



HAL
open science

Évaluation des méthodes in-situ des mesures de résistance à l'enfoncement et de résistance au cisaillement de la neige

Thibault Pilloix

► **To cite this version:**

Thibault Pilloix. Évaluation des méthodes in-situ des mesures de résistance à l'enfoncement et de résistance au cisaillement de la neige. *Climatologie*. 2015. dumas-01285555

HAL Id: dumas-01285555

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01285555>

Submitted on 9 Mar 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MASTER 2

*Domaine : Sciences Humaines et Sociales
Mention : Sciences du Territoire*

Spécialité Professionnelle :
Systemes Territoriaux, Aide à la Décision, Environnement

EVALUATION DES METHODES *IN-SITU* DES MESURES DE RESISTANCE A L'ENFONCEMENT ET DE RESISTANCE AU CISAILLEMENT DE LA NEIGE

Mémoire soutenu le : 17 Juin 2015

Devant un jury composé de :

Responsable : HAGENMULLER Pascal (Chercheur, CEN/ CNRM-GAME)
Examineurs : WILHELM Bruno (Maitre de conférences, LTHE)
BIGOT Sylvain (Professeur, LTHE)

PILLOIX Thibault

M2 STADE
ANNEE 2014-2015

Organisme d'accueil : Centre d'Etude de la Neige. CNRM-GAME. Météo-France

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les membres de mon jury d'évaluation : Bruno Wilhelm et Sylvain Bigot pour leur intérêt vis-à-vis de mon sujet d'étude et pour la lecture de ce rapport.

Je remercie particulièrement Pascal Hagenmuller, qui s'est avéré être un maître de stage particulièrement à l'écoute. Il a effectivement eu la patience et la pédagogie de m'intégrer à son domaine d'étude : les propriétés mécaniques de la neige. J'ai alors pu bénéficier de son précieux accompagnement tout au long du stage.

L'équipe du CEN a aussi été d'un réel soutien. Je pense notamment à Bernard Lesaffre qui m'a accompagné lors de nombreuses mesures de terrain au Col de Porte durant lesquelles il m'a fait partager ses larges connaissances et multiples astuces. Je remercie aussi le CEN de m'avoir invité à suivre un séminaire à Davos (« *international advanced training course on Snow and Avalanches* ») dont le contenu très riche était associé à une hospitalité sans faille.

Par ailleurs, je remercie les nombreux stagiaires et thésards du CEN pour la très saine émulation et la bonne humeur tout au long de ce stage.

Les patrouilleurs de La Grave (Pascal Guiboud et Jérôme Gillet) ainsi que le personnel du TGM ont une place toute aussi grande dans ces remerciements puisqu'ils ont permis d'optimiser nos campagnes de mesures. Ils ont aussi montré un intérêt et une aide cruciale pour le choix de sites de mesures et orienté de manière pertinente nos décisions pour garantir notre sécurité sur le terrain. Un grand merci à eux !

Un grand merci aussi à Laurent Arnaud de nous avoir prêté le SMP du LGGE. Sans lui, cette étude n'aurait pu exister !

Enfin je remercie Charlène Grillet pour son aide apportée à la relecture de ce mémoire mais aussi Charlotte Marion pour son soutien inoxydable.

Un dernier mot est accordé aux collègues du Master STADE et voisins de stages pour les fameux repas 100% féculents du restaurant universitaire et les parties de foot endiablées d'après-stage: Victor, Marine, Simon, Ophélie, Marie, Charlène.

Résumé

Les propriétés mécaniques des différentes strates de neige et leur agencement sont des éléments déterminants pour estimer la stabilité du manteau neigeux. Sur le terrain, les nivologues caractérisent la cohésion de la neige, c'est-à-dire sa capacité à supporter une contrainte mécanique, au travers de deux principaux instruments : les pénétromètres et les scissomètres. Le principe d'un pénétromètre est de mesurer la résistance mécanique à l'enfoncement d'une tige pointue, la sonde, que l'on introduit verticalement dans le manteau neigeux. Le scissomètre mesure la résistance au cisaillement d'une strate de neige en lui appliquant un moment de torsion. L'objectif de ce stage était d'évaluer les mesures des scissomètres disponibles au CEN et de comparer la résistance à l'enfoncement obtenue par un nouveau pénétromètre (le SP1) à celle obtenue par le pénétromètre usuel (la sonde de battage) et un pénétromètre de référence (le SMP). Nous avons montré que la majorité des scissomètres utilisés présentait un défaut mécanique (mauvais étalonnage du dynamomètre ou vitesse de rotation de la bague de graduation non dépendant de celle du cylindre), ne permettant pas une mesure correcte. Par ailleurs, l'abaque utilisée pour transcrire la graduation observée sur le scissomètre en une résistance au cisaillement présente des différences avec nos propres calculs. L'estimation de la cohésion de la neige par les pénétromètres représente donc une alternative intéressante. Pour comparer les pénétromètres, nous avons effectué sur le terrain (La Grave, mars 2015), un sondage avec chaque instrument (SMP/SP1/Sonde de battage) à quelques centimètres de distance. Puis nous avons reproduit ces mesures à quelques mètres de distance pour évaluer comment chaque pénétromètre traduit la variabilité spatiale du manteau neigeux. Nous avons vérifié que les hétérogénéités spatiales horizontales du manteau neigeux à l'échelle d'une dizaine de centimètres sont négligeables, ce qui permet effectivement de comparer les sondages effectués. Notre comparaison montre que (1) la faible résolution de la sonde de battage ne permet pas (ou peu) d'identifier les couches fragiles du manteau neigeux. (2) la sensibilité du SP1 en contrainte permet de distinguer toutes les couches identifiées par le SMP, le pénétromètre de référence, mais qu'il peut présenter d'importante erreur (± 15 cm sur une épaisseur de 50 cm), sur la profondeur des couches détectées. Cette imprécision limite l'interprétation de la variabilité spatiale mesurée par le SP1. La résolution en force du SP1 est donc plus importante que celle de la sonde par battage mais sa précision en profondeur largement inférieure à celle du SMP. Ce défaut du SP1 est tout de même à nuancer par rapport à sa facilité d'utilisation et sa légèreté. Le SP1 est en effet nettement moins encombrant et plus léger que le SMP. De même, il est plus compact que la sonde de battage et ses mesures nettement plus rapides.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	6
ETAT DE L'ART.....	7
Partie 1 : Présentation des outils de mesures	7
1.1- Sonde par battage ou RamSonde (RS)	7
1.2- SnowMicroPen (SMP)	10
1.3- Avatech SP-1 (SP1)	12
1.4- Tableau comparatif des pénétromètres	14
1.5- Le scissomètre	15
1.6- La stratigraphie	16
1.7- Le Compression Test [CT] comme outil de visualisation des couches fragiles	17
Partie 2 : Comparaison des profils de résistance à l'enfoncement obtenus par les différents pénétromètres	18
2.1- Etude autour de l'avatech SP1	18
2.2- Comparaison articulée autour du Snow-Micro-Pen et de la RamSonde.....	19
2.3- Normalisation et comparaison	20
METHODOLOGIE ET MESURE DE TERRAIN.....	21
Partie 1 : Les sites de mesures	21
1.1- Col de Porte	21
1.2- Col du Lautaret	22
1.3- La Grave.....	22
Partie 2 : Protocole de mesure.....	24
2.1- Protocole Col de Porte [CDP] / Col du Lautaret [LAU]	24
2.2- Protocole La Grave [LG] (19 et 20 mars 2015)	25
2.3- Protocole La Grave [LG] (23 mars 2015)	25
RESULTAT	26
Partie 1 : Evaluation générale du scissomètre.....	26
1.1- Objectif et protocole	26
1.2- Résultats	27
1.2.1- Vérification intrinsèque de l'instrument.....	27
1.2.2- Vérification de l'abaque graduation / contrainte.....	27
1.2.3- Conclusion	29
Partie 2 : Comparaison des pénétromètres.....	30
2.1- Critiques d'utilisation des pénétromètres pour les mesures in-situ	30
2.1.1- Avatech SP1	30
2.1.2- Snow-Micro-Pen	30
2.1.3- RamSonde.....	31
2.2 - Reproductibilité des pénétromètres et homogénéité de la zone de mesure	31
2.2.1- Signaux moyens et dispersion des valeurs.....	31

2.3 - Comparaison des mesures de pénétromètres.....	33
2.3.1- Approche visuelle	33
2.3.2- La résistance à l'enfoncement en fonction de la dureté (<i>Hand-Hardness [HH]</i>) et de la stratigraphie.....	36
2.3.3- La capacité de détection des couche fragiles par pénétromètre en fonction des <i>Compression-Tests</i> [CT].....	37
2.3.4- Relations statistiques entre pénétromètres	40
2.3.5- Comparaison des valeurs absolues de contrainte entre SMP et SP1 par forçage de la correspondance en profondeur des signaux.	43
CONCLUSION	46
BIBLIOGRAPHIE.....	47
ANNEXES	50
Annexe 1 : Profil stratigraphique issue de la plateforme AVANET	50
Annexe 2 : Carte de localisation des sites de mesure	51
Annexe 3 : description de l'ECT (<i>Source : slf.ch</i>)	52
Annexe 4 : Rapport d'évaluation du scissomètre	53

INTRODUCTION

Le CEN (Centre d'Etude de la Neige), l'un des huit unités de recherche du CNRM-GAME¹, a pour mission centrale de développer la prévision du risque d'avalanche en France. Pour établir le Bulletin d'Estimation du Risque d'Avalanche (BER), le prévisionniste avalanche de Météo-France utilise deux sources d'informations principales : le réseau d'observation nivométéorologique composé majoritairement de pisteur-secouriste et les sorties de modèle de la chaîne SAFRAN-CROCUS-MEPRA (Durand et al., 1999). Document central pour une large plage d'utilisateurs de la montagne, le BERA cherche à diagnostiquer le type de départ d'avalanche et d'estimer l'occurrence, la fréquence et la dimension des avalanches concernées. Concernant les types de départ d'avalanche, on note (1) les départs ponctuels et (2) les départs en plaques.

(1) Les départs ponctuels se forment à partir d'une couche de surface peu cohésive, qu'elle soit sèche ou humide. L'initiation intervient avec un volume faible (<1m³) au niveau d'un point de rupture (Schweizer et al., 2003). Il se développe ensuite une érosion en « entonnoir » de la couche de surface durant l'écoulement.

(2) Les départs en plaques, au cœur de cette étude représente la grande majorité des accidents mortels de skieurs en Europe et en Amérique du nord (Jamieson et Geldsetzer, 1996; Tschirky et al., 2001, Schweizer et Lütschg, 2001²).

Ces avalanches sont la conséquence du détachement d'une plaque relativement cohésive sur une couche fragile. La fracture est alors analogue au détachement d'un bloc rocheux (Perla, 1980). Le déclenchement d'une plaque intervient par effondrement de la couche fragile lors d'une charge en compression appliquée de manière ponctuelle et d'une propagation de cet effondrement au sein de la couche fragile (Heierli, 2008) qui s'accompagne d'un cisaillement en cas de pente suffisamment forte. Le phénomène d'effondrement est par ailleurs observable sur des zones peu pentues grâce au phénomène de « whumpf » (Bohren et Beschta, 1974).

Les caractéristiques mécaniques de chaque strate de neige sont déterminantes pour comprendre et donc mieux prévoir la formation des avalanches. Pour les départs ponctuels, la résistance mécanique des couches en surface est déterminante. Pour les départs en plaques, l'existence d'une couche de faible résistance sous une couche relativement cohésive dans le mille-feuille que constitue le manteau neigeux est déterminant.

La capacité de la neige à supporter un chargement, appelé cohésion se traduit via la valeur de résistance à l'enfoncement par mesure au pénétromètre (Ancey, 1996) ou via la valeur de résistance au cisaillement obtenue par mesure de scissomètre. Ainsi, à l'instar de Schweizer et Reuter (2015), un indice de stabilité du manteau neigeux peut-être déduit de la résistance à l'enfoncement. Il reste tout de même indispensable d'établir le lien systématique avec la stratigraphie pour pouvoir estimer l'évolution dans le temps du risque d'avalanche. Cette dernière permet en effet de rendre compte des caractéristiques (i.e. formes et tailles) des grains de neige, qui sont déterminées par les conditions de précipitation (température et saturation de l'atmosphère) mais aussi par les conditions au sol (e.g. température de surface, gradient de température ou encore tassement). Ce processus de transformation des caractéristiques physiques des grains de neige est appelé métamorphisme. Or c'est ce processus, évoluant dans le temps et l'espace, qui détermine directement les propriétés mécaniques du manteau neigeux. C'est ensuite l'agencement des strates de neige qui implique *in-fine*, une configuration à dominante stable ou au contraire un risque d'avalanche potentiel.

¹ Le CNRM-GAME (UMR 3589) est une unité Mixte de Recherche, constituée par le CNRS et Météo-France, et regroupant toutes les activités de recherche menées par les sites toulousain et grenoblois du Centre national de recherches météorologiques (CNRM)

² En suisse, 90% des accidents mortels liés aux avalanches sont la conséquence d'un départ en plaque déclenché par les victimes elles-mêmes (pour la décennie 1987-1997)

Considérant l'importance de transcrire la cohésion des strates de neige, nous chercherons à comparer trois pénétromètres (la *RamSonde* [RS], l'*Avatech SP1* [SP1] et le *Snow-Micro-Pen* [SMP]), afin d'établir l'apport du sondage électronique dans l'analyse de la stabilité du manteau neigeux et plus spécifiquement l'apport du SP1. Ce dernier possède en effet un fort potentiel de diffusion au sein du réseau d'observateur nivométéorologue. Nous compléterons cette comparaison en analysant l'utilisation du scissomètre pour établir dans quelle mesure il peut-être complémentaire aux mesures de pénétromètre.

Nous établissons pour cela une présentation des outils de mesures cités précédemment avant d'explicitier les études comparatives existant dans la littérature ainsi que leurs méthodes. Cette première partie précèdera la présentation de la méthodologie utilisée pour les mesures de terrains nécessaire à cette étude. Le rapport d'évaluation du scissomètre ainsi que l'étude comparative entre les pénétromètres seront détaillés dans un troisième temps. Cela nous permettra enfin d'initier une réflexion sur les limites de la *RamSonde* et les perspectives possibles pour l'*Avatech SP1*.

ETAT DE L'ART

Partie 1 : Présentation des outils de mesures

Nous présenterons dans cette partie, les outils de mesure du manteau neigeux que nous étudierons directement, à savoir : les pénétromètres utilisés pour notre comparaison (la *RamSonde* [RS], le *Snow-Micro-Pen* [SMP] et l'*Avatech SP1* [SP1]) ainsi que le scissomètre. Mais aussi les outils de mesure que nous utiliserons comme support aux analyses précédentes : la stratigraphie et le compression-test [CT].

1.1- Sonde par battage ou RamSonde (RS)

Développé à l'origine pour l'étude des sols, la sonde par battage ou *RamSonde* (RS) a été adaptée à l'étude de la neige dans les années 1930 (Bader et al., 1939). C'est aujourd'hui l'instrument de mesure de la résistance à l'enfoncement le plus répandu dans le monde. Il se présente comme un instrument portable (2 kg pour un sondage d'un mètre) et le plus accessible financièrement (environ 800 euros) mais aussi de conception robuste.

Très bien adapté aux mesures *in-situ* en toutes conditions, c'est l'instrument référence du réseau d'observation nivologique. En effet, dans le cadre de la *charte montagne*³, les observateurs nivométéorologues fournissent à intervalle régulier des observations complètes du manteau neigeux comprenant un sondage par battage. Ces observations constituent une aide à la décision essentielle au prévisionniste mais aussi complémentaire des informations de sortie de modèle (Chaîne SAFRAN-CROCUS-MEPRA).

La sonde par battage se compose de tubes démontables de 50 cm ou 1 m de hauteur dont le poids est fixé à 1 kg par mètre de tube (figure 1.1). Le premier tube est terminé d'une pointe en forme de cône d'une section de 12 cm² et d'un angle de 60°.

³ Accord tripartite entre Météo-France, les maires de montagnes (ANMSM) et les exploitants privés (DSF) pour pérenniser l'échange de prévision nivométéorologique contre des relevés effectués par les services des pistes.

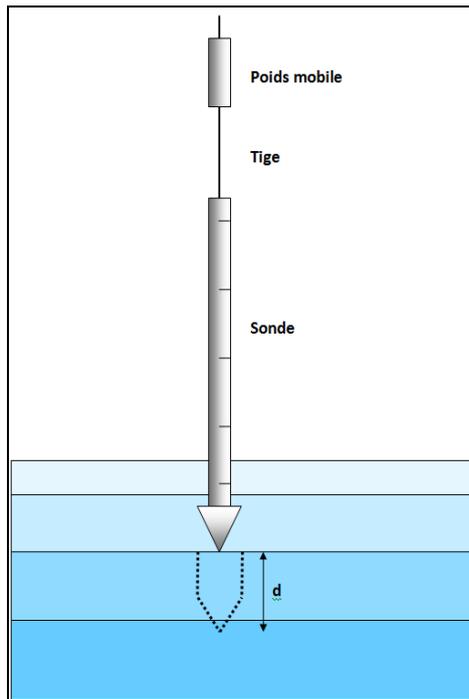


Figure 1.1 :
Schéma d'une sonde de battage.
D'après Perla et Martinelli (1976).

Le battage en tant que tel est réalisé grâce à un poids mobile de 1 kg guidé par une tige insérée au sommet du dernier tube (figure 1.2). Le poids est lâché d'une hauteur maximale de 60 cm et transmet de ce fait une énergie potentielle aux tubes. Il s'agit alors d'adapter cette opération pour avoir un enfoncement idéal d'1cm par lâcher afin de maximiser la résolution verticale de la mesure.

On note alors l'enfoncement de la sonde (d) pour n coups d'une certaine hauteur (h) et du nombre de tube utilisé (q) afin d'obtenir une valeur de résistance à l'enfoncement (R) selon l'équation suivante :

$$R = ((nhP)/d) + P + qQ \quad (1)$$

R = résistance à l'enfoncement [kgf]
 n = nombre de lâcher
 h = hauteur du lâcher [cm]
 P = poids mobile [kg]
 d = enfoncement de la sonde [cm]
 q = nombre de tube utilisé
 Q = poids du tube [kgf]

NB : Cette formule suppose l'uniformité de la résistance R sur toute l'épaisseur (d) de l'enfoncement mesuré pour n coups



Figure 1.2 : Mesure de sondage par battage, La Grave le 19/03/2015
A gauche, lâché de la sonde à vide. A droite, le battage (Source : T.Pilloix)

L'unité retenue en France pour exprimer la résistance à l'enfoncement avec la RS est le kilo-gramme-force [kgf]. Cette unité n'appartient pas au système international, il sera donc nécessaire de convertir ces valeurs en newton en les multipliant à l'accélération de la pesanteur, selon la relation suivante : $1 \text{ kgf} = 9,8 \text{ N}$. Dans cette étude, nous utiliserons davantage la conversion en contrainte, dont l'unité est le kilo Pascal [kPa] afin de normaliser les valeurs des pénétromètres par la surface de la pointe de la sonde, tel que :

$$\sigma = R/S \quad (2)$$

Où σ = contrainte [Pa], R = Résistance [N], S = surface de la pointe [m^2] soit $S = \pi \cdot 0.02^2$ pour la RS.

La RS du fait de son entrainement mécanique et du poids de sa sonde, possède une faible résolution verticale en déplacement (1 cm maximum)⁴, qui tend à lisser les différences au sein d'épaisses couches à faible cohésion. On observe cette configuration dans d'importante quantité de neige récente ou dans de grande épaisseur de neige métamorphosée à faible cohésion (Figure 1.3). Le rapport entre la faible résistance à l'enfoncement et le poids de la sonde ne permet alors pas la discrimination des différentes couches de neige identifiées par la stratigraphie. Gubler (1975) à montrer de surcroit que la RS a une vitesse de déformation non-constante pendant son segment de mesure. Un phénomène d'accélération de la sonde existe dans les configurations décrites en figure 1.3.

⁴ Cette résolution est optimisée par l'utilisateur via un contrôle en jeté du poids mobile.

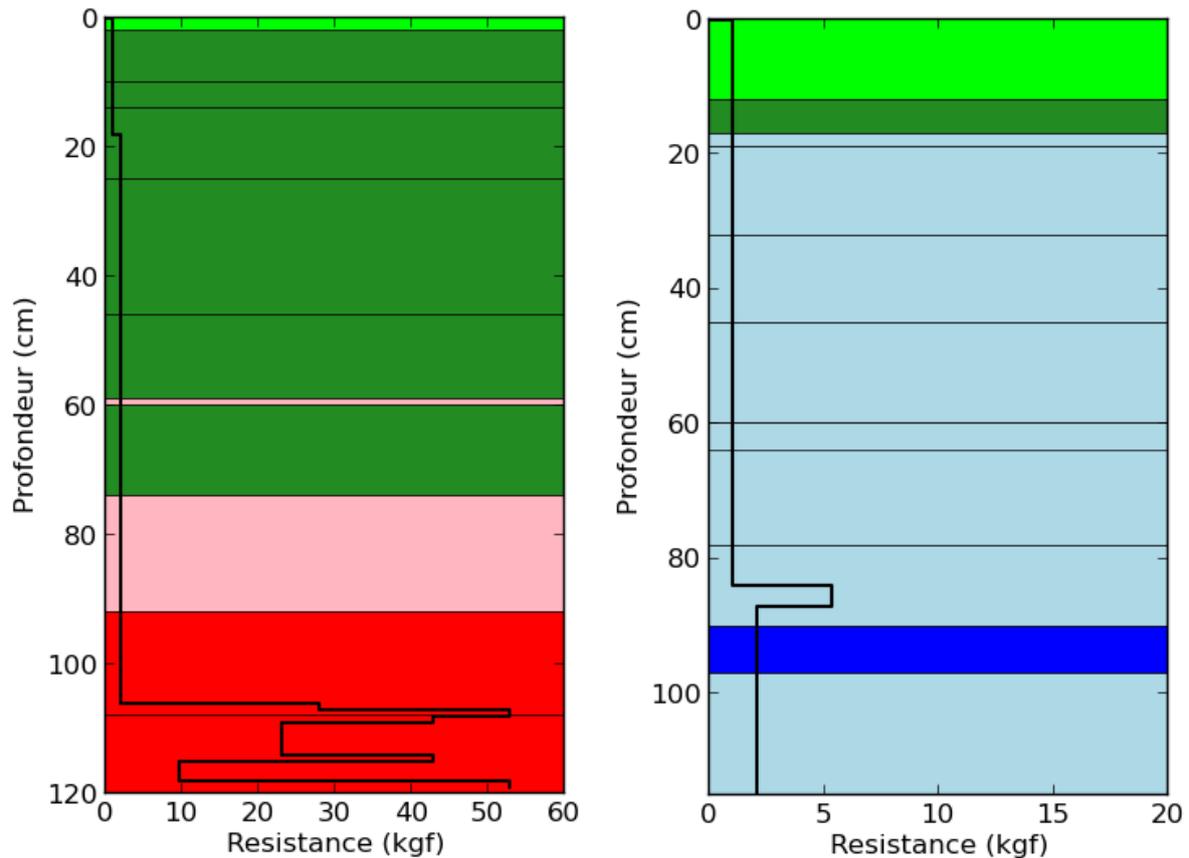


Figure 1.3 : les limites de discrimination de la RS dans le cas de neiges peu cohésives. Le graphique représente la résistance à l'enfoncement obtenue par la RS en fonction de la stratigraphie.⁵
 A gauche, Col de Porte (Isère), le 30/01/2015 : neige roulé (vert clair), particule reconnaissable (vert), Grain fin (rose) et grain rond (rouge).
 A droite, Davos (Suisse), le 24/02/2015 : neige fraîche (vert clair), particule reconnaissable (vert), face plane (bleu clair), gobelet (bleu)

Enfin, concernant la gamme de force, la RS n'as pas de valeur maximale mais un seuil minimum en contrainte de 8 kPa lié à la taille de sa pointe et au poids minimum de la sonde (1 kg), tel que :

$$P/S = \sigma \Leftrightarrow \sigma = 10 / (\pi * 0.02^2) = 8000 \text{ Pa. Soit } 8 \text{ kPa.}$$

Ce seuil minimum limite ainsi la visibilité des variations dans les couches de neige de surface très peu cohésives. Tenant compte de ces limites, des versions plus légère de la RS ont alors été développées (*Alta-Ram* : Perla, 1969) mais n'ont pas connues de diffusion notable, *a contrario* de l'utilisation de pénétromètres électroniques tel que le SMP ou le SP1 que nous présenterons ci-après.

1.2- SnowMicroPen (SMP)

Elaboré par Schneebeli et Johnson (1998), le SnowMicroPen est un instrument de mesure électronique de la résistance à l'enfoncement équipé d'une petite pointe (0.5 cm) adaptée à la caractérisation de la microstructure et d'une résolution verticale de 0.04 mm. Du fait de son encombrement (entre 1,60 m et 2,10 m de longueur) et de son prix (environ 30 000 euros), il est

⁵ Les couleurs utilisé pour la stratigraphie provienne de la classification internationale pour la neige saisonnière au sol (Fierz et al., 2009).

utilisé exclusivement pour la recherche scientifique. Domaine pour lequel il s'impose en outils de référence.

Le SMP (figure 1.4) est formé d'une pointe conique (Diamètre 5 mm ; Angle 60°) connecté à un transducteur de force et inséré dans une tige (longueur de 1,25 m à 1,80 m, diamètre 16 mm). Ce système pointe-cône-tige est inséré dans un bloc moteur qui entraine la sonde à une vitesse constante de 20mm/s.

La force exercée par la neige lors de la descente de la sonde est alors enregistrée sur une carte SD à l'intérieur du boîtier de commande. Ce dernier permet de surcroît de paramétrer le seuil maximum d'enfoncement (en Newton) afin de ne pas abimer la pointe (notamment lors d'un contact avec le sol) et de paramétrer la profondeur de mesure souhaitée.



Figure 1.4 : Mesure *in-situ* avec le SMP, La Grave le 19/03/2015 (Source : T.Pilloix)

L'atout premier du SMP est sa précision couplée à son entraînement automatique qui permet de solliciter la neige à une vitesse constante et tend à afficher une vision millimétrique du manteau neigeux. Favorisant alors l'identification des couches fragiles très fines, comme peut l'être une couche de givre de surface enfouit.

Deuxièmement le SMP permet de dériver de nombreuses propriétés physiques et micromécaniques de la neige (Schneebeli et al, 1999) tel que la densité et la longueur de corrélation (Proksch et al., 2014) ou encore la surface spécifique (Löwe et Van Herwijnen, 2012). Cela se fait à travers une modélisation du processus de pénétration (Schneebeli et Johnson, 1998) rendue possible par les hypothèses suivantes :

- La force de pénétration est une superposition de rupture des liaisons entre les grains de glace.
- Les ruptures sont fragiles (i.e. déformation élastique avant rupture) et spatialement non-corrélées.
- Les ponts intergranulaires ont une distribution aléatoire dans le volume mesuré.

Cette modélisation s'appuie sur un graphique sous forme d'indentation (figure 1.5) qui considère de manière théorique L la distance moyenne entre deux ruptures d'éléments (*structural element size*).

Avec f , la hauteur du pic correspondant à la force de pénétration (*mean rupture force*) et δ sa largeur qui correspond à la déformation élastique du grain (*deflection at rupture*). C'est à travers ce rapport *penetration force/ penetration distance* que l'on peut extraire les propriétés physiques et micromécaniques citées précédemment. Cette modélisation reste tout de même imparfaite car basée sur des hypothèses critiquables (e.g. les ruptures sont fragiles). De plus la distance moyenne entre deux ruptures d'éléments pris en compte dans la modélisation n'est pas toujours en concordance avec la structure réelle du grain, comme le montre la figure 1.5.

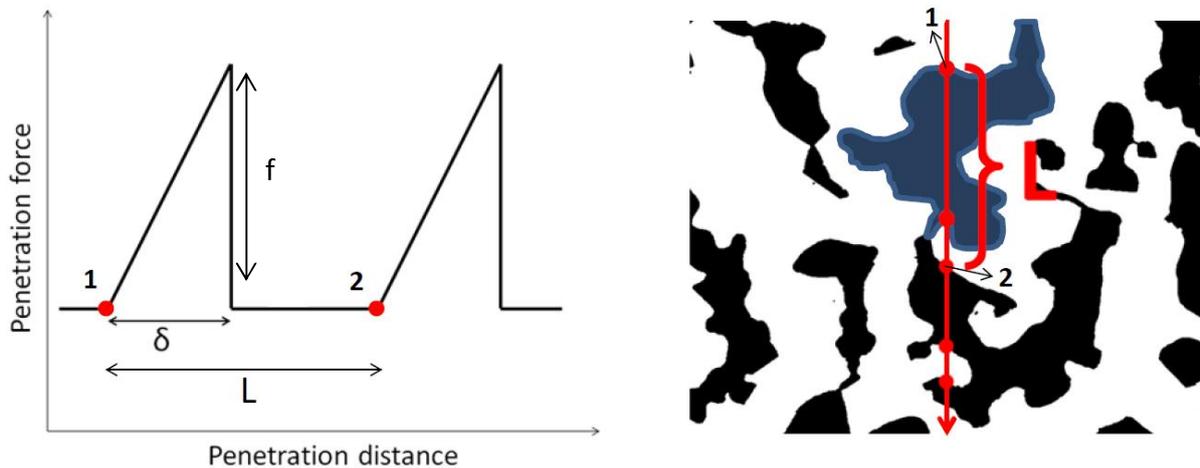


Figure 1.5: Modélisation du processus de pénétration du SnowMicroPen (d'après Proksch, Lowe et Schneebeli, 2015)

Le SMP tend ainsi à objectiver les mesures de résistance à l'enfoncement de la neige en minimisant les biais intrinsèques de ces mesures (e.g. inertie liée au poids, compaction autour de la pointe) et approche de manière pertinente les propriétés physiques et micromécaniques ce qui représente une avancée considérable pour l'étude de la neige. Malheureusement, le SMP reste, probablement à long terme, particulièrement exclusif dans son utilisation du fait de son prix et des difficultés à le déplacer sur le terrain. De surcroît la richesse du signal obtenu par le SMP, utilisée pour définir un indice de texture (Schneebeli et al, 1999), est à considérer comme un facteur limitant pour des observations opérationnelles puisqu'elle tend à rendre délicat, sans traitement de type « lissage », la vision globale du profil.

1.3- Avatech SP-1 (SP1)

La volonté de développer des instruments de sondage électronique utilisables en pratique n'est pas récente. C'est un enjeu important de part l'apport d'informations en termes de stabilité du manteau neigeux (détection optimisée des couches fragiles) mais aussi de part l'aspect pratique d'établir une mesure rapide sans creuser de tranchés (*snowpits*). Ainsi on peut recenser les pénétromètres électroniques suivants : *resistograph* (Bradley, 1966) ; *SnowFork* (Sihvola et Tivri, 1986) ; *electric cone penetrometer* (Schaap, 1987) ; *Capacitec probe* (Louge et al., 1998) ; *SABRE penetrometer* (Mackenzie et Payten, 2002) ou encore le *Pandalp* (Burlet et al., 1998). Pourtant aucun instrument cité précédemment n'a réellement perduré dans le temps ou eu la diffusion attendue pour de multiples raisons : manque de robustesse d'un point de vue mécanique, résultats peu fiables, précautions d'usages ou encombrement trop importants. En effet avant l'arrivée du SP1, seul le SMP a réussi à se diffuser significativement.

L'*avatech* SP1 est un nouveau pénétromètre électronique présenté à l'ISSW⁶ 2014 (Christian et al.). Il se présente comme plus précis que la RS et nettement plus pratique que le SMP. Il s'agit en effet

⁶ International Snow Science Workshop

d'une sonde légère résolument tournée vers un large public de professionnel de la montagne. Les attentes vis-à-vis de cet instrument sont donc importantes dans cette communauté.



Figure 1.6 : mesure *in-situ* avec le SP1, La Grave le 19/03/2015 (source : T.Pilloix)

Le SP1 se compose d'une sonde (longueur d'1,47 m) avec d'une part un capteur électronique de force situé sur une pointe conique (diamètre 0.544 cm, angle 60°) et d'autre part une console placée à l'extrémité haute de la sonde (figure 1.6). La console permet alors une visualisation directe du sondage effectué, avec une unité en kilo-Pascal préalablement paramétrée. De plus, ce pénétromètre s'accompagne d'un principe de partage de donnée : soit instantanément via une connexion Bluetooth et l'utilisation d'une application *smartphone*, soit via une connexion USB et une plateforme internet (*Avanet Cloud Database*). Il est par ailleurs possible sur cette plateforme internet de partager des observations d'avalanches détaillées ou des profils stratigraphiques manuels et de les exporter sous .pdf ou .jpeg.

Enfin, son apport évident est son aspect pratique, il s'agit en effet d'un dispositif de 530 g pouvant se replier en segment de moins de 50 cm de longueur.

Concernant sa capacité de mesure, la taille de sa pointe étant du même ordre de grandeur que le SMP, on peut considérer les mêmes propriétés de compaction de la neige lors du processus de pénétration. Mais le SP1 diverge du SMP par un entrainement manuel et par conséquent non constant. La profondeur d'enfoncement est alors calculée par un capteur infrarouge, situé sur la console, qui mesure la distance avec la surface de la neige durant l'enfoncement. Cet entrainement manuel implique une large gamme de vitesse de sondage théorique mais l'instrument refuse d'enregistrer un sondage si la vitesse de sondage est trop lente ou trop rapide. La variation de la vitesse de pénétration n'impacte pas le comportement mécanique de la neige pour une gamme de 2 à 5 mm/s (Huang et Lee, 2013), cependant on peut penser qu'il s'agit d'un facteur limitant pour la précision concernant la position spatiale d'une couche de neige.

Ainsi, le manuel d'utilisation du SP1 annonce une marge d'erreur de ± 30 kPa en terme de mesure de résistance et une erreur absolue (à partir de la surface du manteau neigeux) de ± 15 cm (entre 0 et 40 cm), ± 10 cm (entre 40 et 80 cm) et ± 4 cm (entre 80 et 147 cm).

Pour l'erreur relative, qui décrit l'incertitude concernant la distance entre deux points du manteau neigeux, les chiffres publiés sont les suivants :

Profondeur	Epaisseur	Précision
0 - 40 cm	< 10 cm	± 120%
	> 10 cm	± 75%
40 - 147 cm	< 10 cm	± 65%
	> 10 cm	± 40%

Tableau 1 : Erreur relative en fonction de la profondeur et de l'épaisseur des strates de neiges (Source : *avanet.avatech.com*)

1.4- Tableau comparatif des pénétromètres

	RamSonde [RS]	SnowMicroPen [SMP]	Avatech SP1 [SP1]
Unité d'origine	kgf	N	kPa
Contrôle de la sollicitation	Poids jeté (entraînement mécanique)	Moteur pas à pas (Entraînement automatique)	Enfoncement manuel
Portabilité	Aisée	Faible	Très aisée
Encombrement	Déplié : au minimum 1 m 20. Replié : Segment de sonde de 50 cm ou 1 m selon les modèles.	Ne peut être plié. Entre 1 m 60 et 2 m 10 de longueur selon les modèles.	Déplié : 1 m 60 de longueur. Replié : Segment de 50 cm de longueur (équivalent à une sonde de secours en avalanche)
Poids	2 kg minimum, 1kg rajouté par mètre de sonde	7kg mais 18kg avec valise de transport	530g
Temps pour effectuer une mesure	Environ 10 min.	Environ 1 min.	Moins de trente secondes
Diamètre de la pointe (cm)	4.0	0.5	0.544
Résolution	Variable et > 1 cm	0.04 mm	N.C.
Nombre d'utilisateur	Instrument de référence pour les services des pistes, prévisionnistes, recherches Plusieurs milliers dans le monde.	Environ 50 dans le monde	Fort potentiel d'extension
Domaine d'utilisation	Gestion opérationnelle du risque d'avalanche, Recherche.	Recherche	Réseau de professionnel de la montagne

Visibilité des informations	Simple (valeurs dans tableau)	Instantanée mais nécessite traitement pour une visibilité Intéressante	Instantanée (échelle « quasi-logarithmique »). Accès aux données brutes verrouillé
Précaution d'usage	Faible	Très forte	Forte
Longueur de sondage possible	Pas de limite (addition de tubes)	Entre 1,25 m (SMP du CEN) et 1 m 60 (SMP du LGGE ⁷)	1,47m
Prix	Environ 800 euros	Environ 30 000 euros	Environ 1600 euros
Contrainte maximum supportée (overload)	Pas de limite	41N soit 1640 kPa	23 N soit 920 kPa

Tableau 2 : Propriétés techniques des différents pénétromètres

1.5- Le scissomètre

Le scissomètre est un instrument de mesure de la contrainte de cisaillement d'une couche de neige. Directement dérivé du « scissomètre » utilisé en mécanique des sols, il a été adapté par le CEN pour remplacer progressivement le cadre de cisaillement (figure 1.8) à partir du début des années 80 (Giraud et al., 2004). Son fonctionnement n'a jamais fait preuve d'une systématisation et n'as été utilisé que dans le cadre d'enquêtes avalanches ou de manière occasionnelle lors de mesures au Col de Porte par le personnel du CEN. La résistance au cisaillement est pourtant fondamentale pour estimer la stabilité du manteau neigeux et est une variable clef du modèle MEPRA (Giraud et al., 2004).

Il se compose de deux parties : un dynamomètre équipé d'une graduation sur lequel on applique un moment en torsion et un jeu de couronne munie d'une tige filetée dont l'emprise correspond à la partie du manteau neigeux mesurée (figure 1.9).



Figure 1.8 : A gauche, le cadre de cisaillement relié à un dynamomètre (Source : Evans Ed.J., 2005). A droite, mesure *in-situ* avec le scissomètre (Source : T.Pilloix)

Son fonctionnement consiste en l'application manuelle d'une torsion sur le dynamomètre jusqu'à rupture de la neige sous l'emprise de la couronne. Il s'agit ensuite d'observer la graduation qui

⁷ Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, Grenoble.

correspond au point critique de résistance au cisaillement. Cette graduation observée est ensuite reportée sur un abaque pour avoir une mesure de contrainte au cisaillement en kPa. L'abaque qui résulte d'un rapport interne du CEN est alors dépendant d'un modèle de dynamomètre (marque Geonor) et considère la réponse en graduation comme linéairement proportionnelle au moment de torsion.

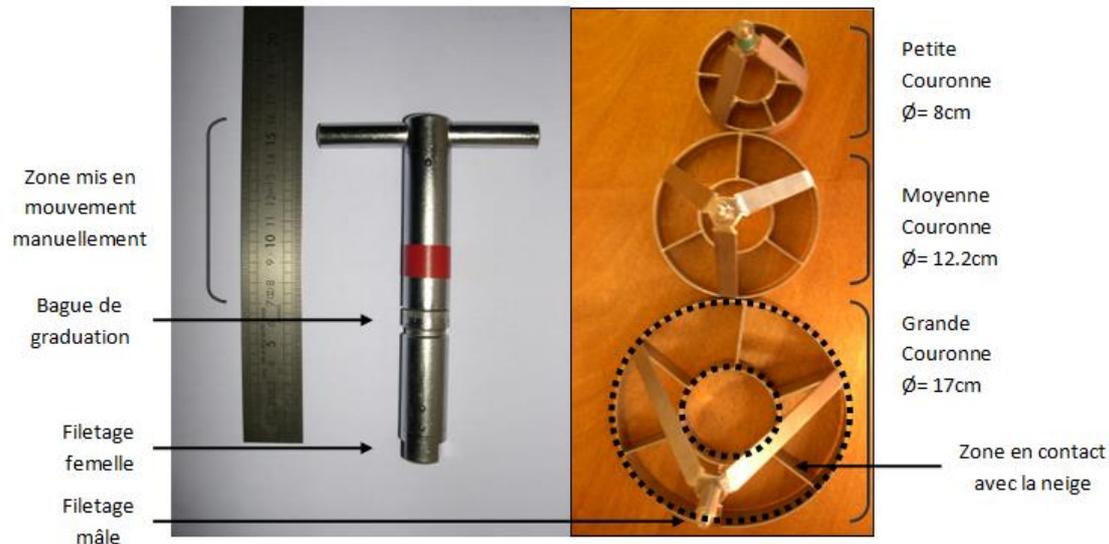


Figure 1.9 : A gauche, le dynamomètre. A droite, le jeu de couronne

Peu d'informations sur cet instrument et sur la conception de l'abaque sont disponibles au sein du CEN et à un plus large spectre, peu d'études ont été réalisées sur cet instrument ou en l'utilisant. On peut tout de même citer une étude de rupture en cisaillement via l'utilisation du cadre de cisaillement et du scissomètre (Navarre et al., 1982) ou encore le développement d'un prototype de scissomètre électronique (Evans, 2005).

1.6- La stratigraphie

La stratigraphie est un protocole de mesure de terrain indispensable qui succède généralement au sondage par battage. Elle permet de caractériser le manteau neigeux en identifiant ses strates et un certain nombre de propriétés physiques pour chaque strate identifiées (Ancey, 1996). Les principales valeurs quantifiées par la stratigraphie sont les suivantes :

- Hauteur des strates
- Nature des grains
- Dureté (*HandHardness*)

NB : Des mesures de Teneur en Eau Liquide (T.E.L), de masse volumique ou de température peuvent aussi être ajoutées.

Il s'agit, après avoir défini manuellement les limites des strates et par conséquent, leurs épaisseurs, de caractériser la nature des grains (tailles et formes) à la loupe sur une plaquette d'observation. La *hand-hardness* [HH] est ensuite quantifiée en mesurant horizontalement, la résistance à l'enfoncement par entrainement manuel selon les valeurs moyennes suivantes⁸: Fist [F] = 20 N ; Four Finger [4F] = 100 N ; One Finger [1F] = 250 N ; Pencil [P] = 500 N ; Knife [K] = 1000 N. Par exemple s'il on peut enfoncer son poing, sans forcer, dans une couche de neige, la résistance à l'enfoncement de cette dernière est évaluée à 20 Newton.

⁸ *The International Classification for Seasonal Snow on the Ground* (Fierz et al., 2009)

La stratigraphie permet ainsi de produire un histogramme représentant la profondeur en ordonnée et la *Hand-Hardness* en abscisse accompagné, pour chaque strate, d'un détail des valeurs citées précédemment (un exemple de profil stratigraphique complet est disponible en annexe 1).

1.7- Le Compression Test [CT] comme outil de visualisation des couches fragiles

Le CT est un test de stabilité du manteau neigeux particulièrement utilisé au Canada et en Suisse (e.g. Schweizer. and Jamieson, 2010). Il permet de visualiser clairement les plans de glissement souvent difficile à discriminer par stratigraphie. En effet, si la pente est suffisante à l'emplacement du test, le CT permet de simuler un effondrement/cisaillement des couches fragiles du manteau neigeux testé. Un glissement de la plaque sus-jacente à la couche fragile est alors mis en évidence avec une amplitude plus ou moins marquée.

La procédure du CT est d'isoler une colonne de neige de 30 cm sur 30 cm avec une pelle et une scie à neige, de placer sa pelle sur le dessus de la colonne et d'affecter une charge progressive en frappant sur le dos de la pelle suivant les gammes d'intensités suivantes (figure 1.10):

Coup 1 à 10 : intensité donnée par l'oscillation du poignet

Coup 11 à 20 : intensité donnée par l'oscillation du coude

Coup 21 à 30 : intensité donnée par l'oscillation de l'épaule

Il s'agit alors pour chaque charge appliquée, d'observer les éventuelles fractures et effondrements dans la colonne de neige. En cas de résultat, il faut noter le nombre de coups et la profondeur de la fracture (e.g. CT12@40 cm pour une fracture observée à 40 cm de la surface pour le douzième coup donné). Il est intéressant de donner par ailleurs la qualité de la rupture selon les critères établis par Van Herwijnen et Jamieson (2007) et enfin s'il y a eu effondrement de la couche fragile ou non.



Figure 1.10 : Test de stabilité par Compression Test. A gauche, oscillation du poignet. A droite, oscillation du coude. (Source : T.Pilloix)

Partie 2 : Comparaison des profils de résistance à l'enfoncement obtenus par les différents pénétromètres

La résistance à l'enfoncement est une valeur majeure pour interpréter la stabilité du manteau neigeux mais elle dépend de l'utilisation d'instruments de sondage dont les caractéristiques intrinsèques (taille de la pointe, mode d'entraînement) modifient sensiblement les valeurs issues des mesures.

Etablir une comparaison entre différents pénétromètres demande (1) de connaître les caractéristiques de chaque sonde afin de pouvoir interpréter leur impacts mécaniques sur le processus de pénétration. Et (2) d'établir des points de références basés sur les atouts et limites connues pour chaque instrument.

2.1- Etude autour de l'Avatech SP1

L'unique comparaison intégrant des mesures de SP1 a été réalisée avec un profil de dureté (*hand-hardness*) et de SMP (Lutz et Marshall, 2014). Cette étude de validation par comparaison a été réalisée, sans soutien financier d'Avatech, avec un prototype de SP1. Plusieurs configurations de terrains ont été exploitées dans les montagnes d'Idaho et au nord du Groenland, afin de confronter le prototype à de la neige sèche, humide et de composition mixte. Concernant la méthodologie de mesure, une distance de 20 à 50cm entre le sondage de SP1 et le plan stratigraphique a été respectée ainsi qu'une distance d'environ 10 cm entre les mesures de SP1 et de SMP.

Il a alors été montré que les profils issus de mesures SP1 affichent des valeurs cohérentes avec le SMP mais qu'une marge d'erreur de 10cm sur la profondeur des couches était fréquente (cf. flèche rouge sur figure 1.11). De plus, cette marge d'erreur augmente jusqu'à 35cm dans des configurations de neige humide. Enfin, le SP1 affiche une concordance occasionnelle avec la stratigraphie. Enfin, des biais importants concernant l'estimation de l'épaisseur des plaques cohésives ont été démontrés ainsi qu'une détection non systématique des couches fragiles affichées sur le profil de dureté. Lutz et Marshall montre aussi qu'une absence de donnée peut exister sur la partie supérieur du manteau neigeux.

Concernant la méthodologie de comparaison, l'étude de la cohérence des profils de résistance s'est développée autour d'une approche visuelle. On ne note donc pas de normalisation des unités de mesures ni de résultats concernant la valeur absolue de la contrainte mesurée entre le SP1 et les outils de comparaison. A savoir le SMP et la *Hand-Hardness*.

Ayant pris connaissance des limites du prototype SP1 mis en évidence par cette étude, il nous apparaît nécessaire d'établir une nouvelle comparaison plus complète de cet instrument sous sa forme finale et commercialisée.

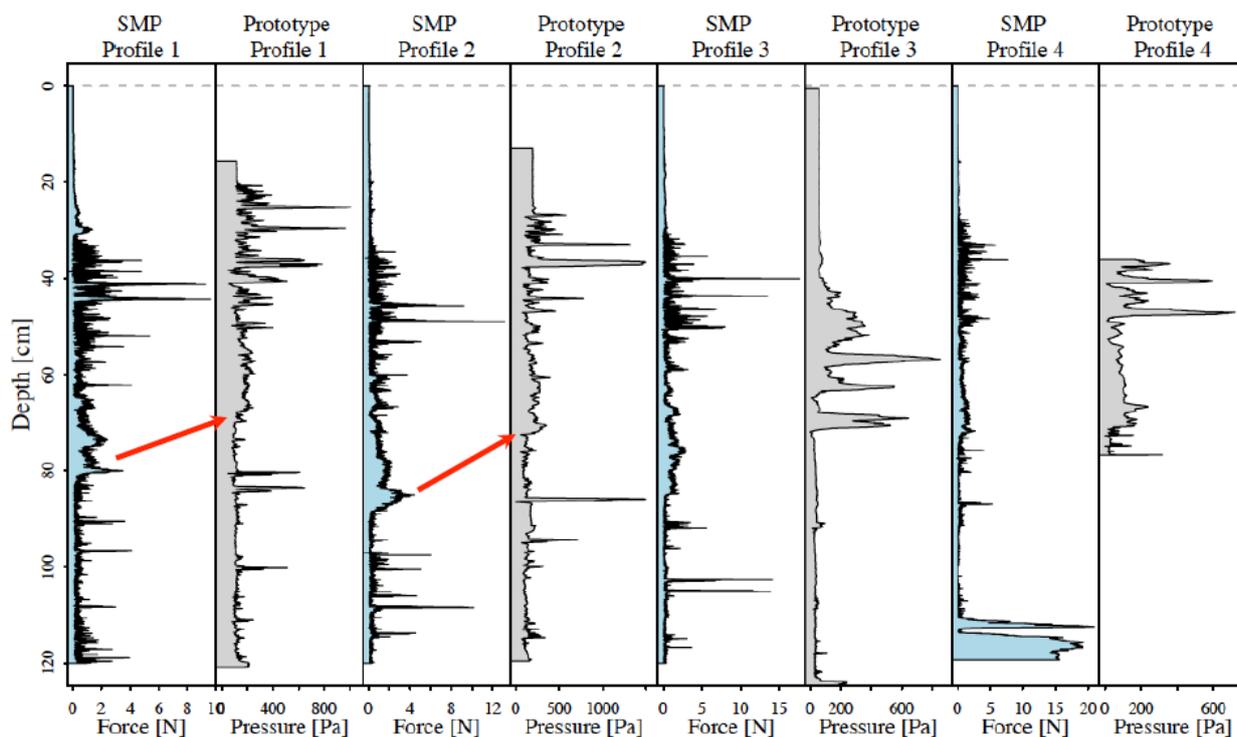


Figure 1.11 : Comparaison des signaux de SP1 (gris) et de SMP (bleu clair) à Bogus Basin (Idaho).
(Source: Lutz et Marshall, ISSW 2014)

2.2- Comparaison articulée autour du Snow-Micro-Pen et de la RamSonde

Les études comparatives articulées sur le SMP sont nombreuses et permettent (1) d'évaluer les propriétés dérivées du SMP en fonction d'instruments de mesure spécifiques à la propriété étudiée (e.g. Carmagnola, 2013 ; Proksch et al., 2014) mais aussi (2) de valider le pouvoir discriminant du SMP en terme de résistance à l'enfoncement face à la RS et à la *Hand-Hardness [HH]* (Pielmeier et Schneebeli, 2003). Nous nous attacherons alors à ce deuxième axe d'étude.

L'identification des strates de neige par le biais du profil de résistance à l'enfoncement est un enjeu majeur pour la prévision du risque d'avalanche, notamment concernant l'identification de fines couches fragiles, souvent responsables de la formation d'avalanche (Schaap et Föhn, 1987). Or cela est particulièrement difficile par stratigraphie ou via la *RamSonde*. Pielmeier (2003), à travers sa comparaison entre SMP, RS et HH (figure 1.12), indique que la stratigraphie capture 80% des couches de neige tandis que la RS n'en détecte que 60% et qu'enfin le SMP tend à détecter l'ensemble des strates. Ce constat se base sur les observations suivantes :

- (1) La « richesse » du signal, c'est-à-dire la capacité à transcrire les variations du manteau neigeux est plus importante pour la RS que pour la HH et nettement plus importante pour le SMP.
- (2) Le SMP se place en outil de référence du fait de sa vitesse de pénétration constante et de son emprise minime (0.5 cm) et aussi constante. Sa plus haute résolution en déplacement et en résistance justifie aussi son statut. La RS, possède quant à elle une aire de pénétration constante mais une vitesse d'enfoncement variable. *In fine*, la HH est peu fiable car sa vitesse et son emprise à la pénétration sont non constants. Toutefois, le « savoir-faire » de l'opérateur peut permettre une plus grande détermination des strates de neige que la RS, notamment pour les strates peu cohésives.

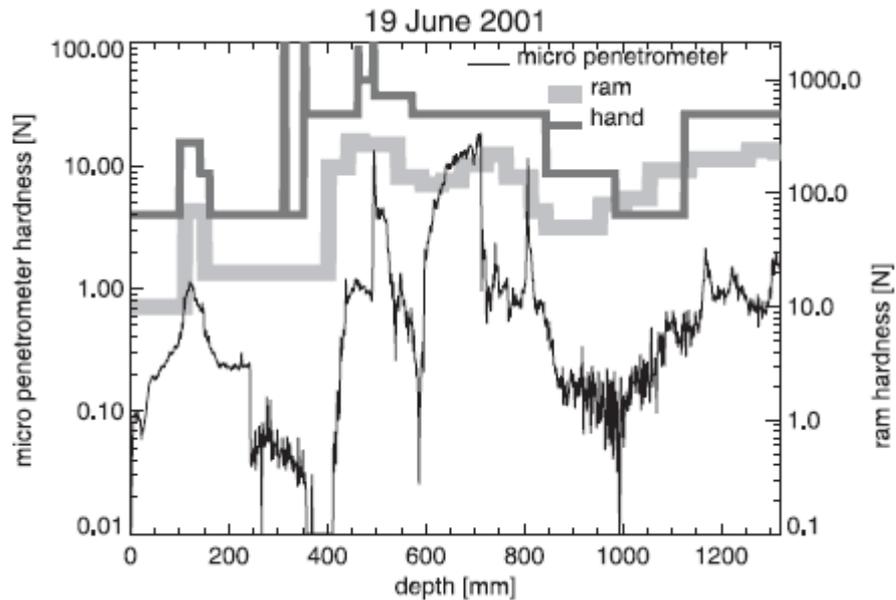


Figure 1.12 : Comparaison de profil de résistance à l'enfoncement entre SMP, RS et HH (Source : Pielmeier et Schneebeli, 2003)

Enfin, concernant le mode de comparaison, l'établissement du Newton comme unité de référence à été choisi car la normalisation en contrainte implique de considérer la vitesse et les propriétés de déformations comme similaires entre les pénétromètres, ce qui n'est pas le cas (Pielmeier, 2003). Toutefois, les échelles de représentation n'étant pas analogues (rapport de 10 entre la RS et le SMP), la comparaison est par conséquent approximative (Pielmeier, 2003). Cette étude permet tout de même de considérer premièrement les profils de résistance à l'enfoncement par mesure de SMP comme référence (Pielmeier, 2003). Deuxièmement, les profils de résistance à l'enfoncement par mesure de RS sont jugée robuste mais d'une résolution faible (Schaap et Föhn, 1987). La RS peut donc permettre de juger la cohérence générale d'un profil issu d'un autre pénétromètre mais elle est par contre limitée dans l'identification de fines couches fragiles et dans la discrimination stratigraphique au sein de neiges peu cohésives. Enfin, les profils de duretés par HH sont jugés peu fiables (Pielmeier, 2003) car particulièrement dépendant de l'opérateur. Ils apportent toutefois une source d'information complémentaire en étant liées à la stratigraphie (i.e. identification de propriétés physiques pour chaque strate).

2.3- Normalisation et comparaison

En écho à la comparaison citée précédemment, il apparait nécessaire d'établir une unité de valeur identique entre les éléments comparés. Or étant donné que la différence concernant la taille de la pointe entre la RS et le SMP/SP1 implique un très fort décalage des valeurs (rapport de 10 ; figure 1.12) et que le SP1 est de toute façon paramétré directement en kPa, nous chercherons à établir une normalisation selon l'aire de pénétration de chaque instrument (équation 2). La normalisation en contrainte permet en effet de considérer l'impact mécanique de la pénétration propre à chaque instrument mais demande toutefois de considérer les points suivants :

- (1) La neige est un matériel poreux, il a été montré qu'une compaction existe autour de la pointe et apparait comme proportionnelle à la taille de la pointe (Huang et Lee, 2013).
- (2) La zone de compaction est en moyenne deux fois plus grande que la taille de la pointe et augmente avec la densité de la neige (Van Herwijnen, 2013).

- (3) La contrainte à l'enfoncement est sensible à la taille de la pointe mais aussi à sa forme (Schneebeli et al., 1999), les cônes des pénétromètres que l'on cherchera à comparer ont par conséquent un angle identique de 60°.

Les études réalisées préalablement ont permis d'établir des critères de référence pour chaque pénétromètre. Critères que nous pourrions réinvestir au sein de notre comparaison entre SP1, SMP et RS.

METHODOLOGIE ET MESURE DE TERRAIN

Partie 1 : Les sites de mesures

Nous avons collecté les données nécessaires à cette étude sur trois sites autour de Grenoble (tableau 1) du 7 janvier 2015 au 23 mars 2015: Col de Porte (massif de Chartreuse, Isère), Col du Lautaret (massif des Ecrins, Hautes-Alpes) et La Grave (massif des Ecrins, Hautes-Alpes). Le choix des sites a été fait selon les conditions suivantes : hauteur de neige suffisante (minimum d'1m50 pour l'utilisation du SP1), intérêt de la stratigraphie vis-à-vis du risque d'avalanche et non perturbation du manteau neigeux par des skieurs ou randonneurs. Les simulations du manteau neigeux de Météo-France ont par ailleurs été utilisées comme outils d'aide à la décision pour les deux premières conditions.

Sites	Latitude	Longitude	Orientation	Altitude	Inclinaison
Col de Porte	5°45'55.9''E	45°17'42/3''N	Nord	1325 m	5°
Col du Lautaret	6°24'24.8''E	45°17'45.3''N	Nord-Ouest	2060 m	10°
La Grave_Glacier du Vallon	6°16'00.7''E	45°00'30.7''N	Nord/ Nord-Ouest	3167 m	38°
La Grave_Glacier de la Girose	6°16'00.4''E	45°00'13.8''N	Nord-Ouest	3279 m	25°

Tableau 1 : Caractéristiques géographiques des sites de mesures (carte de localisation en annexe 2)

NB : Une large gamme d'altitude est représentée mais l'orientation Nord a systématiquement été retenue pour faciliter les observations. En effet, le rayonnement solaire direct tend à compliquer les mesures par transformation des grains sur la plaquette d'observation après tamisage ou encore par le « collage » de la neige sur les instruments. De plus, une augmentation de la température ambiante inhérente aux orientations « chaudes » peut-être à l'origine d'offset significatif sur les pénétromètres électroniques (e.g. Carmagnola, 2013).

1.1- Col de Porte

Le Col de Porte (figure 2.1) est un site de mesure du CEN où sont concentrés de nombreux instruments de mesures utilisés pour évaluer la chaîne de modélisation SAFRAN-CROCUS-MEPRA. C'est aussi une couverture nivale non perturbée qui permet une reproductibilité des mesures tout au long de la saison grâce à l'établissement d'un protocole respecté par tous les usagers du site. L'avantage du Col de Porte est aussi de pouvoir établir un suivi des conditions qui facilite la stratigraphie. Nous avons ainsi réalisé sept campagnes de mesures parallèlement aux mesures effectuées de manière hebdomadaire par le CEN.



Figure 2.1: localisation du site de mesure du Col de Porte (Source : Géoportail, T.Pilloix)

1.2- Col du Lautaret

Le Col du Lautaret (figure 2.2) a été choisi au mois de janvier (le 21/01/2015) afin de trouver une configuration nivologique intéressante. Des couches fragiles ont en effet été détectées par le modèle CROCUS⁹, confirmé par l'étude de l'historique météorologique (chute de neige persistante du mois de décembre suivis d'une large période ensoleillée, favorisant le métamorphisme de fort gradient). De plus, du fait de l'enneigement extrêmement faible de cette période, il s'agissait de l'unique site, accessible autour de Grenoble, où le manteau neigeux n'avait pas subi d'humidification, ce qui est favorable à la reproductibilité des mesures mais aussi à l'étude des configurations nivologiques inhérentes aux avalanches de plaque.

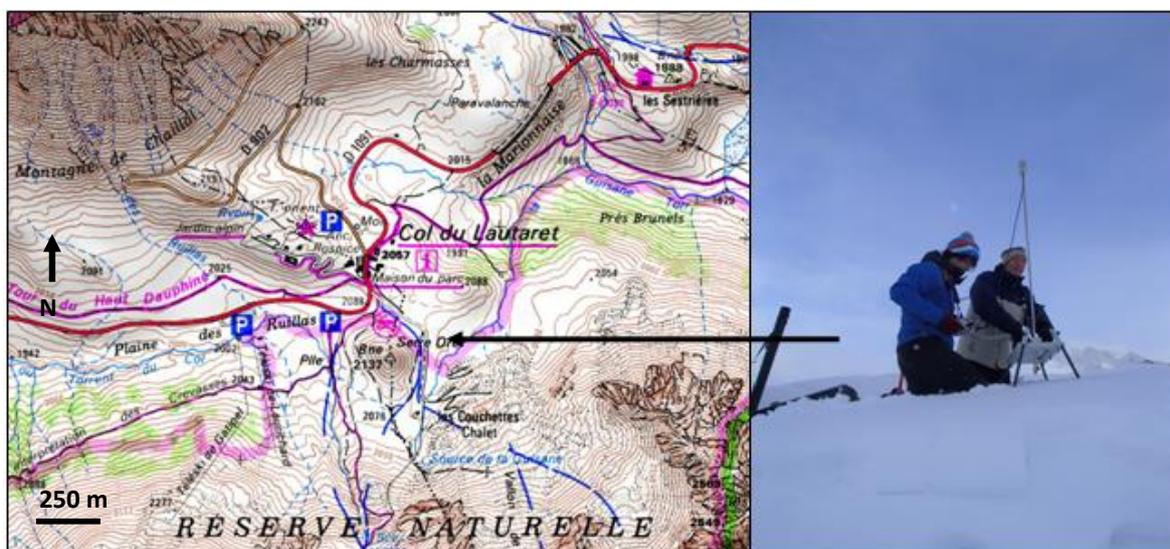


Figure 2.2: localisation du site de mesure, Col du Lautaret le 21 janvier 2015 (Source : Géoportail/P.Hagenmuller)

1.3- La Grave

Les mesures effectuées à La Grave ont été réalisées sur deux sites : le glacier du Vallon (figure 2.3) le 19 et 20 mars et le glacier de la Girose (figure 2.4) le 23 mars. Ces sites ont permis d'avoir une hauteur de neige suffisante (supérieur à 150cm) pour l'utilisation sans risque du SP1 mais aussi de

⁹ Modèle de simulation de l'évolution des propriétés internes du manteau neigeux (Brun et al., 1989)

trouver, à cette période de l'année, une stratification en neige sèche. Les sites de mesures ont ensuite été choisis par rapport à leur exposition au vent. Une période de vent intense précédant la campagne de mesure a en effet créé une forte érosion éolienne ou *a contrario* des zones d'accumulation de neige extrêmement dense et donc difficile à mesurer.

Enfin les accès aux sites ont été réalisés en ski de randonnée après avoir emprunté les remontés mécaniques et ont nécessité une grande vigilance pour limiter les risques glaciaires (figure 2.5)



Figure 2.3: localisation du site de mesure, La Grave_Glacier du Vallon le 19 et 20 mars 2015 (Source : Géoportail, T.Pilloix)



Figure 2.4: localisation du site de mesure, La Grave_Glacier de la Girose le 23 mars 2015 (Source : Géoportail, T.Pilloix)



Figure 2.5 : A gauche, sondage effectué par un patrouilleur (Jérôme Gillet) pour vérifier l'absence de crevasse. A droite, embarquement du SMP (2m10 de longueur) dans le téléphériques de La Grave.
(Source :T.Pilloix)

Partie 2 : Protocole de mesure

Le retard de livraison de l'Avatech SP1 ainsi que les pannes du SMP du CEN mais aussi la configuration des sites de mesures (inclinaison de la pente majoritairement) ont façonnés nos protocoles de mesures, tel que l'on obtient un protocole commun pour le Col de Porte et Col du Lautaret et deux protocoles pour le site de La Grave (les mesures à la Grave ont été rendues possible grâce au prêt d'un SMP par Laurent Arnaud du LGGE). Pour l'ensemble de ces protocoles, la constante a été de délimiter des zones ou des lignes de comparaison permettant d'assimiler plusieurs types de mesures à une configuration nivologique identique.

2.1- Protocole Col de Porte [CDP] / Col du Lautaret [LAU]

Le protocole CDP-LAU est marqué par l'absence du SP1 et par conséquent d'une comparaison au sein d'une zone d'environ 80 cm de côté (figure 2.6) réalisée uniquement entre le SMP, la RS et la Stratigraphie. Les mesures de RS (étape 2) ont été effectuées en triangle autour des mesures de SMP (étape 1) pour enfin établir le sommet du triangle de mesure comme point de référence pour la stratigraphie (étape 3).

Les sondages de SMP sont réalisés en ligne en respectant un écart de 15 cm entre les mesures. Cette procédure étant permise par l'utilisation d'une table en bois (figure 1.4) réalisée préalablement par Carlo Carmagnola (2013).

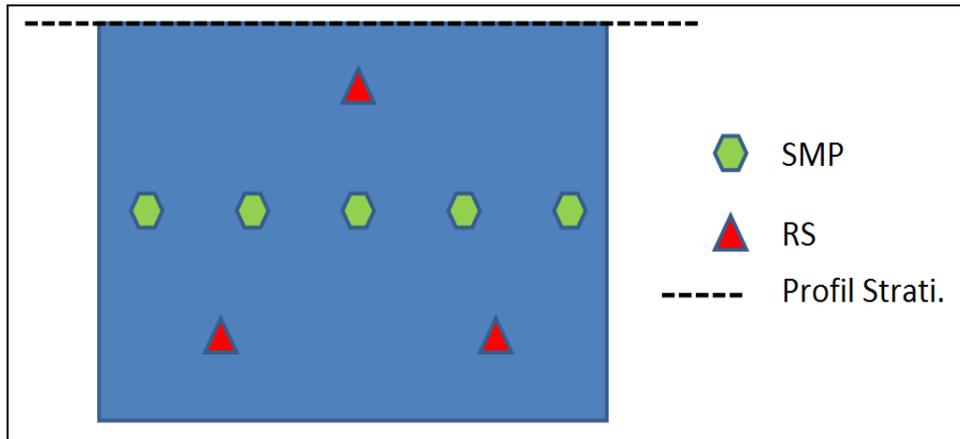


Figure 2.6 : Protocole de mesure pour le Col de Porte/Col du Lautaret (rectangle bleu d'environ 80 cm de coté)

2.2- Protocole La Grave [LG] (19 et 20 mars 2015)

Un protocole identique au précédent (que l'on appellera protocole de reproductibilité) a d'abord été réalisé puis complété par des tests de stabilités : Compression Test [CT] et Extended Column Test [ECT]. Ensuite, un transect de 21,30 m a été établi avec des mesures de SMP, SP1 et RS à intervalle régulier d'environ 1m50 (figure 2.7).

Enfin le transect B a été complété de CT pour chaque point de mesure et des mesures au scissomètre ont été faites en amont de la stratigraphie.

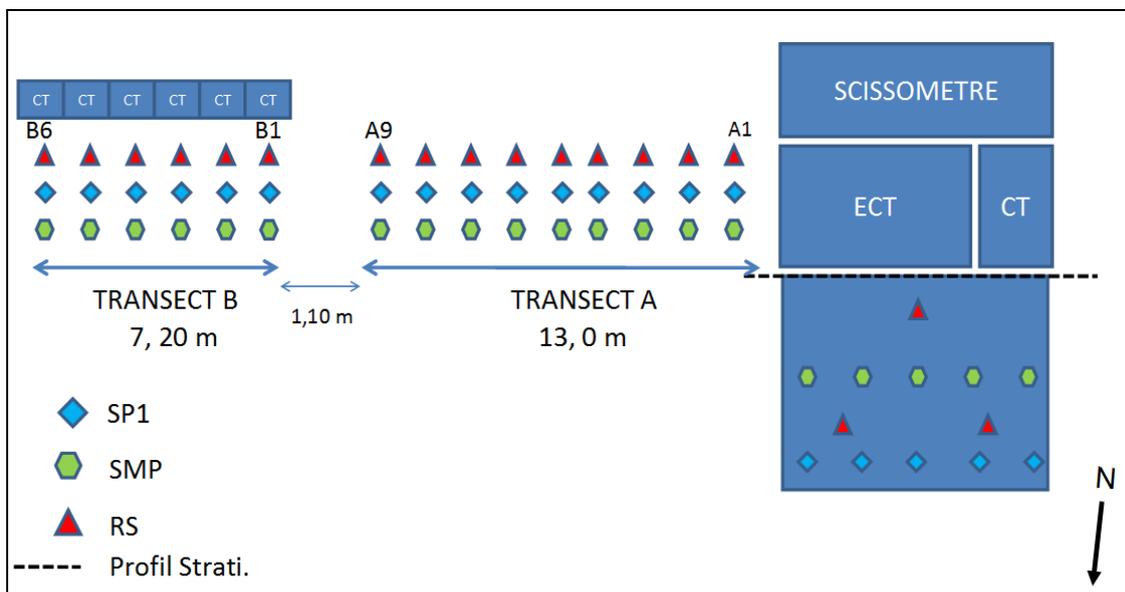


Figure 2.7 : Protocole de mesure pour La Grave_Glacier du Vallon

NB : L'Extended Column Test [ECT] (description en annexe 3) s'est avéré trop chronophage pour permettre sa systématisation dans le protocole. Il ne sera pas pris en compte dans les résultats.

2.3- Protocole La Grave [LG] (23 mars 2015)

Pour la campagne de mesure du 23 mars 2015 (figure 2.8), un transect de 32,4m a été réalisé avec un intervalle régulier de 2,20m (la longueur d'une sonde d'avalanche) entre chaque mesure de SMP et SP1. Ces mesures ont ensuite été complétées par un sondage par battage (RS) pour chaque point de

mesure pair. Enfin, deux CT et une stratigraphie ont permis de renforcer les informations issues des sondages par pénétromètres.

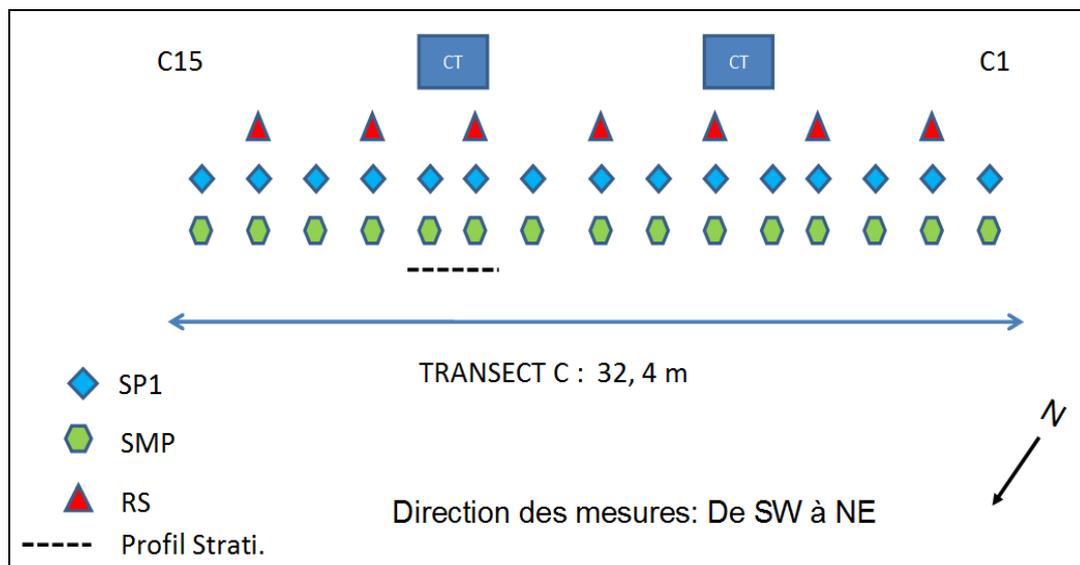


Figure 2.8 : Protocole de mesure pour La Grave_Glacier de la Girose

RESULTAT

Partie 1 : Evaluation générale du scissomètre

1.1- Objectif et protocole

Le scissomètre [SC], développé par le CEN permet d'estimer la valeur clef du modèle MEPRA (Giraud et al., 2004) : la résistance au cisaillement d'une strate de neige. Son utilisation n'a pourtant pas connu de diffusion au sein du réseau d'observateur ni de systématisation concernant les mesures au Col de Porte par le CEN lui-même. En effet, le manque de précision et la faible reproductibilité de l'instrument sont des problèmes largement partagés par les agents du CEN.

Ainsi, à travers la volonté de faire évoluer les paramètres du modèle opérationnelle MEPRA par des mesures *in-situ* au scissomètre, nous chercherons à effectuer une vérification préalable de cet instrument et d'évaluer la fiabilité de ses mesures.

Le CEN dispose de quatre dynamomètres. Pour les différencier durant cette étude, nous utiliserons la nomenclature suivante : SC_A, SC_B, SC_C, SC_D.

Cette évaluation s'établit en deux phases : (1) la vérification intrinsèque de l'instrument à travers la comparaison des dynamomètres et la vérification de la vitesse de rotation de la bague de graduation puis (2) la vérification de l'abaque donnant la relation entre la graduation observée sur le scissomètre et la contrainte de cisaillement exercée sur la neige.

NB : Nous présentons dans cette partie un résumé des résultats obtenus. Un rapport complet est disponible en annexe 4 afin de développer les protocoles expérimentaux, les démonstrations méthodologiques et l'ensemble des résultats.

1.2- Résultats

1.2.1- Vérification intrinsèque de l'instrument

La vérification des ressorts pour chaque dynamomètre est une condition primordiale à la validation des mesures: nous vérifions alors que chaque dynamomètre affiche une graduation identique pour un couple de torsion identique (protocole 1). Sans cela, les mesures effectuées ne sont pas comparables et donc inexploitable.

Or ce protocole, mené en comparant les dynamomètres deux par deux nous permet de mettre en évidence le biais permanent de SC_C (figure 3.1). Ce dernier est en effet deux fois plus lâche que les autres SC.

De surcroit le protocole 1 a permis de mettre en évidence un biais de mesure supplémentaire : lorsque l'on simule la rupture au cisaillement par un « lâcher » brutal du dynamomètre, après avoir appliqué un couple de torsion, une différence dans la vitesse de déplacement de la bague de graduation par rapport au cylindre peut apparaître. La vérification de ce phénomène (protocole 2) nous à alors permis de mettre en évidence une imprécision proportionnelle à l'augmentation du couple appliquée sur SC_B et SC_D. L'ensemble des SC, à l'exception de SC_A que nous utiliserons pour la suite de cette évaluation, sont donc mis en défaut par cette première vérification.

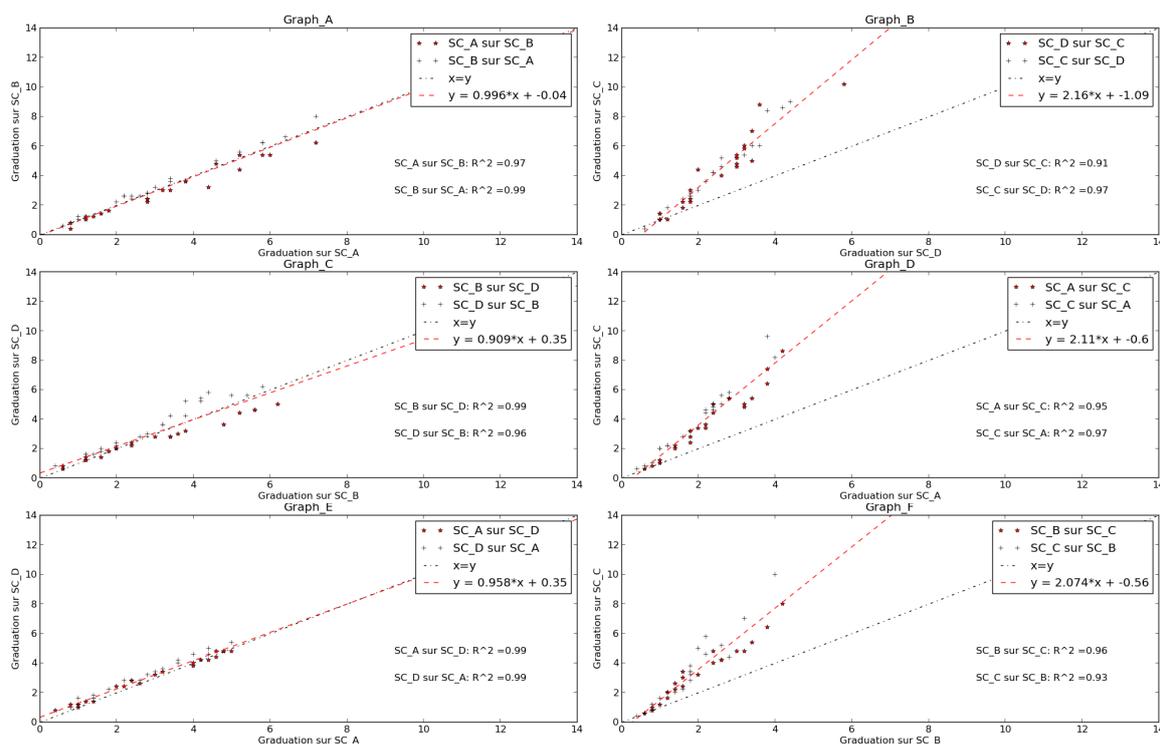


Figure 3.1 : Comparaison, selon le protocole 1, des graduations entre deux scissomètres pour un même couple de torsion.

1.2.2- Vérification de l'abaque graduation / contrainte

Nous cherchons dans un second temps à retracer l'abaque donnant la relation entre la graduation observée sur le scissomètre et la contrainte de cisaillement exercée sur la neige, pour ensuite le comparer à l'abaque existant.

A travers la mise en tension du scissomètre pour une masse donnée (protocole 3), nous appliquons la formule du moment (équation 3) pour obtenir la relation entre la graduation observée sur le scissomètre lors du protocole et le calcul du moment (couple imposé par la masse pesante).

$$M_o = (m \cdot g) \cdot R \quad (3)$$

Où M_o = couple [N.m], R = rayon de la couronne [m], m = masse [kg], g = pesanteur [9,81 N/kg].

Cette relation est vérifiée par l'obtention d'un coefficient analogue pour les différentes tailles de couronnes du scissomètre (excepté pour la petite couronne qui implique des biais expérimentaux trop important). Nous intégrons alors ce coefficient dans l'équation de contrainte au cisaillement (équation 4).

La contrainte en cisaillement de la neige étant un processus complexe, nous reprenons, pour permettre le calcul, l'hypothèse à l'origine de l'abaque existant : la rupture au cisaillement se situe en régime plastique et la neige est considérée d'une plasticité parfaite (Navarre et al. , 1982):

$$\sigma = (3/2\pi) \cdot M_o / (R_e^3 - R_i^3) \quad (4)$$

Où σ = contrainte limite au cisaillement [N.m²] ; M_o = Couple [N.m] ; R_e = rayon total de la couronne [m] ; R_i = rayon intérieur de la couronne [m].

Nous cherchons enfin à comparer les droites obtenues par le raisonnement précédent, pour chaque taille de couronne, avec les droites issues de l'abaque existant dont le raisonnement nous est inconnu (figure 3.2).

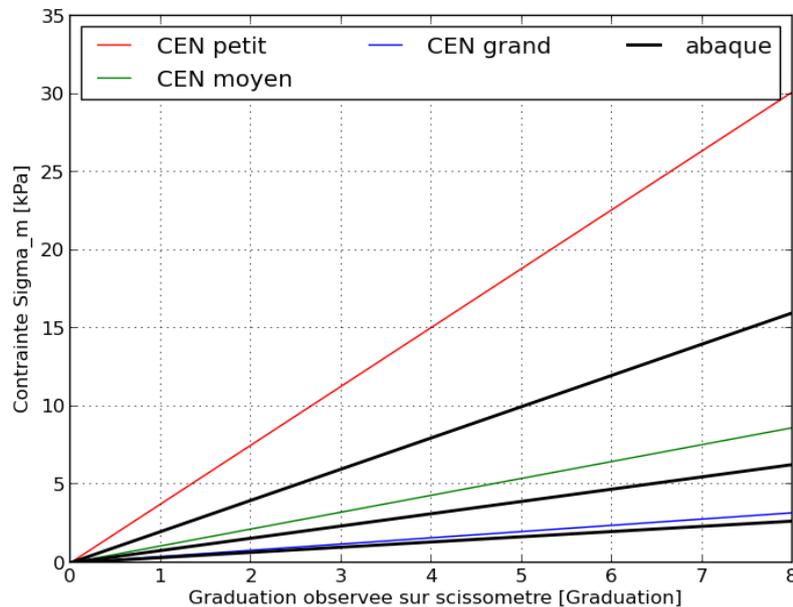


Figure 3.2 : Comparaison de l'abaque existant ('abaque' sur le graphique) avec l'abaque relation graduation/contrainte selon les hypothèses d'étude ('CEN' sur le graphique) pour chaque taille de couronne.

Cette comparaison montre une forte divergence de résultat alors même que la formule de contrainte utilisée est identique aux deux raisonnements. Nous chercherons alors à discriminer l'abaque le plus pertinent en établissant la correspondance des valeurs de contraintes issus de mesure avec la grande couronnes par rapport aux valeurs de contraintes issus de mesure avec la moyenne couronne, pour

une zone de mesure considéré comme homogène. Nous appliquons enfin cette correspondance en utilisant l'abaque existant et l'abaque issu des hypothèses d'études (figure 3.3)

Malgré une dispersion forte (R^2 de 0.65 à 0.66) s'expliquant par la disparité des propriétés physique et mécanique de la neige au sein de la zone de mesure, la correspondance des valeurs issus de l'abaque obtenu par cette étude est excellente (fit = 1.01). *A contrario*, la correspondance des valeurs *in-situ* entre les deux tailles de couronnes pour l'abaque existant montre une sous-estimation des valeurs de la moyenne couronnes.

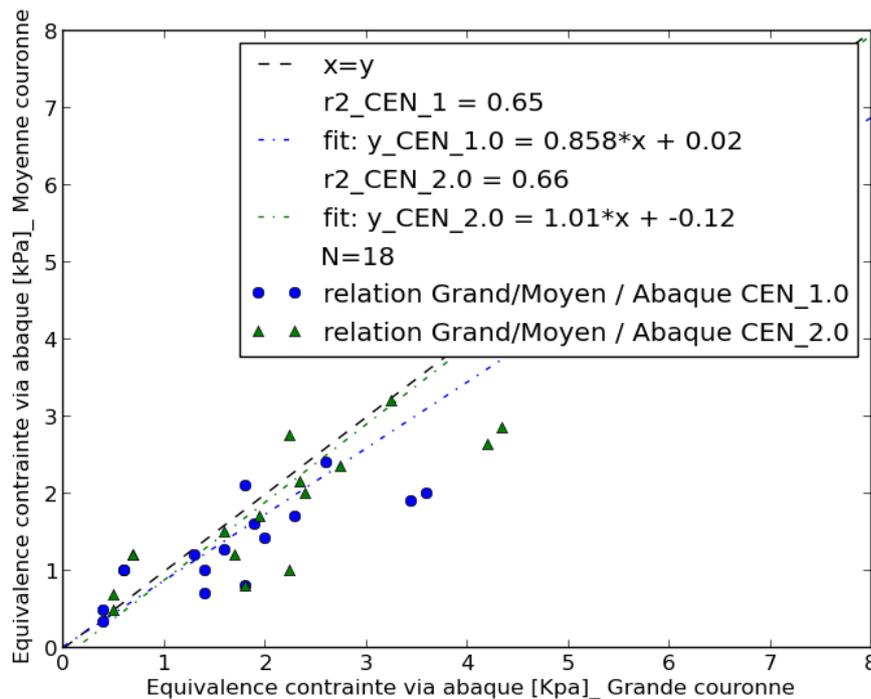


Figure 3.3 : Comparaison des valeurs de contrainte en fonction de mesure effectuée avec la grande et la moyenne couronne, pour des mesures *in-situ* sur une zone considérée comme homogène [CEN_1.0 = abaque existant ; CEN_2.0 = abaque obtenu]

Ce résultat tend alors à mettre en défaut l'abaque existant au profit de l'abaque issu de cette étude, c'est-à-dire selon l'intégration du coefficient de la relation graduation/moment, dans l'équation de contrainte en cisaillement.

1.2.3- Conclusion

Les résultats des protocoles expérimentaux mis en place pour l'évaluation des scissomètres du CEN mettent en évidence :

- les limites intrinsèques de l'instrument : mauvais calibrage du ressort (SC_C) ou encore vitesse de rotation de la bague de graduation non dépendant de celle du cylindre (SC_B, SC_D).
- La nécessité de réfuter l'abaque existant au profit d'une intégration du coefficient de la relation graduation/moment, dans l'équation de contrainte en cisaillement.
- Considérer la neige d'une plasticité parfaite ne correspond pas aux propriétés effectives de la neige et induit fatalement une marge d'erreur significative.

Les valeurs issus des mesures du scissomètre n'offre pas de résultat satisfaisant pour les exploiter pleinement. La paramétrisation du modèle MEPRA ne peut être développée par les mesures *in-situ*

au scissomètre, nous nous tournerons alors vers l'étude de la résistance à l'enfoncement, via l'utilisation de pénétromètre.

Partie 2 : Comparaison des pénétromètres

2.1- Critiques d'utilisation des pénétromètres pour les mesures *in-situ*

2.1.1- Avatech SP1

Le programme de diffusion commerciale du SP1 s'articule principalement sur sa maniabilité et son aspect pratique, s'attarder sur cette composante est alors primordial. On a pu, dans ce cadre là, relever les points suivants :

- Le sondage peut apparaître délicat pour une personne de petite taille dans le cas de pente forte. Il faut en effet pouvoir amener la sonde d'1m50 de long à l'aplomb du point de mesure en garantissant à la pointe d'être hors de la neige.
- La couleur noire de la sonde absorbe davantage le rayonnement solaire ce qui a pour impact direct de faire « coller » la neige sur la sonde, à l'origine d'une augmentation des frottements lors du sondage. De plus, on peut penser qu'en cas de fort réchauffement, un *offset* lié à la température peut apparaître comme il a déjà été observé, pour cette même configuration sur le SMP (Cf. Carmagnola, 2014).
- Des *bugs* électroniques peuvent apparaître occasionnellement, nécessitant d'extraire puis de remettre la batterie de l'appareil.
- Le temps de sondage optimal pour une hauteur d'1m50 est de deux à trois secondes. Cela nécessite de garantir une vitesse importante qui est parfois difficile à obtenir en cas de neige dense. De plus, il semble difficile de bloquer la sonde avant de toucher le sol si la hauteur sondée est inférieure à 1m50. Or un impact de la pointe contre le sol pourrait endommager significativement la pointe et le capteur qu'elle contient.
- De nombreux échanges avec la société Avatech ont été nécessaires pour pouvoir exporter les données brutes des sondages SP1. Les ingénieurs d'Avatech ont rajouté une fonction d'export des données brutes sur la plateforme payante Avanet. Cela a impliqué un retard pour traiter les données. Par ailleurs, la nécessité de devoir souscrire un abonnement annuel pour accéder à ses propres données paraît aberrant. De plus, cette fonction d'export ne fonctionne que sous *Google Chrome* qui est interdit sur le réseau sécurisé de Météo-France.

Le SP1 est tout de même un instrument léger, peu encombrant, rapide et facile d'utilisation. Il marque, sur l'aspect pratique, un véritable progrès face au SMP et à la RS. Aussi, la plate-forme Avanet permet de disposer d'un outil de visualisation « clé en mains » mais l'opacité vis-à-vis de la propriété des données et la dépendance à un abonnement annuel sont un véritable frein pour son utilisation à Météo-France.

2.1.2- Snow-Micro-Pen

La robustesse du SMP a été contrariée dans le cadre de cette étude par plusieurs problèmes électroniques. Il a été rapidement hors-service et a nécessité trois retours au WSL/SLF (Institute for Snow and Avalanche Research, Davos). Un SMP du même modèle nous a alors été prêté par le LGGE (Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, Grenoble) pour la campagne de mesure à La Grave. Ce dernier n'a connu aucune défaillance durant la campagne.

Enfin, d'un point de vue pratique, le SMP est apparu comme assez encombrant lors de mesure en terrain alpin (figure 4.1). Cet encombrement est d'autant plus important que le SMP du LGGE possède une longueur totale de 2m10 au lieu d'1m60. Le basculement de la sonde est alors délicat à gérer pour effectuer des mesures à un seul opérateur. Pour finir, la nécessité d'être deux opérateurs est de toute façon imposée en cas de neige dense afin d'éviter à la sonde de trop vibrer voir de remonter (i.e. le moteur continue à tourner alors que la pointe n'arrive pas à transpercer la couche de neige).



Figure 4.1: Transport du SMP à ski, La Grave le 19/03/2015 (source : T.Pilloix)

2.1.3- RamSonde

La RS est à considérer comme le pénétromètre « traditionnel ». En effet bien que sa précision soit remise en cause (Pielmeier, 2003 ; Van Herwijnen, 2013), la robustesse et le faible coût relatif de ce pénétromètre le rend encore irremplaçable. Le temps de mesure est cependant important vis-à-vis des pénétromètres électroniques et la tâche assez répétitive. Pour le transect A, chaque mesure de sondage par battage a nécessité en moyenne, pour une profondeur d'1m50, un temps de 8 minutes pour environ 150 coups. A noter que pour un opérateur non-entraîné, un sondage par battage d'1m50 nécessite environ 30 minutes (source : Pascal Hagenmuller).

Enfin, la RS est particulièrement dépendante de l'opérateur et de son « savoir-faire ». Il est en effet nécessaire pour optimiser la résolution verticale en déplacement de la sonde de connaître à l'avance l'agencement général du manteau neigeux.

2.2- Reproductibilité des pénétromètres et homogénéité de la zone de mesure

La répétabilité d'une mesure par pénétromètre est nulle puisqu'un sondage est destructif. Ainsi, nous nous intéresserons à la reproductibilité des mesures. C'est-à-dire la capacité d'un pénétromètre à établir des signaux de résistance à l'enfoncement similaires pour un manteau neigeux donné. Pour cela, nous devons vérifier préalablement que les propriétés physiques et mécaniques soient homogènes au sein de la zone de mesure. Cette vérification est indispensable pour dissocier la part de variation inhérente à la neige et la part de variation inhérente aux instruments.

2.2.1- Signaux moyens et dispersion des valeurs

Après avoir réalisé un script de lecture en langage python adapté au fichier d'enregistrement de chaque pénétromètre, nous avons interpolé les résistances à l'enfoncement sur une grille de profondeur (1000 points pour une profondeur de 1m50) identique pour toutes les mesures. Ceci permet de calculer par intervalle de profondeur la moyenne et les extrêmes de résistance à l'enfoncement (figure 4.2).

NB : Du fait de l'existence d'un offset correspondant à la valeur de l'air, un seuillage a été effectué sur les signaux SMP pour exclure les valeurs strictement inférieures à 0.2 N.

Nous observons à travers la figure 1, que la reproductibilité au sein de la zone de mesure est forte pour la RS et le SP1 et très forte pour le SMP. La variabilité de la neige est alors négligeable au sein de la zone de mesure et elle permet, par conséquent, la comparaison entre les pénétromètres.

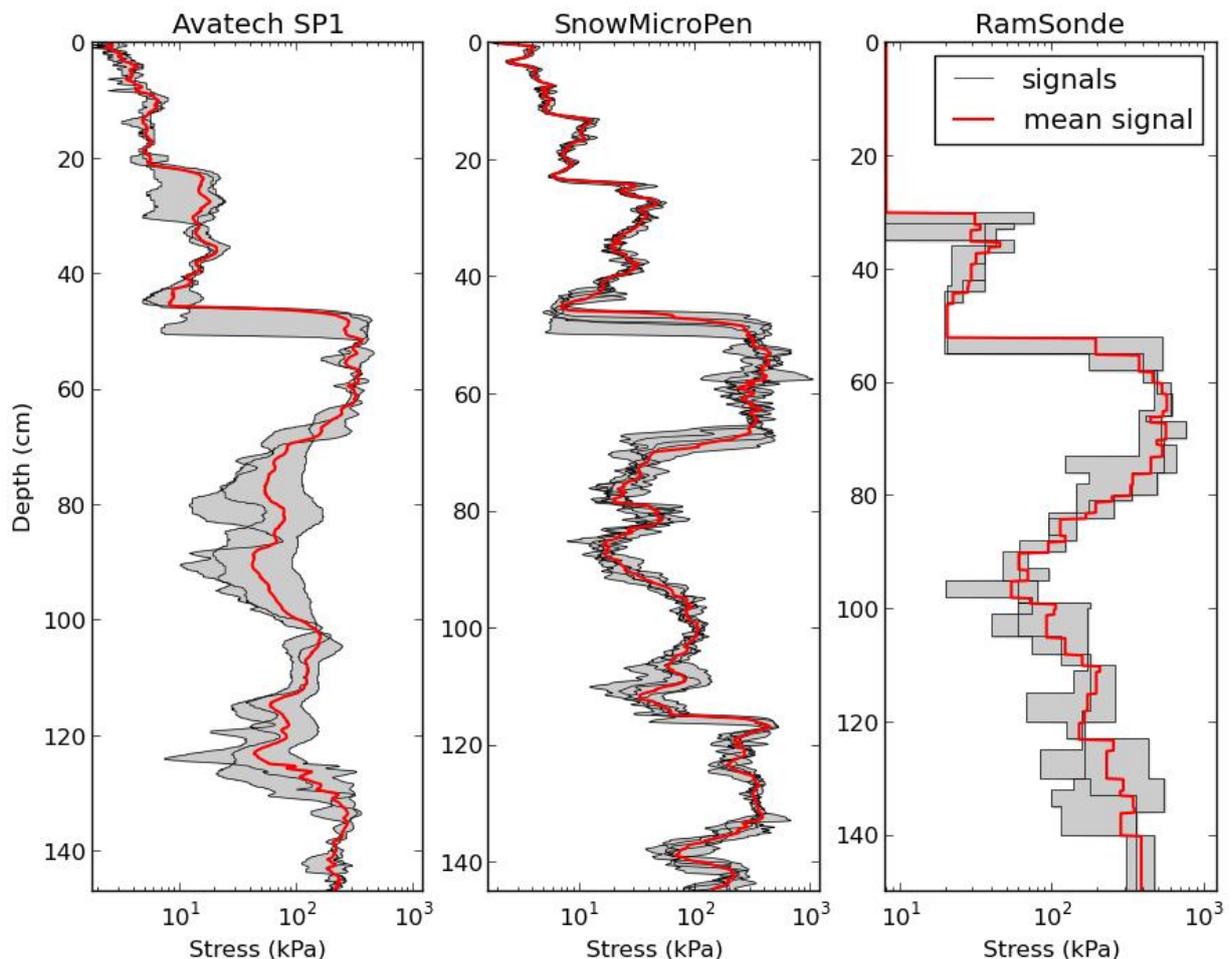


Figure 4.2 : reproductibilité des mesures au sein de la zone de mesure, La Grave le 19/03/2015.

Cette validation doit cependant être vérifiée systématiquement. Des sources d'erreurs liées à l'emplacement ou aux conditions nivologique de la zone de mesure peuvent biaiser significativement les données. C'est le cas des zones d'accumulations tel que les abords de corniches. La figure 4.3 qui correspond à cette configuration, nous permet d'observer, à l'échelle de la zone de mesure (transect de 50cm), un décalage significatif de la plaque relativement cohésive située entre 40 et 70 cm de profondeur. Ce décalage vers le bas s'effectue depuis l'amont de la corniche vers son aval (de gauche à droite sur le graphique).

Cette hétérogénéité locale est aussi à craindre sur des manteaux neigeux ayant subi une humidification : ce phénomène n'est pas homogène spatialement mais lié à une percolation de l'eau liquide par chemin préférentiel, appelé cheminée de percolation (Colbeck, 1972).

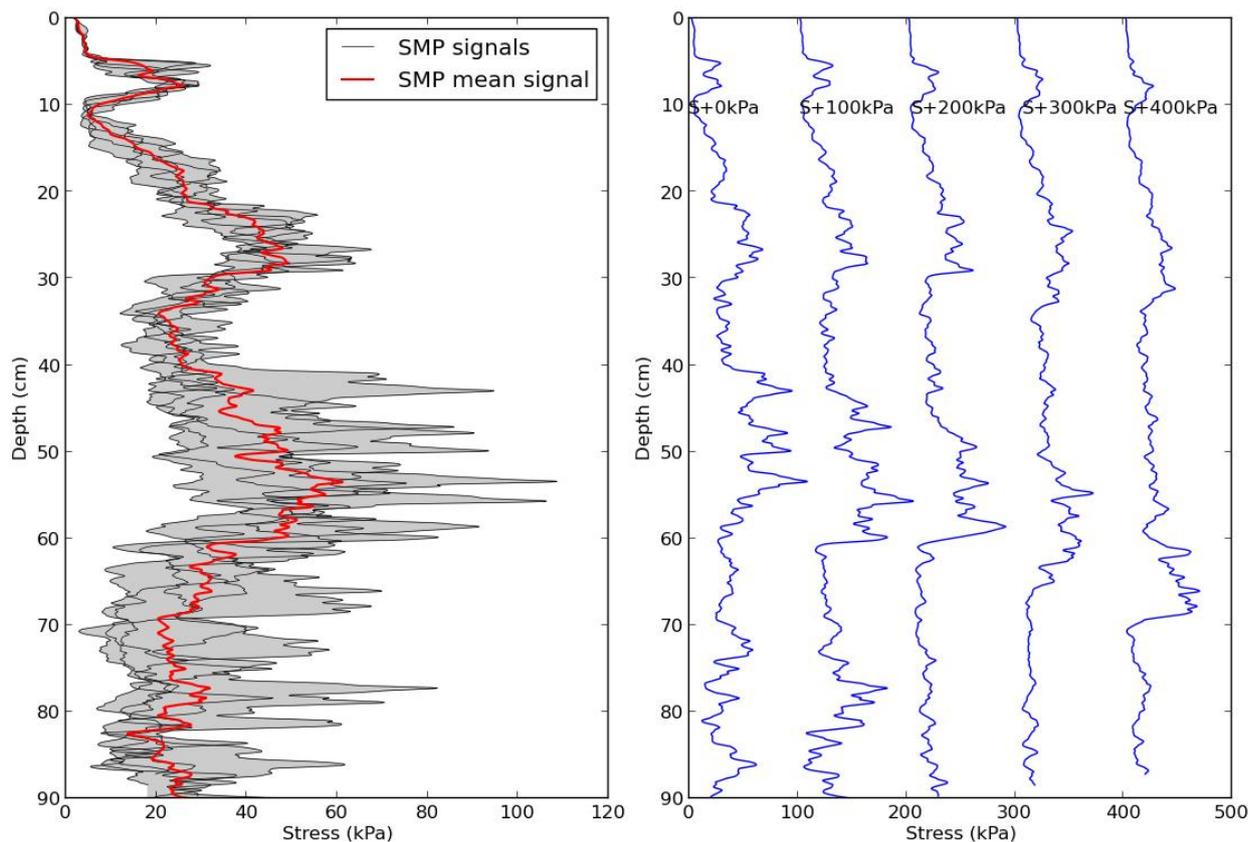


Figure 4.3 : Dispersion des valeurs au sein d'une zone d'accumulation liée au vent, Col du Lautaret le 21/01/2015. A gauche, signal moyen et signaux compris entre les bornes minimums et maximums. A droite, représentation des 5 signaux issus du protocole de reproductibilité, avec un décalage des valeurs de contrainte de 100kPa pour faciliter la visualisation de la variabilité

2.3- comparaison des mesures de pénétromètres.

2.3.1- Approche visuelle

Nous établissons une superposition de trois signaux de résistance à l'enfoncement (SP1, RS, SMP) pour six points de mesures réalisés sur le Transect C (figure 4.4). Cela nous permettra d'établir visuellement la concordance des signaux pour un même point de mesure.

On observe une surestimation des valeurs de résistance à l'enfoncement de la RS par rapport aux valeurs des pénétromètres électroniques. Cette surestimation apparaît par ailleurs plus intense dans la moitié inférieure du manteau neigeux. Deuxièmement, malgré cette surestimation, on observe que la RS est bien corrélée avec le SMP : l'ensemble des plaques denses et couches moins cohésives, d'épaisseurs suffisantes pour être identifiées par la RS, concordent avec celles observées par le SMP.

Enfin, concernant le SP1, les résultats sont plus aléatoires. Une très bonne corrélation existe sur la mesure C4 mais de forts décalages en termes de profondeurs pour une strate donnée apparaissent sur les autres mesures.

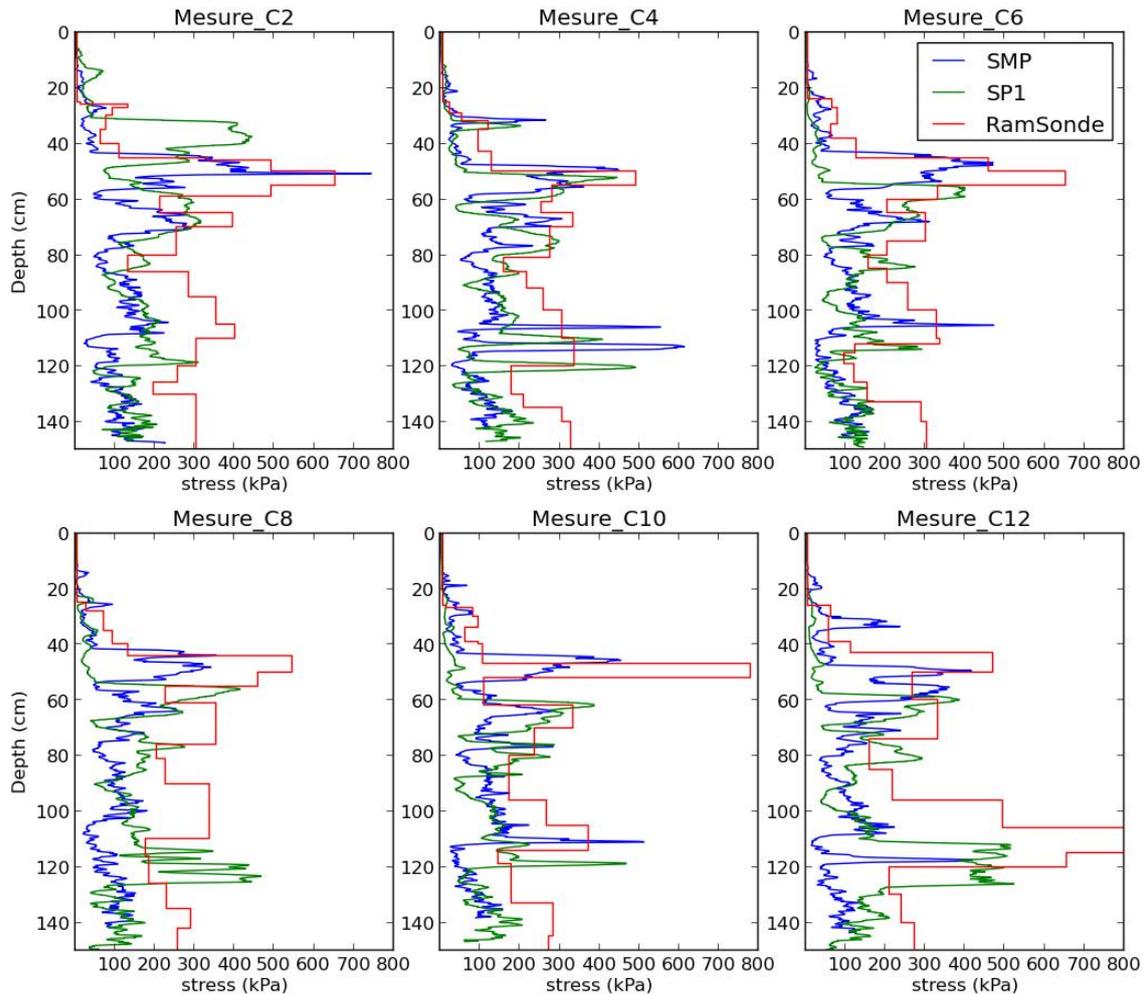


Figure 4.4 : Résistance à l'enfoncement mesurée par le SnowMicroPen, l'Avatech SP1 et la RamSonde sur le transect C. La Grave, le 23/03/2015.

Pour confirmer la variabilité du SP1 en termes de profondeur, nous considérons la position de la plaque dense située entre 40 et 60 cm de profondeur. Nous mesurons la position de l'interface supérieure de cette plaque en identifiant le point de profondeur correspondant à la contrainte 200 kPa (figure 4.5).

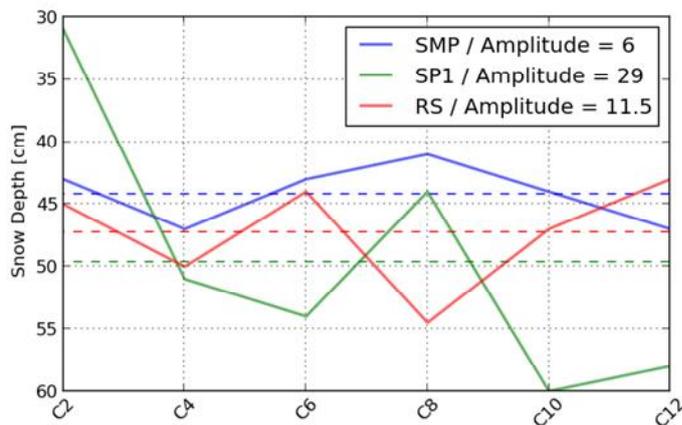


Figure 4.5 : Position de l'interface supérieure de la plaque cohésive située entre $y = 40$ cm et $y = 60$ cm, pour $x = 200$ kPa. La position moyenne est représentée en pointillé

L'amplitude (i.e. l'écart entre la valeur maximum et la valeur minimum d'un signal) dans l'emplacement en profondeur de la plaque cohésive traitée avec la figure 6 est cinq fois plus importante pour le SP1 que pour le SMP, et environ 3 fois plus importante que pour la RS.

Nous reprenons dans un second temps, cette méthodologie en l'appliquant à l'évaluation de l'épaisseur de neige mobilisable (figure 4.6). On considère la hauteur de neige mobilisable comme l'épaisseur de neige en surface pouvant être entraînée à la suite d'un facteur de déclenchement (accidentel, volontaire ou naturel).

Dans le cadre de cette étude, nous définissons l'épaisseur de neige mobilisable en mesurant à partir de la surface du manteau neigeux, l'épaisseur de neige dont la mesure en contrainte est inférieure à la valeur 8 kPa. Cette valeur correspond au seuil minimum de la RS. Elle est de surcroît d'un ordre de grandeur analogue à la charge appliquée par un skieur (q) dont la valeur est utilisée dans le modèle MEPR (Giraud et al., 2004).

A savoir que $q = KP/(BL)$ (5)

Où $P = 850$ N, le poids du skieur
 $K = 1.5$, le coefficient de majoration lié à la prise d'appui
 $L = 1$ m, la longueur « efficace » des skis
 $B = 0.2$ m, la largeur des deux skis.

NB : d'après la société Rossignol, le poids du skieur n'est réparti que sur la moitié de la longueur des skis et la charge peut être doublée lors de prises d'appuis. Cela est confirmé par Föhn (1992) et Schweizer (1995) qui établissent une majoration de l'ordre de 30 à 50 % lors des mouvements de flexion-extensions.

On obtient ainsi :
 $q = 850 * 1.5 / (1*0.2)$
 $q = 6375$ Pa soit 6.375 kPa

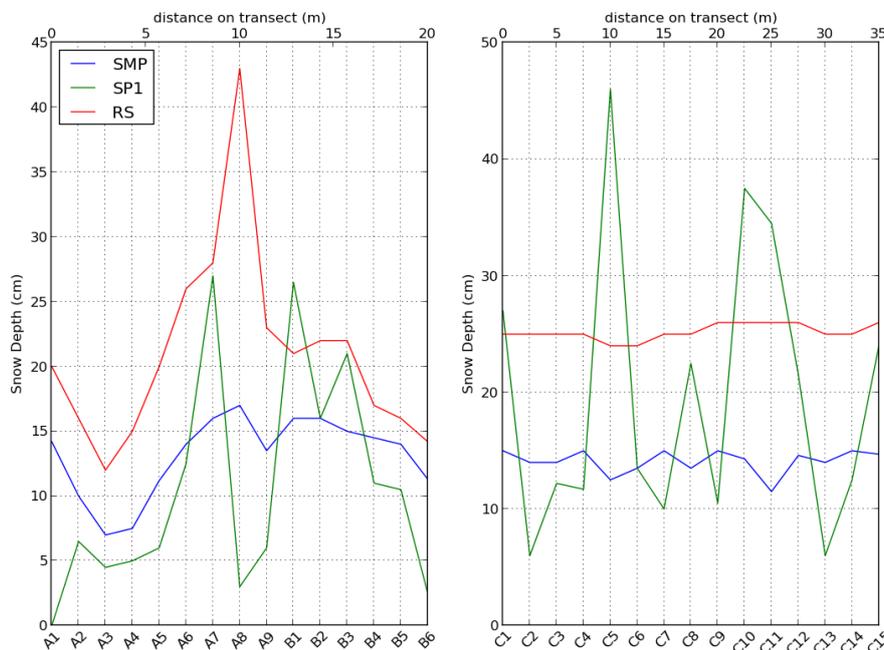


Figure 4.6 : Epaisseur de neige mobilisable en surface en fonction de chaque pénétromètre. A gauche sur le Transect A+B (La Grave, le 19 et 20 mars 2015). A droite, le transect C (La Grave, le 23 mars 2015).

On observe alors deux configurations, une zone sensible aux accumulations (Transect A1-B6) et une zone non soumise aux phénomènes d'accumulations (Transect C1-C15). Dans les deux cas, le SP1 affiche une forte variabilité entre chaque point de mesure. Sur le transect A+B, le SP1 reste tout de même cohérent avec la forme de l'accumulation. Concernant le transect C, la RS et le SMP

définissent l'épaisseur de neige fraîche comme stable le long du transect alors que le SP1 affiche une forte variabilité caractérisé par un écart-type de 12.5 cm. Cet écart-type s'assimile donc à une marge d'erreur moyenne de 12.5 cm : valeur confirmée par les données d'Avatech¹⁰ qui estime à 15 cm la marge d'erreur absolue pour une profondeur de 0 à 40cm.

En conclusion, les trois pénétromètres affichent des profils de résistance à l'enfoncement similaires pour un même point de mesure. Mais il est dès à présent convenu que le SP1 offre une précision moindre concernant la détection en profondeur d'une contrainte donnée.

2.3.2- La résistance à l'enfoncement en fonction de la dureté (*Hand-Hardness [HH]*) et de la stratigraphie

La stratigraphie, couplée à une mesure de dureté (HH) permet d'identifier les différentes couches composant le manteau neigeux ainsi que leur propriétés physiques (i.e. forme et taille des grains). En cela, le couple stratigraphie/HH établit le lien entre les propriétés physiques et les propriétés mécaniques de la neige. Il s'agit cependant d'une méthodologie longue et particulièrement dépendante de l'opérateur, ce qui tend à la rendre subjective. Un opérateur expérimenté peut alors identifier 80% des strates du manteau neigeux via la stratigraphie alors qu'au sondage par battage (RS), il n'en détectera que 60 % (Pielmeier, 2003). Nous chercherons à confirmer cette relation RS/HH pour ensuite définir si les pénétromètres électroniques traduisent (1) l'ensemble des couches définies par la stratigraphie et (2) si au-delà ils permettent de visualiser l'ensemble des couches du manteau neigeux (figure 4.7).

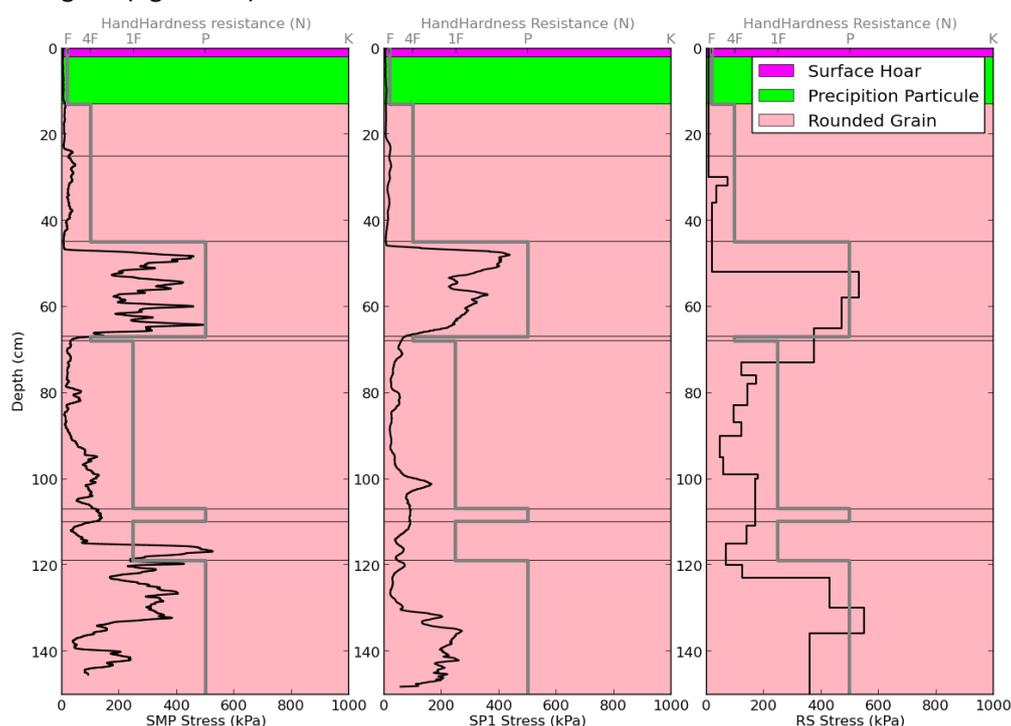


Figure 4.7 : Sondage par pénétromètre en fonction d'une stratigraphie de référence. En noir, les pénétromètres. En gris, la *Hand-Hardness*. La Grave, le 19/03/2015. Pour chaque pénétromètre, le signal le plus cohérent avec la stratigraphie de référence a été sélectionné.

NB : La *Hand-Hardness* nous permet, dans le cadre de cette comparaison, d'établir un critère discriminant au sein d'une superposition de couches de composition homogène (grain fin dans le cas de la figure 4.7). Exprimé en Newton, elle ne peut pas être comparée numériquement aux valeurs de résistance à l'enfoncement des pénétromètres.

¹⁰ Source : Avatech SP1 User Manual / Modèle 100000

On observe que le SMP offre une très bonne détection des strates de neiges en surface (de 0 à \approx 45 cm) et une très bonne corrélation avec la stratigraphie, à l'exception d'un décalage sur la plaque dense à la base du manteau neigeux. Au-delà de cette corrélation, le SMP permet d'indiquer des strates non détectées par la stratigraphie. Bien qu'il soit impossible de considérer comme exhaustif la détection de strates avec le SMP, il apparaît clairement qu'il apporte de nombreuses informations supplémentaires.

Le SP1 permet aussi d'identifier plusieurs informations complémentaires à la stratigraphie qui s'avère de plus analogue à celle du SMP. Un décalage en profondeur est tout de même significatif sur la partie basse du manteau neigeux, comme le témoigne l'emplacement de la croûte détectée à 1 mètre de profondeur alors que la stratigraphie l'identifie 10 cm plus bas. De plus, par rapport au SMP, le SP1 détecte plus profondément et d'une résistance moindre la plaque dense située à la base du manteau neigeux.

Enfin la RS affiche un décalage systématique vers le bas, en termes de profondeur, pour détecter une couche cohésive à la suite d'une couche plus tendre. En tenant compte de ce décalage, on observe qu'elle établit un profil cohérent avec la stratigraphie générale mais ne détecte pas les couches fines (e.g. couche fragile situé à 67cm et croûte situé à 110cm de profondeur). La RS ne permet pas non plus de discriminer les couches de neiges au sein de la neige récente et peu cohésive située en surface.

Concernant le décalage systématique de la RS, cela s'explique par son processus de pénétration. En effet le poids de la sonde couplé à son accélération (Gubler, 1975) décale verticalement l'« arrêt » de la sonde dans une strate. La RS « prend » de la vitesse dans une couche relativement peu cohésive et ne s'arrête pas à l'interface de la couche plus cohésive situé en dessous mais en ayant transpercé partiellement cette couche.

Deuxièmement, on peut penser que ce décalage est accentué, dans une configuration similaire à celle présenté précédemment, par une sous-estimation des valeurs dû à la normalisation en contrainte : si lors de l'amorce de la pointe dans une couche cohésive, cette dernière n'est pas enfoncée totalement, alors la normalisation par la surface de la pointe n'est plus viable car la surface de l'emprise de la pointe n'est pas sa surface totale.

2.3.3- La capacité de détection des couche fragiles par pénétromètre en fonction des *Compression-Tests* [CT]

La comparaison de profils de résistance à l'enfoncement en fonction des résultats issus des CT nous permet d'aborder la pertinence des pénétromètres à détecter les couches fragiles (figure 4.8). Il apparaît clairement que les pénétromètres électroniques (SMP et SP1) ont une forte capacité de détection des couches fragiles. Ce constat doit toutefois considérer une marge d'erreur de 2 à 3 cm liée aux biais expérimentaux des CT. En effet chaque CT correspond à un décrochement visible sur les signaux de résistance à l'enfoncement du SMP et du SP1. Cette comparaison met alors en avant l'apport des sondages électroniques pour détecter de fines couches fragiles.

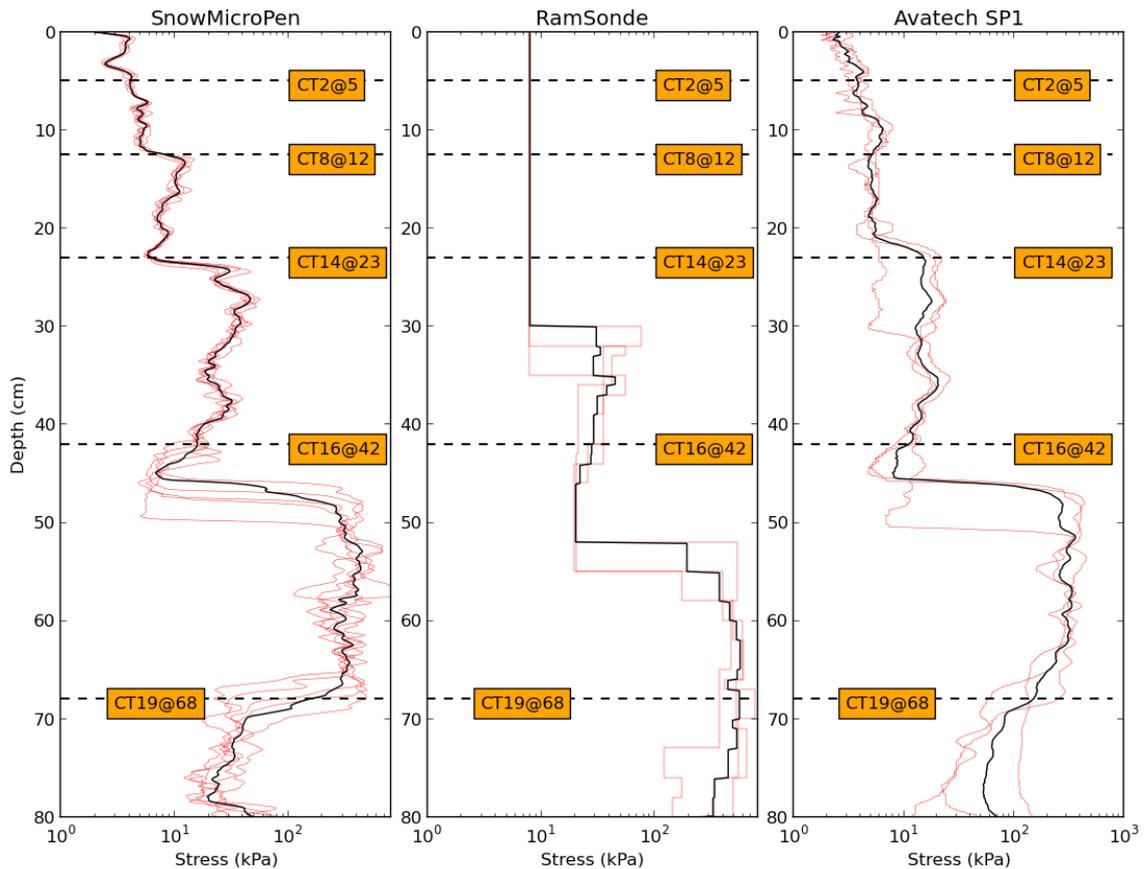


Figure 4.8 : Comparaison des signaux des pénétromètres en fonction des CT, mesures effectuées à La Grave le 19/03/2015 à l'extrémité du transect A. En rouge, l'ensemble des signaux issus du protocole de reproductibilité. En noir, le signal moyen.

Aussi, cette comparaison nous permet de confirmer les limites de la RS. Si, comme nous l'avons vu, la RS permet d'obtenir un profil analogue à celui du SMP et de manière reproductible, elle affiche une véritable limite quant à l'identification des couches fragiles. En effet des structures de plaque d'importante dimension peuvent être détectées (e.g. CT16@42 ou CT14@23, en considérant le décalage vers le bas) mais la RS ne peut détecter de fines couches fragiles. Enfin, la RS ne détecte aucune interface dans la neige de surface (entre 0 et 30 cm pour la figure 4.8), ces interfaces au sein de la neige dite « mobilisable » sont pourtant à l'origine des plaques friables d'apparences poudreuses, et qui sont particulièrement accidentogène.

Dans un second temps, nous représentons l'ensemble des CT réalisés sur le transect A+B sur une extrapolation spatiale des mesures de sondages effectuées sur ce même transect (figure 4.9). Cela nous permet d'observer la concordance entre les CT et les couches fragiles détectées par les pénétromètres, en fonction de la discontinuité spatiale du manteau neigeux. Le transect A+B possède une structure complexe où les strates sont d'épaisseurs variables et non continues dans l'espace. La concordance des CT en fonction des sondages doit donc prendre en compte cette variabilité. Le SMP est particulièrement pertinent dans cette approche : les interfaces fragiles situées en dessus et en dessous de la plaque relative (localisé entre 10 et 40 cm sur la partie droite du transect) sont très bien détectées et le SMP respecte leur agencement spatial. La RS offre aussi de bons résultats pour détecter la couche fragile située en deçà de la plaque susnommée. Les limites de la RS quant à la détection des couches très peu cohésives en surface sont par contre confirmées : elle ne détecte aucune variation dans cette zone et la concordance avec les CT est donc nulle. Le SP1 enfin offre de très bons résultats sur les CT situés à gauche du transect (cf. figure 4.8) mais une

concordance spatiale assez faible pour les CT situés sur la partie droite du transect.

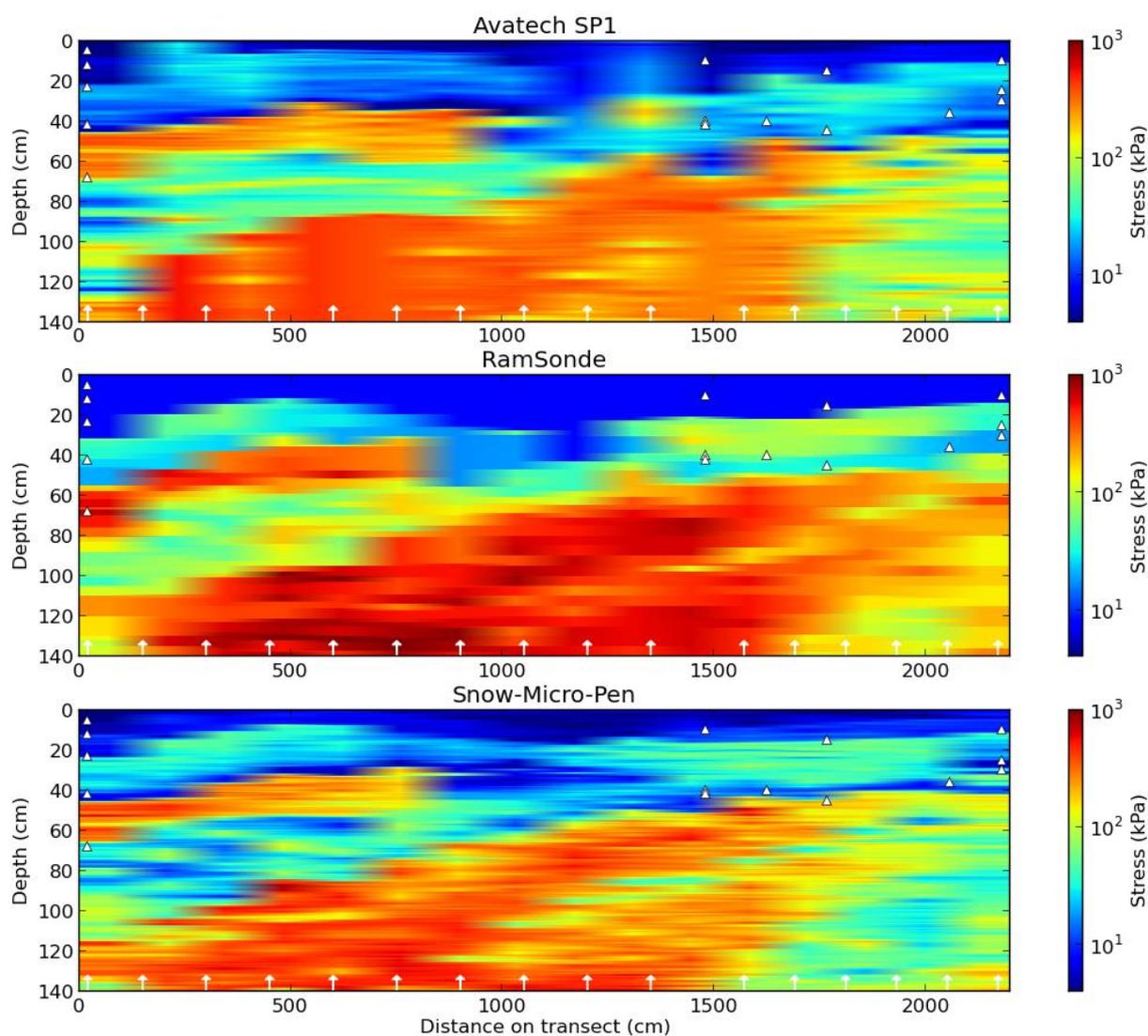


Figure 4.9 : Variabilité spatiale de la résistance à l'enfoncement sur le transect A+B en fonction de chaque pénétromètre et identification des couches fragile par *Compression-Test* (triangle blanc). Les points de mesures de la figure 5 sont situés à l'extrême gauche des graphiques. Les flèches blanches indiquent l'emplacement des mesures de sondages. Mesures effectuées à La Grave, le 19 et 20 mars 2015.

Ainsi, le SP1 respecte la distribution spatiale des couches de neiges mais montre à nouveau des imprécisions en termes de détection en profondeur. Cela limite par conséquent sa concordance avec les CT.

Enfin, la figure 4.9 nous permet d'introduire la problématique centrale des mesures de sondages : la représentativité des sondages dans le cadre d'un manteau neigeux spatialement non-continu. Cette problématique redistribue les enjeux de cette étude : la précision d'une mesure est fondamentale mais la rapidité d'un pénétromètre à multiplier ses mesures dans l'espace l'est tout autant. Le SP1 est au cœur de cet enjeu : bien que sa précision soit critiquable en certains points, sa rapidité d'exécution permet par contre, et *a contrario* des autres pénétromètres, de multiplier facilement les sondages dans l'espace.

2.3.4- Relations statistiques entre pénétromètres

Pour établir la relation quantitative entre la contrainte mesurée par les pénétromètres nous établissons des valeurs moyennes pour des segments de profondeurs données. Nous comparons ainsi (a) les valeurs moyennes de la RS avec le SMP et le SP1 en fonction des segments de RS (figure 4.10), (b) le SMP et la RS en fonction des segments stratigraphiques (figure 4.11), (c) les valeurs moyennes du SMP en fonction du SP1 selon des intervalles de 1cm (figure 4.12) et (d) le SMP et SP1 en fonction des segments stratigraphiques (figure 4.13).

a) La comparaison des valeurs moyennes du SMP et SP1 en fonction des valeurs moyennes de la RS nous permet de confirmer la surestimation, en terme de contrainte, de la RS face au pénétromètre électronique (figure 4.10). De plus, le coefficient directeur de la droite de régression est analogue sur les deux configurations présentées : cette surestimation est donc systématique.

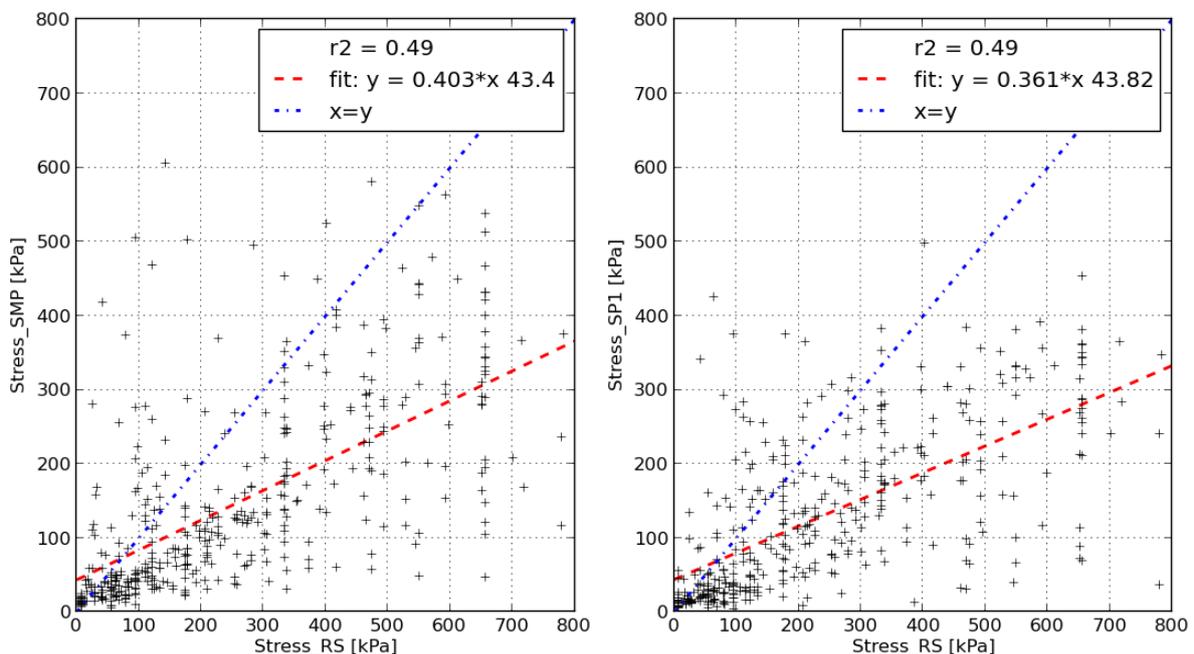


Figure 4.10 : Comparaison des valeurs moyennes entre SMP et RS (à gauche) et SP1 et RS (à droite) selon les valeurs moyennes pour chaque segment de RS.

Ce biais systématique peut être lié à des effets de la taille de la pointe pendant la mesure qui ne peuvent être pris en compte uniquement par la normalisation de la force de résistance par la section de la pointe. Aussi, un fort *intercept* en faveur des pénétromètres électroniques (valeur commune de 43) est à signaler. Cette valeur d'*intercept* est provoquée par le lissage des très faibles valeurs de contrainte à un seuil de 8 kPa par la RS en lien avec la forte capacité de détection des variations au sein de ces couches par le SMP et SP1: une fine couche de neige frittée sera en effet détectée par les pénétromètres électroniques alors que la RS passera au travers sans s'arrêter.

Dans les deux configurations, la dispersion est tout de même forte ($R^2=0.49$). Cela peut s'expliquer par des biais de détection d'une couche en termes de profondeur : décalage vers le bas de la RS ou encore marge d'erreur du SP1. On note aussi plusieurs effets de seuil provenant de la RS qui accentue cette dispersion : pour une valeur unique de la RS (650 kPa par exemple), le SMP trouve des valeurs correspondantes entre 50 et 550 kPa et le SP1 de 75 à 450 kPa. Ce phénomène est dû au caractère discret des valeurs de la RS. Durant les mesures *in-situ*, certains protocoles revenaient fréquemment, donnant des valeurs de résistances identiques. Nous avons par exemple souvent observé un enfoncement de 10 cm pour 10 battages à 40 cm.

b) Nous établissons ensuite l'extraction des valeurs moyennes pour chaque segment de stratigraphie afin d'établir la relation entre la RS et le SMP en fonction du type de grain rencontré lors des campagnes de mesure réalisées au Col de Porte, Col du Lautaret et à La Grave (figure 4.11), à savoir : Grain Fin (*Rounded Grain*) ; Face Plane (*Faceted Crystal*) ; Gobelet (*Depth Hoar*) ; la neige récente tel que la neige fraîche et les particules reconnaissables (*Precipitation Particule*) ; les grains ronds (*Melt Form*) et les croûtes de regel (*Crust*).

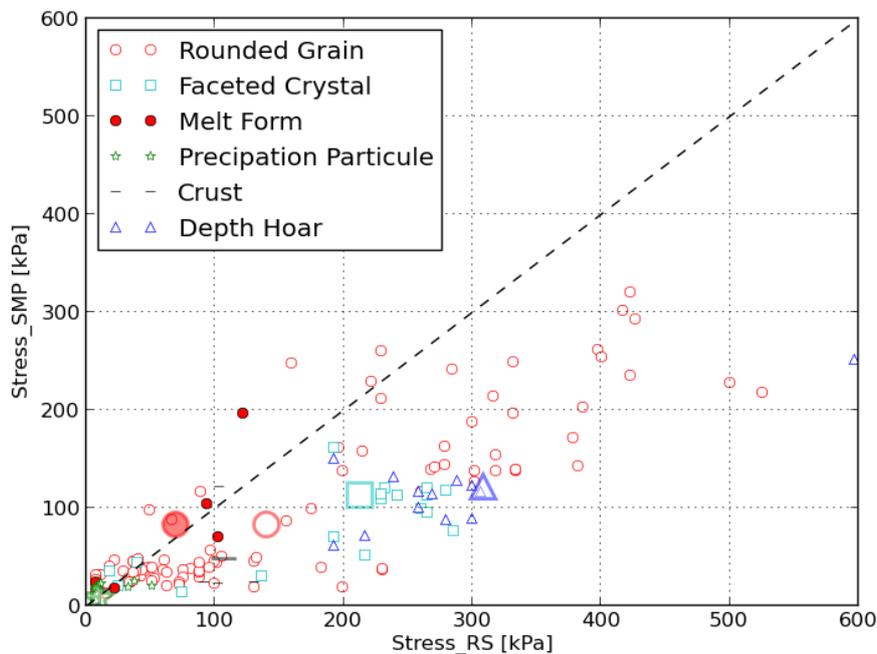


Figure 4.11 : Valeurs de SMP en fonction des valeurs de RS pour différents types de grains. Les symboles agrandis représentent les valeurs moyennes pour chaque série.

Concernant la méthodologie, nous avons cherché, pour plus de pertinence, à prendre en compte les variations de l'épaisseur des strates de neige le long des transects de mesure. Nous avons adapté les bornes inférieures et supérieures de chaque strate définies par la stratigraphie de référence, selon la variabilité spatiale du manteau neigeux de la zone d'étude traitée. Ce calibrage stratigraphique a été effectué d'après les mesures de SMP puis appliqué aux mesures de RS pour permettre la comparaison entre ces deux pénétromètres. Enfin, cette méthodologie comprend l'ensemble des points de mesures réalisés sauf les mesures du transect A+B. Le caractère discontinu des strates représenté sur ce transect empêche en effet la représentativité d'une stratigraphie de référence.

Graphiquement, on note une forme « aplatie » dans la gamme 0-100 kPa. Cette forme témoigne de plusieurs phénomènes :

- (1) Une surestimation du SMP face à la RS pour des valeurs de résistances très faibles (correspondant à la neige récente). La sensibilité du SMP permet de visualiser les variations au sein de la neige récente et de détecter des résistances plus fortes au sein de ces couches. La RS sous-estime par contre ces très faibles valeurs en lissant ces valeurs à un seuil constant de 8kPa.
- (2) Au-delà de 8 kPa et jusqu'à 100 kPa, la RS surestime très fortement les valeurs de résistance. Cette gamme de valeurs correspond majoritairement aux grains fins peu cohésifs.

Enfin, on peut observer sur la figure 4.11 que le SMP discrimine les grains métamorphosés (Face plane et Gobelet) des grains fins cohésifs alors que la RS les assimile dans une même gamme de contrainte (de 200 à 300 kPa environ).

c) Nous affichons ensuite les valeurs moyennes de SMP en fonction du SP1 selon un intervalle de 1cm (figure 4.12). Les décalages de profondeur observés préalablement entre les pénétromètres induisent une très forte dispersion ($R^2=0.32$) et rendent délicat l'interprétation de ce nuage de point. Pour aider à la compréhension des tendances nous avons établi un histogramme 2d qui définit le nombre de point au sein de carré de 30 kPa de cotés.

On observe une surestimation des très faibles valeurs de résistance par le SMP par rapport au SP1. Ce phénomène est à l'origine de l'intercept positif de la droite de régression et apparait analogue à la configuration précédente. On peut alors émettre l'hypothèse que le SP1, au même titre que la RS, a davantage de difficulté à détecter les fines variations inhérente à la neige fraîche (i.e. densification lié à métamorphose de destruction mécanique ou éolienne). Enfin, il faut noter une surestimation des valeurs de contrainte par le SP1 pour la gamme 100-200 kPa en abscisse.

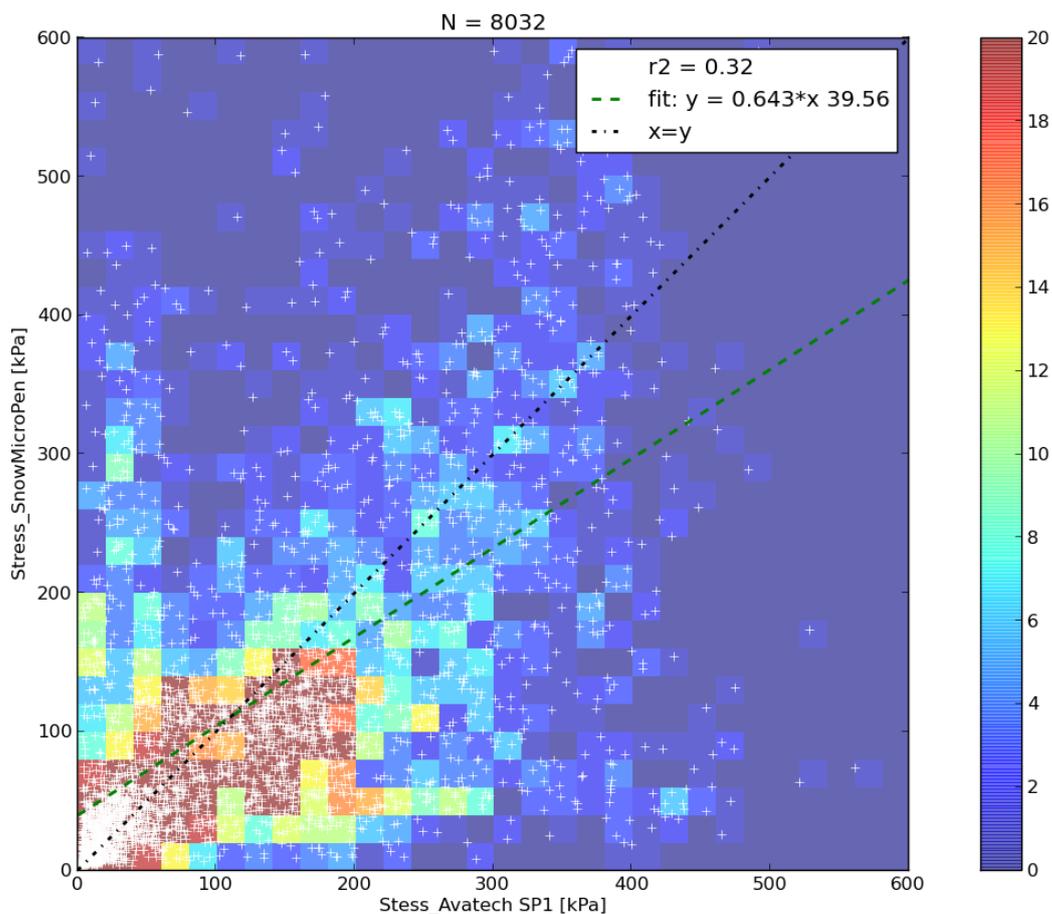


Figure 4.12 : Comparaison des valeurs moyennes (croix blanches) entre le SMP et le SP1 selon un intervalle de 1cm. Les carrés de couleur représente le nombre de point dans un carré (la borne supérieur est à considérer comme supérieur ou égal à 20).

d) Nous établissons l'extraction de valeur moyenne pour chaque segment de stratigraphie afin d'établir la relation entre le SP1 et le SMP en fonction des types de grains rencontrés lors de la campagne de mesure à La Grave (figure 4.13).

Ce graphique permet d'étudier le comportement du SMP et du SP1 en fonction des types de grains mais aussi de limiter la dispersion du fait d'un segment moyenné plus important. De plus, il reprend la méthodologie de calibrage stratigraphique entrepris pour la figure 4.13.

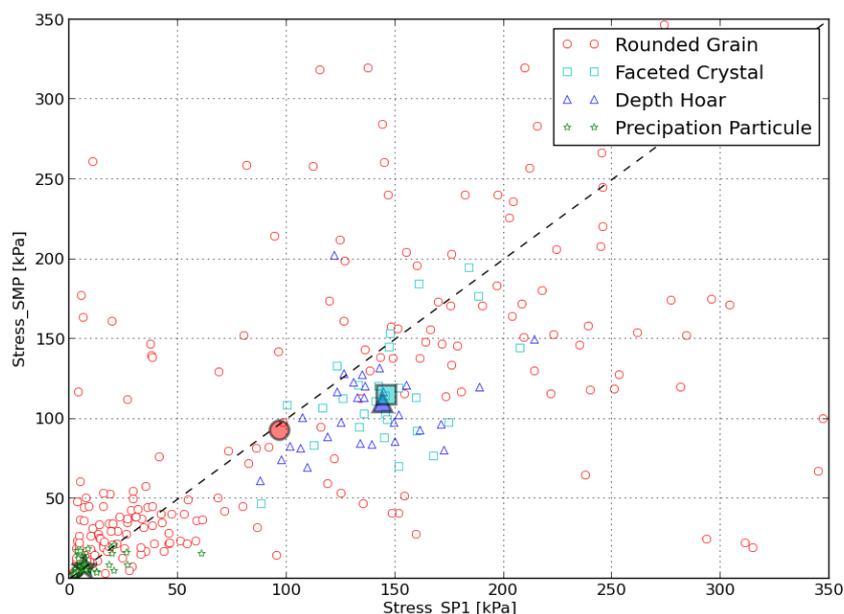


Figure 4.13 : Valeurs de SMP en fonction des valeurs de SP1 pour différents types de grains. Les symboles « plein » représentent les valeurs moyennes pour chaque série.

Ce graphique confirme l'allure générale observée sur la figure 4.13 sans apporter de nouvelles tendances significatives. On note toutefois le rôle majeur des grains fins à fortes résistances concernant la dispersion du nuage de point. Du fait d'une période de vent violent précédant nos mesures, ce constat est à considérer comme inhérent à la condition de formation de la strate : c'est-à-dire au phénomène de saltation, qui induit une très forte hétérogénéité au sein d'une strate de neige.

2.3.5- Comparaison des valeurs absolues de contrainte entre SMP et SP1 par forçage de la correspondance en profondeur des signaux.

Nous l'avons vu dans la partie 2.3.1, la profondeur des couches détectées par le SP1 est variable à cause d'erreurs des capteurs. La comparaison pour une hauteur donnée de la résistance à l'enfoncement des différents pénétromètres est donc difficile et montre une grande dispersion. Pour permettre une comparaison plus fine des contraintes mesurées sur une même couche de neige, nous avons développé une procédure qui permet de recalculer en profondeur le signal du SP1 sur les couches détectées par le SMP.

Cette procédure inspirée des travaux de Lehning et al. (2001) permet d'établir pour un intervalle que nous définissons à 1cm, une contraction ou une dilation du signal de profondeur du SP1 de $\pm 50\%$, tout en respectant l'épaisseur totale du manteau neigeux. L'objectif est alors d'établir la correspondance du SP1 avec le SMP et d'orienter l'analyse vers les valeurs absolues de contrainte. C'est-à-dire pouvoir interpréter les valeurs de contraintes sans biais liés au décalage en profondeur. Pour expliciter cette méthodologie, nous affichons l'exemple pour un point de mesure : le point 2 du transect C (figure 4.14 ; figure 4.15) :

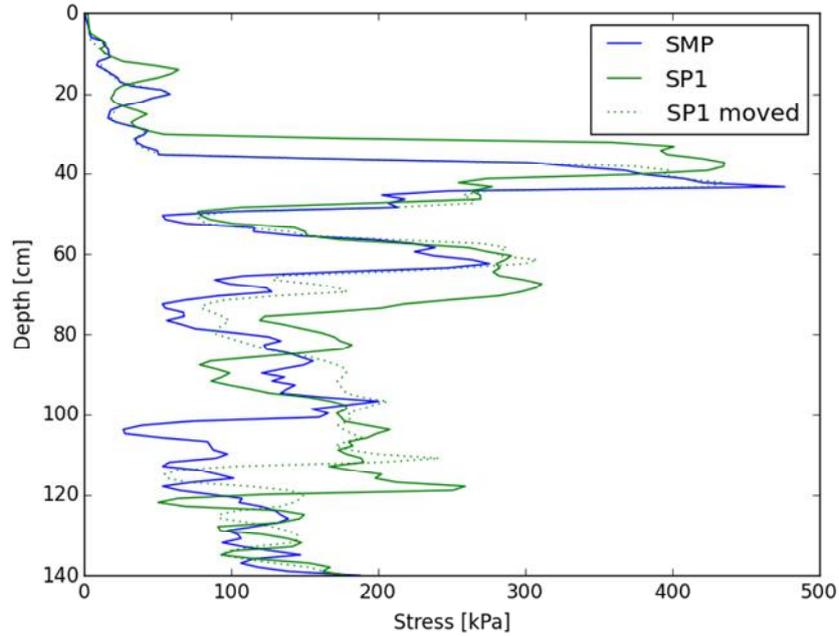


Figure 4.14 : Résultat du processus de *stretching* pour le signal de SP1 en fonction du SMP pour le point de mesure C2. La Grave, le 23/03/2015.

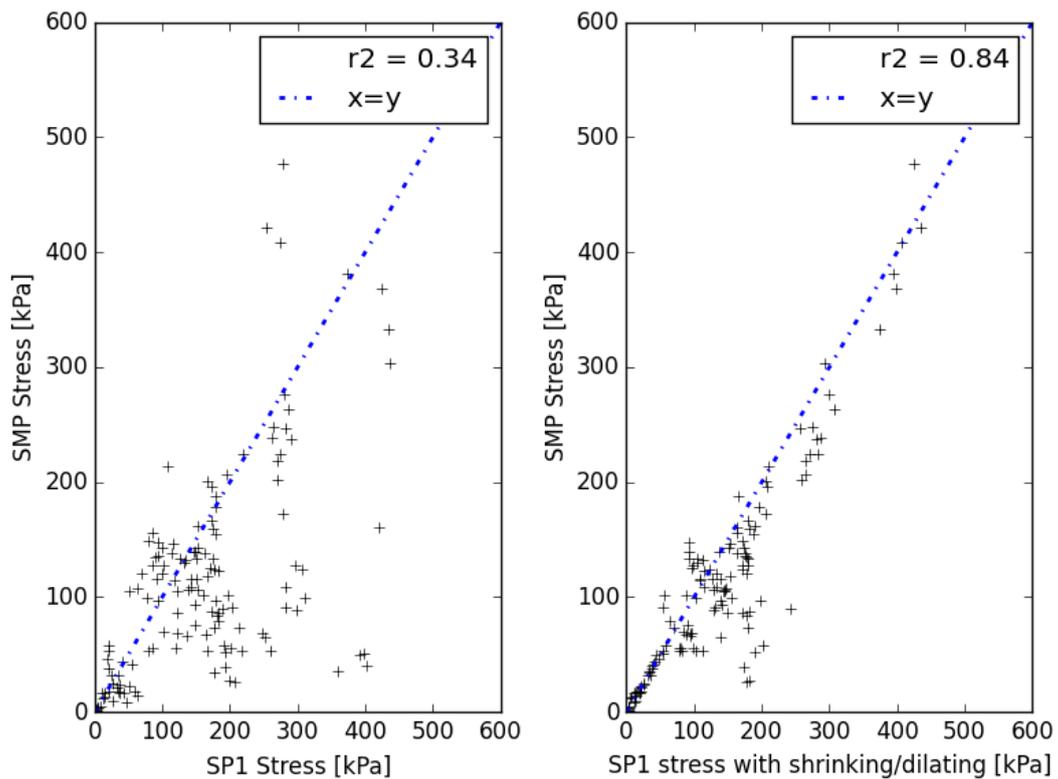


Figure 4.15 : Comparaison des valeurs moyennes entre le SMP et le SP1 selon un intervalle de 1cm pour le point de mesure C2. La Grave, le 23/03/2015. A gauche, les valeurs moyennes de résistances non modifiés. A droite, les valeurs moyennes après contraction/dilatation de $\pm 50\%$ du signal de SP1.

Le forçage du signal de SP1 ('*SP1 moved*' sur la figure 4.14) permet de limiter « artificiellement » la dispersion de la relation SMP/SP1. Le coefficient de détermination passe alors de 0.34 à 0.84. On observe alors, sur la figure 4.15, une excellente concordance entre le SMP et le SP1 pour les valeurs inférieures à 100 kPa et dans une moindre mesure pour les valeurs supérieures à 200 kPa. Au

contraire, sur la gamme 100-200 kPa, une dispersion significative persiste. Ce biais visible dans la gamme 100-200 kPa est inhérent au décalage visible à la profondeur 100-120 cm de profondeur sur la figure 4.14. Décalage pour lequel notre méthodologie n'est pas suffisante.

Toutefois on note que si la détection spatiale des couches entre SMP et SP1 est identique, les valeurs absolues de contrainte des deux pénétromètres ont une très bonne correspondance.

Nous chercherons alors à augmenter le nombre de point de mesure pour cette même méthodologie (figure 4.16):

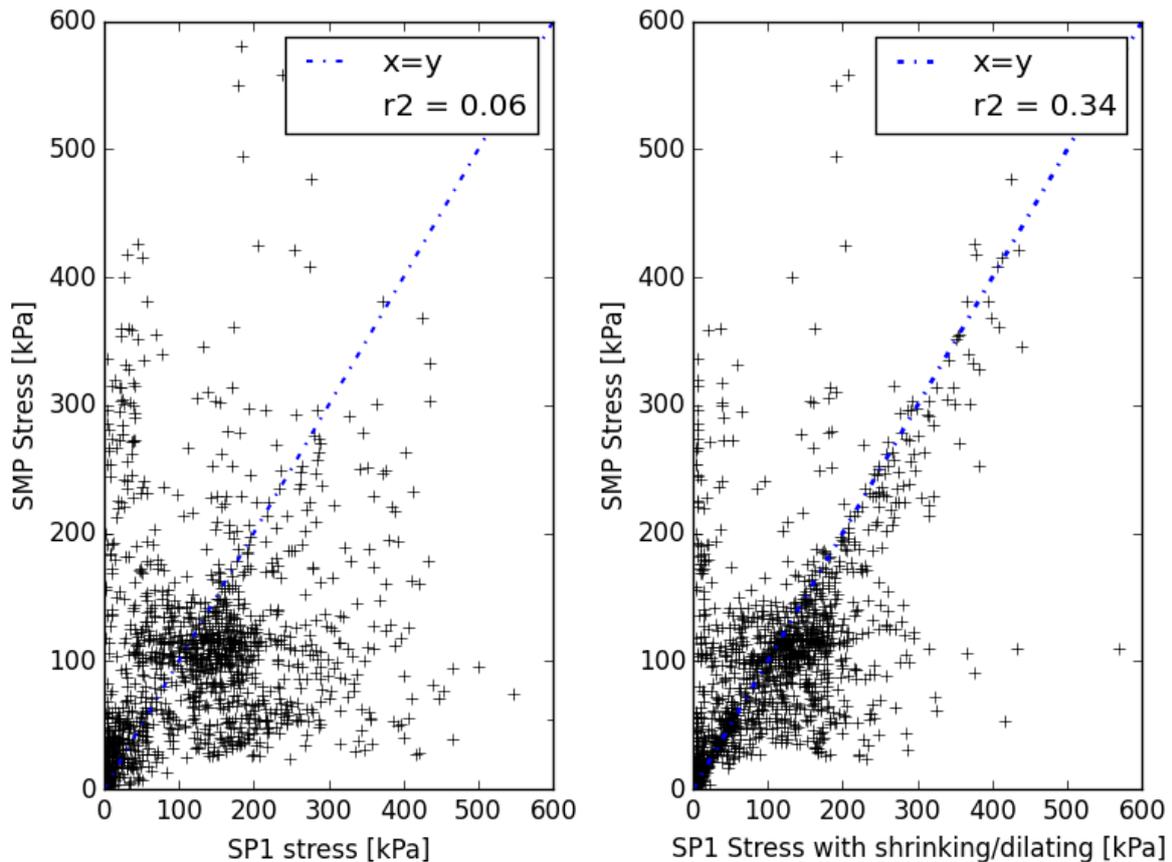


Figure 4.16 : Comparaison des valeurs moyennes entre le SMP et le SP1 selon un intervalle de 1cm pour les mesures du transect C. A gauche, les profils de résistances non modifiés. A droite, après contraction/dilatation de $\pm 50\%$ du signal de SP1.

Cette augmentation du nombre de point considéré n'est pas une systématisation puisqu'un tri dans des résultats est nécessaire pour évacuer les profils dont la méthodologie de stretching ne s'est pas avérée efficace. Après avoir effectué une sélection des profils les plus concordants, on observe une augmentation du coefficient de détermination (de 0.06 à 0.34). Or, cela n'est pas suffisant pour être significatifs. Toutefois graphiquement, cela confirme (1) la bonne concordance général des valeurs absolues de contrainte entre le SMP et le SP1 mais (2) un pôle de dispersion pour la gamme 100-200 kPa du SP1.

CONCLUSION

Cette étude a permis d'amorcer la mise en évidence des limites systématiques ainsi que des atouts de chaque instrument évalué (le SMP, la RamSonde, le SP1 et le Scissomètre), autant sur les critères d'utilisation *in-situ* que sur la pertinence de leur mesure. On note alors les points suivants :

- Le scissomètre possède de nombreux biais mécaniques inhérents aux caractéristiques intrinsèques de l'instrument: mauvais calibrage ou encore vitesse de rotation de la bague de graduation non dépendante de celle du cylindre. Mais aussi des limites concernant les hypothèses d'interprétation de la rupture en cisaillement, qui est à l'origine de l'abaque de relation graduation/ contrainte. Son utilisation, en complément des mesures de résistance à l'enfoncement, n'apparaît donc pas satisfaisante.
- La sonde de battage (RS), fournit des mesures robustes mais ne permet pas une analyse fine du manteau neigeux du fait de sa faible résolution. De plus le temps requis pour un sondage limite la multiplication des mesures.
- Le SMP permet grâce à sa haute sensibilité et sa vitesse de pénétration constante d'obtenir une très grande résolution et une forte précision. Il nous est par contre apparu particulièrement fragile et peu adapté aux mesures en terrain « alpin ». De plus son prix est limitant pour une diffusion dans le réseau d'observateur nivométéorologique.
- Le SP1 est un compromis entre la haute sensibilité du SMP et la portabilité/solidité de la RS. Tout en étant particulièrement pratique sur le terrain et dans son utilisation, il permet une assez bonne visibilité des fines couches fragiles et une bonne discrimination des strates dans la neige peu cohésive. Il possède cependant des difficultés à estimer la position spatiale des couches de neige (e.g. écart-type de 12.5cm pour l'épaisseur de neige tendre en surface sur le transect C).

Il apparaît toutefois nécessaire de poursuivre cette étude la saison prochaine pour multiplier les situations nivologiques analysées pendant les campagnes de mesures, notamment pour des situations de fort risque d'avalanche. Nous notons aussi que la normalisation en contrainte, choisit pour cette étude, implique de considérer comme similaires la vitesse et les propriétés de déformation entre les pénétromètres. Cela permet de réaliser une comparaison quantitative mais des effets de taille du second ordre sont négligés.

Enfin le SP1, placé au cœur de cette étude comparative du fait de son potentiel de diffusion dans le réseau d'observateur nivométéorologue ne peut pas garantir de manière optimale la représentativité du manteau neigeux. Néanmoins, il permet de part sa rapidité et sa facilité d'utilisation, de multiplier les mesures et tendre à améliorer la représentativité spatiale du manteau neigeux. Enfin, la diffusion du SP1 soulève dès à présent des interrogations sur la dépendance à la plate-forme de partage de donnée *Avanet* (i.e. impossibilité d'importer directement les données brutes des mesures depuis l'instrument) mais aussi sur la nécessité d'un traitement algorithmique pour la gestion d'un stock de mesure en expansion.

BIBLIOGRAPHIE

Ancey C. ,1996. Guide Neige et Avalanches : connaissances, pratiques, sécurité. *Edisud (Aix en Provence)*, 71-89.

Bader, H., Niggli, P., 1939. Der Schnee und seine Metamorphose: Erste Ergebnisse und Anwendungen einer systematischen Untersuchung der alpinen Winterschneedecke. Durchgeführt von der Station Weissfluhjoch-Davos der Schweiz. *Schnee- und Lawinenforschungskommission 1934-1938*.

Bohren, C.F. and Beschta, R.L., 1974. Comment on wave propagation in snow. *American J. Physics* 4 : 69-70.

Bradley, C.C. 1966. The snow resistograph and slab avalanche investigations. *IASH Publ.6 (Symposium at Davos 1965—Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanches)*: 251–260

Brun E., E. Martin, V. Simon, C. Gendre C. and C. Coléou, 1989. An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting, *Journal of Glaciology*, 35(121): 333-342

Burlet J. L., Gourves R. , Daudon D. , 1998. Pandalp : a new penetrometer for snow investigation. Norwegian Geotechnical Institute, 203: 84-88

Carmagnola, C.M, 2013. *Mesure, analyse et modélisation des processus physiques du manteau neigeux sec*. Thèse. Université de Grenoble.

Christian J., Whittemore S., Markle B., Laakso T., Sohn A., 2014. Avatech: Avonet- Crowdsourced, real-time snowpack information. *Proceedings, International Snow Science Workshop, Banff*.

Colbeck, S. C., 1972. Theory of water percolation in snow, *Journal of Glaciology*, 11(63): 369–384

Durand, Y & al. , 1999. A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting. *Journal of glaciology (45)*: 151.

Evans E.J. , 2005. *Development of a rotational shear penetrometer for assessing snowpack stability*. PhD Thesis. University of Canterbury.

Faillietaz J., 2003. *Le déclenchement des avalanches de plaque de neige: de l'approche mécanique à l'approche statistique*. Thèse. Université de Grenoble.

Fierz, C., Armstrong, R.L., Durand, Y., Etchevers, P., Greene, E., McClung, D.M., Nishimura, K., Satyawali, P.K. and Sokratov, S.A. 2009. The International Classification for Seasonal Snow on the Ground. *IHP-VII Technical Documents in Hydrology N°83, IACS Contribution N°1, UNESCO-IHP, Paris*.

Föhn P., 1992. Stability evaluation for a sloping snowpack, *Université d'été sur les risques naturels, session 1992: Neige et Avalanches, Chamonix, 14 au 25/09/92*

Giraud, G. ,1992. MEPRA an expert system for avalanche risk forecasting. *In : International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado, USA. Proceeding.* : 97–104

Gubler, H. U. , 1975. On the ramsonde hardness equation. *Proceedings of the Int. Symposium on Snow Mechanics, IAHS-AISH, 114*: 110-121.

Heierli, J., Gumbsch, P. and Zaiser, M., 2008. Anticrack nucleation as triggering mechanism

for snow slab avalanches. *Science* 321(5886): 240-243.

Huang D., Lee J.H., 2013. Mechanical Properties of Snow using Indentation Tests: Size Effects. *Journal of Glaciology* (59): 213

Jamieson, B., & Geldsetzer, T. , 1996. Avalanche accidents in Canada (Vol. 4). *Canadian Avalanche Assn.*

Lehning, M.; Fierz, C.; Lundy, C., 2001. An objective snow profile comparison method and its application to SNOWPACK. *Cold Regions Science and Technology*, 33: 253-261.

Louge, M.Y., Foster, R.L., Jensen, N., Patterson, R., 1998. A portable capacitance snow sounding instrument. *Cold Regions Science and Technology*, 28: 73-81.

Löwe H, van Herwijnen A. 2012. A Poisson shot noise model for micro-penetration of snow. *Cold Regions Science and Technology*, 70: 62-70

Lutz E., Marshall H., 2014. Validation study of Avatech's rapid snow penetrometer, SP1. *Proceedings, International Snow Science Workshop, Banff.*

Mackenzie, R., Payten, W., 2002. A portable, variable-speed, penetrometer for snow pit evaluation. *Proceeding. International Snow Science Workshop (2002: Penticton, B.C.)* : 294-300.

Navarre J.P., Taillefer A., Fraisse P., 1982. Propriétés mécaniques de la neige – mesures des résistances au cisaillement et à la traction. *Ministère des transports – Direction de la météorologie. Note de Travail.*

Perla, R.I., 1969. Strength tests on newly fallen snow. *Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Dept. of Agriculture*: 12

Perla, R. I. , Martinelli, M., 1976. Avalanche Handbook. *Arctic and Alpine Research* 9(3): 318-320

Perla, R., T.T. Cheng and D.M. McClung. 1980. A two-parameter model of snow-avalanche motion. *Journal of Glaciology* 26(94):197-207.

Pielmeier, C.; 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 Technology*, 37: 393-405

Proksch, M., Lowe, H., and Schneebeli, M. , 2012. Statistical model for the correlation length of snow derived from Snow-Micro-Pen measurements, in : *EGU, Vienna. Proceedings.*

Proksch, M.; Reuter, B.; Löwe, H.; Schweizer, J.; Schneebeli, M., 2014. Quantitative Snow Stratigraphy and Stability Derived From High-Resolution Penetrometry. In: *International Snow Science Workshop 2014. A merging of Theory and Practice. September 29 - October 3, 2014. Banff, Alberta, Canada. Proceedings*: 196-201.

Proksch, M.; Löwe, H.; Schneebeli, M., 2015. Density, specific surface area, and correlation length of snow measured by high-resolution penetrometry. *J. Geophys. Res. F: Earth Surface* 120, 2: 346-362

- Schaap, L.H.J. and Fohn, P.M.B., 1987. Cone Penetration Testing In Snow. *Canadian Geotechnical Journal*, 24(3): 335-341.
- Schneebeli, M., Johnson, J.B., 1998. A constant-speed penetrometer for high resolution snow stratigraphy. *Ann. Glaciol.* 26: 107–111.
- Schneebeli, M., Pielmeier, C., Johnson, J.B. 1999. Measuring snow microstructure and hardness using a high resolution penetrometer. *Cold Regions. Science Technology*, 30 : 101-114.
- Schweizer, J, Schneebeli, M., Fierz, C. et Föhn, P., 1995. Snow mechanics and avalanche formation: field experiments on the dynamic response of the snow cover. *Surveys in geophysics*, 16: 621-633
- Schweizer, J., & Lütschg, M., 2001. Characteristics of human triggered avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 33: 147-162.
- Schweizer, J., J. B. Jamieson, and M. Schneebeli 2003, Snow avalanche formation, *Rev. Geophys.*, 41: 1016.
- Schweizer J. and Jamieson, B., 2010. Snowpack tests for assessing snow-slope instability. *Annals of Glaciology*, 51(54): 187-194,
- Schweizer, J. and Reuter, B., 2015. A new index combining weak layer and slab properties for snow instability prediction. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15 : 109-118
- Sihvola, A. H., and M. E. Tiuri (1986), Snow fork for field determination of the density and wetness profiles of a snow pack, *IEEE Trans. Geosci.Remote Sens.*, GE-24(5): 717–721.
- Tschirky, F & al. (2001). Field management of avalanche victims. *Resuscitation*, 51(1) : 7-15.
- Van Herwijnen, A., Jamieson, J.B., 2007. Fracture character in compression tests. *Cold Regions Science and Technology*, 47(1-2): 60-68
- Van Herwijnen, A., 2013. Experimental analysis of SMP cone penetration in homogeneous snow layers. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(10) : 1044-1054.
- Weibull W., 1951. A statistical distribution fonction of wide applicability. *ASME Journal of applied mechanics. Transaction of the American society of mechanical engineers.* 293-297

ANNEXES

Annexe 1: Profil stratigraphique issue de la plateforme AVANET

▲ AvaNet Snow Profile

Organization: Centre d'Etudes de la Neige, CNRM - GAME, Météo-France/CNRS

Location: Le Rateau, Rhône-Alpes

Date: 2015-03-23 1:00 pm

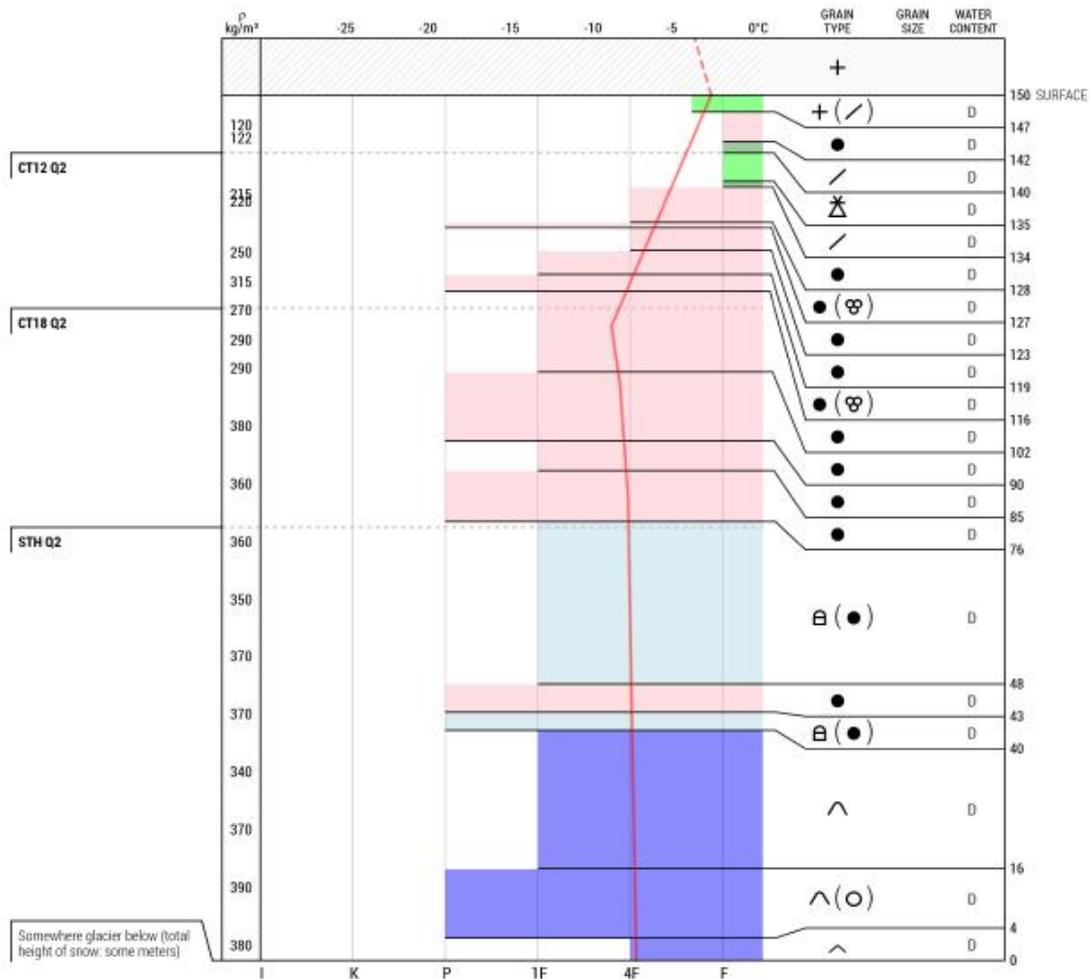
Snowpit depth: 150 cm

Lat/Lng: 45.0061090, 6.2676140

Observer: Pascal Hagenmuller

Snowpack depth: --

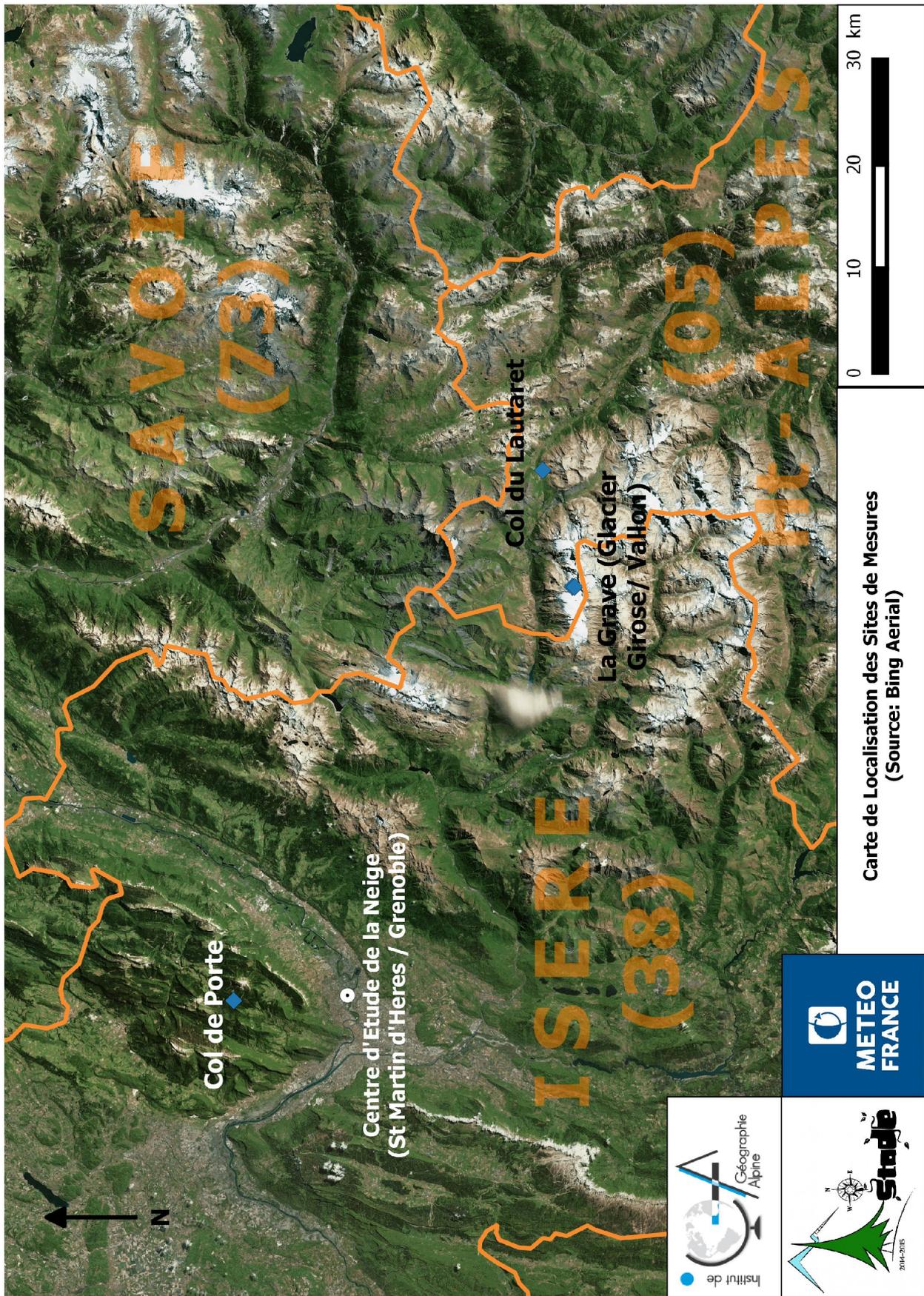
Elevation: 3,277 m	Wind: Calm	Transect C
Slope: 25°	Blowing snow: None	
Aspect: 315° NW	Precipitation: No Precipitation	
Air temp.: -4.0°C	Foot Pen. (PF): 25 cm	
Sky: ☉ Clear	Ski Pen. (PS): 15 cm	



55111E32F52D05D5B09AA567

Powered by AVATECH

Annexe 2 : Carte de Localisation des sites de mesure



Annexe 3 : description de l'ECT (Source : slf.ch)

Procédure

Pour le ECT, il faut dégager à la pelle ou découper avec une scie un bloc rectangulaire de 90 cm de largeur et 30 cm de profondeur (en amont). La paroi arrière du bloc doit être découpée avec une cordelette.

Degré de charge

Poser la pelle sur une partie de la colonne puis taper successivement des séries de 10 coups sur la pelle soit : 10x du poignet (01–10), 10x du coude (11–20) et 10x de l'épaule (21–30). Quand une rupture se déclenche en bloc entier, il faut enlever la partie cassée.

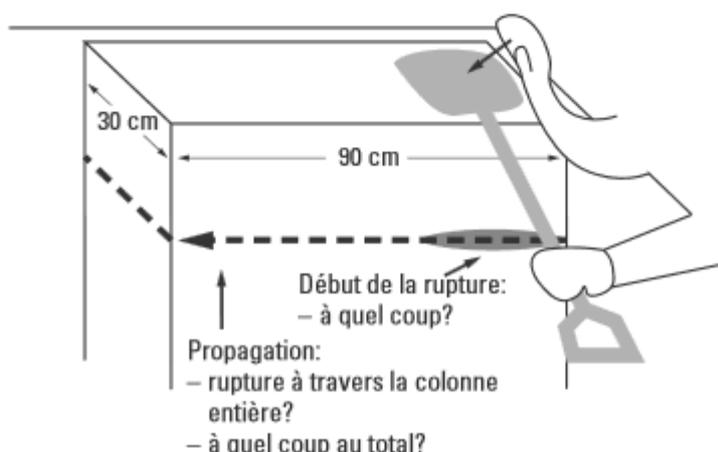
Notation

Le premier nombre définit à quel coup la rupture commence, p. ex. ECT 07/XX @ 70 cm (une rupture se déclenche au 7^{ème} coup du poignet à une altitude de 70 cm; la profondeur doit généralement être mesurée depuis le fond). Pour le deuxième nombre (XX) il y a trois possibilités:

- La rupture se déclenche en bloc entier, p. ex. ECT 07/08 @ 70 cm: Le deuxième nombre (par exemple 08 veut dire 8^{ème} coup du poignet) définit à quel coup la rupture se déclenche en bloc entier
- La rupture se déclenche, mais pas en bloc entier jusqu'au 30^{ème} coup: ECT 07/pp @ 70 cm (pp = partial propagation)
- La rupture ne se propage pas: ECT 07 / np @ 70 cm (np = no propagation)

Cas particuliers

- La rupture se déclenche lors du sciage à une hauteur de 70 cm: ECT 0/0 @ 70 cm
- Aucune rupture (sans début de propagation): ECT nf (nf = no fracture)



Annexe 4 : Rapport d'évaluation du scissomètre

Objectif :

Réaliser une vérification préalable aux mesures de terrain : évaluer la précision de la mesure de résistance au cisaillement pour les différents scissomètres [SC] disponibles à Météo-France.

Présentation des scissomètres :

Le CEN dispose de quatre dynamomètres et de plusieurs jeux de couronnes (grandes, moyennes, petites). La nomenclature suivante a été utilisée pour repérer les différents dynamomètres :

SC_A : Argent sans liseré

SC_B : Or avec liseré vert

SC_C : Or sans liseré

SC_D : Argent avec liseré rouge.

A noté que SC_A correspond au scissomètre utilisé au Col de Porte. Il est de la marque Geonor. Autrement, SC_B/SC_C/SC_D sont des copies effectuées par la société CONCEPT-SOUDURE et SEDITECH. Enfin, les couronnes ont été fabriquées par l'établissement ARDIN selon les plans du CEN (Source J.Roulle /J.L Dumas).

Présentation générale des protocoles :

Protocole 1 : Comparaison entre les dynamomètres des scissomètres.

Protocole 2 : Vérification de la rotation de la bague de graduation.

Protocole 3 : Vérification de l'abaque donnant la relation entre la graduation observée sur le scissomètre et la contrainte de cisaillement exercée sur la neige.

Protocole n°1 : Comparaison entre les dynamomètres des scissomètres.

Nous cherchons, dans un premier temps à comparer les graduations des quatre SC en reliant, à l'aide d'une tige filetée, deux SC entre eux (figure 2). Il s'agit alors de bloquer un des SC (SC_bloqué) et d'appliquer manuellement un couple de torsion sur l'autre (SC_mobile) et ainsi observer la graduation indiquée en fonction du couple de torsion obtenu pour chaque SC. Théoriquement, ils doivent indiquer une valeur (graduation) identique.



Figure 2. A gauche, le dispositif. A droite, application manuelle d'un couple de torsion.

Pour chaque combinaison possible (12), vingt mesures ont été effectuées, en utilisant une gamme de couple variée (graduation entre 0.2 et 11 sur une échelle de 0 à 13).

La première campagne de mesure a révélée un biais lorsque le lâché s'effectue brutalement, ce qui donnera lieu à une étude spécifique de la vitesse de rotation de la bague de graduation (protocole n°2).

La deuxième campagne de mesure à donc été réalisée en accompagnant le mouvement de rotation du SC après la tension maximum appliquée.

Les mesures mettent en évidence deux phénomènes :

- 1- SC_mobile affiche des valeurs sensiblement supérieures à SC_bloqué, quelque soient les combinaisons testées.
- 2- SC_C affiche des valeurs très nettement supérieures, quelque soit le SC utilisé en comparaison.

Nous chercherons alors à vérifier ces hypothèses avec les graphiques suivants :

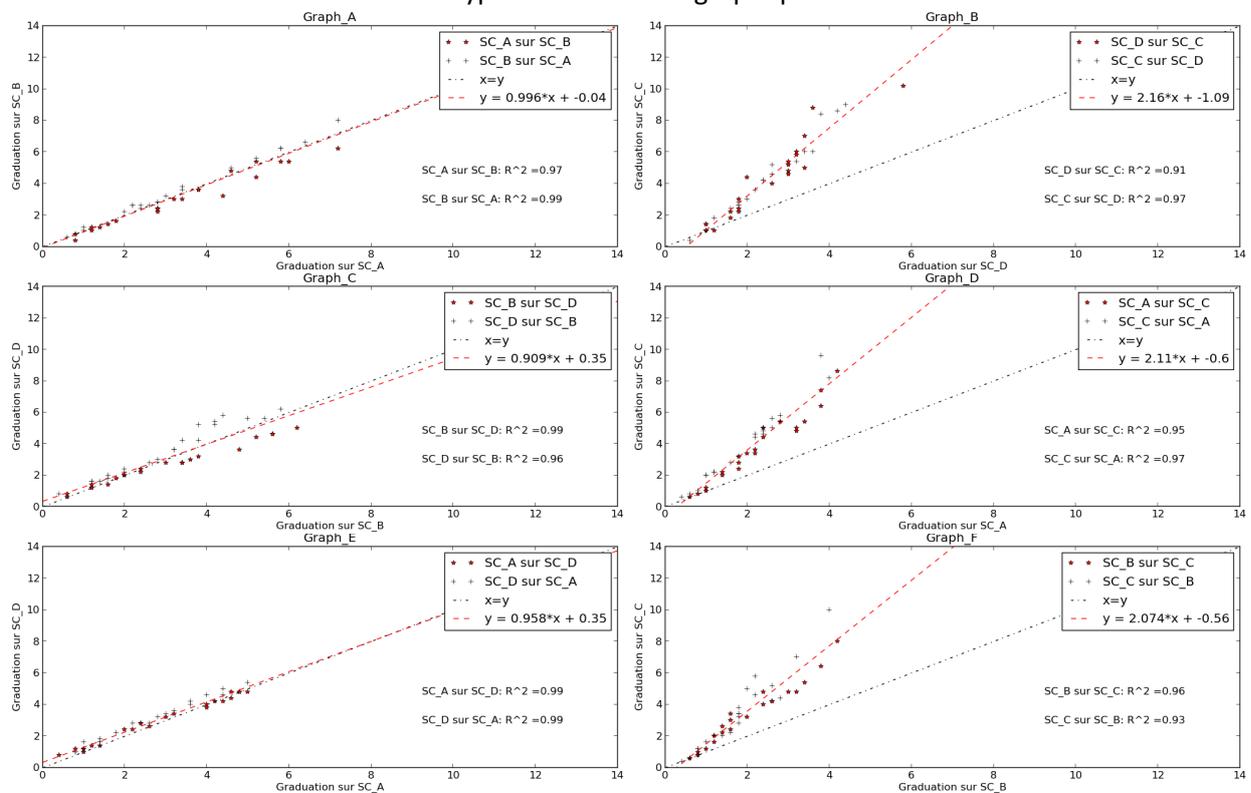


Figure 3 : Comparaison, selon le protocole 1, des graduations entre deux scissomètres pour un même couple de torsion

Premièrement dans l'ensemble des tests, les coefficients de détermination (R^2) sont proche de 1 (de 0.91 à 0.99), la corrélation est donc très forte, SC_bloqué détermine SC_mobile et inversement (tableau 1).

Coefficient de détermination (R^2)				
Bloqué / Mobile	SC_A	SC_B	SC_C	SC_D
SC_A		0,99	0,97	0,99
SC_B	0,97		0,93	0,96
SC_C	0,95	0,96		0,91
SC_D	0,99	0,99	0,97	

Tableau 1 : R^2 pour chaque combinaison testée

Deuxièmement les graphiques confirment que les valeurs de SC_mobile sont légèrement supérieures aux valeurs de SC_bloqué. Au vu du dispositif, on peut raisonnablement penser qu'à l'origine de ce décalage se trouve le poids exercé par SC_mobile sur SC_bloqué, qui tend à créer une force de frottement légèrement supérieur sur ce dernier.

Enfin, les graphiques B, D, F confirment les observations quant au mauvais calibrage de SC_C. En effet, bien que pour ces configurations, les R² soient proche de 1, les droites de régression indiquent des coefficients directeurs de 2.16 [SC_C/SC_D], 2.07 [SC_C/SC_A], 2.11 [SC_C/SC_B] (tableau 2). Le ressort de SC_C peut-être considéré comme deux fois plus « lâche » que ceux des autres SC et nécessite par ailleurs un recalibrage avant réutilisation.

Combinaisons testées	Fit ($y= ax+b$)
AB/BA	$IB = 0,996*IA - 0,04$
AC/CA	$IC = 2,110*IA - 0,06$
AD/DA	$ID = 0,958*IA + 0,35$
BC/CB	$IC = 2,074*IB - 0,56$
BD/DB	$ID = 0,909*IC + 0,35$
DC/CD	$IC = 2,160*ID - 1,09$

Tableau 2 : fits obtenu pour chaque combinaison testée

Protocole n°2 : Vérification de la rotation de la bague de graduation

Après avoir identifié le scissomètre défaillant, à savoir SC_C, nous cherchons dans un second temps à mettre en évidence le biais lié aux lâchers brutaux qui semblent créer une différence de vitesse de déplacement entre la bague de graduation et le cylindre.

Nous établissons le test suivant (figure 4) :

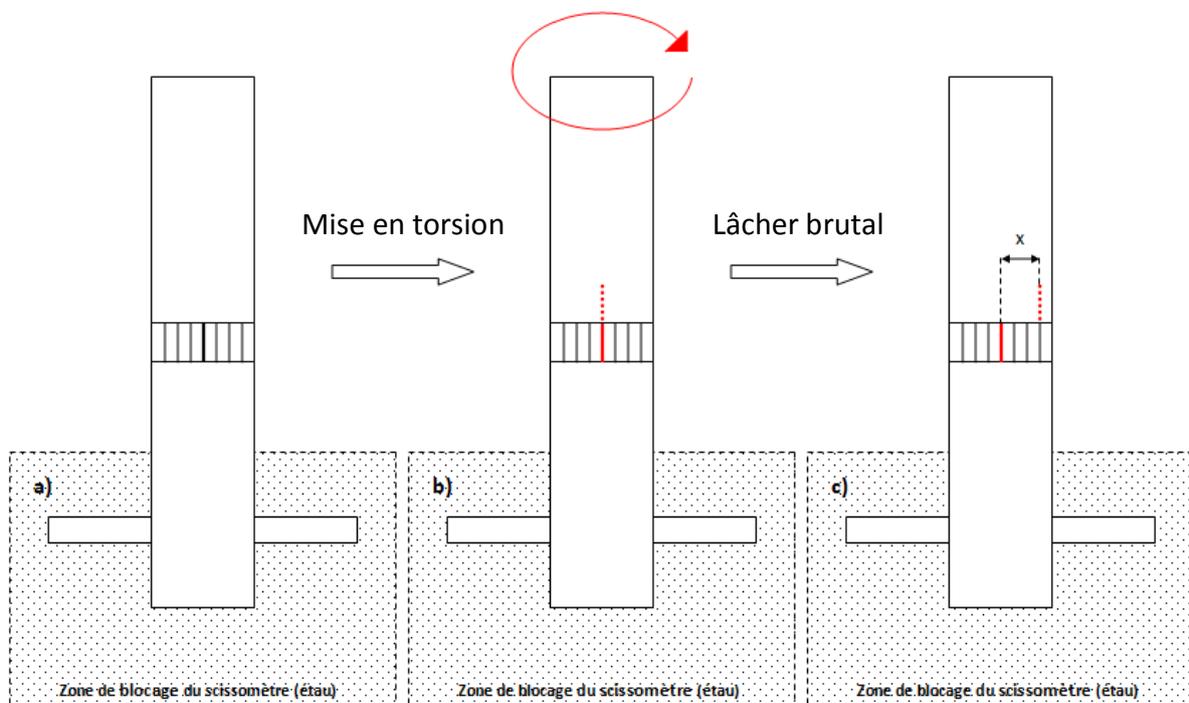


Figure 4. a) le dispositif. b) le marquage du cylindre au niveau d'une graduation repère au moment de la mise en tension du cylindre puis lâcher brutal. c) observation du décalage x (exprimé en graduation) entre le marquage et la graduation repère.

Si le marquage est aligné avec la graduation-repère, le SC est fiable. Le cas échéant, la bague de graduation affiche une vitesse de déplacement différente (elle n'est pas suffisamment entraînée par le retour à la position initiale de la partie du dynamomètre qui est solidaire de la couronne), ce qui est à l'origine d'une mesure faussée. C'est ce que nous exposons par le graphique suivant (figure 5) :

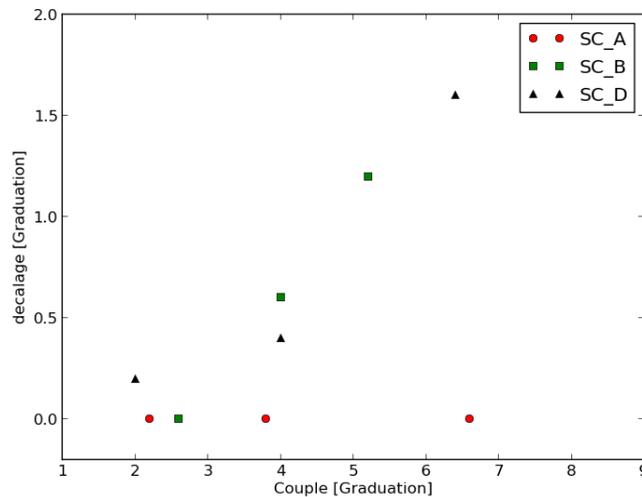


Figure 5 : Mesure des décalages de la bague de graduation à l'issus du protocole n°2.

Les résultats obtenues indiquent la fiabilité de SC_A et mettent en évidence le biais systématique de SC_B et SC_D. Cette imprécision étant par ailleurs proportionnelle à l'augmentation du couple : plus le couple est important, plus le décalage avec la bague de graduation augmente.

Il faut alors noter que SC_B, SC_C, SC_D sont des copies du modèle Geonor (SC_A). Un défaut de conception peut ainsi être envisagé. De plus, l'exposition répétée à l'humidité peut entraîner une usure notable de la bague, un entretien (graissage) pourra être entrepris dans ce cadre là.

Protocole n°3 : Vérification de l'abaque donnant la relation entre la graduation observée sur le scissomètre et la contrainte de cisaillement exercée sur la neige.

Relation graduation/couple

Tout d'abord, nous cherchons à caractériser la relation entre la graduation indiquée par le scissomètre et le couple appliqué exprimé en N.m. Pour cela, nous avons appliqué une torsion en faisant pendre une masse m accrochée à une couronne de rayon R (voir figure 6).



Figure 6. A gauche, le dispositif. A droite, la mise en tension pour une masse donnée.

On connaît alors le moment appliqué par la relation :

$$M_o = (m \cdot g) \cdot R \quad (1)$$

Où M_o = couple [N.m], R = rayon de la couronne [m], m = masse [kg], g = pesanteur [9,81 N/kg].

L'équation (1) nous permettant de mesurer le couple à partir d'une masse mesurable, par comparaison entre la valeur indiquée par le SC lors du test et les valeurs obtenues par (1), nous obtenons alors le graphique suivant (figure 7).

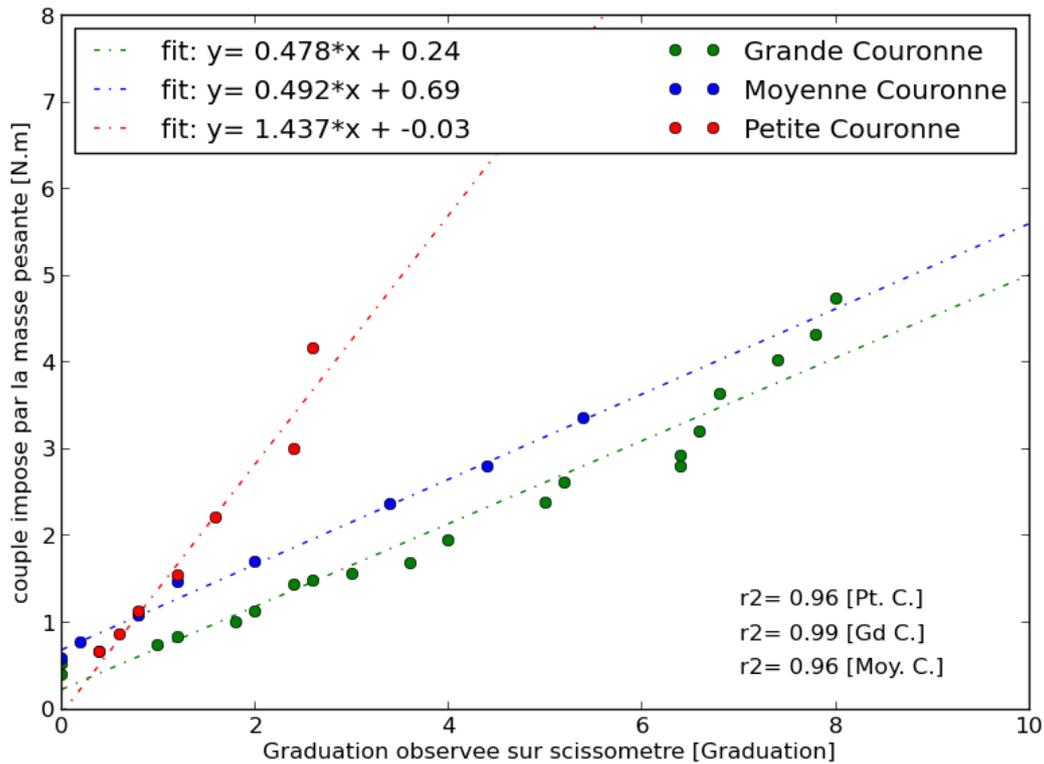


Figure 7 : relation entre la graduation observée sur le scissomètre lors du protocole et le calcul du couple via l'équation (1) pour chaque couronne.

Plusieurs observations sont alors à souligner :

- La petite couronnes à un *fit* complètement différent des deux autres. En effet, le protocole choisit, dans le cas de la petite couronne, exige d'imposer une masse pesante très importante pour représenter une gamme de graduation suffisante (pour une graduation de 2.6 ont impose une masse de 10kg). Or cette configuration crée une forte flexion, à l'origine d'un biais expérimental important.
- La grande et la moyenne couronne ont une pente similaire. On note cependant un *intercept* différent à l'origine d'un effet de seuil que l'on considère inhérent au protocole. En effet, durant le protocole, la masse est appliquée de manière non tangentielle. De plus, en rajoutant les frottements de la ficelle, on observe qu'en dessous d'une certaine valeur (différente selon la taille de la couronne), la masse pesante n'entraîne pas de graduation. Considérant cette effet de seuil comme exclusivement inhérent au protocole, nous forcerons l'*intercept* à la valeur 0 pour la suite de cette étude.

Ainsi, après avoir vérifié la relation couple/graduation, et-ce malgré les biais expérimentaux, nous considérons le coefficient de la grande couronne comme le coefficient à intégrer au calcul de la contrainte.

Calcul de la contrainte via l'intégration du fit issus de la relation couple/graduation

En avant propos il est important de préciser l'importance de la forme de la couronne. En effet le calcul de la contrainte au cisaillement doit prendre en compte la configuration des couronnes, à savoir l'existence d'un rayon intérieur sans ailette. Il est donc nécessaire de considérer uniquement la différence entre le rayon extérieur (total) et le rayon intérieur, qui constitue le rayon « utile ». Ainsi le rayon intérieur, n'offrant aucune contrainte au cisaillement, est à exclure du calcul.

De surcroit, la neige est un matériau hétérogène aux propriétés dépendante de sa microstructure, qui elle-même est un produit de son environnement de formation, de son histoire thermique et hygrométrique et de son environnement actuel (Huang, 2013). Evaluer la résistance aux cisaillements de la neige demande par conséquent d'établir des hypothèses quant à son comportement. Considérant cela, nous établissons les trois hypothèses suivantes :

1) La rupture au cisaillement s'effectue en régime élastique [Equation Smoy] :

- La neige est homogène à l'emplacement de la mesure (emprise de la couronne).
- La contrainte de cisaillement est de forme $\bar{\sigma}(x,y) = a \cdot R$.
- La rupture intervient quand $\bar{\sigma}_{moyen} = \bar{\sigma}_{limite}$.

Ces hypothèses entraînent que:

$$\bar{\sigma} = (4/3\pi) \cdot Mo \cdot ((Re^3 - Ri^3)/(Re^2 - Ri^2)(Re^4 - Ri^4)) \quad (2)$$

Où $\bar{\sigma}$ = contrainte limite au cisaillement [N.m²] ; Mo = Couple [N.m] ; Re = rayon total de la couronne [m] ; Ri = rayon intérieur de la couronne.

2) La rupture au cisaillement s'effectue en régime élastique [Equation Smax] :

- La neige est homogène à l'emplacement de la mesure (emprise de la couronne).
- La contrainte de cisaillement est de forme $\bar{\sigma}(x,y) = a \cdot R$
- La rupture intervient quand $\bar{\sigma}_{max} = \bar{\sigma}_{limite}$.

Cela entraîne l'équation suivante :

$$\bar{\sigma} = 2Mo / \pi \cdot (Re / (Re^4 - Ri^4)) \quad (3)$$

3) La rupture au cisaillement s'effectue en régime plastique [Equation CEN] :

On considère la neige d'une plasticité parfaite tel que :

$$\bar{\sigma} = (3/2\pi) \cdot Mo / (Re^3 - Ri^3) \quad (4)$$

A l'issus de ces trois formules, nous obtenons trois abaques donnant la relation entre la graduation observée sur le scissomètre et la contrainte de cisaillement exercée sur la neige (figure 8) :

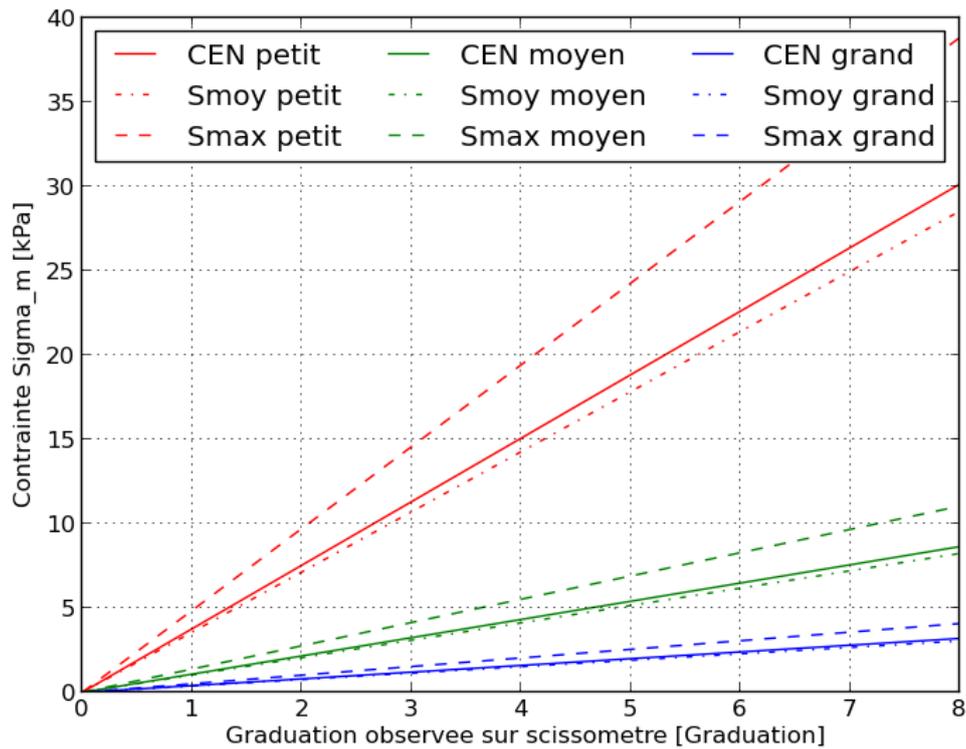


Figure 8 : Relation graduation/ contrainte en fonction des trois hypothèses testés.

Confrontation avec abaque CEN / Formule MEPR

Après avoir détaillé notre raisonnement et les abaques qui en découlent, nous chercherons à comparer ces résultats avec l'abaque du CEN. C'est-à-dire l'abaque qui correspond aux valeurs d'entrées du modèle MEPR. (figure 9)

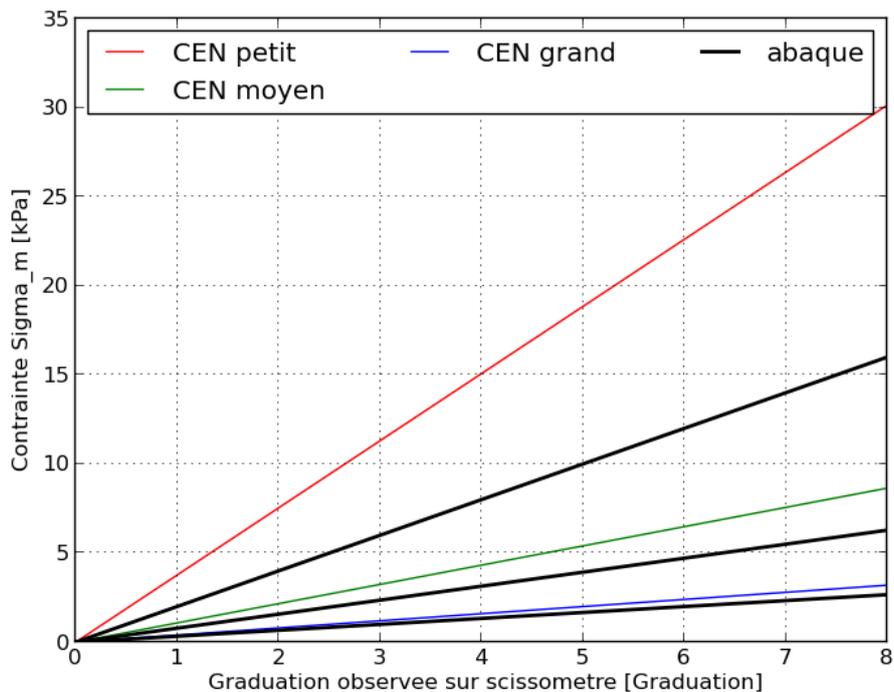


Figure 9 : Comparaison entre l'abaque existant [abaque] et l'abaque relation graduation/ contrainte selon les hypothèses d'études [CEN].

La comparaison entre l'abaque (pour l'équation CEN) issu du raisonnement décrit précédemment et l'abaque du CEN existant montre un décalage important et croissant avec la diminution de la taille des couronnes.

Ce décalage implique une divergence des résultats alors même que la formule de contrainte utilisée est identique au deux raisonnements. Nous chercherons alors à retracer le raisonnement à l'origine de l'abaque pour comprendre cette divergence (voir 'validation méthodologique'), et à comparer ces deux abaques par le biais de mesure *in situ*.

Concernant ce dernier point, nous établissons le protocole suivant (figure 10) :



Figure 10 : Mesure selon différentes tailles de couronnes pour des strates de neige identique [Série A = comparaison Grande/Moyenne couronne ; Série B = comparaison Moyenne/Petite couronne]

Comme l'indique la figure 10, il s'agit pour une même hauteur de neige, sur une zone considérée comme homogène, d'établir une mesure de scissomètre avec deux tailles de couronnes différentes. Le choix de comparaison entre Grande/Moyenne couronne ou Moyenne/Petite couronne dépend alors de la cohésion de la neige et donc de la pertinence de tel ou tel couronne par rapport à cette dernière.

Aussi, afin de réduire la dispersion des valeurs, nous privilégierons les mesures faites dans des neiges sèches. En effet, effectuer des mesures dans des neiges ayant subi une humidification peut entraîner une disparité spatiale d'échelle décimétrique à l'origine d'un décalage importante, via notamment l'existence de chemin de percolation.

En considérant la zone de mesure homogène, nous chercherons à savoir quel abaque permet de se rapprocher au plus proche de la correspondance, en termes de valeur de contrainte, pour les trois tailles de couronnes testées (figure 11 et 12).

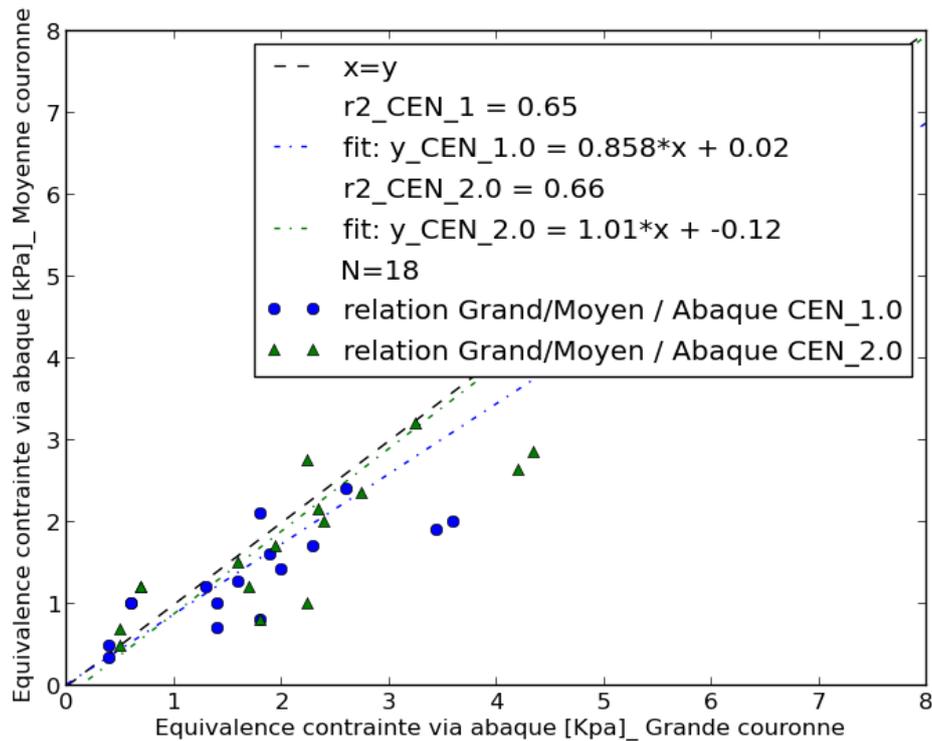


Figure 11 : comparaison des valeurs de contrainte en fonction de mesure effectuée avec la grande et la moyenne couronne, pour une zone considérée comme homogène. [CEN_1.0 = abaque existant ; CEN_2.0 = abaque issus intégration du *fit*]

Ce graphique nous renvoie plusieurs observations :

- La dispersion des valeurs issues des mesures est forte (R^2 de 0.65 et 0.66). Cela s'explique par la disparité des propriétés physiques et mécanique de la neige malgré les précautions prises durant le protocole de mesure. Mais au-delà, on peut vraisemblablement mettre en défaut la précision de l'instrument.
- Malgré la dispersion, la correspondance des valeurs issues de l'abaque CEN_2.0 est excellente (*fit* = 1.01).
- La correspondance pour les valeurs issues de l'abaque CEN_1.0 est moins bonne. En effet on observe une sous-estimation des valeurs pour les mesures faites avec la couronne moyenne (*fit* = 0.86).

Ce graphique met alors en défaut l'abaque existant au profit de l'abaque issu de cette étude. Nous effectuons ensuite la même comparaison pour les couronnes moyennes et petites (figure 12).

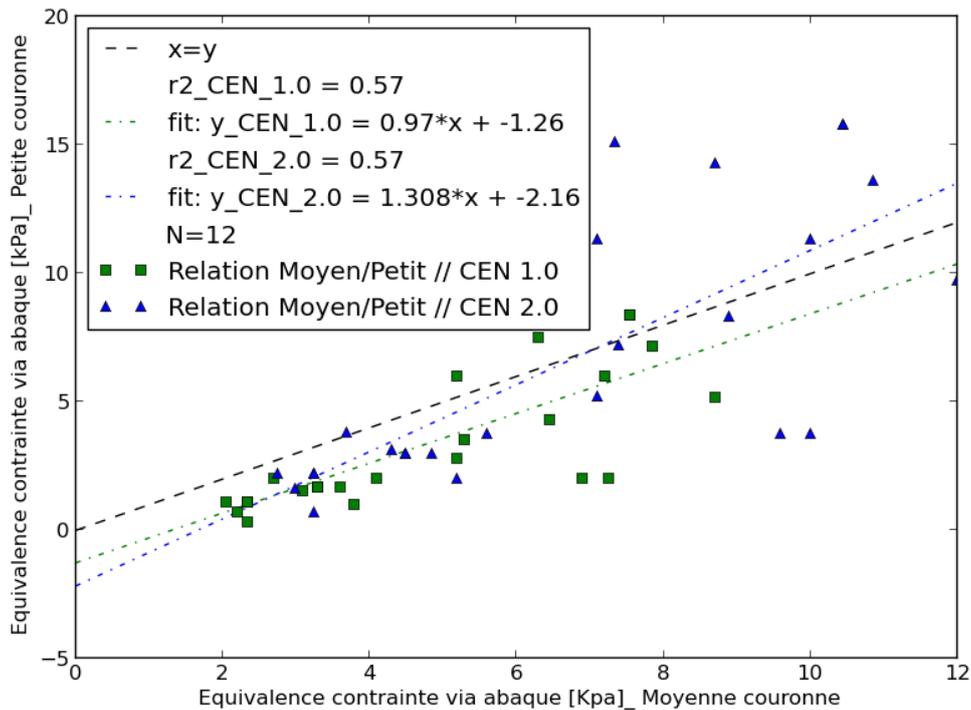


Figure 12 : comparaison des valeurs de contrainte en fonction de mesure effectuée avec la grande et la moyenne couronne, pour une zone considérée comme homogène. [CEN_1.0 = abaque existant ; CEN_2.0 = abaque issu intégration du *fit*]

Le résultat de cette comparaison montre *a contrario* de la précédente, une plus forte concordance pour l'abaque CEN_1.0 que pour l'abaque CEN_2.0. Plusieurs éléments doivent alors être précisés :

- Les mesures pour cette gamme de couronne ont été réalisées majoritairement dans des neiges ayant subi une humidification ou alors dans des plaques ayant subi une forte saltation. Cela implique une grande disparité des résultats et met par ailleurs en doute les conditions du protocole. Il est en effet délicat de parler de répétitivité dans des neiges à très forte disparité.
- La concordance via l'abaque CEN_1.0 est très forte (*fit* = 0.97) mais démontre une importante surestimation de la moyenne couronne par rapport à la petite couronne.

Cette comparaison nuance les résultats précédents mais ne peuvent être formellement pris en compte étant donné les forts biais expérimentaux.

Validation méthodologique du calcul de la contrainte via l'intégration du *fit* issu de la relation couple/graduation

A titre de comparaison, nous avons réalisé dans un premier temps, l'abaque de relation entre la graduation observée sur le scissomètre et la contrainte de cisaillement exercée sur la neige à partir des mesures obtenues pour chaque couronne et avec l'équation CEN (figure 12). C'est-à-dire en incluant un *fit* différent pour chaque couronne et sans forçage de l'*intercept* (Cf. figure 7).

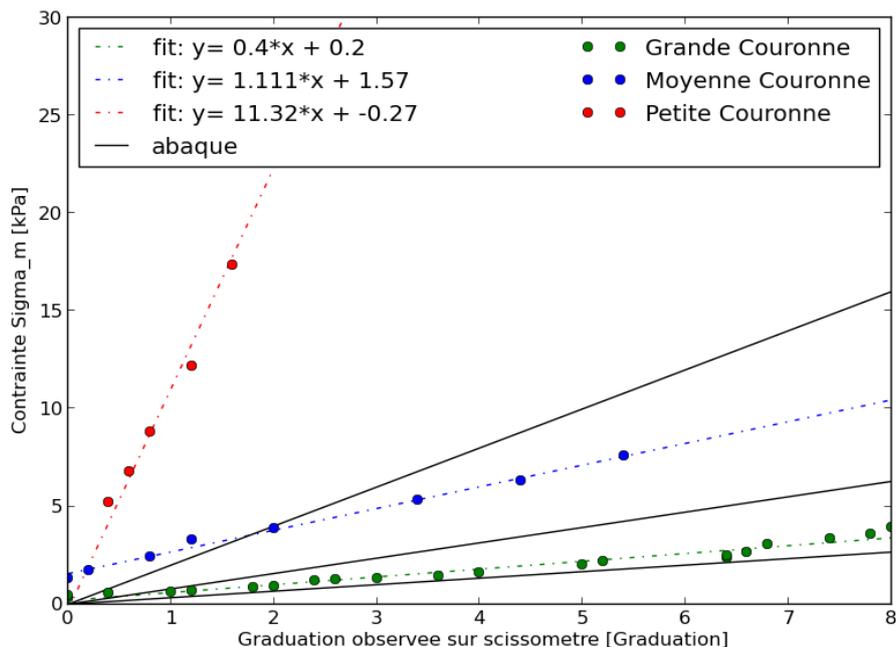


Figure 12 : Comparaison abaque CEN existant et abaque de relation entre la graduation observée sur le scissomètre et la contraintes de cisaillement (équation CEN) en incluant un fit différent pour chaque couronne.

Cette option méthodologique implique de considérer, dans le calcul de contrainte, les biais issus des protocoles expérimentaux (effet de seuil, problème de flexion sur la petite couronne), ce qui induit de fort décalage des valeurs finales. Ce raisonnement est par conséquent réfuté au profit de notre protocole initial.

Aussi, pour expliciter le décalage entre l'abaque issus de ce rapport et l'abaque existant (CEN) vu précédemment, nous avons cherché à retracer le raisonnement à l'origine de ce dernier (figure 13). Ce dernier apparait comme une extrapolation des résultats issus de l'expérimentation uniquement sur la grande couronne.

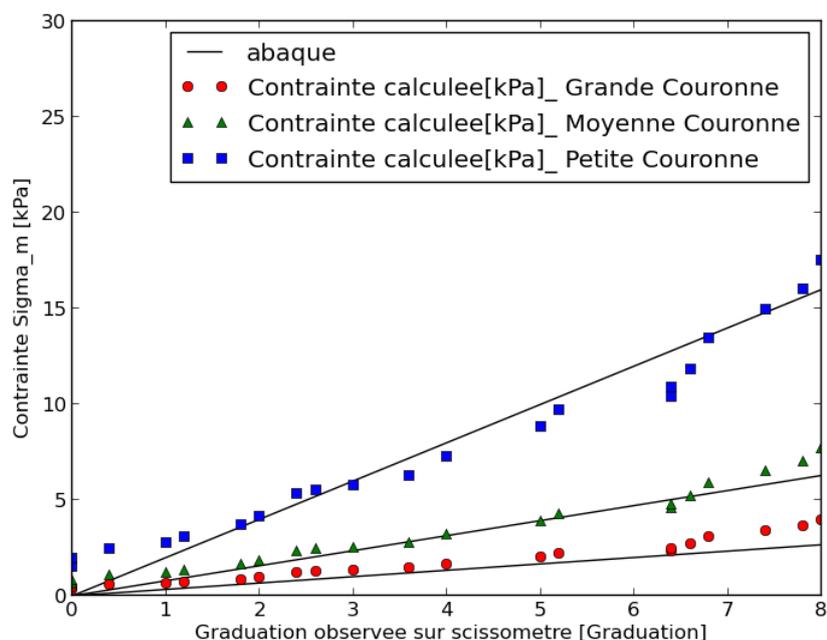


Figure 13 : correspondance entre abaque CEN existant et contrainte calculée

En effet, cette correspondance à été permise par l'utilisation, pour chaque couronne, d'une même série de résultat expérimental (graduation), en l'occurrence celle de la grande couronne. C'est ce que nous exposons ci-après à travers le détail du calcul effectué. De surcroit et étant donné que le calcul du cisaillement met en relation la graduation avec le moment, il semble délicat de considérer la même série de graduation pour les différents calculs de moment. Pour cette raison, il est appaait nécessaire de remettre en cause les résultats issus de cette abaque.

```

''' masse utilise lors du protocole et conversion en poid'''

m= np.array([0.48,0.62,0.79,0.89,0.99,1.20,1.34,1.72,1.78,1.86,2.02,2.34,
2.86,3.14,3.36,3.51,3.83,4.35,4.83,5.17,5.67])

P= m*9.81    # masse vers Poid

''' rayon exterior (Re) et rayon interieur (Ri) pour chaque couronne '''

#R_grand:
Re_g=0.085    # g = grand
Ri_g=0.035
#R_moyen:
Re_m=0.061    # m = moyen
Ri_m=0.025
#R_petit:
Re_p=0.04    # p = petit
Ri_p=0.015

''' Formule du Moment (Mo) selon le poid et les rayons exterior.
Le moment s'exprime sur l'integralite du rayon '''

# Mo
Mo_g = P * Re_g
Mo_m = P * Re_m
Mo_p = P * Re_p

''' Graduation (G) obtenue lors du protocole 3, sur la grande couronne'''

G = np.array([0,0,0.4,1.0,1.2,1.8,2.0,2.4,2.6,3.0,3.6,4.0,5.0,5.2,6.4,6.4,
6.6,6.8,7.4,7.8,8.0])

''' Calcul de la contrainte (Sigma) selon la formule CEN
division par 1000 pour passer de N.m2= Pa en kPa'''

# Sigma [N.m2]
sigma_g = (3/(2*np.pi)*Mo_g/(Re_g**3-Ri_g**3))/1000
sigma_m = (3/(2*np.pi)*Mo_m/(Re_m**3-Ri_m**3))/1000
sigma_p = (3/(2*np.pi)*Mo_p/(Re_p**3-Ri_p**3))/1000

''' Coordonnees des droites de l'abaque CEN existant '''

plt.plot([0,9],[0,3], 'k-', label='abaque')    #grande couronne
plt.plot([0,14],[0,11], 'k-')                #moyenne couronne
plt.plot([0,10],[0,20], 'k-')                #Petite couronne

''' Affichage de la relation graduation (G) obtenue sur la grande couronne (Abscisse)

```

et le calcul de la contrainte Sigma (Ordonnee)'''

```
plt.plot (G,sigma_g, 'ro', label='Contrainte calculee[kPa]_ Grande Couronne') #sigma grd
plt.plot (G,sigma_m, 'g^', label='Contrainte calculee[kPa]_ Moyenne Couronne') #sigma moy
plt.plot (G,sigma_p, 'bs', label='Contrainte calculee[kPa]_ Petite Couronne') #sigma petit
plt.xlabel(' Graduation observee sur scissometre [Graduation] ')
plt.ylabel('Contrainte Sigma_m [kPa] ')
plt.xlim(0,8)
plt.ylim(0,30)
plt.legend()
plt.title('Protocole 3 (4)_CEN')
plt.show()
```

Détail des hypothèses en fonction des propriétés mécaniques de la neige :

La neige est un matériau élasto-plastique dont la résistance au cisaillement dépend de sa cohésion, elle-même dépendante de la « force » de liaisons entre les grains de neige (Failletaz, 2003). Ce constat induit une pluralité de comportements mécaniques en fonction des propriétés physique de la neige. La sélection d'une hypothèse quant au comportement mécanique de la neige lors d'un test de cisaillement, apparait alors comme particulièrement délicate.

Après avoir réfuté l'abaque CEN_1.0, nous chercherons dans cette partie à détailler les implications, en terme mécanique, des hypothèses retenu précédemment : Equation Smax ; Equation Smoy ; Equation CEN.

1) Rupture fragile [Equation CEN]

La notion de rupture fragile renvoi à un phénomène d'augmentation de la contrainte en fonction du déplacement s'effectuant de manière linéaire (i.e. comportement pré-rupture parfaitement élastique) jusqu'à une contrainte limite (σ_{lim}) et une rupture brutale accompagnée d'une contrainte nulle (figure 14).

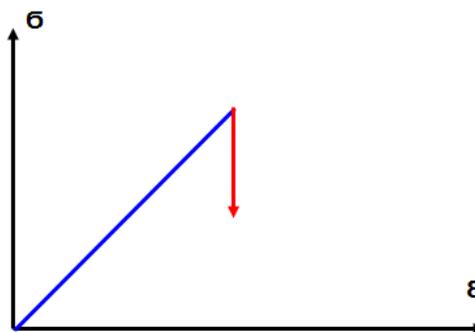


Figure 14 : Rupture fragile (Contrainte en ordonnée, Déplacement en abscisse)

Bien que la neige a un comportement viscoplastique en réalité (la rupture se fait de manière « progressive »), cette hypothèse apparait comme cohérente pour des neiges de type grains fin (e.g. structure de plaque) (Navarre et al., 1982).

2) En régime plastique.

Considérer la neige en régime élastique revient alors à concevoir la relation contrainte/déplacement sous la forme d'un pic : la contrainte croit jusqu'à la rupture pour ensuite décroître progressivement et pas jusqu'à zéro (figure 16).

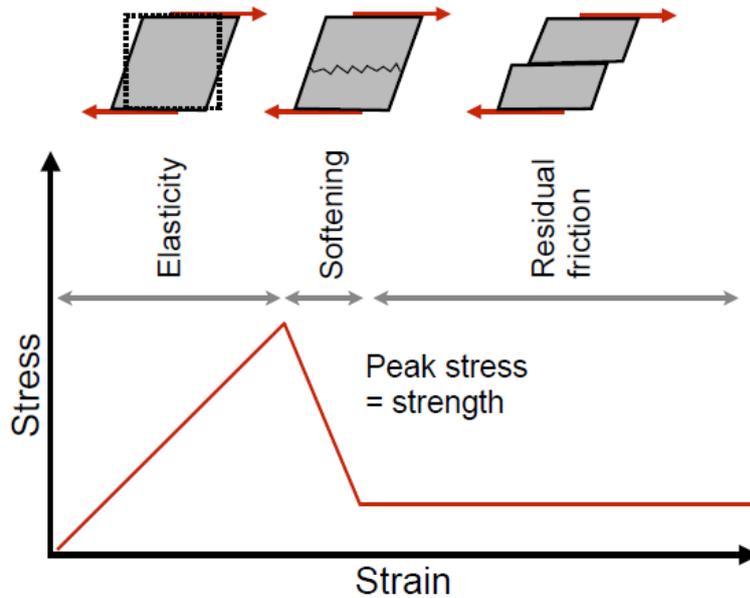


Figure 16 : Modélisation d'une rupture en cisaillement. Contrainte en ordonnée, déplacement en abscisse (Source : Hagemuller, Phd presentation, 2014_12_07)

Enfin, pour les hypothèses en régime élastique ($\sigma_{\max} = \sigma_{\text{limite}}$ et $\sigma_{\text{moy}} = \sigma_{\text{limite}}$), nous établissons les précisions suivante :

- 1- L'hypothèse $\sigma_{\max} = \sigma_{\text{limite}}$ considère que la rupture se fait à l'extrémité du rayon de la couronne (figure 17), c'est-à-dire là où le déplacement est le plus important. Ce qui implique, à l'instar de la théorie du maillon faible (Weibull, 1951), que l'initiation de la rupture se fait à cette extrémité et induit une propagation complète jusqu'au point intérieur du rayon « utile ».
- 2- Au contraire, l'hypothèse $\sigma_{\text{moy}} = \sigma_{\text{limite}}$ permet de se défaire de la théorie du maillon faible en établissant un seuil de rupture plus élevé. On considère alors que c'est au point de contrainte moyen (à l'échelle du rayon « utile » de couronne) que la rupture s'établit. Dans cette configuration, des micro-ruptures peuvent s'établir sans fatalement impliquer une rupture totale. Cependant, cela implique de concevoir une « stabilisation » de la contrainte à l'extrémité de la couronne malgré la continuité du déplacement.

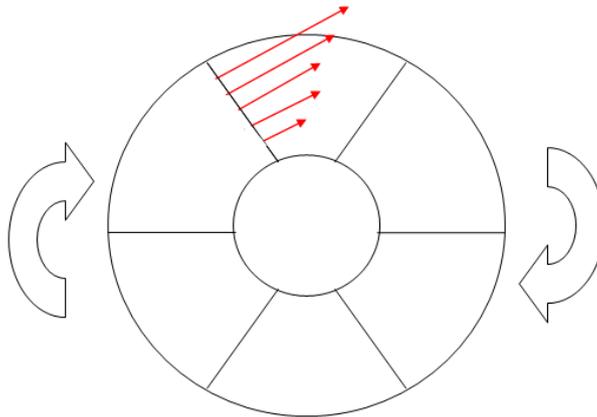


Figure 17 : Représentation des vecteurs de déplacement sur la couronne à l'instant t selon $\sigma_{\max} = \sigma_{\text{limite}}$.

Il apparaît alors délicat d'établir une hypothèse de référence parmi celles décrites précédemment. Ce constat amène les conséquences suivantes : Au même titre que les hypothèses S_{\max} et S_{moy} , l'hypothèse CEN apparaît comme questionnable du point de vue des propriétés mécaniques de la neige. Deuxièmement, les hypothèses n'étant pas satisfaisantes, les valeurs issues des mesures ne peuvent être exploitées de manière satisfaisantes.

Conclusion :

Cette série d'expérience a permis de mettre en évidence le mauvais étalonnage de SC_C ainsi que la précaution d'usage requis pour l'utilisation de SC_B et SC_D. Afin de réaliser des observations exploitables il est alors nécessaire d'utiliser uniquement SC_A, c'est-à-dire le scissomètre argenté sans liséré de la marque Geonor. Concernant les couronnes, afin de ne pas endommager le filetage du dynamomètre, il est nécessaire d'utiliser uniquement les couronnes suivantes : CEN_P2 ; CEN_M4 ; CEN_M5 ; CEN_M6 ; CEN_G6.

Aussi, il apparaît nécessaire de réfuter l'abaque CEN existant au profit de l'abaque issu du calcul de la contrainte comprenant l'intégration du fit de la relation couple/graduation. Toutefois, cet abaque ne permet pas d'avoir une correspondance satisfaisante avec les propriétés mécaniques effectives du manteau neigeux. Il existe par ailleurs aucune hypothèse répondant parfaitement à ces propriétés effectives. Ainsi, bien que la résistance limite au cisaillement soit une valeur clef dans la compréhension de la stabilité du manteau neigeux, les valeurs issues des mesures du scissomètre n'offre pas de résultat satisfaisant pour les exploiter pleinement. Il sera alors nécessaire de transférer l'évaluation de la cohésion de neige vers des mesures de résistances à l'enfoncement plutôt que de résistances au cisaillement.

Annexe Rapport Scissomètre : recensement et évaluation des couronnes disponible au C.E.N

Nom	Diamètre totale de la couronne	Longueur filetage	Type filetage	Autres inscriptions observées	Etat général	Remarques	Diamètre du rayon intérieur
CEN_G1	17 cm	0.8	1	'V07'	ok		7.2
CEN_G2	17 cm	0.7	1	'la botte, Ganesh'	ok	Liseré vert	7.0
CEN_G3	17 cm	0.7	1	'la botte'	ok	Liseré vert Hauteur emprise différente	7.0
CEN_G4	17 cm	1.0	2	R.A.S	moyen	Modèle différent	~7.5

						Déformation/Faux rond	
CEN_G5	17 cm	1.0	1	'CDP'	Voir remarque	Filetage HS	7.0
CEN_G6	12	1.0	2	'cdp'	ok		7.0
CEN_M1	12.2 cm	1.0	2	'A'	ok	Hauteur emprise différente	4.5
CEN_M2	12.2 cm	0.8	1	R.A.S	ok		5.0
CEN_M3	12.2 cm	0.7	1	'la botte, Ganesh'	ok	Liseré vert	5.0
CEN_M4	12.2	1.0	2	'cdp'	ok		5.0
CEN_M5	12.2	1.0	2	'cdp'	ok		5.0
CEN_M6	12.2	1.2	2	'cdp'	ok		4.5
CEN_P1	8.0	0.7	1	'la botte, Ganesh'	ok	Liseré vert	3.5
CEN_P2	8.0	0.8	1	'D'	ok		3.0
CEN_P3	8.0	1.0	2	'cdp'	ok		3.0
CEN_P4	8.0	0.8	1	'cdp'	ok		3.0

Remarques :

- Les couronnes marquées d'un liseré vert ont une longueur de filetage inférieur aux autres. Elles sont utilisables avec le scissomètre correspondant à cette longueur de filetage : SC_B. Autrement, la tige filetée ne vient pas en buté et peut dégrader le filetage femelle lors de contrainte forte.
- Les rayons intérieurs (espace sans ailette), n'ont pas les mêmes dimensions selon les couronnes.
- Il existe deux types de filetage : un dont le pas du filet est de 1mm (type 1) et un dont le pas du filet est de 1,5mm (type 2). Il est recommandé afin de préserver le filetage du dynamomètre d'utiliser le filetage de type 2.
- Malgré le nombre important de grande couronne existante, aucune ne remplit l'ensemble des conditions nécessaire au bon usage et à la non-dégradation du dynamomètre.
- Les couronnes CEN_P2 ; CEN_M4 ; CEN_M5 ; CEN_M6 ; CEN_G6 sont à considérer comme les plus viables.