

Martin LEJEUNE

Années : 2015/2016

Tuteur Polytech : Julien RAMOUSSE

Dates du stage : du 09/05/16 au 13/07/16

Interruption du 30/05/16 au 10/06/16

RAPPORT DE STAGE FI4

Evaluation de la modélisation de l'enneigement sur une piste de ski

Application à la température au niveau de l'interface sol-neige et à la microstructure de la neige



Fabrication de neige de culture sur les pistes de ski à Autrans (Vercors), 26 février 2016

Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM)
Centre d'Etudes de la Neige (Météo France)

Domaine universitaire, 1441 rue de la Piscine
38 400 Saint Martin d'Hères
04.76.63.79.00

Sous la direction de : SPANDRE Pierre,
doctorant.

Remerciements

Je souhaite remercier Mr Pierre SPANDRE, doctorant au Centre d'Etudes de la Neige, qui m'a permis de réaliser mon stage au sein de ce laboratoire et de découvrir le domaine de la recherche autour d'un sujet qui m'a toujours intéressé : la neige. Grâce à lui, j'ai fortement enrichi mes connaissances sur la thématique et découvert une méthode de travail rigoureusement organisée dont j'essaierais de m'en inspirer par la suite. Il m'aura, avec patience, bien éclairé sur la rédaction de ce rapport et je lui en suis reconnaissant. J'ajouterais qu'il a été très agréable de travailler ensemble, toujours avec une note de sourire et de bonne volonté.

Au CEN, je souhaite aussi remercier l'ensemble des personnels du laboratoire, thésards et stagiaires qui m'ont accueilli dans la bonne humeur durant ces 4 semaines de stage.

Sommaire

I.	Introduction.....	p.5
II.	Observation et simulation de la température de sol sous couvert neigeux	
	1. Observation et modélisation de l'enneigement naturel	
	1. Campagne de mesure.....	p.6
	2. Protocole des manip terrain.....	p.7
	3. Modélisation sur la chaîne SAFRAN/SURFEX/ISBA-Crocus.....	p.9
	4. Correction des forçages.....	p.10
	5. Résultats et discussions.....	p.11
	2. Température de sol et impact du damage	
	1. Description des manip.....	p.12
	2. Température sous couvert neigeux naturel.....	p.13
	3. Impact du damage.....	p.14
	4. Impact du nouveau schéma de sol (version V8).....	p.14
	5. Discussions.....	p.16
	6. Perspectives.....	p.16
III.	Caractérisation de la microstructure de la neige	
	1. Observation sur terrain avec DUFISSS.....	p.17
	2. Collecte et traitement des images sur Visilog.....	p.18
	3. Comparaison des deux méthodes.....	p.20
	4. Résultats.....	p.20
	5. Discussions.....	p.21
IV.	Conclusion	
V.	Bibliographie	

I. Introduction

Le tourisme de sports d'hiver et indirectement, la majorité des acteurs économiques de montagne dépendent des conditions d'enneigement des stations de ski (DSF, 2011). Face au déclin d'épaisseur de neige, à l'incertitude de précipitations en phase neige en début de saison et d'une température moyenne de l'atmosphère qui ne cesse d'augmenter (Durand *et al.*, 2009), la tendance des grands domaines skiables va vers une amplification de la gestion de « l'or blanc ». La neige de culture connaît un fort développement actuellement (Spandre *et al.*, 2015), avec un équipement des principales pistes des stations en enneigeurs et la pratique du damage est généralisée.

Or, la connaissance du comportement du manteau neigeux (composé de neige naturelle ou de culture) après passage des dameuses et de l'efficacité des enneigeurs en fonction des conditions météorologiques repose sur l'observation des nivoculteurs professionnels dont les méthodes demeurent empiriques. A notre connaissance, il n'existe aucun outil de modélisation de ces éléments influant le manteau neigeux et peu d'études scientifiques sur lesquelles les stations de ski peuvent s'appuyer (Fauve *et al.*, 2002). Il devient donc essentiel aujourd'hui, d'améliorer notre compréhension de l'évolution du manteau neigeux.

Au sein du CEN¹, l'équipe MANTO travaille sur les propriétés physiques de la neige et sur ses interactions avec l'environnement climatique extérieur. Pierre Spandre a intégré cette équipe depuis 2 ans et étudie l'impact que le damage et la neige de culture entraînent sur l'évolution de ce manteau neigeux. Ce travail a débouché sur le développement d'un modèle physique d'évolution du manteau neigeux (Spandre *et al.*, 2016) qui prend en compte le travail de la neige (damage, production de neige) en plus des conditions météorologiques (Durand *et al.*, 1993) et des lois physiques d'évolutions du manteau neigeux naturel (Brun *et al.*, 1992, Vionnet *et al.*, 2012). Certaines hypothèses et résultats de ce nouveau modèle nécessitent d'être vérifiées et discutées. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce stage dont l'objectif était d'apporter une aide au cours des dernières campagnes à effectuer sur le terrain, à dépouiller et exploiter les données acquises. C'est une expérience enrichissante et valorisante que de proposer un stage dans le cadre de sa thèse.

La première partie de ce rapport introduira l'observation et la modélisation de la température de sol sous couvert neigeux naturel d'une part et damé d'autre part. Les forçages météorologiques jumelés aux conditions d'enneigement naturel ont été expertisés afin de limiter les erreurs associées à la modélisation du manteau neigeux naturel et se concentrer sur la prise en compte des effets du damage par la chaîne de modélisation SAFRAN/SURFEX/ISBA-Crocus². Les observations réalisées sur le terrain, par les pisteurs et Pierre Spandre, lors de la période hivernale ont permis d'évaluer (à l'aide de perche graduée et de carottes de glace) l'épaisseur de neige (m), l'équivalent en eau (kg de neige par m²) et indirectement sa densité (kg m⁻³). Les températures à l'interface sol/neige ont été enregistrées tout au long de la saison par des capteurs spécifiques. Les résultats de ces observations et des simulations associées seront présentés et discutés. Par ailleurs suites aux récentes modifications du schéma physique de représentation des couches de sol dans SURFEX, une comparaison des résultats du modèle avant et après modifications sera présentée.

Nous discuterons dans un second temps les caractéristiques de la microstructure (forme et taille) de la neige damée et neige de culture à l'aide de deux méthodes de mesure. La première méthode fournit une information sur le terrain grâce à un outil appelé DUFISSS. La seconde méthode consiste à récolter des échantillons de neige sur le terrain, les ramener en chambre froide pour prendre des photos (banc photos sur microscope) et appliquer une méthode de traitement d'images (Lesaffre *et al.*, 1998). L'objectif est d'apprécier la disparité des résultats et de les confronter aux hypothèses dans le modèle Crocus.

¹ Centre d'Etude de la Neige

² Nom du programme permettant la modélisation du manteau neigeux

I. Observation et simulation de la température de sol sous couvert neigeux

L'équipe MANTO précédemment citée étudie les phénomènes physiques gouvernant l'évolution interne du manteau neigeux et ses relations avec l'environnement extérieur (sol, atmosphère). Les études se font en chambre froide, sur le terrain et via la simulation numérique.

C'est au sein de cette équipe que Pierre Spandre a entrepris, à l'automne, 2013 la réalisation de sa thèse : « Analyse et simulation de la gestion de la neige dans les stations de sports d'hiver ». L'objectif est de mieux appréhender l'impact du travail de la neige (damage et production) sur les propriétés du manteau neigeux. Le but de cette thèse est d'aboutir à l'élaboration d'un outil permettant la modélisation numérique du profil, sur piste, des couches de neiges.

La neige naturelle étant notre référence d'étude, il est indispensable de simuler son profil avec le plus de précision. Les données météorologiques (forçages) alimentant ce modèle doivent être rigoureusement vérifiées. Ces données sont établies à l'échelle dite du « massif » : des zones de montagne à l'intérieure desquelles les conditions météorologiques sont supposées homogènes et ne dépendre que de l'altitude, de l'orientation et de la pente (Durand *et al.*, 1993). Pour limiter les incertitudes associées aux écarts potentiels entre les données à l'échelle du massif et les données locales, une expertise a été menée. Nous corrigeons les conditions climatiques retenues par SAFRAN en les comparant aux informations du réseau d'observations nivo-météorologiques (stations automatiques, observations manuelles, etc.).

1. Observation et modélisation de l'enneigement naturel

L'expertise des forçages météorologiques étant une étape clé pour l'étude du manteau neigeux, il est impératif de la prendre en compte de façon minutieuse. Pour cela, nous relevons des observations effectuées sur le terrain. Ces dernières nous permettent d'assurer la véracité des conditions de nivologie. Ensuite il nous suffit de corriger les données SAFRAN qui serviront à la modélisation du manteau.

1. Campagne de mesure

Ces missions consistent à évaluer l'épaisseur du manteau neigeux, l'équivalent en eau et la densité du manteau neigeux. Pour son étude, P. Spandre s'est intéressé à 4 domaines de sports d'hiver environnants Grenoble (Figure 1) :

- Tignes (Vanoise), alt. 2150m
- Chamrousse (Belledonne), alt. 1870m
- Les deux Alpes (Oisans), alt. 1750m
- Le plateau de Gève à Autrans (Vercors), alt. 1300m



Figure 1 - Localisation des domaines de ski (Spandre *et al.*, 2016)

Avec l'accord du service des pistes de chaque domaine, une campagne de mesure sur 3 sites d'observation soigneusement sélectionnés a été mise en place (Figure 2) :

- une **référence neige naturelle non damée**
- un site en **neige naturelle damée (B)**

-un site de **neige de culture damée (A)**



Altitudes : env. 1300m
Pente: <math>< 5^\circ</math> - Accès: facile



Figure 2 – Les 3 sites d'observation (A, B et Référence neige naturelle) sur le domaine nordique d'Autrans.
(Spandre *et al.*, 2016)

L'objectif étant d'étudier et comparer ces sites au cours de 2 saisons hivernales successives.

2. Protocole des manips terrain

Un carnet d'observation a été établi par P. Spandre puis présenté et remis en main propres aux pisteurs des 4 domaines. Ils réalisent, 2 fois par mois, un relevé sur les 3 sites. Ce relevé consiste à évaluer en mesurant à l'aide d'une barre en métal graduée, l'épaisseur du manteau neigeux (HTN³). Au cours de mon stage, j'ai eu l'occasion de participer aux trois dernières sorties terrain de la saison 2016, à Autrans, Chamrousse et Tignes. La mission effectuée est détaillée ci-dessous :

Parallèlement, une fois tous les 2 mois, P. Spandre a réalisé lui-même ces manips avec un outil supplémentaire : le carottier. La manip consiste à prélever une carotte de neige et à peser sa masse (pour faciliter la tâche et éviter de perdre de la matière, on verse le contenu du carottier dans un sac plastique). Il suffit de réitérer l'expérience 2 ou 3 fois pour diminuer les imprécisions.

³ Hauteur Totale Neige (HTN) en cm



Figure 3 - Relevé à l'aide de la barre graduée, de l'épaisseur du manteau neigeux (ici HTN = 55cm, à Tignes 25/05/16) – (Source : P. Spandre et M. Lejeune 2016)



Figure 4 – Carottage sur le site A, Autrans le 10/05/16 (Source : P. Spandre et M. Lejeune 2016)



Figure 5- Pesée de la carotte de neige mise en sac (Source : P. Spandre et M. Lejeune 2016)

L'intérêt de cet appareil est qu'il permet la détermination de la lame d'eau (SWE⁴) et donc de la densité de neige.

$$SWE = \frac{\text{masse carotte de neige}}{1000 * Sc}$$

Où Sc est la surface intérieure du carottier.

⁴ Snow Water Equivalent (SWE) : équivalent en eau, en kg/m²

Afin d'estimer « sur le terrain » si la mesure n'a pas été erronée, il existe un calcul approximatif et trivial pour approximer ces deux variables :

$$SWE \left(\frac{kg}{m^2} \right) = \frac{\text{masse carotte de neige} * 2}{10}$$

Puis on estime la densité :

$$\text{Densité} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{SWE}{H_{\text{neige}}}$$

Les variables physiques instrumentalisées sont donc :

- La hauteur de neige (HTN)
- L'équivalent en eau (SWE)
- La densité du manteau neigeux

La seconde mission qui m'a été affectée était le regroupement en fichier ordinateur des carnets d'observations et le traitement des mesures des observations terrains effectuées par P.Spandre au cours de l'hiver.

3. Modélisation sur la chaîne SAFRAN⁵/SURFEX⁶-ISBA⁷-Crocus

Dans le cadre de sa thèse, P. Spandre a effectué une modification au modèle Crocus. Il a intégré les perturbations engendrées par le travail de la neige (damage et production de neige = Snow management - Figure 6) à Crocus pour former une expansion: Crocus-Resort (Spandre et al., 2016). Ce nouveau modèle permet donc la simulation du profil du manteau neigeux sur piste damée ou de neige de culture.

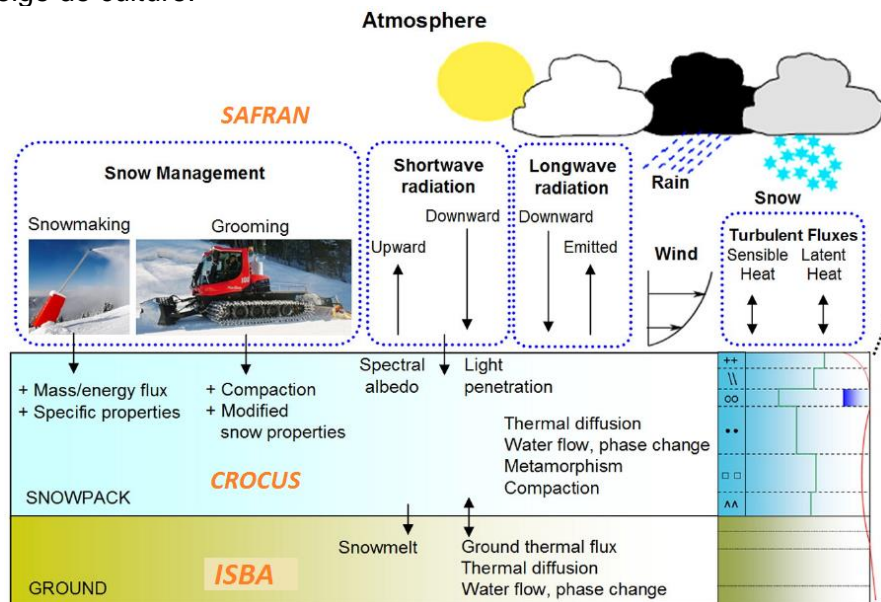


Figure 6- Le modèle Crocus-Resort (Spandre et al., 2016)

⁵ Système d'Analyse Fournissant des renseignements Atmosphériques à la Neige (SAFRAN)

⁶ SURface Externalisée (SURFEX)

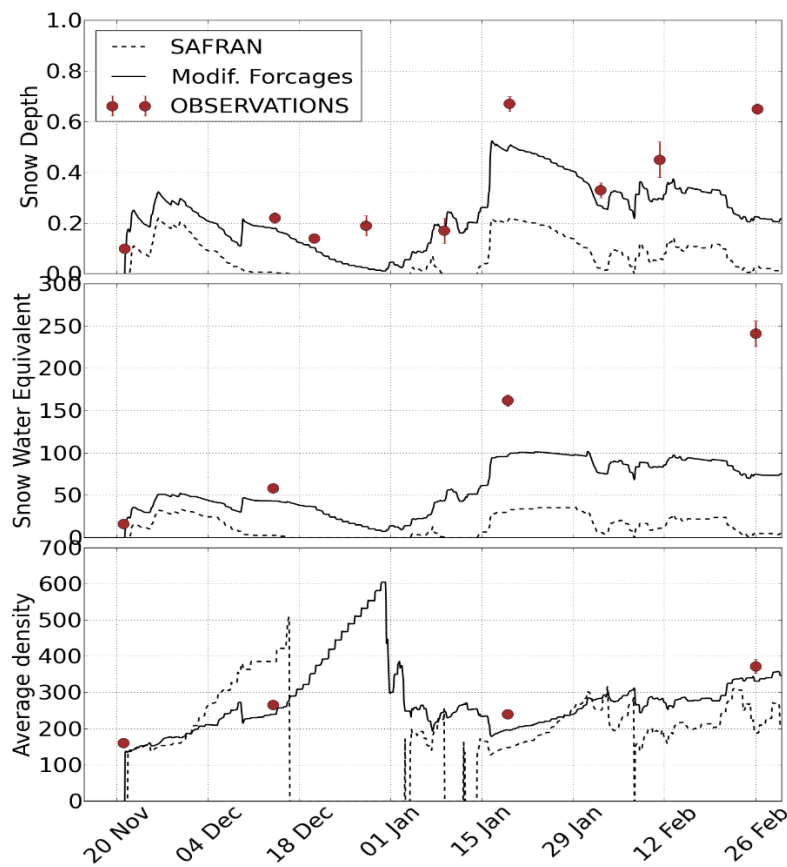
⁷ Interaction Sol-Biosphère Atmosphère (ISBA), composante de la plateforme SURFEX

4. Correction des forçages

Les forçages météorologiques sont le résultat d'une mise en commun de sorties de modèles météorologiques à grande échelle, d'observations satellites et ponctuelles (radiosondes) puis une descente d'échelle est réalisée par le système SAFRAN pour chaque massif de 1000 km² environ, au pas de temps horaire (Figure 6).

Ces données sont ensuite adaptées au niveau local. Pour cela, on corrige les plages de données qui divergent localement, puis on relance une simulation. On observe les nouvelles anomalies et nous réitérons la correction. Le graphique suivant expose les points de mesures relevés sur le site de neige damé à Autrans (Observations, en rouge), le profil que simule Crocus-Resort (en pointillé) et le nouveau profil après modification des forçages (en trait plein).

Saison 2015-2016 : Autrans



Graphique 1 - Expertise des forçages météo (hauteur de neige, équivalent en eau et densité) à Autrans, saison 2015-2016

Dans l'ensemble, les simulations par le modèle Crocus-Resort, tendent à correspondre aux observations. Néanmoins, sur un même massif, la diversité des conditions atmosphériques et topographiques influera nettement la composition et les propriétés du manteau neigeux. Par exemple, si la température de l'air au cours d'une précipitation a pu être sous-évaluée localement par SAFRAN, le modèle enregistrera donc une chute d'eau liquide et non solide. La suite du profil en subira les répercussions. Nous parons à ces erreurs en corrigeant la base de données de SAFRAN.

Malgré le réajustement des forçages, nous constatons qu'à partir du 20 janvier, il apparaît une certaine discordance entre le profil après modification et les observations terrain. Nous nous reposons sur l'hypothèse d'un fait extérieur : pour la préparation de l'évènement sportif « La foulée blanche »,

un déplacement de neige aurait été effectué pour alimenter cette piste. Cette perturbation n'est pas prise en compte dans le modèle Crocus-Resort.

5. Résultats et discussions

- Dans ce rapport, nous présentons uniquement l'expertise des forçages sur le site d'Autrans mais les modifications sont effectuées sur les 4 domaines skiables (avec adaptation à leur milieu respectif).
- Nous intégrons uniquement les conditions météorologiques au système SAFRAN. L'assimilation des observations nivologiques, est effectuée une seule fois par an, en août. Cet apport de valeurs permet une correction des phases liquide/solide lors des précipitations de l'année précédente. Le profil que modélisera Crocus-Resort sera donc modifié par cette mise à jour. Pour l'année 2016, il n'y a pas encore eu l'ajout des postes de nivologie, c'est pourquoi nous avons nous même importés nos observations terrain.
- Le réajustement des données météorologiques de SAFRAN à l'aide d'une campagne de mesure terrain (sondage de l'épaisseur et carottage) limite les erreurs de la simulation en neige naturelle. Toutefois, les observations sur le terrain comportent elles-mêmes une source d'incertitude à prendre en compte (vérification des écarts-types sur les valeurs mesurées).

Le profil de neige naturelle modélisé par Crocus, après expertise des forçages, est désormais utilisable. Nous allons dès à présent pouvoir l'exploiter pour caractériser les propriétés physiques des couches de neige composant le manteau. Ce profil fera office de référence et nous servira à comparer, dans le cadre des recherches suivantes, la neige naturelle à la neige damée et neige de production.

Les deux phénomènes étudiés par la suite sont : la qualification du régime de température du sol et la caractérisation de la microstructure de la neige.

2. Température de sol sous couvert neigeux et impact du damage

Par soucis de répétition, on appellera la température de sol : TG (Ground Temperature). C'est à travers différentes études s'inscrivant dans un contexte écologique et/ou environnemental que l'on a commencé à s'intéresser à la température de sol. Les travaux de Rixen *et al.* (2004) affirment que le damage des pistes affecte les propriétés de la neige et impacte l'écosystème infra couvert neigeux. Précisément, ce damage influe sur le régime thermique des sols : on assiste à la densification de la neige par les engins et à l'augmentation de la conductivité thermique.

Les résultats obtenus par Rixen *et al.* (2004) démontrent cette augmentation de l'intensité et des fréquences des périodes de froid au niveau du sol (Figure 7).

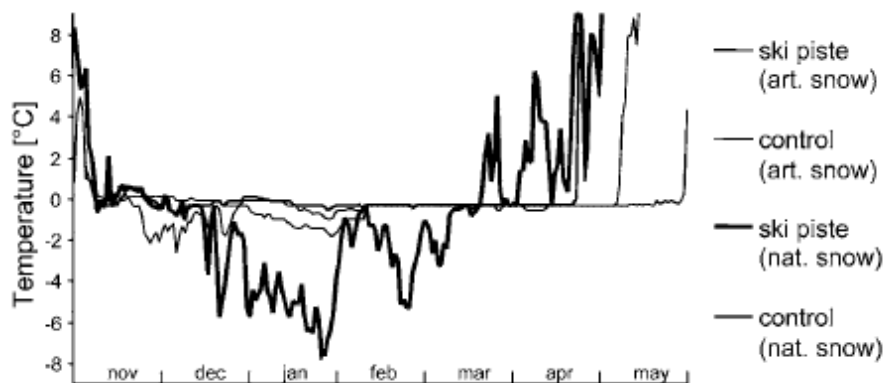


Figure 7 - Température moyenne journalière du sol dans la station de ski de Nendaz, en Suisse- (Rixen *et al.*, 2004)

Sur ce graphique présentant TG en fonction des mois hivernaux, on observe que la température moyenne saisonnière s'abaisse sous la piste damée (en neige naturelle et artificielle), de 1°C en moyenne.

A notre connaissance, aucun modèle numérique n'a été employé pour simuler ce phénomène. L'objectif de cette section est d'évaluer la capacité du modèle Crocus à identifier et reproduire ce comportement. Nous avons effectué des simulations avec Crocus et vérifié les résultats en les comparant aux observations terrain. L'analyse de ces observations se placera également dans le contexte de récentes améliorations du schéma de sol ISBA-DIF de SURFEX, dont l'impact sur le profil du manteau neigeux simulé sera discuté.

1. Description des manips

L'expérience a été réalisée sur le plateau de Gève à Autrans (première partie). La campagne de mesure s'étend du 21 novembre 2015, jour où les capteurs de température ont été installés (*Figure 9*) au 10 mai 2016. Deux sites ont été comparés :

- Un site en neige naturelle damée (piste de ski)
- Un site de référence, en neige naturelle, sans perturbations extérieures

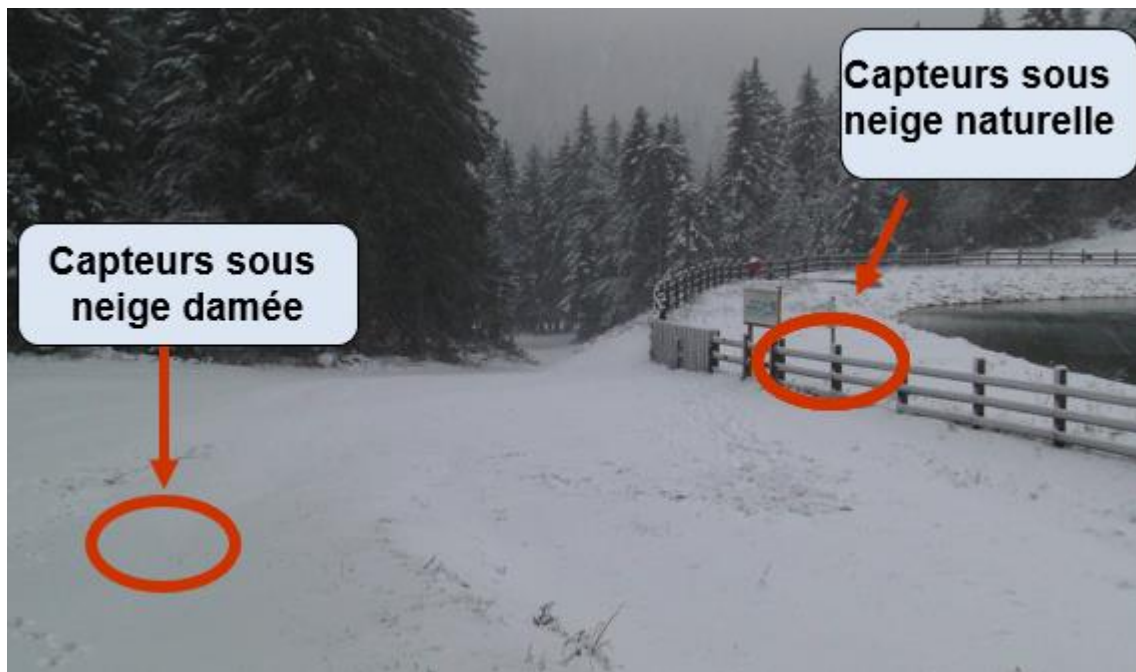


Figure 8 - Emplacement des capteurs de température, i-buttons, sur le plateau de Gève
(Source : P. Spandre & M. Lejeune)

Ces capteurs de température appelés « I-buttons » disposent :

- d'un pas d'acquisition de 2h
- d'une autonomie d'un an
- d'une résolution de 0,5°C
- d'une précision de 0,5°C



Figure 9 – Capteur I-button (de la taille d'une pile de montre)

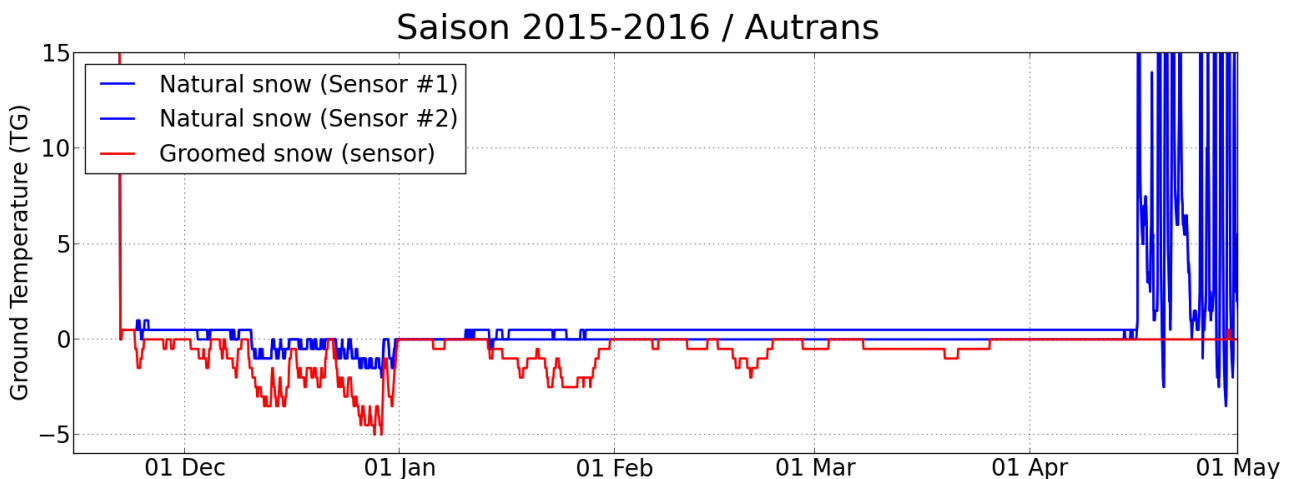
Ils sont globalement bon marché, facile à exploiter et assez robustes pour passer un hiver sous la neige. Il y a deux capteurs par sites pour limiter les imprécisions et parer à l'éventuel disfonctionnement d'un des deux. Ces capteurs ont été disposés dans un support, au niveau du sol (*Figure 10*, capteurs en sac étanche au centre de la plaque).



Figure 10 - Support et i-buttons au centre (Source : P. Spandre & M. Lejeune)

2. Température sous couvert neigeux naturel

Le graphique suivant présente les valeurs des températures enregistrées par les i-buttons tout au long de la campagne de mesure. Un des deux capteurs installés sur le site de neige damée (en rouge) n'est pas représenté à cause d'un disfonctionnement de l'appareil.



Graphique 2- Evolution de TG sous neige damée (rouge) et neige naturelle (bleu) au cours de la saison hivernale

Nous observons une très faible différence, entre les valeurs enregistrées par les deux capteurs sous neige naturelle (Sensor #1 et Sensor #2) : différence sur la température moyenne saisonnière < 0,1°C.

Les pics de température sous neige naturelle (bleu) après mi-avril correspondent à l'absence totale de neige suite à sa fonte printanière. Sur la fin de cette campagne, on peut observer les cycles diurnes (pics et creux de température dû au cycle jour/nuit).

Le constat n'est pas le même sur le profil en rouge. Cela est expliqué par le fait qu'il restait 20cm de neige au-dessus des capteurs au moment où nous les avons récupérés (début du mois de mai).

On remarque aisément que lors des périodes de froid, l'intensité est plus grande sous neige damée. En effet, sur le profil de neige naturelle (bleu), on constate une **température moyenne saisonnière**

de + 0,13°C, de novembre à mi-avril. Alors que le profil de neige damée (rouge) indique sur la même période une **température moyenne saisonnière de – 0,9°C**.

La fréquence de ces périodes de froid est nettement plus importante sous neige damée. On note environ 8 évènements clairement appréciés par le profil rouge pour seulement 3 par le bleu.

3. Impact du damage

L'idée est de superposer les observations réalisées sur le terrain avec le profil modélisé par Crocus-Resort. Les données météorologiques alimentées par SAFRAN ayant été **corrigées** dans la 1^{ère} partie.

- TG, par les capteurs i-button
- HTN
- Densité
- SWE

Sur le graphique 3 (référence neige naturelle), les observations (des capteurs i-button) indiquent une seule période de froid: autour du 25/12.

On remarque qu'une période de gel du sol, avec TG négative autour de cette date, est perçue par Crocus-Resort (en noir). En effet, l'épaisseur du manteau neigeux à cette période est très faible. La couche « isolante » est donc très fine. Ce modèle aurait en revanche tendance à surestimer l'intensité de cette baisse de température.

Sur le graphique 4 (neige damée), 6 des 8 évènements de froid intense, observés par les capteurs, sont simulés par Crocus-Resort. Cette fois ci par contre, le modèle aurait tendance à sous-estimer la pénétration du froid à travers le manteau.

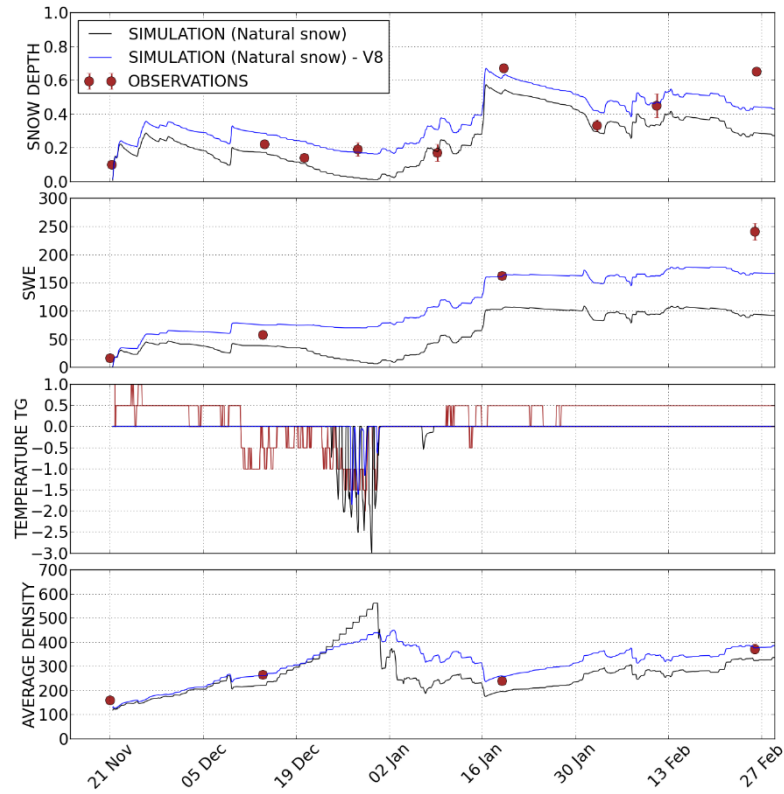
4. Impact du nouveau schéma de sol (version V8)

Des améliorations récentes de la composante sol : ISBA-DIF ont été apportées avec un impact sur les simulations du manteau neigeux mal connu. Nous allons l'appliquer à notre situation pour en apprécier les répercussions. Les graphiques suivants sont similaires à ceux du dessus, la simulation est effectuée cette fois ci par Crocus-Resort couplé à la version modifiée d'ISBA (en bleu). Ces simulations seront désignées par le terme : Crocus-Resort (V8).

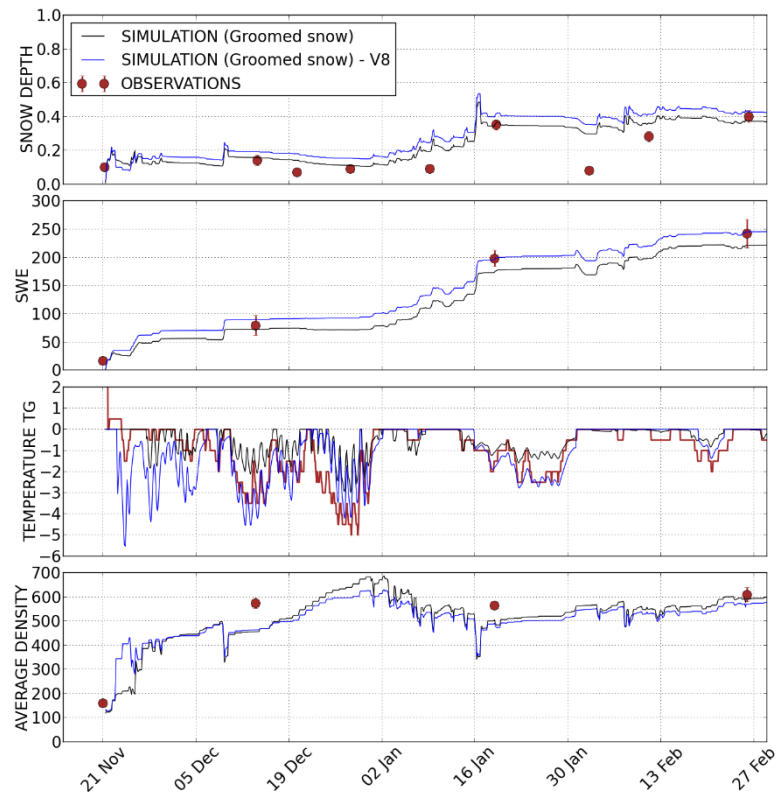
Avec la simulation de Crocus-Resort (V8), la période de froid du 25/12 et aussi prise en compte mais son intensité est mieux quantifiée.

Le suivi du comportement de la température (*graphique 4 et tableau 1*) est plus cohérent avec les observations. Les 8 phases de froid intense sont relevées (*graphique 4*) avec des valeurs plus justes. A part en début de saison où les températures simulées sont nettement plus faible que les observations. Ce phénomène peut être dû à la faible épaisseur du manteau neigeux.

Les graphiques suivants présentent (de haut en bas) HTN, SWE, TG et la densité en fonction de la date. Nous nous concentrons particulièrement sur « Ground Surf. Temp. », la température du sol TG. Le graphique 3 représente le site de neige naturelle (natural snow) tandis que le graphique 4 évoque le site de neige damée (groomed snow).



Graphique 3 - Simulation du manteau neigeux naturel par l'ancien modèle (noir), ISBA-Crocus-V8 (bleu) et les observations (rouge)



Graphique 4 - Simulation du manteau neigeux damé par l'ancien modèle (noir), ISBA-Crocus-V8 (bleu) et les observations (rouge)

Référence neige naturelle		
Modèle	Moyenne (°C)	Erreur moyenne (°C)
Crocus-Resort	-0.068	-0.162
Crocus-Resort (V8)	-0.011	-0.105
Observations	0.094	

Neige damée		
Modèle	Moyenne (°C)	Erreur moyenne (°C)
Crocus-Resort	-0.491	0.413
Crocus-Resort (V8)	-1.04	-0.137
Observations	-0.905	

Tableau 1 - Température moyenne de l'interface sol/neige entre le 21/11 et le 29/02. L'erreur moyenne des modèles est calculée par rapport aux observations.

Les températures observées et simulées, par les deux versions du modèle, sont cohérentes en neige naturelle (valeur moyenne de 0°C, erreur < 0.2°C).

Les températures observées et simulées par crocus-Resort (V8) sous la neige damée sont cohérentes avec une température moyenne de respectivement -0.9°C et -1°C. En revanche, la température moyenne simulée par Crocus-Resort est de -0.49°C avec une erreur moyenne de 0.41°C.

5. Discussions

- La version V8 semble plus performante que l'ancienne composante de SURFEX. L'évolution saisonnière de température simulée par Crocus-Resort (V8) est plus cohérente avec les observations. En effet, la température moyenne du sol, entre la neige naturelle et la neige damée, s'abaisse de 1°C pour les observations et la simulation de Crocus-Resort (V8) tandis qu'elle ne s'abaisse que de 0.5°C avec l'ancienne version.
- Ces observations ainsi que la modélisation par Crocus-Resort (V8) retrouvent les résultats des travaux de (*Rixen et al., 2004*). Ces résultats prouvent une certaine fiabilité du modèle.

6. Perspectives

- L'étude de la température du sol pourrait être effectuée sur un site de neige de culture. Il serait aussi intéressant de répéter l'expérience au cours des prochaines saisons hivernales afin de contrôler nos résultats.
 - L'utilisation du modèle Crocus, avec sa dernière version du schéma de sol, représente un potentiel intéressant pour des recherches axées sur l'écologie et/ou l'environnement.
- Dans cette première partie, nous avons confronté les simulations de la température du sol par Crocus-Resort avec des observations et constaté une réelle cohérence entre les deux méthodes. Dans un second temps, nous chercherons à caractériser par des observations, la microstructure de la neige (damée ou de production). En effet, l'évolution de cette microstructure dans le modèle Crocus-Resort repose sur des hypothèses peu documentées jusqu'ici.

II. Caractérisation de la microstructure de la neige

L'intérêt de cette partie est de comparer deux méthodes de détermination d'une propriété physique des grains de neige : la Surface Spécifique de la neige (SSA⁸). Elle fournit une information sur le type et la taille des grains qui constituent une couche de neige (Domine *et al.*, 2007). Elle est qualifiée par le ratio de la surface d'échange air/glace d'un échantillon de neige par sa masse. Son unité est le m²/kg.

$$SSA = \frac{\text{Surface contact air - glace}}{\text{Masse glace}}$$

Les deux méthodes employées sont :

- **DUFISSS** : un outil de terrain permettant une lecture instantanée de la SSA (Gallet *et al.*, 2009)
- **Le traitement d'images photos**. Après avoir photographié l'échantillon de neige, une méthode permet de déterminer le rayon de courbure moyen des grains de neige (Lesaffre *et al.*, 1998).

La comparaison de ces deux méthodes permettra d'évaluer la forme des grains de neige de production et ceux sur piste damée. Ces caractéristiques seront utiles afin de définir la paramétrisation des grains, appliquée à la modélisation de Crocus-Resort.

1. Observations avec DUFISSS

L'outil DUFISSS permet d'obtenir en direct la valeur de SSA d'un prélèvement de neige. Nous ferons une très brève explication de son fonctionnement (*Figure 11*). La différence (delta) entre le signal envoyé par le rayon laser (photodiode) et la valeur contrôlée au moment de sa réception sur la diode permet d'apprécier, via une calibration spécifique de la longueur d'onde, la SSA de l'échantillon testé.

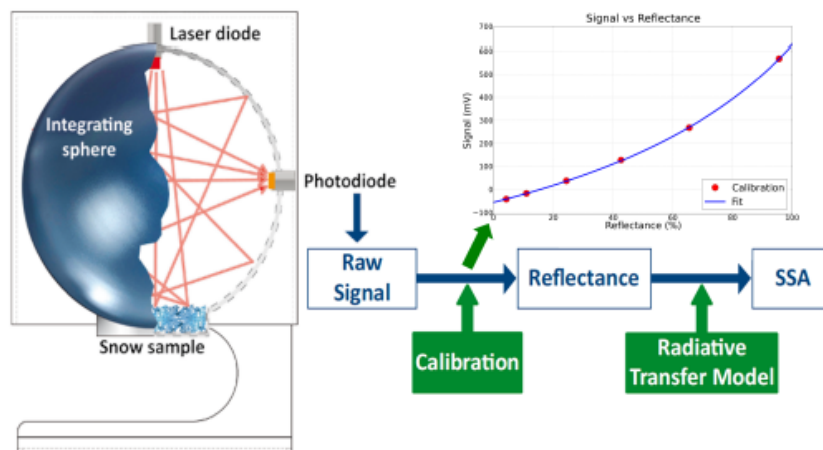


Figure 11- Schéma de fonctionnement de l'outil DUFISSS, (« Snow sample » = échantillon de neige) (Carmagnola *et al.*, 2013)

Nous avons récolté plusieurs échantillons, sur le domaine des 2 Alpes, de neige de culture et de grains sur piste damée. Puis les valeurs ont été informatisées afin de les exploiter.

⁸ Specific Surface Area

2. Collecte et traitement des images

Cette méthode consiste à prendre des photos des mêmes échantillons que pour DUFISSS puis à traiter ces images à l'aide d'une méthode développée au CEN à la fin des années 1990 (Lesaffre *et al.*, 1998). Cette méthode localise les grains en effectuant une différence de ton d'image (Figure 12).

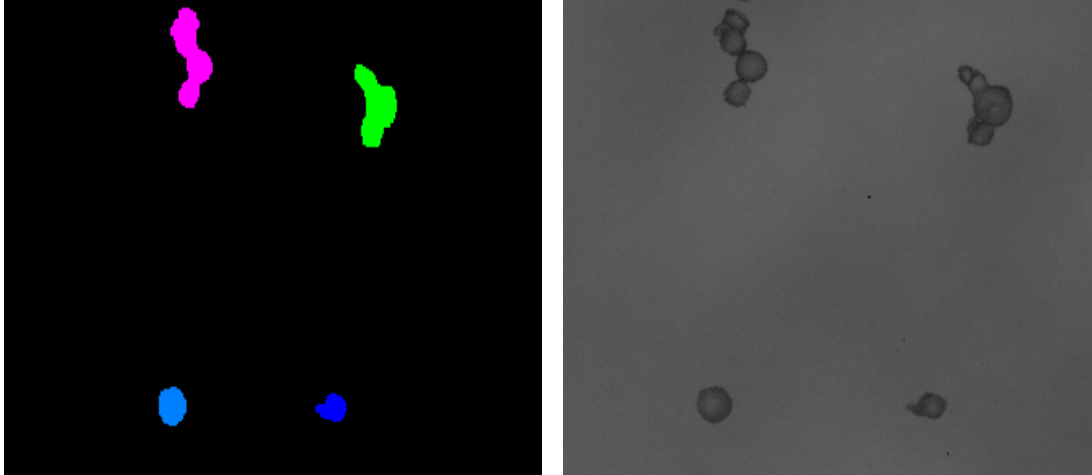


Figure 12 - Localisation des grains avant caractérisation

Le rayon de courbure moyen des grains est ensuite calculé. Ce rayon moyen peut être associé à la SSA dans l'hypothèse que les grains de neige peuvent être assimilés à des billes parfaites. L'expression de la SSA suit alors la relation suivante :

$$SSA (m^2 kg^{-1}) = \frac{4 * \pi * r^2}{\frac{4}{3} * \pi * r^3 * \rho_{glace}} = \frac{6}{d * \rho_{glace}}$$

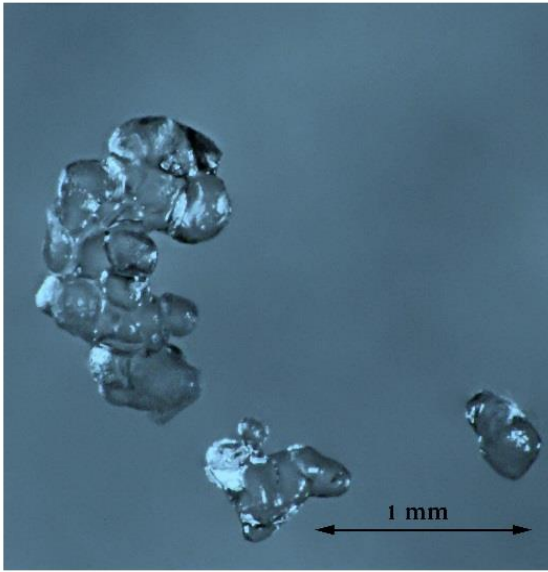
Avec

r, le rayon de courbure moyen des grains de neige et $d = 2*r$ le diamètre (m)

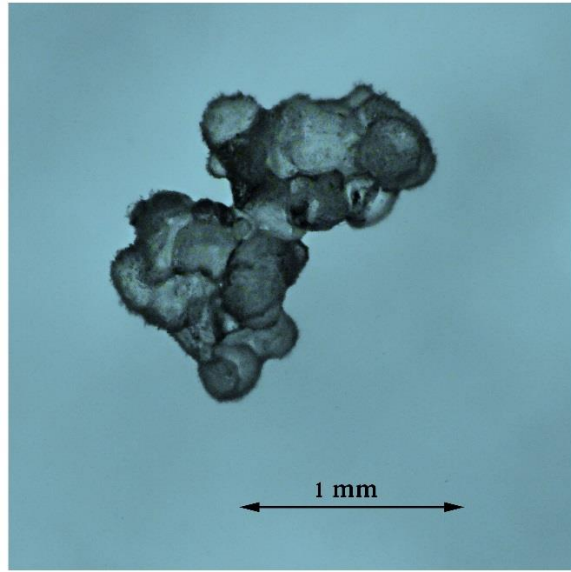
ρ_{glace} , la masse volumique de la glace (917 kg/m³ à 0°C)

La SSA est donc proportionnelle à $1/d$ dans cette hypothèse. Par conséquent, plus la SSA est faible, plus le diamètre et la sphéricité du grain sont importants.

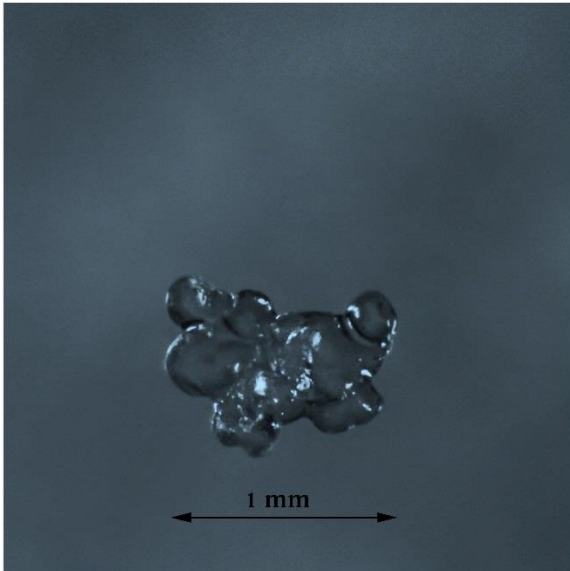
Figures 13 – A,B,C,D et E - Grains de neige de culture (à l'échelle)



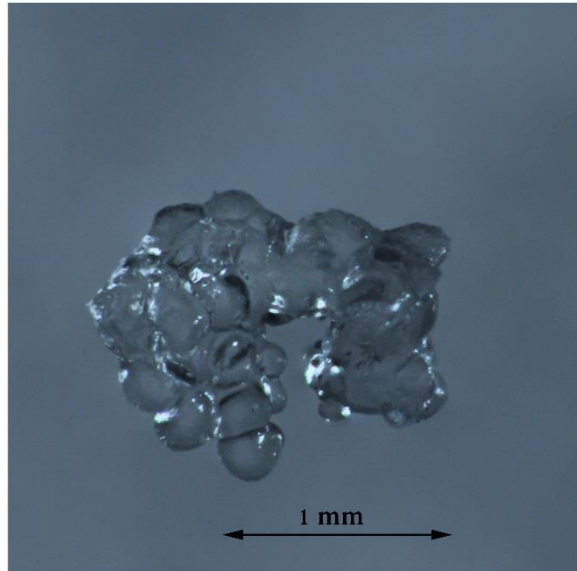
A



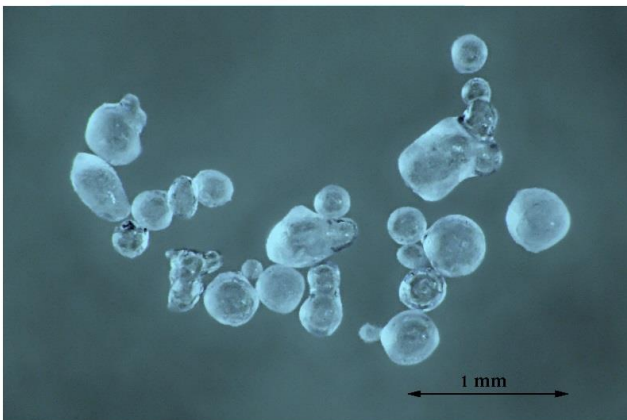
B



C



D



E

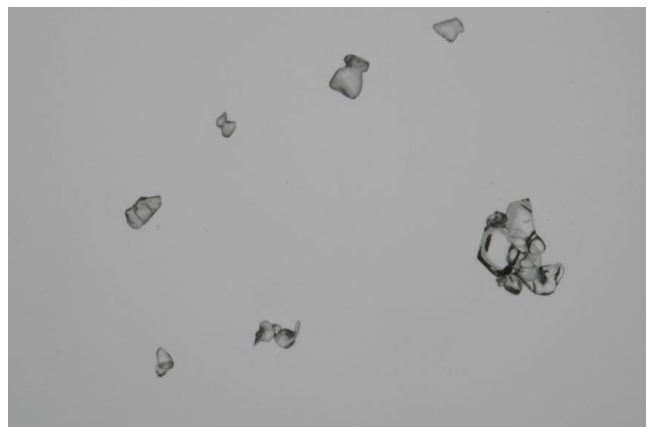
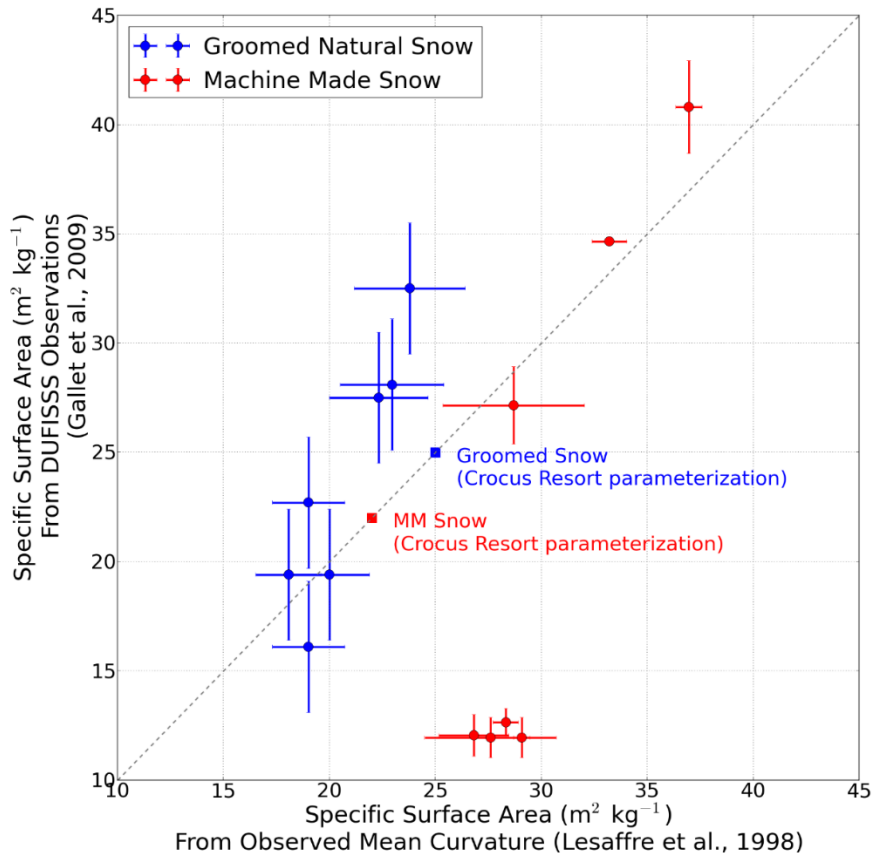


Figure 14 - Grains de neige damée (non échelonné)

3. Comparaison des 2 méthodes

Le graphique suivant présente les résultats de SSA par DUFISSS en fonction de ceux déterminés par le traitement d'image.



Graphique 5 - Les 2 méthodes de SSA pour la neige de production (rouge) et neige damée (bleu)

4. Résultats

- La taille des grains diminue en allant du coin haut-droite vers le coin bas-gauche.
- Pour la neige damée (bleu), les échantillons suivent assez bien la relation linéaire $x = y$. On note cependant quelques points au-dessus de la droite, du fait de leur petitesse ou de leur forme légèrement anguleuse (Figure 14).
- Les échantillons de neige de production suivent aussi cette tendance pour les petits grains. En revanche, en dessous de 25 m²/kg, la SSA mesurée par DUFISSS est très faible comparée au traitement d'image.

5. Discussions

- L'hypothèse des grains sphériques (*Figures 13*) semble raisonnable pour la neige damée mais reste discutable pour la neige de culture. Il serait important de prendre en compte la non-linéarité de ce comportement pour les études antérieures.
- En effet, au sein du nuage de particules d'eaux projetées par un enneigeur, la formation en neige n'est probablement pas homogène. Au centre du nuage, la teneur en eau liquide est telle que la surface d'échange air/glace (facilitant le changement de phase liquide/solide) est réduite. Les particules auront donc tendance à se coller (coalescence, capillarité) pour devenir des amas de grains : des agglomérats. Ces derniers, de faible SSA, se retrouvent groupés sur la graphique 5 ($y = \text{SSA DUFISSS} \sim 12 \text{ m}^2/\text{kg}$, $x = \text{SSA image} \sim 27 \text{ m}^2/\text{kg}$).
- Dans l'élaboration du modèle Crocus-Resort, la paramétrisation de la SSA pour la neige de culture (MM snow) et la neige damée (Grommed snow) a été définie ainsi (*Graphique 5*) :
 - MM snow (Crocus Resort parameterization), $\text{SSA} = 22 \text{ m}^2/\text{kg}$
 - Grommed snow (Crocus Resort parameterization), $\text{SSA} = 25 \text{ m}^2/\text{kg}$

C'est par le biais de travaux d'observations que les grains de neige damée ont pu être examinés comme des billes parfaites et c'est simplement par des hypothèses que les grains issus de neige de production ont aussi été imaginés comme tels.

L'expérience effectuée ici, en comparant les résultats de DUFISSS et le traitement des images, montre qu'il n'existe pas une homogénéité de la parfaite sphéricité des grains de neige de production. Cet élément est à prendre en compte et pourra être utile pour l'évolution du modèle Crocus-Resort.

III. Conclusion

Le travail de la neige (damage et neige de culture) provoque des changements non négligeables dans la composition et le comportement du manteau neigeux. Nous décrivons ici deux variables impactées par le damage et la production de neige: la température de surface du sol et la microstructure des couches de neiges. Les expériences et campagnes de mesures réalisées sur les 4 domaines alpins ont permis d'observer ces phénomènes et d'évaluer les simulations par le modèle Crocus-Resort. L'expertise des forçages décrite dans ce rapport a été agencée de la manière la plus rigoureuse possible afin d'obtenir une solide référence neige naturelle.

L'impact du damage est explicitement perçu. En effet, les observations et la simulation du modèle ont permis d'affirmer une certaine densification après passage des dameuses (entre 400 et 500 kg/m³). Ce tassement entraîne une pénétration du froid à travers le manteau neigeux plus fréquente et plus intense. L'écart de 1°C entre la température moyenne saisonnière de l'interface sol-neige sous neige damée par rapport à la neige naturelle a pu être observé et simulé. Cette modification de température de surface du sol aura des incidences sur la végétation et la faune se réfugiant l'hiver sous les pistes de ski. Une seconde conséquence de ce phénomène est l'allongement de la saison : fonte totale des neiges retardée (Keller *et al.*, 2004, Rixen *et al.*, 2001).

Les températures de l'interface sol-neige simulées par Crocus-Resort couplé avec le nouveau schéma de sol semblent plus réalistes qu'avec l'ancien schéma de sol. Les scores sont significativement améliorés en neige damée (erreur moyenne < 0.14°C contre 0.4°C pour l'ancienne version). Ce résultat suggère que cette nouvelle version est plus performante dans cette situation et pourrait être utilisée pour des études ultérieures.

La microstructure de la neige de culture (SSA = 22 m²/kg) et neige damée (SSA = 25 m²/kg) est prise en compte dans le modèle Crocus-Resort. Nous avons cependant constaté que cette paramétrisation des caractéristiques de la microstructure n'est pas singulière. La formation d'agglomérats de neige de culture entraîne une nette diminution de la SSA observée.

Enfin, la crédibilité apportée au modèle Crocus-Resort (associé aux dernières évolutions du schéma de sol) ouvre de belles perspectives :

- Il est désormais possible de simuler l'évolution saisonnière du manteau neigeux d'une zone géographique pour laquelle nous ne disposons pas d'observations terrain tout en garantissant la fiabilité du résultat. Cette démarche est aussi envisageable pour des périodes temporelles antérieures ne comportant pas d'observations.
- Le modèle pourrait aussi être utilisé par les professionnels des pistes comme un outil d'aide à la décision. Cet élément leur permettrait de mieux « prévoir » l'évolution du manteau neigeux des domaines skiables. Entraînant une optimisation de la gestion de la neige, notamment sur la quantité de production de neige de culture (et donc de la consommation d'eau et d'énergie électrique).

IV. Bibliographie

- ARNAUD L., MORIN S., 2013.- « Snow spectral albedo at Summit, Greenland: measurements and numerical simulations based on physical and chemical properties of the snowpack ». *The Cryosphere*, Vol. 7, n° 4, pp. 1139-1160.
- BRUN E., DAVID P., SUDUL M., BRUNOT G., 1992.- « A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting ». *J. Glaciol.*, Vol. 38, n° 128, pp. 13 - 22.
- CARMAGNOLA C.M., DOMINE F., DUMONT M., WRIGHT P., STRELLIS B., BERGIN M., DIBB J., PICARD G., LIBOIS Q., DOMINE F., TAILLANDIER A.S., SIMPSON W.R., 2007.- « A parameterization of the specific surface area of seasonal snow for field use and for models of snowpack evolution ». *J. Geophys. Res.*, Vol. 112, pp. F02031.
- DSF, 2011.- L'observatoires - Indicateurs et Analyses. Domaines Skiabiles de France, <http://www.domaines-skiabiles.fr/downloads/uploads/OBSERVATOIRERecueilIndicateur2011BD.pdf>.
- DURAND Y., BRUN E., L. M., GUYOMARCH G., LESAFFRE B., MARTIN E., 1993.- « A meteorological estimation of relevant parameters for snow models ». *Ann. Glaciol.*, Vol. 18, pp. 65-71, <http://www.igsoc.org/annals/18/>.
- DURAND Y., GIRAUD G., LATERNSE M., ETCHEVERS P., L. M., LESAFFRE B., 2009.- « Reanalysis of 47 Years of Climate in the French Alps (1958--2005): Climatology and Trends for Snow Cover ». *J. Appl. Meteor. Climat.*, Vol. 48, pp. 2487-2512, doi 10.1175/2009JAMC1810.1.
- FAUVE M., RHYNER H., SCHNEEBELI M., SCHNEEBELI M., SCHNEEBELI M., 2002.- *Preparation and maintenance of pistes: handbook for practitioners*. Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research SLF.
- GALLET J.C., DOMINE F., ZENDER C.S., PICARD G., 2009.- « Measurement of the specific surface area of snow using infrared reflectance in an integrating sphere at 1310 and 1550 nm ». *The Cryosphere*, Vol. 3, pp. 167 - 182.
- KELLER T., PIELMEIER C., RIXEN C., GADIEN F., GUSTAFSSON D., STÅH M., 2004.- « Impact of artificial snow and ski-slope grooming on snowpack properties and soil thermal regime in a sub-alpine ski area ». *Annals of Glaciology*, Vol. 38, n° 1, pp. 314-318.
- LESAFFRE B., POUATCH E., MARTIN E., 1998.- « Objective determination of snow-grain characteristics from images ». *Ann. Glaciol.*, Vol. 26, pp. 112-118.
- RIXEN C., HAEBERLI W., STOECKLI V., 2004.- « Ground temperatures under ski pistes with artificial and natural snow ». *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, Vol. 36, n° 4, pp. 419-427.
- RIXEN C., STOECKLI V., HUOVINEN C., HUOVINEN K., 2001.- « The phenology of four subalpine herbs in relation to snow cover characteristics ». *IAHS PUBLICATION*, Vol. 270, pp. 359-362.
- SPANDRE P., FRANÇOIS H., MORIN S., GEORGE-MARCELPOIL E., 2015.- « Snowmaking in the French Alps. Climatic context, existing facilities and outlook ». *Journal of Alpine Research| Revue de géographie alpine*, n° 103-2, doi 10.4000/rga.2913.
- SPANDRE P., MORIN S., LAFAYSSSE M., GEORGE-MARCELPOIL E., FRANCOIS H., LEJEUNE Y., 2016.- « Integration of snow management in a detailed snowpack model ». *Cold Reg. Sci. Technol.*
- VIONNET V., BRUN E., MORIN S., BOONE A., MARTIN E., FAROUX S., MOIGNE P.L., WILLEMET J.M., 2012.- « The detailed snowpack scheme Crocus and its implementation in SURFEX v7.2 ». *Geosci. Model. Dev.*, Vol. 5, pp. 773-791.

Nom : LEJEUNE
Prénom : Martin
Spécialité : formation d'ingénieur Polytech 4^{ème} année - EBE-GE
Entreprise : Météo-France – CEN - CNRM

Mots clés :
Manteau neigeux - neige de culture – damage - chaîne SAFRAN/SURFEX-Crocus - DUFISSS -
Crocus-Resort

Résumé

La compréhension de l'impact du damage et de la production de neige sur la composition du manteau neigeux est une étape importante afin d'évaluer l'évolution des conditions d'enneigement en station de ski. Nous évaluons la modélisation de ses conditions d'enneigement par Crocus-Resort. Ce dernier a l'avantage de prendre en compte l'influence du damage et la perturbation du manteau lié à l'apport de neige de culture. Une expérience réalisée au cours de la saison 2015/2016 à Autrans (Isère), décrit le comportement de la température de surface du sol sous un site de neige damée et naturelle et apporte des résultats satisfaisants. Un écart de température de 1°C est observé entre les deux sites. L'évolution saisonnière du manteau neigeux en sortie de la version V8 de Crocus est réaliste et l'écart de température du sol entre neige naturelle et neige damée est correctement simulé. Une seconde expérience a permis de comparer des observations de la microstructure de la neige avec la paramétrisation de Crocus-Resort. Cette étude a montré que les caractéristiques retenues dans le modèle sont raisonnables mais simplistes.

La cohérence des simulations du modèle en comparaison avec les observations confirme la fiabilité de Crocus-Resort. L'intérêt de ce modèle est certain car il sera désormais possible de modéliser (avec confiance dans les résultats) l'évolution du manteau neigeux dans les domaines skiables.