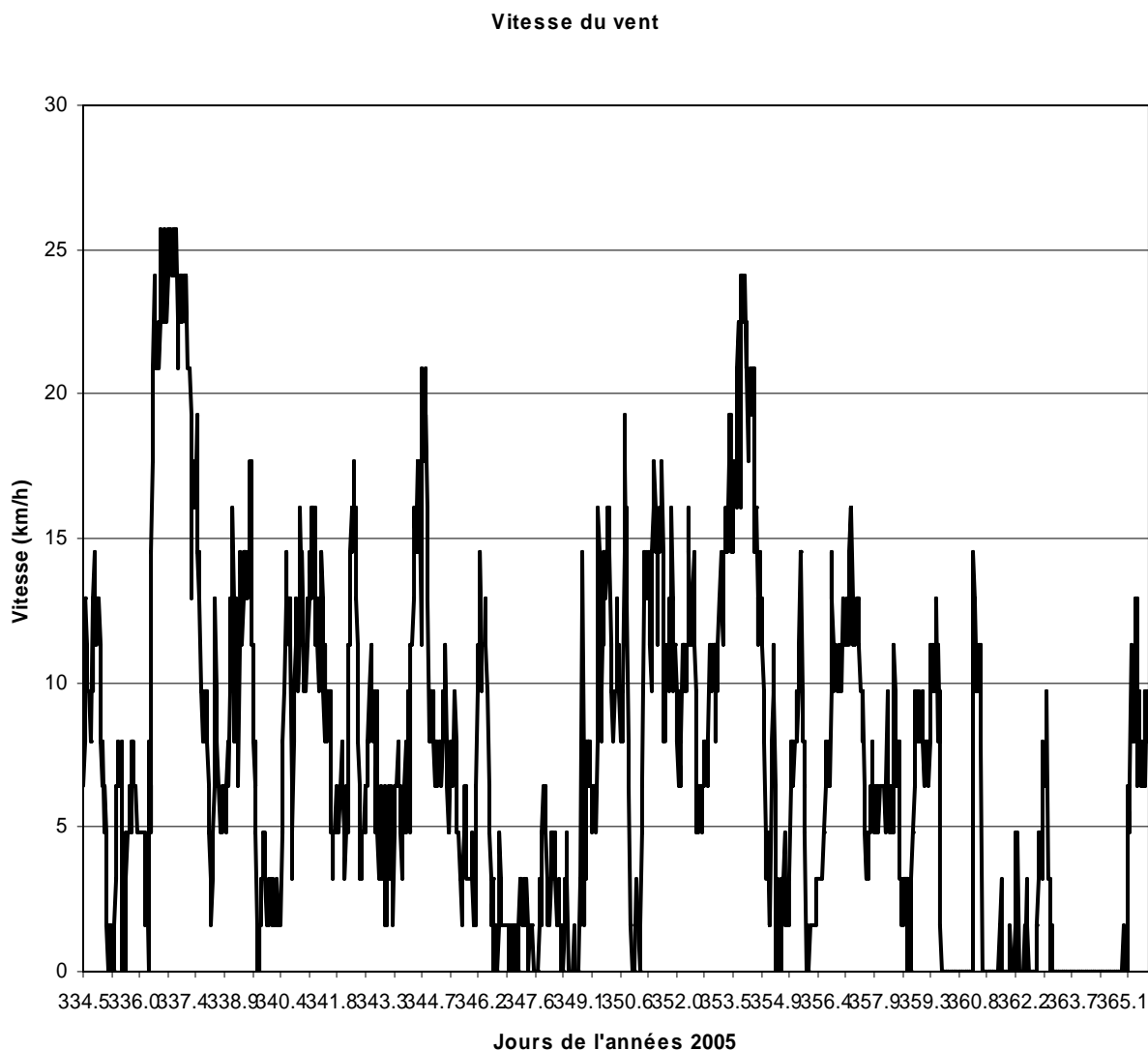


Figure 11. Données de vitesse du vent durant l'automne 2005.

Les résultats de l'expérience contrôlée de mars 2006 ont permis de faire une première comparaison des taux de production de différentes composantes du SPAN et de fournir un peu d'information sur la qualité de neige produite. Ainsi, les taux de production ont varié entre 0,13 (perche) et 1,22 m³/min (Lenko 940). Le meilleur rapport entre le volume de neige produite et le volume d'eau utilisé est de 8,55 pour le Kid Wizzard, tandis que le plus faible est de 0,99 pour le Nivis. La neige ayant la densité la plus faible est celle produite par le canon Lenko 940 (0,006 g/cm³). Finalement, le gradient de température le plus élevé entre la surface et le fond sur les buttes de neige a été mesuré dans la neige produite par la perche Harnois.

L'expérience de l'année 2005-2006 nous porte à penser qu'il faut continuer à procéder à certaines expériences contrôlées en dehors des opérations d'enneigement du centre. Les objectifs fixés initialement au début de ce projet n'ont été atteints que partiellement. D'abord, il faut se rappeler que lors de l'échantillonnage de mars 2006, un seul débitmètre était disponible et une seule mesure de débit par canon a été prise. Il se peut que le débit ait fluctué durant la période de production. Des mesures de débit en continu seraient préférables.

Les mesures de qualité ont aussi été mesurées avec des instruments (balance et thermomètre) ayant une précision limitée. Il serait intéressant de refaire ces mesures avec de manière plus précise et augmenter la taille de l'échantillon. Finalement, le pénétromètre Pandalp qui avait été loué pour mesurer le profile granulométrique de la neige produite n'a pas fonctionné. Une information quantitative sur la granulométrie serait très utile afin de comparer la qualité de neige produite par les différents canons. On pourrait envisager l'utilisation d'un pénétromètre plus sophistiqué tel que le Snow Micropen (Voir St-Hilaire et Ouarda, 2005 pour plus de détails). Une approche alternative consiste à prélever des carottes de neige produite et à en analyser la structure à l'aide d'un scanner CT (Siemens Somatom) disponible au centre Eau, Terre et Environnement de l'INRS. Des tests préliminaires pour l'analyse de carottes de neige ont été faits dans le cadre d'autres projets du centre et la méthode s'avère prometteuse.

Finalement, il est recommandé qu'un nouveau plan d'échantillonnage soit mise en œuvre et que ce plan s'échelonne sur plusieurs saisons, afin de couvrir le plus grand éventail possible des conditions rencontrées durant les opérations d'enneigement.

5. RÉFÉRENCES

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.

Fauve, M., H. Rhyner et M. Schneebeli. 2002. Préparation et entretien des pistes. Manuel pour le praticien. Davos, Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches. 133 p.

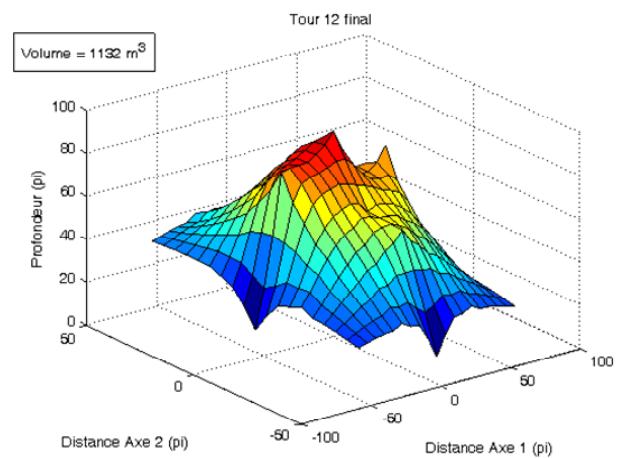
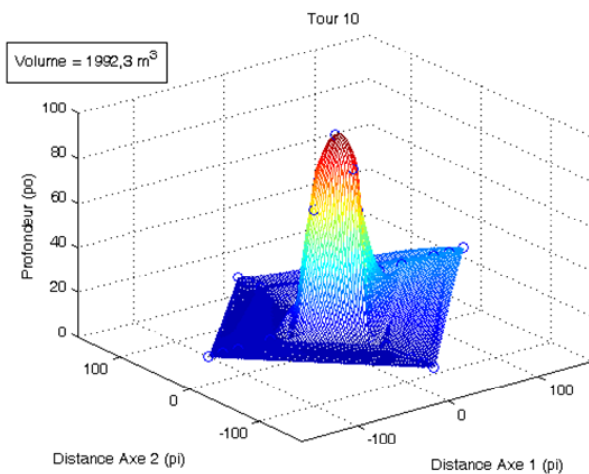
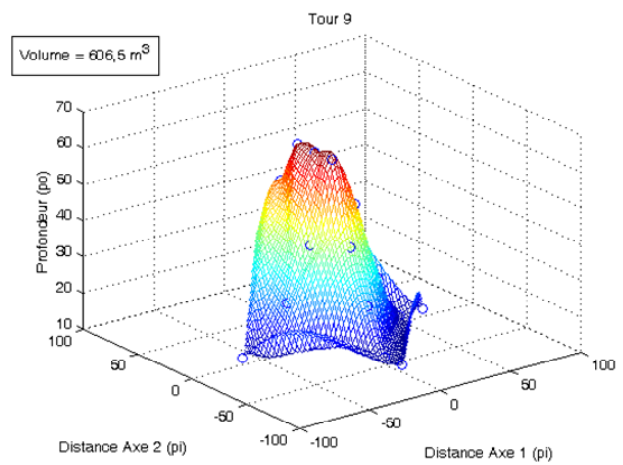
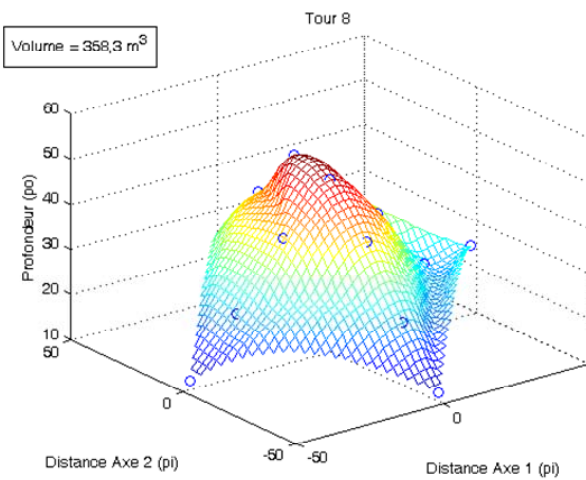
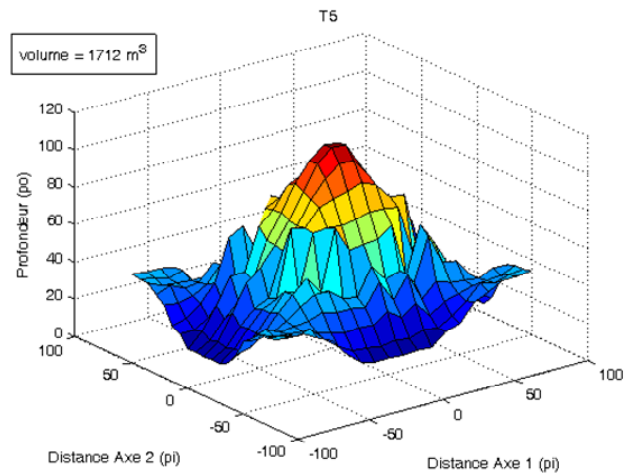
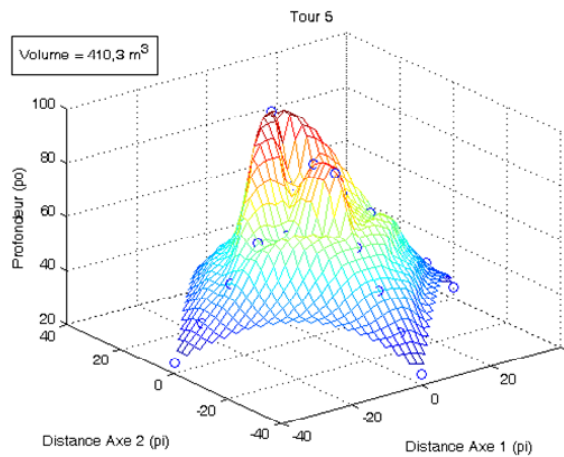
Pielmer, C. (2003). Textural and mechanical variability in of mountain snowpacks. Thèse de doctorat, Université de Bern.

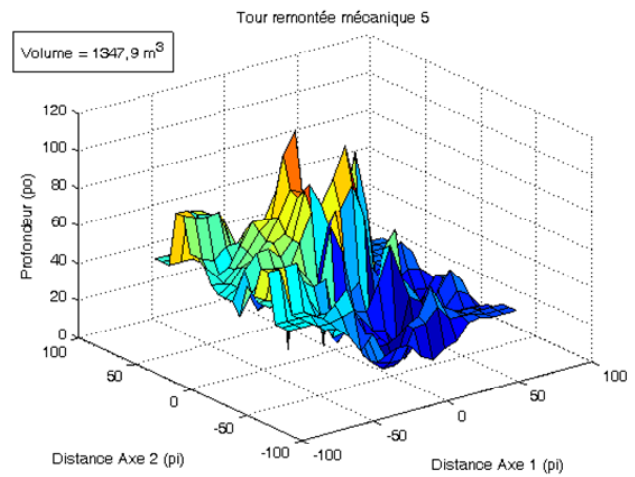
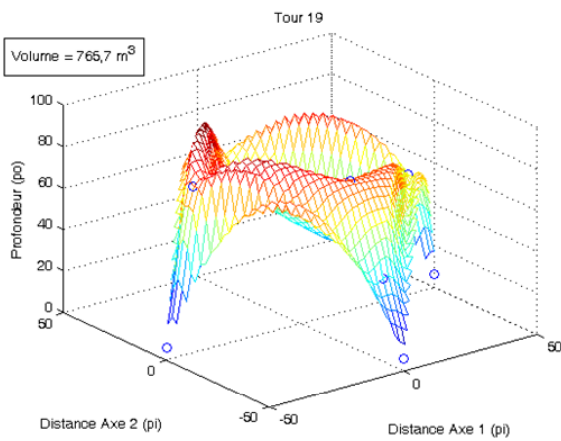
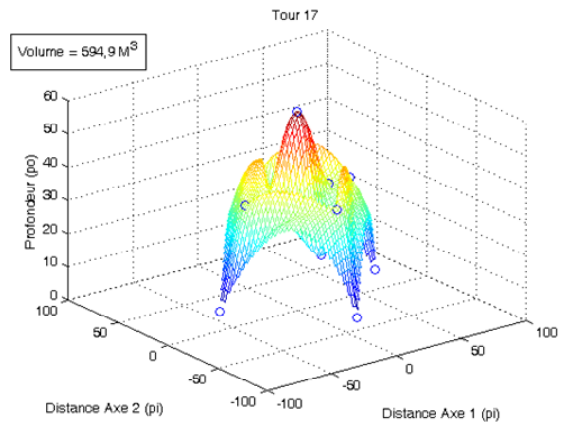
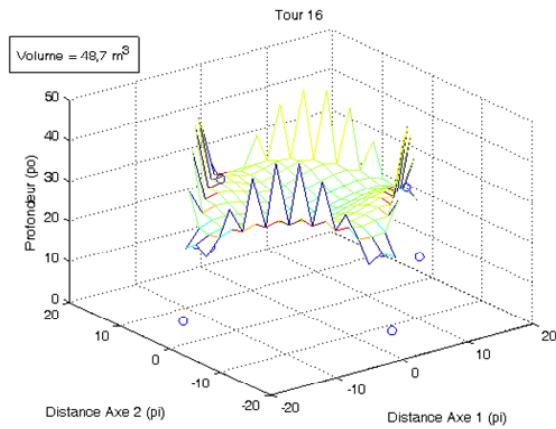
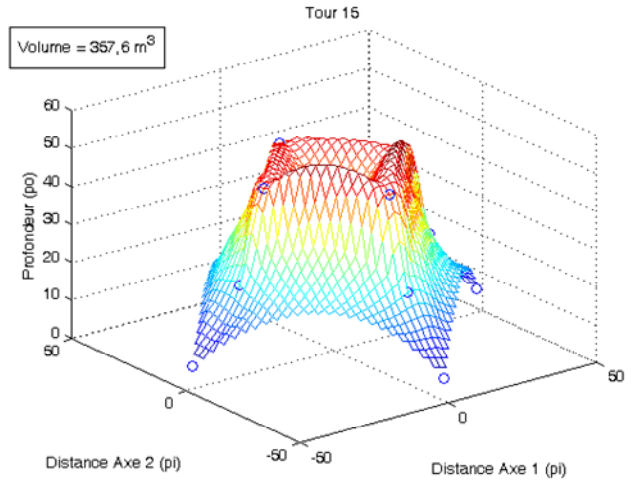
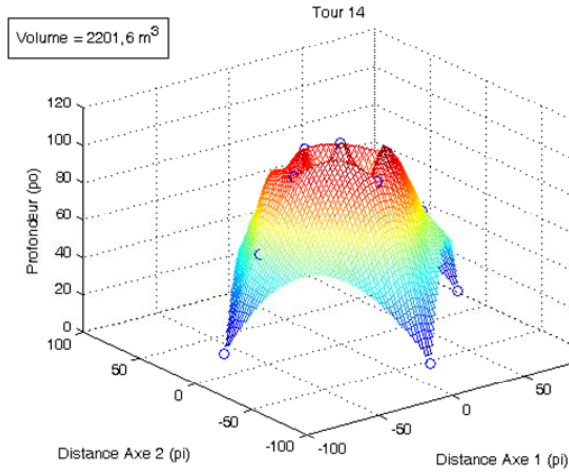
Shapiro, L. J.B. Johnson, M. Sturm, G. Blaisdell. (1997). Snow Mechanics: Review of the state of Knowledge and applications. CRREL Report 97-3. 35 p.

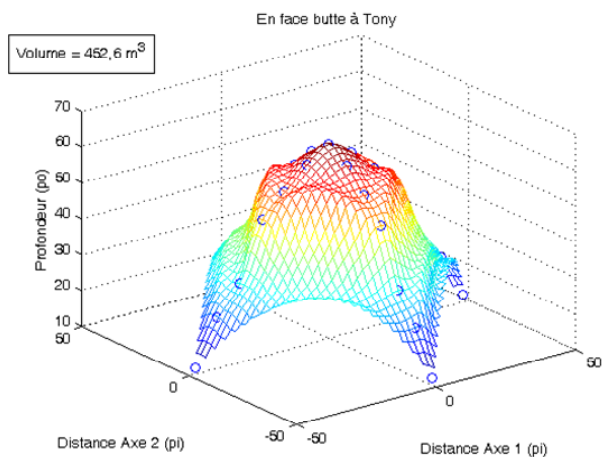
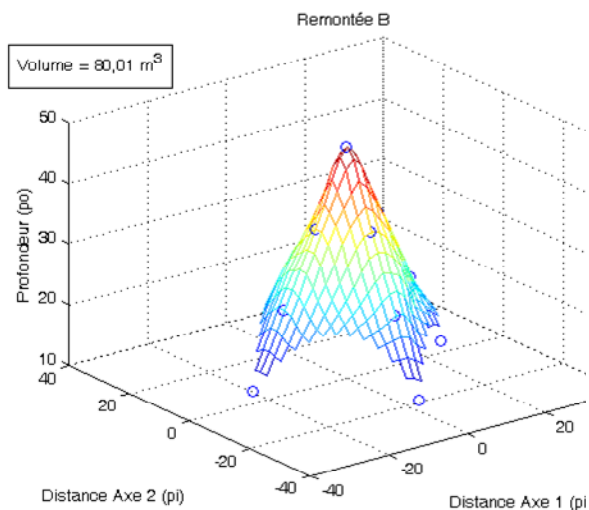
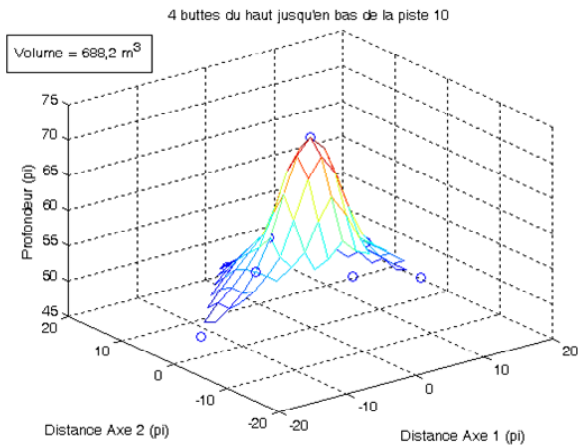
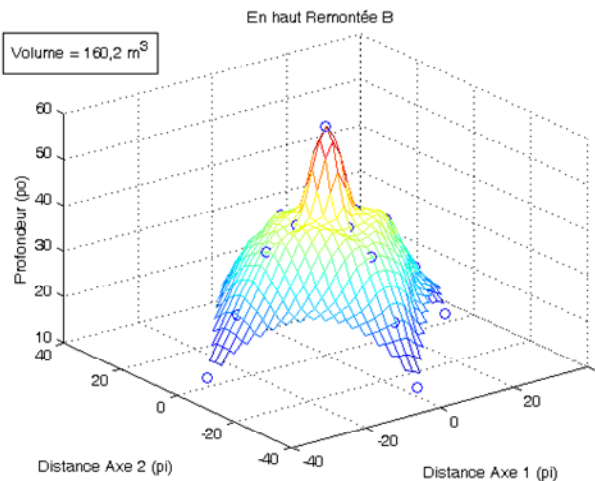
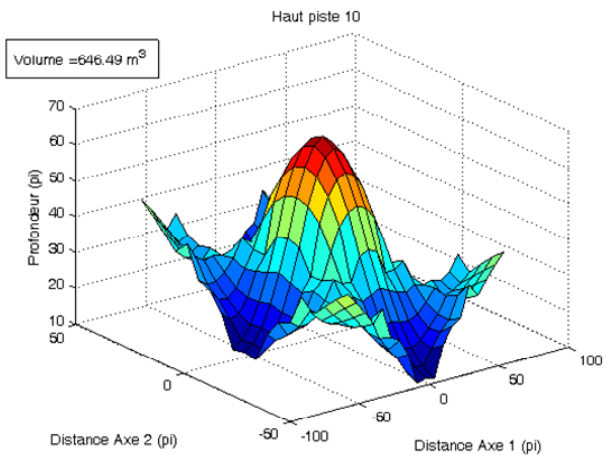
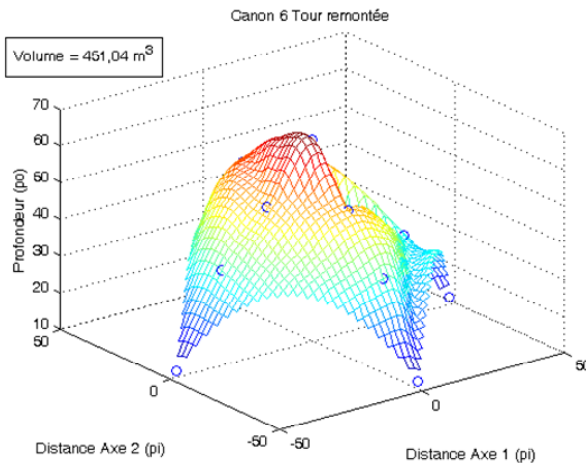
Schneebeli, M., C. Peilmeier, J. Johnson. (1999). Measuring snow microstructure and hardness using a high

St-Hilaire A.et T.B.M.J. Ouarda. 2005. Protocole d'échantillonnage du système de production automatisé de neige (SPAN). INRS-ETE. Rapport de recherche R-834, v+29 pages.

ANNEXE 1. DISTRIBUTION SPATIALE DE LA NEIGE PRODUITE (DÉCEMBRE 2005)







ANNEXE 2. DONNÉES D'ÉQUIVALENT D'EAU EN NEIGE.

Dans le tableau ci-dessous, la profondeur P1 correspond à la profondeur d'enfoncement du carrotier. La profondeur P2 est la hauteur de la carotte de neige (cm). La valeur d'ÉEN est donnée en cm. La densité est calculée à l'aide de l'équation 1.

	P1 (cm)	P 2 (cm)	ÉÉN (cm)	Densité (kg/m ³)
Kid wizard	38	38	14	368.42
	33	30	11	366.67
	23	23	10	434.78
	36	35	14	400.00
	44	39	17	435.90
	45	40	16	400.00
	32	24	12	500.00
	18	18	6	333.33
	15	15	5	333.33
	45	43	18	418.60
28	28	11	392.86	

Moyenne	398.54
Écart-type	48.86

Boyne	13	12	2	166.67
	18	16	4	250.00
	24	23	9	391.30
	22	21	7	333.33
	16	15	5	333.33
	29	27	11	407.41

	Moyenne	313.67
	Écart-type	90.83

Perche	16	14	3	214.29
	20	19	6	315.79
	23	22	8	363.64
	14	12	3	250.00
	24	24	9	375.00
	15	12	3	250.00
	17	16	6	375.00
	17	17	6	352.94
	19	19	9	473.68
	15	14	4	285.71

	Moyenne	325.61
	Écart-type	77.83

Nivis 660	25	24	8	333.33
	28	28	11	392.86
	31	31	14	451.61
	34	30	13	433.33
	28	27	12	444.44
	18	18	6	333.33
	27	27	12	444.44
	26	25	10	400.00
	17	16	5	312.50
	22	22	10	454.55
	22	22	10	454.55
	27	25	10	400.00
	21	21	9	428.57

	Moyenne	406.42
	Écart-type	50.46

	P1 (cm)	P 2 (cm)	ÉÉN (cm)	Densité (kg/m3)
kid wizzard	36	35	14	400.00
	44	39	17	435.90
	45	40	16	400.00
	32	24	12	500.00
	18	18	6	333.33
	15	15	5	333.33
	45	43	18	418.60
	28	28	11	392.86
			Moyenne	401.75
			Écart-type	54.18
Lenko 940	16	15	2	133.33
	20	19	5	263.16
	23	23	9	391.30
	27	27	11	407.41
	33	31	13	419.35
	33	30	11	366.67
	18	18	5	277.78
	14	14	3	214.29
			Moyenne	309.16
			Écart-type	103.42
Tourelle	15	15	3	200.00
	22	21	7	333.33
	19	18	5	277.78
	27	27	11	407.41
	32	31	13	419.35

Analyse de la quantité et de la qualité de neige produite par le système de production automatisé de neige (SPAN)

29	27	10	370.37
39	17	6	352.94

Moyenne	337.31
Écart-type	76.81

ANNEXE 3. TEST A POSTERIORI DE LA DENSITÉ DE LA NEIGE PRODUITE.

Dans le tableau ci-dessous, les valeurs en gras identifient les pairs de canon dont les densités de neige sont significativement différentes.

	Nivis 660	Perche Harnois	Boyne	Kid Wizzard	Tourelle
Nivis 660					
Perche Harnois	0,080				
Boyne	0,426	0,281			
Kid Wizzard	0,036	0,0001	0,006		
Tourelle	0,823	0,058	0,338	0,050	
Lenko 940	0,614	0,034	0,227	0,077	0,753

ANNEXE 4. RAPPORT D'ACTIVITÉS.

- 26/10/05 Réunion de démarrage pour l'élaboration d'un protocole d'échantillonnage du SPAN.
- 10/05 -11/05 Revue de littérature et familiarisation avec SPAN
- 11/05 -12/05 Rédaction du rapport intitulé: Protocole d'échantillonnage du système de production automatisé de neige (SPAN) par St-Hilaire et Ouarda.
- 1/12/05 Dépôt du rapport et rencontre avec les partenaires de Ski Mont Bruno inc. pour l'élaboration des premières expériences sur le terrain (durant les opérations d'enneigement).
- 12/02/06 Premier échantillonnage durant les opérations d'enneigement.
- 01/06-02/06 Planification de l'expérience contrôlée, achat et installation d'équipement de mesure.
- 2/03/06 Expérience contrôlée durant le nuit du 2 au 3 mars
- 0306-08/06 Analyses de données début de la rédaction du rapport
- 5/09/06 Rencontre de travail avec les partenaires de Ski Mont Bruno inc. afin de faire une analyse de l'adéquation du rapport en version préliminaire.
- 09/06-10/06 Analyses géostatistiques et incorporation des données SIG
- 26/10/06 Dépôt de la deuxième version du rapport.
- 3/11/06 Rencontre avec les partenaires de Ski Mont Bruno inc pour la vérification R&D.