



Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement



LABORATOIRE DE GLACIOLOGIE
ET GEOPHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT
C.N.R.S / UNIVERSITE JOSEPH FOURIER – GRENOBLE I

**ANALYSE PRELIMINAIRE DE DONNEES METEOROLOGIQUES EN
CONTEXTE GLACIAIRE. CAS DE DOME C (ANTARCTIQUE, ANNEE
2010) ET DU GLACIER D'ARGENTIERE (ALPES, FRANCE, ETE 2010)**

Mémoire de recherche
Version définitive du 05 mai 2011

Charles AMORY

Encadrants:

Delphine SIX (Physicien adjoint – Corps des CNAP – SO GLACIOCLIM)

Co-encadré par Christophe Genthon (Directeur de recherche CNRS – SO GLACIOCLIM)



Glacier d'Argentière – Massif du Mont-Blanc

TUT 424
Année 2010-2011
Master de 1^{ère} année, Sciences de la Terre de l'Univers et de l'Environnement
Université Joseph Fourier
Grenoble, France

Résumé

Ce stage traite de deux cas d'étude météorologique en contexte glaciaire de haute altitude, à Dôme C (Antarctique, 3250 m d'altitude) et sur la glacier d'Argentière (Alpes françaises, de 2400 à 2800 m d'altitude).

L'analyse des données issues de deux stations météorologiques automatiques implantées à 25 km au Nord et au Sud du site de Dôme C pendant l'année 2010 a confirmé l'existence de hausses ponctuelles et de grande ampleur des températures autour du site. Ces événements chauds ont déjà été enregistrés à Dôme C même, et leur origine est encore mal connue.

L'estimation de bilans de masse estivaux pour l'année 2010 en zone d'ablation par la méthode degré-jour, pour deux profils transversaux du réseau de balises implantées sur le glacier d'Argentière dans le massif du Mont-Blanc donne des résultats encourageants. Les valeurs obtenues sont satisfaisantes comparées aux bilans de masse évalués par lecture de balises.

Abstract

This work deals with the study of two weather cases at high altitude in glacial environments at Dome C (Antarctica, 3250 m.a.s.l) and the glacier d'Argentière (French Alps, from 2400 to 2800 m.a.s.l).

The occurrence of very large increases in temperature around the site of Dome C in Antarctic was confirmed by the analysis of data provided by two automatic weather stations located 25 kilometers North and South of this site during 2010. Such variations had already been measured at Dome C and not fully understood yet. During the summer of 2010 the mass balance along two transverse profiles of the stakes network located in the ablation zone of the glacier d'Argentière have been assessed by a degree-day method. This gives interesting results in comparison to measured mass balances.

REMERCIEMENTS

Ce stage fut l'opportunité d'une approche intéressante du domaine de la recherche en glaciologie et climatologie au sein du LGGE. Mes remerciements concernent l'entièreté du laboratoire, et tout particulièrement Delphine Six pour m'avoir généreusement fourni l'occasion d'intégrer son équipe, et pour m'avoir encadré et épaulé durant ces deux mois, ainsi que Christophe Genthon pour l'avoir secondée pendant ses campagnes de terrain. Tous deux sont à l'origine d'une expérience très enrichissante.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à Delphine Six pour le temps passé à discuter nos résultats, à échanger des idées, à guider ma réflexion, et enfin pour celui accordé à la relecture de mon travail.

Sommaire

<i>Introduction</i>	5
1. Contexte de l'étude	6
1.1 Suivi d'un site en climat polaire : Dôme C.....	6
1.2 Suivi d'un glacier en climat tempéré : le glacier d'Argentièrè.....	8
1.3 Objectifs du stage.....	9
2. Le bilan de masse glaciaire : différentes méthodes d'estimation	12
2.1 Définition.....	12
2.2 Mesure d'un bilan estival par lecture de balises en zone d'ablation.....	12
2.3 Facteur degré-jour.....	13
3. Acquisition et description des données météorologiques	15
3.1 Données Antarctique et instruments de mesure.....	15
3.2 Données Météo-France et station météorologique d'Argentièrè.....	16
4. Résultats	17
4.1 Antarctique.....	17
4.1.1 Première phase de traitement.....	17
4.1.2 Analyse des températures.....	17
4.1.2.1 Décalages verticaux en hiver austral.....	18
4.1.2.2 Hausses ponctuelles et rapides des températures.....	19
4.1.2.3. Décalages en été austral.....	21
4.1.3 Comparaison Nord-Sud.....	22
4.1.3.1 Évolution annuelle des températures.....	22
4.1.3.2 Hausses ponctuelles et rapides des températures.....	23
4.2 Estimation d'un bilan de masse estival local par la méthode degré-jour au glacier d'Argentièrè.....	24
4.2.1 Comparaison des données de Chamonix et du glacier d'Argentièrè.....	24
4.2.2 Bilans de masse aux profils 4 et 7.....	24
4.2.3 Calcul du bilan de masse ponctuel à partir de la méthode degré-jour.....	26
5. Discussion	27
5.1 Dôme C.....	27
5.2 Argentièrè.....	27
<i>Conclusion</i>	30
Références bibliographiques	31
Annexes	33

Introduction

Les régions englacées sont aujourd'hui reconnues comme indicateurs sensibles de la variabilité climatique. Beaucoup d'études, en particulier menées dans les Alpes ont prouvé que les bilans de masses glaciaires de surface, soit la masse perdue ou gagnée par un glacier, sont directement liés aux variations climatiques de surface [1,2].

Avec ses plusieurs millions de km² presque exclusivement recouverts de glace, là où la cryosphère est en interaction permanente avec l'atmosphère et l'océan, l'Antarctique apparaît aussi comme un élément clé dans l'appréhension des processus qui affectent le climat [3].

Des données sur les fluctuations glaciaires existent depuis plus d'un demi-siècle pour les Alpes françaises. En revanche, des mesures météorologiques se sont amorcées depuis quelques années seulement en France à haute altitude. Même si l'acquisition de ce type de données s'est aussi récemment initiée pour l'Antarctique, leur trop faible densité ne permet pas encore l'interprétation des variations du climat local [4].

C'est dans un objectif de compréhension de la relation entre le climat et les fluctuations des glaciers et calottes polaires que s'inscrit ce stage. Il se concentre d'une part sur l'analyse de la série de mesures effectuées à Dôme C en Antarctique pour la saison 2010-2011, et d'autre part sur la comparaison de la quantification de l'ablation locale au cours de l'été 2010 par la méthode degré-jour avec celle mesurée directement à partir d'un réseau de balises pour deux profils transversaux, pour le glacier d'Argentière dans le Massif du Mont-Blanc. Ces deux sites comptent parmi les régions les plus activement surveillées par le Service d'Observation GLACIOCLIM, dont les objectifs sont précisés plus bas. Le jeu de données météorologiques d'Argentière disponible depuis 2006, et celui issu des stations météorologiques automatiques d'Antarctique implantées en 2010 n'ont pas encore fait l'objet de recherches détaillées.

Une description des circonstances de travail sera d'abord proposée, suivie par une exposition des méthodes d'estimation et de calcul de bilan de masse utilisées au cours du stage. Par la

suite, l'acquisition des données et les résultats de leur analyse préliminaire seront respectivement détaillés. Une discussion des résultats viendra clore la présentation.

1. Contexte de l'étude

Si la tendance au déclin des glaciers est initiée depuis le début du XIX siècle pour l'ensemble du Massif Alpin, en revanche les années peuvent être très contrastées. Ainsi en 2009, les bilans des glaciers sont extrêmement déficitaires (l'un des bilans les plus déficitaires depuis le début du siècle dernier), alors que ceux de 2010 sont proches des moyennes sur les trente dernières années [2, 5]. Seule l'interprétation des données météorologiques, associées à des mesures sol et satellites de variations de volume permettent d'interpréter et de comprendre ces résultats.

Le service d'observation GLACIOCLIM créé en 2001 par le LGGE, a pour but de constituer une base de données glacio-météorologiques sur le long terme afin d'étudier entre autres la relation climat-glacier, c'est-à-dire comprendre les relations entre les variations climatiques et les bilans de masse glaciaires, dans des zones climatiques variées. Le glacier d'Argentière, dans le massif du Mont-Blanc, et le site de Dôme C en Antarctique, respectivement représentatif d'un climat tempéré et polaire sont suivis dans le cadre de GLACIOCLIM.

1.1 Suivi d'un site en climat polaire : Dôme C

L'Antarctique concentre près de 90% des glaces terrestres sur une superficie de 24 fois la France. Sur les côtes, la température moyenne annuelle est d'environ -10°C , et les extrêmes saisonniers varient de 0 à -30°C . En revanche, ces chiffres chutent considérablement en s'avancant à l'intérieur du continent. Avec une moyenne annuelle de -50°C à Dôme C à 3250 m d'altitude (environ -30°C pour janvier et février, soit les 2 mois les plus chauds, et une

moyenne d'environ -60°C pour le reste de l'année) et des précipitations annuelles inférieures à 5 cm d'équivalent en eau, parfois même à 2 cm [3, 6], c'est le continent le plus sec et le plus froid du monde. Bien que la première base de recherche fut implantée par les américains en 1957 (Byrd Station), c'est pour ses particularités climatiques et atmosphériques singulières (faible ensoleillement, isolement par le courant océanique circumpolaire Antarctique, fort pouvoir réfléchissant de la glace où près de 80% des rayons lumineux sont réfléchis vers l'atmosphère) que l'Antarctique a d'abord fait l'objet d'études menées surtout par des astronomes à la fin des années 70 sur la variabilité de paramètres météorologiques, dont dépend la performance des instruments d'observation spatiale. Par exemple, situé à 1200 km à l'intérieur du continent sur un des dômes du plateau antarctique, le site de Dôme C (*figure 1*) est depuis plus de trente ans sujet à diverses campagnes de tests et de mesures, et offre également des conditions optimales d'observation en raison de son excellente transparence céleste et de la faible turbulence atmosphérique qui y règne [7].

La volonté grandissante de comprendre et de modéliser les variations climatiques a entraîné la multiplication de campagnes de mesures en Antarctique et l'utilisation des données météorologiques anciennement acquises dans le cadre de recherches plus larges (ex : programme nord-américain AMRC pour Antarctic Meteorological Research Center), et l'implantation de stations météorologiques sur le littoral et à l'intérieur du continent.

Depuis 2004 l'observatoire GLACIOCLIM-SAMBA (SurfAce Mass Balance of Antarctica), composante du service d'observation GLACIOCLIM dédiée à l'Antarctique, a déployé un système de surveillance de l'accumulation neigeuse au sommet du Dôme C, complété en 2007 par une tour de mesures météorologiques de 45 m de haut. Deux autres systèmes de mesure de l'accumulation neigeuse ont été mis en place en 2006 à 25 km au Nord et au Sud du dôme, auxquels se sont ajoutées deux stations météorologiques automatiques en 2010.

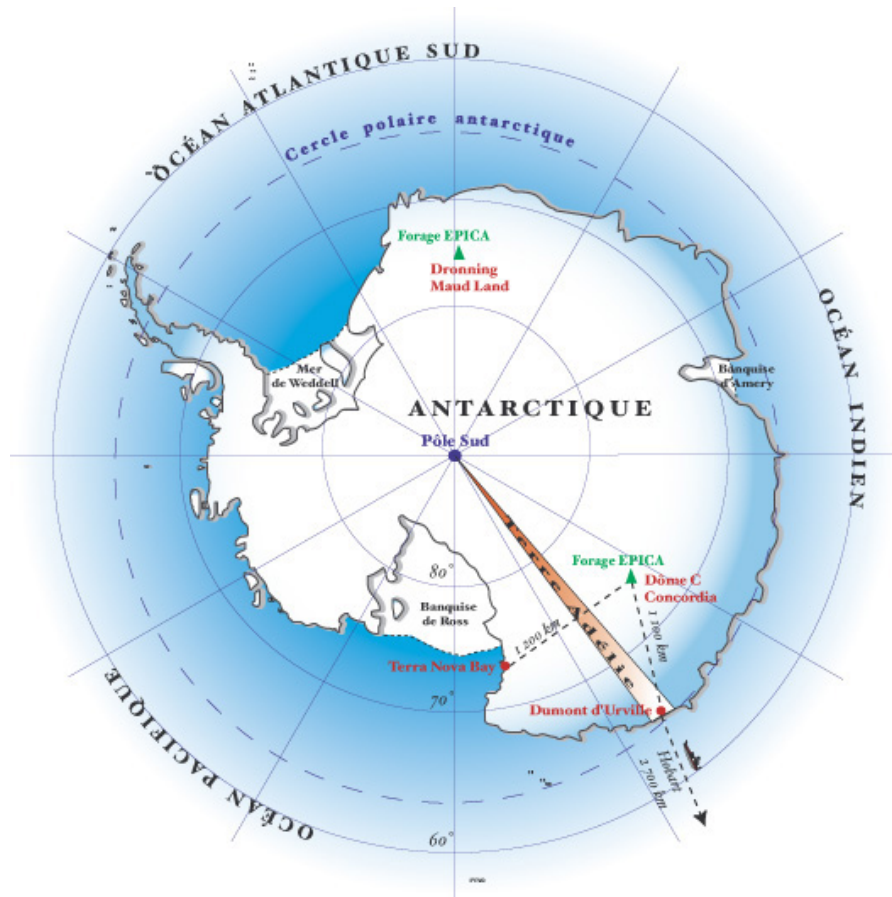


Figure 1 : Carte de situation de l'Antarctique présentant le site de Dôme C (hémisphère Sud)

- latitude 75°06.06S, longitude 123°20.74E

1.2 Suivi d'un glacier en climat tempéré : le glacier d'Argentière

Le glacier d'Argentière (*figure 2*) est situé dans le Massif du Mont-Blanc (Haute-savoie, France). Il s'écoule en direction du village d'Argentière sur une surface de 19km² entre 3600 et 1600 m d'altitude. C'est un glacier tempéré (température de toute la glace égale à 0°C).

Le glacier du Tour Noir, affluent du glacier d'Argentière présente une orientation globale E-W et une pente moyenne de 25°. Il culmine à environ 3500 m, et rejoint le glacier d'Argentière 800 mètres plus bas. Ce dernier, relativement plus plat, montre une orientation globale N-S. Pourtant situés dans le même bassin versant (*figure 3*) et donc soumis au même climat local, le glacier du Tour Noir montre une ablation plus importante que celui

d'Argentière. Cependant, la méthode degré-jour simule une fonte identique pour deux sites de même altitude (haut du profil 7 et bas du glacier du Tour Noir) dont la fonte est différente [5]. Cette méthode, qui donne une estimation du bilan de masse de surface d'un glacier à partir des températures positives à sa surface, doit permettre à plus large échéance d'étudier la sensibilité respective de chacun des deux glaciers au climat, et de discuter de la contribution de l'orientation et de la pente à cette sensibilité.

1.3 Objectifs du stage

Une certaine familiarisation avec des notions et techniques d'études du milieu glaciaire (notions de glaciers et calotte polaire, bilan de masse et calcul de bilans de masse, relation climat-glacier, ligne d'équilibre, zones d'ablation et d'accumulation, techniques de mesures glaciologiques, Antarctique), et avec des méthodes d'acquisition de données météorologiques (instrumentation et variables météorologiques, capteurs, traitement de données, notion de couche limite) constitue les objectifs de ce stage.

Il s'est amorcé par l'analyse des données de la saison 2010-2011 à Dôme C issues des deux stations météo Nord et Sud, dans le but de discuter leur pertinence, plus particulièrement celle des températures, ainsi que la performance des capteurs qui ont permis leur acquisition, pour ensuite proposer des directions plus précises vers lesquelles poursuivre les recherches.

En vue de la préparation d'une nouvelle campagne à Dôme C, suite à un problème d'acquisition et au regard de leur caractère unique, il était nécessaire de traiter au plus tôt les données de cette première année de mesure.

Il s'est poursuivi par l'évaluation d'un bilan de masse local à partir de relevés d'un réseau de balises en zone d'ablation, organisé en profils transversaux (profil 4 et 7, *figure 3*) pour l'été 2010 (de mai à septembre) sur le glacier d'Argentière, et la comparaison de ces résultats avec

ceux obtenus avec la méthode degré-jour. La station météo vieillissante installée sur le glacier et les données non traitées à ce jour nécessitaient également un investissement rapide sur ce sujet.



Figure 2 : Vallée de Chamonix (cliché Google Earth). Le trait rouge marque les contours du glacier d'Argentière - latitude 45°57.29N, longitude 6°58.47E

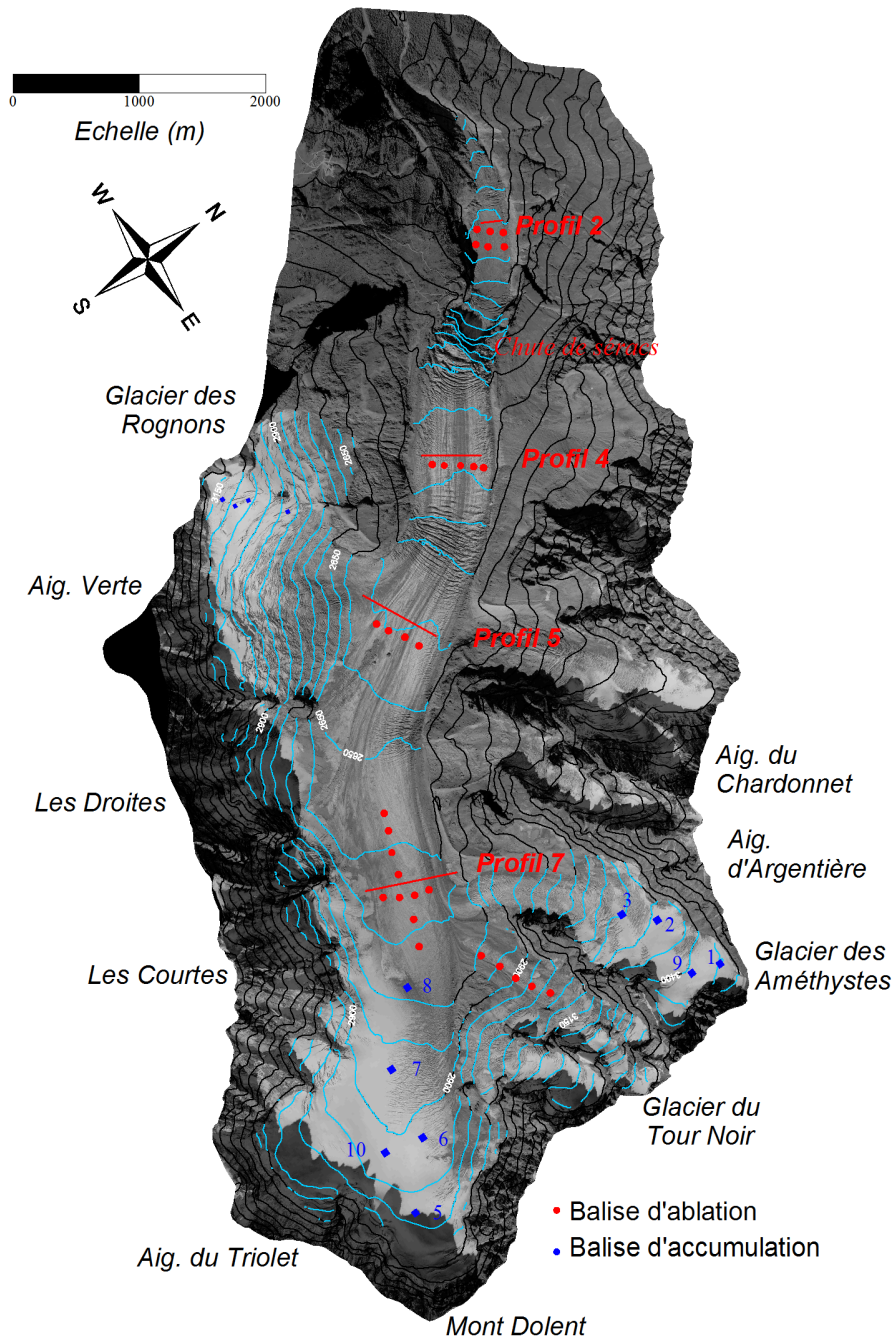


Figure 3 : Carte du glacier d'Argentière. Situation du glacier du Tour Noir, des profils 4 et 7 (lignes rouges) et des balises d'accumulation (points bleus) et d'ablation (points rouges). Le fond de carte est tiré de la restitution photogrammétrique de 2003 (par Christian Vincent). Aux profils 4 et 7, les numéros de balises mentionnés dans ce rapport sont les balises 1 à 5 à chacun des profils transversaux. La balise 1 est en rive droite, la 5 est en rive gauche.

2. Le bilan de masse glaciaire : différentes méthodes d'estimation

2.1 Définition

Le bilan de masse en un point de surface d'un glacier correspond à la masse perdue (par fonte, par sublimation) ou gagnée (par accumulation provenant des précipitations solides, des coulées de neige, de la redistribution de la neige par le vent, du regel de l'eau de surface, etc...) par le glacier en un point donné et pour une période donnée. Le bilan de masse de surface est ainsi directement lié aux conditions météorologiques de surface. Selon le site, l'altitude, ou l'exposition, l'influence des conditions météorologiques sur les bilans de masse de surface n'est pas la même. La variabilité spatiale de ces bilans est donc très importante sur un même glacier, et des comparaisons dans le temps nécessitent des points de mesure situés rigoureusement aux mêmes endroits.

Les bilans de masse de surface sont donc des estimations de l'ablation et/ou de l'accumulation subie par un glacier en des endroits donnés. Rapportées à l'ensemble du glacier pour un bilan de masse total, ces estimations en différents points expriment la variation de volume d'un glacier, en lame d'eau équivalente. Plusieurs façons de mesurer et/ou de calculer un bilan de masse peuvent être envisagées. Une méthode de mesure et une de calcul du bilan de masse estival en zone d'ablation sont présentées dans ce rapport.

2.2 Mesure d'un bilan estival par lecture de balises en zone d'ablation

L'implantation d'un réseau de balises (jalons en bois) enfouies dans la glace à la surface du glacier et le suivi de l'évolution de leur émergence au long de l'été permettent d'accéder au bilan estival en zone d'ablation.

Le bilan estival local est la différence d'émergence de la balise entre deux relevés à un temps t et $t+1$, en mètre d'eau, tenant compte de la densité de glace ou du névé en cas de présence de névé au cours de l'été.

2.3 Facteur degré-jour

La méthode degré-jour simule la fonte estivale d'un glacier à partir des températures positives mesurées (ou théoriques, c'est-à-dire calculées à partir de gradients thermiques altitudinaux moyens) à la surface du glacier. Cette méthode a l'avantage de permettre une estimation de l'ablation de régions glaciaires difficilement accessibles et où peu, voire aucune mesure n'a été effectuée. Elle intervient aussi dans la reconstitution de l'évolution de lignes d'équilibre (soit la limite fictive qui marque la frontière sur le glacier entre la zone d'accumulation et la zone d'ablation) par combinaison avec des images satellites [8].

Comme la température de l'air est généralement le paramètre le moins variable sur une grande étendue et le plus disponible par le passé, la méthode degré-jour est très utilisée pour estimer la fonte de neige et/ou de glace à la surface de cette même aire, même si elle ne rend pas compte de tous les processus physiques impliqués dans la fusion de la surface d'un glacier. Cette méthode établit une relation linéaire empirique entre la fusion et la température positive de l'air :

$$M = \begin{cases} (1/n) DDF_{\text{snow/ice}} T & T > 0 \\ 0 & T \leq 0 \end{cases}$$

où DDF est le facteur degré-jour (Degree-Day Factor ; $\text{mm.d}^{-1}.\text{°C}^{-1}$) qui diffère pour la neige et la glace et est calibré pour un site donné ; T est la température de l'air sur le glacier ; n est le nombre de mesures par jour ; M quantifie la fusion occasionnée par la température positive, en mm d'équivalent en eau pour le pas de temps donné par n .

L'état de la surface du glacier (neige fraîche qui renvoie fortement une partie de ce rayonnement solaire ou glace sale qui absorbe ce rayonnement et fond d'autant plus) influence nettement l'ablation. Il importe donc de savoir si la surface pour laquelle on estime la fonte par la méthode degré-jour est recouverte de neige, et le cas échéant, de connaître l'épaisseur de la couche de neige.

La valeur du DDF est empirique, et de ce fait diffère également d'un site de mesure à l'autre : 3,8 mm.d⁻¹.°C⁻¹ sur le glacier de Sarennes dans le Massif des Grandes Rousses [9], 4,4 mm.d⁻¹.°C⁻¹ sur le Storglaciaren en Suède [10] pour la neige ; 6,2 mm.d⁻¹.°C⁻¹ sur le glacier de Sarennes [9] pour la glace. Pour Argentière, les corrélations avec les mesures d'un bilan de masse de surface réalisé sur une petite portion du glacier indiquent que 4 mm.d⁻¹.°C⁻¹ pour la neige et 6 mm.d⁻¹.°C⁻¹ pour la glace sont les valeurs les plus pertinentes pour le calcul par la méthode degré-jour.

Seul un bilan d'énergie de surface (soit une mesure du rayonnement incident, source majeure d'énergie pour la fonte de la glace) permet une quantification propre de l'ablation d'un glacier. Même si la méthode degré-jour reste très utilisée pour spatialiser sur des zones de grande étendue, son caractère empirique la rend difficilement transposable, d'un point de vue critique. Le principal intérêt réside dans l'opportunité qu'elle offre de reconstituer des fluctuations passées (pour les zones où la méthode a été calibrée à partir de mesures, et validée au regard des bilans connus) à partir de données de température uniquement, et d'anticiper les variations futures.

3. Acquisition et description des données météorologiques

3.1 Données Antarctique et instruments de mesure

En Antarctique, les deux stations météorologiques automatiques Nord et Sud sont équipées de capteurs qui mesurent la température (PT100, capteurs VAISALA HMP45 et HMP155 ; °C), la vitesse et la direction du vent (anémomètre et girouette YOUNG ; $m.s^{-1}$ et °/Nord), l'humidité relative de l'air (HMP45 et HMP155 ; %) et l'accumulation neigeuse (SR50 ; cm) (tableau récapitulatif en *annexe 1*), à raison d'une acquisition toutes les 10 s. La centrale d'acquisition enregistre ensuite une moyenne toutes les 30 min, constituant ainsi un jeu de données demi-horaires pour toute la saison. Les deux capteurs PT100 de la station Nord, ainsi que les HMP45 et HMP155 de la station Sud sont pour chacune des deux stations respectivement situés à 80 cm et 2 m du sol, et permettent d'une part une comparaison verticale des variations de température à une même station, et une comparaison horizontale entre les deux stations d'autre part. Seules les données de température sont exploitées dans ce rapport mais toutes les variables ont fait l'objet d'une première analyse (données de vent, données de sonde à neige) en particulier pour comprendre les variations de température.

3.2 Données Météo-France et station météorologique d'Argentière

Pour Argentière, les données de température sont issues de la station météo automatique implantée sur la rive droite du glacier à proximité du profil 4 depuis 2006. Les variations d'épaisseurs de glace et de neige sont tirées de la lecture des balises implantées aux profils 4 et 7, à 2430 et 2750 m d'altitude, respectivement.

La station météorologique de Chamonix située à 1042 m d'altitude mesure entre autres la température à un pas de temps. Ce travail concerne la période du 01/06/10 au 30/09/10 (données Météo-France).

4. Résultats

4.1 Antarctique

4.1.1 Première phase de traitement

La comparaison de l'évolution des températures entre la station Nord et Sud a pu être envisagée au terme d'une première étape du traitement de données. En effet, un problème informatique survenu pendant le remplacement de la centrale d'acquisition de la station Nord en janvier 2011 par le personnel de GLACIOCLIM a entraîné une perte partielle de données réparties sur l'année. Ces lacunes ont dû être identifiées et dénombrées dans le jeu de données annuelles (*annexe 2*). De plus, un décalage horaire entre l'heure de mesure enregistrée et l'heure réelle au moment de la mesure, détecté par le fait que la première heure de mesure enregistrée ne pouvait s'accorder avec la période d'installation et de lancement de la station, a dû être déterminé pour la station Sud. La comparaison de l'alternance jour-nuit des températures pour une même journée entre la station Nord et Sud, répétée sur plusieurs jours a permis d'évaluer ce décalage à six heures.

A l'issue de cette première phase de traitement indispensable, un premier rapport comprenant aussi les périodes d'arrêt de mesure des capteurs (seuil des capteurs thermiques atteints, anémomètres gelés ou dévissés) et les valeurs supposées issues d'un dysfonctionnement des capteurs a été restitué fin mars 2011 à Christophe GENTHON, responsable GLACIOCLIM-Antarctique (*annexe 2*).

4.1.2 Analyse des températures

Les capteurs PT100 détectent les températures inférieures à -40°C , alors que cette valeur représente la limite de détection des capteurs HMP45. Dans la mesure où la station Sud est équipée à 80 cm du sol d'une HMP45, et étant donné la courte période de fonctionnement de

l'instrument (*annexe 2*), une comparaison verticale n'a été envisagée que pour la station Nord. Pour les mêmes raisons, la comparaison ne concerne que les températures mesurées par les PT100. Une comparaison entre les deux stations suit cette première description.

4.1.2.1 Décalages verticaux en hiver austral

Avec l'arrivée de l'hiver austral, les moyennes mensuelles montrent un décalage progressif de l'ordre du degré entre les températures mesurées à 2 m et 80 cm du sol. Il se remarque un écart de presque 1°C sur ces moyennes dès le mois d'avril, qui avoisine les 2°C pour les mois de juin, juillet et août, et qui disparaît au mois de septembre avec les hausses de température et de la durée quotidienne d'ensoleillement (*annexe 4, figure 1*). Plus en détails, ces décalages ne se perpétuent pas pendant tout l'hiver, et marquent seulement des périodes ponctuelles de stratification thermique de l'air entre les deux capteurs, d'une durée de quelques jours.

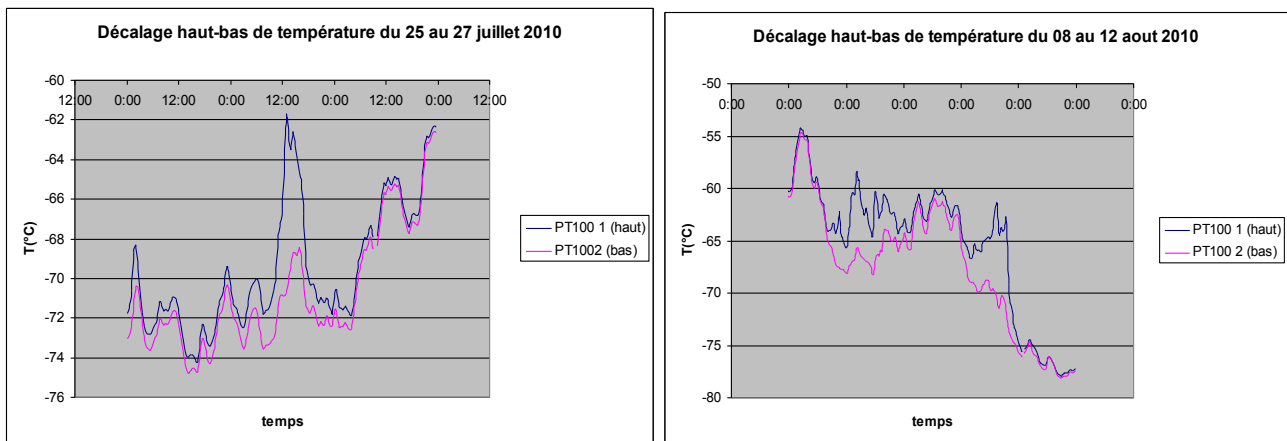


Figure 4 : Décalages entre les températures mesurées par les PT100 à 80 cm et à 2 m du sol survenus pendant les mois du juillet et août 2010

Les deux capteurs enregistrent sensiblement les mêmes variations avant de marquer le 26 juillet aux alentours de midi un écart d'environ 8°C, qui s'atténue en douze heures. La mise en place d'un écart proche de 7°C en quelques heures est à nouveau enregistrée le 09 août. Cet écart se dissipe en vingt-quatre heures puis se prononce à nouveau deux jours plus tard avec sensiblement, la même

amplitude (*figure 4*). A cette période de l'année, l'anémomètre de la station Nord ne fonctionnait déjà plus (*annexe 2*), et ne permet pas de discuter de la contribution du vent à ce phénomène.

Les capteurs mettent en évidence un refroidissement de plus de 15°C en trois jours. Une étude sur l'ensemble des données a permis de révéler l'occurrence de remontées irrégulières de température entre les mois d'avril et octobre nettement plus importantes, en un laps de temps plus court. L'amplitude et la durée de ces événements chauds sont développées par la suite pour deux exemples, l'un en juillet, et l'autre en août.

4.1.2.2 Hausses ponctuelles et rapides des températures

Au mois de juillet, les températures remontent à quatre reprises autour de -55°C pour une moyenne mensuelle d'environ -70°C (*annexe 3, figure 2*). Un événement similaire se produit en août, où la moyenne atteint la valeur moindre d'environ -66°C, et des pics chauds d'au moins 15°C d'écart avec la moyenne mensuelle sont au nombre de trois (*annexe 3, figure 3*).

Pour les prochains commentaires, lorsque cela ne sera pas précisé, la température indiquée sera celle mesurée avec la PT100 2 (à 80 cm du sol), et les valeurs relatives à la PT100 1 (à 2 m du sol) seront indiquées entre crochets.

- Pic de température les 05 et 06 juillet 2010

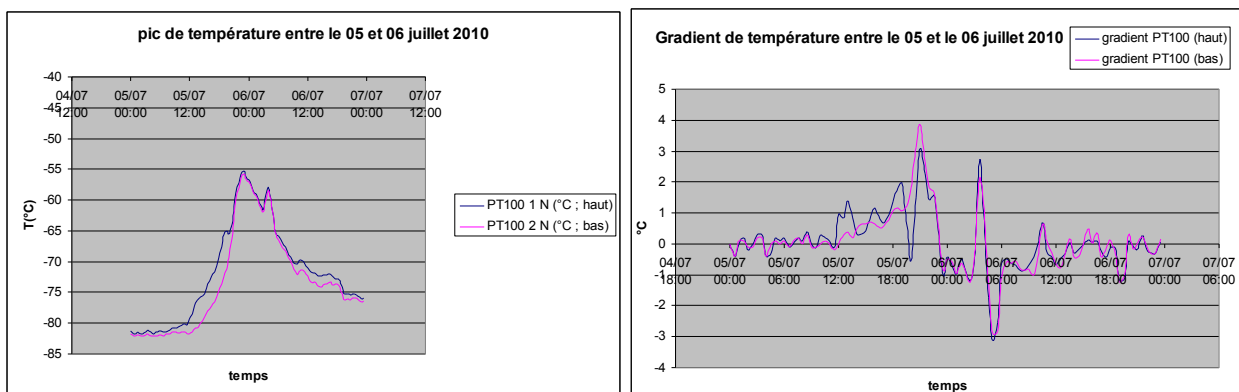


Figure 5 : pic de température (à gauche) et gradient thermique demi-horaire associé (à droite) les 05 et 06 juillet 2010

Le 05 juillet 2010, la température passe de $-81,5^{\circ}\text{C}$ [$-80,2^{\circ}\text{C}$] à 11h00, au maximum thermique pour le mois de juillet de $-55,8^{\circ}\text{C}$ [$-55,3^{\circ}\text{C}$] à 23h00, soit un réchauffement de $25,7^{\circ}\text{C}$ [$24,9^{\circ}\text{C}$] en douze heures (*figure 5, gauche*). Les maxima thermiques pour les deux capteurs sont enregistrés à la même heure. Le gradient thermique demi-horaire (noté GTdH) montre que l'élévation de température n'est pas uniforme pendant la durée du pic (*figure 5, droite*), et connaît par moment des périodes très localisées, de l'ordre de l'heure, pendant lesquelles les variations sont assez brutales (le GTdH moyen pour les deux capteurs atteint plus de $+3^{\circ}\text{C}/\frac{1}{2}\text{h}$ le 05 juillet entre 18h et 20h, et passe dans la nuit du 05 au 06 juillet de $-1^{\circ}\text{C}/\frac{1}{2}\text{h}$ à $+3^{\circ}\text{C}/\frac{1}{2}\text{h}$ entre 2h et 3h du matin). Il se remarque aussi que les deux capteurs n'indiquent pas non plus la même intensité du gradient pour les deux périodes de hausse, ni les mêmes tendances. La PT100 indique à son maximum $+4^{\circ}\text{C}/\frac{1}{2}\text{h}$ contre presque $[+3^{\circ}\text{C}/\frac{1}{2}\text{h}]$ pour la première hausse entre 18h et 20h. Les minima sont encore plus contrastés, puisqu'alors que la PT100 à 80 cm indique toujours une hausse du GTdH, celle à 2 m indique une chute ponctuelle de température de l'ordre $-0,5^{\circ}\text{C}/\frac{1}{2}\text{h}$. Pendant la deuxième hausse entre 2h et 3h, la tendance s'inverse, et le capteur à 80 cm indique une intensité maximum plus forte du GTdH ($+2^{\circ}\text{C}/\frac{1}{2}\text{h}$ contre presque $[+3^{\circ}\text{C}/\frac{1}{2}\text{h}]$). En dehors de ces intervalles de hausse (et de chute associée), les variations du GTdH pour les deux capteurs se font avec la même intensité, sensiblement.

- Pic de température du 14 au 17 août 2010

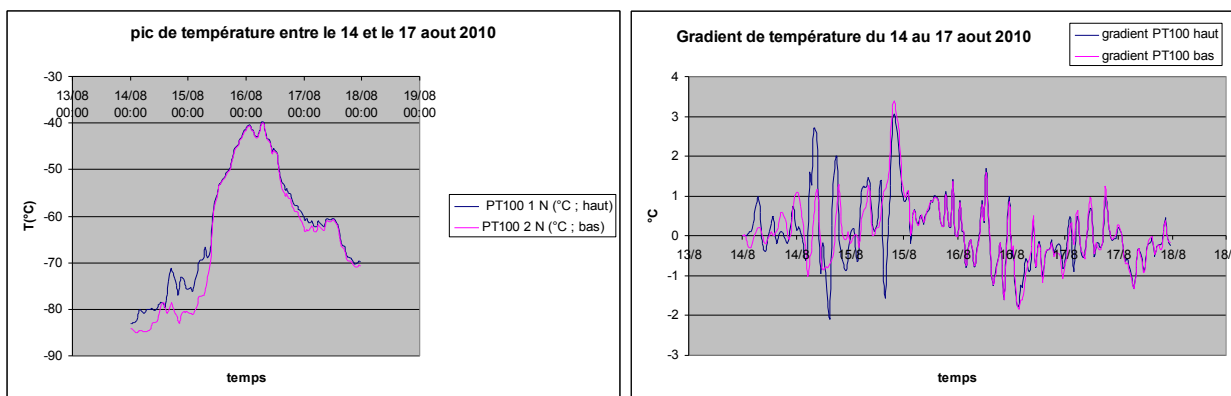


Figure 6 : pic de température (à gauche) et gradient thermique demi-horaire associé (à droite) du 14 au 17 août 2010

Ce réchauffement aoûtien est de plus grande amplitude encore. La température évolue de $-80,2^{\circ}\text{C}$ [$-73,7^{\circ}\text{C}$] le 15/08 à 03h00, à $-51,4^{\circ}\text{C}$ [$-51,1^{\circ}\text{C}$] à 15h00, et atteint $-41,7^{\circ}\text{C}$ [$-41,5^{\circ}\text{C}$] douze heures plus tard. Soit une variation de $28,8^{\circ}\text{C}$ [$22,6^{\circ}\text{C}$] en douze heures, ou de $38,5^{\circ}\text{C}$ [$32,2^{\circ}\text{C}$] en vingt-quatre heures (*figure 6, gauche*).

La température maximum de $-40,6^{\circ}\text{C}$ [$-40,4^{\circ}\text{C}$] pour le mois d'août, et pour les deux capteurs est enregistrée le 16/08 à 01h30.

Sans donner autant de détails que pour le pic de juillet, la figure 6 met en évidence le même type de comportement de la température.

4.1.2.3. Décalages en été austral

En hiver, lorsque les capteurs mettent en évidence une variation de la température entre 80 cm et 2 m, il s'agit toujours d'un gradient positif du bas vers le haut. Cela peut facilement s'envisager selon la stratification de l'air en fonction de la température. Les masses d'air plus froid, donc plus dense, plongent vers la surface induisant bien un gradient ascendant positif.

Cependant l'évolution des températures à partir du mois d'octobre montre l'apparition d'une variation inverse. Le signal de la PT100 à 80 cm est au alentours de midi parfois rehaussé par rapport à son homologue à 2 m, et indiquerait de façon toujours ponctuelle un gradient négatif de température du bas vers le haut (*annexe 3, figure 4*). Ceci impliquerait alors une couche de mélange, liée au réchauffement de la surface par l'arrivée du rayonnement solaire.

Ce phénomène a aussi été observé à la station Sud, au retour de l'été austral, avec des décalages ponctuels de plusieurs degrés Celsius entre 80 cm et 2 m, atteignant parfois même presque en décembre et janvier la dizaine de degrés (*figure 7*). Même si de façon intuitive, la contribution du vent à l'ampleur d'un tel écart peut raisonnablement être envisagée, sa seule responsabilité ne peut être discutée en l'absence de données de nébulosité et de vitesse de vent.

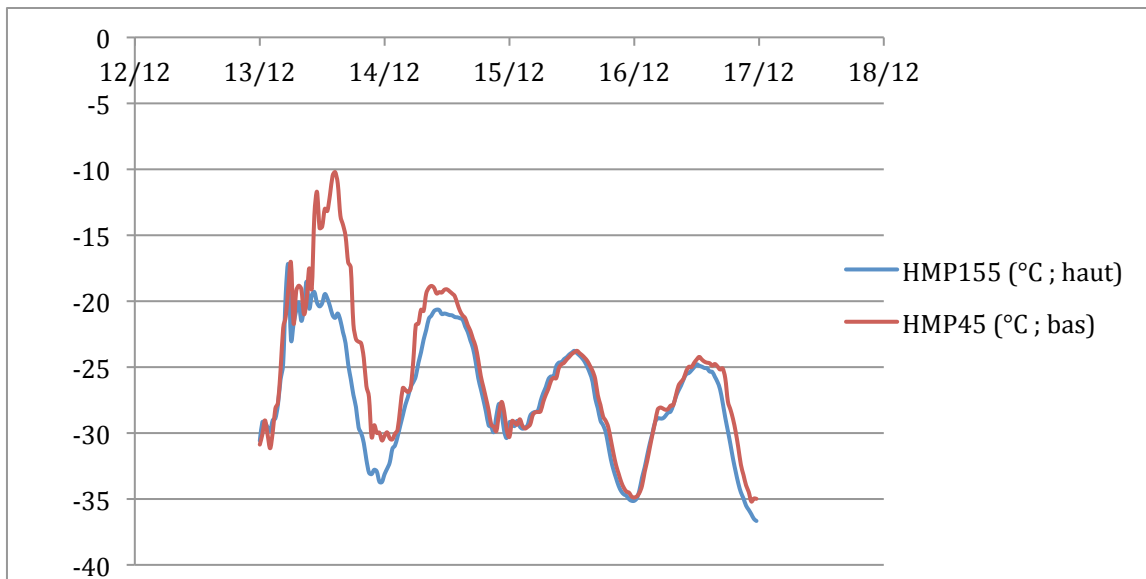


Figure 7 : décalages inverses de température entre les capteurs à 80 cm et 2 m du sol en décembre 2010 – Station Sud. Les ordonnées sont en °C, les abscisses en format jour/mois

4.1.3 Comparaison Nord-Sud

4.1.3.1 Évolution annuelle des températures

Une fois encore, le seuil de détection des HMP45 limite les comparaisons à long terme, et ne permet qu'une comparaison horizontale des capteurs à 2 m. La plus grande période de lacunes occasionnée par le problème informatique s'étendant du 15 septembre 2010 au 08 octobre 2010 pour la station Nord (*annexe 2*), les moyennes non-représentatives des mois de septembre et octobre ont été ignorées, réduisant encore l'étendue de la comparaison dans le temps.

Même si les moyennes restent assez proches d'une station à l'autre pour une même distance du sol, celles des mois d'avril, mai, août et novembre montrent un écart d'au moins 1°C entre le Nord et le Sud (*tableau 1*), caractérisant alors les différences maximum pour des mois où il n'y a que très peu de soleil. Ces écarts sont peut-être à relier avec la différence d'insolation, en suggérant ainsi le rôle d'un effet de latitude sur la température autour du Dôme. Le rayonnement solaire incident et le rayonnement grandes longueurs n'ont pas été mesurés, et rien ne permet

pour l'instant de stipuler qu'ils diffèrent à 50 km de distance du Dôme. Dans la mesure où il n'existe aucune autre série de températures pour les deux stations, il est aussi possible d'attribuer l'origine des ces différences au fonctionnement des capteurs.

Nous espérons poursuivre ce travail pour déterminer l'effet du vent sur les capteurs d'une part et si d'autre part il existe bien une variabilité spatiale des températures et du rayonnement autour du Dôme.

mois/année	moyennes mensuelles					
	PT100 N (2 m)	HMP155 S (2 m)	Δ_{N-S}	HMP45 N (2 m)	PT100 N (80 cm)	HMP45 S (80 cm)
01/10	-30,4	-30,8	-0,4	-29,3	-30,4	-29,73
02/10	-42,7	-43	-0,7	X	-42,9	X
03/10	-54	-54,9	-0,9	X	-54,6	X
04/10	-63	-64,2	-1,2	X	-63,7	X
05/10	-67,3	-68,3	-1	X	-68,6	X
06/10	-65,8	-65,5	+0,3	X	-67,4	X
07/10	-69,3	-69,4	-0,1	X	-71,1	X
08/10	-65,6	-66,8	-1,2	X	-67,5	X
09/10	X	-63,5	X	X	X	X
10/10	X	-53,5	X	X	X	X
11/10	-39,4	-40,4	-1	X	-39,2	X
12/10	-29,7	-30,00	-0,3	-27,6	-29,4	-27,36
01/11	-30,5	-30,9	-0,4	-29,5	-30,5	-29,62

Tableau 1 : moyennes mensuelles des températures enregistrées aux stations Nord et Sud

4.1.3.2 Hausses ponctuelles et rapides des températures

Les évènements chauds observés en juillet et août, et plus largement entre avril et octobre à la station Nord ont également été enregistrés à la station sud (*figure 8*), et marquent ainsi leur simultanéité et leur étendue sur au moins 50 km autour du Dôme C. Les maxima thermiques, identiques à quelques degrés Celsius près, occupent la même position à une heure près (*tableau 2*).

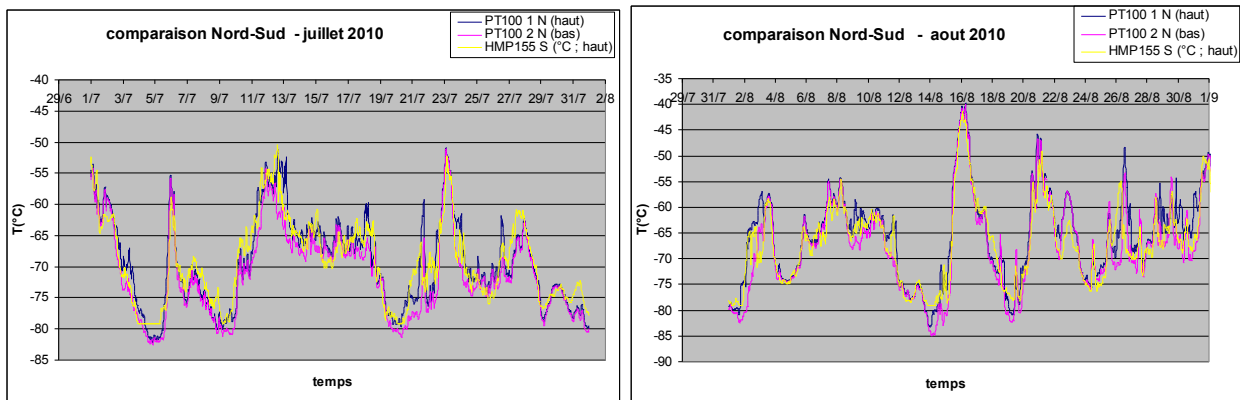


Figure 8 : Comparaison des températures aux mois de juillet et août 2010 aux stations Nord et Sud – situation identique des évènements chauds

capteur	Maximum (°C)	date
PT100 Nord (80 cm)	-55,79	05/07/10 - 23h00
PT100 Nord (2 m)	-55,32	05/07/10 - 23h00
HMP155 Sud (2 m)	-60,2	06/07/10 - 00h00
PT100 Nord (80 cm)	-40,68	16/08/10 - 01h30
PT100 Nord (2 m)	-40,46	16/08/10 - 01h30
HMP155 Sud (2 m)	-41,27	16/08/10 - 01h30

Tableau 2 : date et heure des maxima thermiques des 05, 06 juillet et 06 août 2010 enregistrés aux stations Nord et Sud

4.2 Estimation d'un bilan de masse local estival par la méthode degré-jour au glacier d'Argentière

4.2.1 Comparaison des données de Chamonix et du glacier d'Argentière

Les températures horaires de Chamonix et les températures demi-horaires mesurées vers le profil 4 à 2400 m par la station météo (et converties en températures horaires) suivent une même tendance sur la période de mesure (*annexe 3*), mais ne montrent pas la même amplitude, leurs écarts-types valant 6,23°C et 4,07°C, respectivement. La moyenne des différences donne une valeur pertinente du gradient de température altitudinal de -0,6°C/100

m entre les deux stations. Les températures au profil 7 ont été reconstituées à partir de ce gradient thermique altitudinal et des températures mesurées au profil 4.

4.2.2 Bilans de masse aux profils 4 et 7

L'émergence des balises a été relevée sur le terrain toutes les 3 semaines environ pour la période du 21 mai au 15 septembre 2010 au profil 4 à 2430 m, et du 21 mai au 10 septembre 2010 au profil 7 à 2750 m, et l'ablation a été reportée en équivalent eau dans les *tableaux 3 et 4*.

Différents facteurs peuvent rendre compte des variations du bilan d'une balise à l'autre, pour un même profil. En effet l'ensoleillement, l'altitude, le vent, la nébulosité, la température de la glace profonde, ou encore les apports en neige (avalanches), glace ou sédiments (moraines) provenant de l'amont du glacier sont autant de paramètres qu'il est parfois difficile de prendre en compte dans l'estimation d'un bilan global, qui varient et influencent le bilan de masse local.

Les balises 4 et 5 du profil 7 sont situées à l'exutoire d'un couloir d'avalanche. Les apports réguliers de neige faussant les mesures, les résultats de leurs relevés n'ont pas été reportés.

Balise 3				
date	haut. enf. (m)	haut. neige (m)	densité neige	Δ éq. eau (m)
21/05/10	10,42	1,77	0,47	
06/07/10	7,64	X	X	-1,74
04/08/10	5,75	X	X	-1,70
15/09/10	4,04	X	X	-1,54
total				-4,98
Balise 1				-4,85
Balise 2				-4,6
Balise 4				-4,68
Balise 5				-4,58

Tableau 3 : bilan de masse en équivalent eau au profil 4 pour les balises 1, 2, 3, 4 et 5

Balise 3				
date	haut. enf. (m)	haut. neige (m)	densité neige	éq. eau (m)
21/05/10	13,02	3,56	0,47	
06/07/10	10,97	1,51	0,55	-0,84
04/08/10	9,8	0,08	0,57	-0,55
10/09/10	8,82	X	X	-0,86
total				-2,25
Balise 1				-2,19
Balise 2				-2,08

Tableau 4 : bilan de masse en équivalent eau au profil 7 pour les balises 1, 2, et 3

4.2.3 Calcul du bilan de masse ponctuel à partir de la méthode degré-jour

L'estimation d'un bilan de masse par la méthode degré-jour prend en compte la présence de neige à la surface du glacier, qui influe sur la valeur du DDF (*partie 2.3*).

Les relevés de balises au profil 7 ont permis de dater la disparition de la neige en surface au 04 août 2010. En l'absence d'une telle information au profil 4, il a été considéré que la neige a persisté jusqu'au 15 juin 2010 (date moyenne entre deux visites, l'une avec et l'autre sans présence de neige sur le glacier).

La méthode degré-jour donne une estimation du bilan de masse au profil 4 de -4,49 m, et de -2,63 m au profil 7, pour les périodes de mesure respectives.

A première vue ces résultats, bien que satisfaisants en comparaison avec les bilans mesurés, suggèrent une légère sous-estimation du bilan de masse au profil 4, et une surestimation au profil 7.

5. Discussion

5.1 Dôme C

Des précédentes analyses de profils verticaux de température de l'air, mesurés à travers le continent Antarctique ont révélé la présence d'une couche d'inversion thermique dans les deux premiers mètres au dessus du sol [11,12]. Cependant, ces travaux rapportent que les anomalies thermiques mesurées sont de l'ordre de quelques dixièmes de degrés Celsius tout au plus, bien inférieures aux écarts enregistrés par les PT100 au cours de l'été austral 2010. Ces derniers écarts ont donc été attribués au rayonnement solaire. Comme précisé en 4.1.2.1, l'arrêt des anémomètres au moment de leur observation ne permet pas de débattre de l'influence du vent sur ces résultats.

Les écarts de température hivernaux entre 80 cm et 2 m du sol sont probablement dus à des circulations de masses d'air froid, combinées au brassage réduit de l'atmosphère en l'absence de rayonnement solaire en plein hiver austral.

5.2 Argentière

La méthode degré-jour tend à sous-évaluer le bilan de masse au profil 4 pour l'été 2010. Cette différence est probablement liée à la présence d'une couverture détritique de quelques millimètres d'épaisseur, dont l'effet n'est pas pris en compte par la méthode. En effet la surface à cet emplacement est recouverte d'une fine couche sédimentaire, qui en diminuant l'albédo, accentue la fonte liée à l'absorption du rayonnement solaire.

La surestimation du bilan de masse au profil 7 est attribuée aux retombées estivales de neige.

La méthode degré-jour impose la fusion de la surface du glacier dès que la température de surface passe au dessus de 0°C, sans prendre en considération les périodes de précipitations

neigeuses, pendant lesquelles la glace recouverte de neige ne fond plus, ni la durée nécessaire à la fonte du manteau neigeux, au terme de laquelle la glace sera à nouveau mise à nue.

Un calcul théorique simple à partir des enregistrements des précipitations à Chamonix par la station Météo-France permet de donner un ordre de grandeur de l'erreur faite en négligeant les retombées estivales de neige sur la période de mesure.

Lorsqu'il pleut, le flux de chaleur apporté par les précipitations, et le tassement associé qui a tendance à diminuer l'albédo en augmentant la taille de grains entraînent une intensification de la fonte. Cet apport de chaleur par les précipitations sur la surface du glacier est assez faible. Il est généralement négligé pour la glace, mais a une influence plus importante pour la neige, à l'intérieur de laquelle l'eau de pluie percole. Seules les précipitations neigeuses sont prises en compte dans ce calcul :

En convertissant les précipitations enregistrées à Chamonix en neige au profil 7 pour des températures inférieures à 2°C, et en considérant une densité de 0,35 pour la neige fraîche [2], les précipitations se chiffrent à 405 mm d'équivalent en eau. Ainsi une quantité théorique minimale (les données de précipitations n'étant disponibles qu'à partir du 1^{er} juin, les chutes de neige survenues entre le 21 mai et le 1^{er} juin sont négligées) d'environ 40 cm d'équivalent en eau serait retombée sur le glacier entre le 1^{er} juin et le 10 septembre 2010.

De la même façon et sur une période plus courte, ces calculs chiffrent la chute neigeuse entre le 19 et le 20 juin 2010 à 49 mm d'équivalent en eau. Pour une température maintenue à 1°C, et un DDF de 4 mm.d⁻¹.°C⁻¹, la méthode degré-jour prévoit la fonte de 0,16 mm de neige en équivalent en eau par heure, soit 10 jours et treize heures pour la fonte de ces chutes, pendant lesquels la fusion de la glace devrait être stoppée. A 5°C, il ne s'agit plus que de deux jours et onze heures, et de moins de trente heures à 10°C.

Les reconstitutions de température au profil 7 à partir du gradient altitudinal moyen montrent que des températures supérieures à 8°C surviennent dès le début du mois de juin, atteignant même 14°C en juillet, et restent positives sur une période continue d'au moins un mois à

partir du 23 juin, réduisant ainsi à quelques dizaines d'heures les marges d'erreur faites sur le temps de fusion de la glace.

Conclusion

Les enregistrements de température à 25 km au Nord et au Sud de Dôme C au cours de l'année 2010-2011 révèlent des variations ponctuelles de température extrêmement brutales au cours de l'hiver austral. Ces fluctuations ont déjà été observées au cours des hivers précédents par le biais de la tour à Dôme C, mais les modèles météorologiques ne parviennent pas encore à les restituer, et restent à ce jour mal connues. Des recherches sont en cours, et la responsabilité de dépressions atmosphériques dans la genèse des événements chauds est discutée. Même si les obstacles rencontrés dans l'acquisition des données en Antarctique (seuil de mesure des HMP45, perte de données, dysfonctionnements des appareils) ont limité les comparaisons, les modifications apportées aux stations météorologiques Nord et Sud à Dôme C (*annexe 1*) en vue d'une nouvelle campagne de mesures pour la saison 2011-2012, permettront l'obtention de nouvelles données déterminantes dans la compréhension du climat en Antarctique. Ces événements chauds feront l'objet d'un stage de recherche en juin, supervisé par Christophe Genthon, directeur de recherche au LGGE, responsable GLACIOCLIM-Antarctique.

La méthode degré-jour appliquée aux profils 4 et 7 du réseau de balises du glacier d'Argentièrè montrent des résultats encourageants. A long terme, les objectifs de la modélisation degré-jour pourraient viser à reconstituer un bilan de masse complet pour le glacier d'Argentièrè, en incluant les zones d'accumulation et d'ablation, et plus particulièrement le glacier du Tour Noir. Les résultats permettront de discuter de la sensibilité de l'orientation et de la pente aux variations des bilans de masse entre deux zones du glacier alpin pourtant soumises au même climat.

Références bibliographiques

Citées :

- [1] Vincent C., Le Meur E., Six D. (2006) – *A glacier survey network « glacioclim-alpes », in the french alps*. La Houille Blanche, N°03-2007.
- [2] Vincent C., (2002) – *Influence of climate change over the 20th Century on four french glacier mass balances*. J. Geophys. Res., 107(D19) : 4375, doi : 10.1029/2001JD000832.
- [3] Aristidi E. et al., (2004) - *Antarctica An analysis of temperatures and wind speeds above Dome C, Antarctica*. Astronomy & Astrophysics.
- [4] Genthon C. et al., (2010) - *Meteorological atmospheric boundary layer measurements and ECMWF Analyses during summer at Dome C, Antarctica*. J. Geophys. Res.
- [5] Six D. et Vincent C., (2010) - *Rapport sur les travaux exécutés pour ELECTRICITE D'EMOSSON S.A. LGGE*.
- [6] Cullather R. et al., (1996) - *Interannual variations in Antarctic precipitation related to El Niño-Southern Oscillation*. Journal of Geophysical Research, Vol. 101, NO. D14, PP. 19,109-19,118, 1996 doi:10.1029/96JD01769.
- [7] Sadibekova T., Fossat E., Genthon C., Krinner G., Aristidi E., Agabi K. and Azouit M., (2006) - *On the atmosphere for astronomers above Dome C, Antarctica*. Antarctic Science 18 (3), 437–444, doi : 10.1017/S0954102006000484.
- [8] Rabatel A. et al., (2005) – *Using remote-sensing data to determine equilibrium-line altitude and mass-balance time series : validation on three French glaciers*. Journal glaciology, vol.51, No. 175.
- [9] Vincent, C. and M. Vallon., (1997) - *Meteorological controls on glacier mass-balance - empirical relations suggested by measurements on glacier de Sarennes, France*. Journal of Glaciology, Vol. 43, No. 143,1.
- [10] Braithwaite, R.J. and Y. Zhang., (2000) - *Sensitivity of mass balance of five Swiss glaciers to temperature changes assessed by tuning a degree-day model*. Journal of Glaciology, Vol. 46, No. 152.
- [11] Sodemann H. and Foken Th., (2005) – *Special characteristics of the temperature structure near the surface*. Theor. Appl. Climatol. 80, 81-89.
- [12] Halbersatm I. and Schieldge J.P., (1981) – *Anomalous behavior of the atmospheric surface layer over a melting snowpack*. American Meteorological Society. 0021-8952/81/030255.

Compléments :

- [13] Six D. et al., (2009) – *Meteorological controls on snow and ice ablation for two contrasting months on Glacier de Saint-Sorlin, France*. *Annals of Glaciology*.
- [14] Vincent C. et al., (2009) – *Glacier thickening and decay analysis from 50 years of glaciological observations performed on Glacier d'Argentière, Mont Blanc area, France*. *Annals of Glaciology*.
- [15] Vincent C. et al., (2007) – *Very high-elevation Mont-Blanc glaciated areas not affected by the 20th century climate change*. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, D09120, doi :10.1029/2006JD007407.

Annexe 1

Instruments de mesure aux stations météo à 25 km au Nord et au Sud de dôme C entre 2010 et 2011

Les appareils colorés en vert se substituent aux rouges.

<u>2010</u> :	<u>2011</u> :
Nord : anémomètre Young SR50 PT100 + HMP45 Vaïšala (2 m du sol) PT100 2 (80 cm du sol)	Nord : anémomètre Young SR50 PT100 + HMP155 PT100 2 (80 cm du sol)
Sud : anémomètre Young SR50 HMP155 Vaïšala (2 m du sol) HMP45 Vaïšala (80 cm du sol)	Sud : anémomètre Young SR50 HMP155 + PT100 PT100 (cassée)

Les précisions des instruments sont celles données par les fabricants :

Anémomètre Young : mesure la direction (+/- 3 deg) et la vitesse (+/- 0.3 m/s⁻¹) du vent

PT100 : mesure la température uniquement (+/- 0.2°C)

HMP45 : mesure la température (min : -40°C ; +/- 0.2°C) et l'humidité relative de l'air (+/- 2%)

HMP155 : mesure la température (min : -80°C ; +/- (0.226 - 0.0028*temp) °C) et l'humidité relative de l'air (+/- (1 + 0.008*reading) %)

SR50 : sonde à neige (+/- 1 cm)

Annexe 2

Données Antarctique

Saison 2010-2011

Dysfonctionnement des capteurs

A) Lacunes

a) Panne de la station Nord

Les enregistrements de la station météo à 25 km au Nord de Dome C débutent le 03/01/10 à 13h et se terminent le 26/01/11 à 12h30.

Le total des mesures demi-horaires pour toute la période (pour une moyenne enregistrée toutes les demi-heures ; une mesure correspond à tous les paramètres enregistrés pour une demi-heure) s'élève à 18624 données. Le fichier n'en contient que 17484.

Ainsi les 1138 lacunes (soit environ 6% du total des données) se dénombrent de la façon suivante :

. L'heure précisée est l'heure de la mesure manquante (36 lacunes) :

04/01/10	02:30
06/01/10	02:00
08/01/10	17:30
14/01/10	00:00
24/01/10	11:30
03/02/10	21:30
14/02/10	23:00
24/02/10	18:30
07/03/10	20:30
17/03/10	16:00
30/03/10	19:00
07/04/10	17:00
20/04/10	20:30
28/04/10	16:30
11/05/10	20:30
19/05/10	18:00
02/06/10	02:00
09/06/10	23:30
23/06/10	12:30
02/07/10	00:00
17/07/10	21:00
27/07/10	09:30
12/08/10	02:00

21/08/10	12:30
06/09/10	04:00
22/10/10	01:30
29/10/10	04:00
11/11/10	15:30
18/11/10	16:30
02/12/10	03:00
09/12/10	04:00
22/12/10	15:00
29/12/10	17:30
12/01/11	07:00
19/01/11	11:00
26/01/11	11:00

. Les mesures s'arrêtent le 15/09/10 après 13h30 (mesure à 13h30 recueillie) et reprennent le 08/10/10 à 13h00 (mesure à 13h00 recueillie) pour un total de 1102 lacunes (soit 22 jours, 23 heures et 30 minutes d'interruption de mesure).

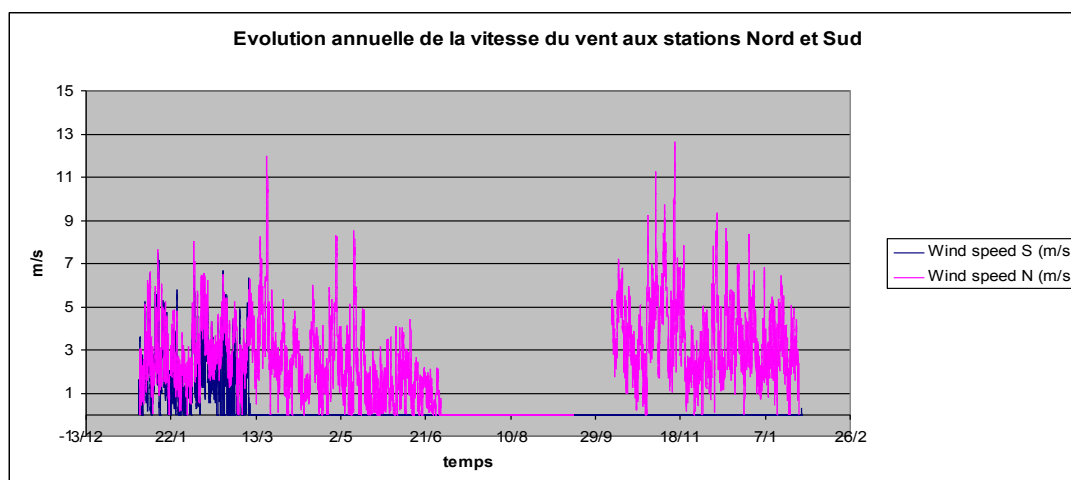
b) SR50

Les distances moyennes corrigées enregistrées à la station Sud le 28 janvier 2011 sont manquantes (NAN), alors que les distances brutes sont bien affichées.

c) Anémomètres YOUNG

Des vitesses nulles sont enregistrées pour la station Sud à partir du 09/03/10 à 8h30 jusqu'à la fin de la période de mesure.

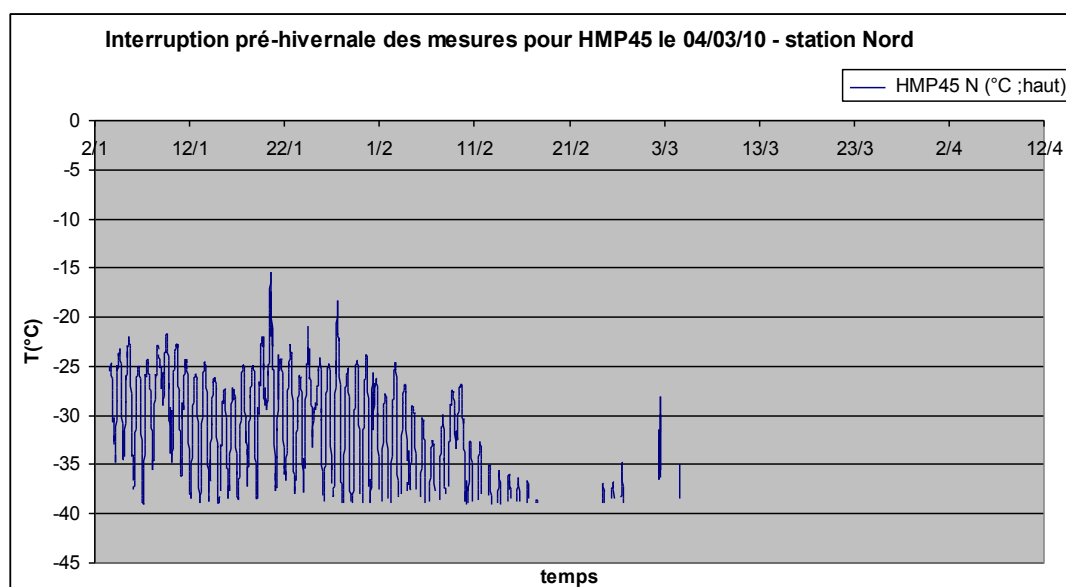
L'anémomètre de la station Nord enregistre lui aussi des vitesses nulles du 29/06/10 à 19h00 au 08/10/10 à 13h00.



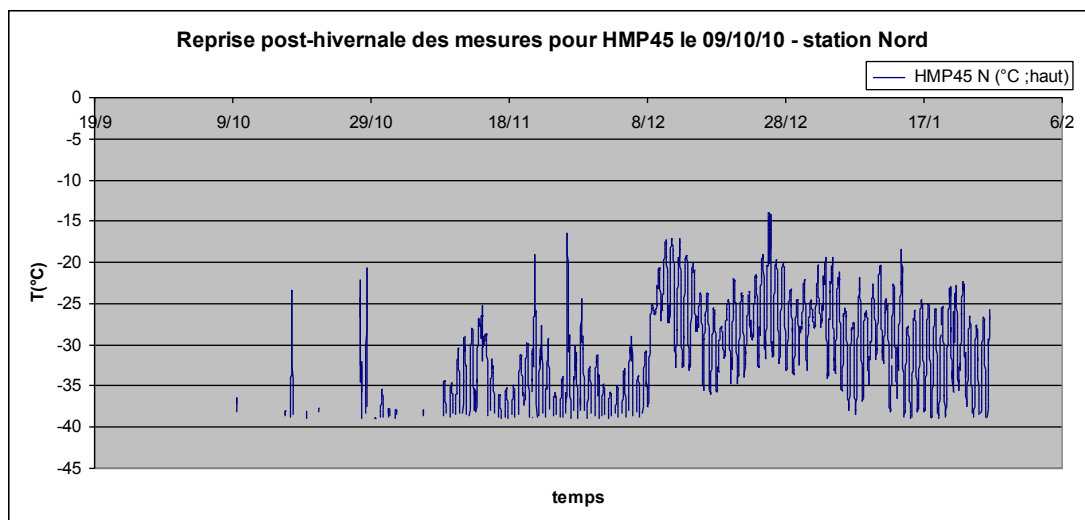
Les directions sont en revanche enregistrées en continu pendant toute la période pour les deux stations (excepté les données perdues de la station Nord du 15/09/10 au 08/10/10).

d) HMP45 Vaisala

Les températures enregistrées par les HMP45 inférieures à -39°C ne sont pas mesurées par le capteur. Ainsi dès les premiers jours de mesure des lacunes apparaissent (le 04/01/10 à 02h30 pour la station Nord, 24 heures plus tôt pour la station Sud) pour concerner grossièrement l'intervalle 21h - 8h à la fin du mois. A partir du 1^{er} février, cette période quotidienne de lacunes s'allonge progressivement pour ne renseigner au milieu du mois que sur les températures de l'après midi (entre 11h00 et 18h00 autour du 12, puis 13h00 et 16h00 trois jours plus tard). Après quelques mesures éparées entre 14h00 et 18h00 début mars (dernière série de plus de 5 mesures par jour le 07/03/10 entre 13 :00 et 15 :30 au Sud), les capteurs n'indiquent plus aucune température jusqu'à mi-octobre (première température supérieure à -39°C le 09/10/10 à 12h00 pour la station Nord, et le 16/10/10 à 9h30 pour le Sud).



De nouvelles mesures extrêmement éparées réapparaissent entre le 09/10/10 et le début du mois de novembre (moins de 8 heures de mesure consécutives jusqu'au 27/10/10). Des températures sont à nouveau enregistrées après 18h00 à partir du 08/11/10. 12 heures consécutives de mesure sont à nouveau disponibles fin novembre – début décembre. La série retrouve une continuité le 07/12/10 (6h30 pour le Sud, 7h30 pour le Nord).



Ainsi les moyennes sont représentatives des températures mesurées par les HMP45 pour les mois de janvier 2010 et 2011 uniquement.

e) HMP155

Les températures inférieures à -79°C ne sont pas mesurées par l'instrument. Ainsi le seuil de détection de la HMP155 est atteint le 01/08/10 de 05h00 à 6h et de 16h à 21h, ainsi que le 13/08/10 de 20h00 à 03h30 et de 05h30 à 07h30 (températures bloquées à $-79,13^{\circ}\text{C}$).

Les principales lacunes sont finalement liées aux seuils des HMP45, qui ne renseignent de façon continue que sur le premier et le dernier mois de mesure pour toute la période, ainsi qu'aux anémomètres (girouette dévissée pour la station Sud et probablement gelée pour la Nord).

capteur	période de non-mesure
HMP45 Sud et Nord	1ère lacune le 03/01/2010 à 02h30 (Sud) dernière mesure estivale le 13/03/ à 16h00 (Sud) reprise lacunaire des mesures le 09/10/10 à 12h00 (Nord) reprise continue le 07/12/10
Anémomètre Sud	du 09/03/10 à 08h30 jusqu'à la fin
Anémomètre Nord	29/06/10 à 19h00 au 08/10/10 à 13h00

B) Valeurs ignorées

Certaines valeurs ont été estimées absurdes par comparaison avec la tendance globale des valeurs suivante, et par conséquent ignorées. Cette sélection concerne :

. PT100 station Nord, haut : 1ère mesure du 03/01/2010 à 13h00 : passage de $-19,05$ à $-26,31$ en 30 minutes (contre une moyenne de $-26,23$ sur les trois heures suivantes).

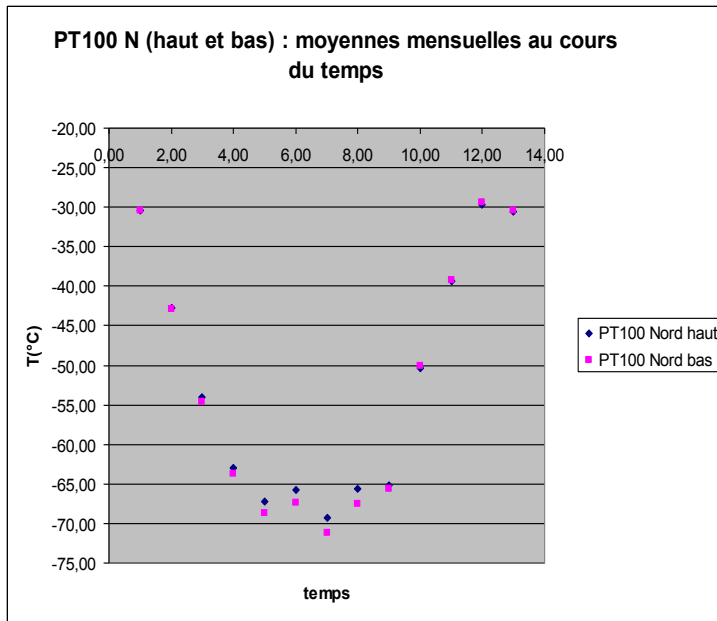
. SR50 station Nord : les 3 premières valeurs (de 13h00 à 14h00) inférieures de plus de 1 m à la tendance des mesures suivantes ($43,67$; $60,71$; $48,35$ contre $176,4$ pour la mesure à 14h30 ; moyenne de $176,31$ sur les 3 heures suivantes).

N.B : Cette considération n'altère en rien les bilans annuels faits sur la sonde à neige puisque ces derniers ont été réalisés entre le 15 janvier 2010 et la fin de la période de mesure).

. HMP45 station Nord, haut : première valeur de $-14,73^{\circ}\text{C}$ à 13h00 contre une moyenne de $-25,22$ sur les 3 heures suivantes.

. Vitesses de vent négatives (respectivement trois et cinq valeurs pour les stations Sud et Nord).

Annexe 3



mois/année	moyennes mensuelles	
	PT100 Nord haut	PT100 Nord bas
01/10	-30,42	-30,38
02/10	-42,75	-42,94
03/10	-54,01	-54,64
04/10	-62,96	-63,70
05/10	-67,26	-68,62
06/10	-65,76	-67,43
07/10	-69,32	-71,15
08/10	-65,61	-67,55
09/10	-65,24	-65,65
10/10	-50,35	-50,10
11/10	-39,37	-39,22
12/10	-29,71	-29,44
01/11	-30,50	-30,48

Figure 1 : moyennes mensuelles des températures mesurées aux stations Nord et Sud pour l'année 2010-2011

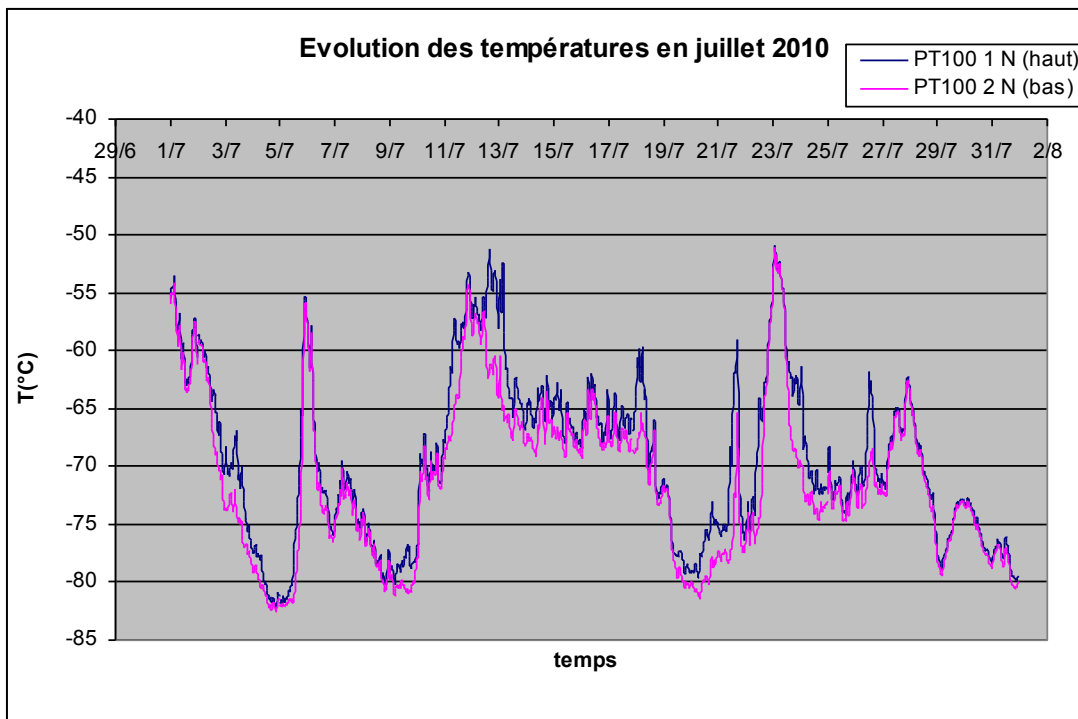


Figure 2 : évolution des températures en juillet 2010 – Station Nord

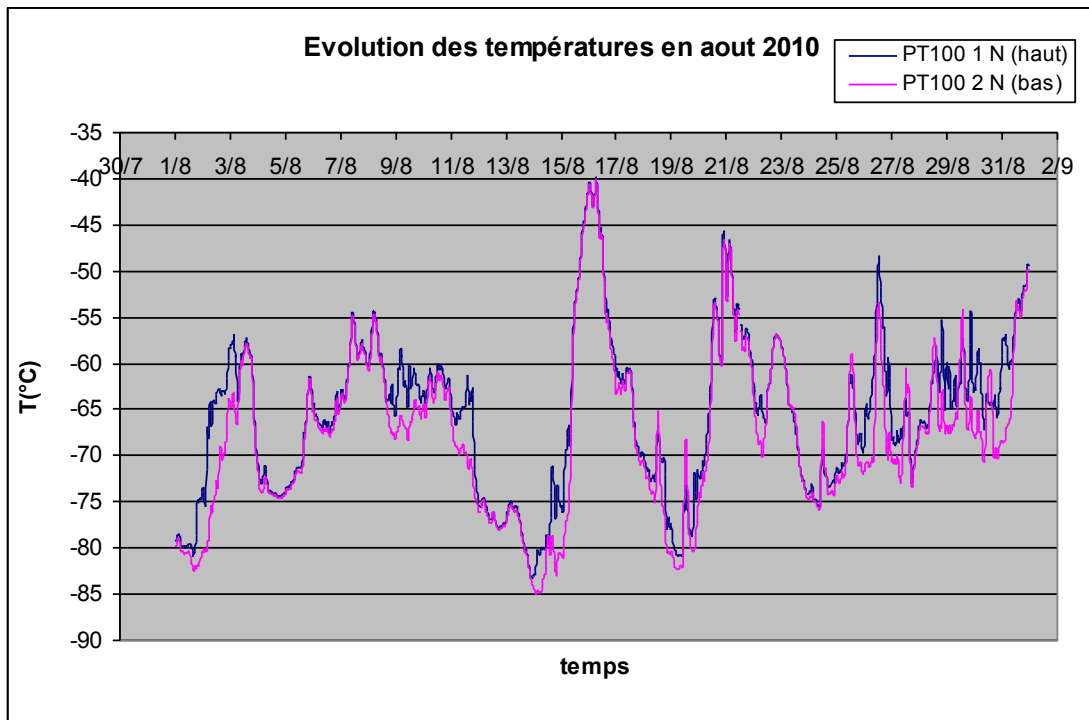


Figure 3 : Evolution des températures en août 2010 – Station Nord

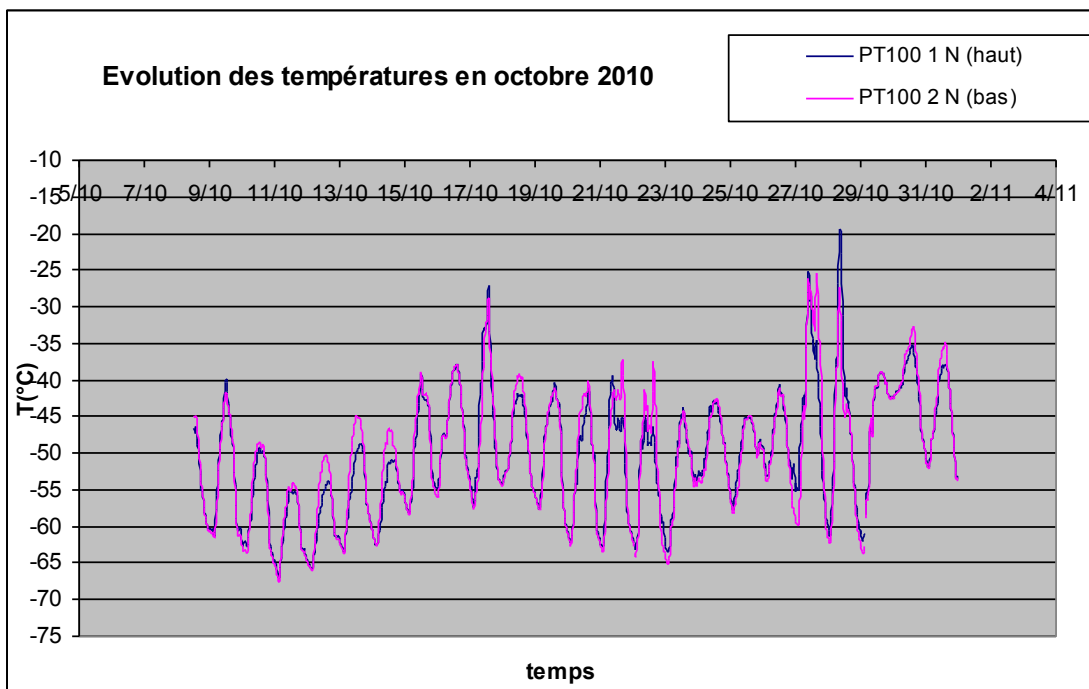


Figure 4 : Evolution des températures en octobre 2010 – mise en évidence des gradients de température inverse - Station Nord

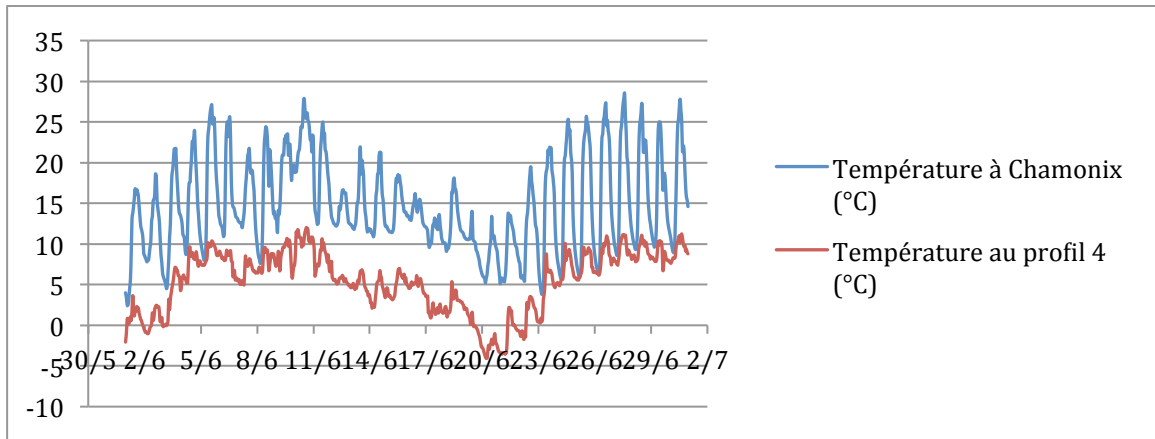


Figure 5 : Evolution des températures à Chamonix et au profil 4 du 1^{er} juin au 30 septembre 2010 – l'axe des ordonnées donne la température en °C.