

Mesure de la surface spécifique de la neige

Champollion Nicolas



*Master Recherche Science de la Terre et de l'Environnement
Spécialité Océan Atmosphère Hydrologie - Génie de l'Environnement
Université Joseph Fourier - Grenoble*

Directeurs de Stage : **Ghislain Picard et Laurent Arnaud**

10 juin 2009

Résumé

La surface spécifique de la neige est une grandeur physique fondamentale pour la compréhension de la physique et chimie de la neige. En particulier, elle est un paramètre clé pour le calcul de l'émissivité du manteau neigeux, permettant ainsi l'interprétation correcte des données satellitaires d'observation par micro-onde passive. Plusieurs techniques existent pour la mesurer. Cependant, aucune ne permet de la mesurer avec précision, rapidité et avec une bonne résolution verticale sur une profondeur de vingt mètres. Une sonde a donc été développée au Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement (LGGE). Elle est basée sur la mesure de la réflectance de la neige dans le proche Infra-Rouge. Un algorithme de traitement des mesures de la sonde a aussi été développée afin de convertir le signal brut en surface spécifique via plusieurs étapes : calibration, correction géométrique de la mesure et conversion de l'albédo en surface spécifique. La modélisation de la mesure de la sonde a aidé au développement de cet algorithme permettant une mesure de surface spécifique de la neige avec une précision d'environ 12%. La résolution verticale est inférieure au cm et la durée de mesure est d'environ de deux heures pour un profil de surface spécifique de deux mètres de profondeur. Des campagnes de mesure dans le manteau neigeux alpin ont permis de valider la mesure de la sonde ainsi que de montrer une décroissance de la surface spécifique de la neige avec la profondeur dans le manteau neigeux alpin.

Abstract

The snow Specific Surface Area (SSA) is a key parameter for a good understanding of snow physics and chemistry. Particular, snow SSA is very important to calculate snowpacks emissivity how permit a good interpretation of satellites data with passive microwave. Some methods exist to measure this SSA. Nevertheless, any methods are accurate and quick with a high vertical resolution of twenty meters depth. So, a probe was developed at Laboratory of Glaciology and Geophysics of Environment (LGGE). This probe measured the near InfraRed reflectance of snow. A measurements processing algorithm was developed in order to drift the snow SSA with the raw data. The differents stage of the algorithm are first calibration, then measurements correction and last deduction SSA by albedo. Modélisation of the probe measure permitted to develop this processing algorithm how evaluate the snow specific surface area with an accuracy of 12%. The vertical resolution is less than one centimeter and the time to obtain a two meters depth profile is around two hours. Some days measurements in the alpine snowpacks permit to validate probe measurements and demonstrate a decrease of the SSA of the snow with the depth in the alpine snowpack.

Mots-clés

Neige, Surface spécifique, InfraRouge, Réflectance, Mesure et Modélisation

Table des matières

I	Introduction	1
I.1	Contexte général	1
I.2	Définition de la surface spécifique de la neige	2
I.3	Méthodes de mesure de la surface spécifique de la neige	2
I.4	Objectifs du stage	5
I.5	Travail réalisé	6
II	Méthodes	7
II.1	Présentation de la sonde	7
II.2	Développement d'un modèle de la mesure effectuée par la sonde	8
II.3	Présentation d'un modèle de transfert radiatif	11
II.4	Autres techniques de mesure de la surface spécifique de la neige par réflectance InfraRouge	11
III	Elaboration de l'algorithme de traitement des mesures	13
III.1	Calibration	13
III.2	Correction géométrique	14
III.3	Relation réflectance / albédo	17
III.4	Détermination de la surface spécifique de la neige	19
IV	Résultats et validation	22
IV.1	Campagnes de mesures	22
IV.2	Validation des mesures de la sonde	24
IV.3	Intercomparaison des mesures de surface spécifique de la neige	27
IV.4	Comparaison des mesures de surface spécifique de la neige entre les différents sites de mesure	28
IV.5	Les mesures de surface spécifique en regard des autres grandeurs physiques du manteau neigeux	30
V	Conclusion et perspectives	31
V.1	Conclusion	31
V.2	Perspectives du stage	31
V.3	Perspectives générales	32
	Remerciements	33
	Liste des figures	34
	Liste des tableaux	34
	Références	36
	Annexes	36
	Liste des annexes	36

I Introduction

I.1 Contexte général

L'avenir du climat de l'Antarctique et ses répercussions sur le niveau des mers sont des enjeux actuels majeurs. La télédétection par satellite permet une couverture spatiale et une résolution temporelle importante. Dans la problématique globale de l'étude du réchauffement climatique, elle est l'outil idéal pour étudier le continent Antarctique. Elle palie ainsi au manque de mesures de terrain, difficile à obtenir. Plus précisément, la télédétection spatiale par micro-onde passive permet de suivre quotidiennement des variables climatiques fondamentales, telles que la couverture de la banquise (Meier et al., 2007), la fonte sur les calottes de glace (Picard et al., 2007), la température de surface sur les continents (Mialon et al., 2007), la couverture neigeuse sur les continents (Boone et al., 2006),... Elle a donc le potentiel de nous livrer des informations précises sur des variables climatiques fondamentales du continent Antarctique. Cependant, les algorithmes de traitement actuels permettant de dériver ces paramètres manquent généralement de précision et de robustesse. C'est pourquoi, il est nécessaire de poursuivre les efforts commencés ces dernières années qui visent à mieux comprendre, mesurer et modéliser l'émissivité micro-onde de la neige, paramètre clé liant la température de brillance mesurée par satellite et la température physique de la neige. L'émissivité du manteau neigeux dépend essentiellement de la taille et de la forme des grains, de la densité et de la température de la neige. La densité et la température de la neige sont des paramètres relativement bien mesurés et modélisés. La mesure et la modélisation de l'évolution de la taille et de la forme des grains de neige sont donc les problèmes principaux. Plusieurs techniques existent pour mesurer la surface spécifique de la neige, seul paramètre quantifiable et objectif caractérisant la taille et la forme des grains de neige. Aucune cependant ne permet de mesurer des profils de vingt mètres de profondeur avec rapidité et précision. Pour cela, une nouvelle technique optique (POSSSUM : Profile Of Snow Specific Surface area) de mesure de la surface spécifique de la neige (SSA : Specific Surface Area)¹ via la réflectance InfraRouge (IR) de la neige, variable qui nous permet facilement d'en déduire la surface spécifique de la neige, a été développée au LGGE.

Par ailleurs, la SSA de la neige est une variable essentielle du manteau neigeux. En effet, elle est fortement liée à d'autres paramètres physiques de la neige comme l'adsorption de gaz et l'albédo. La SSA est sans doute le paramètre physique contribuant le plus à l'impact

¹Dans la suite du mémoire, j'emploierai l'abréviation SSA pour surface spécifique

de la neige sur le bilan énergétique de la Terre via l'albédo et à la chimie de la troposphère via l'adsorption de gaz (Domine et al., 2007).

I.2 Définition de la surface spécifique de la neige

La surface spécifique de la neige est la mesure de la surface de l'interface entre la neige et l'air. Sa définition principale est la surface des cristaux de neige disponible pour l'adsorption de gaz par unité de masse ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) (Legagneux et al., 2002). Elle vaut donc :

$$SSA = \frac{S_{glace}}{\rho_{glace} V_{neige}} \quad (1)$$

S_{glace} = surface des cristaux de neige en m^2

ρ_{glace} = masse volumique de la glace en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

V_{neige} = volume occupé par les cristaux de neige en m^3

Si l'on assimile les cristaux de neige à des sphères, alors la surface spécifique est reliée au rayon de ces sphères (m) par :

$$SSA = \frac{3}{\rho_{glace} r} \quad (2)$$

r = rayon moyen de l'ensemble des cristaux de neige assimilés à des sphères

Les cristaux de neige n'étant rigoureusement jamais des sphères, on définit le rayon effectif (m) ou rayon optique qui correspond au rayon de sphères ayant le même rapport surface / volume que les cristaux de neige (Domine et al., 2007). Sous cette hypothèse :

$$SSA = \frac{3}{\rho_{glace} r_{eff}} \quad (3)$$

I.3 Méthodes de mesure de la surface spécifique de la neige

Mesure par adsorption de méthane

Le principe de cette méthode est de mesurer l'adsorption du méthane CH_4 sur la surface de la neige (Legagneux et al., 2002). La neige placée dans un récipient vide est immergée dans de l'azote liquide (température de 77K à la pression atmosphérique). L'isotherme d'adsorption du méthane est ensuite mesurée par une méthode volumétrique (Gregg and Sing, 1982). L'analyse de cet isotherme permet ensuite d'obtenir la surface des cristaux de neige de l'échantillon, que l'on divise par la masse de celui-ci pour obtenir la SSA de la neige.

Cette technique de mesure possède comme principal avantage d'être précise et on la considère souvent comme une mesure absolue de la SSA de l'échantillon de neige prélevé. Ses inconvénients sont son temps de réalisation (environ trois heures par échantillon), le matériel nécessaire à sa réalisation (azote liquide) et une mesure ponctuelle dans le manteau neigeux.

Mesure par tomographie rayon X

Cette méthode de mesure utilise l'imagerie par rayon X pour déterminer la SSA de la neige. Des échantillons de neige sont prélevés et imprégnés au chloronaphtalène afin de conserver la microstructure de la neige. Une image en trois dimensions en niveau de gris est obtenue par mesure de l'absorption des rayons X à travers l'échantillon de neige. Les images possèdent trois niveaux de contraste associés à trois phases : la neige, le chloronaphtalène et l'air (bulles d'air n'ayant pas été imprégnée). Le traitement des images (Flin et al., 2003; Brzoska et al., 2001) permet d'obtenir une image binaire en trois dimensions de l'échantillon de la neige. La SSA de la neige est alors déterminée soit par des méthodes stéréologiques (Matzl and Schneebeli, 2006b; Kerbrat et al., 2007), soit par le calcul effectif des surfaces (Flin et al., 2004).

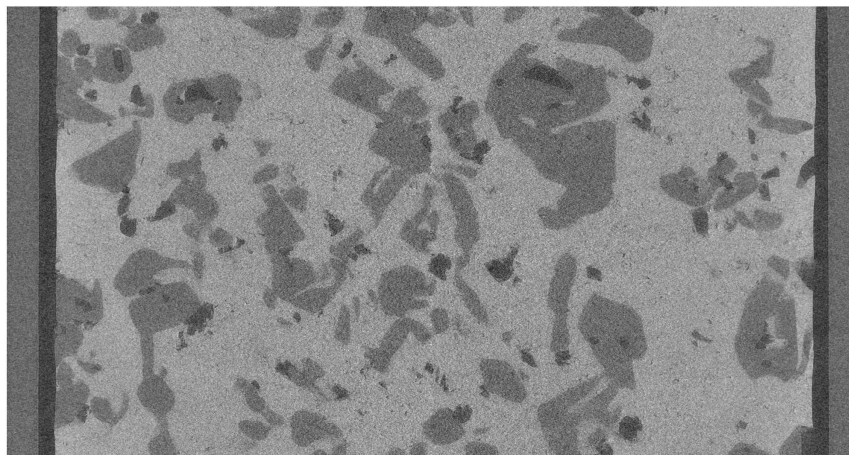


FIG. 1 – Coupe 2D d'un échantillon de neige obtenue par tomographie rayon X ; le gris foncé représente les bulles d'air, le gris moyen les cristaux de neige et le gris clair le chloronaphtalène

Le principal avantage de cette méthode est, comme pour l'adsorption de méthane, la précision et le caractère "absolu" de la mesure de la SSA de la neige. Cependant, elle est aussi longue à réaliser et ne permet que des mesures ponctuelles de SSA de la neige.

Mesure par réflectance InfraRouge

Cette méthode utilise la réflexion du rayonnement électromagnétique par la neige dans le domaine du Proche et Moyen InfraRouge (PIR et MIR entre 800 nm et 2000 nm environ). En effet, l'albédo, rapport entre l'intensité incidente et l'intensité réfléchie dans toutes les directions (Hudson et al., 2006), dépend fortement de la taille des grains et donc de la SSA dans le PIR (voir FIG : 2 et 18) (Domine et al., 2006). Il est donc possible de déterminer la SSA à partir de mesure d'albédo. Cependant, l'albédo dépend aussi de la forme des grains dans le PIR. Donc, pour une mesure parfaite d'albédo, la SSA de la neige aura une précision maximale de 20% environ, pour une variation maximale de la forme des grains de neige (Picard et al., 2008; Bänninger et al., 2008).

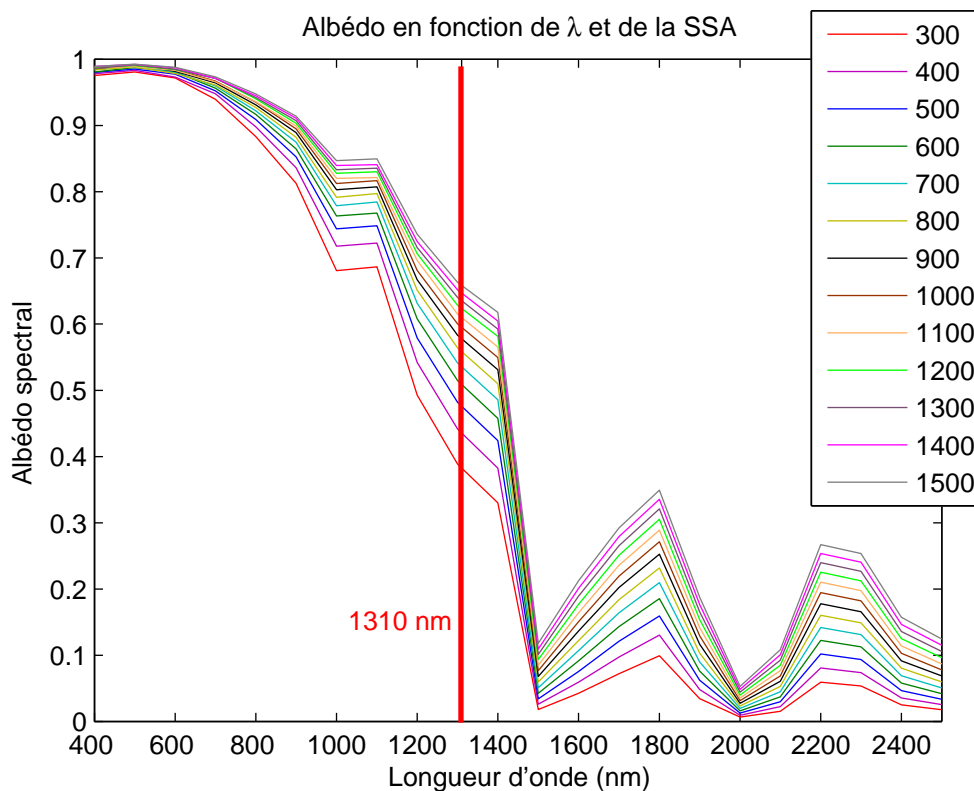


FIG. 2 – Albédo spectral en fonction de la longueur d'onde (nm) et de la SSA de la neige (cm².g⁻¹) calculé par DISORT (voir PART : II.3).

Il existe aujourd'hui plusieurs techniques opérationnelles de mesure de la SSA de la neige par réflectance IR (Gallet et al., 2009; Painter et al., 2007; Matzl and Schneebeli, 2006a). Elles présentent toutes l'avantage d'être relativement rapide mais l'inconvénient

d'une précision inférieure à celle de l'adsorption de méthane ou de la tomographie rayon X . Par ailleurs, seule la photographie IR et POSSSUM permettent d'obtenir des profils verticaux avec une résolution verticale $< 1\text{cm}$, et seul POSSSUM fournit facilement un profil de SSA quantitatif de plusieurs mètres (jusqu'à 20m). La photographie IR est aussi limitée par son protocole de mise en oeuvre et reste souvent qualitative.

I.4 Objectifs du stage

Mon stage, qui s'est déroulé au Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement (LGGE) sous la direction de Ghislain PICARD (Maître de conférence à l'Université Joseph Fourier (UJF)) et Laurent ARNAUD (Ingénieur de recherche au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)), consistait à mettre au point un algorithme de traitement de la mesure de POSSSUM afin de déterminer la SSA de la neige, de le valider sur le terrain par des campagnes de mesure et enfin de modéliser l'évolution de la surface spécifique de la neige. Les trois axes principaux de mon stage étaient donc les suivants :

1. **Un travail théorique.** Il concernait l'étude du signal, la géométrie de la sonde et la relation entre l'albédo spectral et la surface spécifique de la neige. Cet aspect théorique a servi à mettre au point le modèle de mesure.
2. **Un travail de modélisation**
 - Il était destiné à développer un modèle de la mesure de la SSA de la neige par la sonde développée au LGGE. Ce modèle a permis de comprendre le signal reçu, de comparer les mesures avec le modèle et surtout de développer l'algorithme de traitement permettant de dériver la SSA de la neige à partir de la mesure brute.
 - Il consistait aussi à la modélisation de l'évolution de la SSA de la neige. Ce travail aura l'objectif de comparer la simulation de l'évolution de la SSA de la neige avec les mesures et de comprendre les mécanismes physiques qui la font évoluer.
3. **Un travail expérimental.** Il était nécessaire d'expérimenter POSSSUM en laboratoire et sur le manteau neigeux alpin. L'objectif de ce travail expérimental était de tester la sonde, de comparer les mesures avec le modèle et enfin de comprendre l'évolution de la SSA de la neige au cours de l'année. Ce travail a aussi permis de comparer la mesure de la SSA de la neige par POSSSUM avec d'autres techniques de mesure.

I.5 Travail réalisé

Lors de mon stage, j'ai donc :

- étudié le fonctionnement de POSSSUM.
- développé un modèle de la mesure effectuée par POSSSUM.
- élaboré un algorithme de traitement des mesures de POSSSUM, principal objectif de mon stage.
- participé aux campagnes de mesure.

La structure de mon mémoire est donc organisée comme suit : en premier lieu, une partie méthode décrivant la sonde POSSSUM et la modélisation de la mesure de POSSSUM. Dans cette section, je décris aussi un modèle de transfert radiatif existant (outil nécessaire pour le développement de l'algorithme de traitement des mesures) ainsi que d'autres techniques de mesure de la SSA de la neige. Dans une seconde partie, je présente toutes les étapes de l'algorithme de traitement des mesures de POSSSUM. Dans un dernier temps, j'expose les résultats des campagnes de mesure et j'explique la validation des mesures de POSSSUM. Je présente dans cette même partie les résultats des mesures de SSA de la neige acquises par des différentes méthodes et enfin des résultats préliminaires sur la mesure d'autres grandeurs du manteau neigeux.

N'ayant pas encore eu le temps d'aborder l'aspect modélisation de l'évolution de la surface spécifique de la neige, celui-ci n'est pas abordé dans ce mémoire, mais est une perspective importante et immédiate à ce stage.

II Méthodes

II.1 Présentation de la sonde

POSSSUM est une des méthodes de mesure de la SSA qui s'appuie sur la réflectance IR. Deux faisceaux laser à 1310 nm et à 635 nm sont envoyés perpendiculairement sur le mur de neige de forme cylindrique (angle zénithal de 90°). L'intensité réfléchie est mesurée à 3 angles de vue zénithaux (60° , 40° et 20°) pour deux angles de vue azimutaux de 0° et 180° pour la longueur d'onde de 1310 nm. Pour la longueur d'onde de 635 nm, l'intensité réfléchie est mesurée à un angle de vue zénithal de 20° et un angle de vue azimutal de 0° (voir FIG : 19 et FIG : 20). Le point de convergence idéal du faisceau incident et des rayons recus par les photodiodes se situe à 13 mm du bord de la sonde. La tâche lumineuse du laser sur la surface de neige est un disque d'environ 10 mm de diamètre. L'ouverture de la fenêtre est suffisante pour que toute l'énergie du faisceau lumineux incident réfléchi arrive sur les photodiodes. L'intensité reçue par les photodiodes est convertie en mV (voir FIG : 21).

La sonde est attachée à un câble, tenu par un trépied, qui permet de la positionner au-dessus du trou de forage creusé préalablement (voir FIG : 3). Un treuil permet de descendre la sonde à une vitesse faible et si possible constante pour permettre de faire l'acquisition avec une résolution de mesure d'environ 1mm. Afin que le mur de neige se situe bien au point de convergence (à une distance de 13 mm du bord de la sonde), un aléteur a été installé en-dessous de la fenêtre de mesure. Lors de la descente de la sonde dans le trou de forage, il alèse le mur de neige afin d'obtenir une distance adéquate et une surface cylindrique de bonne qualité. Pour empêcher la sonde de bouger lors de sa descente, des patins et des lames ont été installés respectivement en bas et en haut de la sonde. Le creusement du trou de forage ainsi que la mesure avec la sonde prend environ deux heures au total pour un trou de forage de deux mètres, le plus long étant de creuser le trou proprement.

Pour convertir la mesure brute (en mV) en SSA (en $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$), plusieurs étapes sont nécessaires (voir PART : III et FIG : 4) :

- la calibration sur un réflecteur de réflectance parfaitement connue appelé spectralon.
- corriger le signal de facteur géométrique soit de manière théorique, soit de manière empirique pour obtenir une réflectance bi-conique.
- convertir la réflectance bi-conique en SSA qui peut se faire de deux façons :
 - soit de manière théorique ou grâce à la modélisation par passage de la réflectance

bi-conique à la SSA via l'albédo.

- soit de manière empirique par passage direct de la réflectance bi-conique à la SSA.



FIG. 3 – Photo du trépied et de la sonde le 11 mars 2009 au col du Lautaret

II.2 Développement d'un modèle de la mesure effectuée par la sonde

La modélisation de la mesure effectuée par POSSSUM a deux objectifs : le premier est de comprendre la physique de la mesure et de s'assurer que les mesures en laboratoire ou sur le terrain et la modélisation sont comparables ; le second étant de pouvoir convertir précisément le signal mesuré en SSA. L'intensité mesurée dépend du signal émis I_{ref} , de l'angle effectif de la photodiode de mesure θ , de l'angle d'inclinaison de l'axe de la sonde par rapport au mur de neige α , de la distance entre le bord de la sonde et le mur de neige dy et de l'albédo de la neige ω qui est relié à la SSA (tous les paramètres du modèle sont recensés dans le TAB : 1) :

$$I_{mes} = I_{ref} \omega S_{app} \Omega \quad (4)$$

$$S_{app} = S \cos \theta \quad (5)$$

$$\Omega = \int_r \frac{A}{r^2} dr = \int_{-5}^5 \int_{-5}^5 \frac{A}{f(r)^2} dx dz \quad (6)$$

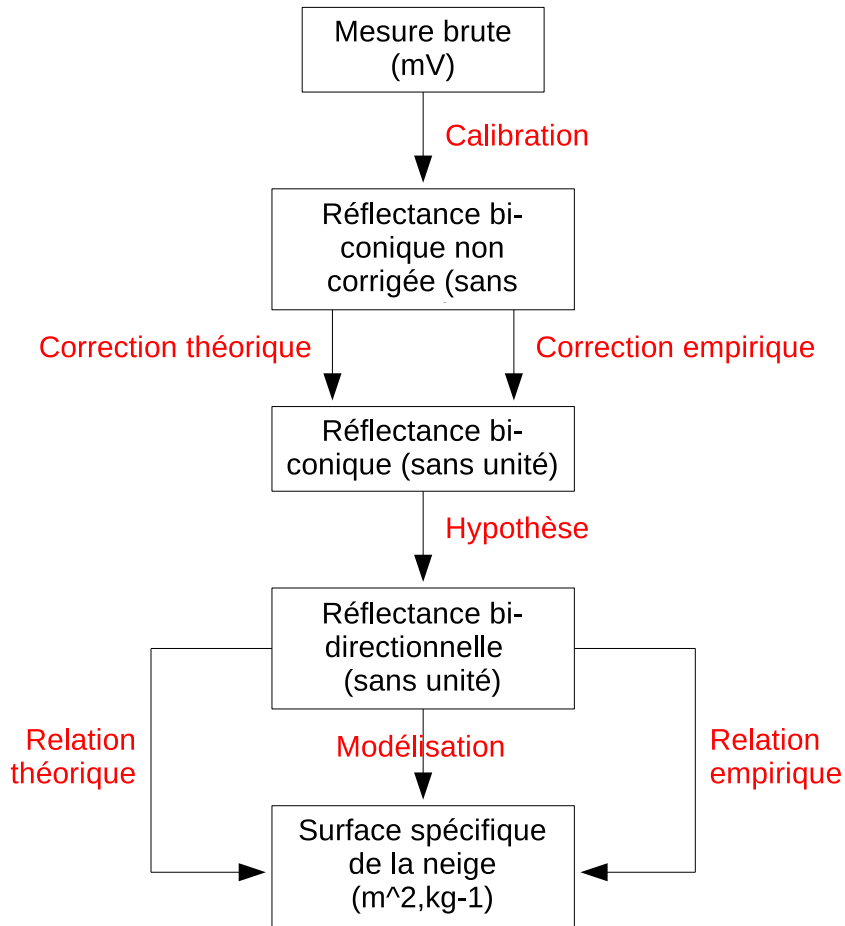


FIG. 4 – Shéma de l’algorithme de traitement des mesures brutes de POSSUM

$f(r)$ = distance r en fonction de la position x et z sur la tache lumineuse en mm

Les axes sont choisis sur la FIG : 21. L’angle d’inclinaison de la sonde s’exprime alors en fonction de dy et de L :

$$\tan \alpha = \frac{L}{dy} \quad (7)$$

Ensuite, en faisant l’approximation que la variation d’angle α change les angles des photodiodes de α , ce qui est raisonnable pour des petites variations de l’angle d’inclinaison, la distance r s’exprime en fonction de l’angle α , de l’angle θ_0 , de la distance r_0 et de la distance dy :

$$r = \sqrt{[r_0 \cos(\theta_0 - \alpha)]^2 + [r_0 \sin(\theta_0 - \alpha) - dy]^2} \quad (8)$$

La connaissance de r permet de trouver une équation reliant l’angle θ à l’angle θ_0 , à la

Symbole	Description	Valeur	Unité
I_{ref}	Intensité émise	inconnue	$mV \cdot mm^{-2} \cdot str^{-1} \cdot nm^{-1}$
I_{mes}	Intensité mesurée	variable	mV
ω	Albédo spectral	variable	sans unité
S_{app}	Surface apparente	variable	mm^2
Ω	Angle solide	variable	str^{-1}
S	Surface de la tâche lumineuse	100	mm^2
θ_0	Angles des photodiodes	-60, -40, -20, +20, +40, +60	degré
θ	Angles effectif des photodiodes	variable	degré
α_0	Angle initial d'inclinaison de la sonde	0	degré
α	Angle effectif d'inclinaison de la sonde	variable	degré
dy	Distance entre le bord de la sonde et le mur de neige	variable	mm
A	Surface de capture des photodiodes	inconnue	mm^2
r0	Distance entre la surface des photodiodes et le de convergence	60	mm
r	Distance entre la surface des photodiodes et le point d'incidence	variable	mm^2
L	Longueur de la sonde	740	mm

TAB. 1 – Tableau des différentes paramètres du modèle

distance r_0 et à la distance r :

$$\sin \theta = \frac{r_0 \sin(\theta_0 - \alpha)}{r} \quad (9)$$

Enfin, la surface apparente S_{app} et l'angle solide Ω s'exprime comme suit :

$$S_{app} = S \cos \theta \quad (10)$$

$$\Omega = \frac{10}{\sqrt{B}} \left[\arctan\left(\frac{A+5}{\sqrt{B}}\right) - \arctan\left(\frac{A-5}{\sqrt{B}}\right) \right] \quad (11)$$

$$A = r_0 \cos(90 - (\theta_0 - \alpha))$$

$$B = r_0 [\sin(90 - (\theta_0 - \alpha)) - dy]^2$$

En résumé, par une modélisation géométrique, le modèle calcule la mesure théorique en mV que mesure POSSSUM en fonction de la distance dy entre le bord de la sonde et le mur de neige, de l'angle d'inclinaison de la sonde α et de l'albédo ω de la neige, à une longueur d'onde de 1310 nm, pour la photodiode considérée.

II.3 Présentation d'un modèle de transfert radiatif

Il est possible d'établir la relation entre la Bi-directional Reflectance Distribution Function (BRDF) (Hudson et al., 2006; Painter and Dozier, 1980; Dumont et al., 2009) et la SSA de la neige grâce au modèle DISORT (Discrete Ordinate method Radiative Transfer). DISORT est un modèle de transfert radiatif développé par Stammes et al. (1988) et Wiscombe and Warren (1980) pour un milieu vertical, inhomogène, non isotherme et constitué de plan parallèle successif. Ce modèle inclus les processus physiques tels que l'émission thermique, la diffusion (simple et multiple) et l'absorption. Il doit être forcé par des radiations incidentes (parallèles ou diffuses), ainsi que par l'émission des couches constituant le milieu. Le modèle est applicable pour un rayonnement électromagnétique allant de l'UV aux ondes radar.

Appliqué au manteau neigeux dans l'IR, il détermine l'albédo spectral et la Bi-directional Reflectance Distribution Function. La BRDF est le rapport entre l'intensité incidente dans une direction (c'est-à-dire un angle zénithal et un angle azimutal) et l'intensité reçue dans une direction (c'est-à-dire un angle de vue zénithal et un angle de vue azimutal) pour une longueur d'onde déterminée et un angle solide infinitésimal. Son intégration sur la demi sphère représentant tous les angles de vue possible donne l'albédo spectral.

Plus précisément, ce modèle discrétise le manteau neigeux en un certains de nombres de couches de neige choisit initialement. Les cristaux de neige sont assimilés à des sphères (leurs rayons sont aussi rentrés initialement dans DISORT). DISORT utilise la théorie de Mie pour calculer la diffusion par la neige et il résout l'équation du transfert radiatif afin de déterminer pour chaque couche la diffusion et l'adsorption. L'équation de Planck lui permet de calculer l'émission de chaque couche. L'intégration sur la hauteur du milieu lui permet alors de calculer l'absorption, la diffusion et l'émission du manteau neigeux. L'albédo et la BRDF se calcule ensuite par le rapport entre la diffusion et l'extinction (absorption plus diffusion). Le paramètre "taille des grains" rentré initialement permet de déterminer la SSA en considérant le rapport surface sur volume constant. Le modèle calcule donc la réflectance bidirectionnelle en fonction de l'angle et de la taille des grains et l'albédo en fonction de la taille des grains.

II.4 Autres techniques de mesure de la surface spécifique de la neige par réflectance InfraRouge

Il existe trois autres méthodes opérationnelles de mesure de la SSA par réflectance IR (voir PART : I.3). Les deux méthodes, DUFISSS et photographie IR, utilisées lors des

campagnes d'intercomparaisons sont présentées.

DUFISSS : Dual Frequency Integrating Sphere for Snow SSA measurement

DUFISSS (Gallet et al., 2009) mesure la réflectance hémisphérique de la neige à 1310 nm et à 1550 nm, la courte longueur d'onde étant optimale pour des $SSA < 60m^2.kg^{-1}$ et la grande longueur d'onde pour des $SSA > 60m^2.kg^{-1}$. Afin de mesurer la réflectance hémisphérique (albédo spectral), DUFISSS utilise une sphère intégratrice collectant le rayonnement réfléchi par l'échantillon de neige dans toutes les directions. Pour des densités faibles ($< 200kg.m^3$), le signal dépend de la SSA mais aussi de la densité car l'échantillon de neige n'a pas une profondeur optique infinie et doit donc être corrigé. La calibration de la relation réflectance / SSA a été déterminée par la mesure de SSA par adsorption de méthane.

Photographie InfraRouge

La photographie IR est une méthode de mesure de la SSA de la neige basée sur la réflectance InfraRouge de la neige à 850 nm (Matzl and Schneebeli, 2006a). Un appareil photo est posé à la perpendiculaire du mur de neige. Afin d'obtenir la réflectance sur toute la hauteur du mur de neige, la luminosité doit être constante. L'image est ensuite corrigée géométriquement ce qui est fait grâce à la connaissance des dimensions du puits. Une deuxième photographie est prise en cachant le mur de neige afin de soustraire le blanc à la première photographie. Enfin, une calibration est effectuée sur des spectralons posés contre le mur de neige dont la réflectance est connue. La relation entre la réflectance et la SSA peut s'obtenir de plusieurs manières, par exemple par calibration avec des mesures tomographique ou de méthane, ou par modélisation (voir PART : III.4).

III Elaboration de l’algorithme de traitement des mesures

Le traitement des données acquises par POSSSUM nécessite deux aspects, un premier modélisation théorique et un second empirique. Dans cette partie, les deux aspects sont abordés conjointement.

III.1 Calibration

La première étape du traitement des données est la calibration, c’est-à-dire la transformation du signal brut en réflectance bi-conique non corrigée géométriquement (voir FIG : 4).

Le signal brut est dénomé par la suite $IR + \text{angle}$ de la photodiode considérée, par exemple $IR+20$ pour la photodiode ayant un angle de vue zénithal de 20 degré et un azimutal de 0 degré. La première partie de la calibration est la soustraction des blancs (la mesure des photodiodes lorsque le laser est éteint, nommé IR_0), ce qui permet de soustraire du rayonnement diffus qui aurait pénétré le manteau neigeux et atteint les photodiodes. Le signal est ensuite divisé par le cosinus de l’angle de la photodiode afin de normaliser par l’angle de vue zénithal (les signaux sont alors appelé BIR) (voir Eq : 12).

$$BIR \theta_0 = \frac{IR \theta_0 - IR_0 \theta_0}{\cos \theta_0} \quad (12)$$

$$CIR \theta_0 = C BIR \theta_0 \quad (13)$$

$$3CVI + 20 = \frac{C BVI + 20}{3} \quad (14)$$

C = coefficient de calibration (voir TAB : 2).

Photodiodes	Coefficient de calibration
BIR-60	0.00596
BIR-40	0.00609
BIR-20	0.00645
BIR+20	0.00627
BIR+40	0.00619
BIR+60	0.00611
3BVI+20	0.01162

TAB. 2 – Tableau des coefficients de calibration de POSSSUM

La dernière étape de calibration s’effectue sur des spectralons, réflecteur lambertien de réflectance connue, qui sont positionnés au point de convergence ($dy = 0$). Une rotation autour de la sonde permet de chercher le signal maximum. En effet, le signal maximum est atteint lorsque le spectralon est exactement perpendiculaire au rayon lumineux incident. La réflectance bi-conique, appelée CIR, est obtenue en multipliant le signal BIR par le coefficient de calibration (voir EQ : 13 et TAB : 2).

Voici un exemple de calibration :

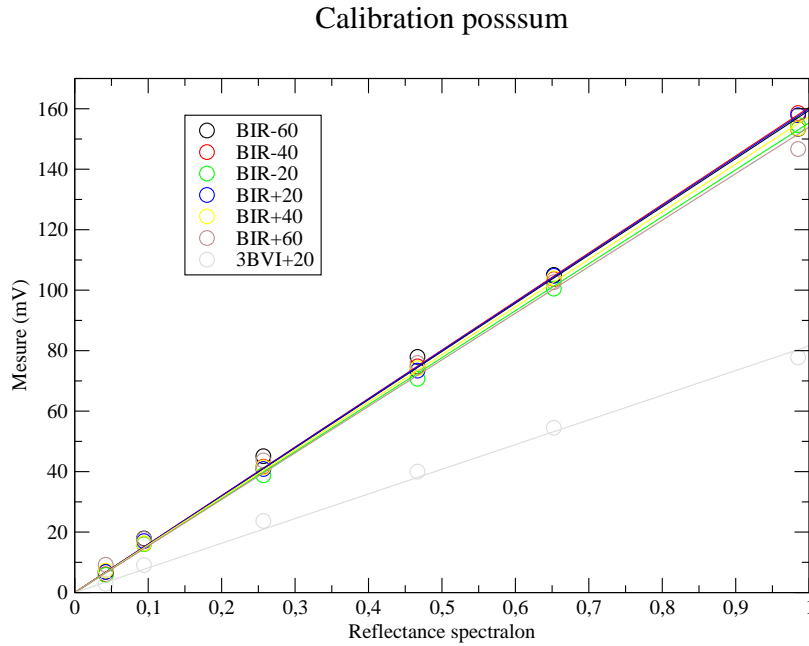


FIG. 5 – Courbe de calibration de POSSSUM

Deux points importants sont à remarquer :

- la droite de calibration est linéaire. Ceci indique l’absence de réflexion mutiple sur l’intérieur de la couronne de la sonde.
- la droite de calibration passe par l’origine. Ce point valide la courbe de calibration, un réflecteur de réflectance nulle impose un signal BIR nul.

Enfin, plusieurs calibrations ont été effectuées afin de vérifier la stabilité de la calibration en fonction du temps, en particulier lorsque la temperature varie. Les coefficients de calibration varie au maximum de 2,2%.

III.2 Correction géométrique

La deuxième étape du traitement des données brutes est la correction géométrique de la réflectance bi-conique (voir FIG : 4).

La réflectance bi-conique est indépendante de la distance auquel se fait la mesure (elle dépend uniquement des angles de visées et de vues). Or le signal CIR est modifié par la distance dy et l'angle α (qui modifie l'angle θ_0 en θ). Si le mur de neige se situe exactement au point de convergence et que l'axe vertical de la sonde est exactement parallèle au mur de neige, alors le signal CIR n'est pas modifié. Cependant, malgré les patins, les lames et l'aléreur (voir PART : II.1) pour maintenir la sonde droite ($\alpha = 0$) et à la bonne distance ($dy = 0$), il subsiste toujours une distance et un angle non nul. Le signal CIR doit donc être corrigé afin d'obtenir une véritable réflectance bi-conique.

Une variation de l'angle d'inclinaison de la sonde induit un changement de distance dy et d'angle θ pour chaque photodiode. Inversement une variation de distance implique forcément une modification de la distance dy mais aussi une modification de l'angle θ .

La moyenne entre deux photodiodes ayant un angle de vue azimutal opposé permet de compenser l'erreur induite par une variation de l'angle d'inclinaison (voir EQ : 15). En effet, le changement d'angle θ s'effectue sur les deux photodiodes opposées de manière contraire et de quasi-même amplitude. ²

$$MIR_{\theta_0} = \frac{(CIR + \theta_0) + (CIR - \theta_0)}{2} \quad (15)$$

Pour corriger l'effet de distance sur la mesure, un essai en laboratoire sur un spectralon, afin de se soustraire de la variation d'albédo, et faisant varier la distance dy de -13 mm à 13 mm, distance maximale pouvant être atteinte dans le trou de forage après alésage, a été effectué. Connaissant l'albédo ω du spectralon, ainsi que la distance dy , la variation de la mesure sur les différentes photodiodes a pu être modélisée et comparée avec celle mesurée (voir FIG : 22). La distance dy au cours du temps a été estimée par un ajustement de la courbe de la photodiode rouge par la fonction suivante :

$$dy = f(t) \quad (16)$$

$$f(r) = A \cos(Br + C) \exp(-Dr) \quad (17)$$

t = temps remplacé ici par le nombre de record r

La modélisation reproduit bien la mesure pour toutes les photodiodes. Afin de corriger l'effet de la distance sur la mesure, le signal MIR en fonction de $\frac{3CVI+20}{\omega}$ a été tracé. La division par l'albédo permet de soustraire de son effet sur la mesure. L'ajustement des courbes obtenues détermine la mesure des photodiodes en fonction de la photodiode rouge

²Dans la suite du memoire, $\theta_0 = 20, 40$ et 60 degré d'angle zenithal de vue

Comparaison modele / mesure sur spectralon

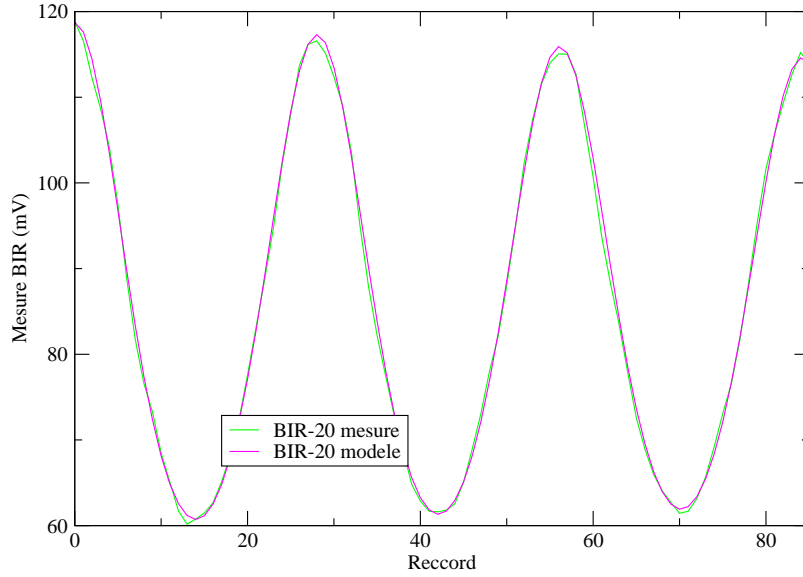


FIG. 6 – Mesure (mV) et résultat de la modélisation de la mesure (mV) sur le spectralon pour la photodiode BIR-20 (Manipulation en laboratoire le 5 février 2009)

(voir EQ : 18), c'est-à-dire la variation du signal des photodiodes en fonction de la distance dy .

$$MIR \theta_0 = f\left(\frac{3CVI + 20}{\omega}\right) \quad (18)$$

Dans un premier temps, l'hypothèse suivante est admise, à savoir que les variations de SSA ont un effet négligeable sur l'albedo dans le rouge ou en d'autres termes que la mesure dans le rouge est un bon proxy de la distance. Le signal MIR est alors corrigé de l'effet de distance par l'équation 19. La détermination du coefficient se fait pour une distance $dy = 0$. En effet :

$$RIR = \frac{Coeff \text{ MIR}}{f\left(\frac{3CVI+20}{\omega}\right)} \quad (19)$$

Si $dy = 0$ alors $RIR = MIR$

D'où $Coeff = f\left(\frac{3BVI+20_{dy=0}}{\omega}\right)$

La détermination de $f\left(\frac{3BVI+20_{dy=0}}{\omega}\right)$ permet de calculer le coefficient.

La même étude avec de la neige (en supposant un albedo de 0.8) aboutit à une correction similaire et des fonctions de corrections similaires. La figure 23 montre un exemple de correction de l'effet de distance sur la mesure. L'équation 19 permet de corriger l'effet de

Détermination fonction de correction

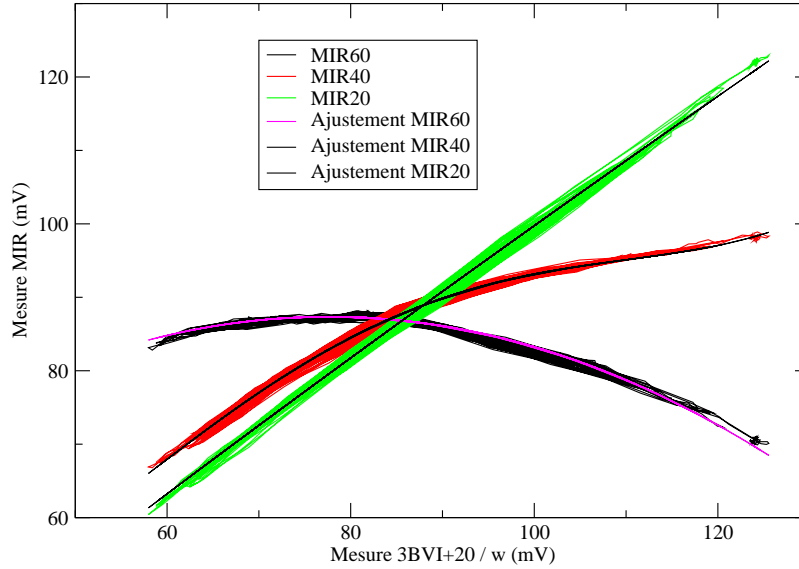


FIG. 7 – Mesure des photodiodes IR (mV) en fonction de la mesure dans le rouge (mV). Les ajustements sont satisfaisants. De plus, la dispersion observée sur la FIG : 22 est maintenant réduite

distance avec une précision inférieure à 4% pour les photodiodes ayant un angle zénithal de 20 et 40 degré.

III.3 Relation réflectance / albédo

L'étape suivante consiste à convertir la réflectance bi-conique en albédo spectral (voir FIG : 4). En premier lieu, on fait l'hypothèse que la réflectance bi-conique est égale à la réflectance bi-directionnelle (Nicodemus et al., 1977). Cette hypothèse semble raisonnable au vue de la taille de la tâche lumineuse sur la neige qui est d'environ 100 mm² (la neige peut être considérée homogène sur 1 cm²).

Deuxièmement, la réflectance³ doit être convertit en albédo. Le facteur d'anisotropie exprime la dépendance angulaire de la réflexion du rayonnement à la surface de la neige. Il est défini par (Hudson et al., 2006; Painter and Dozier, 1980) :

$$R(\theta_i, \Phi, \theta_v, \lambda) = \pi \frac{\rho(\theta_i, \Phi, \theta_v, \lambda)}{\alpha(\theta_i, \lambda)} \quad (20)$$

ρ = BRDF

ω = albédo spectral

Le modèle DISORT, décrit dans la partie II.3 permet de calculer le facteur d'anisotropie

³Dans la suite du memoire, on assimilera le terme réflectance à la réflectance bi-directionnelle

pour la configuration de POSSSUM, à savoir une incidence nadir, des angles zenithaux et azimutaux de mesure décrits dans la partie ?? et une longueur d'onde de 1310 nm (Painter and Dozier, 2004).

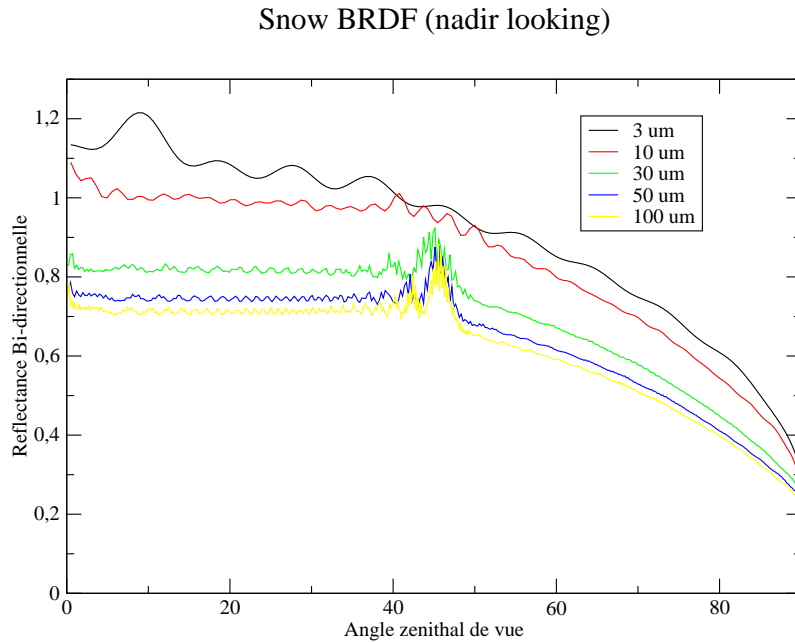


FIG. 8 – Réflectance bi-directionnelle en fonction de l’angle zénithal de vue (degré) et de la taille des grains de la neige (μm)

Le facteur d’anisotropie dépend peu de la taille des grains de neige, de la forme des grains et du contenu en impureté de ces grains à 1310 nm. En effet, les BRDF possèdent la même forme malgré des valeurs différentes. Les facteurs d’anisotropie sont, pour la configuration de POSSSUM et en supposant ces facteurs indépendants de la taille et de la forme des grains (Warren, 1982) :

- pour les diodes à 20° d’angle de vue zénithal : $R_{20} = 1.04$
- pour les diodes à 40° d’angle de vue zénithal : $R_{40} = 1.06$
- pour les diodes à 60° d’angle de vue zénithal : $R_{60} = 1.12$

L’albédo ω est alors obtenu avec l’équation suivante :

$$\omega = \frac{R_{IR\ 20} R_{20} + R_{IR\ 40} R_{40}}{2} \quad (21)$$

Les photodiodes ayant un angle zénithal de vue de 60° ne sont pas utilisés car l’étape de calibration et celle de correction géométrique sont moins satisfaisantes pour ces photodiodes.

III.4 Détermination de la surface spécifique de la neige

La dernière étape consiste à obtenir une valeur de SSA en $(m^2.kg^{-1})$ (voir FIG : 4).

Plusieurs approches sont possibles pour l'obtenir :

- par la modélisation. Le modèle DISORT calcule l'albédo spectral en fonction de la taille des cristaux de neige considérés comme des sphères. Connaissant l'albédo spectral avec les étapes précédentes, il est possible de calculer la SSA.
- par une approche théorique. Une solution analytique de l'équation du transfert radiatif donne une relation entre la taille des grains et l'albédo spectral.
- par une relation empirique. Des mesures de réflectance avec POSSSUM sur des échantillons de neige de SSA variée ont été effectuées en chambre froide par Laurent Arnaud. La SSA de ces échantillons a ensuite été mesurée par adsorption de méthane (voir PART : I.3) par Jean Charles Gallet. Il est alors possible de tracer la réflectance mesurée avec POSSSUM en fonction de la SSA, qui permet de convertir directement le signal RIR en SSA.

Détermination de la SSA avec DISORT

Les figures 18 et 2 montrent l'effet de la SSA de la neige sur l'albédo spectral pour la longueur d'onde de 1310 nm. L'équation 3 permet de déterminer la surface spécifique de la neige avec le rayon optique des cristaux de neige. L'équation suivante, déterminée avec le graphique 9, relie donc la SSA de la neige en $m^2.kg^{-1}$ à l'albédo spectral :

$$SSA = 2.9802 \exp 5.8827 \omega \quad (22)$$

Détermination théorique de la SSA

L'étude de l'équation du transfert radiatif sur la neige permet d'obtenir une équation analytique reliant la taille des grains de neige à l'albédo spectral (Kokhanovsky and Zege, 2004).

$$d = \frac{1}{\gamma b^2} \ln^2 \omega \quad (23)$$

$$d = 2 r_{eff} \quad (24)$$

$$\gamma = 4 \pi \frac{m_{im}}{\lambda} \quad (25)$$

d = diamètre des cristaux de neige assimilés à des sphères en m

b = coefficient représentant l'influence de la taille des grains sur l'absorption sans unité

Albedo / SSA par DISORT

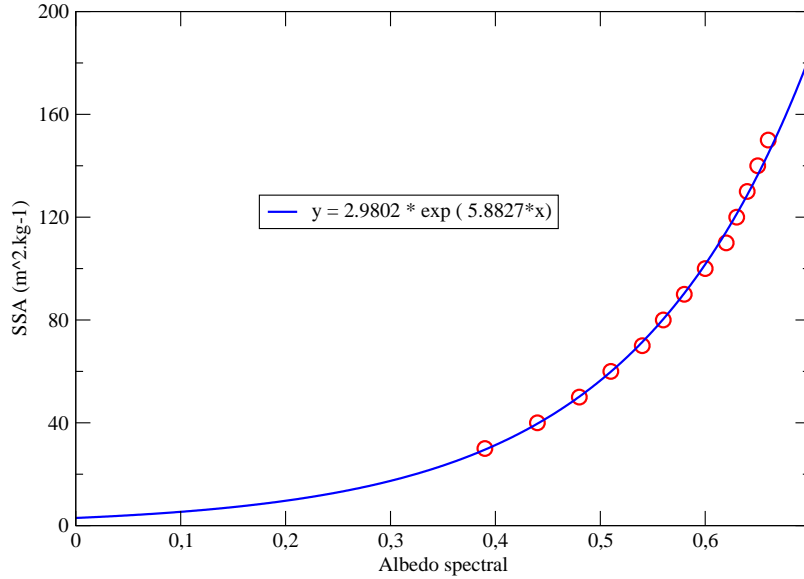


FIG. 9 – Albédo spectral en fonction de la surface spécifique de la neige pour une incidence nadir et une longueur d’onde de 1310 nm

m_{im} = partie imaginaire de l’indice de réflexion sans unité

λ = longueur d’onde en m

Les équations 23, 24 et 25 permettent de déterminer le rayon optique des cristaux de neige pour une longueur d’onde de 1310 nm, un coefficient m_{im} qui vaut $1,3 \cdot 10^{-5}$ (Warren, 1984), un coefficient b qui vaut 4.53 pour des sphères (Kokhanovsky and Zege, 2004) et le signal mesuré par POSSSUM puis convertit en albédo spectral ω avec l’équation 21. Enfin, l’équation 3 permet de calculer la surface spécifique de la neige.

Détermination empirique de la SSA

Les équations suivantes permettent alors de déterminer la SSA avec le signal RIR20 et RIR40 avec une incertitude sur l’équation 27 jusqu’à 5% :

$$RIR\ 2040 = \frac{RIR\ 20 + RIR\ 40}{2} \quad (26)$$

$$SSA = -1.59859 \cdot 10^{-8} RIR\ 2040^5 + 1.99662 \cdot 10^{-6} RIR\ 2040^4 + 0.0004 RIR\ 2040^3 - 0.008 RIR\ 2040^2 + 0.4 RIR\ 2040 \quad (27)$$

Les figures 25 et 26 représentent la réflectance mesurée par DUFISSS en fonction de celle

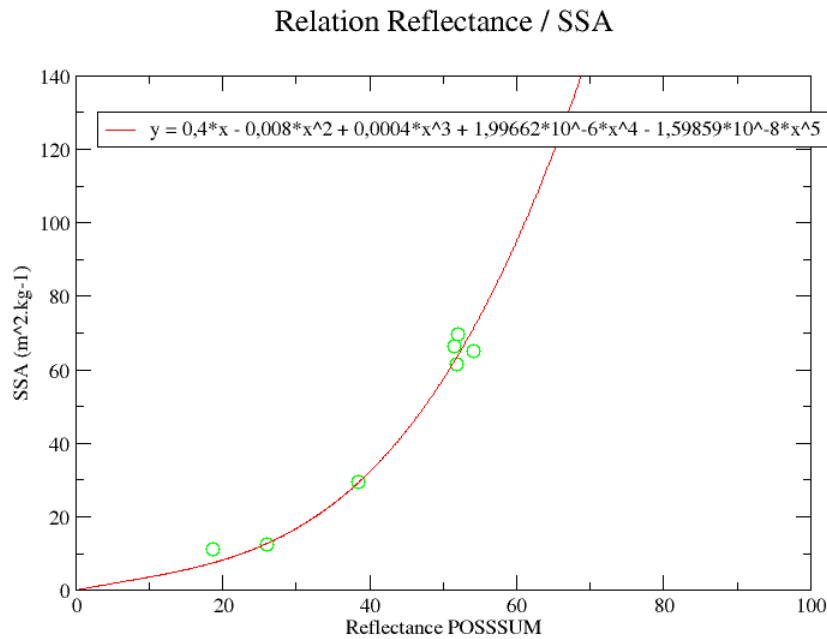


FIG. 10 – SSA mesurée au méthane ($\text{m}^2.\text{kg}^{-1}$) en fonction de la réflectance mesurée par POSSSUM (%)

mesurée par POSSSUM et la réflectance mesurée par adsorption de méthane en fonction de celle mesurée par DUFISSE respectivement. Elles permettent une autre méthode pour convertir la réflectance en SSA qui est de convertir la réflectance mesurée par POSSSUM en SSA via la réflectance DUFISSE. La comparaison entre cette façon de déterminer la SSA et avec les équations 27 montrent des résultats très proches (moins de $1 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$ en moyenne de différence relative).

En résumé, l’algorithme final (celui utilisé dans la partie suivante pour calculer la surface spécifique de la neige) est le suivant :

1. La première étape (calibration) s’effectue avec les équations 12 et 13.
2. La seconde étape (correction géométrique) avec les équations 15 et 19.
3. La dernière étape (détermination de la SSA) s’obtient avec les équations 26 et 27.

Il permet de déterminer une valeur de surface spécifique de la neige avec une erreur inférieure à **12%** (l’erreur sur la mesure est inférieure à 1%, celle sur la calibration est au maximum de 2.2%, celle sur la correction géométrique est au maximum de 4% et enfin l’incertitude sur la détermination de la SSA est de 5%).

IV Résultats et validation

IV.1 Campagnes de mesures

Des campagnes de mesure avec POSSSUM dans les Alpes et en laboratoire ont été faites lors de ce stage. Le tableau 3 résume les différentes campagnes effectuées et les missions respectives. Les objectifs globaux de toutes ces campagnes de mesure étaient les suivants :

- tester la sonde et vérifier son bon fonctionnement afin de s’assurer qu’elle puisse aller en Antarctique (voir FIG : V.3).
- comprendre le signal reçue afin de pouvoir améliorer l’algorithme de traitement des mesures.
- étudier certains paramètres de la mesure de POSSSUM comme la dérive des lasers avec la température, la variation du signal avec la distance dy , la qualité de la calibration,...
- valider les mesures de SSA avec POSSSUM.
- comparer les mesures de SSA de POSSSUM avec d’autres méthodes de mesure (DU-FISSS, adsorption de méthane, photographie IR et tomographie rayon X).
- étudier les liens entre la SSA de la neige et d’autres grandeurs physiques caractéristiques du manteau neigeux et de son évolution temporelle (stratigraphie, densité et cohésion).



FIG. 11 – Carte de localisation des sites de mesure

Date	Lieu	Objectifs	Nb de puits	Autres mesures	Remarques
2009/02/05	Laboratoire	Effet de la distance sur la mesure			Essai sur un spectralon et sur la neige
2009/03/11	Col du Lautaret	Tester la sonde	2	Densité, stratigraphie manuelle et photographie InfraRouge	
2009/03/19	Arsine	Tester la sonde et l'algorithme de traitement	2	Densité, stratigraphie manuelle, Snow-MicroPen () et photographie InfraRouge	
2009/03/25	Laboratoire	Calibration			Essai sur deux spectralons (25% et 50%)
2009/04/01	Sommet téléphérique de La Grave	Comparaison de différentes techniques de mesure de la SSA	3	Densité, stratigraphie manuelle, photographie InfraRouge, DUFISSS et méthane	
2009/04/09	Glacier d'Argentière	Comparaison POSSSUM et prévision CROCUS	2	Densité, stratigraphie manuelle, photographie InfraRouge et DUFISSS	
2009/04/17	Sommet téléphérique de La Grave	Comparaison de différentes techniques de mesure de la SSA	2	Densité, stratigraphie manuelle, photographie InfraRouge, DUFISSS, tomographie rayon X et méthane	
2009/04/22	Laboratoire	Calibration			
2009/05/04	Laboratoire	Calibration			
2009/05/26	Laboratoire	Comparaison POSSSUM, DUFISSS et méthane et avec deux manipulations de La Grave		DUFISSS et méthane	

TAB. 3 – Tableau des différentes campagnes de mesure de POSSSUM

IV.2 Validation des mesures de la sonde

La partie II et III ont permis d'obtenir des profils de SSA de la neige. Afin de pouvoir étudier les processus physiques affectant la SSA de la neige, les mesures doivent être validées. Pour cela, deux méthodes ont été exploitées : la première consiste à étudier la reproductibilité de la mesure de POSSSUM ; la seconde consiste à comparer la mesure de POSSSUM avec d'autres techniques de mesure de la SSA de la neige (voir PART : IV.3).

Dans un premier temps, pour étudier la reproductibilité de la mesure de la sonde, la SSA de la neige a été mesurée à la descente et à la montée du passage de la sonde pour chaque trou de forage. Les figures 12 et 13 montrent la mesure de POSSSUM de deux passages (un passage étant une descente et une montée) du même trou de forage à La Grave 17 avril 2009.

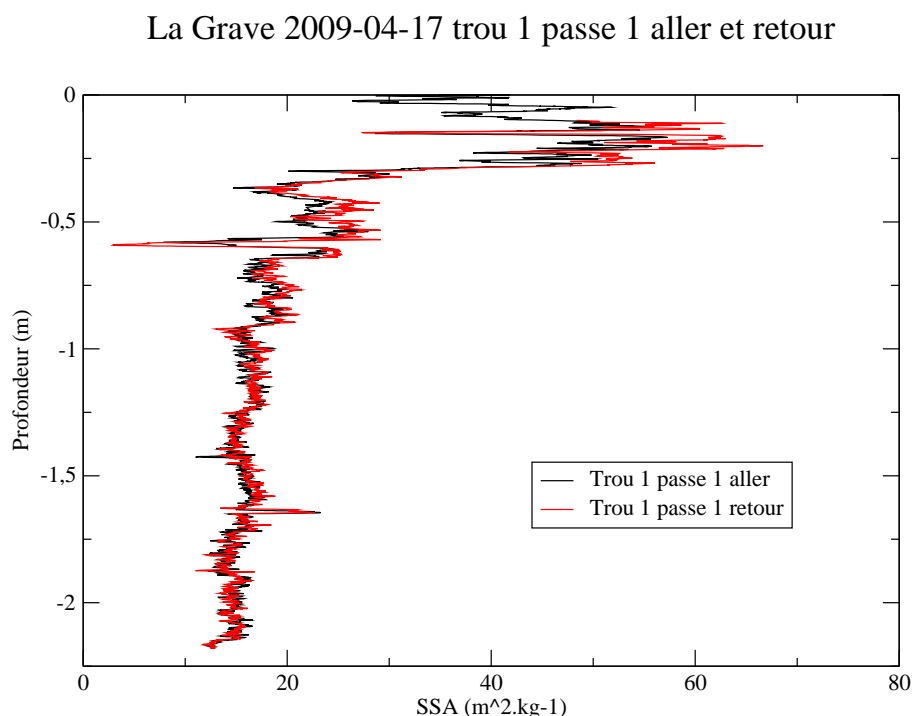


FIG. 12 – Profil de SSA à la Grave le 17 avril 2009 à l'aller et au retour pour le premier passage

Plusieurs commentaires peuvent être faits sur ces profils ainsi que sur ceux en annexe 27. Ces commentaires sont semblables pour les autres profils obtenus non présentés dans ce mémoire. Les valeurs de SSA à l'aller et au retour sont très proches, montrant une bonne reproductibilité des mesures de POSSSUM. Cependant certains points sont à discuter :

La mesure lors du retour est légèrement supérieure à celle de l'aller, et cela sur les deux passages, bien que cette différence soit beaucoup plus marquée sur le deuxième passage.

La Grave 2009-04-17 trou 1 passe 2 aller et retour

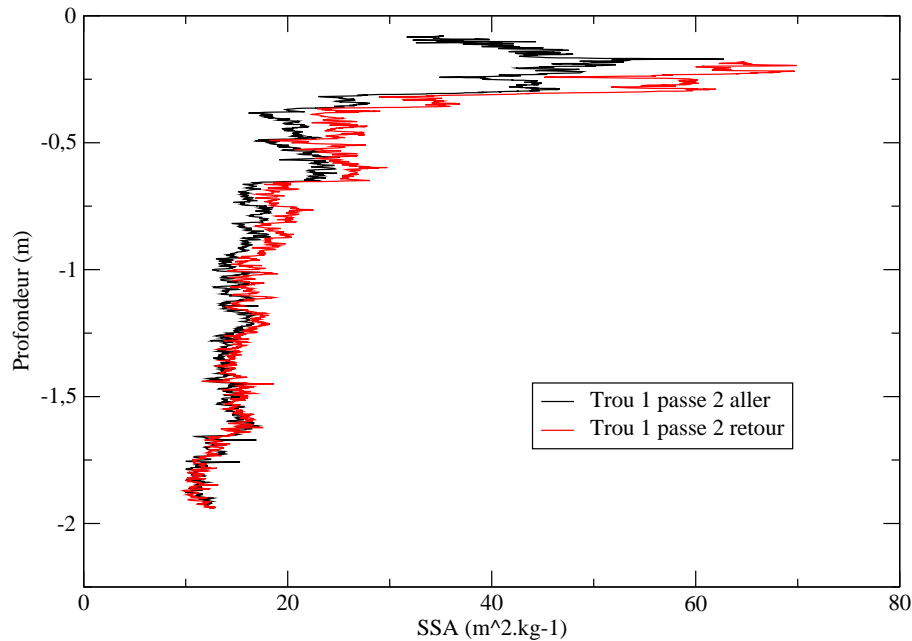


FIG. 13 – Profil de SSA à la Grave le 17 avril 2009 à l’aller et au retour pour le second passage

Malgré cette différence entre l’aller et le retour, les variations de SSA sont identiques pour l’aller et le retour et pour les deux passages. Cette différence peut être expliquée par la qualité du trou de forage et par l’alésage. En effet, le retour s’effectue sur un puits déjà alésé et donc élargit, entraînant une distance dy plus importante. Cette distance est d’autant plus grande que l’on se rapproche de la surface car le creusement du trou de forage entraîne un élargissement du haut du trou. De plus, les lames sortent du trou de forage avant la fenêtre de la sonde qui effectue la mesure quand celle-ci arrive en surface, entraînant un moins bon maintien de la sonde à la bonne distance de mesure. Bien que l’effet de distance soit corrigé (voir PART : ??), cette correction est valable seulement dans une certaines gammes de distance (dy entre -13 mm et 13 mm). Il est donc probable que dans ce cas la distance dy dépasse la gamme de correction possible, et la mesure est donc plus élevée lors du retour. Le deuxième passage mesurant des valeurs encore plus élevées confirme cette hypothèse (en effet il y a encore alésage lors du deuxième passage).

La mesure de deux passages dans le même trou est toujours semblable. Certaines différences peuvent aussi être remarquées (voir FIG : 14) :

1. La mesure sur le deuxième passage est légèrement supérieure en surface à celle du premier passage.

La Grave 2009-04-17 trou 1 passe 1 et 2

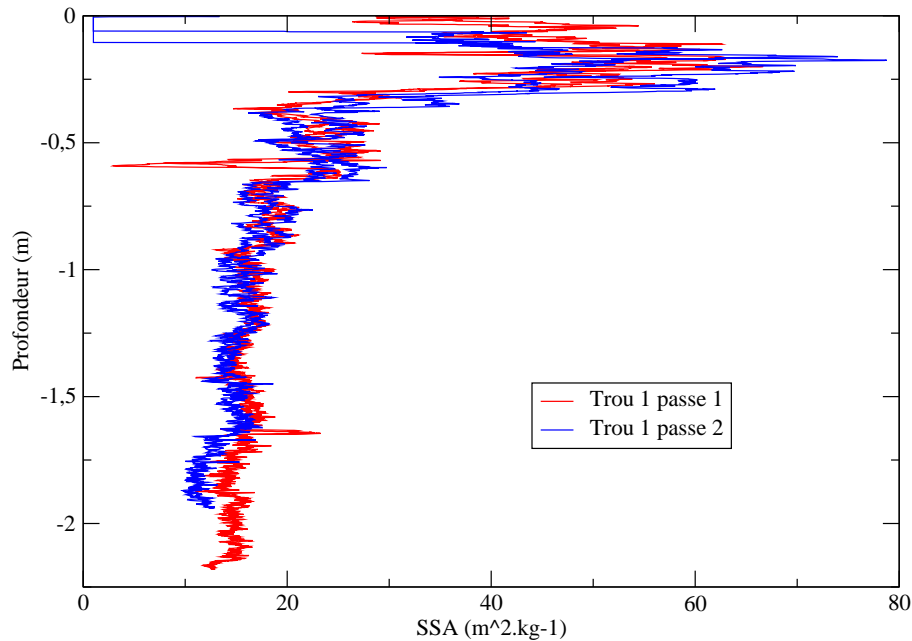


FIG. 14 – Profil de SSA à La Grave le 17 avril 2009 pour deux passages différents du même trou de forage

2. La mesure sur le deuxième passage est légèrement plus faible en profondeur à celle du premier passage. Cette différence est aussi visible sur la figure 28.
3. Aux alentours de 0.6 m de profondeur, une baisse brutale de SSA est observée sur le premier passage mais pas sur le second. Ces pics sont aussi observés sur la figure 28 ainsi que sur d'autres profils non présentés dans ce mémoire.

Le point trois s'explique par le fait que le manteau neigeux n'est pas homogène horizontalement dans les alpes (passage de skieur, vent,...), et induit donc des changements brutaux de SSA. Par exemple pour la figure 14, une couche de glace discontinue avait été observée sur le terrain à cette profondeur, ce qui explique une SSA très faible. L'explication du premier point (s'il est confirmé par d'autres profils) est identique à l'explication de la différence entre l'aller et le retour d'un même passage. Enfin le troisième point s'explique sans doute différemment. Le temps d'effectuer le deuxième passage, de l'air descend dans le trou de forage qui réchauffe le mur neige. La taille de grains augmente alors rapidement diminuant ainsi la SSA.

De manière générale, la mesure de la SSA avec POSSSUM est bien reproductible (moins de 4% de d'écart entre l'aller et le retour pour les premiers passages et moins de 15% d'écart pour les deuxièmes passages), validant ainsi les mesures.

IV.3 Intercomparaison des mesures de surface spécifique de la neige

Afin d'avoir une mesure de SSA plus précise, une moyenne glissante sur cinq mesures consécutives est effectuée qui permet de se soustraire des effets de forme et d'orientation des cristaux ainsi que des trous millimétriques à la surface du mur de neige (la mesure de la SSA possède alors une résolution verticale de l'ordre du cm, vu que l'acquisition s'effectue tous les mm ou deux mm en fonction de la vitesse de descente de la sonde). Lors des deux journées de mesure de La Grave, des mesures de SSA de la neige ont été effectuées avec DUFISSS (Florent Dominé) et POSSSUM, par photographie IR (Laurent Arnaud), par tomographie rayon X (CEN) et par adsorption de méthane (Florent Dominé). Les résultats de la tomographie sont encore en cours de traitement par le CEN.

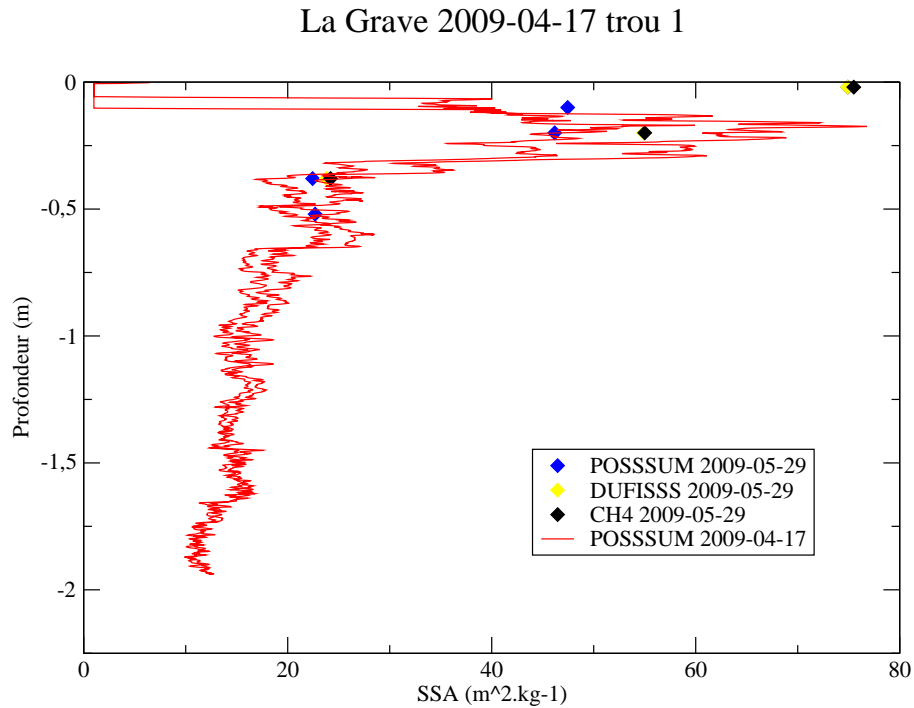


FIG. 15 – Profil de SSA de La Grave le premier avril 2009 ; en rouge mesures de POSSSUM le jour même ; en bleu mesures de POSSSUM en laboratoire sur des échantillons prélevés à La Grave ; en jaune mesures de DUFISSS en laboratoire sur les mêmes échantillons que pour les mesures de POSSSUM ; en noir mesures par adsorption de méthane toujours sur les mêmes échantillons. Le premier point de POSSSUM le 5 juin 2009 est confondu avec celui de DUFISSS

De manière générale, les mesures de SSA de la neige par les différentes techniques sont semblables et montrent une décroissance de la SSA avec la profondeur. Certains différences sont par contre marquée : une différence entre les mesures de POSSSUM et celle de DUFISSS / méthane (voir FIG : 15) ; des valeurs plus élevées de SSA pour les mesures de POSSSUM en laboratoire que pour les mesures sur le terrain (voir FIG : 24). La

différence dans les premiers cm entre la mesure de POSSSUM sur le terrain et en laboratoire POSSSUM / DUFISSS / méthane est due à une mauvaise mesure sur le terrain (la lumière pénétrant les photodiodes étant trop importante, l'enregistrement des blancs entraînant des valeurs NotANumber (NaN)). Malgré des importantes différences, les mesures de SSA de la neige de POSSSUM semble cohérente mais nécessite une étude plus approfondie.

IV.4 Comparaison des mesures de surface spécifique de la neige entre les différents sites de mesure

Avant de comparer les mesures de POSSSUM effectuées sur différents sites, les mesures effectuées sur le même site mais dans deux trous de forage différents sont comparés. La figure suivante représente deux profils verticaux de surface spécifique à La Grave le 17 avril 2009.

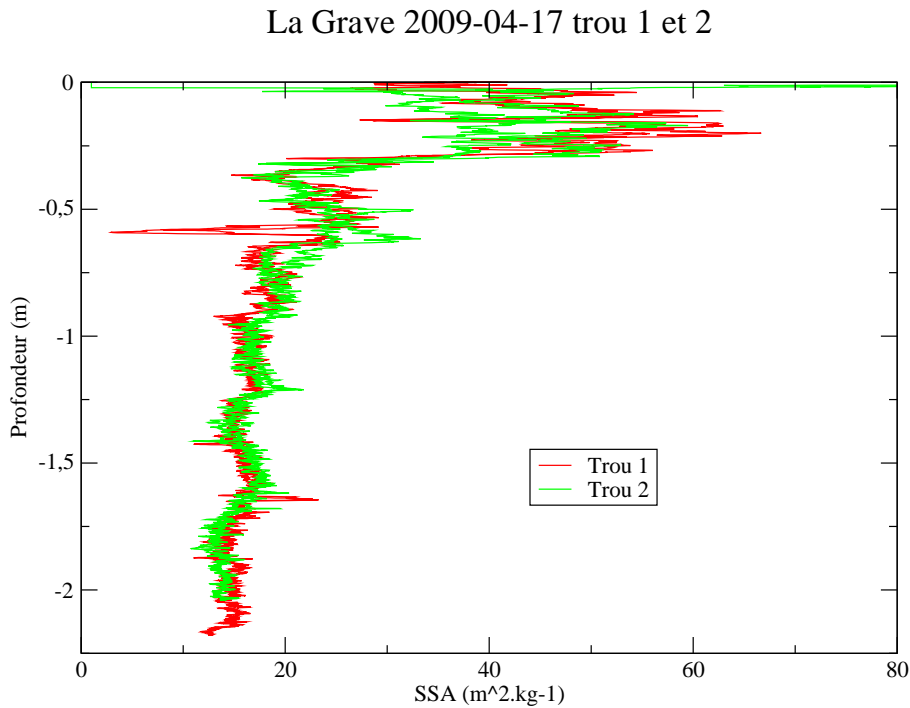


FIG. 16 – Profil de SSA de La Grave le 17 avril 2009 pour deux puits différents

Les sites d'Arsine et de La Grave le premier avril 2009 sont mis en annexes (voir FIG : 29). Globalement la tendance est respectée entre deux trous de forage du même site. Cependant, certaines couches de neige n'apparaissent pas dans tous les puits, ce qui montre une couche de neige discontinue et donc un manteau neigeux hétérogène horizontalement. Une forte différence de SSA entre les deux trous de La Grave le premier avril 2009 est

observée, montrant une hétérogénéité horizontale du manteau neigeux pour l'ensemble de sa hauteur. Le passage de skieur a pu modifier la structure des couches de neige sur une grande profondeur et cela sur une courte distance. Enfin, le deuxième trou d'Arsine a toujours des SSA de la neige inférieures à celle du premier trou. Le puits 2 était touché par le soleil beaucoup plus et plus longtemps que le puits 1 qui se trouvait sous une falaise. Le soleil aura donc accéléré le métamorphisme des cristaux de neige du puits 2, favorisant ainsi la croissance des cristaux de neige et donc augmentant la taille des grains, qui va de paire avec une diminution de la SSA.

Les trois graphiques suivants sont des profils de SSA pour des sites différents.

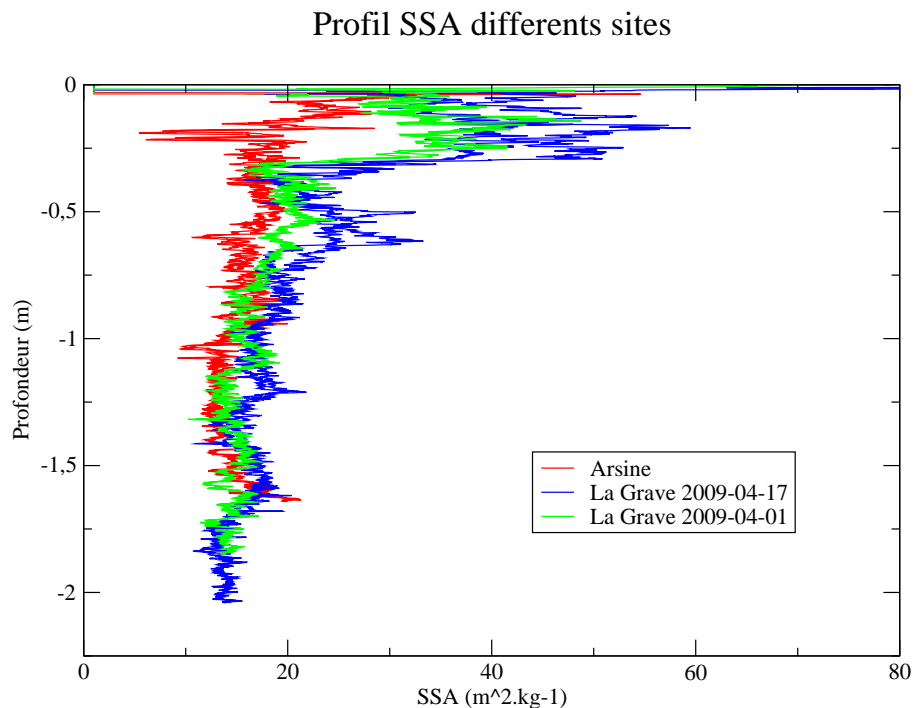


FIG. 17 – Profil de SSA au site d'Arsine, de La Grave le premier avril 2009 et le 17 avril 2009

Pour tous les sites de mesure, une décroissance de la surface spécifique de la neige avec la profondeur dans le manteau neigeux est mesurée, ce qui est attendu car le métamorphisme en milieu alpin a tendance à faire diminuer la SSA de la neige. Deuxièmement, la SSA semble plus élevée pour les deux mesures effectuées à La Grave (moins net pour le premier avril). Une tentative d'explication serait que les sites d'altitude et donc le manteau neigeux d'altitude possède une SSA plus forte à cause d'une température plus faible durant le printemps. En effet, le paramètre principal de l'évolution du manteau neigeux est le gradient de température. Celui-ci est contrôlé par la température de l'air (la tem-

pérature du sol est proche de zéro) et moins par le rayonnement solaire direct, bien que celui-ci soit plus fort en altitude, à cause du fort albédo de la neige. Au printemps donc, les températures en altitude sont proches de zéro degré d'où un métamorphisme lent en altitude et plus rapide en basse altitude où les températures sont supérieures. La taille des grains augmentent donc plus en basse altitude, d'où une SSA plus élevée à La Grave que à Arsine. Il serait intéressant de regarder ce que prévoit CROCUS, le modèle d'évolution du manteau neigeux pour vérifier cette explication. Enfin, les profils montrent l'évolution de la couche de 30 cm de surface de la manipulation de La Grave du 1^{er} avril. En effet, on observe une couche d'environ 30 cm dans le profil de La Grave du 17 avril qui possède une SSA légèrement plus faible entre -0.3 et -0.6 m de profondeur, due au métamorphisme augmentant la taille des grains. Ceci est de plus compatible avec la météorologie de cette période ainsi qu'avec la couche de neige fraîche de 30 cm tombée la veille de notre journée de terrain, montrant une SSA élevée.

IV.5 Les mesures de surface spécifique en regard des autres grandeurs physiques du manteau neigeux

La figure 30 représente en fonction de la profondeur, la stratigraphie visuelle, la cohésion du manteau neigeux représentée par la force de pénétration mesurée avec un SnowMicroPen (SMP) (Schneebeil and Johnson, 1998), la SSA avec POSSSUM, et la densité. Seul le site d'Argentière est présenté ici car une station météorologique est installée à l'endroit de notre site de mesure, permettant ainsi de modéliser l'évolution du manteau neigeux avec CROCUS pendant cet hiver 2008/2009 et comparer ainsi nos mesures avec les prévisions du modèle.

L'interprétation de ces profils s'avèrent complexe et les liens entre les différentes variables ne sont pas évidents. Au premier ordre, on observe quand même une très forte augmentation de la force de pénétration au changement de couche ainsi que diminution brutale de la SSA de la neige. Par ailleurs les chutes brutales de SSA semble se produire avec une forte densité (à -0.4m, -0.65m et -0.75m). Ces couches peuvent être des croute de regel qui possèdent une forte cohésion et une densité élevée. Cependant la couche à -0.15m de profondeur possède les caractéristiques inverses (une forte SSA et une faible densité). Enfin, on observe une augmentation de la densité et une homogénéisation du manteau neigeux avec la profondeur.

V Conclusion et perspectives

V.1 Conclusion

En conclusion, POSSSUM permet la mesure rapide de profils verticaux de surface spécifique de la neige avec une précision de 12% environ et une haute résolution verticale (environ 1 cm). Pour cela, un modèle de la mesure effectuée par POSSSUM a été développé afin de comprendre le signal reçu. Un algorithme de traitement a ensuite été mis au point pour déterminer la surface spécifique de la neige à partir de la mesure brute de POSSSUM. Les différentes étapes de la chaîne de traitement sont la calibration, la correction de la mesure et la conversion de l'albédo en SSA (FIG : 4). Des campagnes de mesure ont montré la reproductibilité de la mesure de la sonde et ont permis de comparer sa mesure avec celle de d'autres techniques existantes. La différence entre la mesure de POSSSUM et la mesure par adsorption de méthane est variable (entre 20% et moins de 1%). Enfin, l'analyse des profils de SSA de la neige a montré une décroissance de celle-ci avec la profondeur dans le manteau neigeux alpin.

V.2 Perspectives du stage

Plusieurs points sont encore à développer :

- améliorer l'algorithme de traitement des mesures de POSSSUM :
 - même si les variations de la calibration entre deux manipulations sont faibles, il serait intéressant de calibrer la mesure à chaque manipulation afin de se soustraire de la dérive des instruments avec la température.
 - ensuite, la correction pourrait se faire avec des photodiodes rouges placées aux mêmes angles que les photodiodes InfraRouge.
 - effectuer la moyenne entre l'aller et le retour d'une même passe afin de minimiser le bruit et les erreurs de mesure.
 - enfin, effectuer une itération sur la correction avec la photodiode rouge, c'est-à-dire, après la première détermination de la SSA de la neige, recalculer l'albédo de la neige pour le rouge (choisit à 0.8 par hypothèse) pour corriger à nouveau le signal calibré et ainsi de suite.
- étudier l'influence de la forme des grains sur la mesure de POSSSUM. La mesure par tomographie rayon X ainsi que la modélisation par "Ray Tracing" (Picard et al., 2008) permettrait d'étudier cet effet.
- étudier en détails la comparaison entre les mesures de POSSSUM, de DUFISSS et

par adsorption de méthane afin de comprendre les différences mis en évidence.

- analyser plusieurs profils montrant les différentes grandeurs physiques du manteau neigeux pour tenter de comprendre les liens entre elles et les mécanismes physiques de leur évolutions.
- enfin modéliser l'évolution de la surface spécifique de la neige au cours du temps. Pour cela, il serait possible d'utiliser CROCUS, modèle d'évolution du manteau neigeux développé au Centre d'Etude de la Neige (CEN) de Grenoble dans les années 1990, qui simule la taille des grains de neige à partir des données météorologiques. CROCUS modélise les processus de métamorphisme du manteau neigeux mais la description géométrique de sa structure ne se fait pas avec un paramètre quantitatif. Il serait donc intéressant de comparer les mesures de POSSSUM avec les résultats de CROCUS afin de mieux comprendre le métamorphisme du manteau neigeux. Cela permettrait aussi d'améliorer CROCUS en incorporant une description explicite de la structure de la neige avec la surface spécifique.

V.3 Perspectives générales

De manière plus générale, les mesures de POSSSUM vont permettre des avancées dans la compréhension et la modélisation du signal micro-onde en Antarctique. La modélisation de l'émissivité du manteau neigeux (voir PART : I.1) sera alors plus précise. L'estimation de paramètres climatiques par le signal micro-onde gagnera alors en précision, entraînant une amélioration de la qualité des modèles globaux de climat par une comparaison de leurs résultats avec des mesures plus précises.

Par ailleurs, les mesures de chimie pourront être comparer avec des meilleures modélisations de la concentration des espèces chimique de la neige. En effet, comme la dépendance de la concentration d'espèce chimique dans le manteau neigeux à la SSA est grande, des mesures plus précises de SSA de la neige permettront de mieux comprendre les interactions neige / air et la chimie dans le manteu neigeux, améliorant la modélisation de la chimie de la neige et la prévision des concentrations d'espèces chimiques.

Remerciements

Pour clore ce mémoire, je souhaite adresser ici tous mes remerciements aux personnes qui m’ont apporté leur aide et qui ont ainsi contribué à l’élaboration de ce mémoire.

Tout d’abord, Ghislain Picard, directeur de stage, pour l’aide et le temps qu’il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n’aurait jamais vu le jour.

Ensuite, je remercie sincèrement Laurent Arnaud pour sa collaboration sans qui je n’aurais pu mener à bien ce stage.

J’exprime aussi ma gratitude à Ludovic Brucker, Jean-Charles Gallet, Samuel Morin, Florent Dominé, Marie Dumont, Romain Dufil et Delphine Six pour leur participations aux campagnes de mesure et leur précieuses aides.

Enfin, j’adresse de chaleureux remerciements à ma compagne, à tous mes proches et amis qui m’ont accompagné au cours de ce stage et de la réalisation de ce mémoire. Une pensée particulière pour les travailleurs et travailleuses assidus de la salle stagiaire ainsi que pour l’équipe de football “victorieuse” du LGGE.

Liste des figures

1	Coupe 2D d’un échantillon de neige obtenue par tomographie rayon X	3
2	Albédo spectral en fonction de la longueur d’onde (nm) et de la SSA de la neige ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) calculé par DISORT (voir PART : II.3).	4
3	Photo du trépied et de la sonde le 11 mars 2009 au col du Lautaret	8
4	Shéma de l’algorithme de traitement des mesures brutes de POSSSUM	9
5	Courbe de calibration de POSSSUM	14
6	Mesure (mV) et résultat de la modélisation de la mesure (mV) sur le spectralon pour la photodiode BIR-20 (Manipulation en laboratoire le 5 février 2009)	16
7	Détermination des fonctions de correction	17
8	Réflectance bi-directionnelle en fonction de l’angle zénithal de vue (degré) et de la taille des grains de la neige (μm)	18
9	Albédo spectral en fonction de la surface spécifique de la neige pour une incidence nadir et une longueur d’onde de 1310 nm	20
10	SSA mesurée au méthane ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) en fonction de la réflectance mesurée par POSSSUM (%)	21
11	Carte de localisation des sites de mesure	22
12	Profil de SSA à la Grave le 17 avril 2009 à l’aller et au retour pour le premier passage . .	24
13	Profil de SSA à la Grave le 17 avril 2009 à l’aller et au retour pour le second passage . .	25
14	Profil de SSA à La Grave le 17 avril 2009 pour deux passages différents du même trou de forage	26
15	Profil de SSA de La Grave le 17 avril 2009	27
16	Profil de SSA de La Grave le 17 avril 2009 pour deux puits différents	28
17	Profil de SSA au site d’Arsine, de La Grave le premier avril 2009 et le 17 avril 2009 . . .	29

Liste des tableaux

1	Tableau des différentes paramètres du modèle	10
2	Tableau des coefficients de calibration de POSSSUM	13
3	Tableau des différentes campagnes de mesure de POSSSUM	23

Références

- Boone, A., Mognard, N., Decharme, B., Douville, H., Grippa, M., and Kerrigan, K. (2006). The impact of simulated soil temperatures on the estimation of snow depth over siberia from ssm/i compared to a multi-model climatology. *Remote Sensing of Environment*, 101 : 482–494.
- Brzoska, J., Flin, F., Lesaffre, B., Coléou, C., Lamboley, P., Delesse, J., Le Saëc, B., and Vignoles, G. (2001). Computation of the surface area of natural snow 3d images from x-ray tomography : two approaches. *Image Anal Stereol*, 20 : 306–312.
- Bänninger, D., Bourgeois, C., Matzt, M., and Schneebeli, M. (2008). Reflectance modeling for real snow structures using a beam tracing model. *Sensors*, 8 : 3482–3496.
- Domine, F., Albert, M., Hutwelker, T., Jacobi, H.-W., Kokhanovsky, A., Lehning, M., Picard, G., and Simpson, W. (2007). Snow physics as relevant to snow chemistry. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 7 : 5941–6036.
- Domine, F., Salvatori, R., Legagneux, L., Salzano, R., Fily, M., and Casacchia, R. (2006). Correlation between the specific surface area and the short wave infrared SWIR reflectance of snow. *Cold Regions Science and Technology*, 46 : 60–68.
- Dumont, M., Brissaud, O., Picard, G., Schmitt, B., Gallet, J., and Arnaud, Y. (2009). High-accuracy measurements of snow bidirectional reflectance distribution function at visible and nir wavelengths ; comparison with modelling results. *Journal of Geophysical Research*, In press.
- Flin, F., Brzoska, J., Lesaffre, B., Coléou, C., and Pieritz, R. (2003). Full three-dimensional modelling of curvature-dependent snow metamorphism : first results and comparison with experimental tomographic data. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 36 : 1–6.
- Flin, F., Brzoska, J., Lesaffre, B., Coléou, C., and Pieritz, R. (2004). Three-dimensional geometric measurements of snow microstructural evolution under isothermal conditions. *Annals of Glaciology*, 38 : 39–44.
- Gallet, J., Domine, F., Zender, C., and Picard, G. (2009). Measurement of the specific surface area of snow in the field using infrared reflectance at 1310 nm and 1550 nm. *The Cryosphere Discussion*, 3 : 33–75.
- Gregg, S. and Sing, K. (1982). Adsorption, surface area and porosity. *Academic*, New York.
- Hudson, S., Warren, S., Brandt, R., Grenfell, T., and Six, D. (2006). Spectral bidirectional reflectance of antarctic snow : Measurements and parametrization. *Journal of Geophysical Research*, 111(D18) : 106.
- Kerbrat, M., B., P., Huthwelker, T., Gäggeler, H., Ammann, M., and Schneebeli, M. (2007). Measuring the specific surface area of snow with x-ray tomography and gas adsorption : comparison and implications for surface smoothness. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 7 : 10287–10322.
- Kokhanovsky, A. and Zege, E. (2004). Scattering optics of snow. *Applied Optics*, 43 : 1589–1602.
- Legagneux, L., Cabanes, A., and Domine, F. (2002). Measurement of the specific surface area of 176 snow samples using methane adsorption at 77k. *Journal of Geophysical Research*, 107(D17) : 4335.

- Matzl, M. and Schneebeli, M. (2006a). Measuring specific surface area of snow by near-infrared photography. *Journal of Glaciology*, 52(179) : 558–564.
- Matzl, M. and Schneebeli, M. (2006b). Stereological measurement of the specific surface area of snow. *Journal of Microscopy*, page .
- Meier, W., Stroeve, J., and Fetterer, F. (2007). Whither arctic sea ice? a clear signal of decline regionally, seasonally and extending beyond the satellite record. *Annals of Glaciology*, 46.
- Mialon, A., Royer, A., Fily, M., and Picard, G. (2007). Daily microwave-derived surface temperature over canada / alaska. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46 : 591–604.
- Nicodemus, F., Richmond, J., Hsia, J., Ginsberg, I., and Limperis, T. (1977). Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. *National Bureau of Standards*, page .
- Painter, P. and Dozier, J. (2004). The effect of anisotropic reflectance on imaging spectroscopy of snow properties. *Remote Sensing of Environment*, 89 : 409–422.
- Painter, T. and Dozier, J. (1980). Measurements of the hemispherical-directional reflectance of snow at fine spectral and angular resolution. *Journal of Geophysical Research*, 109(D18) : 115.
- Painter, T., Molotch, N., Cassidy, M., Flanner, M., and Steffen, K. (2007). Contact spectroscopy for determination of stratigraphy of snow optical grain size. *Journal of Glaciology*, 53(180) : 121–127.
- Picard, G., Arnaud, L., Domine, F., and Fily, M. (2008). Determining snow specific surface area from near-infrared measurements : numerical study of the influence of grain shape. *Cold Region Science and Technology*, 56(1) : 10–17.
- Picard, G., Fily, M., and Gallée, H. (2007). Surface melting derived from microwave radiometers : a climatic indicator of antarctica. *Annals of Glaciology*, 46.
- Schneebeli, M. and Johnson, J. (1998). A constant-speed penetrometer for high-resolution snow stratigraphy. *Annals of Glaciology*, 26 : 107–111.
- Stammes, K., Tsay, S., Wiscombe, W., and Jayaweera, K. (1988). Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. *Applied Optics*, 27(12) : 2502–2509.
- Warren, S. (1982). Optical properties of snow. *Reviews of geophysics and space physics*, 20(1) : 67–89.
- Warren, S. (1984). Optical constants of ice from ultraviolet to the microwave. *Applied Optics*, 23 : 1206–1225.
- Wiscombe, W. and Warren, S. (1980). A model for the spectral albedo of snow : I. pure snow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37 : 2712–2733.

Annexes

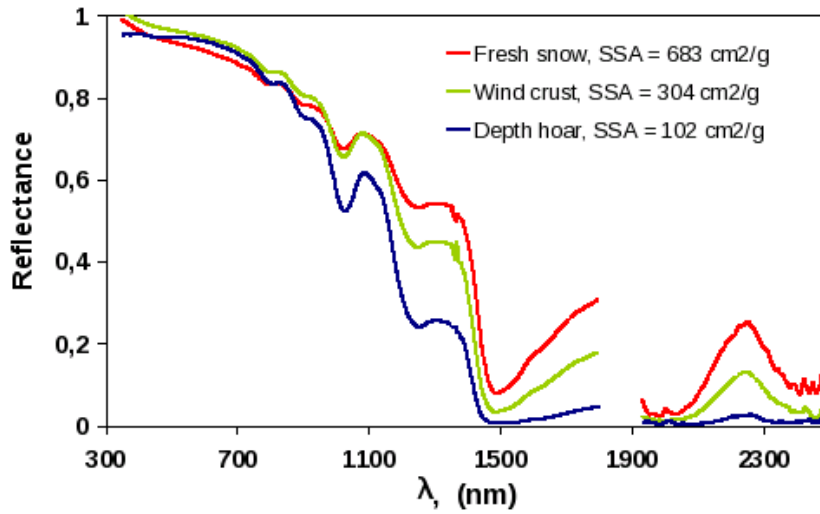


FIG. 18 – Albédo spectral (réflectance) de trois échantillons de neige en fonction de la longueur d'onde (nm) illustrant l'effet de la SSA de la neige ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) sur l'albédo dans le PIR (Domine et al., 2006)

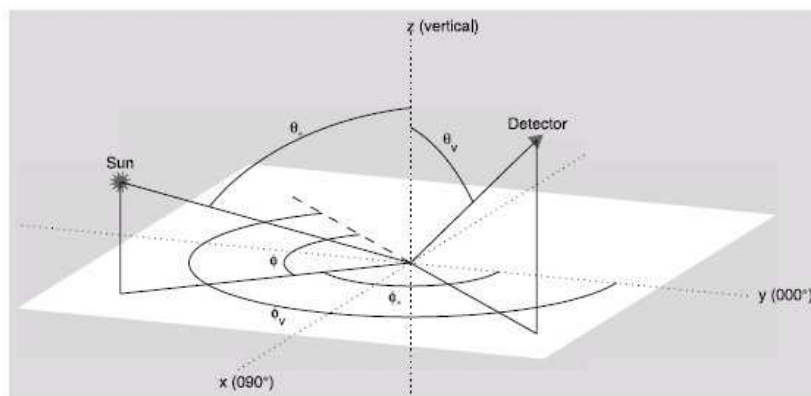
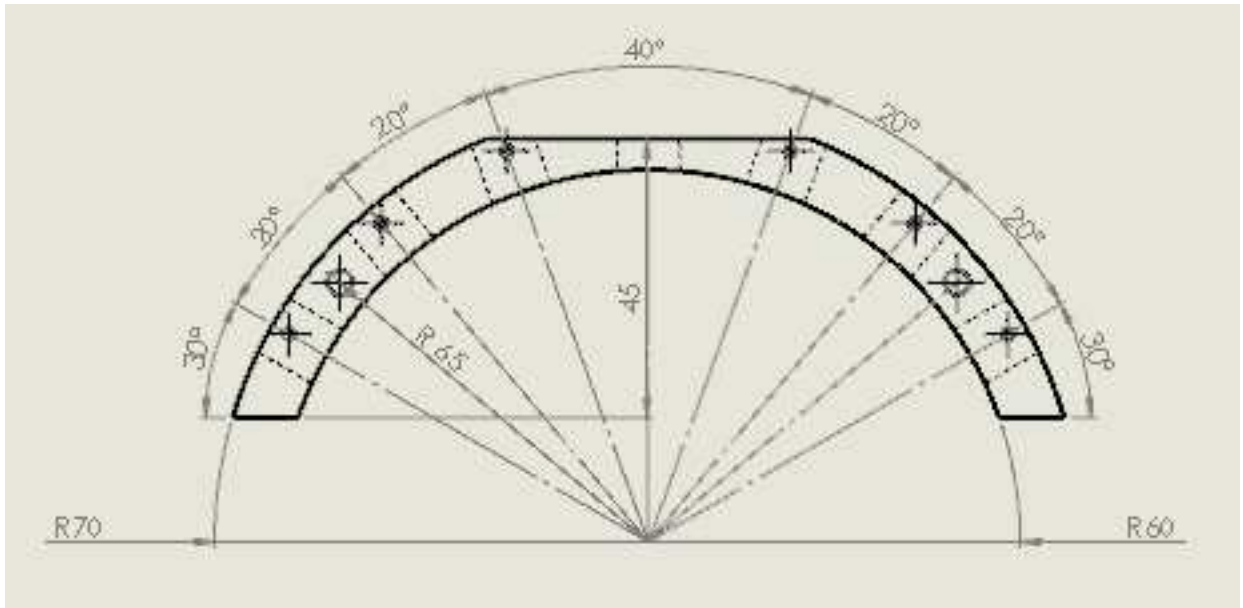
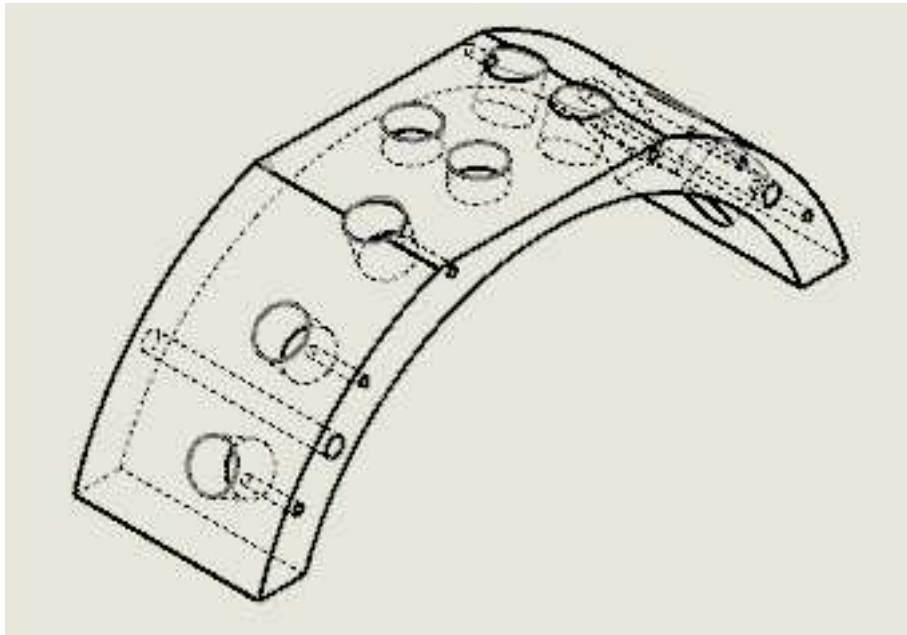


FIG. 19 – Définition de l'angle d'incidence zénithal (θ_0), de l'angle de vue zénithal (θ_v), de l'angle d'incidence azimutal (Φ_0) et de l'angle de vue azimutal (Φ_v) (Hudson et al., 2006)



(a) Vue de profil



(b) Vue de dessus

FIG. 20 – Représentation de la couronne de la sonde POSSSUM, les photodiodes étant les cercles sur le tour de la couronne et la diode laser étant le cercle sur la perpendiculaire de la couronne

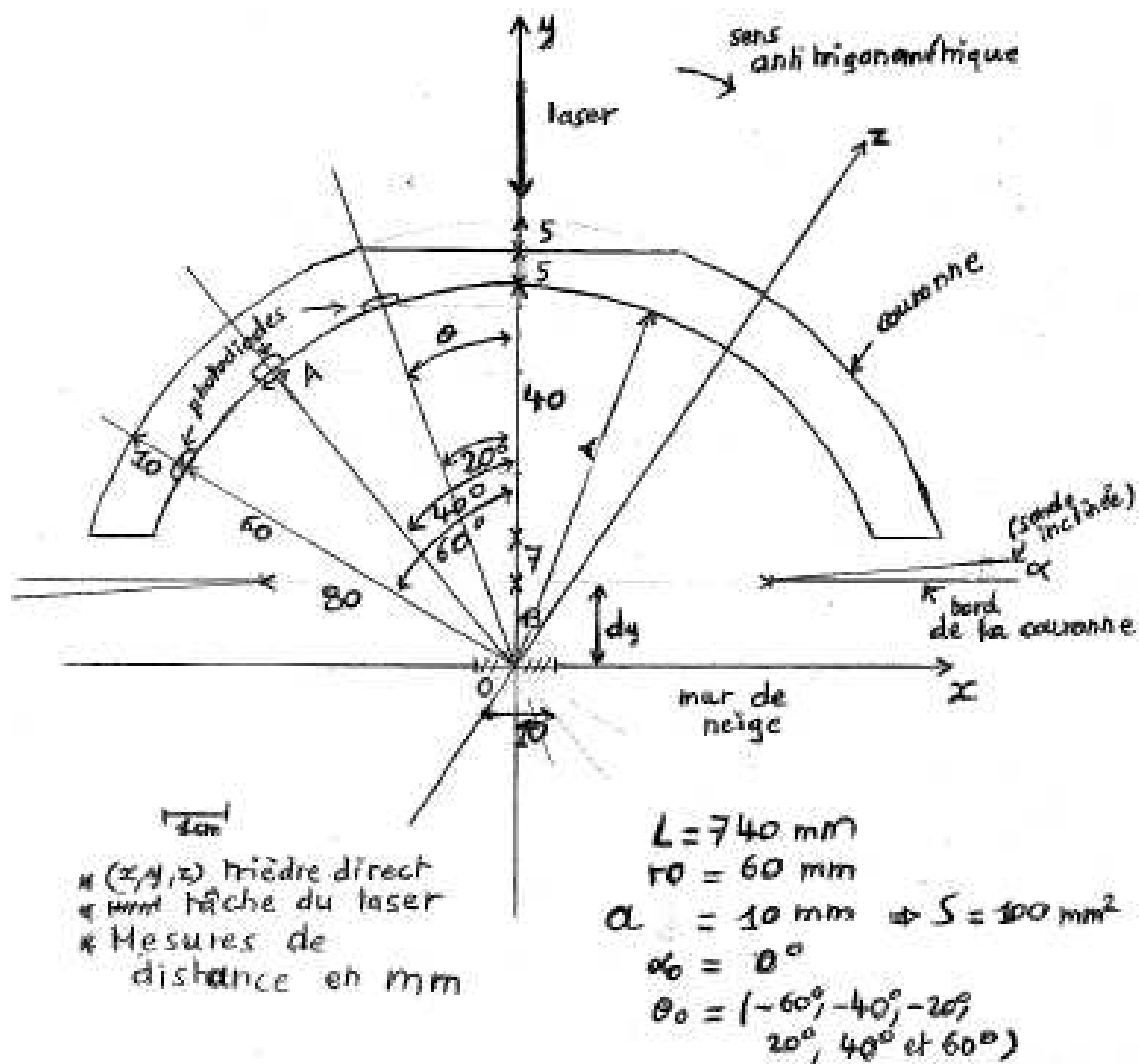
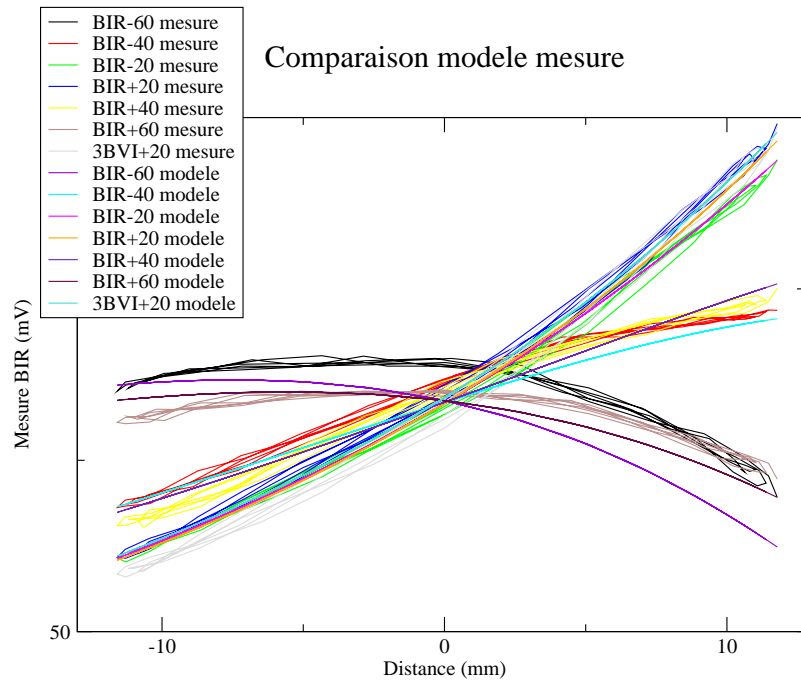
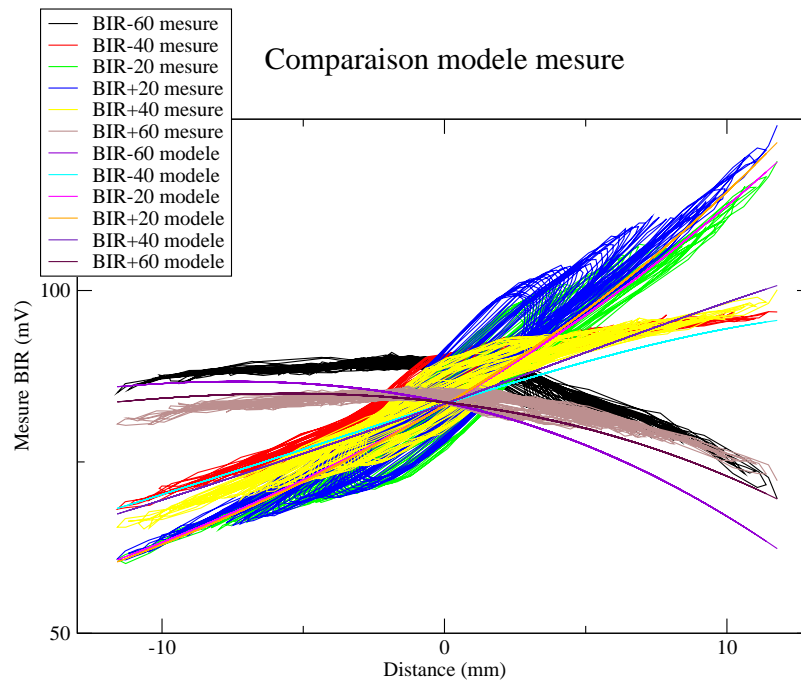


FIG. 21 – Schéma récapitulatif de la couronne, de ses caractéristiques et des notations utilisées dans le modèle



(a) Spectralon 3 périodes



(b) Spectralon complet

FIG. 22 – La première figure représente la mesure sur les différentes photodiodes (mV) et le modèle (mV) en fonction de la distance dy (mm) sur un spectralon et pour 3 périodes de variation de la distance ; la deuxième est la même chose pour toutes les périodes de variation de distance. La différence entre le modèle et la mesure est due à deux effets : un ajustement approximatif de la distance sur la courbe rouge et un coefficient multiplicatif approximatif. Il est intéressant d’observer sur la figure (b) la dispersion des courbes de mesure causée par un mouvement de rotation de la sonde c’est-à-dire une modification des angles azimutaux (une part de la dispersion est aussi du à un changement de distance r par la rotation de la sonde ainsi que par l’ajustement approximatif de la distance dy)

Correction geometrique

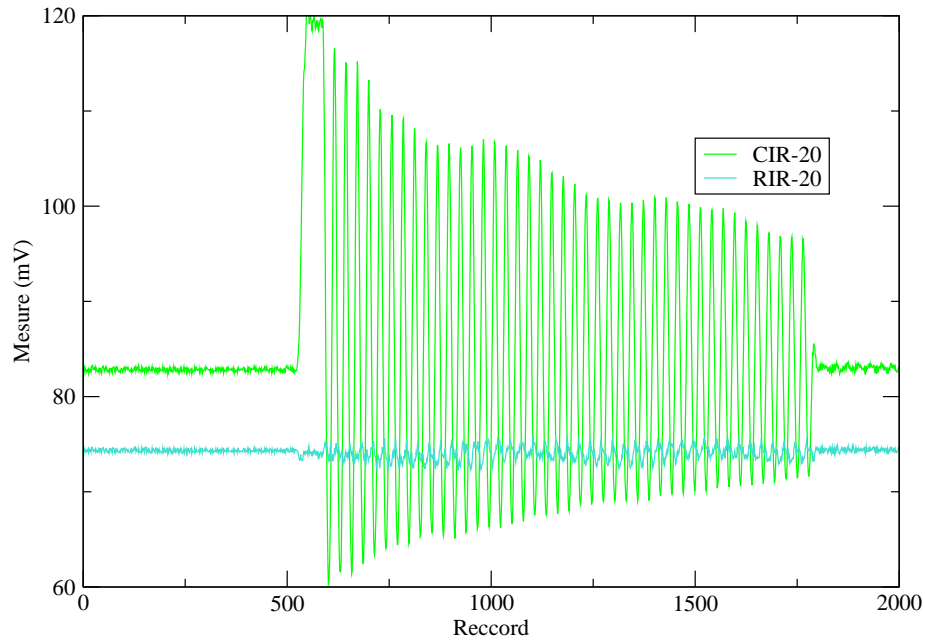


FIG. 23 – Correction de la mesure (mV) de POSSUM sur l'essai faisant varié la distance dy en laboratoire le 5 février 2009 pour la photodiode d'angle zénithal de 20 degré et d'angle azimutal de 180 degré

La Grave 2009-04-01 puits 1

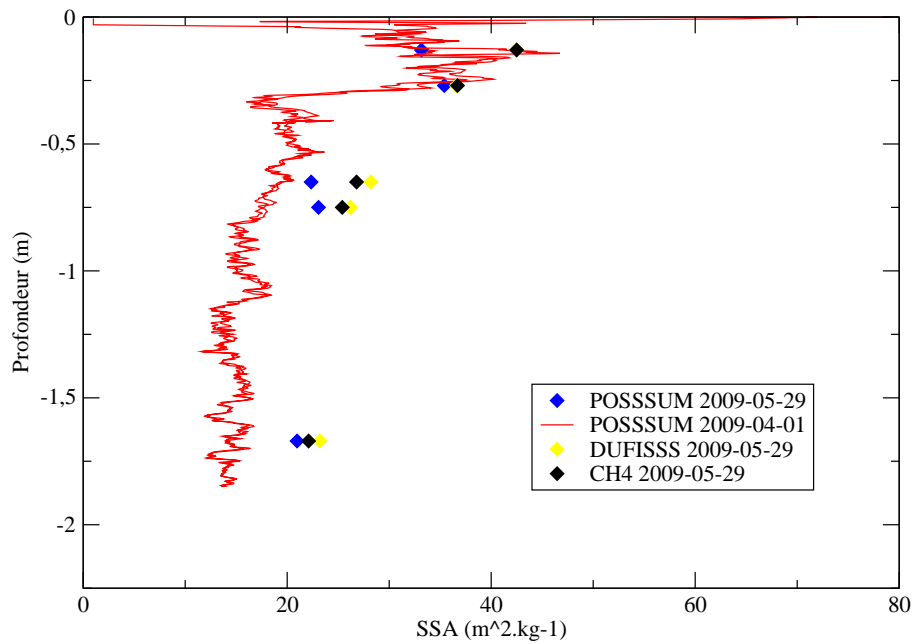


FIG. 24 – Profil de SSA de La Grave le 17 avril 2009 ; en rouge mesures de POSSUM le jour même ; en bleu mesures de POSSUM en laboratoire sur des échantillons prélevés à La Grave ; en jaune mesures de DUFISS en laboratoire sur les mêmes échantillons que pour les mesures de POSSUM ; en noir mesures par adsorption de méthane toujours sur les mêmes échantillons

Comparaison DUFISSS POSSSUM

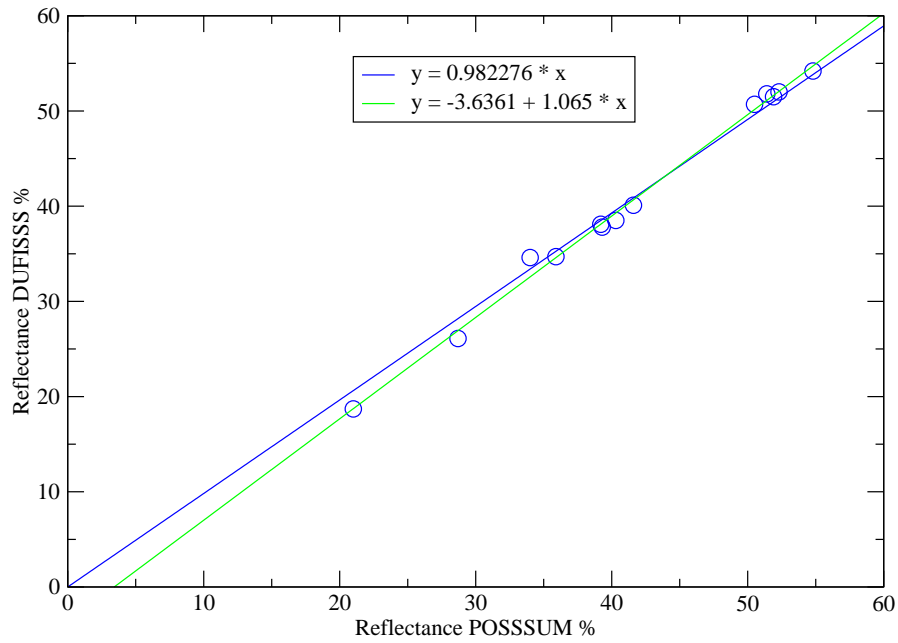


FIG. 25 – Réflectance mesurée par DUFISSS (%) en fonction de celle mesurée par POSSSUM (%)

Relation réflectance / SSA

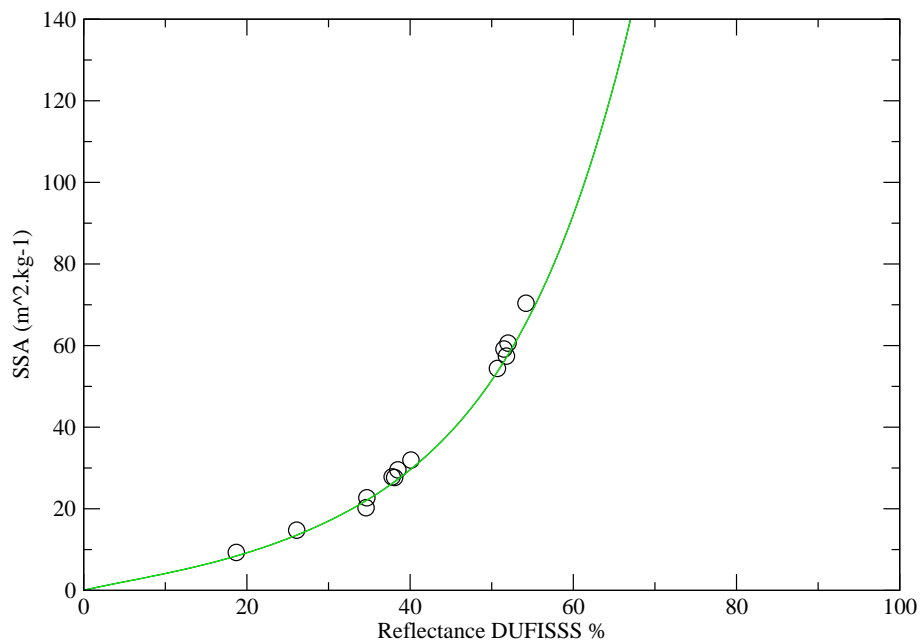
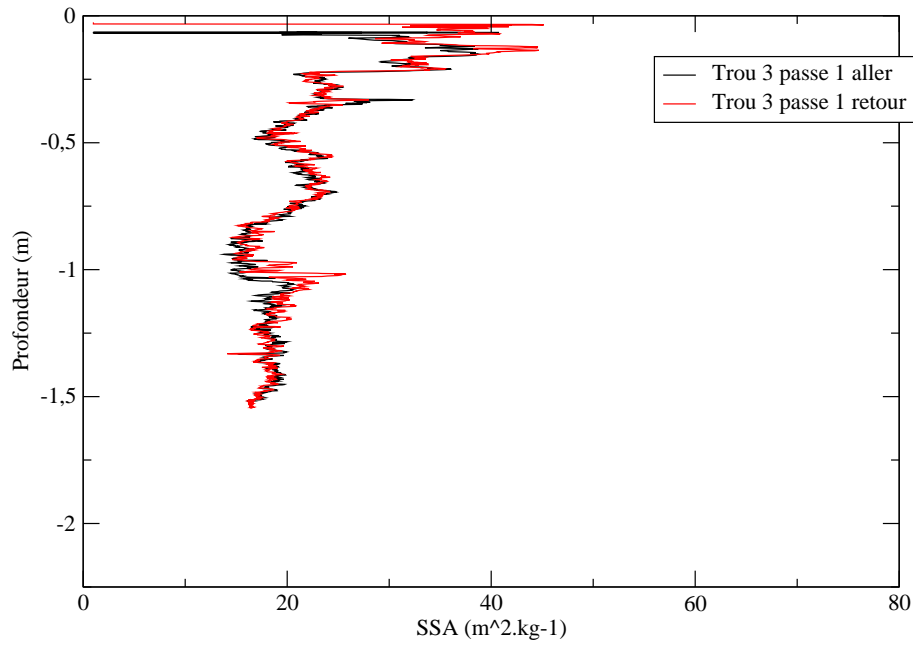


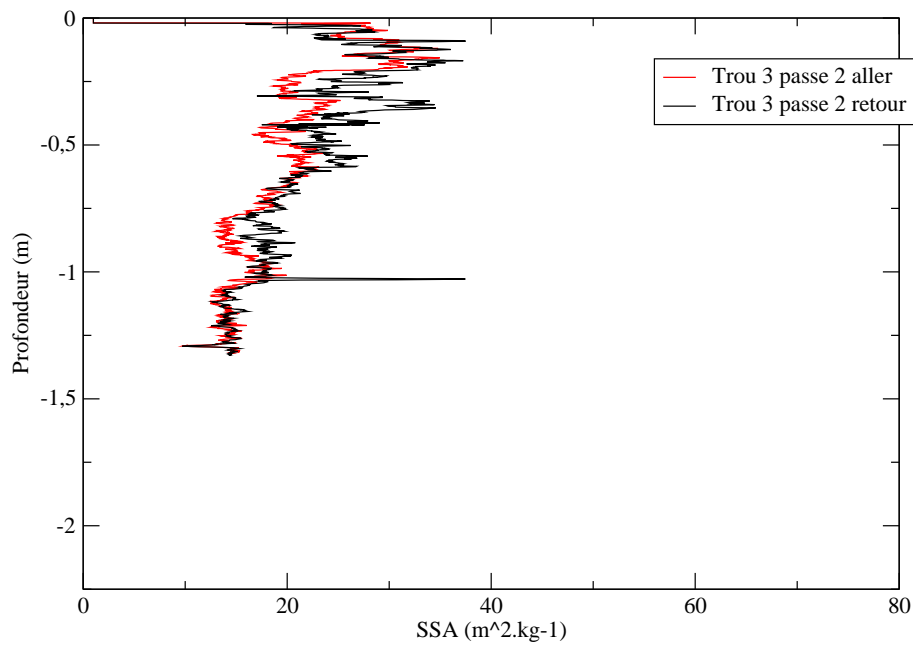
FIG. 26 – SSA mesurée au méthane (m².kg⁻¹) en fonction de la réflectance mesurée par DUFISSS (%)

La Grave 2009-04-01 trou 3 passe 1 aller et retour



(a) Premier passage

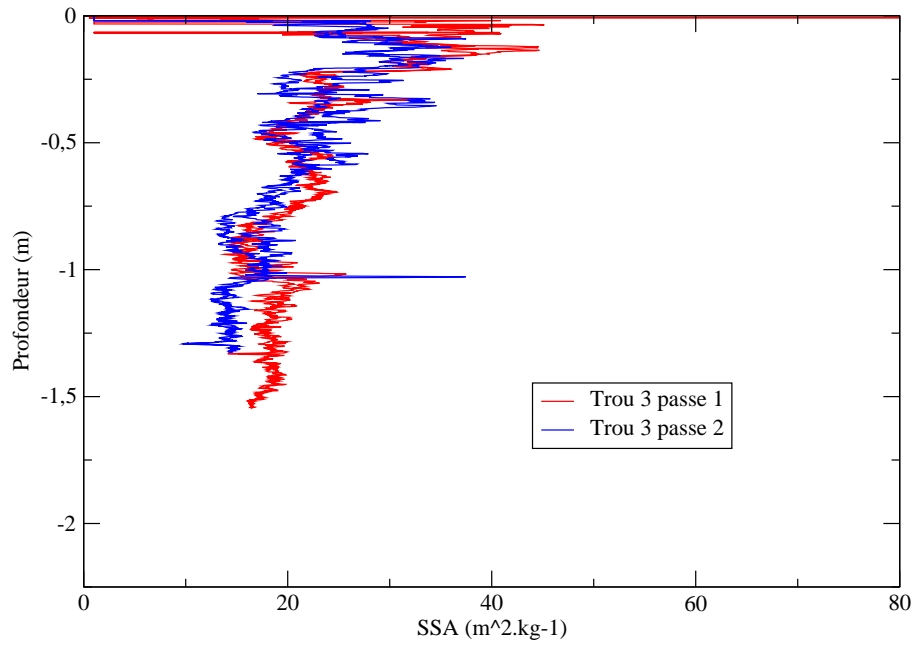
La Grave 2009-04-01 trou 3 passe 2 aller et retour



(b) Deuxième passage

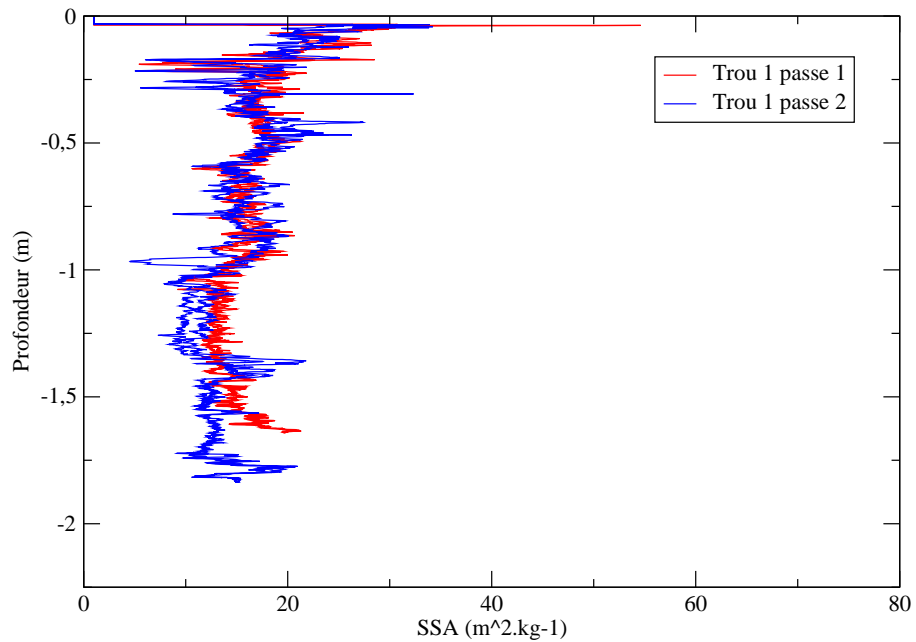
FIG. 27 – Profil de SSA ($\text{m}^2.\text{kg}^{-1}$) à la Grave le premier avril 2009 à l'aller et au retour pour deux passages de POSSUM

La Grave 2009-04-01 trou 3 passe 1 et 2



(a) La Grave

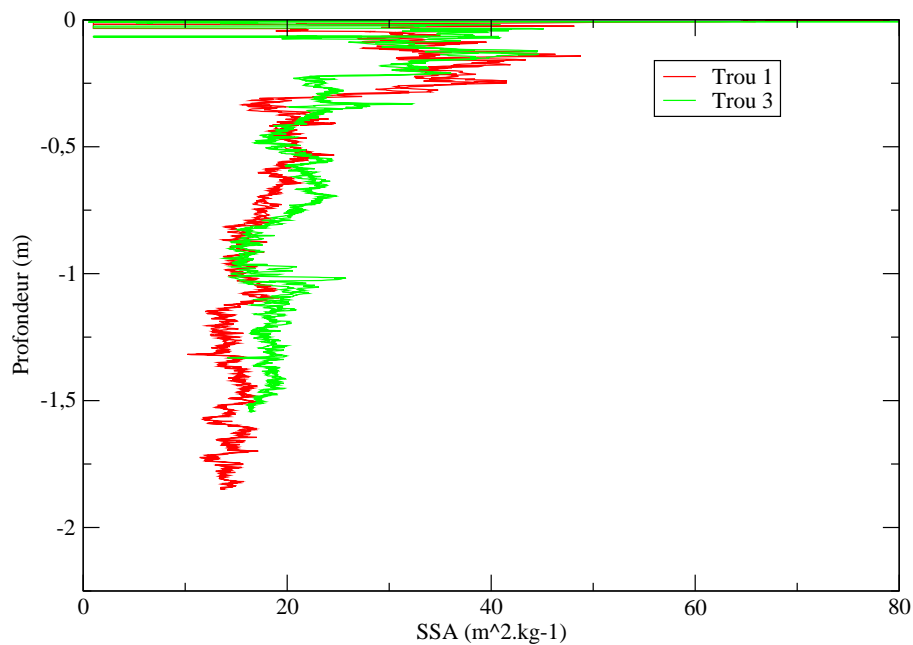
Arsine 2009-03-19 trou 1 passe 1 et 2



(b) Arsine

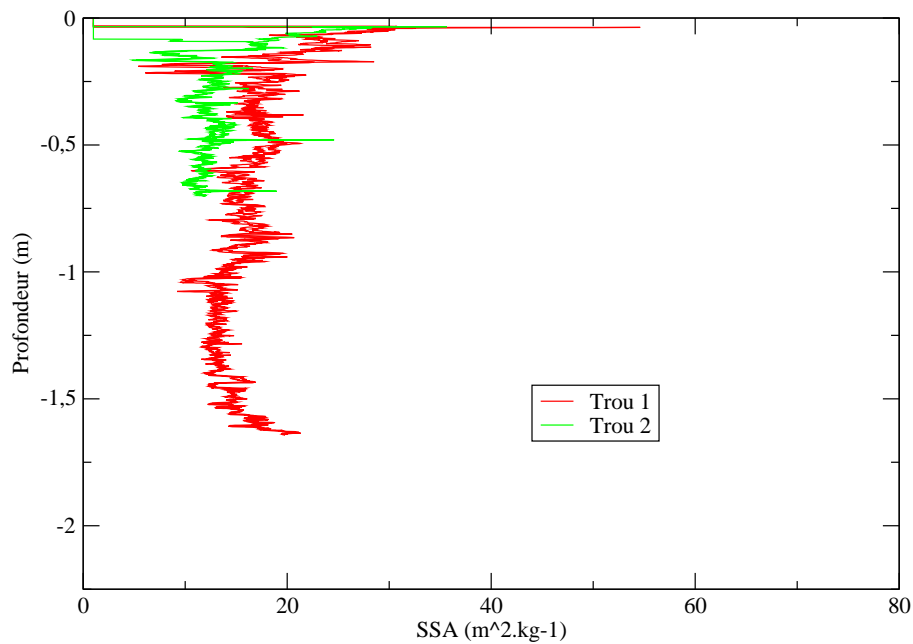
FIG. 28 – Profil de SSA (m².kg⁻¹) à La Grave le premier avril 2009 de deux passages de POSSUM et à Arsine le 19 mars 2009 aussi de deux passages de POSSUM

La Grave 2009-04-01 trou 1 et 3



(a) La Grave

Arsine 2009-03-19 Trou 1 et 2



(b) Arsine

FIG. 29 – Profil de SSA de La Grave le premier avril 2009 et d'Arsine le 19 mars 2009 de deux puits différents pour chaque site

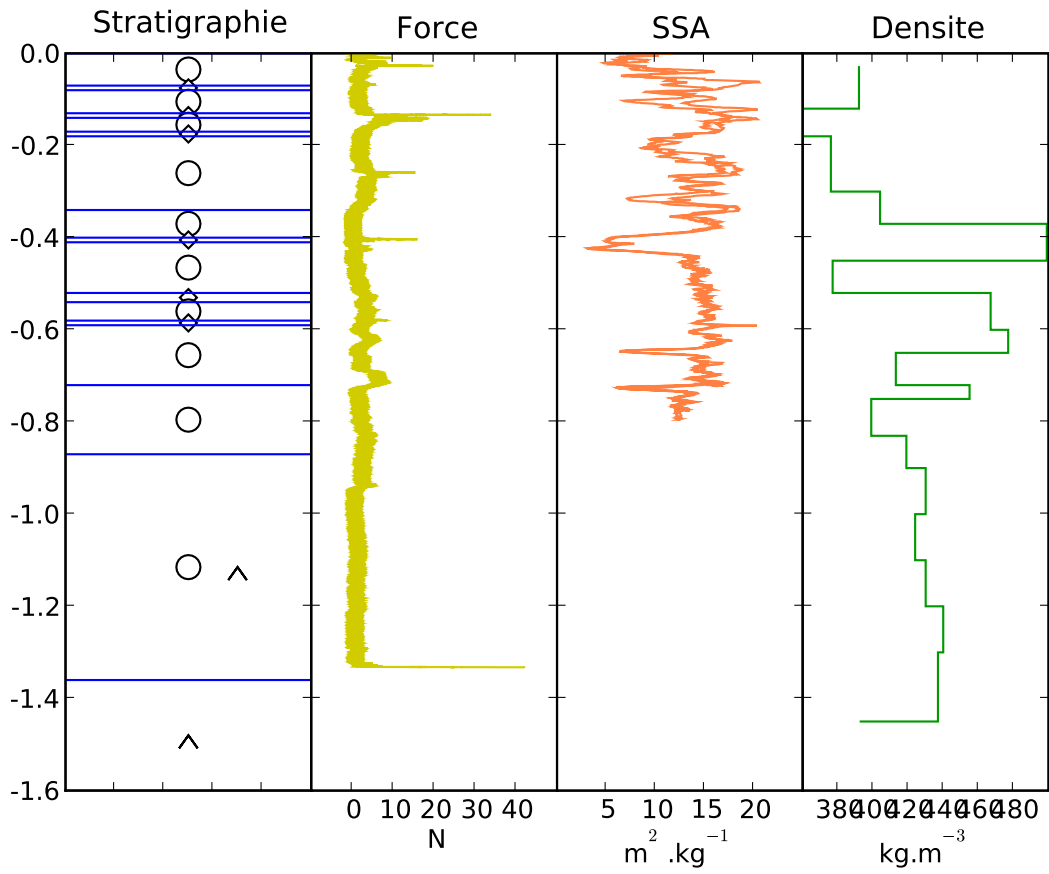


FIG. 30 – Profil stratigraphique, de force, de SSA avec POSSSUM et de densité à Argentière le 9 avril 2009

Liste des Annexes

18	Albédo spectral (réflectance) de trois échantillons de neige en fonction de la longueur d'onde (nm) illustrant l'effet de la SSA de la neige ($\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$) sur l'albédo dans le PIR (Domine et al., 2006)	36
19	Shéma de la géométrie de la mesure	36
20	Shéma de la couronne	37
21	Shéma récapitulatif de la couronne, de ses caractéristiques et des notations utilisées dans le modèle	38
22	Comparaison entre la mesure et le modèle	39
23	Exemple de correction de l'effet de distance	40
24	Profil de SSA de La Grave le 17 avril 2009	40
25	Réflectance mesurée par DUFISSS (%) en fonction de celle mesurée par POSSSUM (%) .	41
26	SSA mesurée au méthane ($\text{m}^2.\text{kg}^{-1}$) en fonction de la réflectance mesurée par DUFISSS (%)	41
27	Profil de SSA ($\text{m}^2.\text{kg}^{-1}$) à la Grave le premier avril 2009 à l'aller et au retour pour deux passages de POSSSUM	42
28	Profil de SSA ($\text{m}^2.\text{kg}^{-1}$) à la Grave le premier avril 2009 de deux passages de POSSSUM et à Arsine le 19 mars 2009 aussi de deux passages de POSSSUM	43
29	Profil de SSA de La Grave le premier avril 2009 et d'Arsine le 19 mars 2009 de deux puits différents pour chaque site	44
30	Profil stratigraphique, de force, de SSA avec POSSSUM et de densité à Argentière le 9 avril 2009	45