

Résumé

Les mesures de résistance à l'enfoncement telles que celles obtenues par la sonde de battage ou le SMP constituent des méthodes simples et rapides de caractérisation de la stratigraphie du manteau neigeux. Cette résistance en plus d'être un indicateur de la cohésion est fortement corrélée à des propriétés de la structure de la neige, comme sa masse volumique et la taille des grains. Dans ce rapport, les liens empiriques entre ces propriétés et la résistance à l'enfoncement ont été étudiés sur deux jeux de données complémentaires. D'une part les archives du réseau d'observation nivo-météorologiques de Météo-France, sur la période de 1983 à 2014, ont été utilisées pour évaluer les corrélations entre variables résistance au battage, type de grains, taille des grains, humidité, température dendricité et sphéricité. Une analyse statistique révèle la corrélation entre la résistance au battage et la masse volumique. Notamment, la taille des grains tels qu'observés à l'oeil n'apparaît pas être corrélable à la résistance à l'enfoncement. D'autre part, une campagne de terrain comprenant des mesures de masse volumique, de surface spécifique à haute résolution verticale et de mesures SMP a été menée. La masse volumique a pu être dérivée à partir du signal SMP avec une erreur de l'ordre de 48 kg m^{-3} en neige sèche et de 68 kg m^{-3} en neige humide, conduisant à une erreur de l'ordre de 60.7 kg m^{-3} sur l'ensemble des profils effectués. L'apport de la haute résolution est faible mais notable, l'erreur étant de 69 kg m^{-3} sans utiliser de statistiques sur les fluctuations de forces mesurées par le SMP. Les profils de surface spécifiques ont été obtenus avec une précision de $12 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ et présentent de faibles variations en comparaison des profils mesurés.

Abstract

Penetration resistance measurement obtained with instruments such as ramsonde or SMP are simple and quick methods of caractérisation of snowpack stratigraphy. In addition to be a good indicator of cohesion, this resistance is strongly correlated to properties of snow structure like density or size of grains. In this report, empirical links between those properties and penetration resistance have been studied on two complementary datasets. First, the archive of the Météo-France's snow observation network, from 1983 to 2014, have been used to evaluate the correlations between ram strength, grain type, size of grains, humidity, temperature, dendricity and sphericity. A statistical analysis reveals the correlation between density and ram strength. Particularly, grains size observed by eye does not shows up to be correlated to penetration resistance. Then, a field campaign including measurements of density and specific surface area with high vertical resolution together with SMP measurement has been realized. Density has been derived from SMP signals with an error in the order of 48 kg m^{-3} in dry snow and of 68 kg m^{-3} in wet snow, leading to an error of the order of 60.7 kg m^{-3} over all profiles. The amelioration of accuracy du to high resolution is small but observable because the error is of 69 kg m^{-3} without using force fluctuation statistics. Profiles of specific surface area have been obtained with an error of $12 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ and presents little variations in comparison with measurements.

Vers une amélioration de la caractérisation de la microstructure de la neige par pénétrométrie: liens empiriques entre géométrie et résistance à l'enfoncement.

Rémi GRANGER - Stage de Master 2 *Eau, Climat et Environnement*

1 Février - 30 Juin 2016

Encadrants :

Pascal HAGENMULLER

*Centre d'Étude de la Neige - CNRM -
Météo-France/CNRS*

Laurent ARNAUD

*Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de
l'Environnement CNRS/UGA*



Table des matières

1	Introduction	2
1.1	Contexte et objectifs	2
1.2	Observation et mesure du manteau neigeux.	2
1.2.1	Profil stratigraphique	2
1.2.2	Mesures de résistance à l'enfoncement.	3
1.2.3	Mesures de surface spécifique par méthode optique	4
2	Analyse statistique de la BD-NIV	5
2.1	BD-NIV : Description du jeu données.	5
2.2	Présentation des modèles existants : MEPRA	6
2.3	Analyse factorielle	7
2.3.1	Méthode	7
2.3.2	Résultats	8
2.4	Comparaison BD-NIV et MEPRA	10
2.4.1	Aperçu global	10
2.4.2	Grains fins	11
2.4.3	Faces planes ou faces planes/givre de profondeurs	12
3	Analyse des signaux de pénétrométrie	13
3.1	Revue bibliographique	14
3.1.1	Contexte scientifique	14
3.1.2	Lien avec le travail de ce stage	14
3.2	Mesures de terrain	16
3.3	Résultats	18
3.3.1	Masse volumique	22
3.3.2	Surface spécifique	22
3.3.3	Influence de l'humidité et du type de grains	23
3.3.4	Dérivation de la masse volumique des mesures conjointes de résistance à l'enfoncement et de surface spécifique	24
4	Discussion et conclusion	24
	Références	26

1 Introduction

1.1 Contexte et objectifs

La neige se dépose sur les reliefs par succession d'épisodes neigeux, pouvant être entrecoupés de périodes variées météorologiquement : de réchauffement, de regel, très ventées en sont des exemples. Ceci a pour conséquence que le manteau neigeux formé au fil de la saison est une superposition de couches de neige aux propriétés physiques distinctes telles que la géométrie des grains, la teneur en eau liquide, la température. La bonne connaissance de ces propriétés est critique pour diverses applications liées à la neige : prévision du risque d'avalanche, gestion des bassins hydrologiques, bilan énergétique (voir figure 1). Les observations usuelles, c'est à dire mises en oeuvre dans le réseau d'observation de Météo-France, comprennent l'observation à l'oeil de la taille et de la forme des grains, caractérisation manuelle de l'humidité et de la dureté des couches, ainsi que des mesures de températures, de teneur en eau liquide, de résistance à l'enfoncement et de masse volumique. Parmi ces observations, le profilage vertical de la résistance à l'enfoncement est la seule permettant une caractérisation rapide et objective du manteau neigeux. Cette mesure constitue de plus un bon indicateur de la cohésion de la neige et peut-être corrélés à d'autres variables telles que la masse volumique le type de neige (Par exemple, une croûte de regel aura une résistance à l'enfoncement très élevée et sera identifiable). Pour ces raisons la résistance à l'enfoncement peut être une observation, permettant de décrire le manteau neigeux, ou une variable modélisée. Dans le cadre de la prévision du risque d'avalanche à Météo-France par exemple, la résistance à l'enfoncement est modélisée par la chaîne Safran-Surfex-Meptra à partir d'observation du réseau nivo-météorologique. Récemment, des instruments tels que le SnowMicroPen (SMP) [Schneebeli and Johnson, 1998] permettant la mesure de la résistance à l'enfoncement à haute résolution ont été développés. Ces pénétromètres fournissent un signal plus riche que la sonde de battage. Plus précisément, la haute résolution permet l'observation de fluctuations de force à l'échelle du grain de neige, celle-ci sont dues à la rupture des ponts entre les grains lors du processus de pénétration. Ces fluctuations sont donc fortement conditionnées par la microstructure de la neige. Des modèles ont été développés récemment pour interpréter les signaux SMP et mesurer des grandeurs géométriques telle que la surface spécifique ou la masse volumique (équivalent à la connaissance de la fraction volumique de glace) [Marshall and Johnson, 2009; Löwe and van Herwijnen, 2012; Proksch et al., 2015]. Lors de ce stage, je me suis intéressé à préciser les relations empiriques entre la résistance à l'enfoncement et les variables microstructurelles sur deux jeux de données différents. Le premier est les archives du réseau d'observations de Météo-France, permettant d'étudier le lien statistique entre les résultats d'un battage et l'observation stratigraphique. Le second provient d'une campagne de terrain effectuée au cours de ce stage comprenant les observations usuelles ainsi que des profils SMP, de masse volumique à plus haute résolution et de surface spécifique. Cette dernière variable a été mesurée en employant des instruments optiques dédiés (voir section 1.2). Ce deuxième jeu de données permet d'évaluer les modèles d'interprétation actuels pour l'utilisation des pénétromètres à haute résolution en tant qu'instrument de la géométrie en condition de terrain.

1.2 Observation et mesure du manteau neigeux.

1.2.1 Profil stratigraphique

Le manteau neigeux étant composé de strates de neiges, une description usuelle est la description de chacune de ces strates de manières individuelles. Pour ce faire, un trou est réalisé dans le manteau neigeux afin de libérer un mur de neige vertical. Ensuite, l'opérateur fait glisser une plaque métallique tenue verticalement dans le mur de neige et sur toute sa hauteur. Chaque changement de résistance perçue représente une interface entre deux couches. Chaque couche est ensuite décrite individuellement, cette description contient :

- la hauteur par rapport au sol de la face supérieure de la couche ;



FIGURE 1 – Coupe de manteau neigeux réalisé au col du Lautaret le 25 février 2016.

- le type de grains observé à la loupe, donné par un type majoritaire et un type secondaire (identique au type majoritaire si un seul type est observé) ;
- la taille des grains ϕ , diamètre moyen apparent des grains estimé par l'observateur ;
- la masse volumique de la couche ρ , mesurée à l'aide d'un carottier permettant de prélever un volume connu de neige et d'en mesurer la masse ;
- la teneur en eau liquide (*TEL*), fraction volumique d'eau liquide, mesurée avec un instrument dédié ;
- la dureté manuelle (*hard*), estimée sur une échelle de 1 à 5 par l'observateur suivant qu'il arrive à enfoncer son poing, quatre doigts, un doigt, un crayon ou une lame de couteau dans la neige ;
- l'humidité manuelle (*hum*), établie sur une échelle de 1 à 5, quantifiant la facilité à former des boules et l'humidité éventuelle qui en ressort.

1.2.2 Mesures de résistance à l'enfoncement.

1.2.2.1 Sondage par battage

La sonde de battage est l'instrument de référence utilisé par les nivologues pour la réalisation de profils de résistance à l'enfoncement. Il s'agit d'un instrument robuste, et facilement transportable (2 kg pour réaliser un profil d'un mètre). Cette sonde est constituée d'un tube composé de segments gradués de 1 m et de 1 kg et doté d'une pointe conique de section 12 cm^2 et d'angle au sommet de 60° (voir figure 2). Ce tube est surmonté d'une tige graduée le long de laquelle un poids mobile de $P = 1 \text{ kg}$ peut glisser librement. La mesure s'effectue en utilisant q segments de poids Q (kg) en lâchant le poids P (kg) n fois de suite d'une hauteur connue h (cm). Ceci produit un enfoncement d (cm) de la tige que l'opérateur relève par observation des graduation sur la tige. La résistance à l'enfoncement R (kgf) est supposée uniforme sur l'épaisseur d et est ensuite calculée à l'aide de la formule (1).

$$R = \frac{nhP}{d} + P + qQ \quad (1)$$

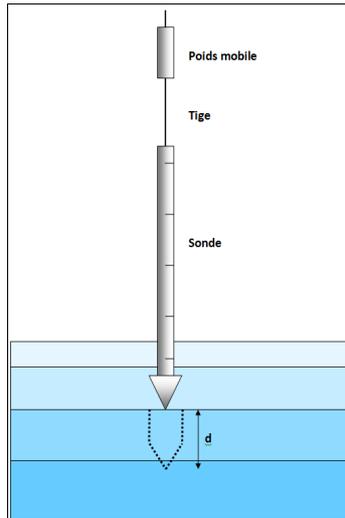


FIGURE 2 – Schéma de la sonde de battage, tiré de [Perla et al. \[1976\]](#).

1.2.2.2 SnowMicroPen

Le SMP est un pénétromètre électronique conçu pour pouvoir détecter de fines couches fragiles [[Johnson and Schneebeli, 1998](#); [Schneebeli and Johnson, 1998](#)]. Il s'agit d'une tige rigide de 16 mm de diamètre dotée d'une tête comprenant une pointe conique de 5 mm de diamètre et d'angle au sommet de 60° montée sur un capteur de force piézo-électrique dont la résolution est de 0.01 N. Une des caractéristiques principales de ce pénétromètre est que la tige est entraînée en translation à vitesse constante de 20 mm s^{-1} par un moteur électrique. Ceci permet d'améliorer la précision i) en réduisant les échanges d'énergie entre les matériaux lors d'accélération/décélération, ii) en évitant les effets inertiels de la tige et iii) en se passant de la dépendance en taux de déformation de la contrainte de fluage [[Schneebeli and Johnson, 1998](#)]. La haute fréquence d'acquisition de ce pénétromètre (250 mesures/mm) permet une résolution de 0.04 mm et donc la détection de fine couches, essentielle pour la prévision du risque d'avalanche. Durant ce stage, deux SMP ont été utilisés. Le premier, celui du CEN et qui a été utilisé pour toute les sorties, possède une tige de 1.25 m. Le second, prêté par la Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, a été utilisé pour trois sortie différentes (Tableau 1) possède une tige de 1.6 m.

1.2.3 Mesures de surface spécifique par méthode optique

1.2.3.1 DUFISSS

[Domine et al. \[2006\]](#) montrent que la réflectance hémisphérique de la neige dépend principalement de la SSA dans l'infrarouge. L'instrument DUal Frequency Integrating Sphere for Snow SSA measurement (DUFISSS) exploite ce lien pour mesurer la SSA [[Gallet et al., 2009](#)]. La construction de DUFISSS est représentée par la figure 3a. Il s'agit d'une sphère dont la surface intérieure est constituée d'un polymère de réflectance calibrée, possédant une ouverture circulaire de 38 mm de diamètre (voir figure 3(a)). L'échantillon de neige à mesurer, placé dans un porte-échantillon, permet de fermer la sphère. Un faisceau laser de 10 mm de diamètre est dirigé perpendiculairement à la surface de l'échantillon, la sphère permet alors de récolter le rayonnement réfléchi par l'échantillon et une photodiode mesure l'illumination à l'intérieur de la sphère à l'aide d'un voltmètre de précision. L'échantillon est préparé sur le terrain comme suit : une surface de neige horizontale est réalisée à l'aide d'une spatule, l'échantillon est ensuite prélevé en utilisant un cylindre en acier doté d'un piston ; enfin, l'échantillon est placé dans le porte-échantillon grâce au piston. La calibration de DUFISSS est effectuée à l'aide d'échantillons Spectralon[®] dont les surfaces possèdent des

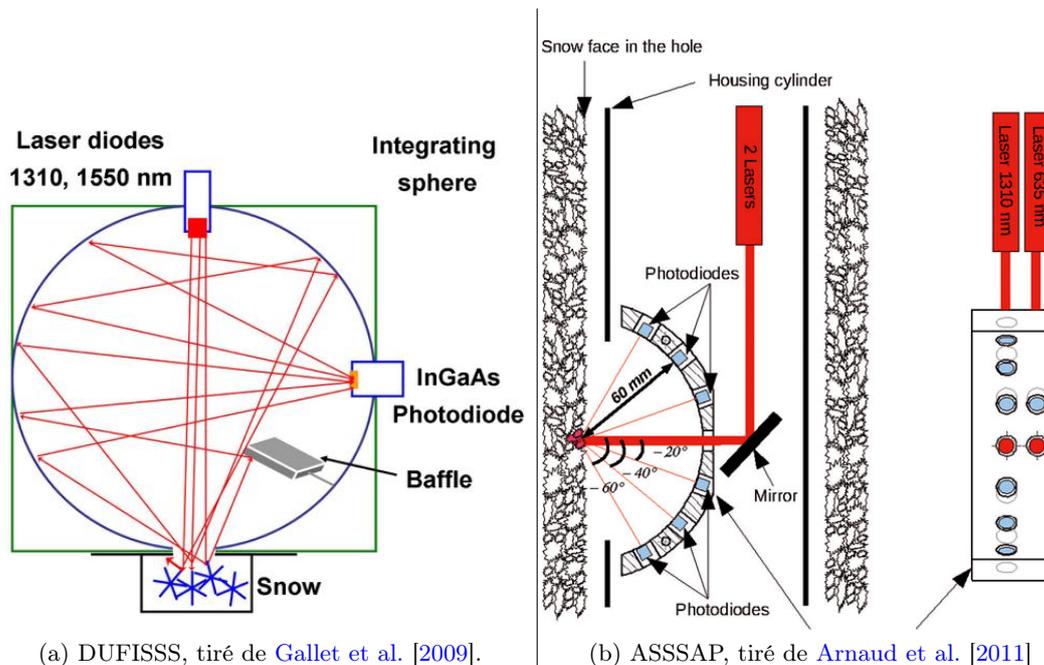


FIGURE 3 – Schemas expliquant la construction des instruments de mesures de SSA.

réflectances calibrées.

1.2.3.2 ASSSAP

Alpine Snow Surface Area Profiler est un second instrument de mesure de la SSA de la neige par illumination d'une surface de neige puis mesure par mesure de sa réflectance. ASSSAP ne requiert pas de préparer d'échantillon et permet de mesurer rapidement un profil de SSA de 1 cm de résolution. De construction semblable à POSSSUM [Arnaud et al., 2011], ASSSAP illumine la surface de neige avec une photodiode à 1310 nm, la radiance réfléchiée est mesurée par 6 photodiodes aux angles ($\pm 20^\circ$, $\pm 40^\circ$ et $\pm 60^\circ$) (voir Figure 3b). Afin de réaliser un profil de SSA, un trou de 70 cm est réalisé à l'aide d'un cylindre en Plexyglass® doté d'une tête permettant de découper la neige. Un guide est ensuite introduit dans ce trou et ASSSAP, lié au guide par une glissière, est descendu dans le trou manuellement approximativement à la vitesse de 1 cm s^{-1} . La position le long du guide est enregistrée à l'aide d'une roue à incrément. Deux profils verticaux de SSA sont réalisés : un lors de la descente de l'appareil dans le trou et le second lors de la montée.

2 Analyse statistique de la BD-NIV

L'étude de la BD-NIV a été réalisée en deux étapes. Dans un premier temps, une analyse factorielle a été réalisée dans le but de faire ressortir d'éventuelles structures dans la base de données et souligner les corrélations entre variables. La méthode employée et les résultats correspondants sont présentés en 2.3. Dans un second temps, les formes de ces relations ont été étudiées et confrontées aux relations utilisées par MEPRA, ces relations sont présentées en 2.2, les résultats de cette comparaison en 2.4.

2.1 BD-NIV : Description du jeu données.

La BD-NIV archive les données du réseau d'observation nivo-météorologiques de Météo-France de 1983 à 2014. Ces observations sont effectuées par près de 400 observateurs, nivologues et pisteurs, quotidiennement dans le but de maintenir une surveillance continue

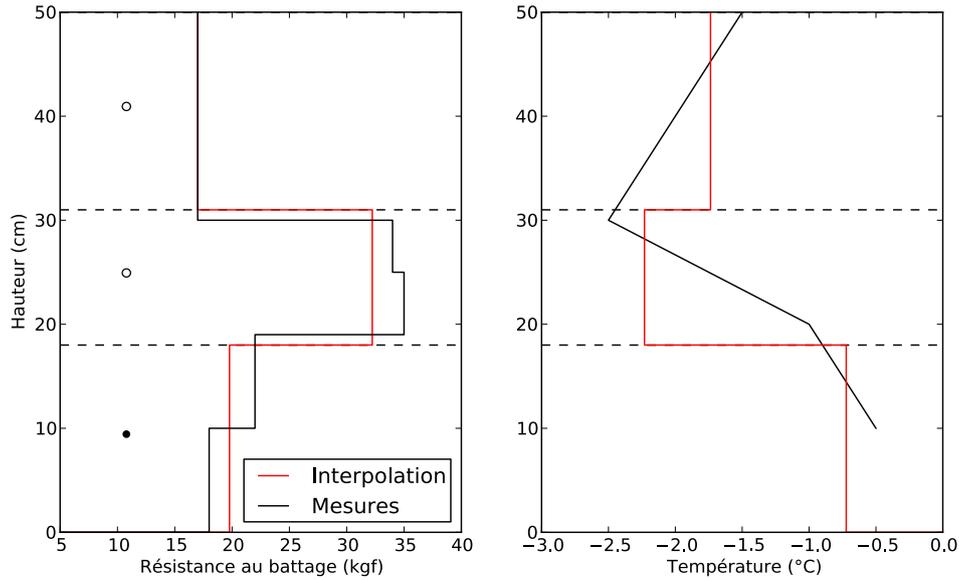


FIGURE 4 – Exemple de rééchantillonnage de la résistance au battage sur le profil stratigraphique. Les lignes pointillées représente les limites entre couches stratigraphiques, les symboles représente le type de neige observé pour ces couches.

du manteau neigeux est du risque d’avalanche. Pour l’étude présentée ici, 430 000 couches stratigraphiques ont pu être exploitées. Celle-ci constitue donc un jeu de données important, représentatif des manteaux alpins.

Cette base de données contient 3 types de profils réalisés conjointement.

- Profil de résistance à l’enfoncement par battage
- Profil stratigraphique
- Profil de température

Le profil de résistance à l’enfoncement est donné par la résistance à l’enfoncement calculée sur une section repérée par la hauteur de sa limite supérieure, mesurée par rapport au sol. Le profil de température contient la température mesurée pour différentes hauteurs. Les profils de résistance au battage et stratigraphique ne possèdent pas la même grille verticale, afin de pouvoir étudier le lien entre ces variables, il est nécessaire de définir une résistance au battage pour chacune des couches du profil stratigraphiques. Ceci a été réalisé en calculant la moyenne de la résistance à l’enfoncement sur chaque couche stratigraphique (Figure 4). Le même algorithme a été utilisé pour traiter le profil de température, celui-ci revient à estimer l’intégrale de la température sur une couche par une méthode des rectangles à droite, cependant pour le profil de température qui est continue, une estimation plus précise pourrait être effectuée.

2.2 Présentation des modèles existants : MEPRA

Le Modèle Expert d’aide à la Prévision du Risque d’Avalanche est un modèle développé et utilisé par MétéoFrance rassemblant un ensemble de lois physiques et expertes [Giraud, 1992]. Ce modèle est chargé de prédire les caractéristiques mécaniques d’un manteau neigeux, modélisé ou observé, connaissant son profil stratigraphique et de température. Plus particulièrement dans le cadre de cette étude, il prédit la résistance à l’enfoncement qui serait mesuré par battage connaissant les profils stratigraphique et de température. Ce modèle constitue alors une base pour le travail présenté ici ; notamment, nous nous intéresserons à observer sur la BD-NIV les relations implémentées dans MEPRA et à en suggérer une amélioration le cas échéant.

La résistance au battage R est calculée à partir des variables du profil stratigraphique taille des grains de neige ϕ , masse volumique ρ , teneur en eau liquide (TEL) et de la température (T). Deux variables supplémentaires, fonction du type de grains et évaluées de manière experte, sont introduites pour quantifier et ordonner leurs formes : la dendricité $dendr$ et la sphéricité $spher$. Ces grandeurs sont sans dimension et leurs valeurs sont comprises dans $[0, 1]$. La dendricité évalue la tendance que possède la neige à présenter des dendrites (une neige récente a une dendricité de 1, une neige évoluée une dendricité de 0). La sphéricité évalue la proximité entre la forme des grains de neige et la sphère (des grains arrondis on a une sphéricité proche de 1, des grains anguleux une sphéricité proche de 0). La relation entre la résistance au battage et ces variables est définie différemment pour 5 groupes de neiges, formés sur le type de grains (voir relations (2) à (6)). Dans ces formules, les variables R , ρ , ϕ sont adimensionnées par les valeurs 1 kgf, 1 kg m⁻³ et 1 mm respectivement.

Grains fins :

$$R_{fins} = \begin{cases} 0.17\rho - 31 & \text{si } \rho \geq 200 \\ 2 & \text{si } \rho < 200 \end{cases} \quad (2)$$

Faces planes ou faces planes et givre de profondeur (gobelets) :

$$R_{fc} = \begin{cases} R_{fins}(0.8 - \phi) + 2\phi & \text{si } \phi \leq 0.8 \\ 2 & \text{si } \phi > 0.8 \end{cases} \quad (3)$$

Grains fins et faces planes :

$$R_{ffc} = \begin{cases} spherR_{fins} + (1 - spher)R_{fc} & \text{si } \rho \geq 200 \\ 2 & \text{si } \rho \leq 200 \end{cases} \quad (4)$$

Neige dendritique ($dendr > 0$) :

$$R_{fc} = \frac{dendr}{(1 - dendr)} \left[(0.018\rho - 1.363) + [R_{fins}spher + (1 - spher)(0.5R_{fins} + 0.6)] \right] \quad (5)$$

Grains ronds :

Avec : A $\Leftrightarrow T < -0.2$ ou ($T \geq -0.2$ °C et $TEL < 0.5\%$)

$$R_{MF} = \begin{cases} 0.103\rho - 19.66 & \text{si A} \\ 1 & \text{si A et } \rho < 250 \\ 2 & \text{si A et } 250 \leq \rho < 350 \\ 0.16\rho - 54 & \text{si A et } \rho > 350 \end{cases} \quad (6)$$

2.3 Analyse factorielle

2.3.1 Méthode

L'analyse factorielle est une méthode statistique permettant de traduire les corrélations entre variables en facteurs caractéristiques de l'ensemble étudié. La méthode consiste à déterminer des variables latentes (non observables) non corrélées, influençant simultanément plusieurs variables mesurées. Ces facteurs permettent alors de réduire le nombre de variables décrivant la base de données et soulignent les corrélations entre les variables mesurées ; notamment, ceci permet de compresser l'information redondante, comme la mesure d'une même grandeur par deux variables relativement proches (e.g. la dureté manuelle a des chances d'être une information redondante avec la résistance au battage). Cette sous-section a pour but de présenter les calculs effectués sur la BD-NIV. Une présentation détaillée des méthodes d'analyse factorielle pourra être trouvée dans [Escofier and Pagès \[2008\]](#).

Considérons une base de données formée de n réalisations conjointes de p variables de moyenne 0 et variance 1 (en pratique une standardisation des données est effectuée). Pour $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$ et $j \in \llbracket 1, p \rrbracket$, notons $z_{i,j}$ la i -ème réalisation de la j -ième variable.

Il est possible d'introduire de nouvelles variables non corrélées F_k nommées facteurs où $k \in \llbracket 1, q \rrbracket$ et $q < p$ dont la i -ème réalisation est $F_{i,k}$, des coefficients $l_{j,k}$ nommés chargement de la j -ème variable sur le k -ème facteur, et des erreurs $\epsilon_{i,j}$ telles que :

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \forall j \in \llbracket 1, p \rrbracket, \quad z_{i,j} = l_{j,1}F_{i,1} + \dots + l_{j,k}F_{i,k} + \dots + l_{j,q}F_{i,q} + \epsilon_i$$

La méthode consiste à déterminer le nombre de variables q , les facteurs $(F_k)_{k \in \llbracket 1, q \rrbracket}$ ainsi que les chargements minimisant l'erreur en un certain sens. Le sens choisi ici est d'obtenir des facteurs permettant d'expliquer le plus de variance possible (factorisation par composante principale), en d'autres termes les facteurs ainsi calculés sont les principaux traits de la population étudiée selon lesquels la variation individuelle est la plus importante. Les résultats présentés en 2.3.2 ont été obtenus en effectuant les calculs suivants :

- **Factorisation** : Les variables z_j sont transformées par combinaison linéaire en nouveaux facteurs F_k où $k \in \llbracket 1, p \rrbracket$. La matrice de corrélation est diagonalisable dans une base orthonormée. Ces nouveaux facteurs sont choisis comme étant des vecteurs propres orthonormés de cette matrice. Les chargements $l_{j,k}$ correspondent aux coefficients de corrélation entre la j -ième variable et le k -ième facteur. Les valeurs propres $\{\lambda_k\}_k$ associées correspondent aux variances associées à ces facteurs.
- **Classement** : Valeurs et vecteurs propres sont classés par ordre de variance décroissante.
- **Sélection** : seuls les q premiers facteurs sont conservés, les facteurs $(F_k)_{k > q}$ étant considérés comme du bruit, i.e. $\epsilon_i = \sum_{k=q+1}^p l_{i,k}F_{i,k}$. Le nombre q est déterminé par le critère de Kaiser : seuls les facteurs ayant une valeur propre supérieure à 1 sont conservés. C'est à dire seuls les facteurs expliquant le plus de variance dans la base de données qu'une unique variable de départ sont conservés [Kaiser, 1960].
- **Rotation** : Les nouveaux facteurs conservés définissent un sous-espace de l'espace de départ, formé par les variables physiques. À ce stade de l'analyse, les chargements des facteurs sont potentiellement équilibrés entre les différentes variables, rendant l'interprétation physique de ces facteurs délicate. Il est cependant possible d'effectuer une rotation de la base de ces facteurs, ce qui ne modifie pas le sous-espace décrit par ces derniers et conserve l'orthonormalité de la base. Cette opération n'induit donc pas de perte d'information et garantie de conserver la décorrélation entre les facteurs et une variance unitaire pour chacun d'entre eux. La rotation effectuée ici est une rotation varimax [Kaiser, 1958] : celle-ci cherche à maximiser la dispersion des valeurs des chargements au sein d'un même facteur, c'est-à-dire à aligner au mieux les facteurs avec certaines variables, de sorte à faciliter leur interprétation physique.

Les facteurs ainsi obtenus permettent alors de caractériser et différencier les individus. Dans le cas présent, la population réfère à un ensemble de couches de manteau neigeux dont on connaît les différentes variables. La corrélation entre chaque variable et chacun des facteurs permettent d'une part de donner un sens physique à ces facteurs, représentant alors les traits caractéristiques de la neige.

Nous retiendrons alors pour la suite que les résultats de l'analyse factorielle sont :

- un nombre entier de facteurs (inférieur aux nombres de variables initiales) ;
- le chargement de chacune des variables sur ces facteurs (c.à.d. le coefficient de corrélation entre le facteurs et les variables) ;
- la variance expliquée par chacun de ses facteurs, reflétant l'importance statistique de ces derniers.

2.3.2 Résultats

Pour chacun des sous-ensembles neige dendritique (dendritic), grains ronds (MFs), grains fins (RG), faces planes ou faces planes et gobelets (FC/FC+DH), grains fins et faces planes (RG/FC) une analyse factorielle a été réalisée avec les 7 variables suivantes : R , ρ , $hard$, ϕ , TEL , hum et T . Deux facteurs ressortent systématiquement sur les 5 sous-ensembles, ceux-ci sont présentés par la figure 5. Un troisième facteur est détecté pour les grains fins, par

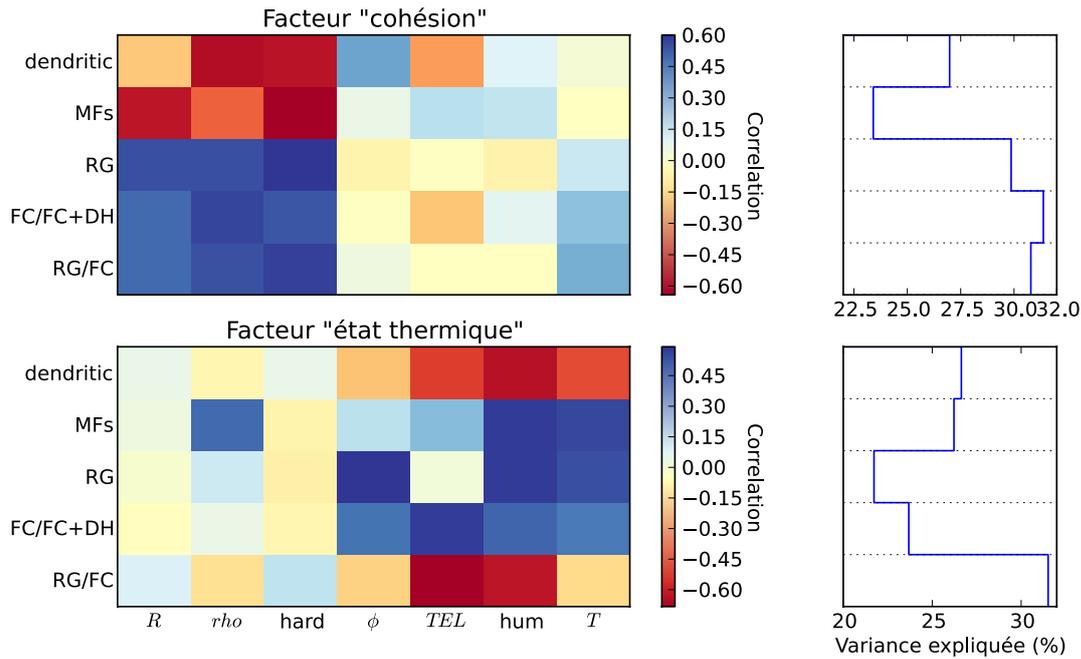


FIGURE 5 – Résultats de l’analyse factorielle pour les 5 catégories de grains présents dans ME-PRA pour 7 variables analysées. Les figures de gauches représentent les coefficients de corrélation avec le facteur pour chacune des variables et pour chaque groupe. Haut : facteur cohésion, bas : facteur état thermique. Les variances expliquées par ces facteurs sont représentées par les figures de droites.

souci de clarté celui-ci n’est pas inclus dans la figure 5 mais est discuté dans le paragraphe suivant.

Le premier facteur est principalement corrélé à la résistance au battage, à la dureté manuelle et à la masse volumique, avec le même signe pour chacune de ces variables. Une exception est la neige dendritique où la résistance au battage n’apparaît pas, ce point est adressé plus loin dans cette section. Ce facteur confirme que la résistance au battage augmente avec la masse volumique conformément à l’intuition et à la littérature [Giraud, 1992; Pielmeier and Schneebeli, 2003]. En raison de sa nature, ce facteur sera dénommé cohésion par la suite. De plus, on notera que la taille n’apparaît pas être corrélée à ce facteur.

Le second facteur est principalement corrélé à la teneur en eau liquide, à l’humidité, la température ainsi que la taille pour les grains fins et les grains facettés. Ce facteur sera appelé état thermique. Pour les grains fins, on peut remarquer que la TEL n’apparaît pas être corrélée à ce second facteur, mais un troisième facteur, non représenté possédant les coefficients de corrélation 0.12, 0.19, -0.062 -0.42, 0.815, 0.320 et 0.04 avec les variables R , ρ , $hard$, ϕ , TEL , hum et T respectivement. Ce facteur souligne donc une anti-corrélation entre la taille et la teneur en eau liquide et l’humidité. Nous pensons que ceci peut correspondre à des effets de capillarité où des grains plus petits permettent un stockage plus important de l’eau liquide par la neige.

Pour la neige dendritique (neige fraîche, particule reconnaissable, particule reconnaissable et grains fins ou particule reconnaissables et faces planes) la forme des grains est très variable, afin d’en observer les corrélations avec les facteurs précédents, l’analyse a été réalisée sur ce type de grains avec les variables, $spher$, $dendr$, la taille ayant peu de sens pour des grains dendritique, celle-ci n’est pas incluse dans l’analyse. Les résultats sont présentés sur la figure 6.

Trois facteurs ressortent de l’analyse, on peut observer que le premier facteur 'F1' est

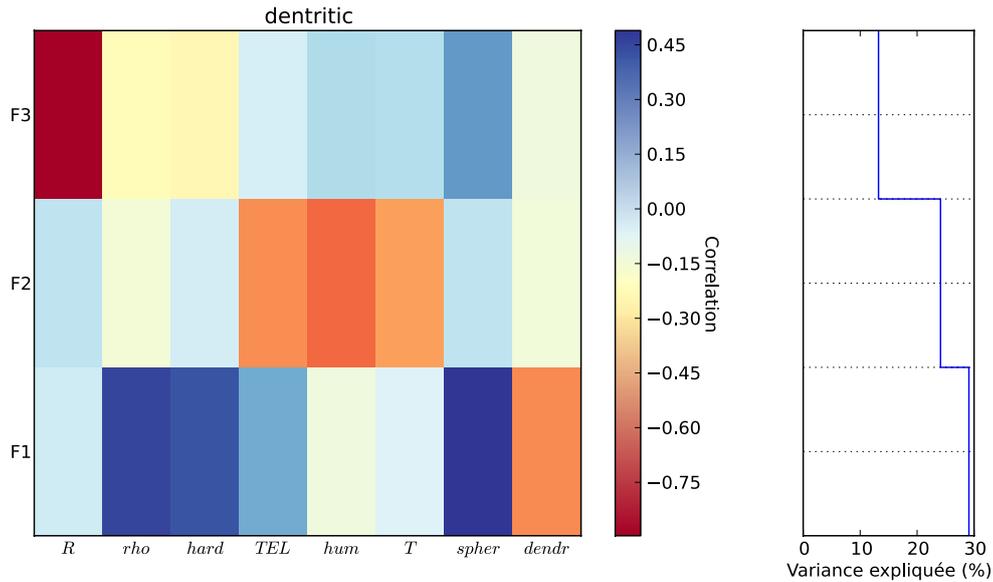


FIGURE 6 – Résultats de l’analyse factorielle restreinte à la neige dendritique : 3 facteurs ressortent. Gauche : chargement des variables sur chaque facteurs : Droite : variance expliquée correspondante par chaque facteur.

corrélé à la masse volumique, à la résistance manuelle et à la sphéricité et anticorrélé à la dendriticité. Ce facteur est celui correspondant au facteur cohésion présenté dans la figure 5. Une remarque est que la dendriticité peut-être assimilée à la surface spécifique : les dendrites sont des formations possédant une importante interface air/glace pour un volume de glace restreint. On retiendra pour la suite que la résistance au battage est anticorrélée à la surface spécifique pour ce type de neige. Le second facteur est corrélé à la teneur en eau liquide, à l’humidité et à la température et correspond à l’état thermique. Le troisième facteur fait ressortir seulement la résistance au battage. Nous pensons que ceci est explicable par le fait que la mesure des couches de neige dendritique comme de la neige fraîche par la sonde de battage est difficile : si par exemple une telle couche de faible épaisseur est posée sur une couche plus dure, au moment du sondage, la sonde s’arrêtera dans la couche dure sous-jacente et la résistance mesurée ne sera pas représentative de la couche de neige fraîche.

2.4 Comparaison BD-NIV et MEPRA

Les résultats de l’analyse factorielle suggèrent une corrélation entre la résistance au battage et la masse volumique. Nous nous intéressons ici à déterminer une relation simple entre ces variables. De relations de ce type étant présentes dans MEPRA, celles-ci sont comparées et discutées pour les deux types de grains i) fins et ii) faces planes ou faces planes+givre de profondeur. Les autres types de grains ne seront pas abordés car les relations correspondantes sont d’une part basées sur ces deux premières relations et d’autres soulignent des liens avec des variables n’apparaissant pas corrélés à la résistance à l’enfoncement dans la BD-NIV, d’après les résultats l’analyse factorielle.

2.4.1 Aperçu global

La figure 7 présente un histogramme bi dimensionnel dans le plan (résistance calculée, résistance mesurée) de la BD-NIV. Une première remarque est qu’une grande partie des points sont situés autour du point de coordonnées (2,2), correspondant au minimum mesurable par la sonde de battage. Cependant, sur le reste du domaine, le nuage de points ne s’aligne

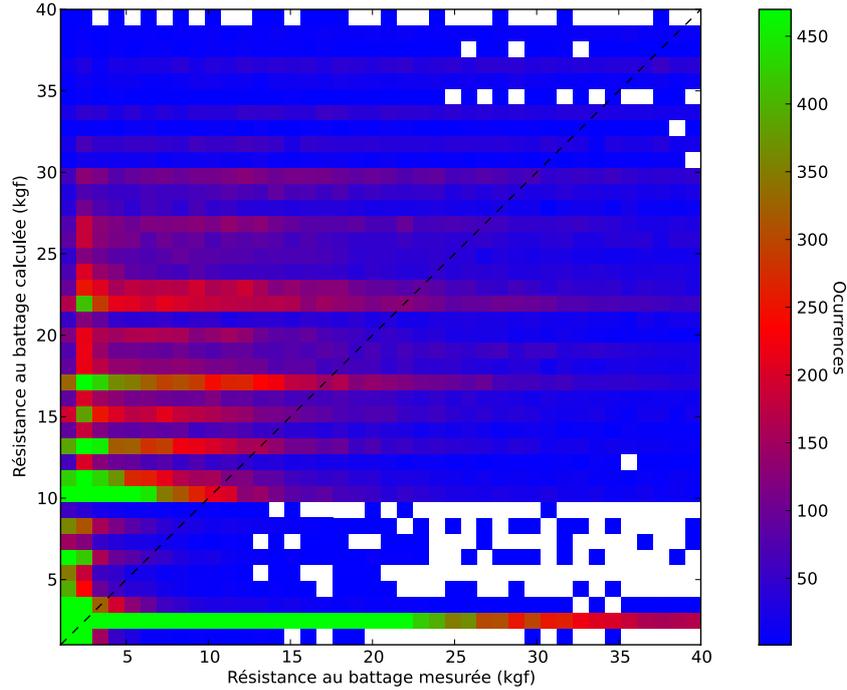


FIGURE 7 – Histogramme de résistance au battage calculée par MEPRA sur les données de la BD-NIV en fonction de la résistance au battage mesurée et interpolée, l’intervalle utilisé pour réaliser l’histogramme est de 1 kgf. La première bissectrice est représentée en ligne pointillée. Les maximums d’occurrences se situent dans la région $[1\text{kgf},4\text{kgf}] \times [1\text{kgf},4\text{kgf}]$ avec 5000 occurrences par kgf^2 , le maximum de l’échelle de couleur a été volontairement limité à 470 kgf pour observer la répartition dans sur le reste du domaine.

pas sur la première bissectrice, la résistance au battage apparaît globalement surestimée, à l’exception de la ligne $R_{calc} = 2 \text{ kgf}$. Il est à noter cependant que MEPRA est réalisé afin de détecter le risque d’avalanche et donc d’amplifier la dangerosité de certains cas. Par exemple, une couche de plaquettes entre deux couches de grains fins présente un risque important d’avalanche de plaques. Afin de souligner le danger, la cohésion des grains fins peut être surestimée et celle de la couche de plaquettes sous-estimée.

2.4.2 Grains fins

La figure 8 est un histogramme bi-dimensionnel de la BD-NIV dans le plan (R, ρ) . L’élément sur lequel l’histogramme est calculé est de $(1 \text{ kgf} \times 10 \text{ kg m}^{-3})$. La loi MEPRA (équation (2)) est une relation linéaire entre la résistance au battage et la densité, soumise à un seuil d’une hauteur de 2 kgf, correspondant à la valeur minimale mesurable par la sonde de battage lorsqu’elle est composée d’un tube de 1 m et du poids mobile. Cette loi conduit à une erreur-type (rmse) de 15 kgf. Cette loi est représentée en gris sur la figure 8. Visuellement, cette loi s’accorde plutôt bien avec les données. Afin de tester si une amélioration est possible, cette même loi a été optimisée avec les coefficients réajustés pour minimiser l’erreur quadratique sur la base de données en gardant la hauteur du seuil à 2 kgf, ceci conduit à la loi (7).

$$R_{fins} = \begin{cases} 0.154\rho - 31 & \text{si } \rho \geq 213 \\ 2 & \text{si } \rho < 213 \end{cases} \quad (7)$$

et une erreur standard (rmse) de 14.80 kgf.

Afin d’évaluer la pertinence éventuelle d’une relation d’une autre forme, un ajustement avec une loi de puissance a été réalisé.

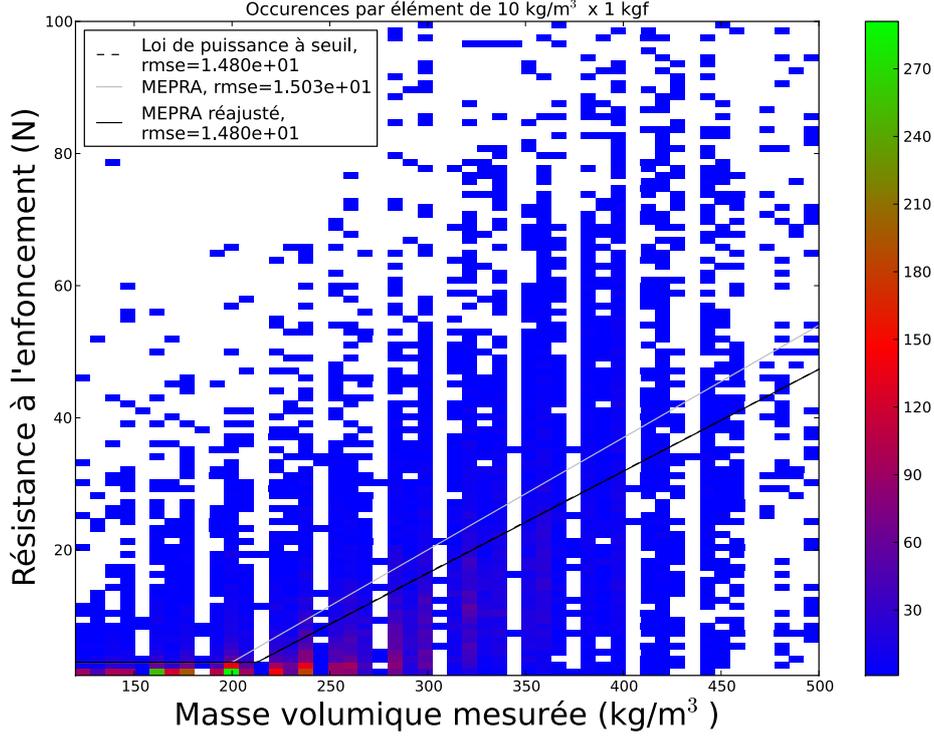


FIGURE 8 – Histogramme de la BD-NIV en fonction de la résistance au battage et de la masse volumique. Trois lois sont affichées : la loi MEPRA, la loi MEPRA avec des coefficients optimisés et une loi de puissance à seuil.

$$R_{fins} = \begin{cases} p_1(\rho - p_0)^{p_2} + 2 & \text{si } \rho \geq p_0 \\ 2 & \text{si } \rho < p_0 \end{cases} \quad (8)$$

Les valeurs des coefficients optimisés sont $p_0=213 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $p_1=0.158 \text{ kgf} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{-0.996}$, $p_2=0.996$ et une rmse de 14.80kgf. Cette loi est donc très proche de la loi MEPRA 8.

2.4.3 Faces planes ou faces planes/givre de profondeurs

Ce groupe de neige est représentatif de l'influence de la présence de faces planes sur les grains de neige. Pour ces types de neige, MEPRA définit la loi (3), cette loi introduit une dépendance en ρ et ϕ de R . Les résultats de l'analyse factorielle ne présentent pas cette corrélation et suggère une simple dépendance en ρ . Afin d'évaluer cette paramétrisation, des histogrammes bidimensionnels ont été tracés dans les plans $(Rx\rho)$ et $(Rx\phi)$ (Figure 9). Sur ces figures, la masse volumique varie entre 100 et 350 kg/m^3 et la taille entre 0.4 et 4 mm. La plage de variation de la résistance à l'enfoncement sur ces intervalles est délimitée par les lignes solides noires. À première vue, dans le plan $(Rx\rho)$, cette paramétrisation permet de reproduire une variabilité proche de celle observée. Dans le plan $(Rx\phi)$ on peut observer que cette variabilité est produite par les petites tailles de grains. Il reste cependant plus difficile d'observer cette tendance sur la BD-NIV. En accord avec cette remarque et les résultats de l'analyse factorielle, une simple dépendance en ρ a été testée, utilisant une loi de puissance à seuil semblable à la loi (8) et conduit aux coefficients $p_0=265 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $p_1=0.16 \text{ kgf} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{-0.957}$, $p_2=0.957$ et une rmse de 16.85kgf

L'erreur quadratique moyenne est du même ordre pour les deux paramétrisations, même légèrement plus faibles pour une paramétrisation en variable ρ uniquement. Ceci suggère que la prise en compte de la taille des grains, telles que mesurées dans réseau d'observation ne permet pas d'améliorer la précision de l'estimation de la résistance à l'enfoncement. Ce

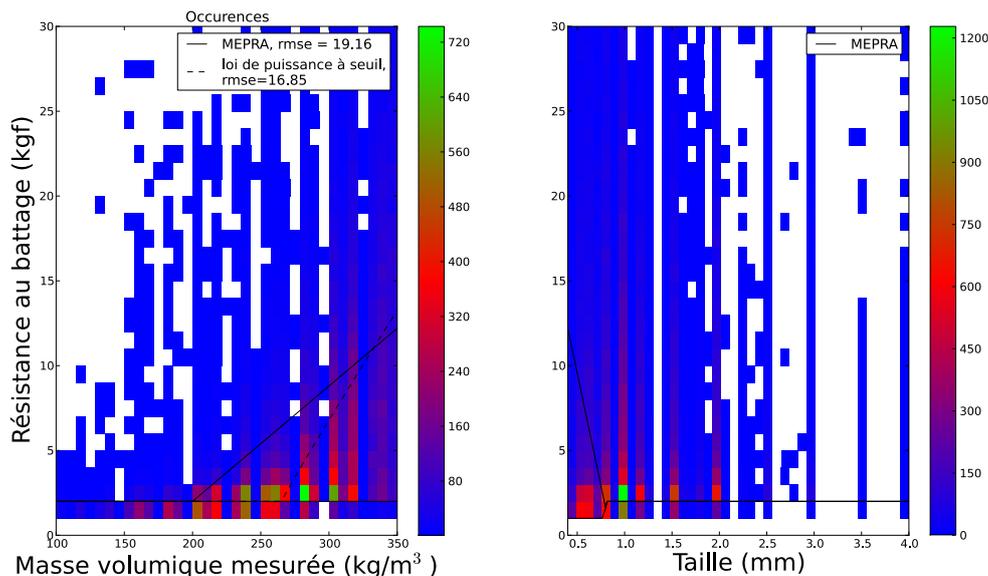


FIGURE 9 – Histogrammes de la BD-NIV pour les grains de type faces planes ou faces planes et gobelets, dans le plan (R, ρ) à gauche et (R, ϕ) à droite. Les limites de la plage de variation de la fonction MEPRA en ligne continue noire, un ajustement par une loi de puissance à seuil entre R et ρ est représenté en ligne pointillée.

désaccord entre le modèle MEPRA semble donc remettre en question la loi MEPRA 3. Cependant, il est à noter aussi que la mesure par l'observation à l'œil de la taille des grains est une mesure subjective, la caractérisation physique de la neige observée est éventuellement insuffisamment précise pour rendre compte de la loi MEPRA.

3 Analyse des signaux de pénétrométrie

Cette étude de la BD-NIV permet d'observer les limites de la qualification à l'œil de la microstructure, notamment de la taille des grains. Bien que celle-ci permet un usage très opérationnel de ces observations, comme la production quotidienne de bulletin de risque d'avalanche, elle introduit une subjectivité des mesures, d'une part limitant la précision des modèles d'évolution du manteau neigeux et du risque d'avalanche ; d'autre part demandant une connaissance experte de ces observations pour leurs exploitations. L'observation de variables physique, ouvrirait la porte non seulement à une mesure par instrument, objective, de ces grandeurs permettant des modèles numériques plus précis, mais aussi à d'autres applications de ces mesures. Par exemple, il pourrait être possible d'utiliser ces variables pour calculer plus facilement des indices interprétable pour une personne initiée mais non experte, donnant accès à une information très locale complémentaire au bulletin de risque d'avalanche.

Dans cette optique, la seconde étude réalisée au cours de ce stage était d'appliquer les développements récents [Proksch et al., 2015; Löwe and van Herwijnen, 2012] d'analyse des signaux produits par le SMP, permettant de déduire un profil de masse volumique et de SSA, et de les confronter à des méthodes dédiées à la mesure de ces grandeurs : Profils de masse volumique obtenue par carottage, profils de surface spécifiques par mesures optiques (DUFISSS [Gallet et al., 2009], ASSSAP[Arnaud et al., 2011]).

3.1 Revue bibliographique

3.1.1 Contexte scientifique

Le SMP produit un signal riche, présentant d'importantes fluctuations dues à une résolution suffisamment haute pour observer la rupture des différentes liaisons entre grains de glace au cours de la pénétration; dès lors, il apparaît être possible de déduire des paramètres microstructuraux du signal SMP. [Johnson and Schneebeli \[1999\]](#) développent un modèle micromécanique en supposant que la contribution de la compaction de la neige est négligeable (petite pointe \approx taille des grains) et que la déformation est élastique-fragile (voir Figure 10), ce qui est justifiable pour des taux de déformation suffisamment grands ($> 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) [[Kirchner et al., 2001](#)]. Ceci permet l'interprétation de grandeurs statistiques du signal de force en matière de paramètres physiques : taille de l'élément structural de base L , déflexion à la rupture δ et force de rupture f . La résistance à l'enfoncement mesurée est alors supposée être due à la superposition de la déformation élastique de chacun des grains, aux frottements entre les grains et la pointe du pénétromètre et à la rupture des grains. [Marshall and Johnson \[2009\]](#) reprennent ce modèle et développent un algorithme d'inversion du signal de force basé sur le comptage des ruptures individuelles de grains pour déduire les paramètres δ , L et f . [Löwe and van Herwijnen \[2012\]](#) interprète le signal de force en considérant la rencontre d'un grain avec la pointe du pénétromètre comme un processus de poisson en espace. Ceci permet de relier la variance du signal à la force de rupture, la longueur de corrélation à la déflexion à la rupture et l'intensité du processus à la taille de l'élément L . Ils montrent aussi que le signal de force présente différentes longueurs de corrélations, montrant que des informations sur la neige à différentes échelles peuvent être déduites du signal SMP (taille des clusters des grains de neige par exemple) [Proksch et al. \[2015\]](#) reprennent cette approche pour déduire différents paramètres plus classiquement utilisés pour l'étude de la neige : masse volumique, surface spécifique et longueur de corrélation. Le modèle est calibré avec différentes données de terrain afin d'établir les valeurs de différentes constantes intervenant entre les paramètres statistiques et physiques. Ceci permet, en moyenne sur différent type de neige, d'estimer la masse volumique avec une erreur de 10.6%, la longueur de corrélation avec une erreur de 16.4% et la surface spécifique avec une erreur de 23,1%, à partir du seul signal du SMP.

3.1.2 Lien avec le travail de ce stage

Le modèle de [Löwe and van Herwijnen \[2012\]](#) suppose une distribution d'éléments de rupture élastique fragile similaire à ceux représentés figure 10 (droite) aléatoire selon un processus de Poisson tri dimensionnel. L'intensité λ_{3D} de ce processus de Poisson est alors une mesure de la densité des éléments de rupture et la longueur $L = \lambda_{3D}^{-3}$ est la distance moyenne entre les éléments mécaniques. Le procédé de pénétration peut alors être interprété comme un processus de poisson unidimensionnel (intégration sur la surface de la pointe du nombre de rencontres de celle-ci avec les éléments de rupture) superposant aléatoirement les motifs représentés en Figure 10 (gauche). Cette approche permet d'exprimer les variables statistiques du signal de pénétration matière de paramètres micromécaniques. Le calcul des variables statistiques est effectué sur une épaisseur de taille $w^{(smp)}$ sur laquelle la neige est supposée être homogène (i.e. les paramètres L , δ et f ne varient pas). Par la suite, la notation \bar{A} $\sigma(A)$ représente respectivement la moyenne et la variance de la variable A sur l'ensemble des points de mesures SMP dans la fenêtre de taille $w^{(smp)}$. Afin de permettre un modèle plus avancé des éléments de rupture, [Löwe and van Herwijnen \[2012\]](#) effectue leurs calculs en permettant à la force de rupture f de varier d'un élément à un autre. Deux distributions de ces éléments sont employées : d'une part les éléments sont supposés identiques, une distribution de Dirac permet alors de retrouver la modélisation de l'élément de rupture décrit par [Schneebeli et al. \[1999\]](#) et utilisée par [Schneebeli et al. \[1999\]](#); [Marshall and Johnson \[2009\]](#), d'autre part une distribution gamma est utilisée afin d'introduire un paramètre de dispersion α (facteur de forme de la distribution) des forces de rupture. Par la suite, la notation $\langle \cdot \rangle$ représente la moyenne sur la distribution des ruptures de force.

En introduisant la fonction de corrélation à deux points du signal de résistance à l'en-

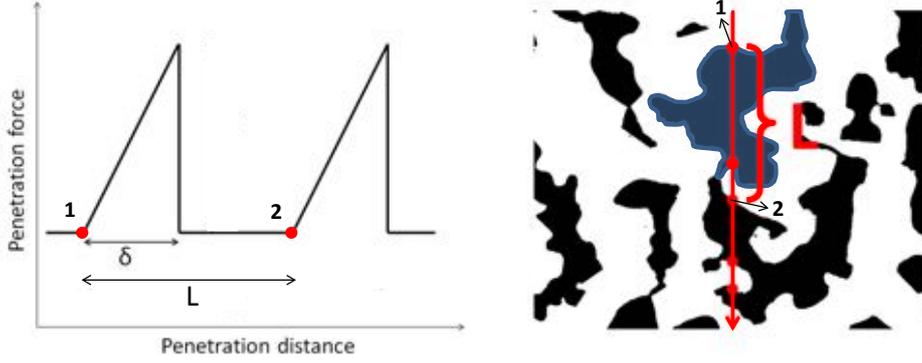


FIGURE 10 – Depuis Schneebeli and Johnson [1998]. Gauche : signal modèle par la traversé d'un élément de rupture élastique-fragile tel qu'utilisé dans les modèles micromécaniques d'interprétation du signal Schneebeli and Johnson [1998]; Schneebeli et al. [1999]; Marshall and Johnson [2009]; Löwe and van Herwijnen [2012]. Droite : interprétation en termes de géométrie de la neige de la taille de l'élément L .

foncement F , dont l'expression au décalage r est :

$$C(r) = \overline{\langle F(z) - \bar{F} \rangle \langle F_T(z+r) - \bar{F} \rangle} \quad (9)$$

Löwe and van Herwijnen [2012] montrent que la déflexion à la rupture δ ne dépend pas de la distribution de force choisie et peut être exprimée

$$\delta = -\frac{3}{2} \frac{C(0)}{C'(0)} \quad (10)$$

En supposant une distribution de Dirac des forces de ruptures, l'intensité $\lambda_{3D,Dirac}$ et la force de rupture $f_{0,Dirac}$ s'expriment respectivement

$$\lambda_{3D,Dirac} = \frac{4}{3} \frac{\bar{F}^2}{\sigma(F)\delta S} \quad (11)$$

avec S la surface projetée de la pointe du SMP et

$$f_{0,Dirac} = \frac{3}{2} \frac{\sigma(F)}{\bar{F}} \quad (12)$$

En introduisant en supplément κ_3 le cumulante d'ordre 3 du signal de force sur $w^{(smp)}$, l'intensité $\lambda_{3D,\Gamma}$, la force de rupture moyenne $f_{0,\Gamma}$ et le facteur de forme α s'expriment

$$\lambda_{3D,\Gamma} = \frac{6\bar{F}^2\sigma(F)}{(9\sigma(F)^2 - 4\kappa_3\bar{F})\delta S} \quad (13)$$

$$f_{0,\Gamma} = \frac{9(\sigma(F)^2 - 4\kappa_3\bar{F})}{3\bar{F}\sigma(F)} \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{2(4\kappa_3\bar{F} - 9\sigma(F)^2)}{9\sigma(F)^2 - 8\kappa_3\bar{F}} \quad (15)$$

Proksch et al. [2015] utilise ces résultats pour construire des modèles empiriques reliant les variables physiques densité ρ et SSA à la force médiane \bar{F} du signal sur la fenêtre d'analyse $w^{(smp)}$ et à la distance moyenne entre les éléments de rupture pour une distribution uniforme des forces de rupture $L = \lambda_{3D,Dirac}^{-3}$. La masse volumique est alors donnée par :

$$\rho^{(smp)} = a_1 + a_2 \ln(\tilde{F}) + a_3 \ln(\tilde{F})L + a_4 L \quad (16)$$

avec $a_1 = 420.47 \pm 8.31 \text{ kgm}^{-3}$, $a_2 = 102.47 \pm 4.24 \text{ N}^{-1}$, $a_3 = -121.15 \pm 10.65 \text{ N}^{-1}\text{m}^{-1}\text{m}$, et $a_4 = -169.96 \pm 18.70 \text{ mm}$

Debye et al. [1957] fournit une relation entre la masse volumique, la surface spécifique et la longueur de corrélation l_c d'un matériau poreux isotropes dont les pores sont de taille et de formes aléatoires :

$$SSA = 4 \frac{1 - \frac{\rho}{\rho_m}}{l_c} \quad (17)$$

cette relation est exploitée par Proksch et al. [2015] en dérivant la surface spécifique comme étant :

$$SSA^{(smp)} = \frac{4(1 - \phi_i^{smp})}{c_1 + c_2 L + c_3 \ln(\tilde{F})} \quad (18)$$

en définissant $\phi_i^{(smp)} = \rho^{(smp)} / \rho_{ice}$ et avec $c_1 = 0.131 \pm 0.0081 \text{ mm}$, $c_2 = 0.355 \pm 0.015 \text{ m}^{-1}\text{m}$ et $c_3 = 0.0291 \pm 0.0024 \text{ N}^{-1}$

Le travail réalisé durant ce stage a été d'effectuer nos propres mesures de terrain, en effectuant des profils de résistance à l'enfoncement, de masse volumique et de SSA et d'appliquer les modèles de Löwe and van Herwijnen [2012] et Proksch et al. [2015] sur ce nouveau jeu de donnée.

3.2 Mesures de terrain

De février à mai, 7 sorties de terrain ont été réalisées sur deux sites : 3 au site nivométéorologique du col de porte (1325m d'altitude) et 4 au col du lautaret (2058m d'altitude). Ces sorties ont fait l'objet de mesures variées utilisées pour diverses études au CEN.

Le protocole de mesure était le suivant (voir la Figure11 pour la disposition type des différentes mesures) :

1. Mesure de plusieurs profils SP2 le long d'une ligne EST-OUEST d'environ 1.5 m, avec environ 10 cm entre chaque profil. Ceci permet d'évaluer la variabilité du champ de neige le long de cette direction.
2. Mesure de profils SP2 le long de lignes perpendiculaires à la première ligne afin d'évaluer la variabilité sur la seconde dimension horizontale.
3. Mesures de plusieurs profils SMP sur une ligne parallèle à la ligne des profils SP2, séparée de celle-ci de 10 cm, avec 10 cm entre chaque profil.
4. Réalisation de 1 à 2 sondages par battage
5. Si réalisation de mesures ASSSAP : mesures de profils SMP supplémentaires puis carottage et mesures ASSSAP, éventuellement sur différentes faces du trou ainsi réalisé.
6. Ouverture du manteau neigeux afin de faire apparaître un mur vertical afin de réaliser les mesures qui suivent.
7. Réalisation du profil de stratigraphie classique : couches, masse volumique par couches, type de grains, taille des grains, teneur en eau liquide, indice de dureté, indice d'humidité.
8. Réalisation d'un profil de masse volumique à l'aide d'un carottier prismatique droit de hauteur 2.5 cm à base carré de côtés 10 cm. Ce carottier permet une haute résolution en profondeur due à sa hauteur réduite.
9. Réalisation d'un profil de température
10. Profil de SSA en utilisant DUFISSS.

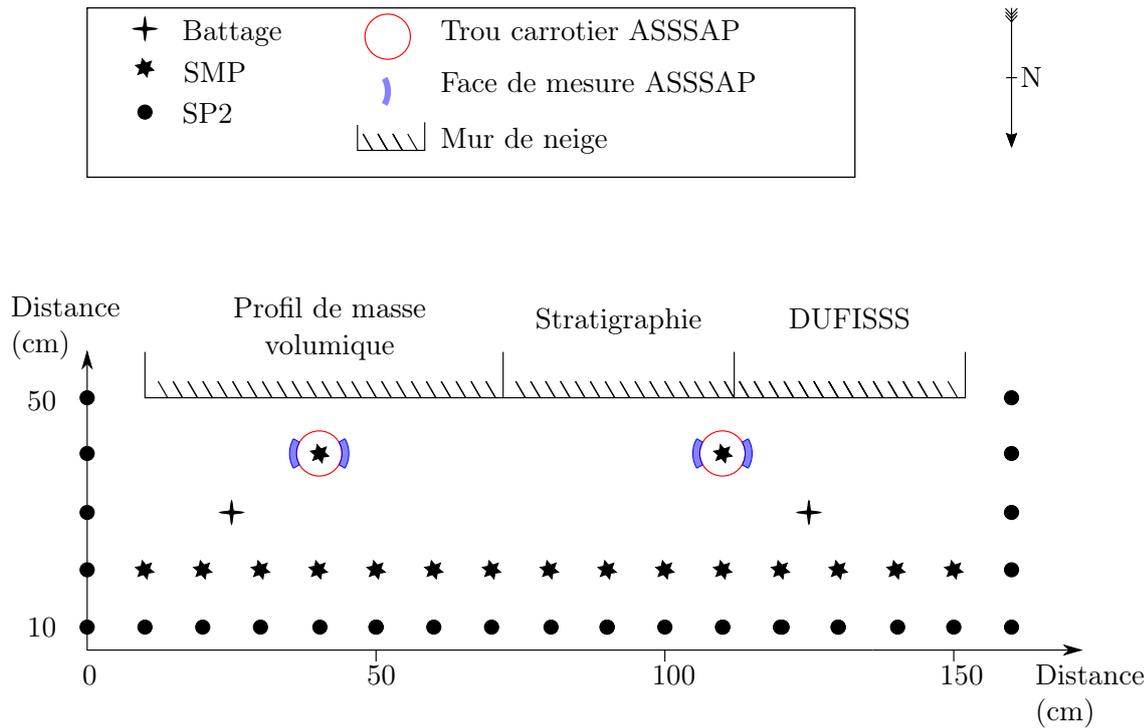


FIGURE 11 – Plan type de la disposition des différentes mesures effectuées lors d’une sortie terrain.

TABLE 1 – Information générales sur les sorties effectuées : lieu et nombre de profils effectués avec chaque instrument.

Date	Lieu	SMP	SP2	Battage	ASSSAP	DUFISSS
18/02/2016	Col du Lautaret	15	37	2	0	1
25/02/2016	Col du Lautaret	20 ¹	31	2	0	1
02/03/2016 ²	Col de Porte	9	9	1	0	1
11/03/2016	Col de Porte	20 ¹	15	1	0	1
16/03/2016	Col de Porte	20 ¹ +2(ASSSAP)	10	1	3	1
17/03/2016	Col du Lautaret	10 +2(ASSSAP)	36	1	3	1
31/03/2016 ²	Col du Lautaret	22	21	1	2	0

¹ Dont la moitié réalisé avec le SMP prêté par le Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l’Environnement.

² Les mesures effectuées ces jours n’ont pas pu être exploitées et ne sont pas présentées.

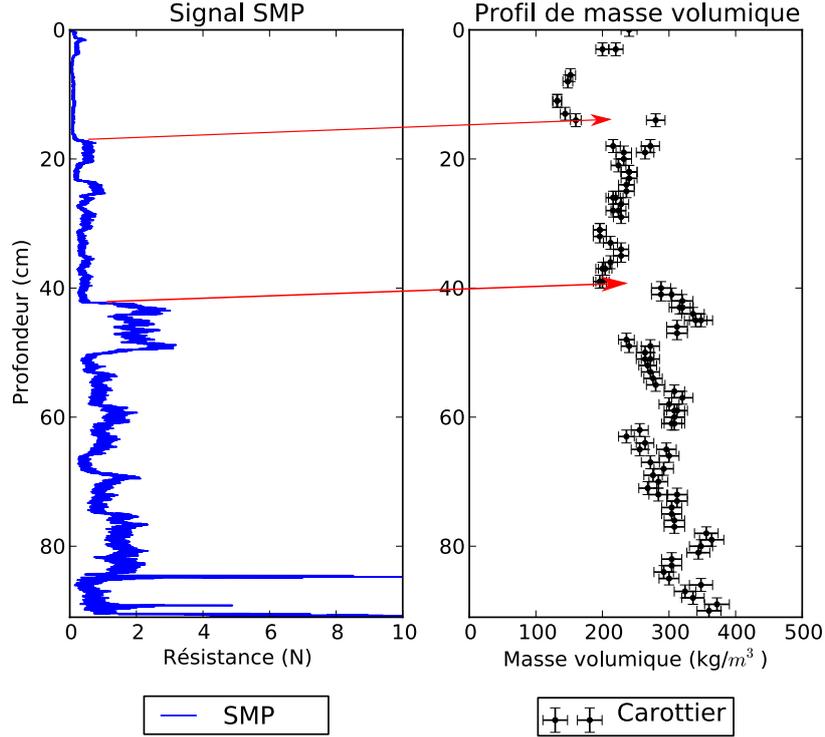
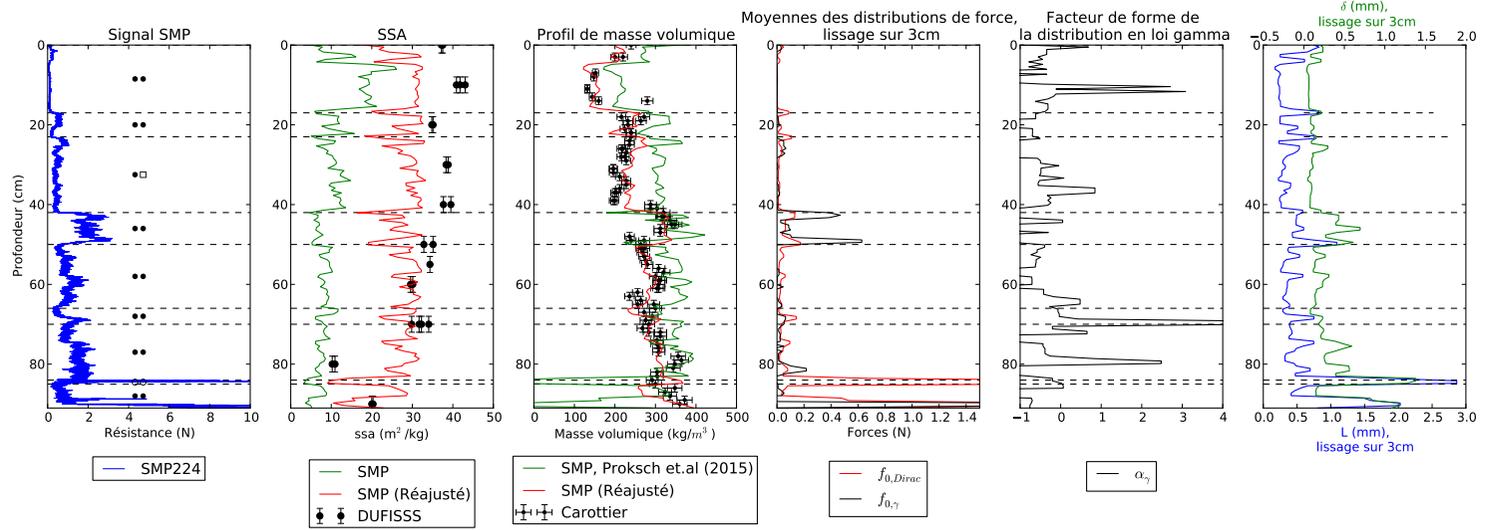


FIGURE 12 – Exemple de réalignement des profils de masse volumique et de SMP. Les flèches rouges indique les caractéristiques correspondantes entre ces deux profils.

3.3 Résultats

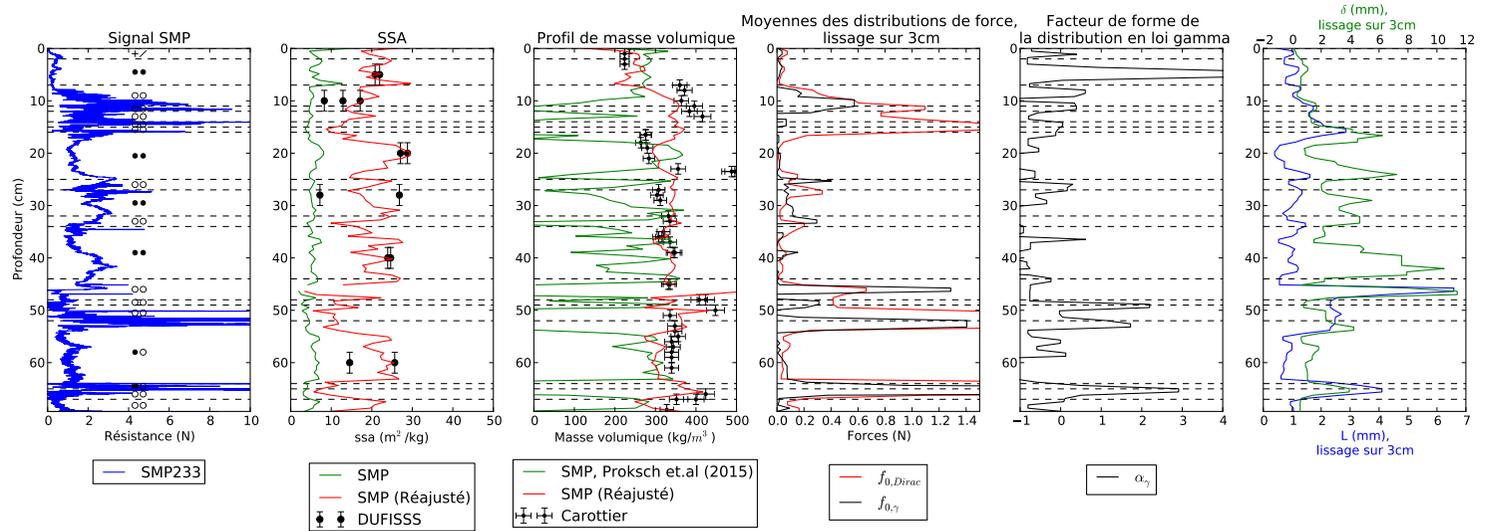
Les figures 13(a) à (e) présente les profils SMP, de SSA réalisé avec DUFISSS et/ou ASS-SAP, de masse volumique ainsi que les résultats de l'analyse de Löwe and van Herwijnen [2012] : profils de $f_{0,Dirac}$, $f_{0,\gamma}$, α_γ , δ et L calculés depuis le signal SMP, sur une fenêtre de 1000 points, correspondant à 4 mm. Afin d'améliorer la lisibilité de ces profils, un lissage par moyenne glissante sur 3cm est appliqué sur ces profils. Une même couche peut être positionnée à différentes hauteurs entre ces différents profils, ceci est dû d'une part à la variabilité spatiale du champ de neige, les différentes grandeurs n'étant pas mesurées au même endroit (voir Figure11) et d'autre part aux erreurs de mesures et de calibrations des différents instruments utilisés. Afin de faciliter la comparaison de ses profils, ceux-ci ont d'abord été réalignés manuellement, en faisant correspondre les hauteurs quand une même couche est nettement visible sur chacun des profils, en gardant un déplacement des couches inférieures à 5 cm (Voir Figure 12). Les valeurs de SSA et de masse volumique estimées depuis le signal SMP à l'aide des modèles empiriques Proksch et al. [2015] sont représentées en vert dans les graphiques correspondants à ces grandeurs. Dans cette partie, nous présentons les analyses effectuées et leurs résultats, la discussion de ces résultats pourra être trouvée en partie 4.

20160218-Lautaret



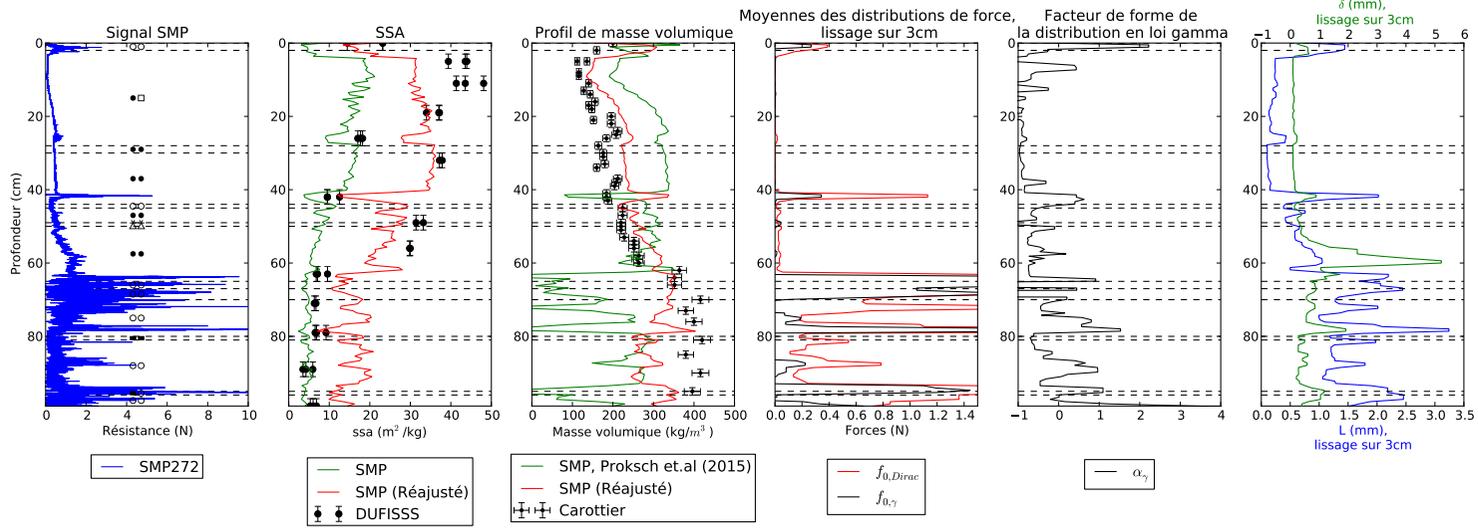
(a) 18/02 : Col du Lautaret

20160225-Lautaret



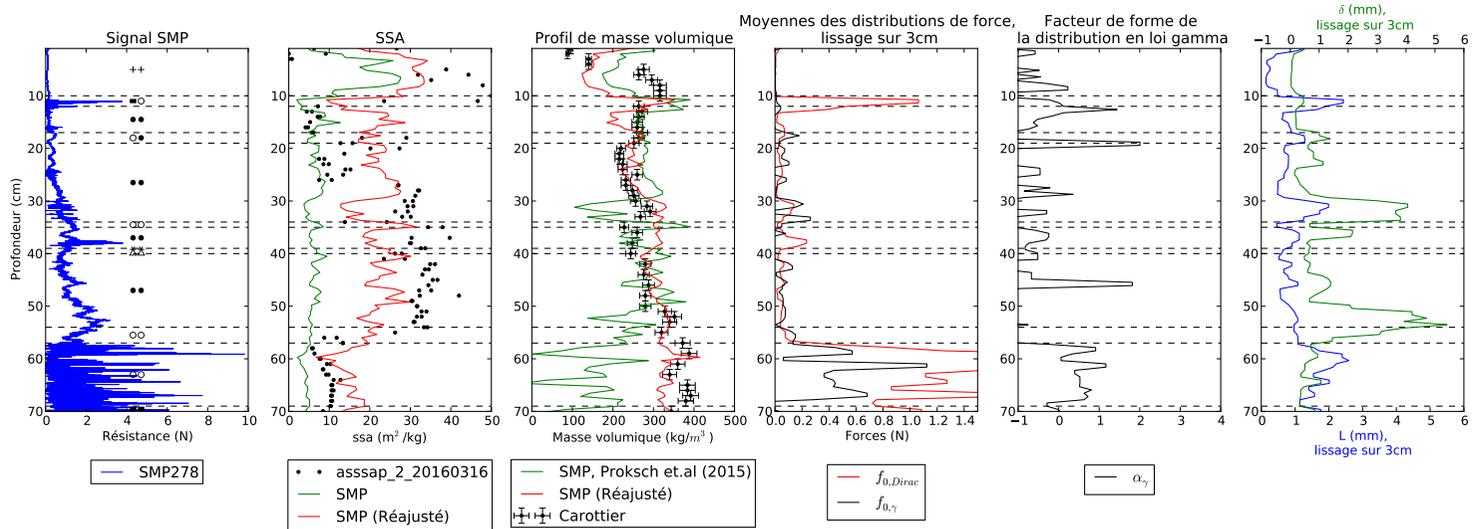
(b) 25/02 : Col du Lautaret

20160311_ColdePorte

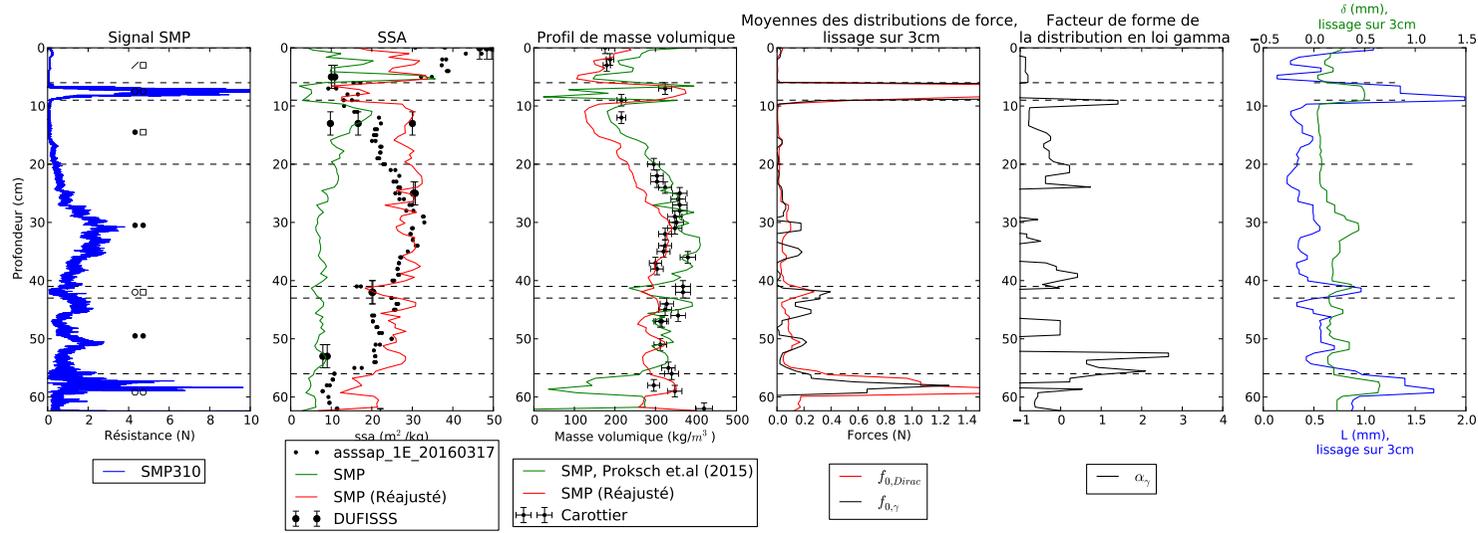


(c) 11/03 : Col de Porte

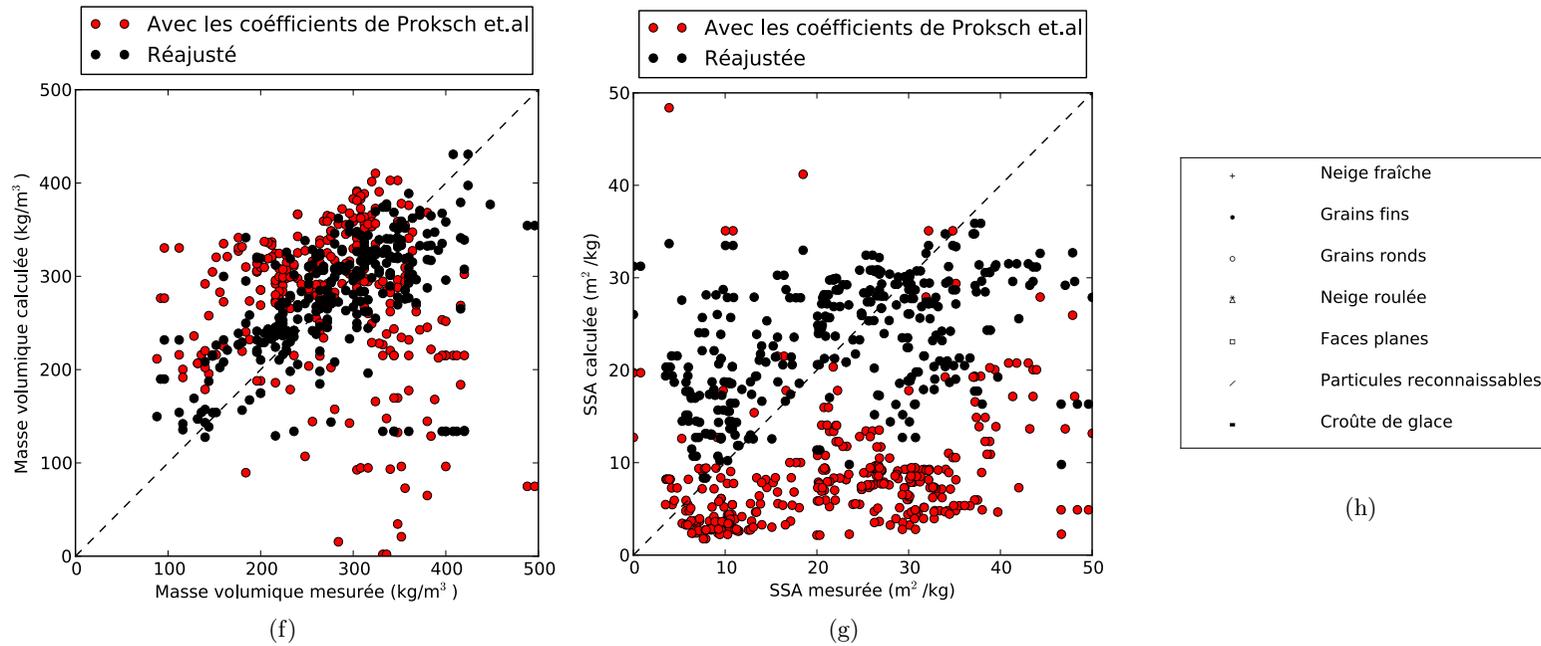
20160316_ColdePorte



(d) 16/03 : Col de Porte



(e) 17/03 : Col de porte



(h)

FIGURE 13 – Résultats des mesures de terrains. De (a) à (e). Chacun de ces graphiques est un profil dont les grandeurs sont, de gauche à droite : résistance à l'enfoncement SMP, surface spécifique (mesurée et dérivée du SMP), masse volumique (mesurée et dérivée du SMP), moyenne des distributions de force, facteur de forme α_γ , déflexion à la rupture et taille de l'élément de rupture. Efficacité des fonctions d'estimations pour la masse volumique et la surface spécifiques. Les traits en pointillés représentent la limite des couches observées à l'oeil, dont le type est donné par les symboles représentés sur le profil SMP (dont les significations sont données par (h)).

3.3.1 Masse volumique

Qualitativement, une bonne reproduction de l'évolution du profils de masse volumique, notamment les variations rapides, permettent d'obtenir le nombre de couches et leur positions. Pour les profils en vert celle-ci est respectée sur ceux du 18/02 et du 17/03, les couches visibles dans le profils de masse volumique mesuré sont aussi visible dans le profils reproduit. Ceci n'est pas le cas sur les profils du 11/03 et du 16/03 où des erreurs apparaissent dans le bas des profils, produisant une mauvaise évolution. D'importantes fluctuations sur de faible épaisseur, non physiques (masse volumique nulle notamment), apparaissent. On peut observer sur les profils 25/02, 11/03 ($d > 60\text{cm}$) et 17/03 qu'une importante partie de ces erreurs se produisent quand grossièrement, $L > 0.8\text{mm}$. En effet, en utilisant les coefficients de Proksch et al. [2015], la masse volumique devient une fonction décroissante de la résistance à l'enfoncement pour des valeurs de L supérieure à 0.85mm . Les coefficients de Proksch et al. [2015] sont issus d'ajustement sur des profils dont la taille de l'élément de rupture reste inférieure à 1mm . Ceci justifie que ces coefficients ne permettent pas d'estimer la masse volumique sur l'ensemble des points rencontrés dans nos données. Une correction simple dans un premier temps est d'effectuer un réajustement du modèle (16) sur les données collectées lors de ce stage. Pour ce faire une valeur de \tilde{F} et L , nécessaire à l'estimation de la masse volumique, est déterminée par interpolation de ces grandeurs à chaque hauteur dont ont dispose d'une mesure de masse volumique. L'erreur quadratique a été minimisée en utilisant l'algorithme L-BFGS-B (Limited memory-Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno-Bounded) Morales and Nocedal [2011]. La performance globale de l'estimation est représentée par le graphe 13f. Sur l'ensemble des 291 points utilisés, la rmse est de 181kg m^{-3} avec un biais de 38.7kg m^{-3} en utilisant les coefficients de Proksch et al. [2015] et de 60.7kg m^{-3} sans biais après réajustement sur l'ensemble des profils, conduisant aux coefficients suivants : $a_1 = 279\text{kg m}^{-3}$, $a_2 = 62\text{N}^{-1}$, $a_3 = -23.2\text{N}^{-1}\text{mm}^{-1}$, et $a_4 = 34\text{mm}$. Les profils avec ces valeurs de coefficients sont représentés en rouge sur les graphes de masse volumique sur les figures 13a à 13e. On remarque l'évolution des courbes est correctes sur tous les profils. L'erreur résiduelle est due à des imprécisions de l'estimation. Le profil du 18/02 est très bien reproduit, le profil du 25/02 comporte plusieurs imprécisions de l'ordre de $\simeq 50\text{kg m}^{-3}$, cependant l'évolution générale est retrouvée et les importantes fluctuations ne sont pas présentes. Sur le profil du 11/03, la masse volumique des couches entre 0 et 40cm de profondeur ainsi qu'en dessous de 80 cm reste imparfaitement reconstruite, la forme est respectée, mais la masse volumique est surestimée de $\simeq 50\text{kg m}^{-3}$ dans les couches supérieures et sous-estimées de $\simeq 100\text{kg m}^{-3}$ dans les couches inférieures. Pour le profil du 16/03, sans tenir compte de l'erreur de mesure du SMP entre 29 et 34 cm, les principales variations sont reproduites avec une erreur globale de $\simeq 50\text{kg m}^{-3}$ (notamment sur les deux premières couches stratigraphiques), en dessous de 60cm, la masse volumique n'est plus sous-estimée. Sur le profil du 17/03, la masse volumique est nettement sous-estimée (100kg m^{-3}) entre 10 et 30 cm, et la croûte située à 42cm n'apparaît pas. Cependant, les valeurs calculées restent correctes sur le reste du profil. Afin d'évaluer l'apport de la taille de l'élément de rupture L sur l'estimation de la SSA, un ajustement a été réalisé en maintenant les coefficients a_3 et a_4 nuls. Ceci conduit aux coefficients $a_1 = 309\text{kg m}^{-3}$ et $a_2 = 49\text{N}^{-1}$ et une rmse de 69kg m^{-3} . L'élément de rupture L permet donc une réduction de l'erreur de 10kg m^{-3} .

3.3.2 Surface spécifique

Sur les figures 13(a) à (e), on peut observer que la dérivation de la SSA depuis le signal SMP sous-estime systématiquement cette grandeur en se référant aux mesures effectuées avec DUFISSS et ASSSAP. De plus, les signaux calculés possèdent de faibles variations (25/02, 11/03 et 16/03 notamment) ou même une évolution allant à l'inverse de celle mesurée (17/03). Une première raison de ces importantes erreurs est que la SSA est calculée à partir de

TABLE 2 – Erreurs après réajustement des modèles sur des sous ensembles des données de terrain suivant le type de grain majoritaire et la classe d’humidité¹.

Humidité	type de grains	points	RMSE (kg m ⁻³)
1	tous	178	47.6
>1	tous	139	67.5
toutes	fins	226	41.2
toutes	ronds	53	48
1	fins	167	41.7
>1	fins	59	37
>1	ronds	47	45

¹ Classes d’humidité : 1= sèche (Boules impossibles), 2= peu humide (T>-1°C et boule faciles), 3=humide(gant humide), 4=mouillée (l’eau coule en serrant)

la masse volumique estimée $\rho^{(smp)}$ selon l’équation (18).¹ Comme il a été vu, cette estimation présente quelques erreurs. De même que pour la masse volumique, un réajustement des coefficients c_1 , c_2 et c_3 de la formule (18) a été effectué, la masse volumique étant estimée avec le réajustement présenté en 3.3.1. Pour ce faire, seuls les points correspondants à une mesure optique de la surface spécifique ont été utilisés, \tilde{f} et L étant obtenues par interpolation (344 points au total). La figure 13(g) représente la performance globale de l’estimation de la SSA. La rmse avec les coefficients d’origine est de 19.9 m² kg⁻¹ avec un biais de 15.0 m² kg⁻¹ et de 12.3 m² kg⁻¹ avec un biais de 0.061 m² kg⁻¹ après réajustement, conduisant aux paramètres $c_1 = 0.084$ mm, $c_2 = 0.028$ m⁻¹m et $c_3 = 0.00266$ N⁻¹. Les profils de SSA dérivés du signal SMP sont affichés en rouge sur les figures 13a à 13e. Sur tous les profils, la SSA calculée possède d’importantes fluctuations, de l’ordre de 10 m² kg⁻¹. On peut noter aussi que les variations des profils calculés sont moins marquées que celles des profils mesurés.

3.3.3 Influence de l’humidité et du type de grains

Bien que l’évolution des profils de masse volumique soit correcte, l’estimation présente une erreur de 60.7 kg m⁻³ et la SSA de 12 m² kg⁻¹. Ces erreurs sont particulièrement importantes en comparaison des résultats obtenus par Proksch et al. [2015] (rmse ρ :35.9 kg m⁻³, SSA :4.03 mm⁻¹=3.69 m² kg⁻¹). Nous pensons que ceci est dû au fait que d’autres facteurs introduisent une variabilité. Notamment, plusieurs des couches mesurées présentaient de l’humidité; ceci peut mettre en défaut l’applicabilité des modèles utilisés par exemple l’hypothèse de rupture élastique-fragile. Afin de mieux cerner les meilleures conditions d’application des modèles en conditions de terrain, des ajustements de la masse volumique ont été effectués sur des sous-ensembles de notre jeu de donnée, définis suivant leur classe d’humidité manuelle et de type de grains majoritaires. Les résultats de cette analyse sont donnés par le tableau 2. Il apparaît que les modèles fournissent les meilleurs résultats pour les grains fins, que ceux soient secs ou humides, avec une erreur de l’ordre de 40 kg m⁻³. Cependant, dans le cas général, l’humidité représente un facteur important (20 kg m⁻³ de différence) sur ce jeu de données, composé de 72% de grains fins, de 16% de grains ronds et de 12% d’autres types de neige.

¹Une autre possibilité aurait été d’ajuster simultanément les deux modèles statistiques sur leurs variables respectives. Cependant, l’équation (17) étant une relation théorique entre ρ et SSA l’estimation de la SSA devrait être optimale quand celle de la masse volumique l’est aussi. La seconde méthode a été testée est produit une erreur sur la masse volumique de 60.3 kg m⁻³ et sur la surface spécifique de 9.5 m² kg⁻¹, semblable donc aux résultats présentés.

TABLE 3 – Résultats d’ajustement d’une loi de puissance de ρ en fonction de f pour les 4 catégories de SSA [0,15], [15,25] [25, 30] et [30, 40] ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$).

p_1 (kg m^{-3})	p_2 (N)	p_3
338	0.0346	0.0897
315	0.0334	0.0969
312	0.0154	0.120
253	-0.026	0.262

3.3.4 Dérivation de la masse volumique des mesures conjointes de résistance à l’enfoncement et de surface spécifique

La surface spécifique étant corrélée à la masse volumique [Debye et al. \[1957\]](#) et des profils de cette grandeur étant rapidement réalisable avec ASSSAP, nous nous sommes intéressés à améliorer l’estimation de la masse volumique à partir des mesures conjointes de résistance à l’enfoncement et de surface spécifique. Afin de préciser le lien entre ces grandeurs, il a été tracé sur la figure 14(a) la masse volumique mesurée en fonction de la résistance à l’enfoncement en classant les points selon quatre catégories de surface spécifique (en $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$) : [0, 15], [15, 25] [25, 30] et [30, 40], comprenant respectivement 109, 70, 54 et 109 points. Les symboles représentent le type de grains. Principalement grains fins et grains ronds sont présents dans cet ensemble. Les autres types de grains paraissent en nombre insuffisant pour permettre une interprétation. Les points représentés sont correspondre aux points de mesure de surface spécifique, les valeurs de masse volumique et de force médiane \tilde{f} étant interpolée depuis leurs profils respectifs. Pour chaque catégorie de SSA, un ajustement par une loi de puissance de forme donnée par l’équation 19 est effectué sur les points correspondant aux grains fins uniquement, où f° est une force de référence valant $f^\circ=1$ N. Ces ajustements sont représentés par les lignes sur la figure14a. Les paramètres résultants sont donnés par la table 3.

On observe pour les grains fins que, à résistance à l’enfoncement fixée, la masse volumique diminue avec la SSA. Ce fait devrait pouvoir permettre d’affiner la corrélation entre ρ et \tilde{f} . La masse volumique des grains ronds se répartit sur un intervalle restreint de 300 à 400 kg m^{-3} , une tendance est assez faiblement observable.

$$\rho = p_1 \left(\frac{\tilde{f} - p_2}{f^\circ} \right)^{p_3} \quad (19)$$

De même la masse volumique a été tracée en fonction de la surface spécifique (Figure 14b). Les points sont représentés suivant 4 catégories de force \tilde{f} . La dépendance de la masse volumique avec la SSA est observable pour chacune des catégories de forces. La masse volumique diminue grossièrement linéairement avec la SSA.

4 Discussion et conclusion

Les relations empiriques entre résistances à l’enfoncement et propriétés géométriques de la neige ont été étudiées sur deux jeux de données. Le premier comportant un nombre important d’observations sur les variables classiques, le second comportant des données permettant d’évaluer l’estimation de la masse volumique et de la surface spécifique à partir d’un signal SMP.

La corrélation classique entre la résistance à l’enfoncement et la masse volumique a été observée sur les deux jeux de données.

Dans les données de la BD-NIV, la masse volumique est la seule variable à avoir pu être clairement corrélée à la résistance à l’enfoncement. Plus particulièrement, la taille observée

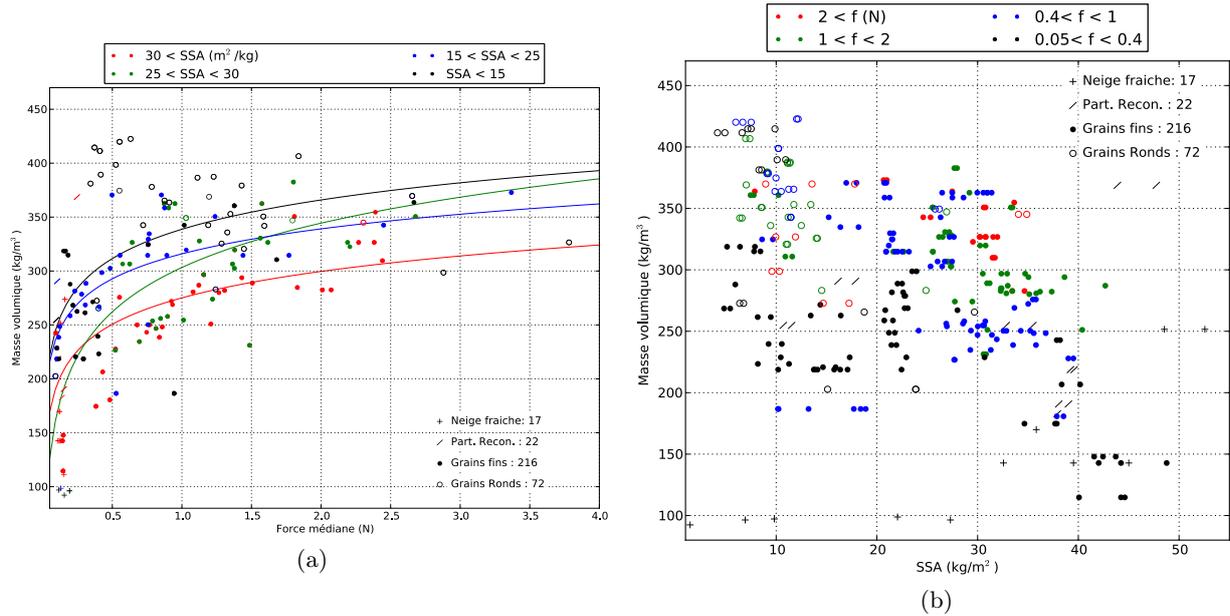


FIGURE 14 – (a) Masse volumique mesurée en fonction de la résistance à l’enfoncement médiane, la couleur des points réfèrent à la catégories de SSA.(b)masse volumique mesurée en fonction de la SSA, les couleurs réfèrent aux catégories de force médiane. Pour les deux figures, le symbol réfère au type de neige.

à l’œil ne semble pas permettre d’affiner le lien entre ces deux variables. Nous pensons que ceci peut-être dû au fait que cette mesure de la taille est très subjective, plus adapté à la surveillance du risque d’avalanche qu’à une étude physique de la neige. En effet, pour mesurer une telle taille, l’observateur doit recueillir un peu de neige sur la plaquette, séparer les grains manuellement et estimer une taille moyenne observée. Cette méthode rend la mesure dépendante de l’observateur : la séparation des grains peut être plus ou moins prononcée, définir les limites des grains à l’œil est parfois équivoque et estimer la taille moyenne de ces grains introduit une incertitude importante (les grains n’étant pas forcément ronds et identiques, plusieurs tailles peuvent être mesurées pour une même couche). Cependant, l’observateur expérimenté, quand une incertitude se présente sur cette estimation, saura choisir la valeur permettant au mieux de prévenir le risque d’avalanche. Dans ce cas, il devient difficile de relier cette grandeur à la mesure effectuée par la sonde de battage. À l’inverse, la taille de l’élément de rupture dérivée du signal SMP permet d’affiner l’estimation de la résistance à l’enfoncement à partir de la masse volumique. L’influence de cette taille reste cependant modeste (amélioration de 10 kg m^{-3} pour une erreur initiale de 69 kg m^{-3} sans utiliser cette variable). Comme attendu, sans distinction de type de grains l’analyse des signaux SMP fournit de meilleurs résultats sur de la neige sèche que sur la neige humide. En effet, la dérivation des paramètres micromécaniques est réalisée sous l’hypothèse que la résistance à l’enfoncement est créée par la résistance élastique des grains, aucune influence de l’eau liquide n’étant prévue [Schneebeli et al., 1999; Löwe and van Herwijnen, 2012]. Notre jeu de donnée ne permet pas d’établir de conclusion sur d’autres types de grains que les grains fins et les grains ronds. L’analyse des signaux SMP fournit de meilleurs résultats pour les grains fins que les grains ronds. Ceci est relié à la remarque sur l’humidité, les grains fins sont généralement secs ou peu humides, une légère présence d’eau liquide ne semble donc pas mettre en défaut ce modèle d’interprétation. À l’inverse, les grains ronds sont généralement mouillés et le modèle conduit à d’importantes erreurs. La dérivation de la surface spécifique à partir du signal SMP s’est révélée être imprécise avec une erreur de $12 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ les profils présentes des variations peu marquées en comparaison des profils par mesures optiques. Une première

raison à cela, comme suggéré par Proksch et al. [2015], est que la SSA est estimée à partir d'une relation théorique avec la masse volumique et la longueur de corrélation du milieu poreux, ces deux grandeurs étant estimées par des modèles empiriques, les erreurs de chacun de ces modèles se cumulent. Les erreurs obtenues par Proksch et al. [2015] pour l'estimation de masse volumique et de SSA pour la neige alpine sont respectivement de 35.9 kg m^{-3} et de $3.70 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$. Celles-ci sont plus faibles que celles obtenues lors de notre étude, plus particulièrement pour la surface spécifique. L'ensemble de neige alpine utilisée par ces auteurs présente des types de neige variés [Riche and Schneebeli, 2013], le type de neige ne semble donc pas être responsable de cette divergence. Enfin, les profils conjoints de résistance à l'enfoncement, masse volumique et SSA suggère qu'à résistance à l'enfoncement fixée, la masse volumique décroît avec la SSA, particulièrement pour les grains fins. Cette observation est en accord avec le résultat de l'analyse factorielle pour la neige dendritique où la résistance au battage apparaît anticorrélée à la dendricité, assimilable à une mesure de la surface spécifique (une neige très dendritique aura une SSA élevée). Cependant, une différence apparaît entre ces résultats dans le fait que les grains fins possèdent relativement peu de dendrites, la surface spécifique étant plus une mesure de la taille que de la forme de ces grains. Cette remarque nous amène à penser que la corrélation classique entre la masse volumique et la résistance à l'enfoncement peut-être affinée par une mesure de paramètres microstructuraux, particulièrement par une notion de taille des grains. Cependant cette grandeur peut être définie de diverses manières : optiquement (rayon de sphère équivalente), mécaniquement (taille des éléments de ruptures), visuellement (maximum d'extensions des grains observés à la loupe). La taille définie mécaniquement ou optiquement apparaît être plus adaptée pour effectuer les corrélations entre variables physiques.

Références

- Arnaud, L., Picard, G., Champollion, N., Domine, F., Gallet, J.-C., Lefebvre, E., Fily, M., and Barnola, J.-M. (2011). Measurement of vertical profiles of snow specific surface area with a 1 cm resolution using infrared reflectance : instrument description and validation. *Journal of Glaciology*, 57(201) :17–29.
- Christian, J., Whittemore, S., Markle, B., Laakso, T., and Sohn, A. (2014). Avatech : The first portable, web connected snow penetrometer for professionals. In *proceedings, International Snow Science Workshop, Banff*.
- Debye, P., Anderson, H. R., and Brumberger, H. (1957). Scattering by an inhomogeneous solid ii. the correlation function and its applications. *Journal of Applied Physics*, 28 :679–683.
- Domine, F., Salvatori, R., Legagneux, L., Salzano, R., Fily, M., and Casacchia, R. (2006). Correlation between the specific surface area and the short wave infrared (SWIR) reflectance of snow : preliminary investigation. *Cold Regions Science and Technology*, 46 :60–68.
- Escofier, B. and Pagès, J. (2008). *Analyses factorielles simples et multiples : objectifs, méthodes et interprétation*. Dunod.
- Gallet, J.-C., Domine, F., Zender, C. S., and Picard, G. (2009). Measurement of the specific surface area of snow using infrared reflectance in an integrating sphere at 1310 and 1550 nm. *The Cryosphere*, 3 :167 – 182.
- Giraud, G. (1992). MEPRA : an expert system for avalanche risk forecasting. In *Proceedings of the International snow science workshop, 4-8 oct 1992, Breckenridge, Colorado, USA*, pages 97–106.
- Johnson, J. B. and Schneebeli, M. (1998). Snow strength penetrometer. US Patent 5,831,161.

- Johnson, J. B. and Schneebeli, M. (1999). Characterizing the microstructural and micromechanical properties of snow. *Cold Regions Science and Technology*, 30 :91–100.
- Kaiser, H. F. (1958). The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23(3) :187–200.
- Kaiser, H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and psychological measurement*, 20 :141–151.
- Kirchner, H., Michot, G., Narita, H., and Suzuki, T. (2001). Snow as a foam of ice : plasticity, fracture and the brittle-to-ductile transition. *Philosophical Magazine A*, 81(9) :2161–2181.
- Löwe, H. and van Herwijnen, A. (2012). A poisson shot noise model for micro-penetration of snow. *Cold Regions Science and Technology*, 70 :62–70.
- Marshall, H.-P. and Johnson, J. B. (2009). Accurate inversion of high-resolution snow penetrometer signals for microstructural and micromechanical properties. *Journal of Geophysical Research*, 114 : F04016.
- Morales, J. L. and Nocedal, J. (2011). Remark on Algorithm 778 : L-BFGS-B : Fortran subroutines for large-scale bound constrained optimization . *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 38(1) :7.
- Perla, R. I., Martinelli Jr, M., et al. (1976). Avalanche handbook. *Agriculture Handbook, US Department of Agriculture*, (489).
- Pielmeier, C. and Schneebeli, M. (2003). Stratigraphy and changes in hardness of snow measured by hand, ramsonde and snow micro penetrometer : a comparison with planar sections. *Cold Regions Science and Technology*, 37 :393–405.
- Proksch, M., Löwe, H., and Schneebeli, M. (2015). Density, specific surface area and correlation length of snow measured by high resolution penetrometry. *Journal of geophysical research*.
- Riche, F. and Schneebeli, M. (2013). Thermal conductivity of snow measured by three independent methods and anisotropy considerations. *The Cryosphere*, 7(1) :217–227.
- Schneebeli, M. and Johnson, J. B. (1998). A constant-speed penetrometer for high-resolution snow stratigraphy. *Annals of Glaciology*, 26 :107–111.
- Schneebeli, M., Pielmeier, C., and Johnson, J. B. (1999). Measuring snow microstructure and hardness using a high resolution penetrometer. *Cold Regions Science and Technology*, 30 (1–3) :101–114.