



**HAL**  
open science

## Suivi des variations du glissement du glacier d'Argentière par GPS haute fréquence

Romain Garnier

► **To cite this version:**

Romain Garnier. Suivi des variations du glissement du glacier d'Argentière par GPS haute fréquence. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2017. dumas-01835477

**HAL Id: dumas-01835477**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01835477>**

Submitted on 11 Jul 2018

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

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



**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS**  
**ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES**

---

**MEMOIRE**

**présenté en vue d'obtenir**

**le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM**

**SPECIALITE : Géomètre et Topographe**

**par**

**Romain GARNIER**

---

Suivi des variations du glissement du glacier d'Argentière par GPS haute  
fréquence

**Soutenu le 5 Juillet 2017**

---

**JURY**

**PRESIDENT : Mme Nathalie THOMMERET**

**MEMBRES : Mme Andrea WALPERSDORF  
Mme Joëlle NICOLAS-DUROY**

## **Remerciements**

Je souhaiterais tout d'abord adresser mes remerciements à mon encadrante principale, Mme Andrea WALPERSDORF, qui a fait preuve de beaucoup de disponibilité et d'attention à mon égard. Sa bonne humeur et son calme m'ont permis d'aborder ce travail de fin d'études avec sérénité.

Un grand merci à mon co-encadrant, M. Christian VINCENT. Les conseils et les réponses qu'il m'a apportés m'ont été très précieux et m'ont guidé pendant ces 20 semaines de stage. Le partage de ses connaissances en glaciologie ont été primordiales pour ce projet.

Je remercie également toutes les personnes que j'ai rencontrées au laboratoire ISTerre, aussi bien les équipes de chercheurs que les autres stagiaires, avec qui j'ai passé de très bons moments et qui m'ont accueilli chaleureusement.

Merci à mon professeur référent, Mme Joëlle NICOLAS-DUROY, pour le suivi de ce stage de fin d'études et les conseils qu'elle m'a donnés.

## **Liste des abréviations**

CDDIS : Crustal Dynamics Data Information System.

GAMIT : Global positioning system At Massachussetts Institute of Technology.

GLOBK : Global Kalman Filter.

GMT : Generic Mapping Tools.

GNSS : Global Navigation Satellite System.

GPS : Global Positioning System.

IGS : International GNSS Service.

LGGE : Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement.

MIT : Massachussetts Institute of Technology.

NASA : National Aeronautics and Space Administration.

RINEX : Receiver Independant Exchange format.

RGP : Réseau GNSS Permanent.

SAR : Synthetic Aperture Radar.

SLR : Satellite Laser Ranging.

SOPAC : Scripps Orbit and Permanent Array Center.

VLBI : Very Long Baseline Interferometry.

## **Glossaire**

CDDIS : Centre d'archives permettant de récupérer les orbites des satellites GPS et GLONASS.

GMT : Permet de manipuler avec une multitude de commandes des données géographiques et tracer des graphiques en 2D ou en 3D.

TEQC : Permet principalement de convertir les données natives GNSS au format RINEX.

UNAVCO : Consortium d'universités à but non lucratif facilitant la recherche sur la géoscience.

## Table des matières

Remerciements .....	2
Liste des abréviations .....	3
Glossaire .....	4
Table des matières .....	5
Introduction .....	6
<b>I    PRÉSENTATION DU SITE ET DU MATÉRIEL .....</b>	<b>7</b>
I.1    LE GLACIER D'ARGENTIERE .....	7
I.2    HISTORIQUE DES ETUDES .....	8
I.3    RESEAU GPS POUR L'ETUDE .....	12
I.3.1    Localisation des stations .....	12
I.3.1    Caractéristiques des stations GPS .....	13
I.4    LE POSITIONNEMENT RELATIF PAR MESURES DE PHASE EN GPS .....	15
<b>II    PRÉSENTATION DE TRACK ET TRAITEMENT DES DONNÉES .....</b>	<b>19</b>
II.1    LE LOGICIEL TRACK .....	19
II.2    TRAITEMENT DES DONNÉES .....	23
II.2.1    Tests des différents signaux GPS .....	23
II.2.2    Fenêtres des données .....	25
II.2.3    Multi-trajets .....	26
II.2.4    Lissage des séries temporelles .....	29
II.2.5    Vitesses .....	32
II.2.6    Précisions des séries lissées et des vitesses horizontales .....	35
<b>III    ANALYSES ET INTERPRÉTATIONS DES RESULTATS.....</b>	<b>37</b>
III.1    COMPARAISON INTER-SAISONNIERE DE LA VARIABILITE SUB-DIURNE .....	37
III.2    ÉVÉNEMENTS PARTICULIERS .....	42
III.2.1    Soulèvement au mois de Juin .....	42
III.2.2    Interventions sur les stations GPS .....	43
III.2.3    Stagnation de la verticale sur une courte période .....	44
III.3    SIGNAUX INTER-SAISONNIERS .....	45
III.3.1    Vitesses horizontales .....	45
III.3.2    Positions verticales .....	46
III.4    COMPARAISON AVEC LES RESULTATS EN POSITIONNEMENT STATIQUE .....	48
Conclusion .....	51
Bibliographie .....	53
Liste des figures .....	55
Table des annexes .....	57
Annexe 1 Vitesses horizontales et déplacements verticaux du 18/03/2016 au 9/12/2016 ..	58
Annexe 2 Vitesses horizontales et azimuts journaliers du 24 au 27/08/2016 .....	65
Annexe 3 Vitesses horizontales en fonction de la direction moyenne et de la perpendiculaire du 24 au 27/08/2016 .....	66

## Introduction

Depuis plusieurs décennies, le glacier d'Argentière, situé dans les Alpes, sur le massif du Mont Blanc, fait l'objet de nombreuses études tant par les glaciologues que les géophysiciens. Les méthodes sont variées et parfois originales pour obtenir le plus d'informations possible et la collaboration des différents chercheurs est de mise pour faire concorder tous les résultats, dans le but d'étudier les déplacements du glacier et d'en comprendre les causes.

L'étude de la variation du glissement du glacier est primordiale pour connaître sa dynamique par rapport à des problématiques comme la climatologie et les ressources en eau. Le déplacement peut être observé de plusieurs manières mais une méthode connue et précise est utilisée depuis une dizaine d'années : le positionnement par GPS (Global Positioning System). Les premières mesures étaient des campagnes annuelles mais avec l'arrivée de récepteurs consommant peu d'électricité, des mesures continues ont été réalisées puis analysées sur de longues périodes (une année ou une saison) (Ponton, 2013). Cela a permis de se rendre compte que beaucoup de facteurs devaient être pris en compte pour expliquer les variations du phénomène de glissement.

Après avoir obtenu des résultats annuels et saisonniers, l'objectif était d'exploiter les données GPS continues sur de plus courtes périodes. Les données étaient traitées jusqu'ici en statique mais cela ne permettait d'avoir qu'un positionnement moyen sur plusieurs heures. Des analyses horaires ont montré en 2011 que des variations sub-diurnes apparaissaient, essentiellement pendant la période estivale. Grâce à la méthode cinématique, des résultats peuvent être apportés toutes les secondes permettant des analyses plus poussées et mieux adaptées. Cette méthode est appliquée grâce au module Track du logiciel GAMIT (Herring, 2015), développé par le MIT (Massachusetts Institute of Technology).

Nous aborderons tout d'abord dans ce recueil la configuration du site du glacier d'Argentière avec les stations GPS disponibles, leurs caractéristiques, ainsi que le principe du positionnement GPS. Nous nous pencherons par la suite sur le programme Track, le traitement des données enregistrées et la multitude de paramètres à prendre en compte pour le bon déroulement des calculs. Pour finir, nous ferons l'analyse des résultats obtenus en les comparant à ceux des années précédentes (avec la méthode statique) et tenterons de donner les explications les plus plausibles des phénomènes observés.

# I Présentation du site et du matériel

## I.1 Le glacier d'Argentière

Le glacier d'Argentière est situé dans le département de Haute-Savoie, sur le Massif du Mont-Blanc. Il s'étend sur une longueur d'environ 10 km en partant d'une altitude de 3600 m pour finir au point le plus bas situé à 1600 m. Sa superficie est de 19 km<sup>2</sup>. C'est un glacier tempéré, ce qui signifie qu'il a une température proche du point de fusion (0°), sauf à la surface où la température varie en fonction des saisons. Il se comporte donc comme les autres glaciers des Alpes et d'autres glaciers dans l'Himalaya ou les Rocheuses par exemple.

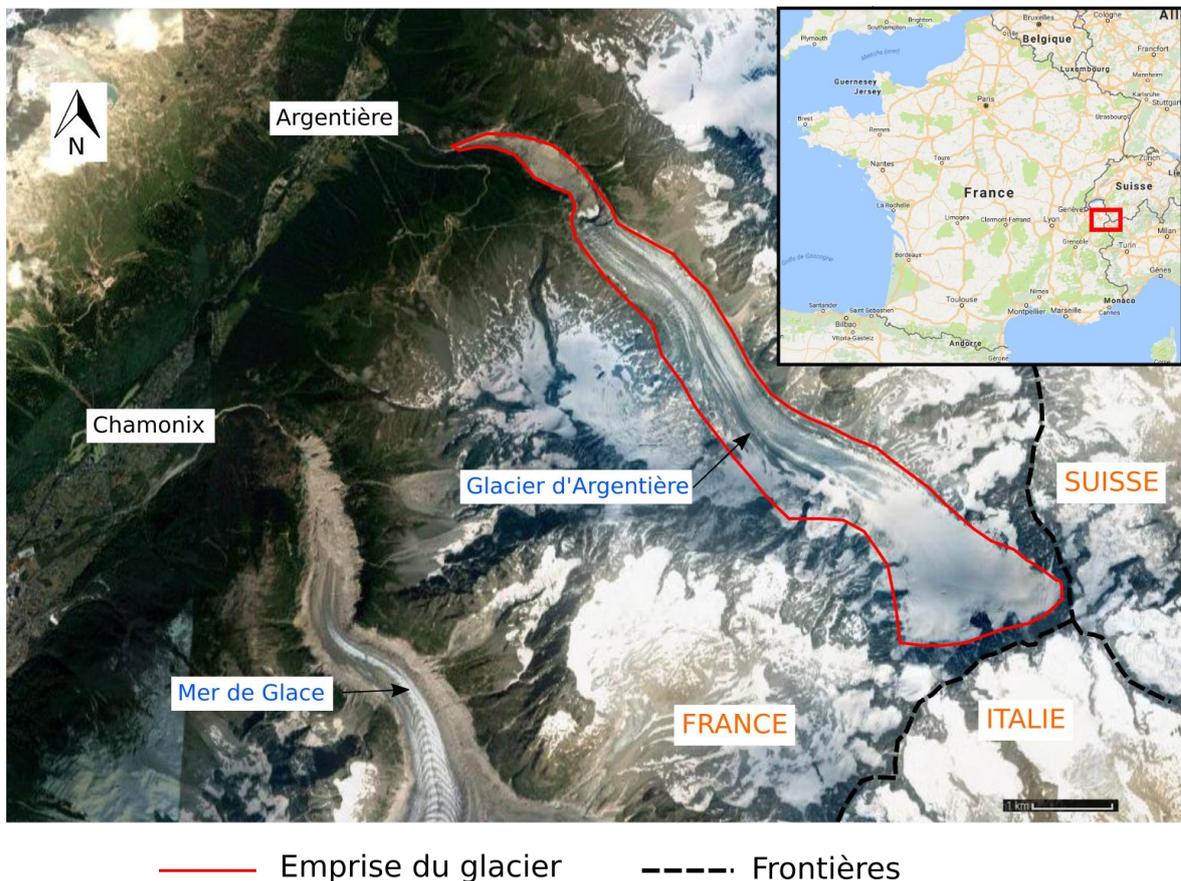


Figure 1 : Localisation du glacier d'Argentière. *Source : google maps pour le fond de carte.*

## I.2 Historique des études

Le glacier d'Argentière est étudié depuis de nombreuses années. En effet, il est possible de retrouver quelques observations datant du début du XIX<sup>ème</sup> siècle, pas forcément précises mais qui montrent que ce glacier attire l'attention de plusieurs chercheurs depuis des centaines d'années (Vivian, 2005). Le début des observations sur la vitesse de glissement, l'équilibre de masse et la variation de l'épaisseur du glacier commence avec beaucoup d'attention en 1975 par le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, à Grenoble).

Depuis 1997, des mesures sont acquises quasiment en continu. Différents moyens sont utilisés pour obtenir ces informations comme des sismographes, un cavitomètre (roue de vélo qui touche le dessous du glacier et est attachée à un bras articulé fixé à la roche (Fig. 2)), des mesures de débit de ruissellement, des images radar satellitaire (SAR), des données météorologiques et des mesures GPS.



Figure 2 : Cavitomètre situé sous le glacier d'Argentière

Toutes ces données ont mené à plusieurs résultats (Vincent et al., 2009). Tout d'abord, ces derniers indiquaient que la vitesse de glissement annuelle était en baisse de 10 m/an à 2730 m depuis les deux dernières décennies en passant de 60 m/an à 50 m/an. Différentes explications ont été apportées concernant la diminution de la vitesse du glissement du glacier et des relations ont été trouvées, notamment entre la vitesse en

surface, la vitesse de glissement à la base du glacier et l'épaisseur de la glace (Vincent and Moreau, 2016). Des études saisonnières ont été réalisées, montrant que la vitesse de glissement augmente avant ou pendant une période de fort ruissellement (Fig. 3). En revanche, à la fin de la période de fonte de la glace, la vitesse de glissement décroît et n'est plus vraiment dépendante du ruissellement.

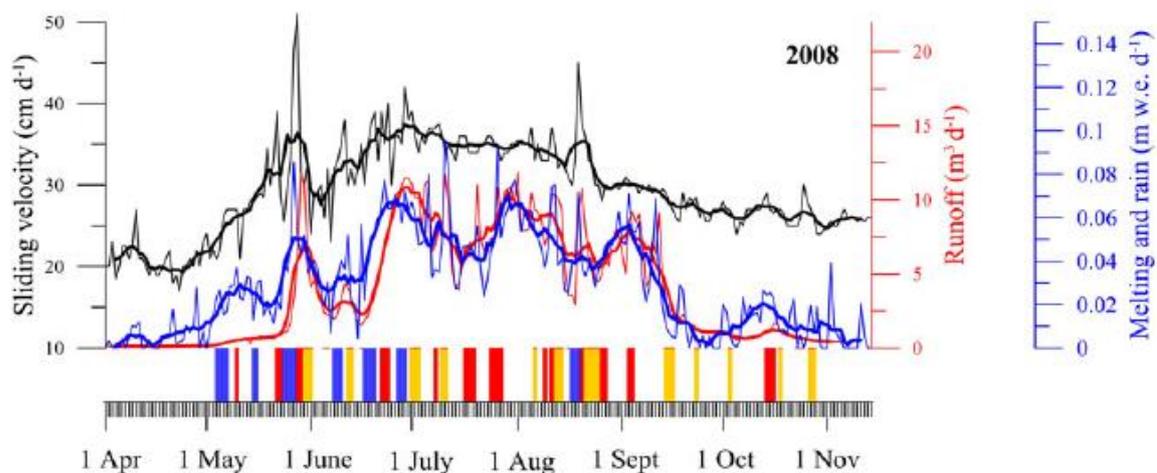


Figure 3 : Vitesse de glissement (en cm/jour) (ligne noire), ruissellement sous-glaciaire (en m<sup>3</sup>/jour) (ligne rouge) et neige fondue et précipitations (en mètres d'eau équivalent/jour) (ligne bleue) durant la saison de fonte de la glace. Les bandes bleues sur la partie inférieure du graphique indique une augmentation simultanée du ruissellement et de la vitesse de glissement, les bandes rouges correspondent à une augmentation du ruissellement pendant une diminution de la vitesse de glissement, les bandes jaunes indiquent une diminution du ruissellement et de la vitesse de glissement. *Source : Vincent and Moreau, 2016*

Des mesures GPS continues ont été organisées depuis 2007. Les données acquises ont, dans un premier temps, été traitées en mode statique, c'est-à-dire qu'une position était calculée toutes les 6h. Cette méthode est très efficace et très précise (quelques mm  $\pm$  0.5 à 1 ppm, soit  $<$  1 cm pour de courtes lignes de base). Elle permet de calculer les tendances de la vitesse du glissement du glacier sur une période assez longue (plusieurs semaines, mois ou années). Des résultats ont été obtenus (Ponton, 2013) et montrent que le glacier se déplace de 12.3 cm/jour en moyenne au niveau de la station ARGG (2714 m) en hiver et de 17.7 cm/jour au niveau de la station SERA (2440 m) (Fig. 4), deux stations GPS situées directement sur le glacier (Fig. 5).

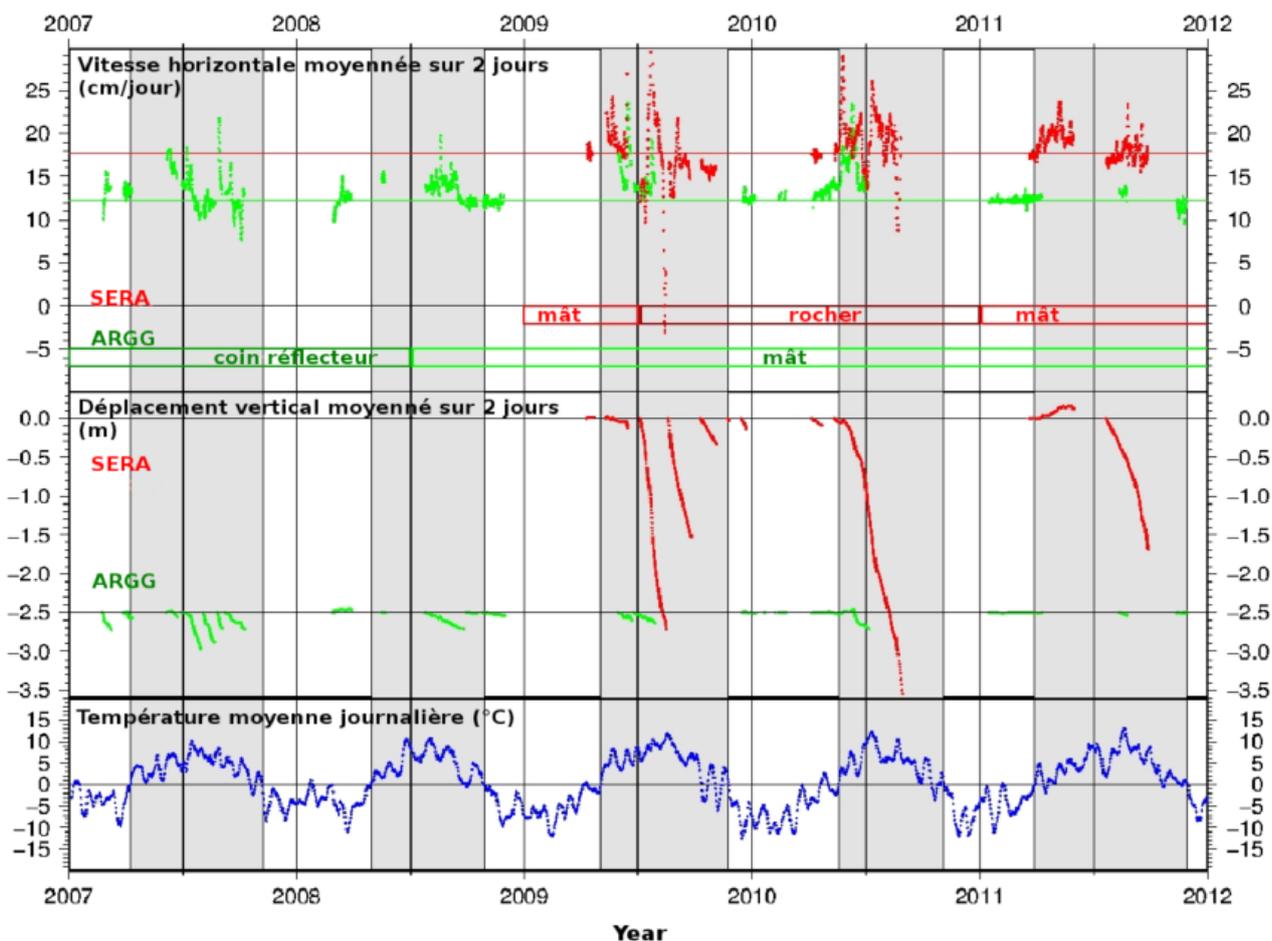


Figure 4 : Vitesses horizontales avec une position toutes les 6h, déplacements verticaux corrigés de la pente du lit rocheux et températures journalières moyennées sur 10 jours. Les vitesses horizontales sont calculées en utilisant une fenêtre glissante de 2 jours à partir des positions horizontales moyennées sur 1 jour. Les bandes grisées représentent les périodes pendant lesquelles la température est positive. *Source : Ponton, 2013*

Le phénomène de soulèvement qui apparaît en 2011 au niveau du déplacement vertical pourrait, selon leurs analyses par rapport à des études précédentes (Iken et al.1983; Iken and Bindschadler 1986; Sugiyama et al. 2010), être dû à une séparation entre la base du glacier et la roche provoquée par une augmentation de la pression de l'eau à la base du glacier lors de la saison estivale.

Des analyses ont également été réalisées pour évaluer des positions toutes les heures pour des intervalles de quelques jours en Avril et en Août 2011 (Ponton, 2013). Ces positions horaires étaient obtenues à partir des analyses de sessions de 6h, décalées d'une heure (24 sessions par jour). Les résultats ont permis d'identifier une période en Août pendant laquelle des variations importantes de la vitesse apparaissaient. Un phénomène de variation sub-diurne était observé au niveau de la vitesse horizontale du glissement du

glacier et un cycle diurne était visible sur le déplacement vertical. En s'appuyant sur des recherches précédentes (Fischer and Clarke, 1997), un mécanisme de stick-slip semblait s'appliquer. Ce mécanisme correspond au fait que la surface se soulève alors que la vitesse horizontale est faible. Ces soulèvements étaient de l'ordre de 5 cm (Fig. 33). On constate, grâce à ces résultats que le GPS est une méthode efficace pour étudier les variations du glissement du glacier car les valeurs obtenues, de plusieurs dizaines de centimètres, sont bien supérieures aux précisions calculées (5.6 cm/jour pour la vitesse horizontale et 2.5 cm pour la position verticale) pour 2011.

## I.3 Réseau GPS pour l'étude

### I.3.1 Localisation des stations

Un petit réseau GPS est installé dans les environs du glacier. Celui-ci est composé de 4 stations GPS disposées de façon méthodique, afin d'avoir des données précises et contrôlées. Deux d'entre elles permettent d'étudier le glissement du glacier et sont donc installées directement sur la glace et deux autres sont des stations fixes, nécessaires pour calculer la position des premières en mode de positionnement relatif.

Les stations installées sur le glacier se nomment ARGG (pour Argentière glacier) et SERA (pour sérac, c'est un bloc de glace qui se détache partiellement d'un glacier). La première, ARGG, est la plus haute des deux et culminait à une altitude de 2714 m en 2016. Elle se situe à proximité de la ligne d'équilibre du glacier, qui correspond à une zone séparant le lieu où la neige s'accumule et le lieu où la glace fond. Elle est implantée à 4 m dans la glace, ce qui permet de laisser le mât deux années consécutives s'il n'y a pas de problème. C'est la station que nous étudierons par la suite car la deuxième, SERA, se trouvait à environ 2440 m mais ne fonctionne plus depuis 2011.

Les stations qui ne sont pas sur le glacier se nomment ARGR (pour Argentière refuge) et CHMX (pour Chamonix). La première, ARGR est située près d'un refuge et culmine à une altitude de 2835 m. Elle se situe à seulement 500 m de la station ARGG, nous avons donc choisi d'utiliser cette station fixe pour nos calculs. La deuxième station fixe se situe dans la ville de Chamonix, à une dizaine de kilomètres du glacier, à une altitude de 1121 m. Elle a été utilisée pour certains tests réalisés dans cette étude.



Figure 5 : Répartition des stations GPS sur le glacier d'Argentière. Source : géoportail pour le fond de carte

### I.3.1 Caractéristiques des stations GPS

Ces stations enregistrent des données presque continues depuis 2007. Il arrive parfois que des problèmes surgissent, par exemple l'antenne qui tombe à cause de la fonte de la glace en été, ce qui empêche d'avoir une continuité parfaite.

Dans ce mémoire, les deux principales stations que nous utiliserons seront ARGG et ARGR en raison de leur proximité. La première station, ARGG, est équipée d'un récepteur Trimble NetR9, avec une antenne Zephyr II posée sur un mât ajustable en métal et alimentée par des panneaux solaires montés sur un mât séparé, à côté de l'antenne. Cette station joue le rôle du mobile. Un coin réflecteur est également posé à proximité et sert de point de référence pour des images SAR (Fallourd, 2012). Pour la station ARGR, un récepteur Trimble NetRS est installé, avec l'antenne sur un trépied, lui-même fixé sur un rocher. Elle n'est pas située directement sur le glacier mais sur une partie à côté qui est considérée comme fixe car nous n'avons pas pris en compte le mouvement des Alpes. Elle constitue donc la base.



Figure 6 : Dispositifs des stations GPS ARGG (à gauche) et ARGR (à droite) le 9 Décembre 2016

Plusieurs campagnes sont organisées chaque année afin de récupérer les données, élever ou abaisser le mât de la station ARGG pour ne pas qu'il soit recouvert par la neige en hiver mais aussi pour réparer ou maintenir en état de marche les appareils et les panneaux solaires.

Les principales caractéristiques des deux appareils sont données ci-après.

		ARGR (refuge, fixe)	ARGG (glacier, mobile)
Type de récepteur		Trimble Net RS	Trimble Net R9
Signaux mesurés		L1 C/A, L1P et L2P	L1 C/A, L2C, L2P et L5
Précision positionnement statique	Horizontale	5 mm +0.5 ppm	3 mm +0.1 ppm
	Verticale	5 mm + 1 ppm	3 mm + 0.4 ppm
Précision positionnement cinématique	Horizontale	-	8 mm + 1 ppm
	Verticale	-	15 mm + 1 ppm
Mémoire	Interne	150 Mo	8 Go
	Externe	1 Go	> 1To
Vitesse d'enregistrement		10 Hz max	50 Hz max

Tableau 1 : Caractéristiques des appareils en station sur ARGR et ARGG.

La station NetRS (ARGR) ne possède pas de mémoire externe comme une clé usb ou une carte mémoire. De ce fait, il faut aller récupérer les données sur place plusieurs fois par an. Cette station peut enregistrer jusqu'à 3400 h de données avec des époques de 15 secondes, ce qui équivaut à plus de 4 mois pour cette fréquence d'enregistrement.

Ces récepteurs GPS fonctionnent par positionnement relatif, et utilisent des mesures de phase pour atteindre les précisions indiquées dans le tableau ci-dessus. Nous allons donc expliquer ce principe de positionnement.

## I.4 Le positionnement relatif par mesures de phase en GPS

Deux types de positionnements GPS existent : l'absolu et le relatif. Ils ont tous les deux leurs avantages et leurs inconvénients mais nous nous intéresserons au positionnement relatif car c'est celui que nous avons utilisé lors de cette étude.

Le positionnement relatif correspond au fait d'utiliser deux récepteurs GPS qui enregistrent simultanément des données transmises par un même satellite. La première station est fixe et connue en coordonnées (base) tandis que la deuxième station est celle dont on cherche la position (mobile). Les coordonnées recherchées sont obtenues en calculant le vecteur entre les deux stations, que l'on appelle plus communément la ligne de base.

Les mesures réalisées par les récepteurs sont des mesures de pseudo-distance et de phase. Les premières sont les moins précises et ne seront pas traitées dans ce mémoire. En revanche, les mesures de phase sont celles utilisées pour cette étude et sont globalement plus précises que celles citées précédemment. Cet autre type de mesure s'appuie sur le fait que les signaux envoyés par les satellites se répètent.

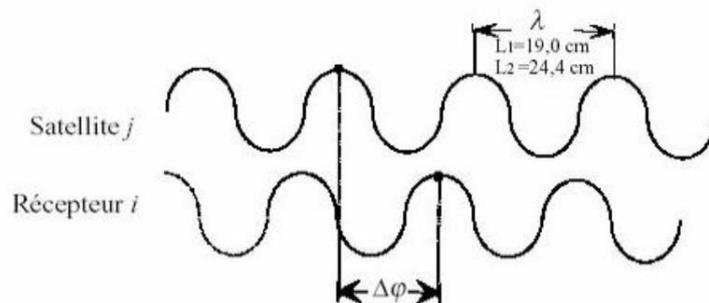


Figure 7 : Décalage entre le signal émis par le satellite et celui reçu par le récepteur. Source : Duquenne et al., 2005

En considérant un récepteur  $i$  et un satellite  $j$ , le but est ainsi de déterminer le déphasage total  $\Delta\phi_i^j$  entre le signal envoyé par le satellite et celui reçu par le récepteur sous forme de code. Afin de calculer le déphasage total, il est nécessaire de connaître le nombre de cycles entiers entre le satellite et le récepteur, que l'on appelle ambiguïtés entières. Cependant, cette donnée n'est pas mesurée par le récepteur. Le déphasage total s'écrit :

$$\Delta\phi_i^j = \Delta\phi_i^j + N_i^j$$

Avec :

- $\Delta\phi_i^j$ , le déphasage total ;
- $\Delta\varphi_i^j$ , la mesure de phase, donnée par le récepteur et égale à  $\Delta\varphi_i^j = f(t_{Ri} - t_E^j)$ ,  $f$  étant la fréquence,  $t_{Ri}$  le temps de réception du signal et  $t_E^j$  le temps d'émission du signal ;
- $N_i^j$ , le nombre d'ambiguïtés entières du satellite  $j$  observées par le récepteur  $i$ .

D'autres paramètres sont à prendre en compte lors de mesures GPS. En effet, l'atmosphère par exemple constitue une source d'erreur car cela provoque un petit retard qui n'est pas négligeable. Il faut donc prendre en compte le délai ionosphérique et le délai troposphérique notés respectivement  $\Delta\rho_i^{iono,j}$  et  $\Delta\rho_i^{trop,j}$ . Ces erreurs sont aujourd'hui assez bien connues et peuvent être corrigées relativement bien.

Les erreurs dues au satellite et au récepteur doivent également être corrigées. Parmi celles-ci se trouvent les erreurs de décalage d'horloges aussi bien pour le satellite ( $dt^j$ ) que pour le récepteur ( $dt_i$ ) et le décalage de centre de phase de l'appareil qui est la variation de la position du point d'impact des signaux des satellites sur l'antenne. Cette dernière erreur est connue grâce à des calibrations et peut donc être corrigée.

En prenant en compte toutes ces composantes, l'équation de mesure de pseudo-distance devient :

$$R_i^j = \rho_i^j + c(dt^j - dt_i) + \Delta\rho_i^{iono,j} + \Delta\rho_i^{trop,j}$$

Avec  $\rho_i^j$  la distance géométrique satellite-récepteur.

On obtient l'équation de mesure de phase suivante :

$$\lambda\Delta\varphi_i^j = \rho_i^j + c(dt^j - dt_i) - \lambda N_i^j + \Delta\rho_i^{iono,j} + \Delta\rho_i^{trop,j}$$

Cependant, un problème persiste : le nombre d'inconnues est toujours supérieur au nombre de mesures, ce qui ne permet pas de résoudre l'équation. Pour cela, un compteur de cycles est mis en place sur chaque récepteur. Ainsi, seul le nombre entier de cycles de déphasage à la première mesure est inconnu. Ce compteur de cycles est noté  $n_i^j(t_0 \rightarrow t)$

On obtient alors une équation de ce type :

$$\Delta\varphi_i^j(t) = \frac{f}{c} \rho_i^j + f(dt^j - dt_i) - N_i^j(t_0) - n_i^j(t_0 \rightarrow t) + \frac{f}{c} (\Delta\rho_i^{iono,j} + \Delta\rho_i^{trop,j})$$

La plupart de ces erreurs peuvent être éliminées en utilisant la méthode de calcul des doubles différences. Cette méthode permet également de résoudre les ambiguïtés entières. Elle consiste à effectuer des différences entre les mesures de phases pour au moins deux satellites et deux récepteurs. Ainsi, cela permet de s'affranchir des décalages d'horloges des satellites et des récepteurs mais également des délais ionosphérique et troposphérique. Pour les erreurs atmosphériques, cela ne concerne que les lignes de base assez courtes (< 10 km) car les délais sont les mêmes pour des stations proches.

En considérant deux récepteurs i et k ainsi que deux satellites j et l, on obtient :

$$\Delta\varphi_{i,k}^l(t) = \frac{f}{c} \rho_{i,k}^l + f(dt_i - dt_k) - N_{i,k}^l(t_0) - n_{i,k}^l(t_0 \rightarrow t) + \frac{f}{c} (\Delta\rho_{i,k}^{iono,l} + \Delta\rho_{i,k}^{trop,l})$$

$$\Delta\varphi_{i,k}^j(t) = \frac{f}{c} \rho_{i,k}^j + f(dt_i - dt_k) - N_{i,k}^j(t_0) - n_{i,k}^j(t_0 \rightarrow t) + \frac{f}{c} (\Delta\rho_{i,k}^{iono,j} + \Delta\rho_{i,k}^{trop,j})$$

Ainsi, en effectuant la différence :

$$\Delta\varphi_{i,k}^{j,l}(t) = \Delta\varphi_{i,k}^l(t) - \Delta\varphi_{i,k}^j(t)$$

$$\Delta\varphi_{i,k}^{j,l}(t) = \frac{f}{c} \rho_{i,k}^{j,l} - N_{i,k}^{j,l}(t_0) - n_{i,k}^{j,l}(t_0 \rightarrow t) + \frac{f}{c} (\Delta\rho_{i,k}^{iono,j,l} + \Delta\rho_{i,k}^{trop,j,l})$$

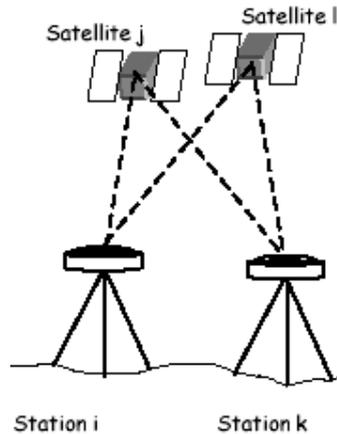


Figure 8 : Schéma du principe des doubles différences

Dans une analyse scientifique, les erreurs de décalage d'horloge sont éliminées par doubles différences, l'erreur ionosphérique est éliminée par la combinaison LC (L1+L2)

des phases de fréquence L1 et L2, l'erreur troposphérique est estimée et les ambiguïtés sont résolues par des algorithmes dédiés.

De plus, les GPS peuvent fonctionner en mode statique, c'est-à-dire qu'une position moyenne est calculée sur un intervalle de données (1h, 6h, 24h), ou bien en cinématique, ce qui signifie qu'une position est enregistrée pour chaque époque (1s, 30s) mais sans moyennner. Dans notre cas, nous avons travaillé sur le positionnement cinématique à partir d'un logiciel appelé Track.

## II Présentation de Track et traitement des données

### II.1 Le logiciel Track

Utiliser la méthode cinématique demande deux prérequis. Il faut tout d'abord que les récepteurs enregistrent à haute fréquence afin de pouvoir évaluer les positions toutes les secondes et il faut également utiliser un logiciel particulier qui permet de traiter des données GPS uniquement en cinématique comme le logiciel Track du MIT, l'équivalent cinématique de GAMIT qui est utilisé pour le positionnement statique.

Grâce à une analyse cinématique, il sera possible de compléter et vérifier les conclusions concernant la variabilité sub-diurne du déplacement du glacier de l'ordre de 30 cm/jour (Ponton, 2013). Cette méthode a l'avantage de donner beaucoup de positions en peu de temps mais est moins précise que la méthode statique (environ 2 cm en horizontale et 5 cm en verticale). Cela permettrait de confirmer si des variations sub-diurnes sont visibles et éventuellement expliquer à quoi elles sont dues.

GAMIT (Global positioning system At Massachusetts Institute of Technology), GLOBK (Global Kalman Filter) et Track sont des programmes complémentaires développés par le MIT permettant de traiter et d'analyser des données GPS.

GAMIT est un ensemble de plusieurs programmes qui permet de calculer la position de la station sur laquelle ont été récupérées les données en utilisant les mesures de phase. D'autres informations sont également calculées comme les délais atmosphériques, les orbites des satellites, ... Cette suite de programmes permet d'exploiter des données acquises avec une approche de positionnement statique.

GLOBK est un filtre de Kalman (estime un signal utile qui est pollué par un bruit (Alazard, 2006)) qui permet par ailleurs de combiner plusieurs méthodes de positionnement comme le GPS, le VLBI (Very Long Baseline Interferometry) et le SLR (Satellite Laser Ranging). Les données à entrer sont des « quasi-observations », c'est-à-dire des estimations et matrices de covariance des coordonnées des stations, les paramètres d'orientation de la Terre et les paramètres d'orbites. GLOBK est utilisé dans le positionnement statique pour calculer une position unique lors d'une campagne de mesure, pour établir des séries temporelles de positions ou pour calculer des vitesses constantes à partir de mesures GPS sur des intervalles de temps longs (plusieurs mois ou années).

Track permet de calculer des séries temporelles de positions avec la méthode cinématique. Cela permet d'étudier le mouvement d'une station toutes les secondes ou toutes les 30 secondes par rapport à une base fixe. Différents modes de positionnement relatif sont disponibles dans Track en fonction de la distance entre la base et le mobile. Le mode « short » permet de réaliser des calculs pour des lignes de base de moins d'1 km. Dans ce cas, les paramètres atmosphériques peuvent être ignorés en raison de la faible distance entre les deux stations. Le mode « long » concerne les longues lignes de base (plus d'1 km) et estime les paramètres atmosphériques. Un autre mode est disponible : le mode « air ». Il est notamment utilisé pour le positionnement d'avions.

Pour lancer un calcul Track, il faut un fichier de commande dans lequel toutes les options et les informations en entrée sont renseignées. Parmi les informations en entrée, on trouve les fichiers d'observation que l'on appelle Rinex (Receiver Independent Exchange Format), les fichiers d'orbites des satellites, les coordonnées cartésiennes approchées des stations, les informations sur l'antenne, ...

Les fichiers Rinex sont obtenus après conversion des données brutes à l'aide d'un programme comme teqc de UNAVCO (Estey and Wier, 2014). Il permet principalement de convertir les données natives GNSS (Global Navigation Satellite System) au format Rinex, d'éditer des fichiers Rinex (découpage, fusion,...) et de réaliser des contrôles de qualité. D'où le nom teqc pour Translation, Editing et Quality Checking.

Les fichiers d'orbites sont de deux types :

- Les éphémérides radiodiffusées sont obtenues en même temps que l'enregistrement des mesures, pour les satellites visibles. Leur précision est cependant limitée : environ 2 m. Ces éphémérides sont aussi disponibles sur le site du RGP (Réseau GNSS Permanent) pour tous les satellites
- Les éphémérides recalculées par l'IGS (International GNSS Service) sont disponibles moins rapidement que les précédentes mais sont plus précises :
  - Les produits ultra-rapides sont disponibles après 4h avec une précision de 0.1 m ;
  - Les produits rapides sont disponibles après 1 jour avec une précision de 0.05 m ;

- Les produits finaux sont disponibles après 2 semaines avec une précision inférieure à 0.05 m.

Pour le calcul à l'aide de Track, nous avons utilisé les orbites finales de l'IGS, récupérées via des centres d'archives comme le CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System), SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center), MIT, à partir d'une commande de GAMIT. Le centre d'archives utilisé était le CDDIS, qui avait été développé pour servir de banque de données pour la NASA et qui, aujourd'hui, archive et met à disposition les orbites des constellations GPS et GLONASS mais aussi les données SLR (Satellite Laser Ranging) et VLBI (Very Long Baseline Interferometry) entre autres. Ces orbites sont indispensables pour calculer les positions des satellites et doivent être contenues dans le fichier commande de Track.

C'est dans ce fichier commande (Fig. 9) que l'on précise également le mode que l'on veut utiliser (short, long ou air). L'option « data\_type » permet de choisir le type d'observable avec lequel on souhaite travailler. Par exemple, il est possible de choisir de ne calculer la série qu'avec la phase L1. L'option « back smooth » permet d'appliquer un filtre de lissage. L'option « ante\_off » permet, quant à elle, d'introduire les informations nécessaires à propos d'une antenne, quelle qu'elle soit. Enfin, l'option « antmod\_file » permet de prendre en compte les centres de phase des stations et des satellites et l'option « dcb\_file » permet d'utiliser correctement les codes GPS pour des valeurs a priori.

```

obs_file

  argr argr2210.16o F
  argg argg2210.16o K

nav_file igs201608.sp3 sp3

mode short

interval 30

back smooth

sum_file <S01>.sum
pos_root <S01>

data_type l1

ante_off
  argg 0.000 0.000 0.000 TRM57971.00 NONE N
  argr 0.000 0.000 0.000 TRM41249.00 TZGD C
  chmx 0.000 0.000 0.000 ASH701945E_M NONE C

antmod_file ~/gg/tables/antmod.dat

dcb_file ~/gg/tables/dcb.dat.gps

```

Figure 9 : Exemple de fichier de commande de Track.

Une fois le calcul réalisé, on obtient plusieurs fichiers de sortie. Les premiers concernent la position calculée pour chaque époque avec des informations complémentaires comme les incertitudes, la date et l'heure de chaque époque, ... (Fig. 10). Un autre fichier est également créé et indique, quant à lui, le nombre de doubles différences effectuées, le nombre de cycles du signal L1, ... Il est possible de modifier la forme de ces fichiers et de choisir par exemple les types de coordonnées à avoir en sortie (coordonnées géographiques, cartésiennes, planes), les systèmes de référence, ...

* YY	MM	DD	HR	MIN	Sec	dNorth	+-	dEast	+-	dHeight	+-	RMS	#	Atm	+-
Fract DOY					Epoch	Rho-UA	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(mm)	DD	(mm)	(mm)
2016	8	8	0	0	0.000000	-387.1852	0.0139	-316.4525	0.0053	-110.1595	0.0143	0.00	4	0.00	0.00
221.000000000000					1 10	1 K	0.000								
2016	8	8	0	0	29.999999	-387.2109	0.0140	-316.4531	0.0053	-110.1704	0.0143	0.72	4	0.00	0.00
221.00034722222					2 10	1 S	0.000								
2016	8	8	0	1	0.000000	-387.1984	0.0141	-316.4554	0.0053	-110.1633	0.0142	0.20	4	0.00	0.00
221.000694444445					3 10	1 S	0.000								
2016	8	8	0	1	30.000000	-387.2098	0.0142	-316.4556	0.0053	-110.1679	0.0142	1.19	4	0.00	0.00
221.00104166666					4 10	1 S	0.000								
2016	8	8	0	2	0.000000	-387.1993	0.0143	-316.4542	0.0053	-110.1566	0.0142	0.80	4	0.00	0.00
221.00138888889					5 10	1 S	0.000								
2016	8	8	0	2	30.000000	-387.1977	0.0144	-316.4582	0.0053	-110.1692	0.0141	1.63	4	0.00	0.00
221.00173611111					6 10	1 S	0.000								

Figure 10 : Extrait d'un fichier de sortie de Track

## **II.2 Traitement des données**

Pour une bonne compréhension de Track et dans le but de vérifier si les résultats étaient justes, les premiers calculs ont été réalisés sur des données du 13 Mars 2015. Des résultats avaient déjà été obtenus pour cette date, ce qui permettait d'avoir un contrôle.

### **II.2.1 Tests des différents signaux GPS**

Après avoir obtenu des résultats cohérents par rapport aux précédents, différents tests ont été réalisés, toujours pour le 13 Mars 2015, afin de déterminer les paramètres les plus appropriés pour le traitement des données de 2016 et pour corriger certains problèmes. L'un d'eux concernait des valeurs élevées sur des résidus de l'estimation du délai ionosphérique obtenus dans le fichier de sortie « .sum ». Nous avons donc essayé plusieurs tests, notamment en utilisant différents signaux GPS ou différentes combinaisons lors du calcul pour réduire ces valeurs.

Pour envoyer des informations, chaque satellite transmet des signaux à destination des récepteurs. Les premiers signaux pour le GPS ont été le signal civil L1 C/A et deux signaux militaires L1P et L2P. L1 (1575.42 MHz) et L2 (1227.60 MHz) sont les bandes de fréquences utilisées. Les signaux GPS sont modulés par deux codes : le code Coarse/Acquisition (appelé C/A) et Precision (appelé P). Depuis quelques années, les signaux militaires sont utilisés pour les travaux géodésiques et topographiques. Cependant, pour avoir plus de précision, un nouveau signal civil est apparu sur la fréquence L2 : le signal L2C, en 2005. Seulement certains satellites envoient ce type de signal. Ainsi, il est normalement possible de recevoir les signaux L1P, L2P et L2C (pour les satellites qui peuvent l'envoyer) et d'effectuer un calcul avec ceux-ci.

Les signaux L2P et L2C sont donc différents. Plusieurs récepteurs ont la capacité de reconnaître les deux signaux, d'autres ne peuvent en recevoir qu'un seul. Pour certains, il est même possible de les configurer de manière à enregistrer soit L2P, soit L2C, soit les deux (Berglund, 2011).

Tout d'abord, nous avons essayé d'enlever la mesure de code C2 au moment de la conversion des fichiers bruts. Pour cela, il suffit de supprimer, dans les options de teqc le « C2 ». Cela devait avoir pour conséquence de ne pas prendre en compte la mesure L2C. Cependant, nous nous sommes aperçus, après avoir effectué le calcul sur Track, qu'il

manquait une grande partie des positions. Nous avons des coordonnées pour les 40 premières minutes, puis un saut jusqu'à 6h sans valeurs.

En regardant dans les fichiers Rinex, il s'est avéré que certaines valeurs pour le signal L2 avaient disparues (Fig. 11). En observant plus attentivement, nous avons constaté que les valeurs qui n'apparaissaient plus correspondaient aux mêmes satellites à chaque époque. Nous avons donc des époques pendant lesquelles il n'y avait pas assez d'observations pour calculer une position (4 satellites au minimum). Ces époques correspondaient aux périodes où nous n'avions pas de résultats avec Track.

<pre> 2.11      OBSERVATION DATA  G (GPS)      RINEX VERSION / TYPE teqc 2013Mar15 Karen BONIFACE 20151028 13:19:42UTC PGM / RUN BY / DATE Linux 2.4.21-27.ELsmp Opteron gcc Linux x86_64 =+ COMMENT BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION COMMENT ARGC_1s  MARKER NAME ARGC  MARKER NUMBER -Unknown- -Unknown- OBSERVER / AGENCY 5307K51406 TRIMBLE NETR9 4.81 REC # / TYPE / VERS TRM57971.00 NONE ANT # / TYPE 4411645.8151 541788.6695 4562793.7877 APPROX POSITION XYZ 0.0000 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N 1 1 WAVELENGTH FACT L1/2 7 L1 L2 C1 C2 P2 S1 S2 # / TYPES OF OBSERV 16 LEAP SECONDS SNR is mapped to RINEX snr flag value [0-9] COMMENT L1 &amp; L2: min(max(int(snr_dBHz/6), 0), 9) COMMENT teqc edited: all GLONASS satellites excluded COMMENT teqc edited: all SBAS satellites excluded COMMENT 2015 5 13 0 0 0.0000000 0 GPS TIME OF FIRST OBS END OF HEADER 15 5 13 0 0 0.0000000 0 10G04G17G22G11G19G28G03G32G01G14 105335932.666 8 82080054.11946 20044769.727 20044774.230 50.900 40.600 134686561.232 6 104950584.115 6 25629999.570 25630004.953 25630004.941 39.700 38.400 125111845.396 7 97489769.78144 23807984.164 23807987.148 43.700 26.000 105505026.877 7 82211776.95046 20076934.258 20076937.930 46.600 39.500 115302841.006 8 89846403.60646 21941393.617 21941396.078 49.500 37.300 124134614.572 6 96728316.12243 23622033.875 23622037.996 41.700 22.900 117541245.644 7 91590705.394 7 22367376.656 22367384.789 22367384.605 45.700 44.500 105647661.193 8 82323004.828 46 20104105.600 20104111.371 </pre>	<pre> 2.11      OBSERVATION DATA  G (GPS)      RINEX VERSION / TYPE teqc 2013Mar15 20170207 15:55:46UTC PGM / RUN BY / DATE Linux 2.4.21-27.ELsmp Opteron gcc Linux x86_64 =+ COMMENT teqc 2013Mar15 20170207 15:54:57UTC COMMENT BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION COMMENT ARGC_1s  MARKER NAME ARGC  MARKER NUMBER -Unknown- -Unknown- OBSERVER / AGENCY 5307K51406 TRIMBLE NETR9 4.81 REC # / TYPE / VERS TRM57971.00 NONE ANT # / TYPE 4411645.8151 541788.6695 4562793.7877 APPROX POSITION XYZ 0.0000 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N 1 1 WAVELENGTH FACT L1/2 5 L1 L2 C1 P1 P2 # / TYPES OF OBSERV 16 LEAP SECONDS SNR is mapped to RINEX snr flag value [0-9] COMMENT L1 &amp; L2: min(max(int(snr_dBHz/6), 0), 9) COMMENT teqc edited: all SBAS satellites excluded COMMENT 2015 5 13 0 0 0.0000000 0 GPS TIME OF FIRST OBS END OF HEADER 15 5 13 0 0 0.0000000 0 9G04G17G22G11G19G28G03G01G14 105335932.66648 82080054.11946 20044769.7274 20044774.2304 134686561.232 6 25629999.570 25629999.570 125111845.39647 97489769.78144 23807984.1644 23807987.1484 105505026.87747 82211776.95046 20076934.2584 20076937.9304 115302841.00648 89846403.60646 21941393.6174 21941396.0784 124134614.57246 96728316.12243 23622033.8754 23622037.9964 117541245.644 7 22367376.656 22367376.656 109170988.961 8 20774546.688 118133131.15147 92051748.77745 22479958.5394 22479963.8204 15 5 13 0 0 1.0000000 0 9G04G17G22G11G19G28G03G01G14 105336238.51048 82080292.43446 20044827.7814 20044832.4024 134683044.390 6 25629330.523 25629330.523 125114921.73347 97492166.91944 23808569.7034 23808572.6724 </pre>
---	---

Figure 11 : Extrait d'un fichier Rinex avec l'option « C2 » (à gauche) et sans cette option (à droite)

Étant donné que nous obtenions des résultats complets avec le signal L2C, nous en avons conclu qu'il y avait un problème au niveau de ce signal : soit le signal L2C avait été supprimé mais le signal L2P ne l'avait pas « remplacé » au moment de la conversion des fichiers, soit le signal L2P n'avait pas du tout été enregistré par l'appareil, alors qu'il aurait dû l'être.

Pour vérifier quelle hypothèse était exacte, nous avons réalisé un test : celui de ne prendre que les signaux L2P dans l'étape juste avant teqc. En observant les fichiers Rinex, nous avons pu constater la même chose que précédemment : des valeurs manquantes pour certains satellites. Cela signifiait donc que les signaux L2P n'avaient pas été enregistrés pour les satellites envoyant des signaux L2C et L2P. Ce problème est valable uniquement

pour la station ARGR et est peut-être lié au fait que nous avons quelques valeurs élevées (de l'ordre d'1 m) pour des résidus concernant le délai ionosphérique (estimation des résidus des MW-WL (Melbourne-Wubbena Wide Lane) et EX-WL (Extra Wide Lane)).

Par la suite, nous avons continué les tests afin de réduire les valeurs du délai ionosphérique calculées par Track. Des calculs avec L2C pour ARGR mais sans pour ARGG ont montré que cela ne changeait pas les valeurs du délai.

Les résultats avec le signal L2 n'étant pas concluants, une autre solution consistait à ne réaliser le calcul qu'avec le signal L1. En effet, des scientifiques ont rassemblé des données dans le but de comparer les signaux L1 et LC (L1+L2) (De Juan et al., 2008). Ces données ont été réalisées au niveau d'un glacier au Groenland, et il s'est avéré que les traitements avec L1 étaient plus précis pour des lignes de base courtes (< 6 km) tandis que pour des lignes de base plus grandes (> 6 km), les résultats étaient plus précis avec LC.

Cette fois, le réglage s'effectue dans Track. Une option doit être spécifiée pour faire le calcul avec L1 uniquement. Avec cette configuration, les résultats sont meilleurs, les résidus sur les EX\_WL moins importants dans l'ensemble (de l'ordre d'1 cm).

Les résultats sur Track étant plus probants avec le signal L1 uniquement, nous avons décidé d'utiliser cette configuration.

## **II.2.2 Fenêtres des données**

Lors du calcul des données pour l'année 2016, nous nous sommes aperçus lors du tracé des premières séries qu'il y avait un léger décalage lors du passage d'un jour à un autre (Fig. 12). Ainsi, il a fallu créer de nouveaux Rinex à partir des précédents. Initialement, nous avions des Rinex qui allaient de 0h à 23h 59min 30s. Dans l'optique d'avoir des données continues, nous avons fusionné les Rinex deux par deux puis, lors du calcul avec Track, une session était réalisée entre 0h et 23h 59min 30s et une autre entre 12h et 11h 59min 30s. Ensuite, à l'aide d'un script, il fallait découper les fichiers afin de prendre une première partie de 6h à 17h 59min 30s dans la session de calcul réalisée entre 0h et 23h 59min 30s ainsi qu'une deuxième partie de 18h à 5h 59min 30s dans la session de calcul réalisée entre 12h et 11h 59min 30s. De cette façon, les séries étaient continues.

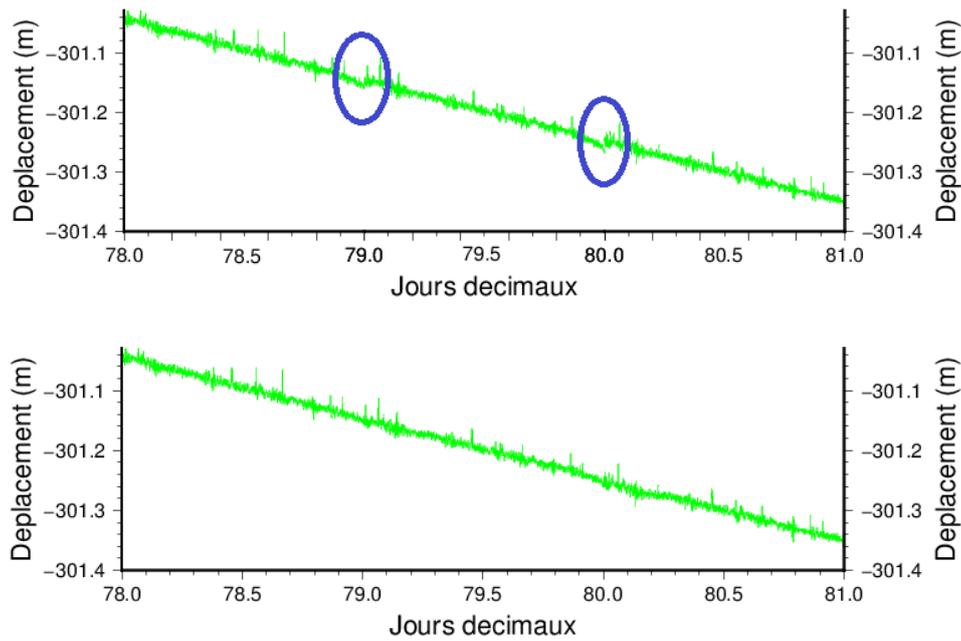


Figure 12 : Comparaison du déplacement de la station ARGG par rapport à ARGR pour la composante Est sur 3 jours (du 18 au 20/03/2016) avec décalages lors des changements de jour (en haut) et sans décalages, après avoir modifié les fenêtres des données (en bas)

### II.2.3 Multi-trajets

Le phénomène de multi-trajets correspond à une erreur de positionnement du récepteur. En effet, un objet plus réfléchissant qu'un autre comme une vitre d'un bâtiment par exemple peut influencer le trajet des signaux envoyés par un satellite. Le signal « rebondit » sur la surface et ne possède pas le même trajet que les autres signaux envoyés. On obtient alors une position erronée de la station. Cette erreur dépend donc de l'endroit où se trouve le récepteur et des éléments qui l'entourent.

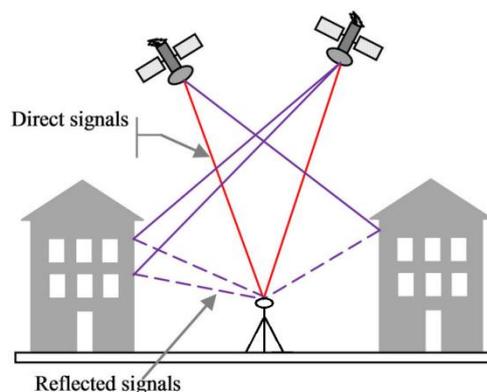


Figure 13 : Principe des multi-trajets. Source : Sateesh Kumar et al., 2013

Cette erreur peut tout de même être corrigée partiellement. Effectivement, chaque satellite possède une orbite précise et une période de révolution qui se répète toutes les 12 h environ. En connaissant la période exacte de révolution, il est possible d'appliquer un filtre sidéral afin de corriger les effets des multi-trajets qui reviennent toutes les 12 h. Ces effets sont beaucoup plus importants pour des méthodes calculant une position par époque, ce qui est le cas du positionnement cinématique. En revanche, l'influence de ce phénomène est réduite pour les techniques calculant des positions moyennées lorsque le temps d'observation est long car les écarts observés sur une petite période sont moyennés sur une période plus longue, avec des valeurs correctes.

Il est aussi possible de réduire les multi-trajets à l'aide d'antennes possédant un plan absorbant ou d'antennes « choke ring » (Fig. 14). Ces dispositifs limitent ainsi les réflexions sans pour autant les éliminer complètement. Sur le glacier, il n'y a pas d'antenne de ce type car les données sont traitées principalement en statique, c'est-à-dire que les positions obtenues sont des moyennes sur un certain intervalle de temps. De ce fait, les multi-trajets n'affectent que très peu le positionnement et l'achat de ce matériel n'est pas nécessaire. De plus, les antennes choke ring sont assez grosses et lourdes, ce qui ne conviendrait pas vraiment pour être fixé en haut du petit mât qui supporte l'antenne. Cela pourrait faire pencher le dispositif et casser ou tordre le mât en cas de fortes rafales de vent.



Figure 14 : Antenne choke ring

Dans notre cas, il est très important de corriger ces multi-trajets car nous utilisons la méthode cinématique. Les satellites de la constellation GPS, ceux utilisés dans notre cas, ont une période de révolution de 11h 58min 2s, c'est-à-dire exactement un demi-jour sidéral (Global Positioning System standard positioning service performance standard, 2008), les satellites font donc deux fois le tour de la Terre en un jour. Cependant, lorsqu'ils reviennent au même endroit au bout de presque 12h, le récepteur est de l'autre côté de la Terre. Il faut donc 23h 56min 4s pour retrouver les mêmes conditions. Ainsi, lorsque des

multi-trajets apparaissent, ils sont sensés se répéter toutes les 23h 56min 4s. Le but est de supprimer, ou plutôt de diminuer leur impact.

Pour cela, il est possible de réaliser une moyenne, sur une quinzaine de jours par exemple, des séries temporelles de positions calculées avec Track. De ce fait, normalement, les multi-trajets qui se répètent tous les jours ressortiront tandis que les positions correctes resteront les mêmes. Une fois la moyenne effectuée, il suffira de soustraire la moyenne à la série originale afin de corriger les multi-trajets.

Cependant, des problèmes apparaissent. Tout d'abord, les multi-trajets se répètent toutes les 23h 56min 4s, or nous avons des positions stockées dans des fichiers de 24h. Il a donc fallu créer un script permettant de découper les fichiers toutes les 23h 56min 4s en faisant attention de basculer les 3min 56s restantes dans le début du fichier suivant.

Le second problème provient du fait que les séries possèdent un certain taux linéaire car la station se déplace de plusieurs centimètres par jour. Ce taux linéaire n'est pas le même chaque jour et doit donc être déterminé et éliminé. Ceci a été effectué grâce à une fonction de GMT (Generic Mapping Tools) appelée `trend1d`. Cette commande permet de trouver la meilleure approximation de la droite de régression linéaire de la série par la méthode des moindres carrés. Une fois la droite trouvée, il réalise la soustraction entre un point de la série et son homologue sur la droite pour obtenir un résidu. Cela permet d'obtenir une série avec des valeurs quasiment nulles et sans pente.

Une fois les nouveaux fichiers comportant des positions sur un jour sidéral créés, ainsi que les taux linéaires éliminés, nous avons choisi d'effectuer la moyenne des séries des 14 jours que nous avons calculées pour le mois de Mars. Nous avons décidé de prendre, dans un premier temps, cette moyenne sur 14 jours en Mars pour corriger les séries calculées pour le mois d'Août car la période de Mars est celle pendant laquelle il n'y a pas encore de fonte et le glacier glisse régulièrement avec sa vitesse hivernale. L'opération consiste simplement en une soustraction entre les valeurs de la série originale et la moyenne calculée pour le mois de Mars. Cette moyenne a également été utilisée pour corriger les multi-trajets du mois de Mars. (Fig. 15). Ce procédé correspond au filtrage sidéral.

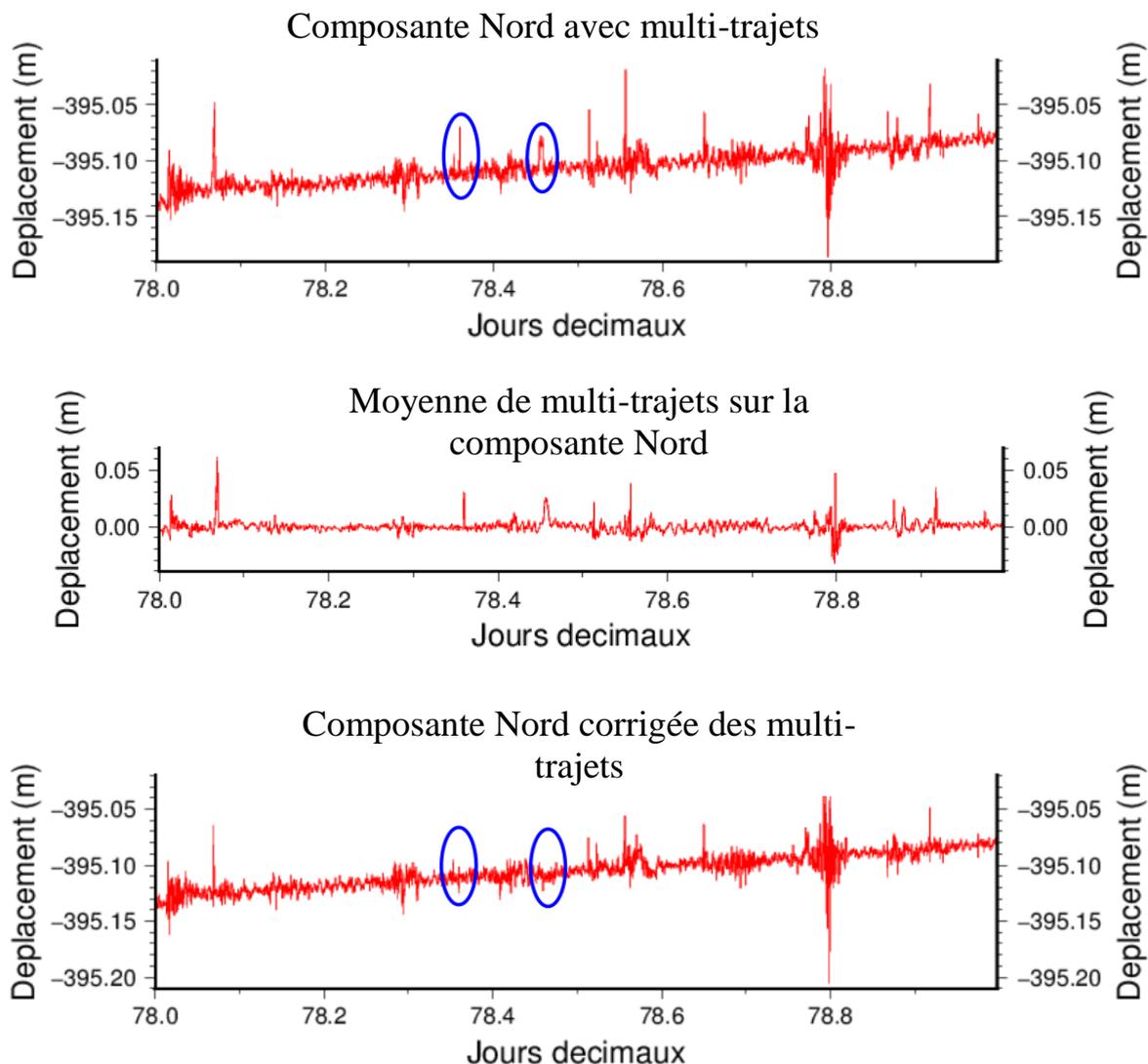


Figure 15 : Comparaison du déplacement relatif de la station ARGG sur la composante Nord par rapport à la station ARGR avec les multi-trajets (en haut) et après correction des multi-trajets (en bas) le 18/03/2016. Le graphique du milieu représente la moyenne des séries que l'on soustrait à la série avec les multi-trajets.

Il reste cependant toujours des endroits avec un fort bruit. Cela vient du fait qu'il y a peu de satellites durant ces périodes à cause des masques que représentent les montagnes et le fait d'utiliser uniquement la constellation GPS. Ainsi, la position est mal contrainte et de ce fait arbitraire, contrairement aux multi-trajets qui se répètent. C'est pour cela que nous avons voulu effectuer une moyenne glissante.

#### II.2.4 Lissage des séries temporelles

Afin d'avoir des séries plus lisses et plus facilement interprétables nous avons choisi d'effectuer une moyenne glissante sur les positions.

La moyenne glissante (ou moyenne mobile) est particulièrement utilisée pour analyser des séries temporelles (notamment en bourse) puisqu'elle permet de conserver les

tendances des séries. Ce calcul est une succession de moyennes que l'on décale d'un rang à chaque fois. De ce fait, les variations les moins significatives sont atténuées et le résultat est un lissage de la série originale. Dans notre cas, cela permet de réduire le bruit du signal et d'éliminer les positions trop éloignées des autres, que nous considérons comme erronées.

La moyenne glissante s'écrit généralement :

$$\bar{x}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_{n-k}$$

Avec N le nombre de valeurs successives,  $x_n$  la valeur de référence et k le rang.

Dans le but d'avoir la série la mieux interprétable possible, nous avons décidé de réaliser plusieurs tests avec des intervalles de temps différents (15 min, 30 min, 1h et 2h). Pour le premier cas, en prenant un intervalle de temps de 15 min, nous avons donc réalisé la moyenne de 30 valeurs car nous avons des positions toutes les 30 secondes, soit 2 par minute. Nous avons alors remarqué que la série avait bien été lissée par rapport à la série d'origine mais qu'il restait tout de même du bruit et quelques sauts dus au faible nombre de satellites visibles durant la période où le saut intervenait. En réalisant les autres tests, nous nous sommes rendu compte, comme c'était attendu, que plus l'intervalle de temps augmentait, plus la série était lissée. Cela permettait donc d'analyser la tendance de la série sans se préoccuper du bruit. Il faut cependant faire attention à ne pas trop la lisser car plus l'intervalle est long, plus on perd de signal.

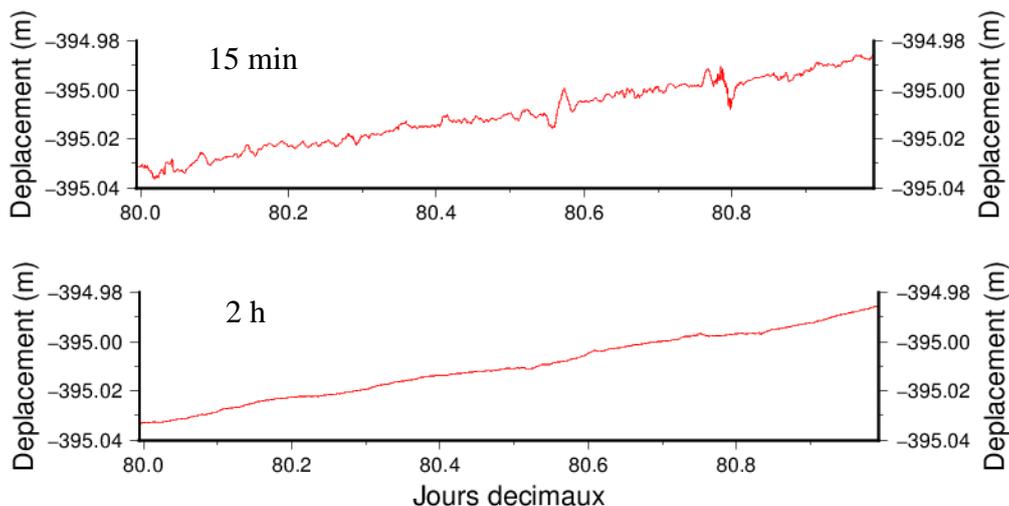


Figure 16 : Comparaison entre la moyenne glissante du 20/03/2016 sur la composante Nord avec un intervalle de 15 min (en haut) et avec un intervalle de 2h (en bas)

L'intervalle que nous avons retenu est celui de 2h car il permet d'avoir une série sans bruit, tout en conservant les tendances.

Nous avons calculé la moyenne glissante pour le mois de Mars et pour le mois d'Août dans un premier temps mais au mois d'Août, de gros sauts apparaissaient dans les séries originales mais aussi dans les séries lissées. Cela correspondait aux moments pendant lesquels il n'y avait pas beaucoup de satellites. Lorsqu'il y a moins de satellites, moins de doubles différences sont effectuées et cela implique des incertitudes élevées, que Track évaluait et indiquait dans le fichier de sortie. En effet, en regardant comment varient ces incertitudes par rapport à la série temporelle, on observe que lorsqu'il y a des incertitudes élevées, les positions sont très bruitées (Fig. 17).

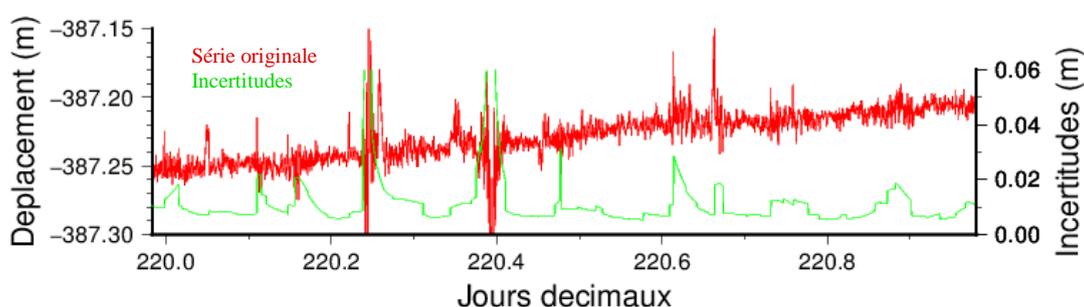


Figure 17 : Déplacements et incertitudes de la station ARGG par rapport à ARGR sur la composante Nord, le 07/08/2016

Ce bruit se répercutait directement sur les moyennes glissantes car certaines valeurs étaient si élevées qu'elles influent sur les autres positions prises pour calculer la moyenne. Cela créait même un biais sur certaines périodes (Fig. 18) dû au fait que lorsque la moyenne arrivait aux valeurs aberrantes, ces dernières influençaient la moyenne.

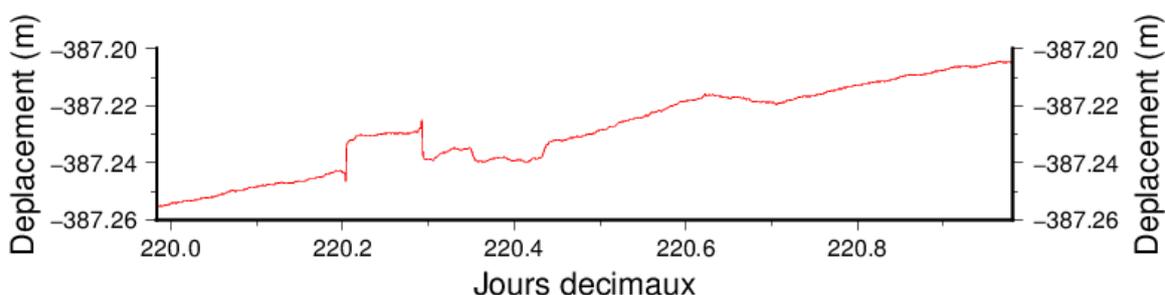


Figure 18 : Déplacement relatif d'ARGG par rapport à ARGR lissé (sur un intervalle de 2h) avec un saut pour la composante Nord, le 07/08/2016

Des travaux précédents se sont confrontés à ce type de problème (Milcent, 2013). La solution proposée est d'éliminer les observations contenant des fautes. Les observations dont la précision est supérieure à un seuil fixé (3 cm) sont donc supprimées du calcul. Ainsi, en reprenant en partie ce principe, nous avons décidé de pondérer les positions pour le calcul de la moyenne glissante en fonction des incertitudes sur les positions au lieu de les supprimer.

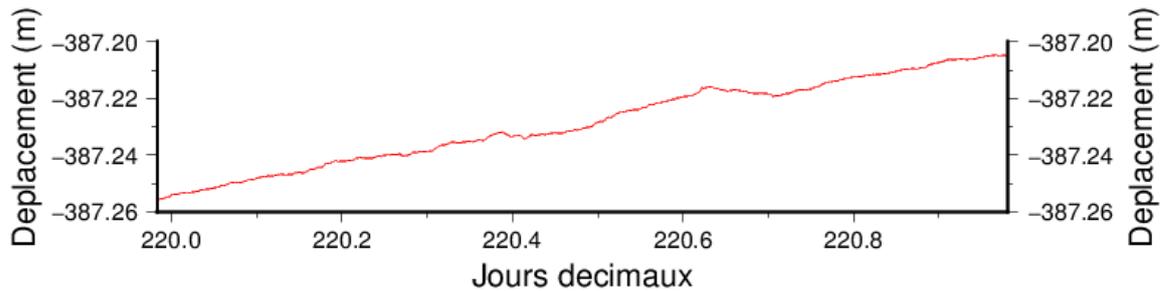


Figure 19 : Déplacement relatif d'ARGG par rapport à ARGR lissé (sur un intervalle de 2h) après pondération avec les incertitudes pour la composante Nord, le 07/08/2016

Nous avons alors obtenu une série lissée correcte, sans biais ou saut qui intervenaient auparavant. A partir de ces séries lissées, nous pouvions calculer les vitesses, sauf pour la composante verticale dont nous interpréterons directement les déplacements, plus simples à analyser que les vitesses pour cette composante.

### II.2.5 Vitesses

L'objectif final de ce traitement est d'obtenir les vitesses horizontales de la station et de voir si des variations sub-diurnes apparaissent. Pour cela, il faut d'abord calculer les vitesses des composantes Nord et Est séparément.

Les vitesses que nous avons calculées l'ont été à partir de la formule :  $v = \frac{d}{\Delta t}$ , avec  $v$  la vitesse,  $d$  la distance et  $\Delta t$  un intervalle de temps. La distance est la différence entre deux positions, prélevées à partir de la moyenne glissante et le temps est l'intervalle entre les deux positions prises. La vitesse calculée comprendra donc la vitesse correspondant au taux linéaire moyen des séries sur les déplacements ainsi que la vitesse sub-diurne, qui varie au cours de la journée.

Encore une fois, plusieurs cas ont été étudiés afin de savoir quel intervalle était le plus approprié. Nous avons essayé des intervalles d'1h, 2h, 3h, 4h et 6h. Nous nous

sommes aperçus une nouvelle fois que plus l'intervalle est petit, plus il y a de bruit alors que lorsque l'intervalle est plus grand, la série est plus lisse mais les tendances sont moins visibles.

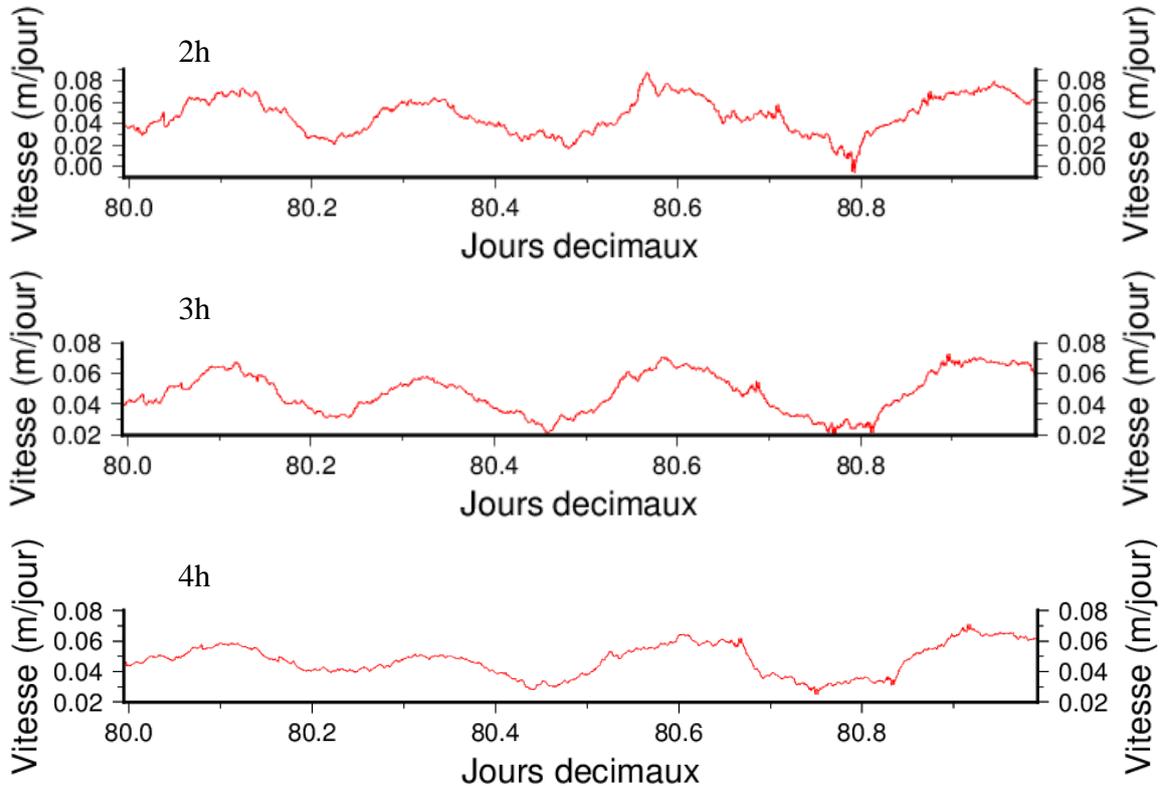


Figure 20 : Comparaison des vitesses de la station ARGG pour la composante Nord, le 20/03/2016, en fonction de différents intervalles : 2h (en haut), 3h (au milieu) et 4h (en bas)

Sur ces graphiques (Fig. 20), pour un intervalle de 2h, le bruit est plus important et les variations sont plus prononcées que sur les graphiques avec des intervalles de 3h ou 4h. Cependant, avec un intervalle de 4h, certaines variations sont très atténuées voire même supprimées. C'est pourquoi nous avons décidé de calculer toutes les vitesses avec un intervalle de 3h, qui semble être le meilleur compromis en terme de rapport signal/bruit.

Pour calculer la vitesse horizontale, il suffit de réaliser une somme quadratique de la vitesse sur la composante Nord et la vitesse sur la composante Est :  $v_h = \sqrt{v_e^2 + v_n^2}$  avec  $v_h$  la vitesse horizontale,  $v_e$  la vitesse sur la composante Est et  $v_n$  la vitesse sur la composante Nord.

Cependant, pour l'interprétation, il faut faire attention car certaines vitesses sur les composantes Nord ou Est étaient négatives, ce qui signifie que la station se déplaçait vers

le Sud ou l'Ouest, et deviennent positives avec ce nouveau calcul. Pour savoir dans quelle direction se déplace la station, il est possible de calculer l'azimut.

Un azimut est un angle dans le plan horizontal entre la direction d'un objet et la direction du Nord géographique dans notre cas. Il varie entre 0 et 360° et se calcule de la façon suivante :

$$azimut = \tan^{-1}\left(\frac{v_e}{v_n}\right)$$

L'azimut varie en fonction du signe de  $v_e$  et  $v_n$ . On peut raisonner en termes de quadrants :

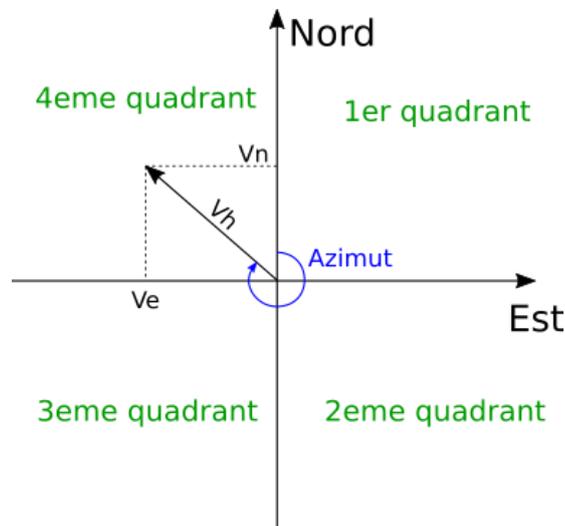


Figure 21 : Schéma de l'azimut en fonction des composantes Nord et Est

- Si  $v_e \geq 0$  et  $v_n \geq 0$ , on se situe dans le premier quadrant et il n'est pas nécessaire de faire de calcul supplémentaire.
- Si  $v_e \geq 0$  et  $v_n \leq 0$ , on se situe dans le 2eme quadrant et  $azimut\ final = 180^\circ - azimut$
- Si  $v_e \leq 0$  et  $v_n \leq 0$ , on se situe dans le 3eme quadrant et  $azimut\ final = 180^\circ + azimut$
- Si  $v_e \leq 0$  et  $v_n \geq 0$ , on se situe dans le 4eme quadrant et  $azimut\ final = 360^\circ - azimut$

La valeur de l'azimut se situe principalement autour de  $290^\circ$ , ce qui correspond à un déplacement vers le Nord-Ouest, qui est cohérent avec l'orientation du glacier.

### **II.2.6 Précisions des séries lissées et des vitesses horizontales**

La précision des positions est donnée par le logiciel Track mais étant donné que nous réalisons d'autres calculs (moyenne glissante puis vitesse), la précision n'est plus la même. Pour cela, il est possible d'utiliser la station CHMX, située à Chamonix, à une dizaine de kilomètres du glacier. Cette station est fixe, comme ARGR et en étudiant sa position au cours du temps, il est possible de déterminer la précision de la moyenne glissante et de la vitesse. Puisqu'elle est censée ne pas bouger, la vitesse que nous obtiendrons correspondra à la précision que l'on peut attendre.

En revanche, les paramètres du calcul ne sont pas tout à fait les mêmes car la station est plus éloignée que celle sur le glacier. L'idéal aurait été d'avoir une autre station à côté du glacier et fixée sur un rocher. Nous avons choisi de réaliser le calcul Track en prenant le signal LC et non pas uniquement le signal L1. C'est-à-dire que nous utilisons L2C pour ARGR et L2P pour CHMX, ce qui introduit un certain bruit. Ainsi, le positionnement de CHMX donne une estimation pessimiste de l'incertitude de Track en calculant avec L1.

Nous avons réalisé la même démarche que pour le traitement avec la station ARGG. Les données ont été traitées sur la deuxième partie du mois de Mars. Nous avons donc effectué la moyenne des séries pour corriger les multi-trajets en ce lieu, puis calculé les moyennes glissantes et enfin les vitesses. Dans un premier temps, nous n'avons pas pris en compte la troposphère. Cependant, étant donné que les stations sont à des altitudes différentes (plus de 1700 m d'écart), il était important de faire des tests avec les paramètres troposphériques. Le résultat n'était pas vraiment concluant car nous avons plus de bruit pour les vitesses horizontales et les déplacements verticaux lorsque nous prenons en compte les paramètres troposphériques que lorsque nous ne les utilisons pas. Cela peut être dû au ZWD (Zenithal Wet Delay), une composante du délai troposphérique qui est corrélée avec l'altitude mais qui n'est pas parfaitement connue.

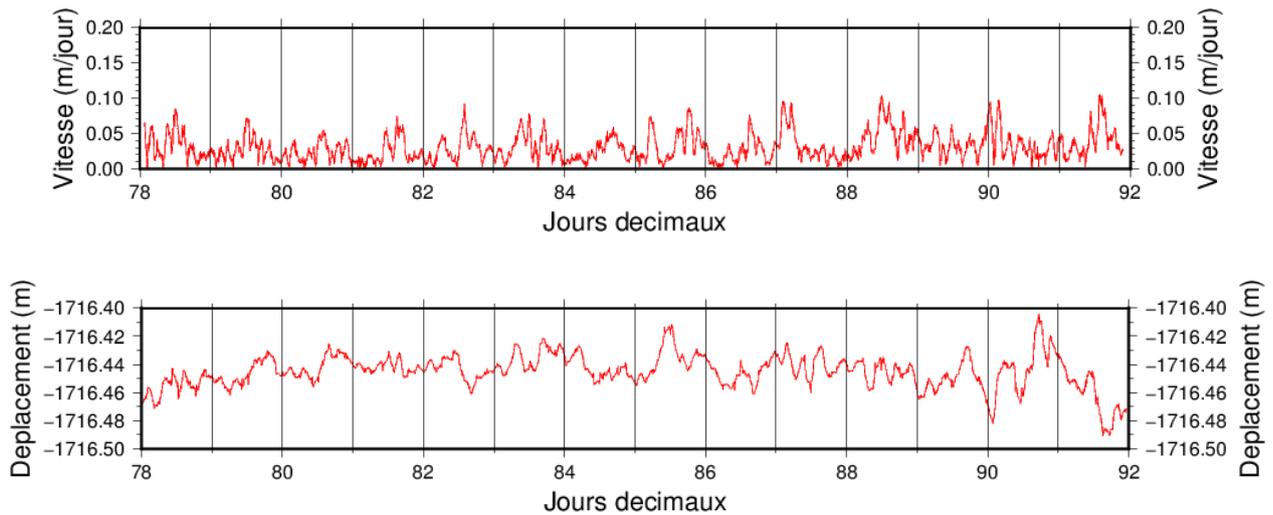


Figure 22 : Vitesses horizontales (en haut) et déplacements verticaux (en bas) de la station CHMX, du 18 au 31/03/2016 calculées à partir de positions obtenues toutes les 30 s.

Nous avons calculé la précision concernant la moyenne glissante de la position verticale. D'après la formule :  $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (x_i - \bar{x})^2}$ , avec n le nombre de valeurs,  $x_i$  la position au rang i et  $\bar{x}$  la moyenne des positions, l'écart type trouvé était de  $\pm 1$  cm.

Pour les vitesses, une moyenne des vitesses horizontales de la station CHMX a suffi pour obtenir la précision. La moyenne des vitesses était de 3 cm/jour.

Toutes les vitesses horizontales et les déplacements verticaux calculés ont permis de visualiser à différentes échelles la façon dont se déplaçait le glacier et la connaissance de la précision a permis de distinguer les vrais déplacements et les incertitudes liées à la précision de l'appareil (2 cm pour les déplacements verticaux et 3 cm/jour pour les vitesses horizontales).

### III Analyses et interprétations des résultats

Les calculs des positions en cinématique ont été réalisés sur toutes les données enregistrées sur l'année 2016 par la station ARGG, c'est-à-dire du 18 Mars au 9 Décembre. Les vitesses horizontales ont également été calculées durant cette période, tout comme les déplacements verticaux lissés (Annexe 1). Plusieurs échelles d'études étaient alors possibles : les analyses des variations sur une journée, sur un mois ou sur toute l'année.

#### III.1 Comparaison inter-saisonnière de la variabilité sub-diurne

Les variations sub-diurnes correspondent aux variations que l'on peut voir dans une journée. Grâce au positionnement cinématique, nous avons l'avantage d'avoir assez de mesures (une position toutes les 30 secondes) pour étudier ces variations. Nous avons choisi de nous concentrer d'abord sur deux périodes différentes pour l'étude en 2016 : la première de 14 jours du 18 au 31 Mars et la deuxième de 16 jours du 16 au 31 Août. Le premier intervalle, en Mars, correspond à une période pendant laquelle la station ne subit pas de grandes variations car la neige ne fond pas encore et les températures ne sont pas très élevées. Ces dernières sont issues d'une station météo située juste à côté du glacier.

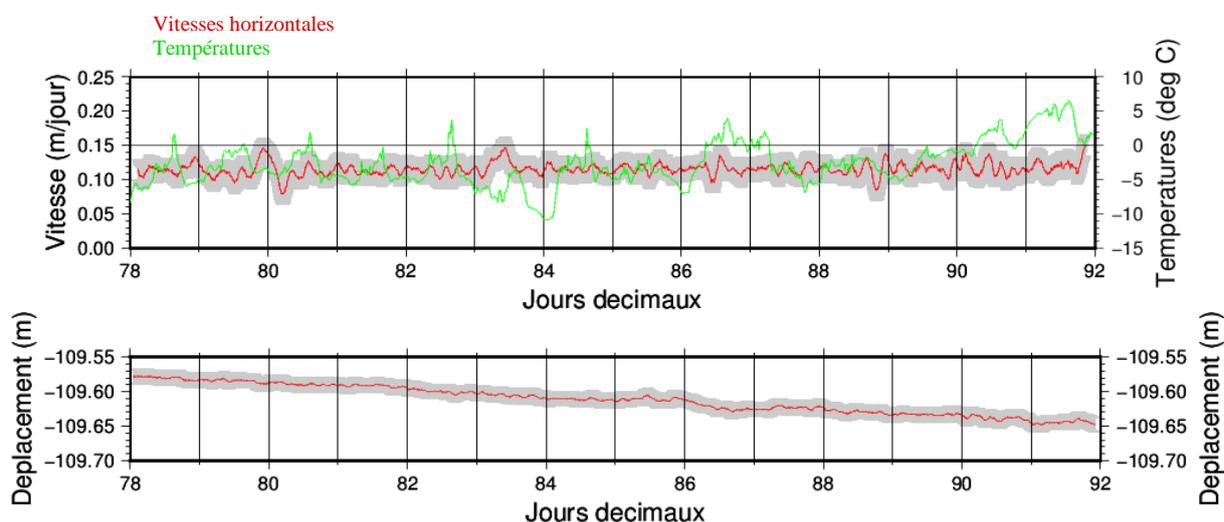


Figure 23 : Vitesses horizontales et températures du 18 au 31/03/2016 (en haut) et positions verticales (en bas). Les incertitudes sont en gris.

Sur les résultats obtenus avec la méthode de positionnement cinématique pendant la fin du mois de Mars (Fig. 23), les variations des vitesses horizontales sont relativement faibles. Les variations maximum vont de 5 à 8 cm/jour ce qui est légèrement plus que la précision sur les vitesses qui est de 3 cm/jour. Il n'y a pas vraiment de variations sub-

diurnes à relever durant cette période car le glacier ne subit pas encore des températures élevées. Il glisse donc de façon quasi-constante avec une vitesse moyenne horizontale d'environ 12 cm/jour.

Le déplacement vertical est beaucoup moins variable que la vitesse horizontale. Pour la même période, il n'est pas réellement possible de distinguer de variations sub-diurnes. Lors de ce mois, le déplacement semble constant avec une valeur de 5 mm/jour.

Pendant la deuxième période (mois d'Août), à l'inverse de la première, la station subit beaucoup plus de variations.

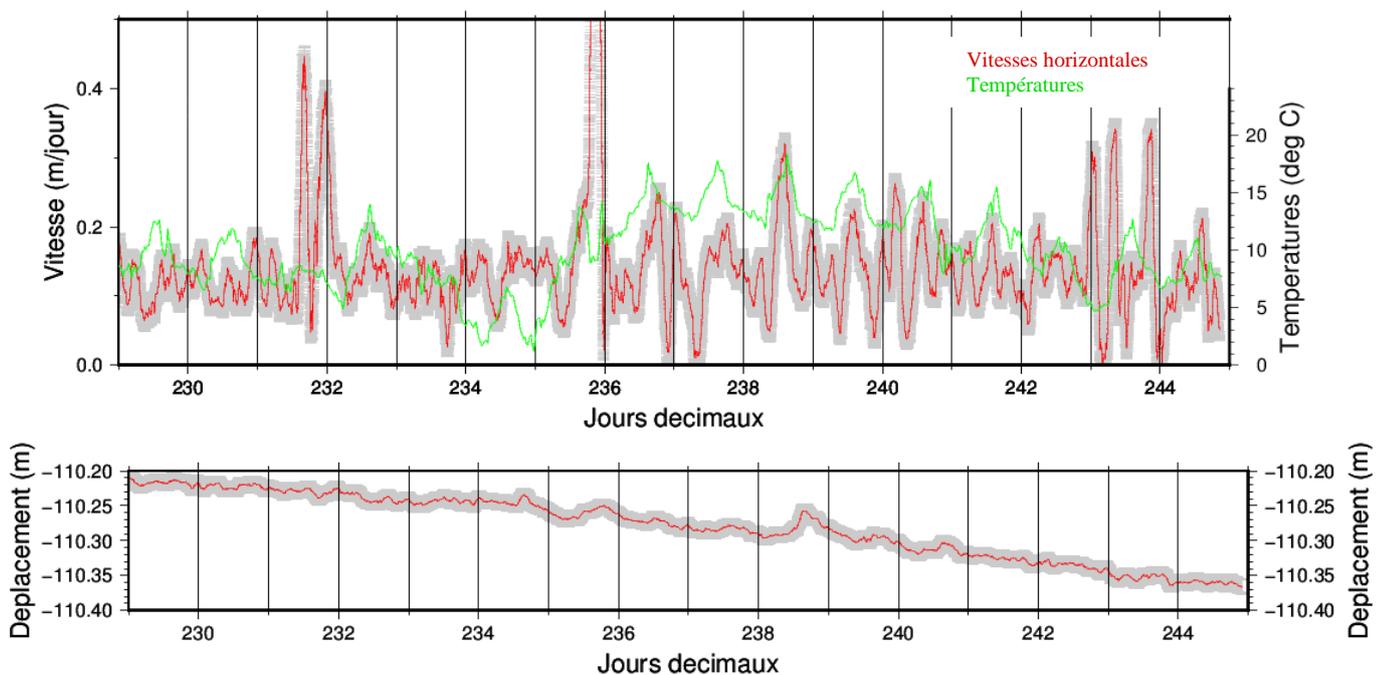


Figure 24 : Vitesses horizontales de la station ARGG et température d'une station météo proche du glacier du 16 au 31/08/2016 (en haut) et positions verticales (en bas). Les incertitudes sont représentées en gris.

Pour la période concernant la deuxième partie du mois d'Août, le graphique (Fig. 24) est assez différent. En effet, les variations sont beaucoup plus importantes que la période précédente. Certaines variations sont supérieures à 40 cm/jour mais elles ne sont pas dues à la mauvaise résolution des ambiguïtés car les valeurs des incertitudes sur les positions données par Track ne sont pas très élevées (inférieures ou égales à 1 cm). Ces grands pics, que l'on retrouve sur d'autres mois, ne devraient pas être dus aux multi-trajets

insuffisamment corrigés car ces derniers sont éliminés par le lissage. Pour une correction optimale, il aurait tout de même fallu réaliser une moyenne des séries chaque mois par exemple puis corriger les multi-trajets sur cette période, et ne pas utiliser la moyenne du mois de Mars pour corriger tous les autres comme nous l'avons effectué. Le pic durant le jour 235 a lieu lors du premier jour de température élevée et une petite augmentation de la verticale est visible, ce qui signifie qu'il est possible d'avoir un pic de vitesse horizontale aussi important à ce moment.

Plusieurs variations se produisent au cours de la journée et sont parfois importantes, en particulier après le jour 235. En regardant les données climatologiques, il apparaît que plus la température est élevée, plus les variations sont grandes. Il est également important de noter que la vitesse moyenne durant cette période est d'environ 14 cm/jour, donc légèrement plus élevée que pour le mois de Mars.

Au cours de ce mois d'Août, plus de variations sont visibles pour la position verticale. Cependant, même pendant la période où la température était élevée, entre 10 et 15 °C (jours 236 à 241), il n'y avait pas ou peu de variations. Seuls certains soulèvements sont significatifs, comme celui au jour 238 de 5 cm.

Lors de cette période, un signal semble revenir plusieurs jours de suite (jours 236 à 240) pour la vitesse horizontale. En prenant les jours un par un, il est clairement possible de voir cette tendance (Annexe 2). Nous avons alors pensé que ce phénomène pouvait être dû à la déformation du mât à cause du soleil qui le chauffe car lorsque la température augmente, les variations sont plus grandes. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons décidé de regarder l'ensoleillement. Les variations devraient être semblables lorsque l'ensoleillement est élevé et continu pendant la journée.

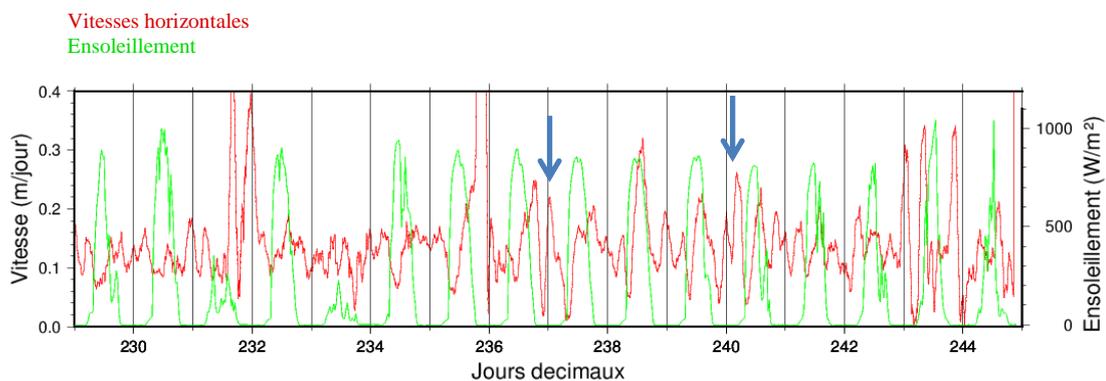


Figure 25 : Vitesses horizontales de la station ARGG et ensoleillement d'une station météo juste à côté du glacier du 16 au 31/08/2016. Les flèches bleues représentent des exemples d'accélération la nuit.

Sur le graphique ci-dessus, les jours ensoleillés correspondent au moment où la courbe d'ensoleillement décrit une courbe de Gauss parfaite. Lorsque la courbe est légèrement bruitée, cela signifie qu'il y avait des nuages par intermittence tandis que lorsque la courbe ne prend pas la forme de celle d'une gaussienne, la journée était couverte.

On retrouve une fois de plus la période entre le jour 235 et le jour 241, pendant lesquels la journée est très ensoleillée. Cette donnée est particulièrement liée aux températures puisqu'on peut voir que les journées très ensoleillées sont celles avec les plus hautes températures, ce qui est logique.

Comme il était possible de le remarquer avec les températures, durant cette période, les vitesses semblent augmenter lorsque l'ensoleillement augmente également. En revanche, les jours nuageux par intermittence ou les jours couverts ne présentent pas beaucoup de variations. Quelques exceptions sont à noter comme le jour 231 qui correspond à un jour couvert, sans pluie, mais pendant lequel la vitesse augmente fortement en fin de journée.

De plus, les nuits des périodes de fort ensoleillement, des accélérations sont également observables. Celles-ci sont parfois de quelques dizaines de centimètres (flèches bleues Fig. 25).

L'étude de l'azimut peut également être un élément important afin de savoir dans quelle direction la station se déplace et si elle varie au cours de la journée. Le glacier devrait se déplacer dans la direction de son axe moyen ( $289^\circ$  pour le mois d'Août). Un mouvement hors de cet axe peut être considéré comme une instabilité du mât de l'antenne.

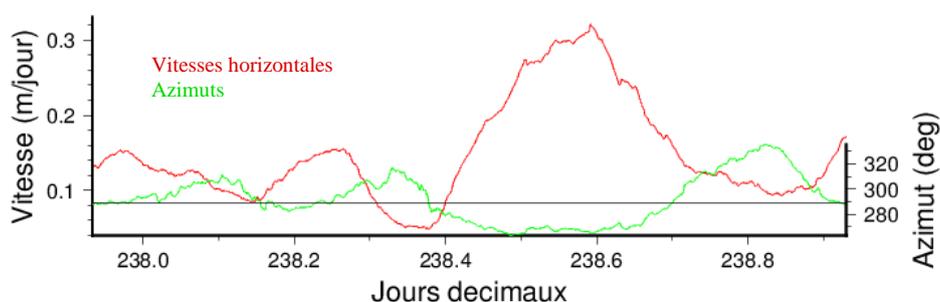


Figure 26 : Vitesses horizontales et azimuts de la station ARGG le 25/08/2016. Le trait noir horizontal est l'azimut moyen pour le mois d'Août.

L'azimut change de plusieurs dizaines de degrés au cours des journées pendant lesquelles la température était élevée (Fig. 26 et Annexe 2). Ce type de données est difficile à interpréter et malgré des changements d'azimuts parfois importants, il n'est pas prudent de tirer des conclusions. Nous avons décidé de tracer la vitesse horizontale dans la direction moyenne de déplacement du glacier au mois d'Août, c'est-à-dire 289° ainsi que la vitesse horizontale dans la direction perpendiculaire pour essayer de distinguer les moments où le mât décrit un mouvement anormal.

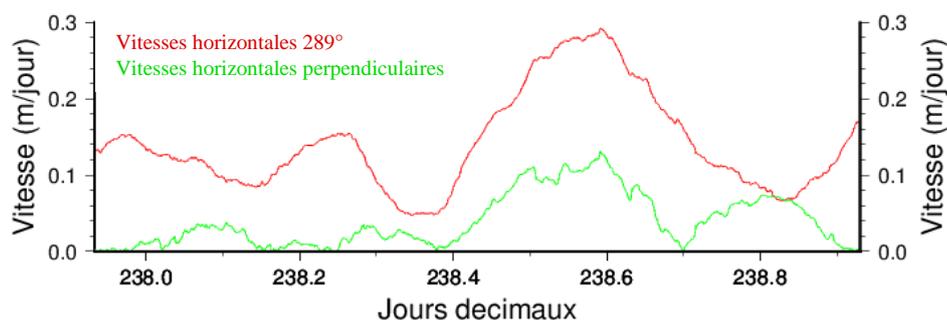


Figure 27 : Vitesses horizontales en fonction de la direction moyenne de la station ARGG au mois d'Août (289°) et vitesses horizontales perpendiculaires à cette direction pour le 25/08/2016.

Une fois de plus, les vitesses perpendiculaires sont plus élevées en deuxième partie de journée (Fig. 27 et Annexe 3), ce qui semble montrer une tendance du mât à bouger pendant le moment le plus chaud et ensoleillé de la journée.

L'hypothèse d'une déformation du mât en raison de la chaleur n'est pas complètement vérifiée. Le fait d'avoir de grandes variations pendant la nuit, alors que les températures sont peu élevées est contradictoire et ne permet pas de tirer de conclusions. Cependant, le mât constitue une source d'imprécision. En effet, lors des différentes interventions, le mât avait besoin d'être ajusté en fonction de la hauteur de la neige qui peut atteindre 4 m en hiver alors qu'il est possible d'avoir des pertes de 2 m de glace en été. Des photos ont été prises lorsqu'il était en train de basculer. Une solution pourrait être de choisir un autre type de mât, plus gros et en bois par exemple mais le problème serait pour le planter dans la glace. Le mât en métal est assez simple à fixer dans la glace car il est fin et des outils sont utilisés pour cela. En revanche, planter un mât de plus large diamètre devient beaucoup plus compliqué.

## III.2 Évènements particuliers

### III.2.1 Soulèvement au mois de Juin

Tout au long de l'année, le glacier subit des changements principalement dus aux conditions climatiques. En réalisant les séries temporelles, un évènement plutôt particulier, réparti sur plusieurs jours, s'est révélé. Cet épisode a lieu la deuxième partie du mois de Juin et est particulièrement prononcé sur la position verticale de la station ARGG.

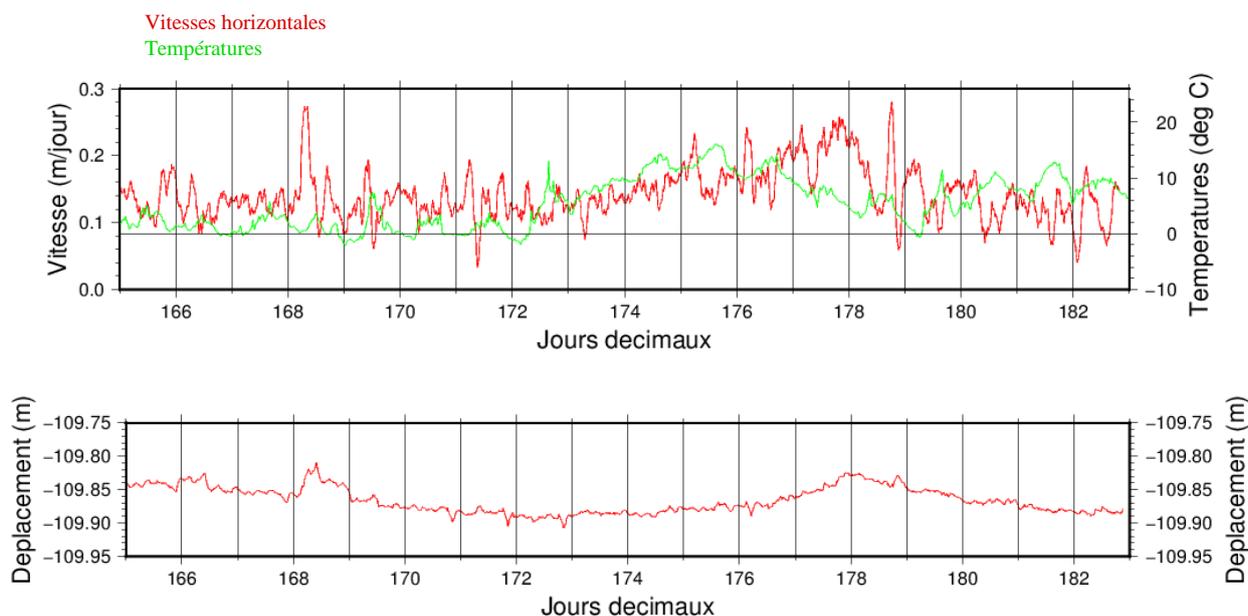


Figure 28 : Vitesses horizontales de la station ARGG et températures (en haut) et positions verticales (en bas) du 13 au 30/06/2016.

Le phénomène observé est un soulèvement du glacier sur une période de 5-6 jours. Comme il est possible de voir sur le graphique (Fig. 28), la position verticale diminue les premiers jours, ce qui est normalement toujours le cas à cette période de l'année, cependant, à partir du 20/06 (jour 172), la verticale ne diminue plus mais stagne pendant 3 jours puis augmente pendant 3 jours, à partir du 24/06 (jour 175). Ensuite, le glacier reprend sa descente régulière. Ce soulèvement est d'environ 7 cm et la station revient à la même hauteur qu'elle était 10 jours plus tôt.

Pendant ce même intervalle de temps, les vitesses horizontales sont également impactées. A partir du 21/06 (jour 173), la vitesse commence légèrement à augmenter et atteint même 25 cm/jour à la fin de cette période, le 25/06 (jour 177). Ensuite, la vitesse horizontale redevient la même qu'avant et se concentre autour de 13 cm/jour.

Ce phénomène peut s'expliquer par la fonte rapide de la neige à cette période, à cause des températures assez élevées (environ 10°C), comme le montre le graphique (Fig. 28). Effectivement, juste avant le soulèvement, les températures augmentent et passent de 1 ou 2°C à 12 ou 13°C. Cette fonte soudaine entraîne une forte augmentation du ruissellement de l'eau à la base du glacier qui flotte dessus car la glace est moins dense. Pendant cette période, les canaux par lesquels l'eau s'écoule ne sont pas encore très larges et cela crée une forte pression entre le lit rocheux et la glace. Il y a donc un décollement du glacier du lit rocheux par l'eau.

Lors du mois de Juin, un petit saut au niveau du jour 168 est observable. Celui-ci, contrairement au précédent se déroule en un seul jour. Le saut est d'environ 5 cm, ce qui est supérieur à la précision de la moyenne glissante (1 cm). En même temps, la vitesse horizontale augmente fortement puis diminue. Pour cet événement, la température n'est pas aussi élevée que lors du précédent qui atteignait les 12-13°C. Ici les températures sont plutôt de l'ordre de 0°C et il n'y a pas de grande variation de celles-ci. Le phénomène ne peut donc pas s'expliquer avec la fonte de la glace. Cependant, nous avons remarqué grâce à la station météo proche du glacier qu'il y avait eu des précipitations, ce qui a eu le même effet que si la neige avait fondu.

### **III.2.2 Interventions sur les stations GPS**

Deux interventions sur les stations GPS ont été réalisées durant l'année 2016. Il est possible de les observer directement sur les séries. L'une a été réalisée le 10 Juin (jour 162) et l'autre le 14 Septembre (jour 259).

Le premier saut est bien visible et se produit le jour 162. Le mât a effectivement été élevé d'une dizaine de centimètres. En observant la vitesse horizontale, une grande augmentation est remarquable et correspond à un moment où le mât était manipulé.

Pour la deuxième, une des stations a cessé de fonctionner quelques jours avant l'intervention, c'est pourquoi la série est interrompue à partir du 7/09 (jour 251). Cependant, la position verticale a beaucoup varié. La différence de hauteur entre le moment avant la coupure et après est de 3.8 m. Cette grande différence semblait tout d'abord très importante mais après avoir discuté avec les personnes ayant été sur le glacier

ce jour, nous avons eu la confirmation qu'ils avaient baissé le mat de plusieurs mètres. Ce changement de hauteur était nécessaire car la neige qu'il y avait sur le glacier avait fondu pendant la période estivale et le mât commençait à pencher dangereusement.

### III.2.3 Stagnation de la verticale sur une courte période

Un autre évènement, beaucoup moins important cette fois, est survenu la deuxième partie du mois de Mai (Fig. 29). Il s'agit encore de la verticale qui, cette fois, stagne au lieu de diminuer de façon constante.

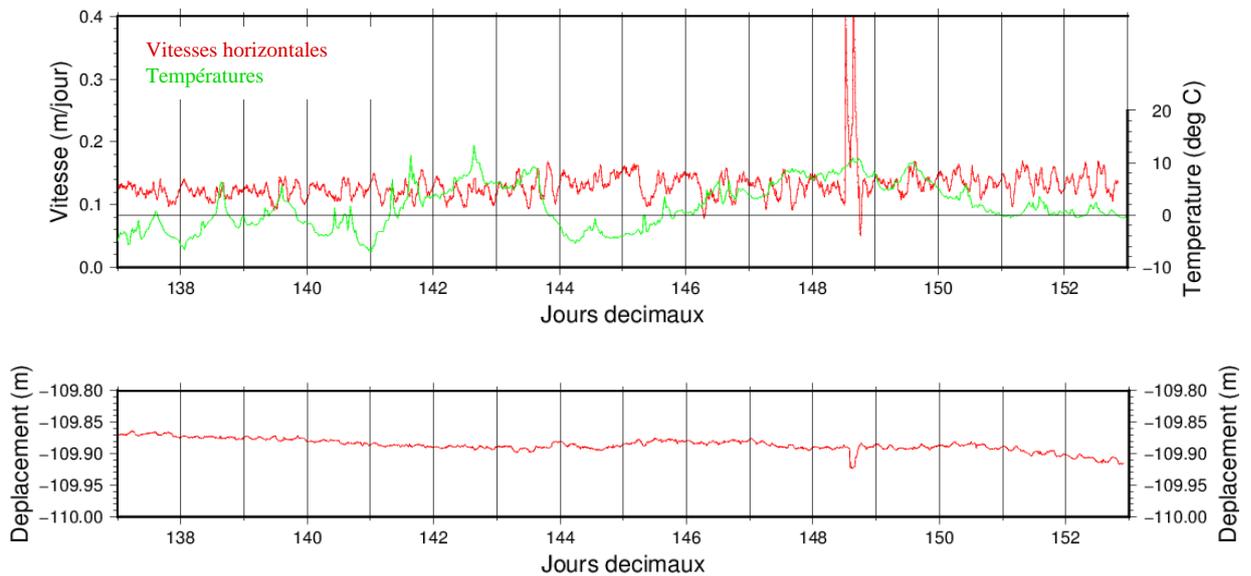


Figure 29 : Vitesses horizontales de la station ARGG et températures (en haut) et positions verticales (en bas) du 16 au 31/05/2016.

A partir du jour 143 (22/05/2016), la courbe ne diminue plus et commence à devenir constante jusqu'au jour 150 (29/05/2016). Les températures montrent que les jours 141 à 143 étaient plus chauds que les précédents, vient ensuite une diminution dans les deux jours suivants. La température redescend même sous 0°C. Puis elle augmente à nouveau jusqu'à atteindre 10°C. Ce phénomène n'est pas exactement comme le précédent car les vitesses horizontales n'augmentent pas mais pourrait éventuellement être causé par un relief du lit glaciaire.

### III.3 Signaux inter-saisonniers

Les données étant enregistrées sur une année presque entière, il est intéressant de tracer les séries sur un même graphique afin d'observer sa tendance en fonction des saisons.

#### III.3.1 Vitesses horizontales

Lors du tracé des vitesses horizontales à l'échelle d'une année, beaucoup de bruit est observé. A une telle échelle, les variations sub-diurnes ne sont plus intéressantes à analyser, c'est pourquoi un lissage est souhaitable.

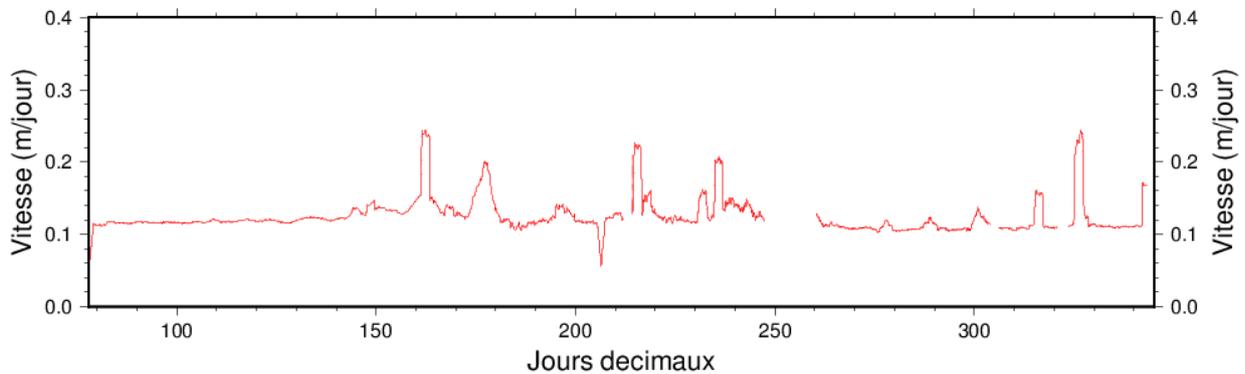


Figure 30 : Vitesses horizontales de la station ARGG du 18/03/2016 au 9/12/2016 lissées sur un intervalle de 2 jours.

L'évènement du mois de Juin est bien visible. En effet, une augmentation importante de la vitesse horizontale durant cette période (jours 172 à 177) est observée en passant de 13 cm/jour à plus de 20 cm/jour.

Une particularité intéressante peut être relevée sur ce graphique (Fig. 30). Elle concerne les sauts dus à des valeurs aberrantes. Lors du début de la session d'enregistrement, de Mars à début Juin (jours 78 à 160), aucune variation importante de la vitesse n'est observée. En revanche, après cette période, le bruit est légèrement plus élevé et la vitesse varie de façon significative. Au début du mois d'Août (jour 215), des sauts apparaissent. Ce nombre important de sauts à partir de cette période pourrait être dû à des instabilités du mât.

La différence de vitesse horizontale moyenne n'est pas très importante. Lors des premiers mois, cette vitesse est d'environ 12 cm/jour. Une augmentation est observée lors du mois de Juin (jour 159) dont la vitesse horizontale est comprise entre 14 et 16 cm/jour. Durant la période estivale, la vitesse horizontale est globalement aussi importante que lors du début d'année, sauf qu'il y a plus de variations et la vitesse au mois d'Août semble légèrement plus élevée (jours 214 à 244) que le mois de Juillet (jours 183 à 213). En revanche, pour l'intervalle de temps après la modification du mât en Septembre (jours 259 à 344) la vitesse moyenne est d'environ 11 cm/jour en moyenne.

### III.3.2 Positions verticales

Concernant les positions verticales au cours de l'année, le bruit est beaucoup moins important. Pour des raisons de clarté, nous avons choisi de décaler verticalement le graphique lors de l'intervention qui avait entraîné un abaissement du mât de plusieurs mètres pour faire apparaître les positions acquises à la fin de l'année au même niveau que les autres.

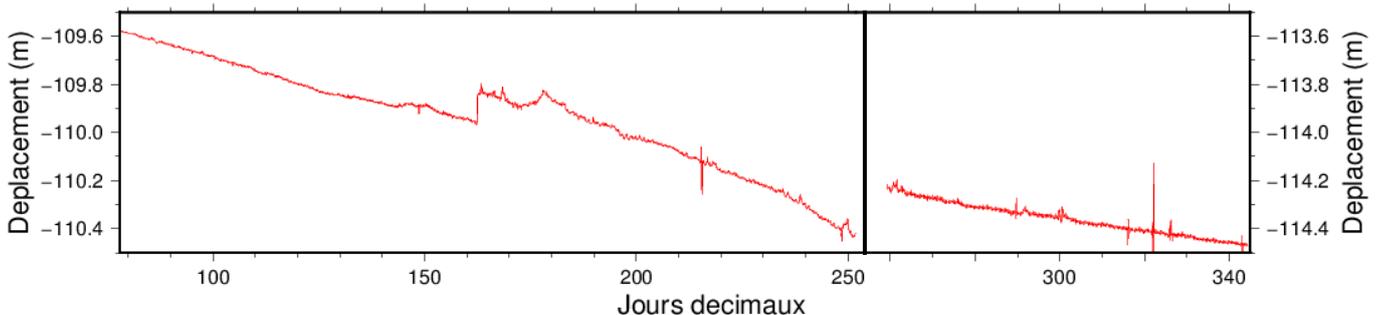


Figure 31 : Positions verticales de la station ARGG par rapport à ARGR du 18/03/2016 au 9/12/2016. L'axe des ordonnées n'est pas le même à gauche (pour les jours 78 à 251) et à droite (pour les jours 259 à 344). Le trait vertical après le jour 251 représente le moment où l'antenne a cessé de fonctionner et à l'abaissement du mât.

Sur ce graphique (Fig. 31), les événements vus précédemment sont bien visibles, tels que les sauts durant les interventions en Juin et en Septembre ou encore le soulèvement sur la deuxième partie du mois de Juin.

De plus, trois taux linéaires différents sont observables, avec plus ou moins de clarté. Le premier de mi-Mars à mi-Juin (jours 78 à 165), le deuxième de mi-Juin à fin Août (jours 166 à 251) et le dernier de mi-Septembre à Décembre (jours 260 à 344).

Le plus prononcé correspond à la période entre mi-Juin et fin Août, c'est-à-dire pendant l'été. Sa valeur est de 7 mm/jour. Cela correspond à un amincissement du glacier qui vient du fait que la partie située en bas avance plus vite que celle du haut, ce qui implique une diminution de son épaisseur.

Les deux autres périodes ont des taux linéaires proches. Pour la première période, de mi-Mars à mi-Juin, la vitesse verticale moyenne de la station est de 5 mm/jour, autrement dit, le glacier descend de 5 mm/jour. Lors de la période de mi-Septembre à Décembre, la vitesse verticale moyenne est de 3 mm/jour. Il y a donc une légère différence entre ces deux intervalles de temps. Les résultats sont cohérents avec les vitesses horizontales trouvées qui étaient également légèrement plus élevées de Mars à Juin (12 cm/jour) et plus faibles en fin d'année (11 cm/jour en moyenne).

### III.4 Comparaison avec les résultats en positionnement statique

Les études précédentes en statique montraient que des variations sub-diurnes étaient visibles au niveau de la vitesse horizontale (Ponton, 2013). Une analyse sur des positions connues toutes les heures, à partir de sessions de 6h, a été réalisée pour deux périodes de l'année 2011 : 15 jours en Avril et 15 jours en Août.

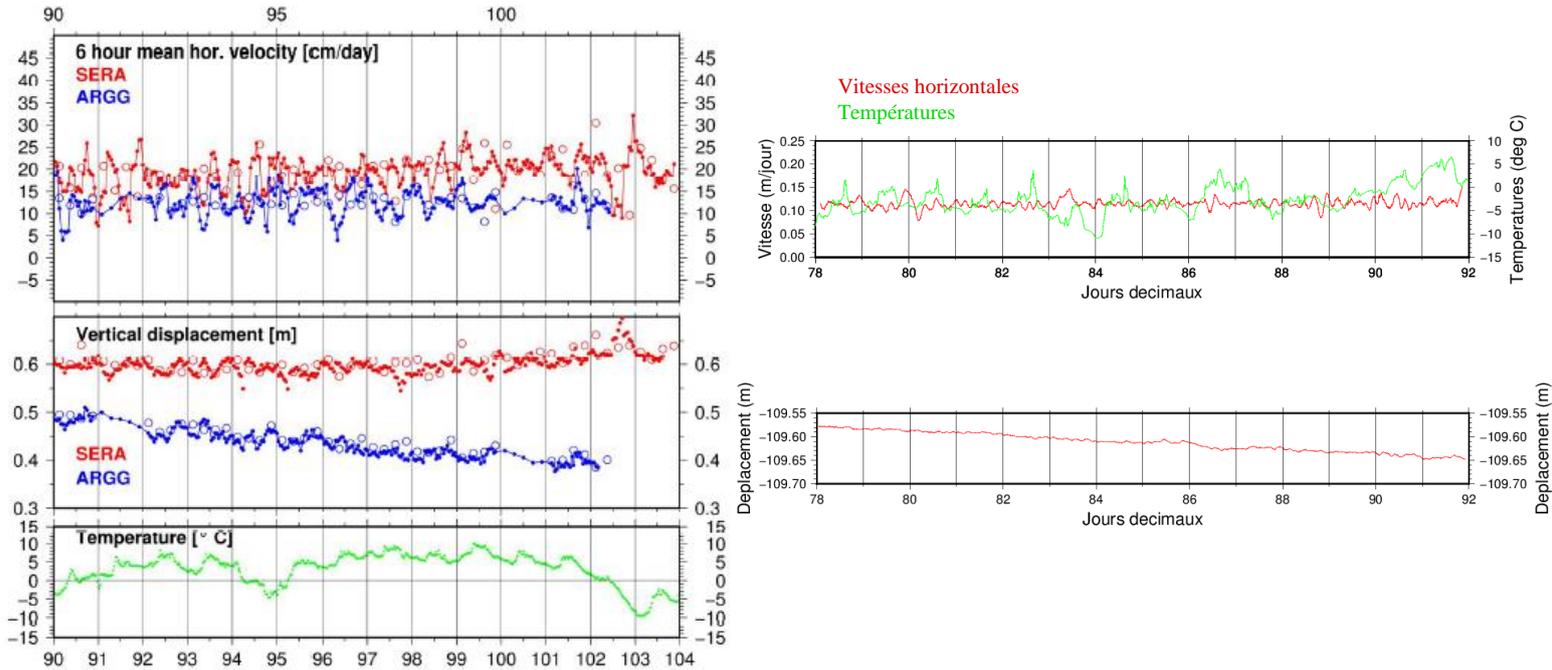


Figure 32 : Comparaison entre les vitesses horizontales, les positions verticales et les températures des stations ARGG (bleu) et SERA (rouge) pour une solution lissée à 1h du 31 Mars au 14 Avril 2011 (à gauche) (Source : Ponton, 2013) et les vitesses horizontales, les positions verticales et les températures du 18 au 31 Mars 2016 (à droite)

Pour cette première période (Mars-Avril 2011), les variations n'étaient pas flagrantes. La variabilité de la série était d'environ 10 cm/jour au niveau de la station ARGG avec une précision de 4 cm/jour. Concernant le déplacement vertical, de petites variations étaient observables mais pas vraiment de tendance qui revenait chaque jour.

Lorsque nous comparons ces graphiques à ceux trouvés pour l'année 2016 avec une méthode cinématique, il apparaît que, pour les vitesses horizontales dans un premier temps, les variations sont plutôt semblables aux mois de Mars-Avril 2011.

Pour cet intervalle de temps, la vitesse est aussi variable en statique (10 cm/jour maximum) qu'en cinématique (8 cm/jour maximum) et la vitesse moyenne est très proche :

13 cm/jour en statique et 12 cm/jour en cinématique. Il faut toutefois garder à l'esprit que la vitesse d'écoulement du glacier varie en fonction de l'endroit où se trouve la station. ARGG se déplace de 13 cm/jour, ce qui signifie qu'en un an, elle aura effectué plusieurs dizaines de mètres et ne sera donc pas dans la même configuration spatiale.

D'autre part, les positions verticales, pour ce premier intervalle de temps sont assez semblables et n'ont pas une grande variabilité, surtout pour l'analyse en cinématique.

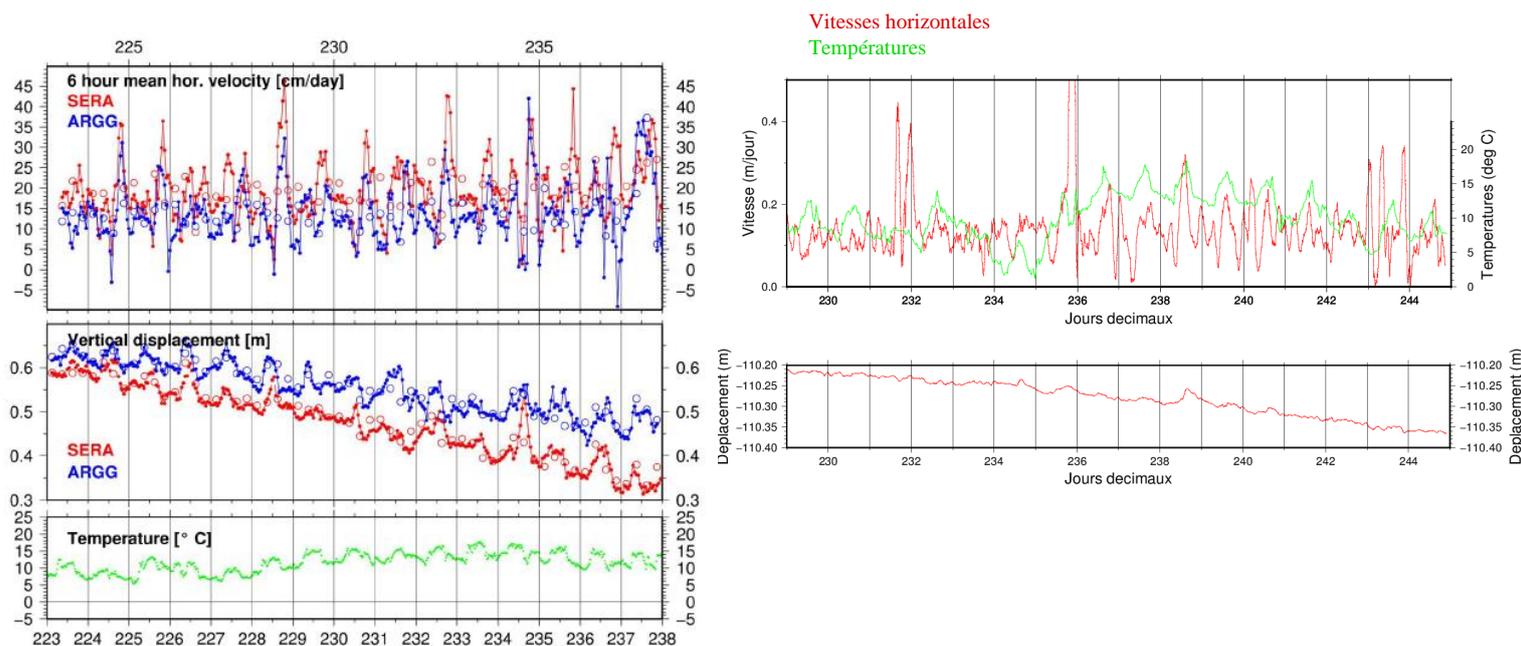


Figure 33 : Comparaison des vitesses horizontales, positions verticales et températures des stations ARGG (bleu) et SERA (rouge) pour une solution lissée à 1h du 11 au 26 Août 2011. (à gauche) (Source : Ponton, 2013) et les vitesses horizontales, positions verticales et températures pour la station ARGG du 16 au 31 Août 2016 (à droite)

Sur la deuxième période (mois d'Août) (Fig. 33), les variations sub-diurnes étaient bien visibles en 2011. Certains pics montaient jusqu'à 30 voire 40 cm/jour pour la vitesse horizontale avec une précision de 5.6 cm/jour. En observant le déplacement vertical pour chaque jour, un soulèvement de la station était visible de 5 à 10 cm, ce qui est supérieur à la précision de 2.5 cm, donc significatif. Des explications ont été apportées concernant ce phénomène, s'appuyant sur le mécanisme de stick-slip, c'est-à-dire de soulèvement du glacier lorsque la vitesse horizontale est faible.

Pendant l'année 2016 en cinématique, pour la deuxième période, les vitesses semblent également très variables, en particulier sur un certain intervalle de temps (à partir du jour 235) sur lequel la vitesse horizontale atteint parfois plus de 30 cm/jour. La vitesse

moyenne est aussi similaire pour les deux modes et les deux périodes (14 -15 cm/jour). En observant les températures, il est intéressant de constater qu'elles sont plutôt semblables (entre 10 et 15°C) à partir du jour 229 en 2011 et à partir du jour 236 en 2016. C'est lors de ces périodes qu'il y a le plus de variations de la vitesse horizontale.

Concernant la position verticale, en revanche, une différence est constatée lors de ce deuxième intervalle (mois d'Août). En effet, un cycle diurne est observé pour le mode de positionnement statique (soulèvement de 5 à 10 cm) alors que pour le positionnement cinématique, la variabilité est très faible (2-3 cm).

Il y a donc de nombreuses similitudes entre les résultats avec un positionnement statique et un positionnement cinématique, notamment concernant la vitesse horizontale. On constate effectivement des variations sub-diurnes dans les deux cas, avec une variabilité plus importante au mois d'Août. Pour le déplacement vertical du glacier, des différences sont visibles, en particulier pour le mois d'Août. Un soulèvement du glacier de quelques centimètres est observé chaque jour en positionnement statique, pour l'année 2011 alors que de faibles variations apparaissent en positionnement cinématique, pour l'année 2016.

## Conclusion

L'étude de la variation du glissement du glacier d'Argentière par positionnement GPS cinématique a été possible grâce à des données enregistrées en haute fréquence, du 18 Mars 2016 au 9 Décembre 2016.

Le traitement de ces données s'est réalisé dans un premier temps à l'aide du logiciel Track. Une fois les positions obtenues toutes les 30 secondes, plusieurs étapes étaient nécessaires pour obtenir les vitesses. Ainsi, les multi-trajets ont été corrigés et les positions lissées avant de calculer les vitesses horizontales.

Cette étude a permis dans un premier temps de s'apercevoir de l'erreur que l'on pouvait commettre concernant les signaux des satellites à enregistrer. Il est important de choisir d'enregistrer tous les signaux pour ne pas avoir par la suite de manque de données. Ensuite, nous avons pu constater que la correction des multi-trajets joue un rôle important et qu'il serait préférable de faire une moyenne de ceux-ci pour chaque quinzaine et les corriger sur cette période plutôt que de les corriger avec une seule moyenne effectuée en Mars, comme nous l'avons réalisé dans cette étude.

Les vitesses horizontales et les positions verticales calculées sur la quasi-totalité de l'année 2016 ont permis de réaliser plusieurs analyses et d'aboutir à certaines conclusions. L'un des résultats important concernait les vitesses horizontales moyennes qui variaient entre 11 et 16 cm/jour en fonction de la période de l'année étudiée. Ces valeurs correspondent à celles trouvées précédemment, en statique. (Ponton, 2013)

Nous avons également pu confirmer la présence de variations sub-diurnes de la vitesse horizontale. Ce type de variations était principalement visible en Août 2016. Des pics au niveau des vitesses horizontales de plus de 30 cm/jour étaient observables dans une journée. Cela aurait pu être dû à la déformation du mât à cause de la chaleur, cependant, il n'y avait pas assez d'éléments en faveur de cette hypothèse pour la confirmer. Des variations apparaissaient la nuit et l'analyse des azimuts n'a pas permis de fournir une réelle explication. Cependant, il est possible d'affirmer que le mât constitue un facteur d'imprécision difficilement quantifiable en raison de la variation de hauteur de neige et des autres conditions climatiques qui ont un impact direct sur celui-ci. Le changement du type de mât pourrait être envisagé, même si d'autres paramètres sont à prendre en compte. En attendant, nous avons indiqué des incertitudes de 3 cm/jours pour la vitesse horizontale et de 2 cm pour la position verticale basées sur l'analyse d'une station fixe. Ces incertitudes

sont probablement pessimistes pour le positionnement du site du glacier mais ne tiennent pas compte de l'instabilité du mat.

D'autres évènements ont pu être observés lors de cette année 2016 comme le soulèvement de 7 cm au mois de Juin. Ce phénomène s'est déroulé pendant plusieurs jours et progressivement. Il a pu être expliqué en observant l'évolution des températures qui ont entraîné une fonte rapide et importante de la neige au-dessus du glacier. Cela a ensuite provoqué un ruissellement de l'eau à la base du glacier dans de petits canaux qui, avec la pression, l'a décollé du lit rocheux.

Des éléments intéressants ont pu être abordés dans cette étude mais d'autres perspectives sont envisageables. La correction des multi-trajets et l'installation sur place peuvent par exemple être modifiées mais il pourrait également être intéressant de pouvoir utiliser d'autres constellations de satellites comme GLONASS et GALILEO sur le logiciel Track afin de réduire les périodes où les incertitudes sont élevées et pendant lesquelles peu de satellites étaient visibles. De plus, une autre station fixe pourrait être installée sur un rocher proche du glacier afin de pouvoir analyser ses données avec la même stratégie que la station du glacier et ainsi avoir une meilleure idée de la précision. Pour finir, refaire un calcul en cinématique d'une année précédente avec un mât plus stable serait utile pour confronter deux jeux de données d'années différentes mais avec la même méthode de calcul afin de mieux comparer les variations sub-diurnes.

## Bibliographie

ALAZARD Daniel. Introduction au filtre de Kalman. 2006, p. 5-6.

BERGLUND Henry. The effect of L2C signal tracking on high-precision carrier phase GPS positioning. 2011.

DE JUAN J., ELOSEGUI P., DAVIS J.L., NETTLES M., LARSEN T.B., Analysis of ionospheric errors and correction techniques in high-rate GPS glaciology. Geophysical Research Abstracts, 2008.

Disponible sur [https://igsac-cnes.cls.fr/documents/egu08/EGU08\\_G7\\_Dejuan.pdf](https://igsac-cnes.cls.fr/documents/egu08/EGU08_G7_Dejuan.pdf)

DUQUENNE Françoise, BOTTON Serge, PEYRET François, BETAILLE David, WILLIS Pascal. GPS : localisation et navigation par satellites. Editeur : Hermes Science Publication, 2005, 330 pages.

ESTEY Lou, WIER Stuart. Teqc tutorial : Basics of Teqc Use and Teqc Products. 2014, p. 3.

FALLOURD Renaud. Suivi des glaciers alpins par combinaison d'informations hétérogènes : images SAR Haute Résolution et mesures terrain. STIC Traitement de l'Information. Thèse préparée au sein des laboratoires LISTIC et LTCl, 2012, 235 pages

FISCHER UH, CLARKE GKC. Stick-slip sliding behaviour at the base of a glacier. Annals of Glaciology, 1997.

GRIMES John G. Global Positioning System standard positioning service performance standard, 2008.

HERRING T. A., KING R. W., FLOYD M. A., MCCLUSKY S. C. GAMIT reference manual. GPS Analysis at MIT, Release 10.6, 2015, 168 pages.

IKEN A., ROTH LISBERGER H., FLOTRON A., HAEBERLI W. The uplift of Unteraargletscher at the beginning of the melt season - a consequence of water storage at the bed ? *Journal of Glaciology*. 1983, p. 28-47.

IKEN A., BINDSCHADLER R. A. Combined measurements of subglacial water pressure and surface velocity of Findelengletscher, Switzerland: Conclusions about drainage system and sliding mechanism. *Journal of Glaciology*. 1986, p. 101-119.

MILCENT Cédric, Comparaison de traitement de données GPS GAMIT/GLOBK et PPP et validation du logiciel PPP. Sciences de l'ingénieur, Mémoire soutenu en 2013. 97 pages.

PONTON Fanny. Mesure de la variabilité de déplacement 3D de glaciers alpins par GNSS et imagerie radar satellitaire. Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement, Thèse préparée au sein de l'Institut des Sciences de la Terre, 2013, 167 pages.

SATEESH KUMAR G., SASI BHUSHANA RAO G., KUMAR M., GPS signal short-term propagation characteristics modeling in urban areas for precise navigation application. *Positioning*, Vol. 4 No. 2, 2013.

Disponible sur [https://file.scirp.org/pdf/POS\\_2013052214363910.pdf](https://file.scirp.org/pdf/POS_2013052214363910.pdf)

SUGIYAMA S., BAUDER A., RIESEN P., FUNK M., Combined measurements of subglacial water pressure and surface velocity of Findelengletscher, Switzerland: Conclusions about drainage system and sliding mechanism. *Journal of Geophysical Research*. 2010.

VINCENT C., SORUCO A., SIX D., LE MEUR E. Glacier thickening and decay analysis from 50 years of glaciological observations performed on Glacier d'Argentière, Mont Blanc, France. *Annals of Glaciology*, 2009, p. 73-79.

VINCENT Christian and MOREAU Luc. Sliding velocity fluctuations and subglacial hydrology over the last two decades on Argentière glacier, Mont Blanc area. *Journal of Glaciology*, 2016, 12p.

VIVIAN Robert. *Glaciers du Mont-Blanc*. La Fontaine de Siloé, 10 mai 2005, 316 pages. (Collection Les savoisiennes).

## Liste des figures

Figure 1 : Localisation du glacier d'Argentière. <i>Source : google maps pour le fond de carte.</i> .....	7
Figure 2 : Cavitomètre situé sous le glacier d'Argentière.....	8
Figure 3 : Vitesse de glissement (en cm/jour) (ligne noire), ruissellement sous-glaciaire (en m <sup>3</sup> /jour) (ligne rouge) et neige fondue et précipitations (en mètres d'eau équivalent/jour) (ligne bleue) durant la saison de fonte de la glace. Les bandes bleues sur la partie inférieure du graphique indique une augmentation simultanée du ruissellement et de la vitesse de glissement, les bandes rouges correspondent à une augmentation du ruissellement pendant une diminution de la vitesse de glissement, les bandes jaunes indiquent une diminution du ruissellement et de la vitesse de glissement. <i>Source : Vincent and Moreau, 2016.</i> .....	9
Figure 4 : Vitesses horizontales avec une position toutes les 6h, déplacements verticaux corrigés de la pente du lit rocheux et températures journalières moyennées sur 10 jours. Les vitesses horizontales sont calculées en utilisant une fenêtre glissante de 2 jours à partir des positions horizontales moyennées sur 1 jour. Les bandes grisées représentent les périodes pendant lesquelles la température est positive. <i>Source : Ponton, 2013</i> .....	10
Figure 5 : Répartition des stations GPS sur le glacier d'Argentière. <i>Source : géoportail pour le fond de carte</i> .....	12
Figure 6 : Dispositifs des stations GPS ARGG (à gauche) et ARGR (à droite) le 9 Décembre 2016	13
Figure 7 : Décalage entre le signal émis par le satellite et celui reçu par le récepteur. <i>Source : Duquenne et al., 2005.</i> .....	15
Figure 8 : Schéma du principe des doubles différences .....	17
Figure 9 : Exemple de fichier de commande de Track.....	22
Figure 10 : Extrait d'un fichier de sortie de Track.....	22
Figure 11 : Extrait d'un fichier Rinex avec l'option « C2 » (à gauche) et sans cette option (à droite) .....	24
Figure 12 : Comparaison du déplacement de la station ARGG par rapport à ARGR pour la composante Est sur 3 jours (du 18 au 20/03/2016) avec décalages lors des changements de jour (en haut) et sans décalages, après avoir modifié les fenêtres des données (en bas) .....	26
Figure 13 : Principe des multi-trajets. <i>Source : Sateesh Kumar et al., 2013.</i> .....	26
Figure 14 : Antenne choke ring.....	27
Figure 15 : Comparaison du déplacement relatif de la station ARGG sur la composante Nord par rapport à la station ARGR avec les multi-trajets (en haut) et après correction des multi-trajets (en bas) le 18/03/2016. Le graphique du milieu représente la moyenne des séries que l'on soustrait à la série avec les multi-trajets. ....	29
Figure 16 : Comparaison entre la moyenne glissante du 20/03/2016 sur la composante Nord avec un intervalle de 15 min (en haut) et avec un intervalle de 2h (en bas) .....	30
Figure 17 : Déplacements et incertitudes de la station ARGG par rapport à ARGR sur la composante Nord, le 07/08/2016.....	31
Figure 18 : Déplacement relatif d'ARGG par rapport à ARGR lissé (sur un intervalle de 2h) avec un saut pour la composante Nord, le 07/08/2016 .....	31
Figure 19 : Déplacement relatif d'ARGG par rapport à ARGR lissé (sur un intervalle de 2h) après pondération avec les incertitudes pour la composante Nord, le 07/08/2016 .....	32
Figure 20 : Comparaison des vitesses de la station ARGG pour la composante Nord, le 20/03/2016, en fonction de différents intervalles : 2h (en haut), 3h (au milieu) et 4h (en bas)	33
Figure 21 : Schéma de l'azimut en fonction des composantes Nord et Est .....	34
Figure 22 : Vitesses horizontales (en haut) et déplacements verticaux (en bas) de la station CHMX, du 18 au 31/03/2016 calculées à partir de positions obtenues toutes les 30 s. ....	36
Figure 23 : Vitesses horizontales et températures du 18 au 31/03/2016 (en haut) et positions verticales (en bas).....	37
Figure 24 : Vitesses horizontales de la station ARGG et température d'une station météo proche du glacier du 16 au 31/08/2016 (en haut) et positions verticales (en bas). Les incertitudes sont représentées en gris.....	38

Figure 25 : Vitesses horizontales de la station ARGG et ensoleillement d'une station météo juste à côté du glacier du 16 au 31/08/2016. Les flèches bleues représentent des exemples d'accélération la nuit. ....	39
Figure 26 : Vitesses horizontales et azimuts de la station ARGG le 25/08/2016. Le trait noir horizontal est l'azimut moyen pour le mois d'Août. ....	40
Figure 27 : Vitesses horizontales en fonction de la direction moyenne de la station ARGG au mois d'Août (289°) et vitesses horizontales perpendiculaires à cette direction pour le 25/08/2016.	41
Figure 28 : Vitesses horizontales de la station ARGG et températures (en haut) et positions verticales (en bas) du 13 au 30/06/2016. ....	42
Figure 29 : Vitesses horizontales de la station ARGG et températures (en haut) et positions verticales (en bas) du 16 au 31/05/2016. ....	44
Figure 30 : Vitesses horizontales de la station ARGG du 18/03/2016 au 9/12/2016 lissées sur un intervalle de 2 jours. ....	45
Figure 31 : Positions verticales de la station ARGG par rapport à ARGR du 18/03/2016 au 9/12/2016. L'axe des ordonnées n'est pas le même à gauche (pour les jours 78 à 251) et à droite (pour les jours 259 à 344). Le trait vertical après le jour 251 représente le moment où l'antenne a cessé de fonctionner et à l'abaissement du mât. ....	46
Figure 32 : Comparaison entre les vitesses horizontales, les positions verticales et les températures des stations ARGG (bleu) et SERA (rouge) pour une solution lissée à 1h du 31 Mars au 14 Avril 2011 (à gauche) ( <i>Source : Ponton, 2013</i> ) et les vitesses horizontales, les positions verticales et les températures du 18 au 31 Mars 2016 (à droite) ....	48
Figure 33 : Comparaison des vitesses horizontales, positions verticales et températures des stations ARGG (bleu) et SERA (rouge) pour une solution lissée à 1h du 11 au 26 Août 2011. (à gauche) ( <i>Source : Ponton, 2013</i> ) et les vitesses horizontales, positions verticales et températures pour la station ARGG du 16 au 31 Août 2016 (à droite) ....	49

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des appareils en station sur ARGR et ARGG. ....	14
--	----

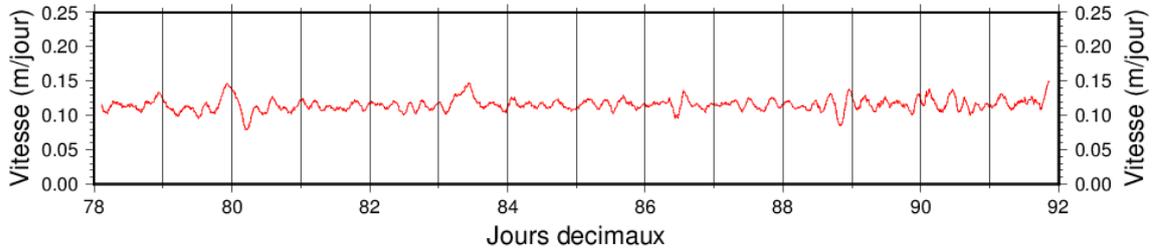
## **Table des annexes**

Annexe 1 Vitesses horizontales et déplacements verticaux du 18/03/2016 au 9/12/2016 .....	58
Annexe 2 Vitesses horizontales et azimuts journaliers du 24 au 27/08/2016 .....	65
Annexe 3 Vitesses horizontales en fonction de la direction moyenne et de la perpendiculaire du 24 au 27/08/2016 .....	66

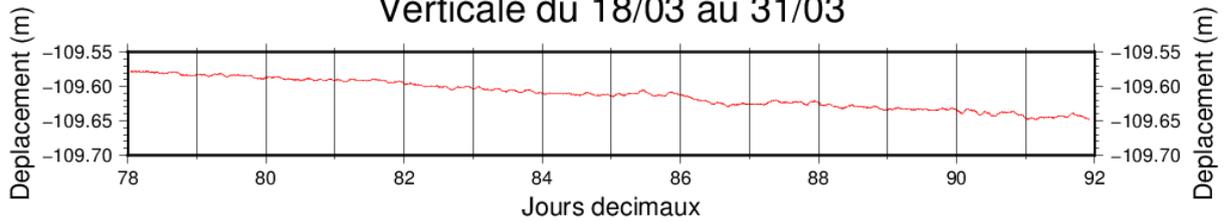
# Annexe 1

## Vitesses horizontales et déplacements verticaux du 18/03/2016 au 9/12/2016

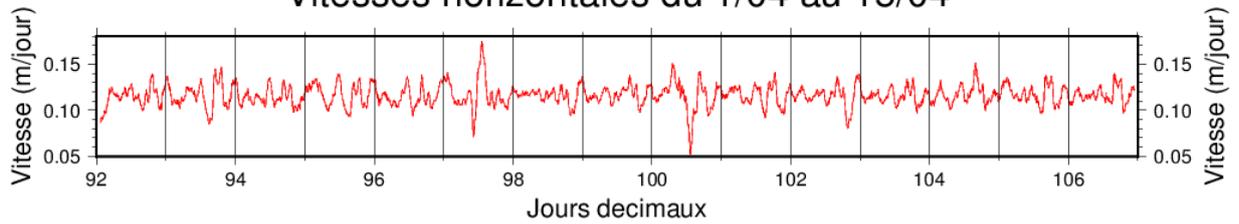
### Vitesses horizontales du 18/03 au 31/03



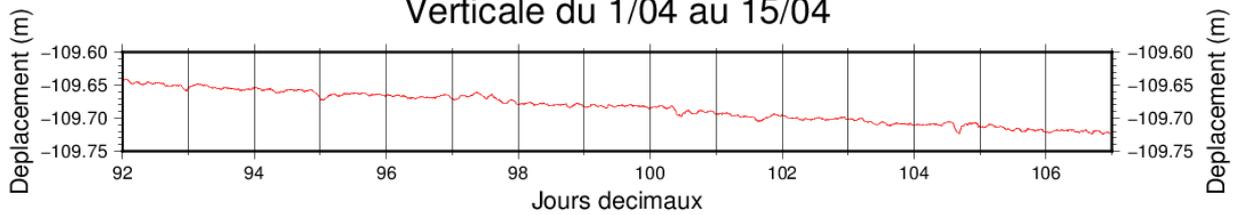
### Verticale du 18/03 au 31/03



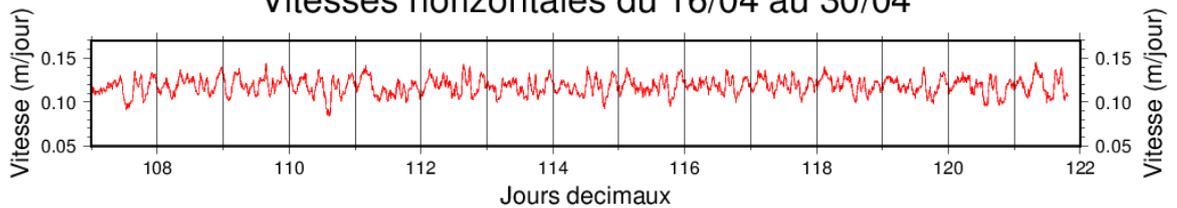
### Vitesses horizontales du 1/04 au 15/04



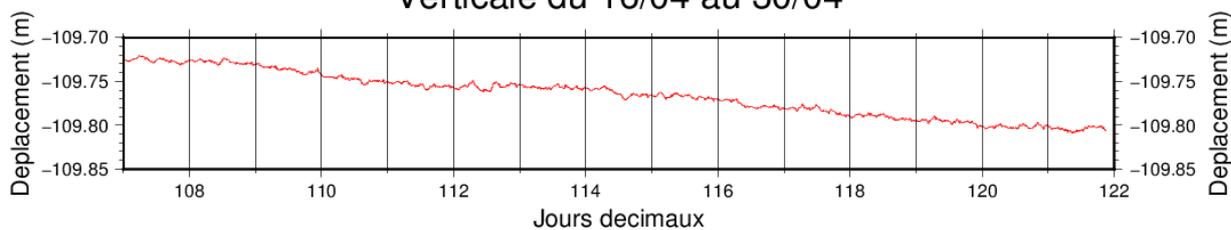
### Verticale du 1/04 au 15/04



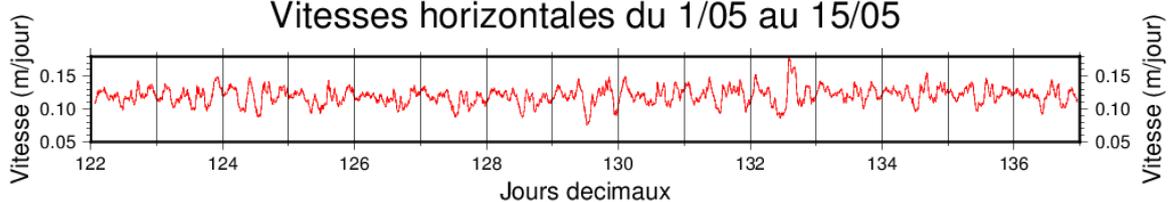
### Vitesses horizontales du 16/04 au 30/04



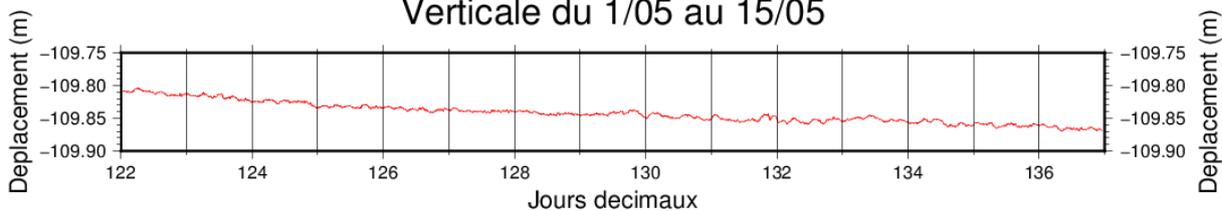
### Verticale du 16/04 au 30/04



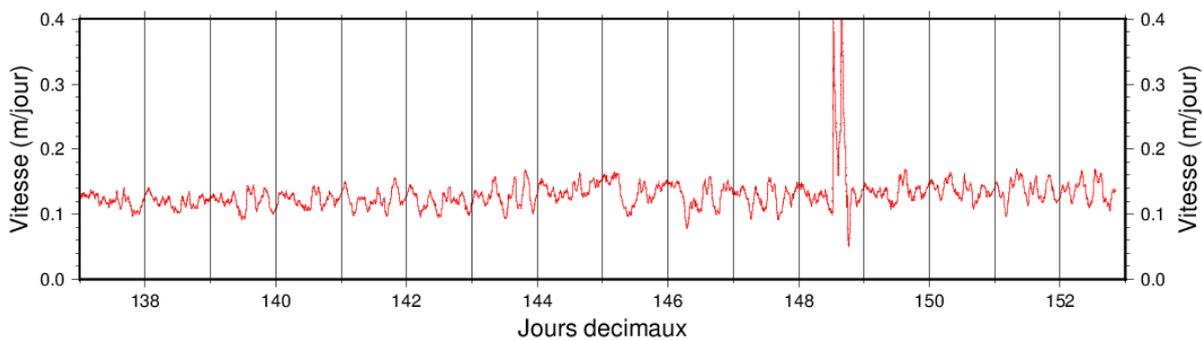
### Vitesses horizontales du 1/05 au 15/05



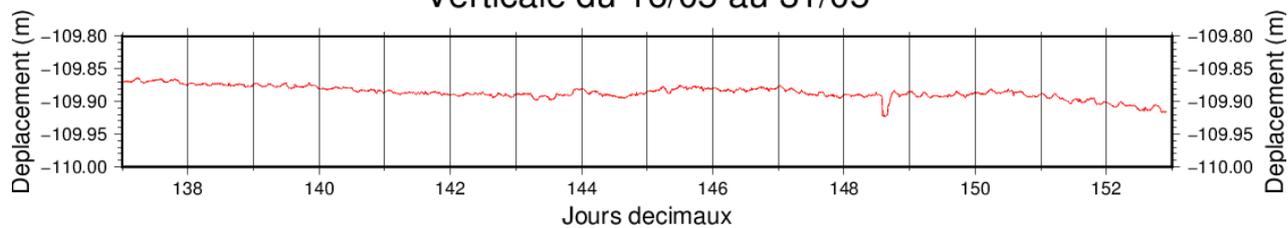
### Verticale du 1/05 au 15/05



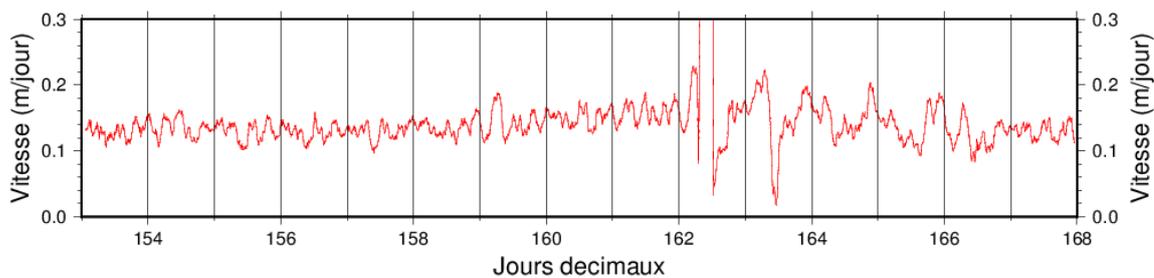
### Vitesses horizontales du 16/05 au 31/05



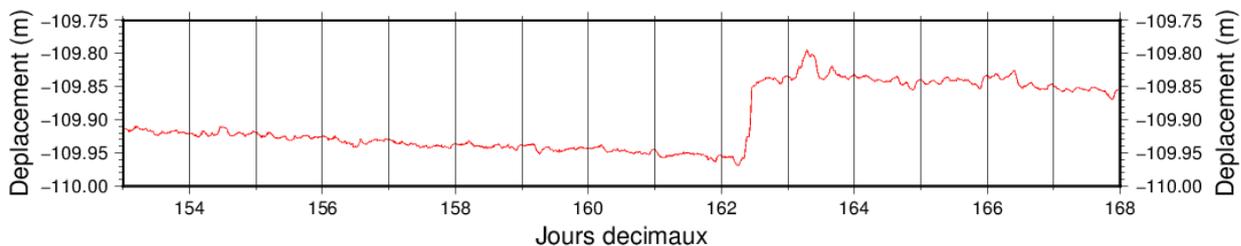
### Verticale du 16/05 au 31/05



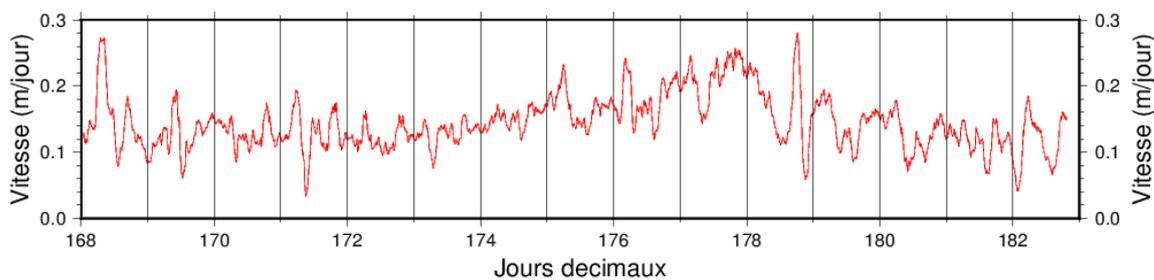
### Vitesses horizontales du 1/06 au 15/06



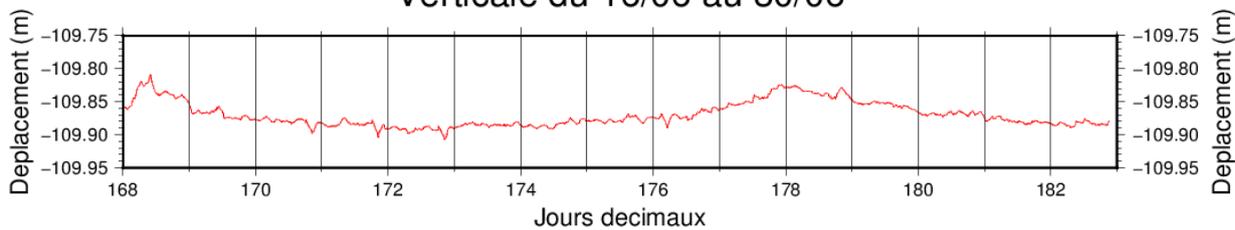
### Verticale du 1/06 au 15/06



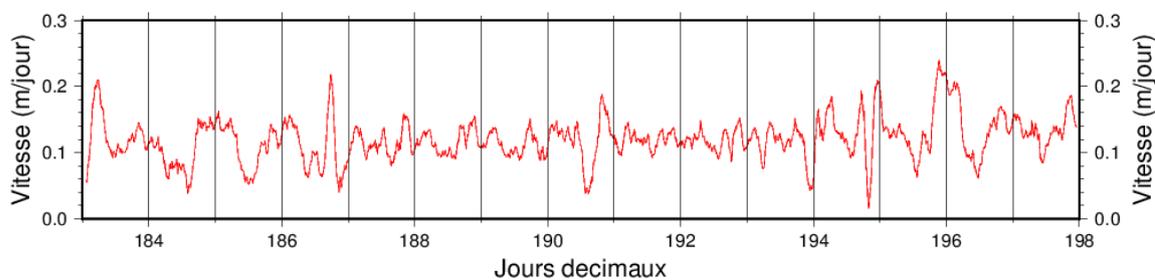
### Vitesses horizontales du 16/06 au 30/06



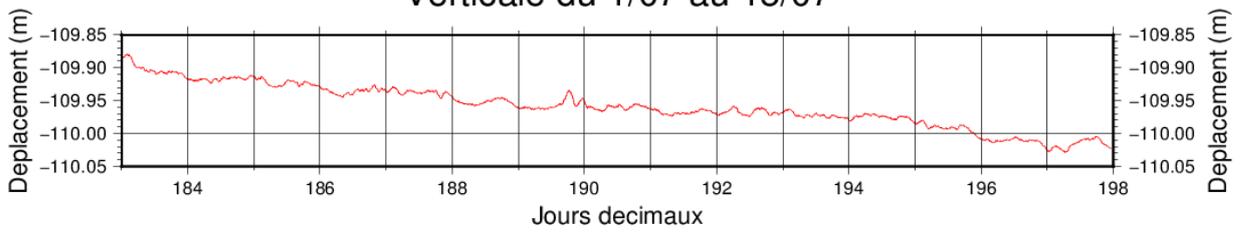
### Verticale du 16/06 au 30/06



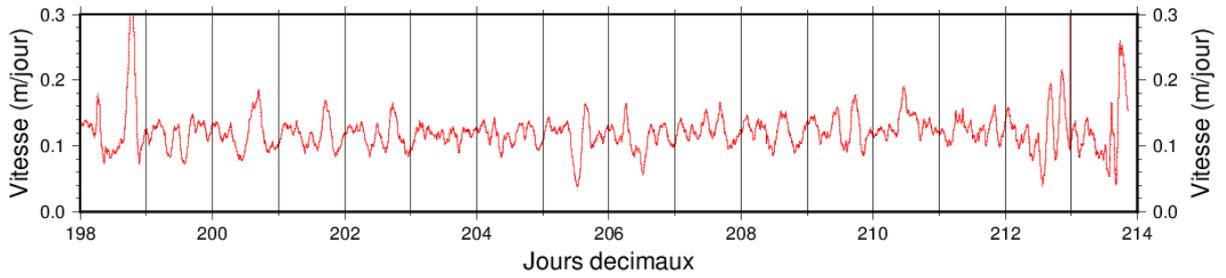
### Vitesses horizontales du 1/07 au 15/07



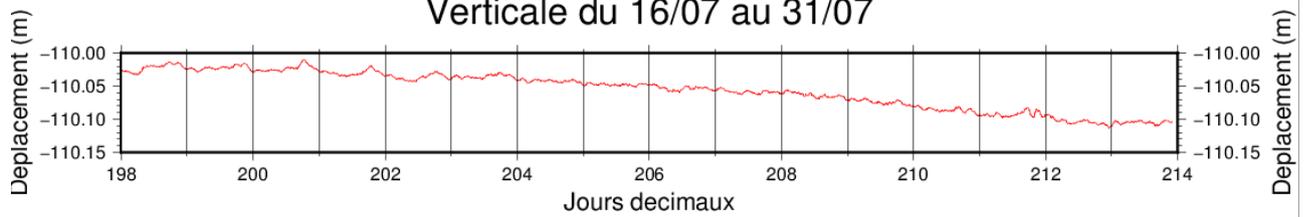
Verticale du 1/07 au 15/07



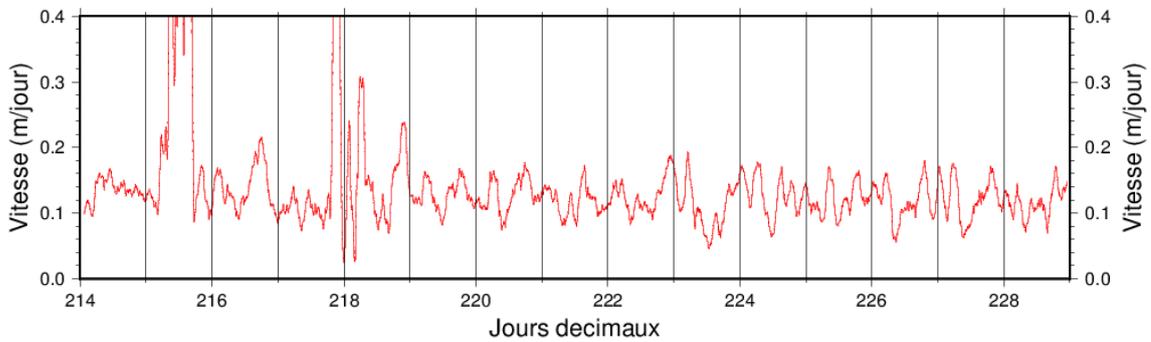
Vitesses horizontales du 16/07 au 31/07



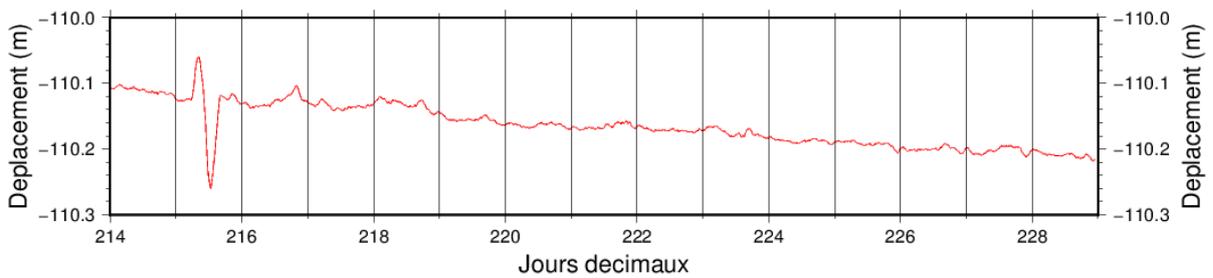
Verticale du 16/07 au 31/07



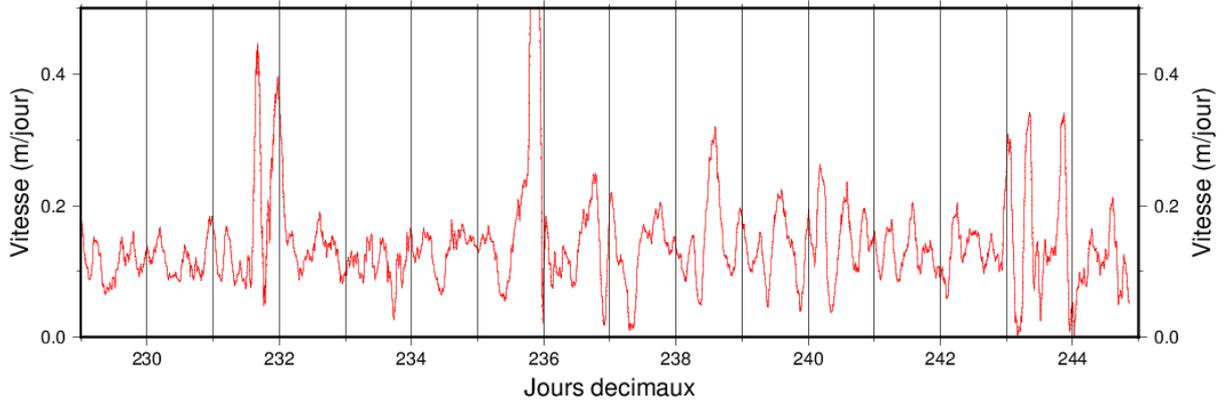
Vitesses horizontales du 1/08 au 15/08



Verticale du 1/08 au 15/08



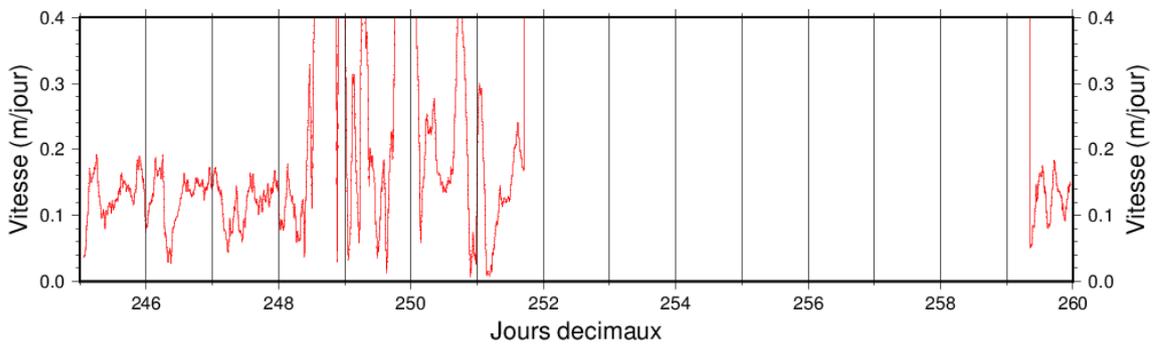
Vitesses horizontales du 16/08 au 31/08



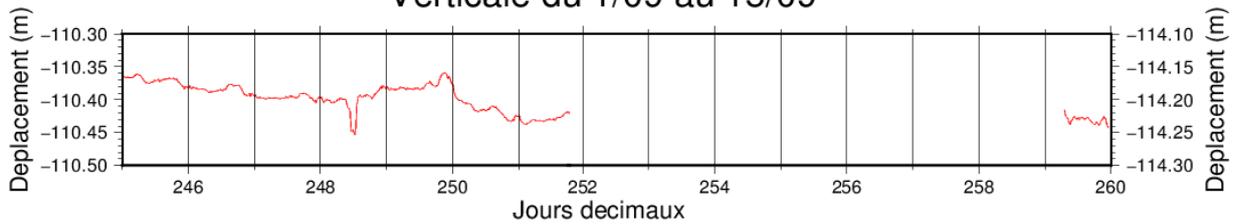
Verticale du 16/08 au 31/08



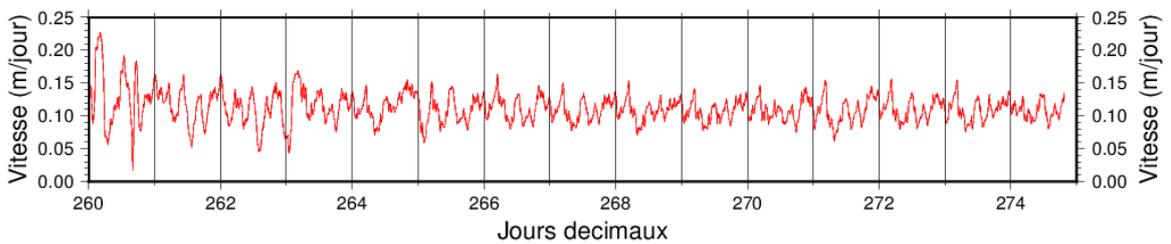
Vitesses horizontales du 1/09 au 15/09



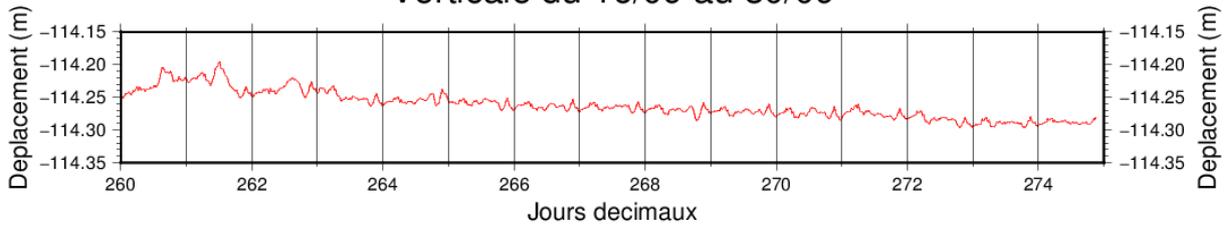
Verticale du 1/09 au 15/09



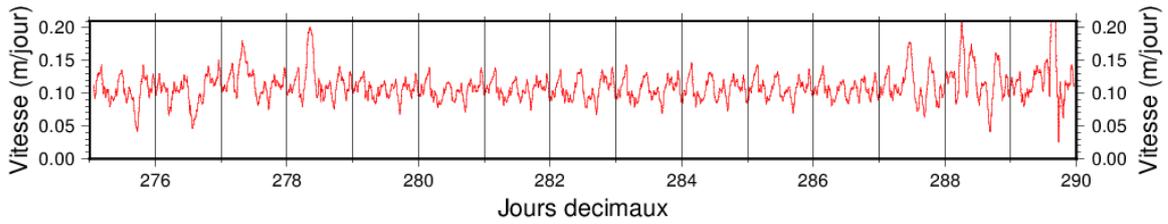
Vitesses horizontales du 16/09 au 30/09



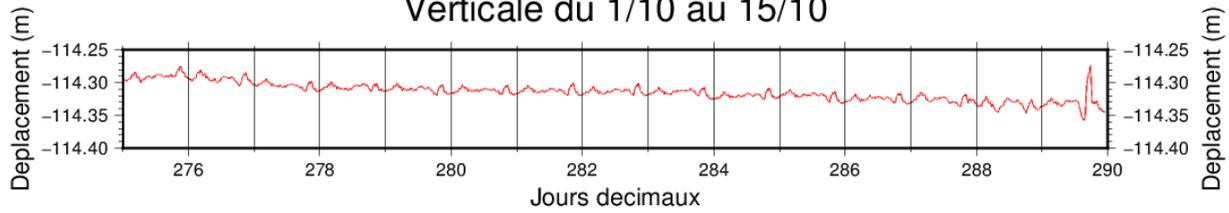
### Verticale du 16/09 au 30/09



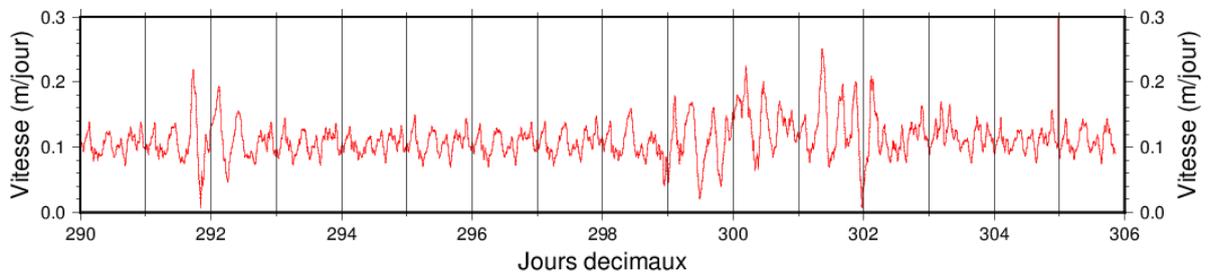
### Vitesses horizontales du 1/10 au 15/10



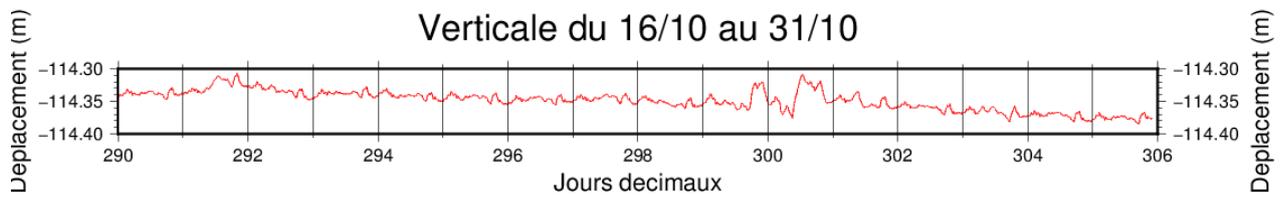
### Verticale du 1/10 au 15/10



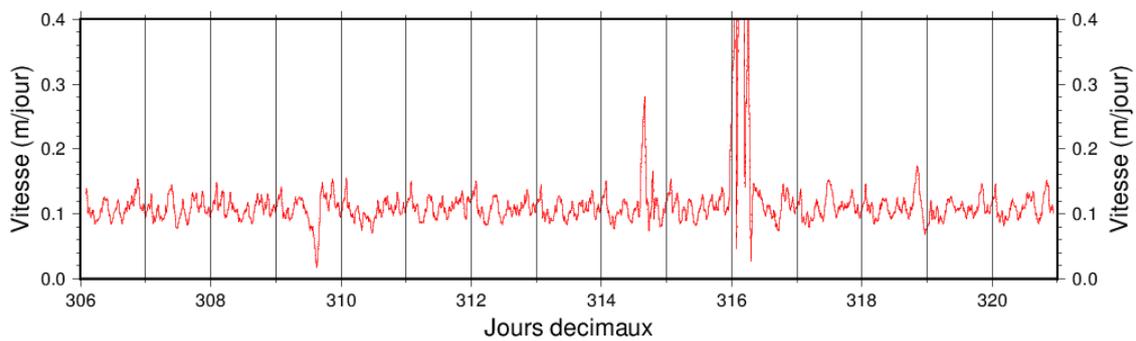
### Vitesses horizontales du 16/10 au 31/10

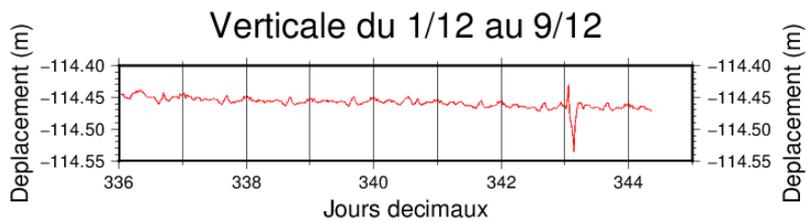
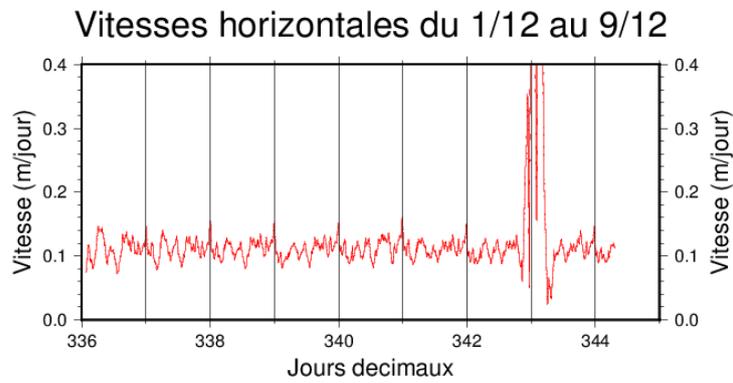
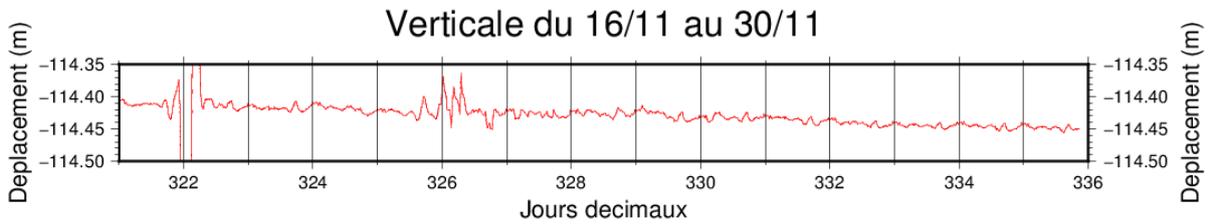
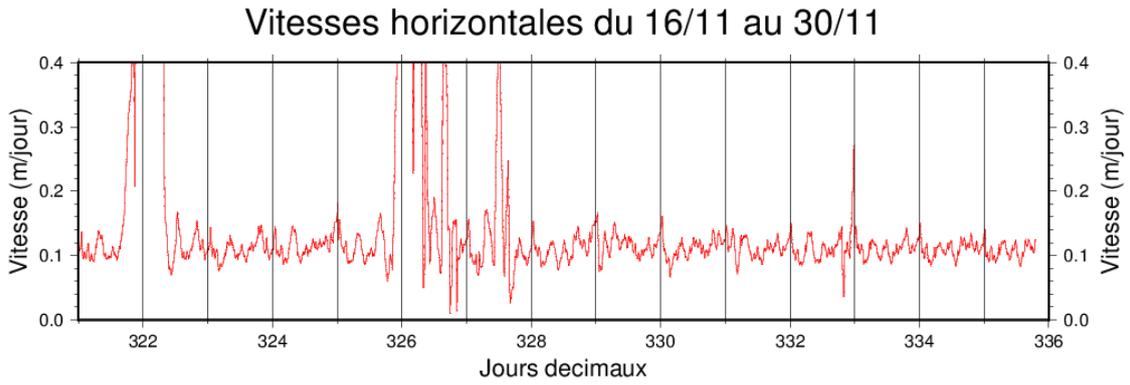
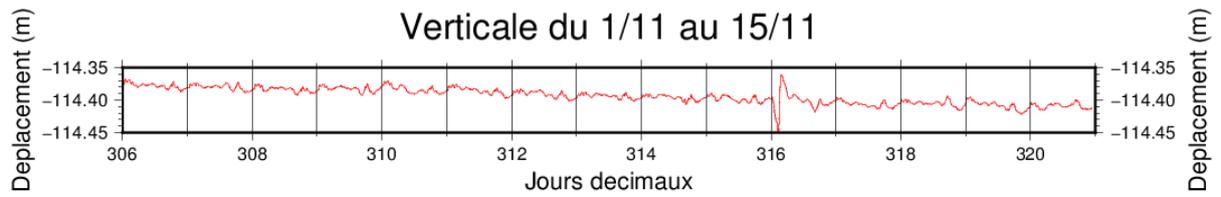


### Verticale du 16/10 au 31/10



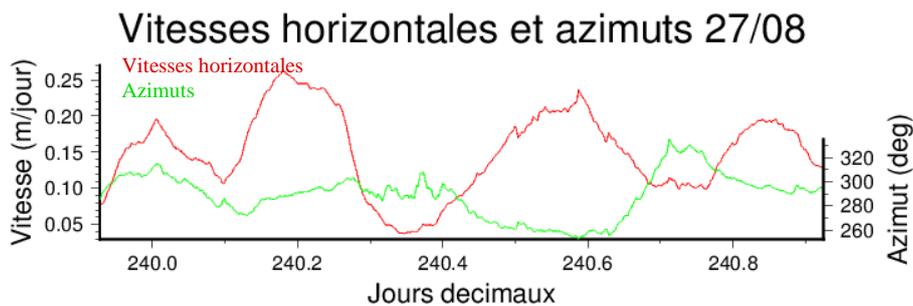
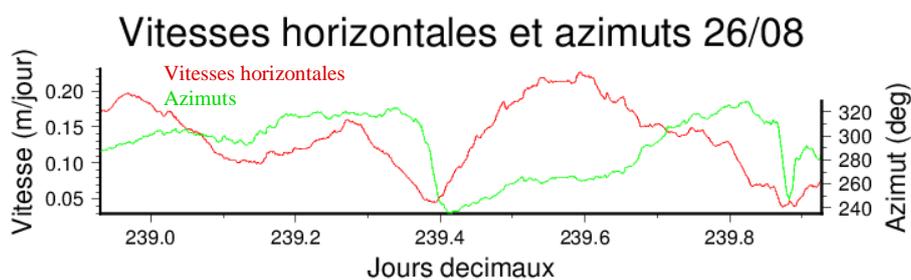
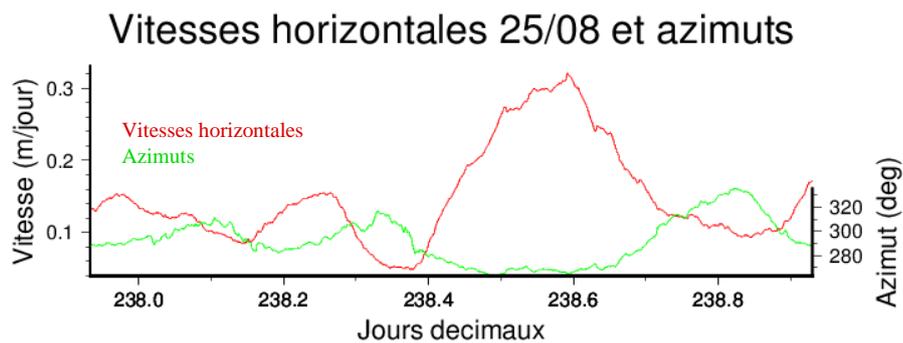
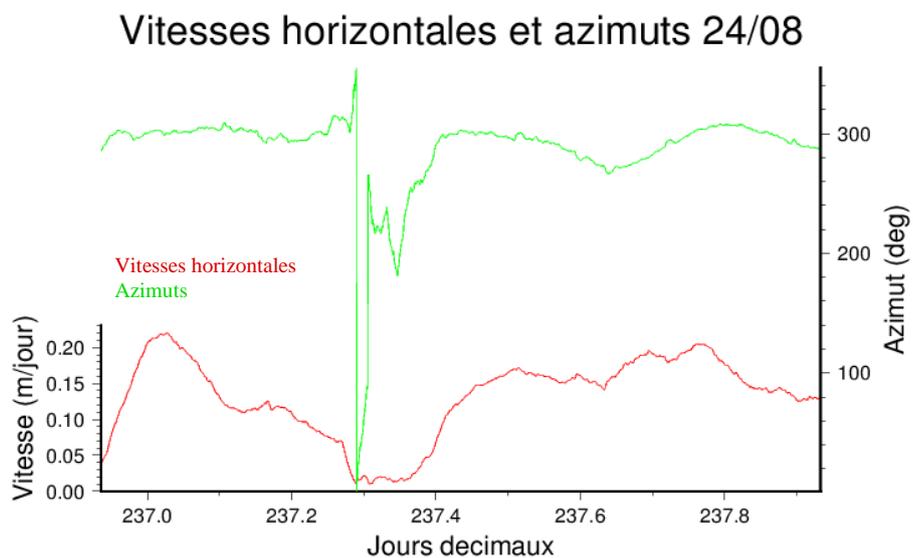
### Vitesses horizontales du 1/11 au 15/11





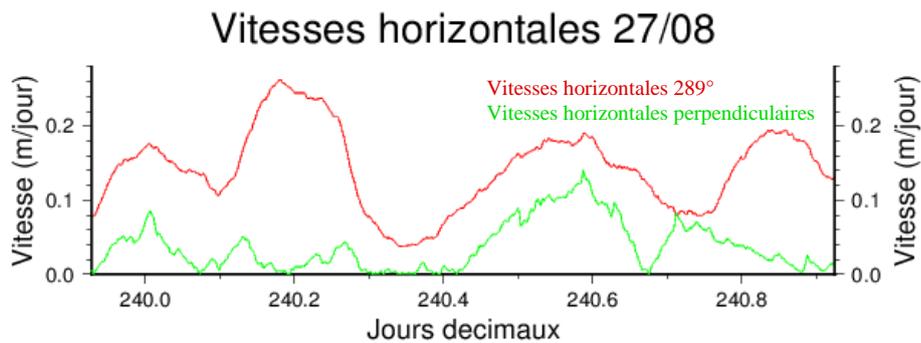
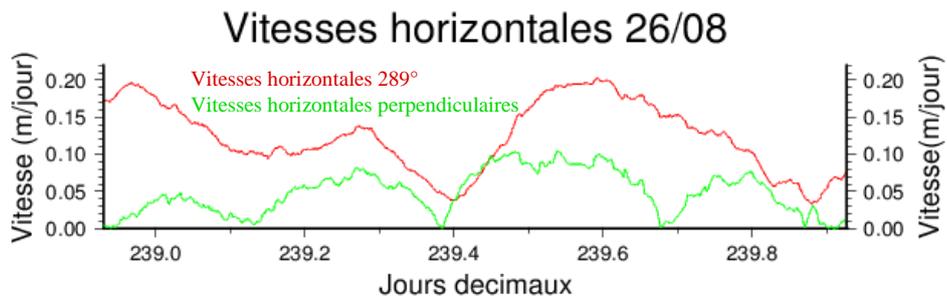
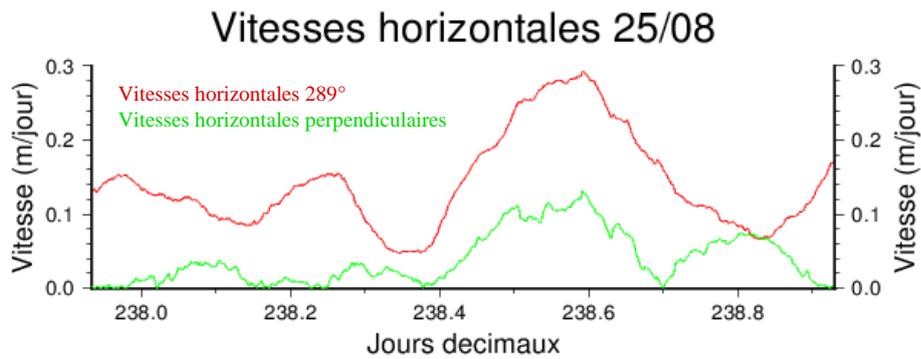
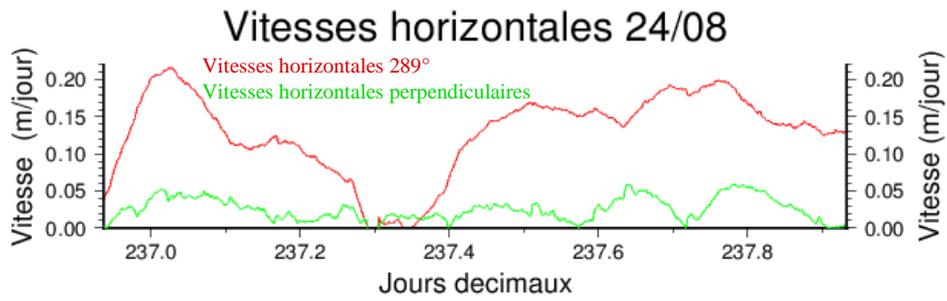
## Annexe 2

### Vitesses horizontales et azimuts journaliers du 24 au 27/08/2016



### Annexe 3

## Vitesses horizontales en fonction de la direction moyenne et de la perpendiculaire du 24 au 27/08/2016



# **Suivi des variations du glissement du glacier d'Argentière par GPS haute fréquence**

**Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2017**

---

## **RESUME**

Les travaux menés dans le cadre de ce stage de fin d'études concernent l'étude de la variabilité du glissement du glacier d'Argentière par GPS haute fréquence. Les données GPS analysées jusqu'ici sur le glacier d'Argentière se basaient sur un positionnement statique, c'est-à-dire avec une position moyennée toutes les 6 h. Grâce aux GPS haute fréquence et à un logiciel appelé Track, il est possible de traiter les données en mode cinématique, avec une position toutes les 30 secondes. Presque une année de données a été enregistrée du 18/03/2016 au 9/12/2016.

Le traitement de ces données avec le logiciel Track puis le calcul des vitesses horizontales a permis de comparer et compléter les résultats précédents qui semblaient indiquer une variation sub-diurne de la vitesse du glacier. Des variations sub-diurnes ont effectivement été observées mais leurs causes n'ont pas été précisément découvertes. D'autres phénomènes ont été analysés comme un soulèvement de 7 cm sur plusieurs jours au mois de Juin. Cet évènement est sûrement dû à la fonte brutale de la neige à cause des températures élevées qui a décollé le glacier et le lit rocheux.

**Mots clés : GPS haute fréquence, glacier, Track, positionnement cinématique, variations sub-diurnes, soulèvement.**

---

## **SUMMARY**

The works presented in this report show the surface displacement variability of Argentière glacier with High Rate GPS. The previous GPS data results were obtained with a static positioning but there was only one position every 6 h. Thanks to High Rate GPS and a software named Track, it is possible to process the data with a kinematic mode, with a position every 30 s. Almost a year of data have been recorded : from 18/03/2016 to 9/12/2016.

The data processing with the software Track and the horizontal speed velocity computing allowed to compare and complete the previous results that showed a sub-diurnal variability of the glacier's velocity. Indeed, sub-diurnal variability has been observed but the causes haven't been discovered. Other phenomenon have been analysed as 7 cm uplift during a few days in June. This event is probably due to a brutal snowmelt with high temperatures that took off the glacier and the bedrock.

**Key words : High rate GPS, glacier, Track, kinematic position, sub-diurnal variability, uplift.**