

Analyse GPS des données GPS du glacier d'Argentière

SERAFINI Jonathan

M2R Science de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement, Option Océan,
Atmosphère et Hydrologie
Université Joseph Fourier

Stage effectué au
Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique,
Equipe Cycle Sismique et Déformations Transitoires,
sous la direction de
Andrea Walpersdorf
Février-Juin 2009



FIGURE 1 : *Glacier d'Argentière*

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier tout particulièrement Andrea Walpersdorf, pour toute l'aide et le savoir qu'elle m'aura apporté pendant ce stage. Elle aura été d'une grande disponibilité, d'une patience, et d'une implication qui auront été extrêmement formatrices, aussi bien d'un point de vue humain que professionnel.

Je remercie également, toute l'équipe, « cycle et déformation transitoire », et plus particulièrement, Nathalie Cotte, Cécile Lasserre, Erwan Pathier et Romain Jolivet qui ont bien voulu partager leurs connaissances et leur expérience pour que je puisse mener ce projet à bien. Ainsi qu'Alexandra Royer et Haythem Balti, également stagiaires dans l'équipe, avec qui j'ai pu confronter mes expériences et ainsi mieux avancer.

Je remercie de façon plus générale tout le Laboratoire du LGIT, pour son accueil chaleureux.

Résumé

Le glacier d'Argentière situé dans le massif du Mont Blanc fait l'objet de nombreuses études, dont une portant sur la correction d'imagerie radar, le projet EFIDIR. Ce stage, appartenant à ce projet, a pour objectif d'analyser les données issues d'un réseau GPS installé sur ce glacier. Celui-ci est composé de 4 stations GPS situées entre 1121m et 2835m. Une des analyses, utilisant les logiciels GAMIT/GLOBK (MIT), montre la relation entre le déplacement linéaire (à vitesse constante de l'ordre de 13,4 cm/j) et le déplacement résiduel de 5% (accélérations) présentant une variation saisonnière. Cette étude permet également de quantifier une variabilité spatiale du glissement en comparant les mesures des deux stations à différentes altitudes (2770 et 2440m). Sur la distance de 3,3 km la vitesse moyenne augmente de 30% pour atteindre 16,76 cm/j à 2400m. Les paramètres troposphériques (ZTD) estimés dans cette analyse GPS servent à quantifier la variabilité atmosphérique. L'évaluation des différences de ZTD entre les stations permet de caractériser la variabilité atteignant 6cm dans la couche entre 1121 et 2770m d'altitude et peut donc affecter les mesures radar de façon significative. Enfin la corrélation observée entre les observations GPS et des évaluations à partir d'un modèle météorologique global ERA40 utilisé par EFIDIR conserve un décalage constant. ERA40 ne reproduit la variabilité temporelle que partiellement (4 cm dans la couche entre 1121 et 2770 m). L'utilisation des mesures GPS est donc conseillée quand elles sont disponibles.

The glacier of Argentière, in the Mont Blanc massif, is subject to numerous scientific studies. The EFIDIR project, dealing with corrections of radar imaging, is one of them. This internship, carried on within this group, aims at analyzing the data collected on the glacier by four GPS stations, at altitudes between 1121 and 2835 meters. One of these analysis, using the GAMIT/GLOBK (MIT) software, shows a correlation between the linear displacement (with a constant speed of about 13,4 cm/day) and the residual displacement of 5% (acceleration) that presents a seasonal variation. This study also demonstrates a spatial variability of the displacement by comparing the data from two stations at different heights (2770m and 2440m). The mean speed varies by a factor of 30% over 3,3 kms, peaking at 16,76 cm/j at 2440m. The tropospheric parameters (ZTD) assessed in this GPS analysis helped us quantify an atmospheric variability as high as 6 cm between the layers at 1121 and 2770 meters, that can effectively affect radar measurements. Finally we compare GPS observations with estimates based on the global meteorologic model ERA40 used by EFIDIR, showing a constant shift. This may be due to the fact that ERA40 can only partially reproduce the temporal variability (4 cm difference between the layers at 1121 et 2770 m). The use of GPS measurements is then advised when available.

Table des matières

1	Introduction	1
2	État de l'art de l'analyse GPS	2
2.1	Le contexte	2
2.2	Les objectifs de ce stage	4
3	Les données GPS et leur analyse	5
3.1	La mesure GPS	5
3.2	L'analyse des données réalisées lors du stage au LGIT	11
4	La dynamique du glacier d'Argentière	16
4.1	Les variations temporelles du positionnement	16
4.2	Les variations spatiales du positionnement	20
5	L'estimation des paramètres troposphériques	22
5.1	Les variations des paramètres troposphériques	23
5.2	Le délai zénithal troposphérique différentiel	24
5.3	Les perspectives dans l'interférométrie radar	25
6	Conclusion	30
A	Annexes	32
A.1	Vitesses annuelles de surface obtenues par l'étude de C. Vincent et al., 2009, [6]	32
A.2	Séries temporelles des résultats à l'échelle d'Origine	33
A.3	Etude de comparaison entre le modèle ERA40 et l'analyse GPS.	39
A.4	Organigramme des logiciels utilisés GAMIT/GLOBK	43
	Références	44

1 Introduction

Ce rapport présente l'étude effectuée pendant mon stage Master 2 recherche. Celui-ci a duré cinq mois, de février à juin 2008, sous la direction d'Andrea WALPERSDORF, chercheuse dans l'équipe cycle et déformation transitoire au LGIT (Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique) de Grenoble. Ce stage est impliqué dans un projet plus vaste, le projet ANR EFIDIR (Extraction et fusion de l'information pour la mesure de déplacements par interférométrie radar, coordonné par E. Trouvé, LISTIC, Annecy). Une des cibles du projet EFIDIR est le glacier d'Argentière en tant qu'exemple pour un objet géophysique en déformation active. Dans le cadre d'EFIDIR, des prises de vue radar sont faites régulièrement sur le glacier d'Argentière, et un corner réflecteur (dispositif créant un point de repère lumineux sur l'image radar) a été installé sur le glacier. Ce dispositif est complété par des stations GPS continues qui fournissent la "vérité de terrain", c'est à dire la position du corner au moment de la prise de vue radar et la vitesse de glissement réelle. Ce réseau GPS local est constitué de quatre stations, deux sur le glacier en déplacement, et deux à des endroits stables à proximité. Alors que des mesures GPS intermittentes sont couramment utilisées pour étudier des glaciers tempérés, notre réseau GPS sur le glacier d'Argentière fournit les premières mesures continues de positionnement sur un glacier alpin.

Ce stage a pour objectif d'analyser des données GPS de ces quatre stations entre 2007 et 2008. Pour cela nous avons intégré ce réseau local de quatre stations dans un réseau plus global regroupant 66 stations. Ce réseau constitue la base de notre étude. Les données de l'ensemble de ces stations ont été analysées avec les logiciels GAMIT et GLOBK (Herring et al., 2006 [4]). GAMIT utilise la méthode des moindres carrés pour estimer les distances interstation et les différents paramètres troposphériques tels que les délais zénithaux troposphériques (ZTD). GLOBK applique un filtre de Kalman, pour pouvoir déterminer les positions des stations par rapport au référentiel international ITRF et les vitesses moyennes associées.

Ce rapport présente dans un premier temps le contexte, les enjeux et les objectifs de l'analyse GPS du glacier d'Argentière, puis la méthode géodésique utilisée pour mener cette analyse. Ensuite, deux études découlant de cette analyse seront présentées. La première cherche à mesurer différents paramètres de la dynamique du glacier en surface, c'est à dire la vitesse moyenne de déplacement à deux endroits différents du glacier, et la variabilité saisonnière de la vitesse du glissement. Dans ce rapport sera présentée la méthode utilisée pour mettre en évidence ces paramètres de la dynamique du glacier malgré certaines imperfections dans les mesures GPS disponibles. Nous examinons ensuite si nos observations continues sont cohérentes avec des études déjà existantes basées sur des mesures annuelles.

La seconde étude est l'estimation des paramètres troposphériques à l'aplomb des stations GPS. L'objectif est d'améliorer les méthodes de corrections de l'atmosphère en interférométrie radar. Pour cela, nous quantifions la variabilité atmosphérique au-dessus du glacier par les mesures GPS du réseau local. Ceci nous permet d'estimer l'erreur potentielle dans les images radar. Ensuite nous comparons ces mesures troposphériques du GPS avec des estimations d'un modèle météorologique global, ERA40, couramment utilisé pour corriger les prises de vue radar. Ainsi nous pourrions quantifier l'erreur commise par l'utilisation de ce modèle qui est de résolution spatio-temporelle limitée mais a l'avantage d'être disponible en tout point du globe.

2 État de l'art de l'analyse GPS

Dans cette partie nous présentons tout d'abord le contexte dans lequel évolue cette étude. Celle-ci traitant du glacier d'Argentière, nous introduirons les grandeurs importantes mesurées sur les glaciers alpins puis nous présenterons spécifiquement le glacier d'Argentière. Nous présenterons ensuite le projet dans lequel ce stage est inclus : EFIDIR. Dans un second temps, nous développerons les objectifs de ce stage. Ces objectifs concernent deux aspects : l'étude de la dynamique du glacier en surface à l'échelle intra-annuelle et la détermination de paramètres atmosphériques dans le but d'améliorer la correction de l'influence de l'atmosphère en interférométrie radar.

2.1 Le contexte

La connaissance des glaciers alpins Les volumes de glace ont considérablement varié au cours du temps. Nous savons que la quantité de glace présente sur Terre est étroitement liée au climat, mais elle dépend aussi de la géographie des continents et de leur reliefs. L'étude des glaciers peut se faire à plusieurs échelles de temps, pouvant remonter à plusieurs millions d'années et mettre en évidence les différentes ères glaciaires. Toutefois des mesures directes des variations glaciaires ne se font que depuis une période beaucoup plus récente. En France elles ont débuté en 1870, avec les relevés annuels de la position du front de quelques glaciers, principalement dans le massif du Mont Blanc : sur les glaciers d'Argentière, des Bossons et de la Mer de Glace. Ces mesures visaient à quantifier et comparer la variation de longueur de ces différents glaciers. Cette comparaison montre, malgré quelques crues en 1890, 1920 et 1960, une tendance générale de recul des glaciers alpins. Dans les années 1990 une nouvelle décrue a commencé se prolongeant jusqu'à maintenant. Mais, même si les glaciers d'un même massif subissent les mêmes variations climatiques, ils peuvent avoir des variations de longueur

très différentes. Ces variations dépendent principalement de leur taille, mais aussi parfois de caractéristiques morphologiques particulières telles que l'importance de leur dénivelée ou leur couverture rocheuse. Ainsi les variations du front ne permettent pas de dissocier l'influence du climat et les caractéristiques morphologiques propres à chaque glacier. C'est pourquoi depuis 1950, ces mesures au front des glaciers ont été complétées par d'autres mesures, telles que le bilan de masse et la variation avec l'altitude de la vitesse de surface en trois sites différents du glacier (Vincent et al., 2009 [6]). Ces mesures ont été effectuées tous les ans pendant le mois de septembre par le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement) de Grenoble.

Le glacier d'Argentière Le glacier d'Argentière est situé dans le massif du Mont Blanc, dans les Alpes françaises. Ses coordonnées sont 45°55' N et 6°57' E. Sa surface était de 12,4km² en 2003. Le glacier s'étend entre les altitudes de 3400m à son sommet et de 1600m à son front. Sa longueur est d'environ 10km. Il est orienté vers le Nord-Ouest.

Le bilan de masse annuel varie d'environ +2m w.e. (water equivalent) par an dans l'aire d'accumulation à environ de -10m w.e. par an près du front. L'altitude de la ligne d'équilibre entre accumulation et ablation est proche de 2800m en moyenne sur les 20 dernières années. Depuis 2004 des survols satellites radar (ERS1-2) ont pu déterminer précisément le champ global de vitesses de surface du glacier grâce à l'interférométrie [3]. Cette étude interférométrique a mené par la suite au projet plus vaste d'EFIDIR.

Le projet EFIDIR L'étude du glacier d'Argentière à laquelle appartient ce stage fait partie du projet EFIDIR (Extraction et Fusion d'Informations pour la mesure de Déplacement par Imagerie Radar). Ce projet est financé par l'appel d'offres ANR "Masse de données et Connaissances" sur la période 2008-2011. Le coordinateur est Emmanuel TROUVE, chercheur au LISTIC de l'Université de Savoie. Le projet est mené en partenariat avec 6 laboratoires : quatre laboratoires spécialistes du traitement d'image RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) : le LISTIC de l'Université de Savoie, le IETR de l'Université de Rennes, le GIPSA-Lab, Grenoble, et le LTCl, Paris, ainsi que deux laboratoires de géophysique : le LGIT, Grenoble et le LG, Paris.

Le projet EFIDIR a pour objectif de développer une plateforme ouverte d'archivage et de traitement adaptée des données radar particulièrement volumineuses. De plus il a également pour objectif la conception, la réalisation et la validation de codes spécifiques, complémentaires aux éléments de traitement disponibles en logiciel libre. Ainsi ce projet exploite des données radar sur différents sites dont celui du glacier d'Argentière, survolé par des satellites RSO tels que Radarsat ou Terrasar-X. Ces données seront ensuite corrélées avec d'autres études dont

l'analyse GPS et les modèles météorologiques.

Pour atteindre ces différents objectifs le projet se divise en trois sous-projets : le premier est le développement d'outils complémentaires de traitement du signal et d'images justifiés par les thématiques proposées. Le second est l'intégration de ces outils dans des plateformes logicielles permettant de remonter aux paramètres de déplacement du sol. Le dernier est l'étape de fusion des informations, qui a pour but de permettre le passage à des grandeurs géophysiques.

Donc globalement, ce projet cherche à transformer la masse de données issue de l'imagerie satellite radar en mesures de déplacement et d'enrichir ainsi la connaissance des phénomènes géophysiques observés.

2.2 Les objectifs de ce stage

Ce stage a eu deux objectifs majeurs. Ces objectifs se basent tous deux sur une analyse GPS utilisant des mesures faites avec quatre stations GPS, dont deux placées sur le glacier et deux à proximité. Le premier objectif est l'étude de la dynamique du glacier par des mesures de positionnement continues en deux points de celui-ci. Cette étude est constituée de deux parties. D'un côté elle cherchera à mettre en évidence la variabilité temporelle de la vitesse de glissement, à la recherche d'une éventuelle composante saisonnière. Pour ceci, il faudra tout d'abord estimer la vitesse moyenne du glacier sur les deux ans de mesure disponibles au point d'ancrage de l'une des deux stations. D'autre côté, cette étude permettra d'observer la variabilité spatiale de la vitesse de glissement entre les points d'ancrage des deux stations du glacier. Ces mesures pourront être comparées aux observations du LGGE (Vincent et al., 2009, [6]). Cette étude a une application directe en glaciologie puis qu'elle fournit des nouvelles observations continues pour mieux comprendre et quantifier la dynamique du glacier à l'échelle intra-annuelle.

Le second objectif est la détermination des paramètres troposphériques à l'aplomb des différentes stations du glacier. Ces paramètres sont donc estimés pour les différentes altitudes (1121m, 2770m et 2835m). L'un de ces paramètres, le ZTD, est caractéristique de la troposphère entre la station considérée et la tropopause (limite supérieur de la troposphère) à l'aplomb de la station. Ainsi avec les hypothèses adéquates, en faisant la différence de ces ZTD pour ces trois altitudes, on tentera d'évaluer le ZTD différentiel des trois couches délimitées par les trois altitudes et la tropopause, et d'en exploiter la variabilité. L'interférométrie radar est sensible à la même grandeur (ZTD). Ainsi nous comparerons les ZTD observés par GPS avec un modèle météorologique global, ERA40, utilisé en interférométrie radar pour s'affranchir

de la variabilité troposphérique. Cette étude présente un double enjeu. Un enjeu atmosphérique puis qu'elle évalue les paramètres troposphériques d'une zone d'étude régionale et qu'elle peut ainsi valider la précision des modèles globaux à une telle petite échelle. L'autre enjeu est un enjeu en télédétection puisque cette étude tente de déterminer les ZTD avec une précision millimétrique pour pouvoir mieux corriger l'influence de la troposphère en interférométrie radar.

3 Les données GPS et leur analyse

Dans cette partie, nous présenterons dans un premier temps le réseau GPS utilisé. Ce réseau est composé de deux ensembles de stations : un réseau local composé de quatre stations situées sur le glacier et à proximité, et d'un réseau global constitué de stations de différents réseaux européens publiques. Dans un second temps nous présenterons le principe de l'analyse des données. Enfin, je présenterai les méthodes et les logiciels utilisés concrètement au cours de ce stage pour mesurer les positions et les paramètres troposphériques des stations sur le glacier d'Argentière.

3.1 La mesure GPS

Le réseau GPS du glacier d'Argentière

Station	Latitude	Longitude	Altitude	ERA40	Latitude	Longitude
ARGR	45.94650281	7.00483818	2835.3044	Point N-E	46.54176	7.8750
ARGG	45.94142347	7.00537766	2769.5936	Point N-O	46.54176	6.7500
ARGS	45.96133298	6.97538123	2440.5273	Point S-E	45.42028	7.8750
CHMX	45.92615519	6.87300025	1120.8033	Point S-O	45.42028	6.7500

FIGURE 2 : *Tableau répertoriant les coordonnées des 4 stations du réseau local et les points du maillage ERA40 utilisés*

Un réseau local Le réseau local est constitué de quatre stations GPS continues (voir 3). La station ARGG se trouve à 2770m d'altitude, proche de la ligne d'équilibre du glacier (entre la zone d'accumulation et la zone d'ablation). La deuxième, ARGS, se situe plus bas à 2441m d'altitude, et est séparée de la première par une chute de séracs. Les deux autres stations sont situées à proximité du glacier : l'une est située sur la roche proche du refuge d'Argentière à 2835m d'altitude (ARGR), et la seconde dans la vallée de Chamonix à 1121m d'altitude (CHMX).

Leurs coordonnées sont présentées par le tableau 2. Chaque station du réseau local est constituée d'une antenne, d'un récepteur et de batteries alimentées par des panneaux solaires. La station ARGG située sur le glacier en amont, a été la première installée fin février 2007 (jour julien 52). Son antenne a d'abord été montée directement sur le corner réflecteur du projet EFIDIR. Le corner réflecteur a pour objectif de bien situer l'image

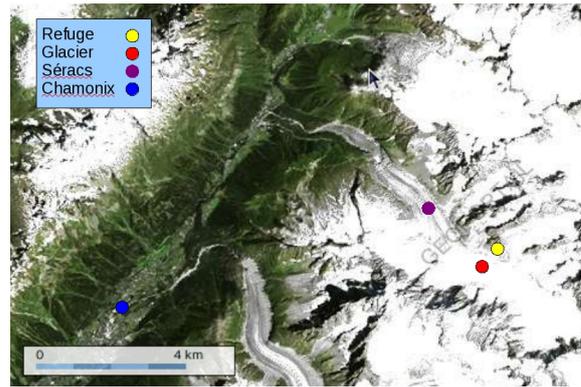


FIGURE 3 : Réseau GPS local du glacier d'Argentière

radar. Il a une forme conique. Il est conçu dans une matière reflétant fortement les signaux électromagnétiques émis par le satellite radar, ce qui se traduit par un point contrasté sur l'image radar. La station GPS a donc profité de cette armature. Toutefois il a fallu à de nombreuses reprises tourner ce corner réflecteur en direction du satellite radar, et donc la station GPS a changé de position à chaque fois. Pour palier ce problème il a été décidé de placer l'antenne GPS sur un mât de 5m de hauteur. Ce mât a été installé fin juillet 2008 (jour julien 205) à une dizaine de mètres du corner. Il a été réadapté une fois, fin septembre 2008 (jour julien 271). La station est alimentée par quatre panneaux solaires. Les batteries et le récepteur sont entreposés dans une caisse basée sur le glacier. Les stations ARGR (à côté du refuge du glacier d'Argentière) et CHMX (dans la vallée de Chamonix) ont toutes deux été installées fin juin de 2007 (jour julien 180). L'antenne de la station ARGR est directement fixée à la roche, et celle de la station CHMX est fixée sur le toit du collège de Chamonix. La station ARGGS, en dessous des séracs à 2441m, fut la dernière installée. Elle a été mise en place fin 2008. Elle présente le même dispositif expérimental que la station en amont, avec l'antenne sur un mât, mais pour cette station nous ne disposons que d'une faible quantité de données pour l'année 2008.

Difficultés de maintenance L'accès au glacier, que ce soit en été ou en hiver, n'est pas chose facile. En effet la montée de matériel ne peut se faire que de deux manières : à dos d'homme ou en hélicoptère. Transporter du matériel à dos d'homme ne permet pas de monter des objets lourds ou encombrants tels que des batteries ou des panneaux solaires. Dans ces cas là, il faut donc faire appel à un hélicoptère, toutefois celui-ci est coûteux, il n'est donc utilisé que en dernier recours. Toutes les missions destinées à rapatrier les données et à déneiger les panneaux solaires se font donc à pied ou à ski. J'ai eu la chance de participer à l'une d'elles. Un autre point est à souligner : la sécurité, tout le personnel permanent destiné (dans le cadre du projet EFIDIR) à travailler sur le glacier d'Argentière, a suivi une formation le préparant aux

dangers de la montagne. De plus toutes les missions se font au minimum à deux.

Le réseau global de l'étude Pour déterminer la position absolue d'une station, le calcul GPS estime dans un premier temps les positions relatives des stations du réseau entre elles. Ces distances s'appellent les lignes de base. Une fois ces lignes de base déterminées, on les fixe à un référentiel (le référentiel international ITRF : International Terrestrial Reference Frame, Altamimi et al., 2007 [1]) grâce à des stations de référence (les stations du réseau IGS), pour en déduire la position absolue de chaque station. Donc globalement, plus le nombre de lignes de base passant par une station est important plus la position de celle-ci sera connue précisément. C'est pour cette raison que nous avons sélectionné un grand nombre de stations à analyser simultanément.

Le réseau ici constitué regroupe des stations appartenant à 5 réseaux (voir la 4), le réseau local présenté précédemment et quatre réseaux européens qui présentent l'avantage d'un accès libre et gratuit aux données GPS. Ces quatre réseaux sont les réseaux IGS (<http://igs.ensg.ign.fr>), RGP (<http://rgp.ign.fr>), GAIN (<http://www.alps-gps.units.it>), et RENAG (<http://renag.unice.fr>).

L'étude GPS sur le glacier avait déjà commencé avant mon arrivée. Le réseau global avait déjà été sélectionné. Toutefois j'y ai intégré deux nouvelles stations, dont une du réseau local : la station ARG5. Au total 62 stations, autres que celles du réseau local, ont été sélectionnées. Les critères de sélection sont les suivants : il faut que le réseau soit le plus dense possible autour de la zone d'étude, que les positions des stations soient stables au cours du temps,

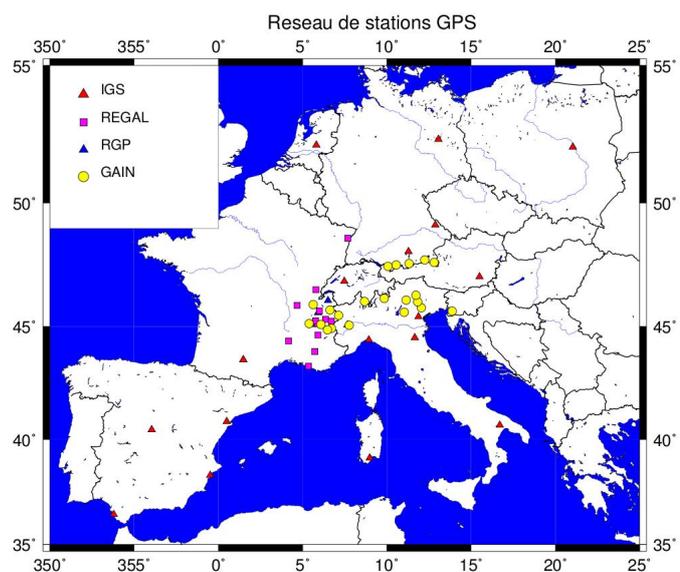


FIGURE 4 : Réseau GPS global utilisé

que les données soient accessibles et disponibles pour la période étudiée et que nous puissions les rapatrier via internet, que nous disposions d'un nombre suffisant de stations du réseau IGS pour fixer notre réseau au référentiel ITRF, car les positions de ces stations sont connues dans le référentiel ITRF. Sur les 62 stations sélectionnées, toutes ne sont pas opérationnelles pour toute la période d'étude, en moyenne seule une quarantaine de stations sont utilisées. Ceci est d'ailleurs préférable car les logiciels utilisés analysent les données de 55 stations au maximum. Le réseau ainsi constitué est donc la base des mesures qui seront traitées dans

cette étude.

L'analyse GPS Dans cette partie nous développerons uniquement la méthode utilisée par la communauté scientifique pour traiter les données GPS par une étude a posteriori, qui diffère de la méthode utilisée par les GPS portables (de randonnée ou de navigation) pour le positionnement en temps réel.

L'analyse GPS consiste à traiter les informations fournies par le signal électromagnétique émis par l'un des 32 satellites GPS en orbite au tour de la Terre et capté par la station au sol. Ce signal électromagnétique est émis sur deux fréquences porteuses L1 (1575,42 MHz) et L2 (1227,60 MHz).

La station et le satellite sont tous deux munis d'une horloge et génèrent simultanément le même signal (voir 5). Ainsi, lorsque le signal A émis par le satellite est capté par la station, il est comparé au signal B généré par celle-ci. Le signal A a parcouru la distance entre le satellite et la station avant d'être capté par celle-ci. Il sera donc décalé par rapport au signal B d'un temps t correspondant au temps de trajet du signal. Connaissant la vitesse de l'onde, si l'on arrive à mesurer ce temps de décalage on peut alors en déduire la distance entre le satellite et la station. Si cette distance est mesurée simultanément pour trois satellites dont on connaît la position, on peut en déduire la position de la station.

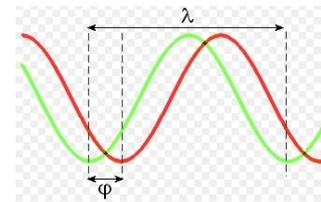


FIGURE 5 : Schéma du déphasage du signal électromagnétique émis par le satellite

Or nous ne mesurons pas directement ce temps de décalage t , mais plutôt le déphasage entre les deux signaux. Nous pouvons alors exprimer le temps de décalage t tel que :

$$t = (N + \phi) * T$$

ou T est la période du signal, N le nombre entier d'ondes séparant les deux signaux A et B. Il est aussi appelé ambiguïté. ϕ est le déphasage mesuré entre ces deux signaux. La seule grandeur mesurée étant le déphasage il est plus intéressant d'exprimer cette expression sous la forme :

$$\phi = t/T - N$$

Il nous faudra donc déterminer les ambiguïtés N , pour connaître le temps t (qui nous donne la distance parcourue).

Toutefois les ambiguïtés ne sont pas le seul paramètre dont il faudra s'affranchir. En effet trois autres sources majeures d'imprécisions viennent s'ajouter à la mesure : les erreurs d'horloge, les imprécisions d'orbite et l'atmosphère.

Les erreurs d'horloge Pour que la mesure GPS soit précise il faut que les horloges du satellite et de la station soient parfaitement synchronisées. Or, dans la pratique ceci est impossible. De plus si le satellite est équipé d'une horloge atomique, la station ne dispose que d'une horloge à quartz avec une précision moyenne (0,1 à 1 microseconde).

Les imprécisions d'orbite La solution la plus précise pour les orbites des satellites (2 cm) est transmises avec un retard de quinze jours sur le jour de la mesure. Des solutions moins précises sont disponibles plus rapidement, jusqu'aux orbites prédites disponibles en temps réel avec une précision de 200 m. La ré-estimation des orbites est optionnelle selon leurs précisions initiales.

L'influence de l'atmosphère : Lors de son trajet satellite-station, l'onde électromagnétique traverse l'atmosphère. Sa vitesse de phase diminue donc par rapport à celle qu'aurait cette onde dans le vide. On peut donc dire que l'atmosphère retarde le signal. Ce retard est directement représentatif de l'atmosphère traversée. Le signal électromagnétique va être perturbé par deux couches atmosphériques : l'ionosphère et la troposphère.

Si l'on prend en compte ces nouveaux paramètres l'expression du déphasage devient :

$$\phi = t/T - N + \Delta_{tropo}/T + \Delta_{iono}/T + \Delta O + \Delta H$$

Où Δ_{tropo} et Δ_{iono} représentent les retards provoqués par la troposphère et l'ionosphère. ΔO est le terme d'imprécision des orbites et ΔH le terme d'erreurs d'horloge.

On peut éliminer le terme ionosphérique au premier ordre en effectuant une combinaison linéaire des deux fréquences porteuses L1 et L2. On peut également éliminer les erreurs d'horloge avec la méthode des doubles différences.

La méthode des doubles différences consiste à utiliser deux satellites A et B et deux stations 1 et 2 (voir 6). On mesure le déphasage à un instant donné pour chaque couples satellite-station, soit ϕ_{A1} , ϕ_{A2} , ϕ_{B1} et ϕ_{B2} , puis on fait la double différence $\Delta\phi_{A,B,1,2}$ de ces quatre déphasages, soit :

$$\Delta\phi_{A,B,1,2} = \phi_{A1} - \phi_{A2} + (\phi_{B1} - \phi_{B2})$$

Les erreurs d'horloge s'annulent alors entre eux et l'équation devient :

$$\Delta\phi_{A,B,1,2} = (t_{A1} - t_{A2} - t_{B1} + t_{B2})/T + (N_{A1} + N_{A2} + N_{B1} + N_{B2}) + \Delta_{tropo}/T + \Delta O$$

Où t_{ij} et N_{ij} représentent respectivement les temps de décalage et les ambiguïtés associées entre les quatre couple satellite-station, Δ_{tropo} représente la somme des retards du à la troposphère et donc ΔO la somme des imprécisions liées aux orbites.

Ceci a donc permis d'éliminer les erreur liées au horloges, mais en contrepartie on ne peut maintenant déterminer la position d'une station qu'en fonction d'une autre. Ainsi les positions

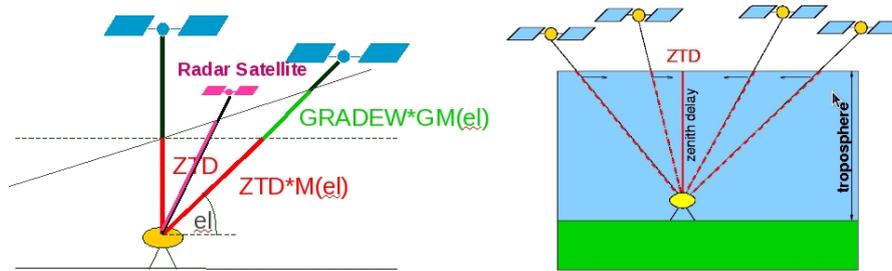


FIGURE 7 : Paramètres troposphériques estimés par l'analyse GPS

estimées de nos stations seront des positions relatives (lignes de base). Par la suite, il nous faudra les fixer par rapport à un référentiel.

Mais avant cela, il faut déterminer les paramètres N , Δ_{tropo} et ΔO , pour pouvoir trouver t et donc la position relative. Dans la pratique, nous estimons simultanément t et ces trois paramètres (moindres carrés et filtre de Kalman). Plus exactement les paramètres estimés seront les ambiguïtés N , les imprécisions d'orbites ΔO , les paramètres troposphériques et, dans un premier temps les lignes de base, puis dans un second temps les positions absolues.

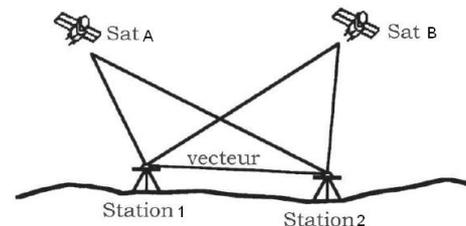


FIGURE 6 : Schéma présentant la double différence

Les paramètres troposphériques Les paramètres troposphériques estimés ici sont les délais zénithaux troposphériques (ZTD) et les gradients horizontaux associés.

Le délai zénithal troposphérique Nous avons vu que l'influence de l'atmosphère pouvait être perçue comme le retard du signal électromagnétique Δ_{tropo} par rapport au temps qu'il aurait mis pour le même trajet dans le vide. Si nous faisons l'hypothèse que l'atmosphère est stratifiée en couches homogènes horizontalement, à un instant t donné une station reçoit le signal de plusieurs satellites. Les signaux sont tous marqués par un retard Δ_{tropo} différent car celui-ci est lié à la longueur du chemin parcouru dans la troposphère, minimal au zénith, et maximal à 0 degré d'élévation (voir 3.1). Le délai zénithal troposphérique est alors définie (à un facteur multiplicatif près qu'est la vitesse de la lumière c) comme la moyenne de ces Δ_{tropo} projetés au zénith. Son unité est le mètre. Il est de l'ordre de 2,5m pour une station située au niveau de la mer.

Les gradients de délai Toutefois l'atmosphère n'est pas homogène horizontalement. Pour prendre en compte cette variation horizontale de l'atmosphère dans le modèle, nous pouvons introduire un paramètre que nous appellerons gradient. Plutôt que de considérer la stratification de la troposphère, en couches planes horizontales, on considère que la limite de ces couches peut être inclinée toujours avec une épaisseur et une densité linéairement variable (voir 3.1). Ainsi le gradient présente la correction des projections des Δ_{tropo} en fonction de l'angle d'azimut entre le Nord et la direction horizontale du satellite considéré. Autrement dit, il représente le retard supplémentaire induit par la variation latérale de la troposphère. Les différents paramètres à estimer étant définis, nous pouvons maintenant expliquer comment ils vont être estimés et avec quels outils informatiques.

3.2 L'analyse des données réalisées lors du stage au LGIT

Comme nous l'avons dit précédemment, la grandeur utilisée par une analyse GPS systématique est le déphasage. Dans cette partie nous allons voir comment avec ce déphasage, des modèles théoriques et une première estimation des paramètres à déterminer que nous appellerons paramètres a priori, nous allons pouvoir estimer ces paramètres avec une précision millimétrique.

Le principe général L'analyse des données est faite en deux étapes majeures : La détermination des paramètres cités précédemment avec le logiciel GAMIT, qui va conduire à la détermination des lignes de base et des paramètres troposphériques. L'autre étapes majeure est l'utilisation de GLOBK, un filtre de Kalman appliqué pour déterminer les positions par rapport au référentiel ITRF et les vitesses des différentes stations du réseau.

Une étape préliminaire à GAMIT est la conversion des données GPS brutes (format binaire propre à chaque type de récepteur). Les données brutes du déphasage doivent être converties en format RINEX (Receiver Independent Exchange Format, Gurtner and Estey, 2007) qui est le format standard utilisé en analyse GPS. Les fichiers peuvent alors être traités par les différents logiciels d'analyse GPS. Nous avons fait cette conversions avec le logiciel Teqc (Estey and Meertens, 1999). Ce logiciel présente l'avantage de répertorier la majorité des récepteurs utilisés. De plus il permet également une vérification des fichiers de données.

Le logiciel GAMIT GAMIT (Global positioning système At Massachusetts Institute of Technology) est un logiciel qui a été mis au point par le MIT (Herring et al., 2006 [4]). Il constitue un ensemble de routines de traitement GPS. La méthode utilisée pour déterminer les différents

paramètres est la minimisation par moindres carrés de la différence entre l'estimation théorique et la mesure des paramètres. Pour cela, il utilise quatre routines principales : MAKEX, MODEL, AUTOCLEAN et SOLVE et une section de contrôle où sont répertoriés les différents paramètres a priori. Les routines ont chacune une fonction bien spécifique.

La méthode des moindres carrés Le principe est le suivant. Soit un vecteur p contenant les paramètres a priori et la matrice T correspondant à la théorie. Le vecteur m contenant le modèle est défini de la manière suivante :

$$m = T.p$$

Ce vecteur m est alors comparé à un vecteur d contenant les données mesurées. Avec la méthode de moindres carrés, GAMIT détermine l'écart le plus faible entre le modèle et les données mesurées et en déduit ainsi la meilleure estimation des différents paramètres.

La section de contrôle Cette section de contrôle est divisée en trois parties. Les tables de paramètres standards, les tables propres à notre réseau de stations et les tables de paramétrage du calcul. Les tables des paramètres standards sont indépendantes du réseau étudié et peuvent être rapatriées via internet. Ces tables sont principalement les paramètres a priori d'orbite, de marée, d'orientation de la Terre, de surcharge océanique et atmosphérique et les fonctions de projections.

Les tables propres à notre réseau sont directement liées aux caractéristiques des stations étudiées et c'est à nous de les paramétrer. Ces tables sont au nombre de trois : la table concernant le matériel tel que les hauteurs d'antenne ou les récepteurs utilisés, mais aussi les dates où la station a été opérationnelle ; la table des positions a priori de chaque stations. Ces positions a priori sont nécessaires à l'estimation théorique des différents paramètres. Elles seront recalculées par GAMIT pour être déterminées précisément. Et enfin la table de rapatriement des données en format RINEX pour les stations des réseaux européens, via internet. Dans cette table, devront aussi être indiquées les stations dont les données sont fournies localement, comme par exemple pour les RINEX des stations de notre réseau local.

La section de contrôle contient également des paramètres du calcul. En effet, c'est dans cette section que nous déterminerons, entre autres, l'intervalle de temps entre le calcul de deux ZTD, le nombre de gradients associés ou si le modèle sera avec ou sans contraintes sur les positions et les vitesses. Si nous faisons le choix de contraindre notre réseau il nous faudra alors définir ces contraintes. Globalement dans cette étude, mise à part pour les deux stations sur le glacier qui évoluent rapidement, les vitesses des stations seront imposées nulles. Les contraintes sur les positions vont dépendre des paramètres que l'on veut déterminer et seront donc présentés

plus bas.

Les routines MAKEX est une routine qui réécrit les fichiers RINEX en format GAMIT. Une fois ce formatage fait ces fichiers vont être utilisés par la routine MODEL. Cette routine a pour fonction de créer le modèle théorique à partir des paramètres a priori et de calculer la différence entre celui-ci et les données mesurées. Cette différence va être traitée par la routine AUTOCLEAN. Celle-ci détermine la validité de chaque donnée et élimine ou corrige celles qui sont aberrantes. Enfin SOLVE est la routine qui minimise grâce à la méthode des moindres carrés la différence entre le modèle et la mesure en ajustant les paramètres libres du modèle : coordonnées, ZTD et ambiguïtés.

GLOBK Les paramètres obtenus par GAMIT et leur corrélation (matrice de covariance) vont être traités par le logiciel GLOBK pour déterminer les positions absolues et les vitesses moyennes des stations. Pour cela, GLOBK utilise un filtre de Kalman.

Le filtre de Kalman Le filtre de Kalman est un filtre de traitement du signal, l'une de ses utilisations est la détermination d'informations telles que la position ou la vitesse d'un objet à partir d'une série d'observations relative à sa position qui incluent les erreurs de mesure. Ce filtre est un estimateur récursif. Cela signifie que pour estimer l'état courant, seuls l'état précédent et les mesures actuelles sont nécessaires. Ce filtre nécessite donc deux variables : l'estimation de l'état à l'instant i et la matrice de covariance de l'erreur (une mesure de la précision de l'état estimé).

Le référentiel ITRF Pour déterminer des positions absolues, le filtre de Kalman minimise la différence mesurée des positions de certaines stations du réseaux, avec leurs positions bien connues en ITRF, ce qui a pour effet de fixer le réseau au référentiel de ces stations et donc de connaître précisément la position en ITRF de chaque stations du réseau. Ici, les stations ayant servi à fixer notre réseau sont celles du réseau IGS qui sont extrêmement bien contraintes dans le référentiel ITRF.

Ainsi nous pouvons déterminer précisément les positions en ITRF et les vitesses moyennes des stations du réseau.

Choix des paramètres du calcul Lors de cette étude nous avons utilisé GAMIT pour deux applications différentes. La première application est la détermination des séries temporelles de positionnement des stations de notre réseau local, autrement dit cela représente l'évolution des

SITE	FIX	--COORD.CONSTR.--	SITE	FIX	--COORD.CONSTR.--
	<< default	for regional stations >>		<< default	for regional stations >>
ALL	NNN	100. 100. 100.	ALL	NNN	100. 100. 100.
	<< IGS core	stations >>		<< IGS core	stations >>
VILL VILL_GPS	NNN	0.005 0.005 0.01	VILL VILL_GPS	NNN	0.5 0.5 0.5
MAS1 MAS1_GPS	NNN	0.005 0.005 0.01	MAS1 MAS1_GPS	NNN	0.5 0.5 0.5
etc ...			etc ...		

FIGURE 8 : Configuration du fichier *sittbl* : contraintes des stations IGS

positions Nord, Est et verticale des stations en fonction du temps. La seconde application est la détermination des paramètres troposphériques à l'aplomb de ces stations. La configuration du calcul n'a pas été la même pour ces deux applications.

Pour déterminer les séries temporelles de positionnement, j'ai configurés GAMIT avec de fortes contraintes sur les stations appartenant au réseau IGS, 5mm en coordonnées N et E et 1cm en coordonnée verticale (voir 3.2). Les contraintes sur les autres stations ont été plus lâches, 100m pour les trois composantes. Ce qui a permis une détermination des positions avec une précision millimétrique. J'ai calculé ces positions toutes les six heures pour l'ensemble des jours disponibles entre 2007 et 2008, ce qui représente quatre points par jour. Nous n'avons calculé qu'un ZTD toutes les deux heures et un gradient associé, car l'estimation de ceux-ci augment considérablement le temps de calcul et une estimation de plus de paramètres troposphériques dégrade la précision du positionnement. De plus les positions et surtout les vitesses n'étaient pas suffisamment précises pour assurer une bonne précision sur l'estimation du ZTD.

Une fois que j'ai estimé le positionnement des stations qui évoluent rapidement, telles que ARGG, j'ai déterminé les intervalles où nous pouvions considérer la vitesse linéaire et j'ai pu ainsi estimer les vitesses moyennes sur ces intervalles. Les positions précises et leur évolution ont pu être utilisées comme nouveaux paramètres a priori dans GAMIT, pour déterminer les paramètres troposphériques. La configuration du calcul a alors fait l'objet d'une étude, dans laquelle j'ai déterminé si contraindre le réseau pendant l'analyse induisait un biais systématique sur l'estimation des paramètres troposphériques par rapport à la même analyse avec un réseau libre. Cette étude a été menée pour deux configurations différentes sur les contraintes des stations IGS. L'une (configuration A) avec de fortes contraintes, 5mm sur les composantes N et E, et 1cm sur la composante verticale et une autre (configuration B) avec des contraintes plus lâches, 50cm pour les trois composantes (nous appellerons l'analyse sans contraintes configuration O). Ce qui a motivé cette étude est une autre étude menée par Hugues BRENOT au cours de sa thèse (Brenot, 2006) mettant en évidence que d'utiliser un réseau contraint pouvait induire un biais systématique sur la détermination des paramètres troposphériques. Toutefois ce biais n'est pas présent pour toutes les stations, et dépendant de la géométrie du

réseau. Comme ici nous étudions des paramètres troposphériques à l'aplomb d'une station qui se déplace avec une certaine vitesse, il a été préférable d'utiliser un réseau contraint avec des contraintes toutes relativement lâches.

L'étude a été menée pour la station ARGG, le jour 185 de 2007. Nous avons déterminé un ZTD toutes les 15min et 13 gradients associés. Les ZTD ont été calculés sur des sessions de 6h toutes les trois. Ce qui fait un recouvrement d'une heure et demi entre deux sessions successives, autrement dit les sessions se chevauchent. Ceci a permis d'éliminer les 6 ZTD en début et fin de sessions qui sont jugés non valables car altérés par des effets de bord lors du réajustement par moindre carrés. Cette méthode est appelée Sliding windows (ou fenêtre glissante).

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 9. On observe que globalement les trois études sont bien corrélées et qu'il n'apparaît pas de biais systématique, même pour le modèle fortement contraint, on peut donc valider l'utilisation d'une configuration contrainte avec des contraintes de 50cm sur les trois composantes pour les stations IGS.

Ainsi cette configuration a été utilisée pour déterminer les paramètres troposphériques à l'aplomb de trois de stations ARGG, ARGR et CHMX du réseau local sur tous les intervalles avec une vitesse considérée linéaire intervalle par intervalle sur les deux années d'études.

Cette partie nous aura donc permis de mieux comprendre quelles sont les démarches et les outils utiles à la mise en place d'un réseau GPS et de l'analyse de celui-ci. Nous soulignerons que les logiciels utilisés, même si ils sont bien pensés nécessitent beaucoup de vigilance, mais qu'ils permettent d'obtenir des résultats avec une grande précision. Ces résultats vont pouvoir être exploités et interprétés.

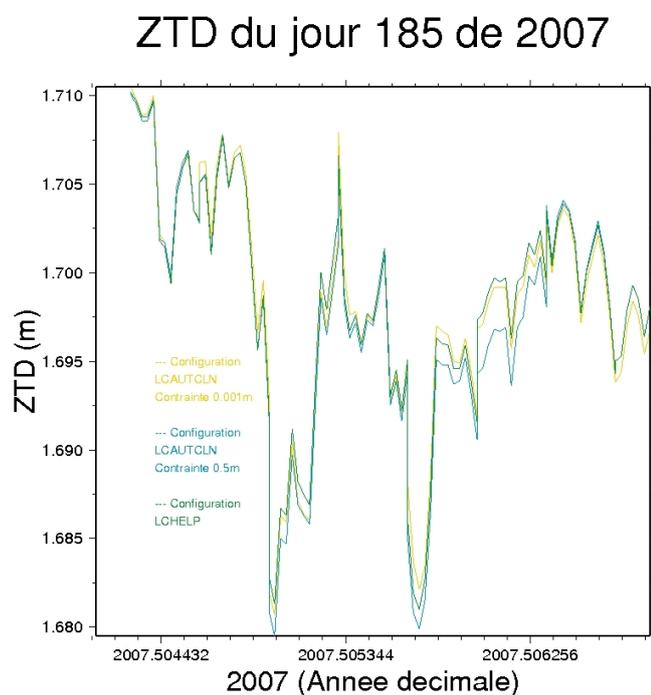


FIGURE 9 : Comparaison du modèle avec les différentes options de contraintes (LC – AUTCLN/LC – HELP)

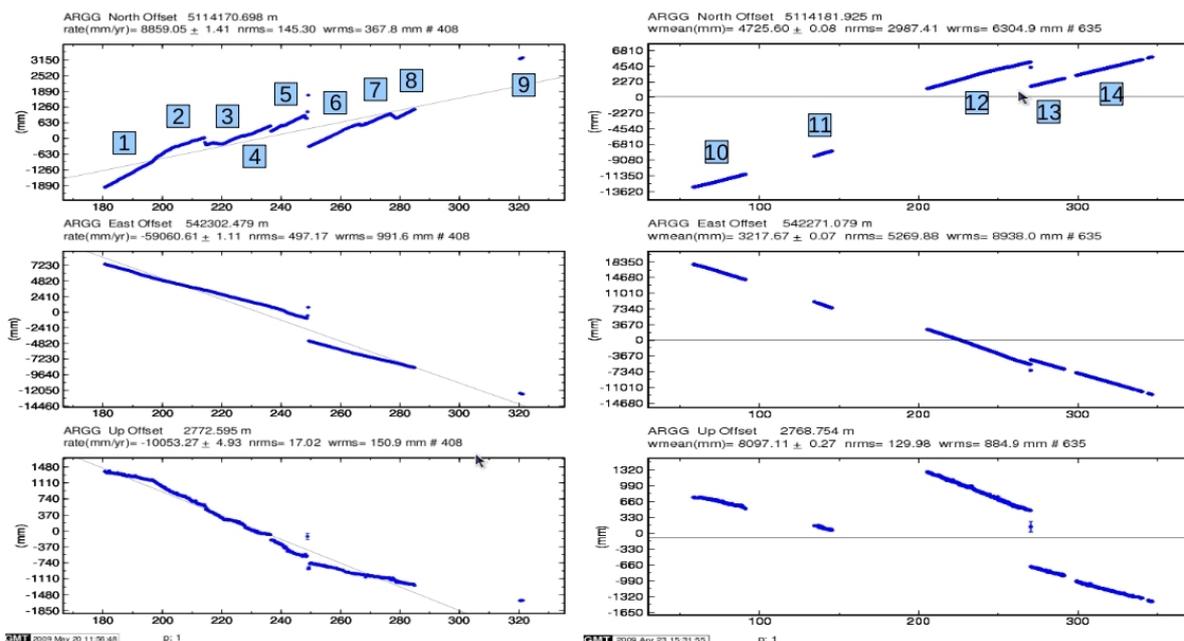


FIGURE 10 : Séries temporelles de positionnement de la station ARGG entre 2007 (à gauche) et 2008 (à droite) suivant les trois composantes Nord, Est et verticale

4 La dynamique du glacier d'Argentièrè

L'un des principaux objectifs de ce stage est de montrer et de quantifier certains indicateurs de la dynamique du glacier. Pour cela comme nous l'avons expliqué précédemment, nous avons constitué un réseau GPS qui comprend entre autres, deux stations sur le glacier. Ces deux stations vont nous permettre de visualiser et de quantifier les mouvements du glacier en deux points, l'un proche des séracs et l'autre, plus en amont sur le glacier au niveau du refuge.

4.1 Les variations temporelles du positionnement

Intervalles continus et sauts dans les séries temporelles La station en amont du glacier (ARGG) possède un grand nombre de données disponibles puisqu'elle est la première station à avoir été installée sur le glacier. En effet, nous disposons de données pour les années 2007, 2008 et début 2009. Comme je l'ai dit précédemment, durant ce stage je n'ai traité que les données de 2007 et 2008, les données de 2009 n'étant pas encore disponibles lors du traitement des données. Nous visualisons sur la figure 4.1 les séries temporelles en positionnement suivant les composantes Nord, Est et verticale, pour ces deux années. Le déplacement dominant représenté ici est bien dans le sens de plus grande pente du glacier (du Sud-Est vers le Nord-Ouest), puisque la composante Nord de la position augmente et les composantes Est et verticale diminuent. De plus on remarque que les séries temporelles de positionnement

sont constituées d'intervalles quasi-linéaires (numérotés sur la figure) entrecoupés de sauts brusques et de périodes sans mesures. Ces sauts et ces manques de mesures ne sont pas représentatifs du déplacement du glacier, mais plutôt de la difficulté à maintenir le dispositif expérimental sur le glacier. En effet, les panneaux solaires qui alimentent les batteries qui, elles-même alimentent le récepteur GPS, ont été ensevelis sous la neige à de nombreuses reprises et déneigés lors des missions de maintenance sur le glacier, ce qui explique les interruptions de mesures. De plus, comme nous l'avons déjà expliqué, la station GPS a été déplacée plusieurs fois, car, au début celle-ci était placée sur le corner réflecteur radar, or celui-ci devait être régulièrement re-orienté en direction du satellite. Ainsi nous voyons un déplacement systématique entre les intervalles 2 et 8 représenté par la succession de petits sauts. Ceux-ci sont bien synchronisés avec les premières missions ayant pour but de réorienter le corner. Nous remarquons qu'entre l'intervalle 5 et 6 la hauteur du coin du corner supportant l'antenne GPS a été réajustée. Par la suite, la station GPS a été installée sur un mât indépendant. Nous observons deux sauts importants sur les trois composantes en début et fin de l'intervalle 12. Ces sauts correspondent au réajustement de ce mât.

Les vitesses moyennes de déplacement pour les intervalles continus Dans un premier temps, nous nous intéresserons donc uniquement aux intervalles quasi-linéaires réellement représentatifs de la dynamique en surface du glacier. J'ai calculé la vitesse moyenne pour chaque intervalle. Ces vitesses moyennes sont répertoriées dans le tableau 11. On observe que ces vitesses varient : Pour la composante Nord, entre 4,8 cm par jour (mi-août 2007) et 6,8 cm par jour (mi-mai 2008). Pour la composante Est, entre 10,7 cm par jour (début octobre 2008) et 15,65 cm par jour (fin août 2007).

Pour la composante en altitude, entre 0,72 cm par jour (début mars 2007) et 3,7 cm par jour (fin août 2008). On peut faire une première estimation de la composante linéaire de la vitesse de la station sur deux ans en

n°	Intervalles	rate N	rate E	rate U
1	180-195	6,48	-13,33	-1,25
2	196-213	5,19	-10,85	-3,35
3	221-226	5,09	-11,82	-1,82
4	228-235	4,78	-10,95	-2,02
5	237-247	5,37	-15,65	-3,74
6	250-265	5,53	-12,51	-1,68
7	267-276	5	-10,83	-0,99
8	279-284	5,91	-12	-1,29
9	320-321	5,65	-11,43	-1,16

n°	Intervalles	rate N	rate E	rate U
10	58-91	5,77	-11,27	-0,72
11	134-145	6,83	-13,54	-1,03
12	205-269	5,99	-13,06	-1,29
13	271-291	5,5	-10,7	-0,88
14	298-346	5,57	-10,75	-0,9

Estimation des vitesses moyennes				
Années	Rate N	Rate E	Rate U	Rate tot
2007	5,52	12,46	1,95	13,77
2008	5,83	11,86	1,01	13,25
2007-08	5,74	12,05	1,31	13,41

FIGURE 11 : Tableau récapitulant les vitesses moyennes en cm par jour pour chaque intervalle de calcul en jours juliens et estimation des vitesses annuelles

pondérant ces vitesses moyennes par le nombre de jours de l'intervalle puis en calculant la moyenne de celles-ci. Cette estimation de vitesse totale moyenne est de 13,4cm par jour, soit

49m par an. On remarque (11) que le module de la vitesse moyenne sur un an varie peu entre les deux années puisqu'il ne diffère que de 5,2 mm par jour au maximum. Cette première estimation de la vitesse est donc en accord avec les vitesses en surface mesurées annuellement sur le glacier d'Argentière (Vincent et al., 2009, [6]). Celles-ci étant de 50m par an pour les deux années considérées.

Le réajustement des séries temporelles Pour visualiser le déplacement réel du glacier, il nous faut nous affranchir des sauts répertoriés précédemment.

Or ceux-ci n'ont pas été quantifiés lors des missions de maintenance. J'ai donc dû les estimer, la méthode utilisée est illustrée sur la figure 12.

J'ai tout d'abord calculé les régressions linéaires de chaque intervalle (représentées par les droites rouges sur la figure), puis le jour j_m moyen entre deux intervalles. J'ai déterminé les ordonnées p_m et p_n correspondantes à ce jour moyen pour chaque régression. Puis la différence d entre celle-ci. Le saut est donc estimé par cette distance d . J'ai ensuite soustrait cette distance aux mesures de l'intervalle suivant le saut. J'ai répété l'opération pour chaque couple d'intervalles. J'ai ainsi obtenu les séries temporelles de positionnement réajustées, présentées par la figure 4.1.

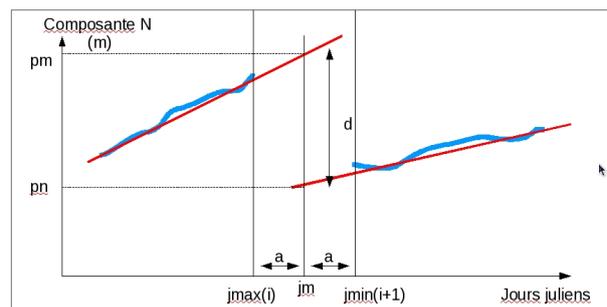


FIGURE 12 : Schéma expliquant la méthode de réajustement choisie pour s'affranchir des sauts dans les séries temporelles de positionnement

Validation des réajustements La figure 4.1 présente donc les séries temporelles de positionnement réajustées sur deux ans pour les trois composantes. Au premier ordre, on observe un déplacement linéaire. Celui-ci peut être visualisé par la régression linéaire sur deux ans (courbe rouge sur la figure). De cette régression, on peut déduire la composante linéaire de la vitesse de déplacement (représentée par la pente) du glacier sur les deux années 2007 et 2008. Les composantes linéaires des vitesses de surface pour les trois composantes Nord, Est et verticale sont : 5,77 cm par jour pour la composante Nord, 12,22 cm par jour pour la composante Est, 1,52 cm par jour pour la composante verticale. Ce qui correspond à un module de la vitesse totale de 13,59 cm par jour. On remarque que cette vitesse ne diffère que de 2mm de l'estimation de la vitesse totale calculée précédemment, ce qui tend à valider les réajustements des sauts.

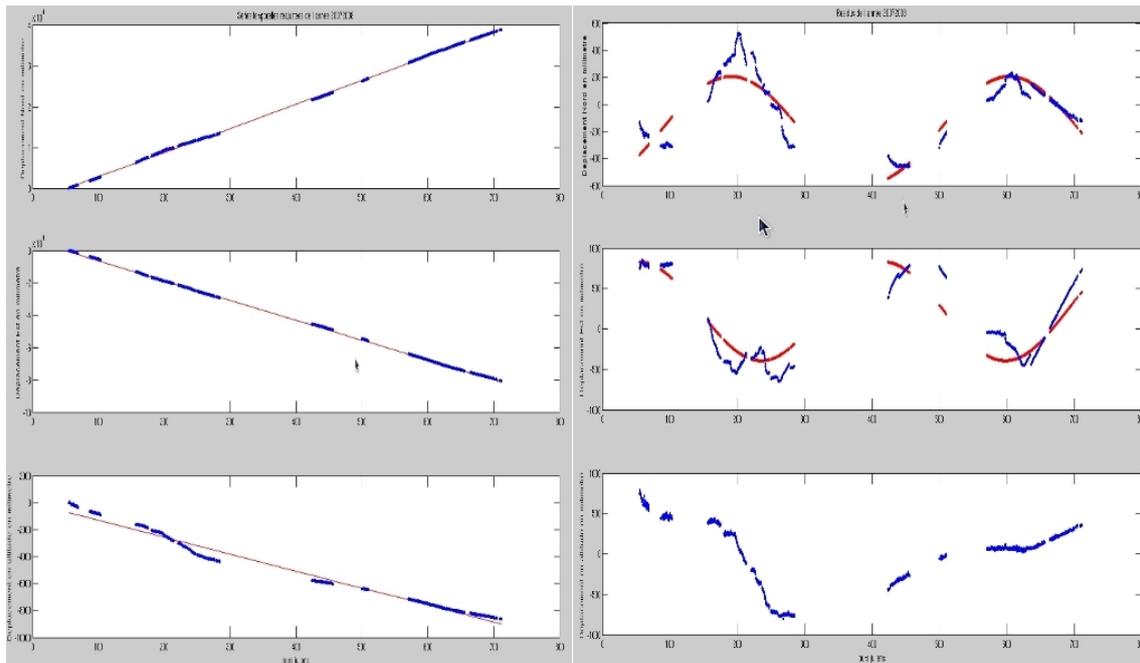


FIGURE 13 : *Séries temporelles de positionnement réajustés (à gauche) et ses résidus (à droite) (les deux sont représentés par la courbe bleu) entre 2007 et 2008), la droite (à gauche) et la sinusoïde (à droite) en rouge sont respectivement les régressions linéaire et sinusoïdale de ces séries temporelles*

La composante saisonnière de la vitesse de déplacement Il est intéressant de calculer les résidus des déplacements par rapport à la régression linéaire calculée après le réajustement des sauts, pour observer les variations de déplacement d'ordre supérieur. Ces résidus sont représentés sur la figure 4.1. Celle-ci présente les résidus sur les deux années d'études pour les trois composantes. On observe nettement une tendance sinusoïdale pour les composantes Nord et Est. On peut supposer qu'elles représentent les variations saisonnières. J'ai donc calculé une régression sinusoïdale pour ces deux composantes. Les périodes de ces sinusoïdes sont respectivement de 413 et 362 jours pour les composantes Nord et Est. Ces périodes sont donc proches de la durée d'une année. On peut expliquer une plus forte imprécision sur la période pour la composante Nord par le fait que celle-ci présente une variation de déplacement moins important que la composante Est, qui est elle plus précise. En effet un déplacement plus important permet une meilleur mise en évidence des variations de ce déplacement. De plus on observe que ces deux sinusoïdes sont relativement en phase mais inversées l'une par rapport à l'autre. Ceci s'explique simplement par le fait que l'axe des ordonnées de la composante Est est négatif pour un déplacement qui se fait de l'Est vers l'Ouest comme c'est le cas ici, les déplacements de cette composante sont donc inversés. On peut déduire de ces résultats que le déplacement est plus important en juillet août (les extrema sont respectivement aux jours

julien 191 et 236 de 2007 pour les composantes Nord est Est) et moins important en février (les extrema sont respectivement aux jours 33 et 52 de 2008 pour les composantes Nord et Est). On peut donc déduire que ces variations sont les variations saisonnières du déplacement du glacier, menant à des vitesses plus importantes en été qu'en hiver.

Toutefois, l'amplitude du signal annuel des résidus est de l'ordre de 1m (781 mm pour les extrema de la sinusoïde) pour la composante Nord et de 1,6m (1225 mm pour les extrema de la sinusoïde) pour la composante Est, ce qui représente une variation de l'ordre de 4 à 5 pour cent par rapport au déplacement annuel total (3 pour cent pour les valeurs de la sinusoïde).

La variabilité saisonnière du déplacement en surface sur les glaciers du massif du Mont Blanc, et plus précisément sur le glacier d'Argentière, n'a jamais été aussi clairement mise en évidence par des mesures. Ceci s'explique par la présence d'un grand nombre de données au cours de l'année. Les campagnes GPS annuelles menées en parallèle par le LGGE (Vincent et al., 2009, [6]) ont pour objectif d'étudier l'évolution du glacier d'année en année, en vue d'une étude sur des périodes plus importantes. Elles sont donc réalisées sur une même courte période (en septembre) tous les ans et ne permettent donc pas de mettre en évidence cette variabilité saisonnière.

Les limites de la mesure La composante verticale des résidus ne met pas clairement en évidence la variabilité saisonnière. Ceci peut s'expliquer de différentes manières. Les variations du déplacement vertical sont également liées au relief sous le glacier (bedrock). Il en résulte que la composante verticale n'est pas forcément le reflet de la dynamique au sein du glacier mais aussi du relief. Une autre explication est que le rapport des résidus sur le déplacement total annuel est de 40 pour cent, autrement dit l'ordre de grandeur des résidus est proche de celui du déplacement total, il est donc compréhensible que les résidus ne soient plus représentatifs de la variations saisonnière puis que l'on atteint les limites de la résolutions sur la composante linéaire du déplacement. Pour améliorer ces mesures il faudrait un plus grand nombre de données, avec une meilleure continuité, s'étalant sur un plus grand nombre années.

4.2 Les variations spatiales du positionnement

Les séries temporelles de positionnement d'ARGS La station ARGS située proches des séracs n'a été mise en place que tardivement en 2008, c'est pour cette raison que nous ne disposons de données que pour une courte période de 14 jours entre fin octobre et début novembre pour cette année 2008 (du jours julien 299 au jours 313). Toutefois ces données sont

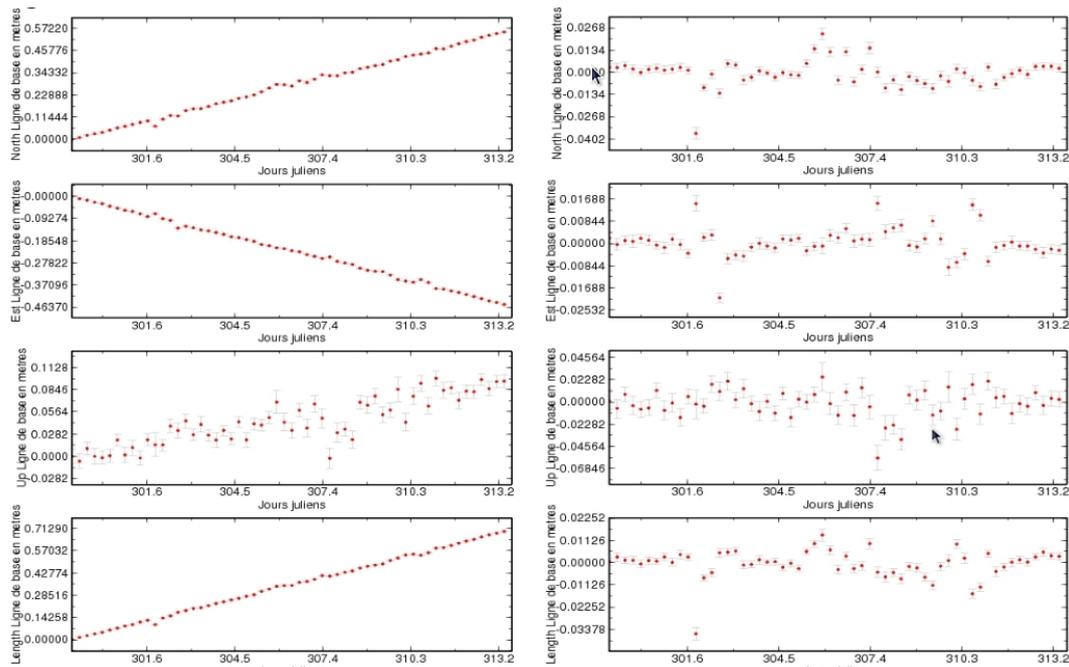


FIGURE 14 : Lignes de bases et leurs résidus entre les jours juliens 299 et 313 de 2008 sur les trois composantes Nord, Est et verticale, entre les stasios ARGG et ARGR

continues et de bonne qualité. Ici aussi, le déplacement du glacier peut être considéré linéaire sur l'intervalle étudié, ce qui correspond à une vitesse constante. Toutefois cette vitesse est beaucoup plus élevée que celle de la station en amont, ARGG. En effet celle-ci est de 9,45 cm par jour pour la composante Nord, de 13,84 pour la composante Est et de 0,30 pour la composante verticale, ce qui correspond à un module de la vitesse moyenne totale de 16,76cm par jour. Le module de vitesse moyenne totale de la station ARGG sur cette intervalle est 12,1cm par jour, soit 1,3 fois moins élevé que celui de la station ARGS. Ainsi la glacier va nettement plus vite en aval qu'en amont, ceci est normal puisque la température diminue avec l'altitude, ce qui a pour effet d'accentuer les mécanismes de déplacement du glacier tels que le glissement sous glaciaire et la déformation visqueuse. Il peut être également intéressant d'observer l'évolution de la ligne de base (distance inter-station) entre la station ARGG et ARGS. L'évolution temporelle des différentes composantes de la ligne de base et la distance totale les séparent sont présentées par la figure 4.2. On peut encore une fois voir que la stations ARGS s'éloigne avec une vitesse relativement constante de la station ARGG. Si l'on observe les résidus du déplacement par rapport à ce déplacement constant (4.2), on observe que ceux-ci n'excedent pas 2 cm, ce qui correspond à 3% du déplacement total sur les 14 jours, on peut donc considéré que la station ARGS s'éloigne avec une vitesse constante de 4,65 cm par jour de la station ARGG.

Corrélation des vitesses moyennes avec l'étude annuelle Le laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement (LGGE) étudie annuellement le glacier d'Argentière et analyse ainsi l'évolution des paramètres physiques de celui (C.Vincent et al. 2009, [6]). Cette étude est entre autres, constituée de campagnes successives faites septembre depuis 1975, et équipée d'un système GPS depuis 2000. Elle a pour objectif de mesurer différents paramètres du glaciers, tels que l'altitude depuis 1950. Lors de cette étude les vitesses moyennes annuelles sont estimées pour trois sections du glacier : la section 7 à 2730m, la section 4 à 2400m et la section 2 à 1800m.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 22. Même si cette étude met en évidence les variations d'amplitude et de vitesse sur plus d'un demi siècle et donc à une échelle de temps bien supérieure à la nôtre, les mesures ont été faites sur des périodes et des zones très proches des nôtres. Elles vont donc nous permettre de valider l'ordre de grandeur de nos mesures. En effet la station ARGG, située à 2770m est proche de la section 7, nous estimons le déplacement moyen annuel de celle-ci à 49 m par an. Vincent et al., 2009, [6] a estimé qu'en 2007 et 2008 celui-ci été d'environ 50m par ans. Les résultats sont donc bien cohérents.

La station ARGS qui est à une altitude de 2441m et donc proche de la section 4 présente une vitesse moyenne (pour la période de fin octobre début novembre 2008) de 60 m par an. la vitesse moyenne mesurée par le LGGE est de 75m par an, une fois encore les données semblent bien cohérents.

Ainsi dans cette partie nous avons pu visualiser et quantifier le déplacement de surface de deux stations sur le glacier d'Argentière : ARGG et ARGS. L'analyse de ces déplacements pour la station ARGG a permit de mettre en évidence la composante saisonnière de la vitesse sur le glacier et de la quantifier. De plus nous avons mesurer la nette différence de vitesse entre les deux stations, et donc des deux zones étudiées. Enfin nous avons pu corrélér ces résultats avec les mesures annuelles faites par le LGGE.

5 L'estimation des paramètres troposphériques

Le second objectif de ce stage a été l'estimation des paramètres troposphériques dans l'analyse des données GPS, l'étude de la variabilité temporelle de ces paramètres, ainsi que la variation de ceux-ci avec l'altitude. Enfin de faire la corrélation et la validations des paramètres théoriques calculés par un modèle météorologique global ERA40 avec les paramètres estimés par analyse GPS. L'application principale est la correction troposphérique en interférométrie.

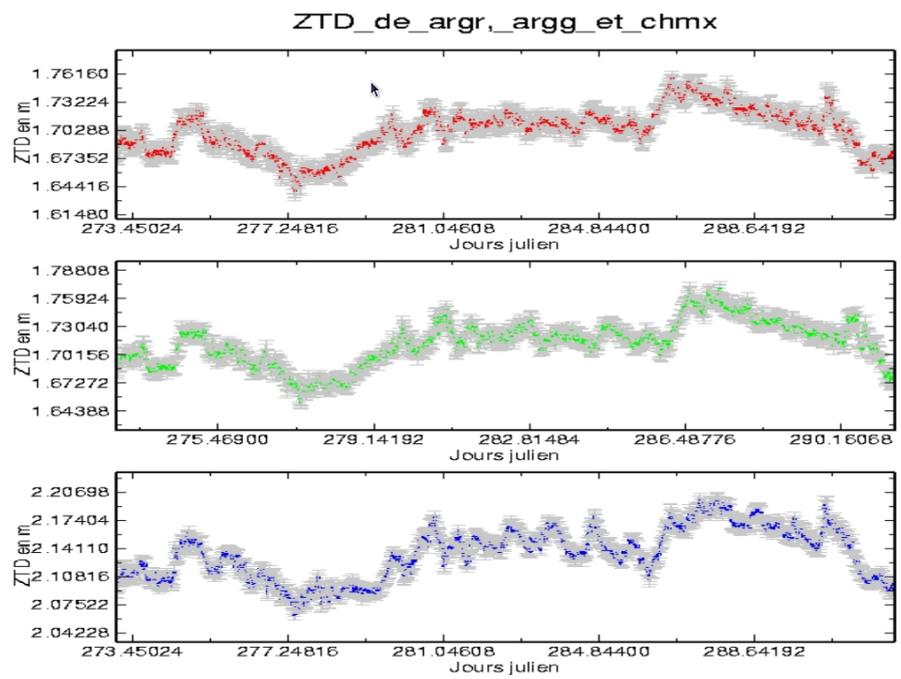


FIGURE 15 : Valeurs des ZTD à l'aplomb de trois stations, ARGR en rouge, ARGG en vert, et CHMX en bleu, entre le jour 273 et 291 de 2008

5.1 Les variations des paramètres troposphériques

Le principe général Comme nous l'avons vu précédemment, au cours de cette étude j'ai pu, grâce au logiciel GAMIT estimer les deux paramètres troposphériques que sont le délai zénithal troposphérique (ZTD) et les gradients associés.

A l'heure actuelle de mon stage je n'ai pu analyser que le ZTD qui est la principale grandeur considérée pour s'affranchir de l'influence de l'atmosphère sur les différents outils de télédétection tels que le GPS ou le radar. La suite de cette partie présente l'analyse de ces ZTD et leur interprétation.

Le délai zénithal troposphérique des différentes stations Les ZTD ont été ici estimés pour les trois stations, ARGG, ARGR et CHMX, pour les différents intervalles de temps où les vitesses moyennes de déplacement ont pu être calculées (voir le tableau 11).

Ces ZTD sont présentés, pour un intervalle de temps choisi, ici du jour 273 au jour 291 de l'année 2008, sur la figure 5.1. Le premier graphique représente le ZTD à l'aplomb de la station ARGR, le second, le ZTD à l'aplomb de la station ARGG et le dernier le ZTD à l'aplomb de la station CHMX. On observe que ceux-ci suivent la même tendance sur l'intervalle étudié, mais avec une amplitude et une variabilité différente. En effet chaque station présente une forte variabilité (10 cm d'un extremum à l'autre pour la station ARGR, soit 6 pour cent par rapport

à la valeur moyenne du ZTD de 1,7m). Cette variabilité peut avoir deux causes majeures : les variations d'humidité (petite échelle) et les variations de pressions (grande échelle). Toutefois, si l'on considère que l'atmosphère est stratifiée en couches homogènes, on peut supposer que les différences d'amplitudes des ZTD entre les trois stations sont alors directement liées à l'altitude. Ceci est normal puisque le ZTD est représentatif de la quantité d'air entre la station et la tropopause. On comprend que plus on est haut, et donc plus on se rapproche de la tropopause, moins cette quantité sera importante. La variabilité des ZTD à une altitude donnée est donc un paramètre difficile à évaluer précisément.

5.2 Le délai zénithal troposphérique différentiel

Au cours de cette étude, nous considérons un réseau de trois stations à trois altitudes différentes (voir la figure 16). La première CHMX à une altitude de 1121m, la seconde ARGG à 2770m et enfin la plus haute, ARGR à 2835m.

Pour comprendre comment varie le ZTD en fonction de l'altitude, j'ai considéré l'atmosphère en trois couches délimitées par ces trois altitudes. La plus basse entre la station CHMX et ARGG, la seconde entre ARGG et ARGR et enfin la plus haute entre ARGR et la tropopause. Si comme précédemment on fait l'hypothèse que l'atmosphère est stratifiée en couches homogènes horizontalement, on peut estimer le ZTD de chaque couche en calculant la différence entre les ZTD des différentes stations. Une étude similaire a été menée sur le puits de Dôme par J. Van Baelen et al., 2008 [5]).

Ces ZTD différentiels sont présentés par la figure 17. Ceux-ci ont été calculés pour tous les intervalles linéaires disponibles cités précédemment. J'ai choisi de présenter ici les ZTD différentiels de l'intervalle compris entre les jours 273 et 291 de 2008 car pendant cet intervalle il y a eu deux survols du satellite radar TerraSAR-X (représentés sur les graphiques par les traits noirs verticaux). Les mesures de cet intervalle présentent donc un intérêt particulier pour l'étude de l'influence de la troposphère sur l'interférométrie radar, cet aspect est développé dans la partie (Les perspectives dans l'interférométrie radar 5.3). Ainsi les résultats présentés ci-après ont contribué à l'élaboration d'un article regroupant différentes équipes du projet EFIDIR, qui est en cours de publication.

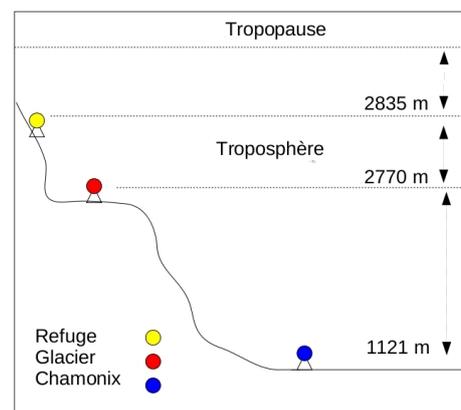


FIGURE 16 : Schéma présentant la différence d'altitude entre les trois stations, ARGG à 2835m, ARGG à 2770m et CHMX à 1121m

On observe, pour l'intervalle considéré, que le ZTD est de l'ordre de 1,7m dans la couche supérieure de la troposphère (d'environ 7 km d'épaisseur) avec une différence de 10 cm entre les extrema. Le ZTD de la couche intermédiaire est lui de l'ordre du centimètre. Ceci s'explique par l'épaisseur de cette couche qui n'est que de 65m, toutefois celui-ci n'est pas négligeable et met en évidence le fort taux d'humidité relatif dans les premiers mètres à l'aplomb du glacier. Enfin la couche la plus basse d'une épaisseur de 1,5km, est située dans la couche limite de la troposphère. Le ZTD de celle-ci est de 42 cm avec une différence des extrema de 7cm. Les fortes amplitudes et variabilités de cette couche s'expliquent par le fait que la vapeur d'eau est plus concentrée dans les couches les plus basses de la troposphère.

On peut également observer que pour les trois couches les ZTD ont une variation journalière. De plus, de fortes variations rapides comme celle entre le jour 286 et 287 apparaissent clairement sur la couche basse et la couche haute. Ces fortes variations peuvent généralement être corrélées avec des événements météorologiques violents, comme une forte chute de neige. Mais si l'on considère des intervalles de temps plus longs, les ZTD des deux couches ne varient pas de la même manière, comme par exemple entre le jour 287 et 29. Hormis les variations journalières, les ZTD restent relativement constants pour la couche basse, et décroissent dans la couche supérieure. Cette observation montre la variabilité de la troposphère avec l'altitude.

5.3 Les perspectives dans l'interférométrie radar

Le principe général L'interférométrie radar, comme le GPS est basée sur l'interprétation d'un signal électromagnétique émis par un satellite. Dans le cadre du projet EFIDIR les satellites utilisés sont le satellite TerraSAR-X pour la période 2007 2009 et le satellite Radarsat pour la période 2009.

Pour former une image, l'antenne radar émet des impulsions micro-ondes vers une cible et détecte l'énergie renvoyée par cette cible dans cette direction. Le radar enregistre ainsi l'intensité de l'impulsion retour qui traduit les propriétés physiques de la cible et la phase de l'onde retour. De cette phase on déduit le temps de trajet aller-retour et donc la distance radar-cible. Tout comme le GPS cette phase est sensible à l'atmosphère, mais contrairement à la mesure GPS, le radar ne dispose pas de plusieurs satellites pour s'en affranchir.

Le satellite fait plusieurs survols de la zone d'étude et génère ainsi plusieurs images, ou plutôt plusieurs mesures de phase. L'interférométrie consiste à calculer la différence entre les phases d'une image radar pour deux survols différents. Dans notre cas les survols satellitaires radar sont espacés de 11 jours, leur but étant de mettre en évidence les mouvements du sol. Après s'être affranchi des différences d'orbite, de la topographie et de la troposphère, cette différence

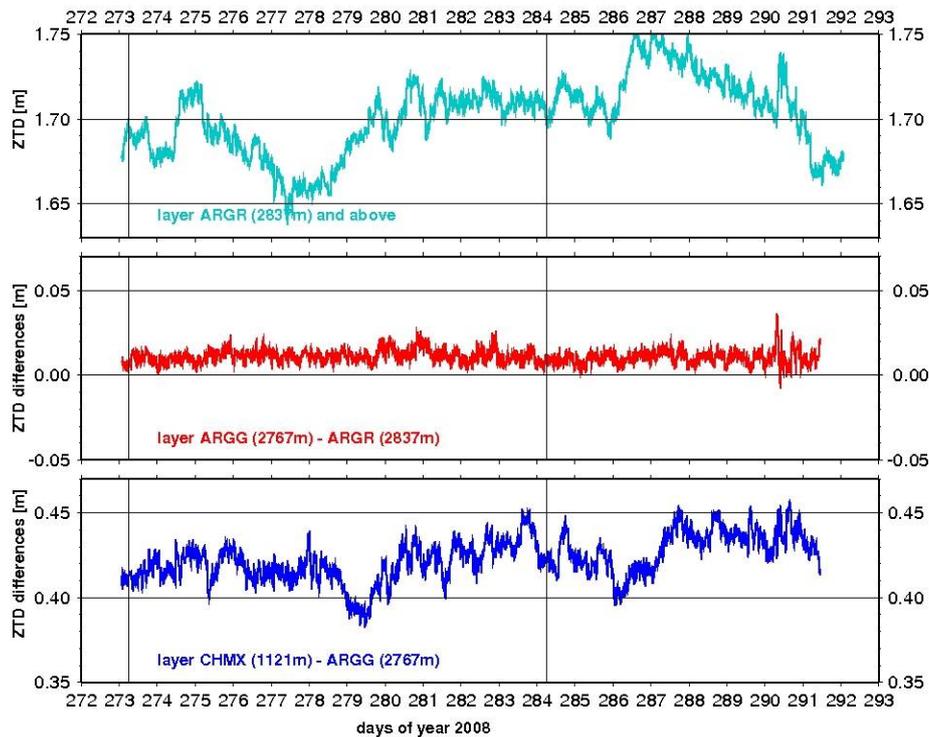


FIGURE 17 : ZTD différentiels pour les différentes couches troposphériques interstation entre le jour 273 et 291 de 2008. En vert est représenté le ZTD à l'aplomb de la station ARGR, en rouge est représentée la différence entre le ZTD de ARGR et celui de ARGG et en bleu est représentée la différence entre le ZTD de ARGG et de CHMX, les traits noirs verticaux représentent les passages du satellite radar TerraSAR-X

de phase, aussi appelée interférogramme, traduit les déplacements du sol. Pour s'affranchir de la troposphère, l'étude radar utilise plusieurs méthodes : La comparaison phase-topographie, qui observe une corrélation entre la phase et la variation en altitude du relief. Cette corrélation est de l'influence de la troposphère sur la phase. Toutefois cette méthode suppose une troposphère homogène et est moins efficace si l'atmosphère connaît de fortes variations. Elle peut aussi faire appel aux modèles météorologiques, comme le modèle ERA40 que je présenterai par la suite. Ces modèles, qui font également l'hypothèse que l'atmosphère est stratifiée de façon homogène, présentent une bonne estimation du ZTD dans le cas d'une étude globale. Nous discuterons de leur fiabilité pour des études sur des zones plus locales et accentuées, comme le glacier d'Argentière. Le programme EFIDIR utilise deux modèles météorologiques, le modèle NARR, centré sur le Mexique et le modèle ERA40, qui lui étudie les paramètres météorologiques sur l'ensemble de la Terre. Nous nous intéresserons donc à ce second modèle qui peut être appliqué au glacier d'Argentière.

Le modèle météorologique ERA40 Le modèle ERA40 fait l'analyse de l'atmosphère et des conditions de surface. Cette étude sera réalisée sur 40 ans, elle a vu le jour en août 2002. Elle s'appuie sur de nombreuses sources d'observations météorologiques telles que le radiosondage et les études satellitaires variées des paramètres troposphériques. Ses objectifs sont :

De promouvoir l'utilisation des analyses globales de l'état de l'atmosphère, des terres et des conditions de surface. De constituer des séries homogènes d'analyses du modèle sur quarante ans, pour l'ensemble du globe. Ce modèle présente deux avantages majeurs. Il est gratuit et couvre l'ensemble du globe. C'est pour ces raisons que le projet EFIDIR l'a choisi. Ce modèle permet d'estimer 154 variables. Parmi ces variables, il y a la température, l'humidité spécifique et l'altitude pour différents niveaux de pression. Nous nous intéresserons tout particulièrement à ces quatre paramètres, car ce sont eux qui vont nous permettre d'estimer le ZTD de nos stations.

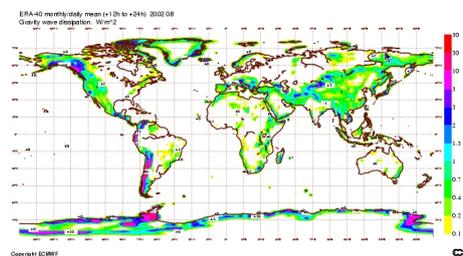


FIGURE 18 : Exemple de maillage ERA40

Détermination des ZTD avec ERA40 ERA40 utilise un maillage de 120km de côté en longitude et en latitude qui recouvre l'ensemble de la Terre (figure 18). De plus il divise l'atmosphère en 21 niveaux de pression équivalents.

La détermination des ZTD a été faite sur deux ans et demi du premier janvier 2007 au 31 mai 2009, et elle est constituée de quatre étapes :

La récupération des paramètres météorologiques : Tout d'abord j'ai déterminé les quatre points du maillage d'ERA40, espacés de 120km, délimitant ma zone d'étude, les coordonnées de ces points sont présentés par le tableau 2. Puis nous avons rapatrié les listes des différents paramètres météorologiques pour ces quatre points. Ces listes sont des tableaux où la première colonne présente les jours et les 21 colonnes qui suivent indiquent les valeurs du paramètre météorologique recherché pour les 21 niveaux de pression correspondants. Ainsi nous avons trois listes par point du maillage : une liste des températures, une liste des humidités spécifiques et une liste des altitudes.

La détermination des ZTD pour les 21 niveaux de pression au quatre points du maillage : La publication de Baby et al. (1988) [2] (grâce encore une fois à un modèle en couches de l'atmosphère), détermine une loi liant le ZTD aux quatre paramètres que sont la température T , l'humidité spécifique e , la pression P et l'altitude z . Cette équation est :

$$ZTD = 10^{-6} \left\{ \frac{k_1 R_d}{g_m} P(z_0) + \int_{z_0}^{\infty} \left[\left(k_2 - \frac{R_d}{R_v} k_1 \right) \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right] dz \right\} \quad (1)$$

Où g_m est l'accélération gravitationnelle moyennée sur la troposphère, R_d et R_v sont respectivement, les constantes spécifiques d'air sec et de vapeur d'eau. R_d égale 287,05 J/kg/K et R_v égale 461,495 J/kg/K. Et k_1 , k_2 et k_3 sont des constantes. k_1 égale 0,776 K/Pa, k_2 égale 0,716 K/Pa et k_3 égale $3,75 \cdot 10$ puissance 3 Kcarré/Pa.

Avec cette formule, nous pouvons donc déterminer les ZTD pour les 21 niveaux de pression et donc pour les 21 altitudes correspondantes. Toutefois cette opération n'est pas simple car dans l'équation intervient une intégrale en z , Or nous ne disposons que de 21 points. Pour mieux déterminer cette intégrale nous avons donc utilisé une méthode d'interpolation cubique (ou méthode spline) pour déterminer la température et l'humidité spécifique pour des intervalles en altitude plus petits. Cette méthode n'a été appliquée que pour déterminer l'intégrale. Nous ne déterminons donc toujours les ZTD que pour les 21 altitudes définies précédemment. Le programme faisant cette opération à été créé par Romain Jolivet, doctorant de mon équipe au LGIT. Ainsi grâce à ce programme j'ai pu déterminer les ZTD des quatre points du maillage encadrant ma zone d'étude pour 21 altitudes.

L'interpolation des ZTD aux altitudes des stations pour les quatre points du maillage : De la même manière que précédemment j'ai créé un programme utilisant le méthode d'interpolation cubique pour rééchantillonner mes ZTD en fonction de l'altitude et ainsi les estimer aux trois altitudes des stations du réseau d'Argentière.

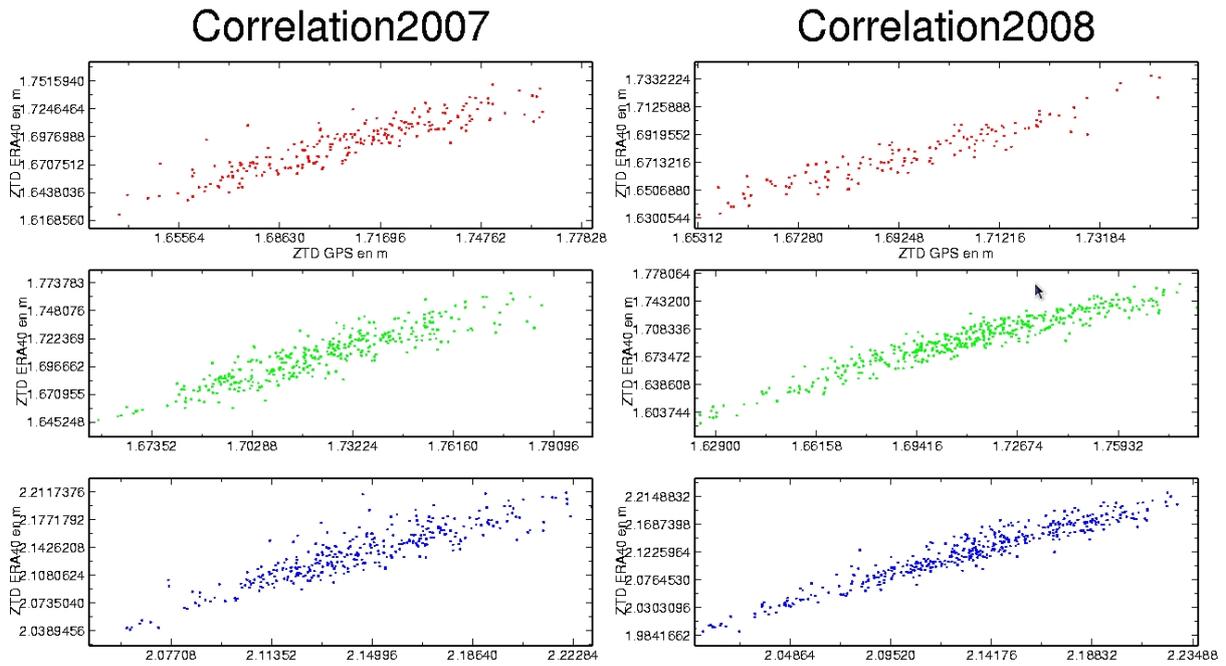


FIGURE 19 : Corrélation entre les ZTD calculés par ERA40 et ceux estimés par l'analyse GPS entre 2007 et 2008. Est représentée en rouge la variation de ARGR, en vert celle de ARGG et en bleu celle de CHMX

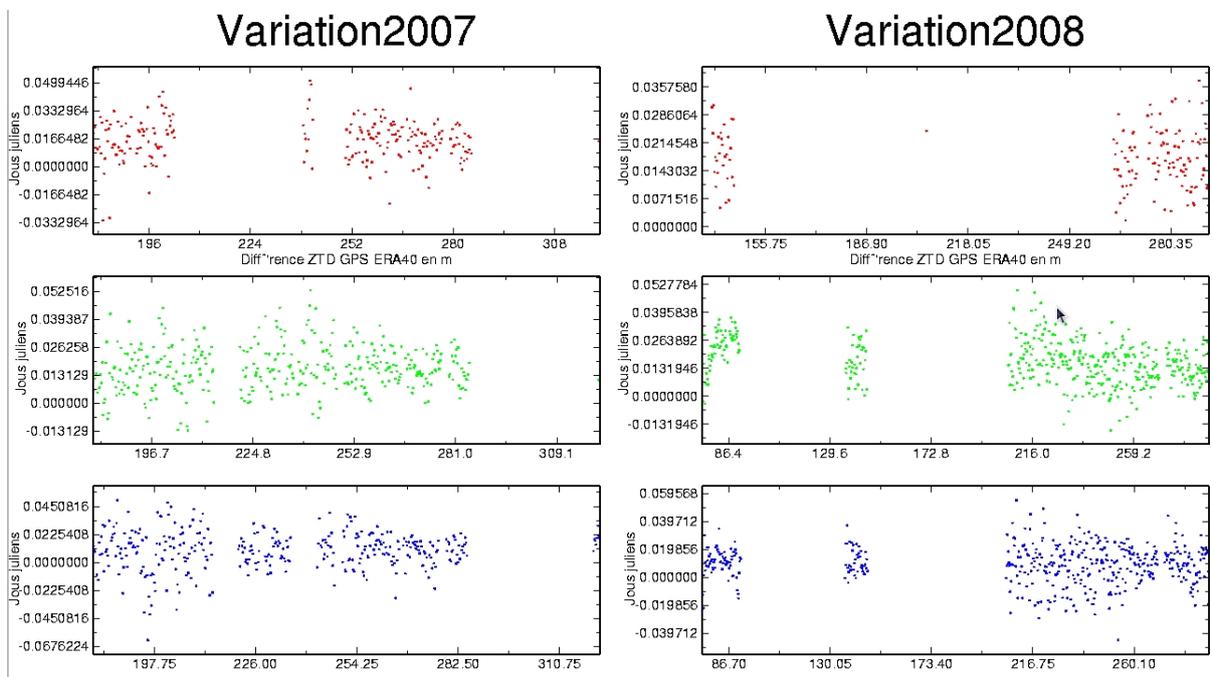


FIGURE 20 : Différence entre les ZTD calculés par ERA40 et ceux estimés par l'analyse GPS entre les jours 2007 et 2008. Est représentée en rouge la variation de ARGR, en vert celle de ARGG et en bleu celle de CHMX

L'interpolation des ZTD en longitude et latitude des trois stations du réseau d'Argentière : Il nous reste maintenant à déterminer les ZTD pour les longitudes et latitudes de nos trois stations (voir tableau 2). Pour cela nous allons encore une fois faire une interpolation. Pour une altitude donnée (donc pour une station donnée) Nous faisons une interpolations bi-linaire des ZTD aux quatre points du maillage ERA40, pour estimer le ZTD à la longitude et à la latitude de la station étudiée.

J'ai systématisé ces quatre opérations pour les trois stations et pour chaque date comprise entre début 2007 et mi 2009, puis j'ai sélectionné uniquement les ZTD correspondant aux dates où j'ai également estimé les ZTD par la méthode GPS. Nous avons ainsi obtenu les résultats présentés par la figure 20. Est représentés sur cette figure la différence entre les ZTD calculés par le modèle ERA40 et les ZTD estimés par l'analyse GPS, pour la station ARGR (courbe rouge) en haut, la station ARGG, au milieu (en vert) et la station CHMX en bas (en bleu) pour l'année 2008. On observe que ceux-ci sont relativement bien corrélés. Pour quantifier cette corrélation, j'ai tracé les ZTD calculés par le modèle ERA40 en fonction des ZTD estimés par l'analyse GPS. Ces graphiques sont présentés sur la figure 19. La linéarité de ces graphiques prouve la corrélation entre les détermination de ces ZTD. Toutefois les droites issues des régressions linéaires ont toutes des coefficients directeurs proches de 1 mais des ordonnées à l'origine proches de 2cm, ce qui montre que l'estimation a un biais systématique de l'ordre de 2cm. Enfin on voit que les coefficients de correction linéaires R^2 sont tous très proches de 0,9. On peut donc conclure que ces deux estimations du ZTD sont corrélées avec un biais de l'ordre de 2cm, et que les coefficients de corrélation, même s'ils sont acceptables, ne sont peut être pas suffisants pour affirmer que ERA40 à la précision suffisante pour une zone d'étude régionale.

L'estimation des paramètres troposphériques par analyse GPS peut avoir de multiples applications et peut notamment servir, comme c'est le cas ici, à valider les modèles météorologiques globaux pour la détermination des ZTD en vue de corrections troposphériques en interférométrie. Dans cette partie nous avons donc analysé la variabilité des ZTD estimés par la méthode GPS et nous avons introduit l'une des applications de cette estimation : la validation du modèles ERA40. Cette étude met en évidence la nécessité de faire une telle validation.

6 Conclusion

Grâce à l'analyse de données des stations GPS du glacier d'Argentière, faite avec différent outils informatiques puissants tels que GAMIT/GLOBK, nous avons pu mener deux études (le suivi temporel du positionnement et de la troposphère) ayant chacune des résultats impliquant

de nombreuses perspectives. Ainsi, même si le maintien de ce réseau demande une grande implication et comprend des difficultés d'accès et d'entretien du matériel, celui-ci a réellement son intérêt scientifique et notamment pour sa complémentarité avec les mesures radar. Le GPS présente effectivement une continuité temporelle dans la mesure, et il est capable d'estimer les délais troposphériques, deux capacités complémentaires à l'InSAR.

Les résultats obtenus sont donc répartis sur deux études. Dans la première étude nous avons pu mettre en évidence différents paramètres de la dynamique du glacier, tels que le déplacement de celui-ci et les variations de la vitesse superposées. En effet, d'une part nous avons montré la variation saisonnière du déplacement du glacier, avec une réelle accélération en été. Ceci est en accord avec les études glaciologiques des glaciers tempérés tels que le glacier d'Argentière. D'autre part nous avons pu mesurer la variabilité spatiale du glissement par la différence de vitesses moyennes sur 14 jours (du jour julien 299 au jour 313 de 2008) de deux stations sur le glacier. Cette mesure a pu être corroborée par les mesures annuelles faites sur le glacier par Vincent et al., 2009 [6].

Dans la seconde étude nous avons pu déterminer les paramètres troposphériques à l'aplomb de trois stations. Ceci nous a permis d'observer la variation temporelle mais aussi en altitude de ces paramètres. L'étude de ces variations a mis en évidence une variabilité non négligeable des ZTD notamment dans les couches les plus basses qui ne peut pas être prise en compte par des modèles météorologiques globaux tels que ERA40. Nous avons en effet montré que malgré la bonne corrélation entre les calculs ERA40 et l'analyse GPS il subsiste un manque d'amplitude de la variabilité troposphérique dans ERA40. La variabilité ERA40 est plus faible de l'ordre de 2cm, ce qui ne peut être négligé dans l'analyse radar.

Ce stage aura donc eu une contribution interdisciplinaire. En effet son aspect principal est la télédétection, où il aura contribué à la méthodologie d'imagerie radar, notamment par la mesure de la variabilité réelle de la troposphère dans différentes couches au dessus du glacier. Il aura eu un aspect glaciologique, avec la mise en évidence de la dynamique du glacier. Et enfin un aspect atmosphérique, avec la validation des performances d'un modèle météorologique global pour ce type d'étude locale.

A Annexes

A.1 Vitesses annuelles de surface obtenues par l'étude de C. Vincent et al., 2009, [6]

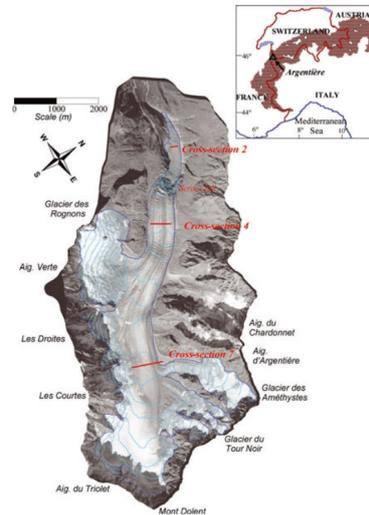


FIGURE 21 : Présentation du glacier d'Argentière (C. Vincent et al., 2009, [6])

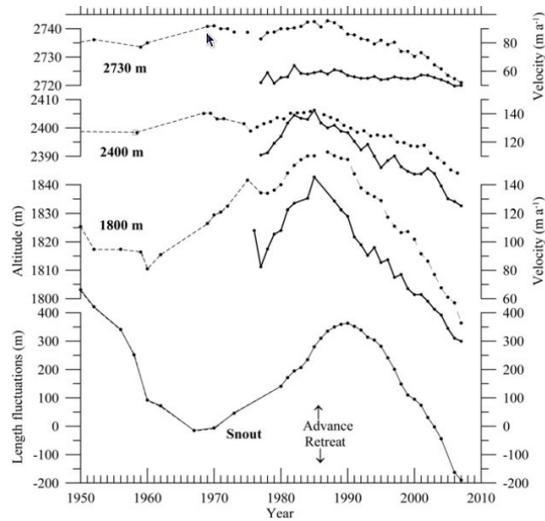


FIGURE 22 : Vitesses annuelles mesurées depuis 1950, sur le glacier d'Argentière sur trois zones différentes, 1800m, 2400m, et 2700m, image issue de l'article Vincent et al 2009, [6]

A.2 Séries temporelles des résultats à l'échelle d'Origine

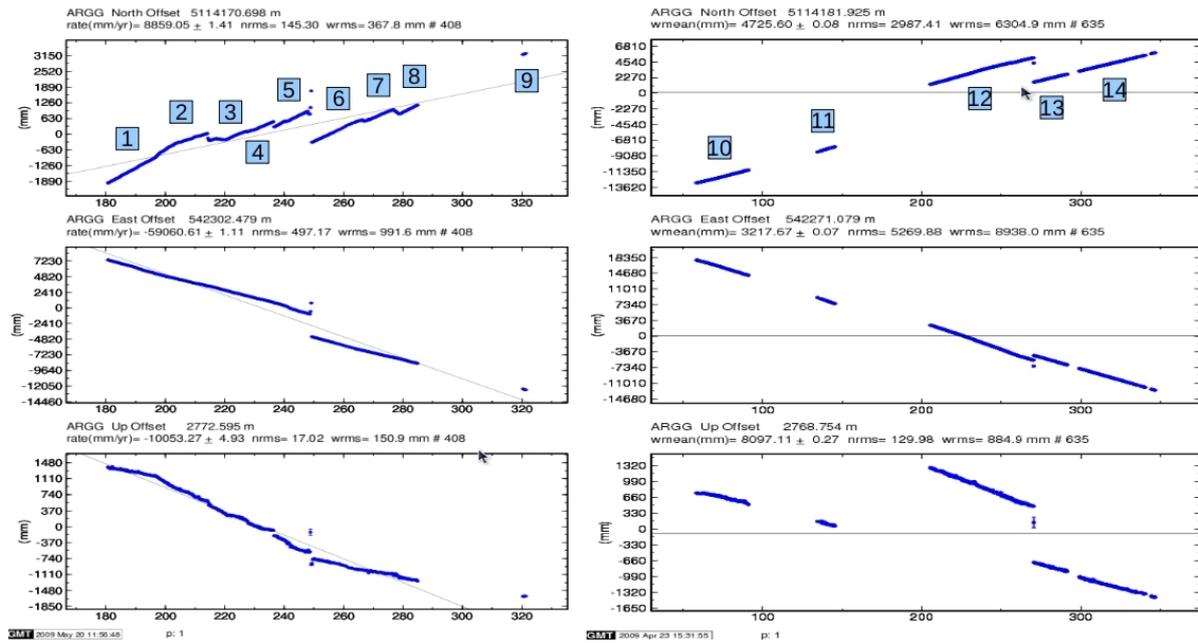


FIGURE 23 : Séries temporelles de positionnement de la station ARGG avant réajustement, de 2007 (à gauche) et de 2008 (à droite) pour les composantes Nord (en haut), Est (au milieu) et verticale (en bas)

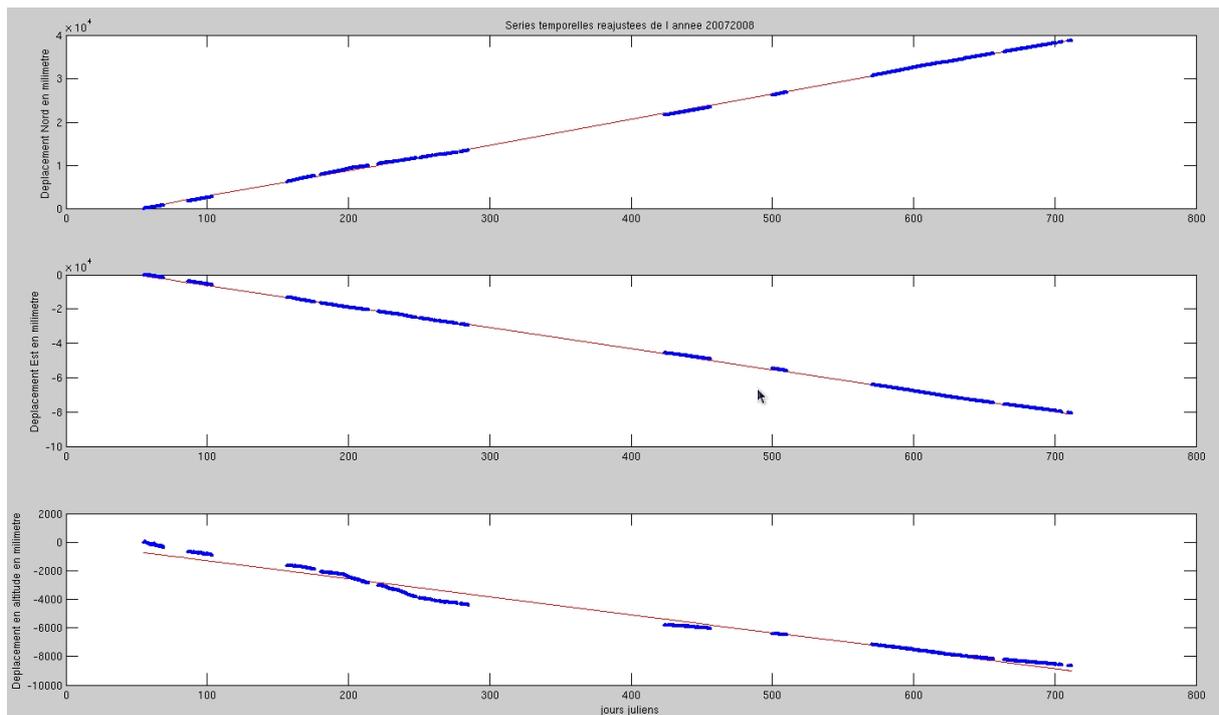


FIGURE 24 : *Séries temporelles de positionnement de la station ARGG après réajustement, de 2007 (à gauche) et de 2008 (à droite) pour les composantes Nord (en haut), Est (au milieu) et verticale (en bas)*

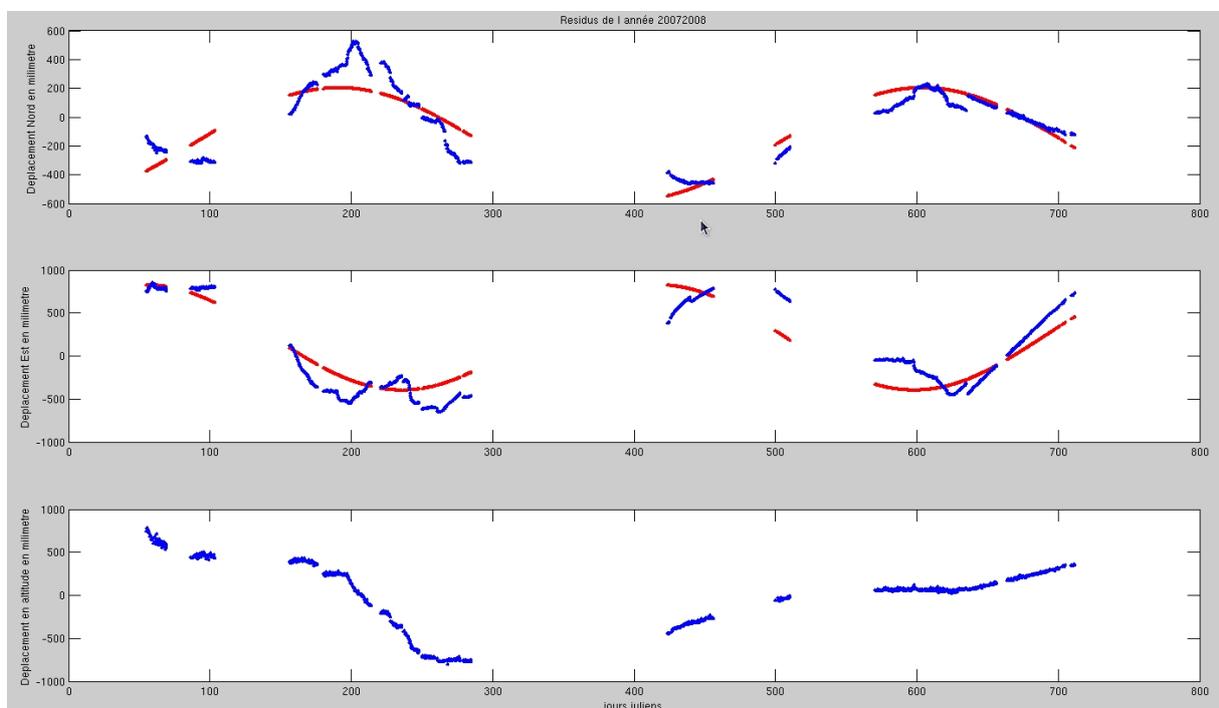


FIGURE 25 : *Séries temporelles des résidus du positionnement de la station ARGG après réajustement, de 2007 (à gauche) et de 2008 (à droite) pour les composantes Nord (en haut), Est (au milieu) et verticale (en bas)*

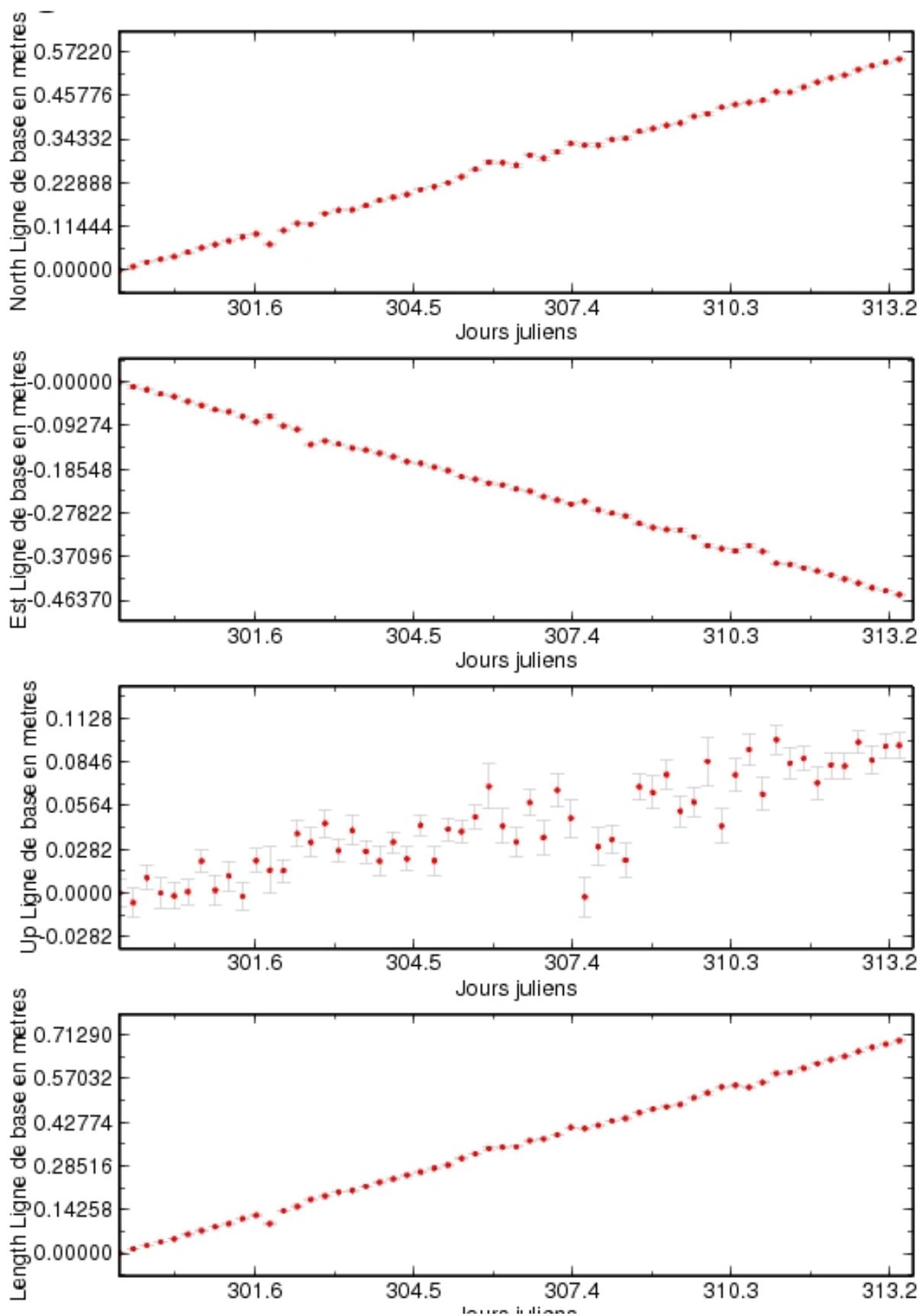


FIGURE 26 : *Séries temporelles des lignes de base entre ARGG et ARG5, entre le jour 299 et 313 de 2008 pour les composantes Nord (en haut), Est (en second), verticale (en troisième) et en longueur (en bas)*

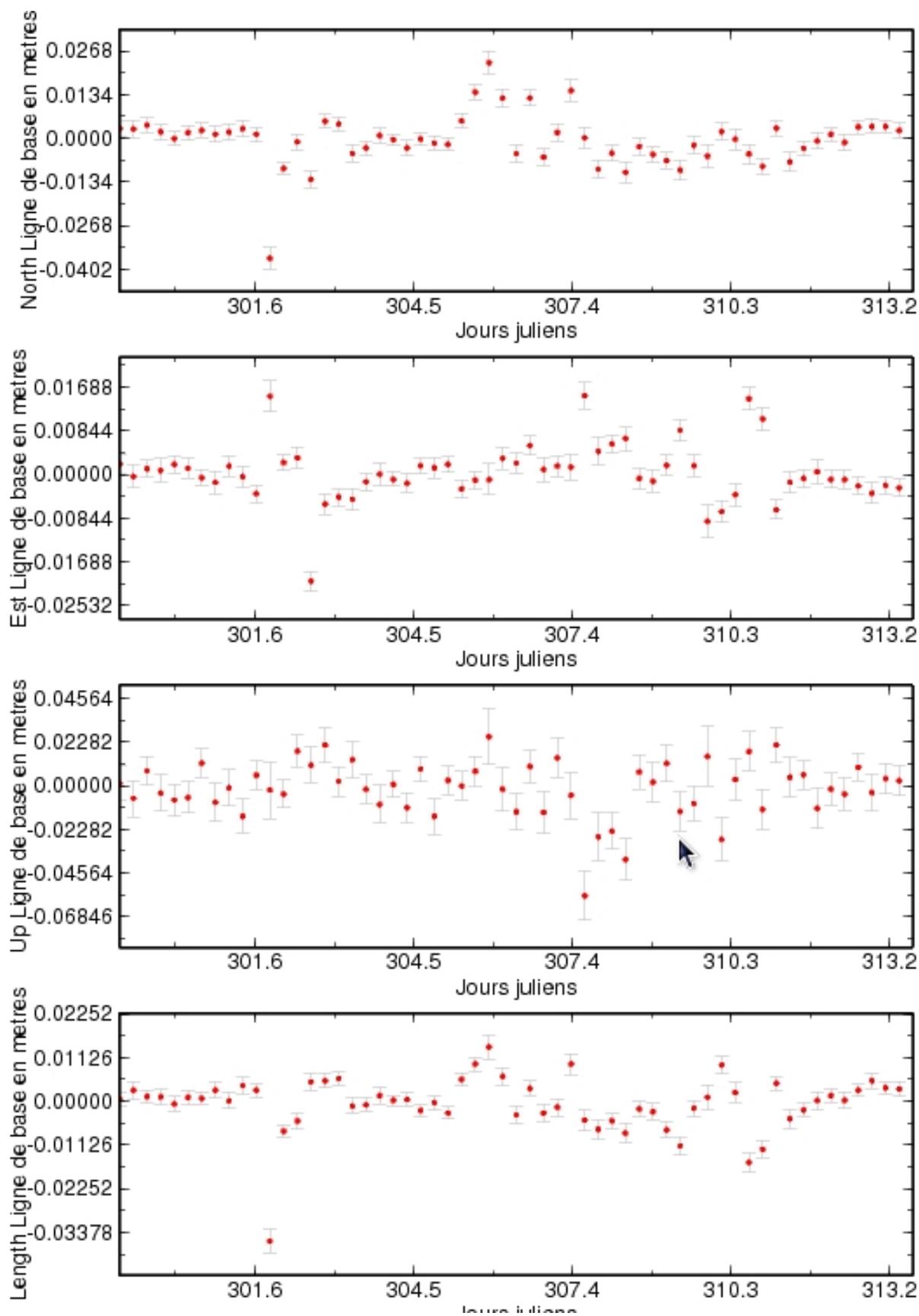


FIGURE 27 : *Séries temporelles des résidus des lignes de base entre ARGG et ARGS, entre le jour 299 et 313 de 2008 pour les composantes Nord (en haut), Est (en second), verticale (en troisième) et en longueur (en bas)*

ZTD_de_argr,_argg_et_chmx

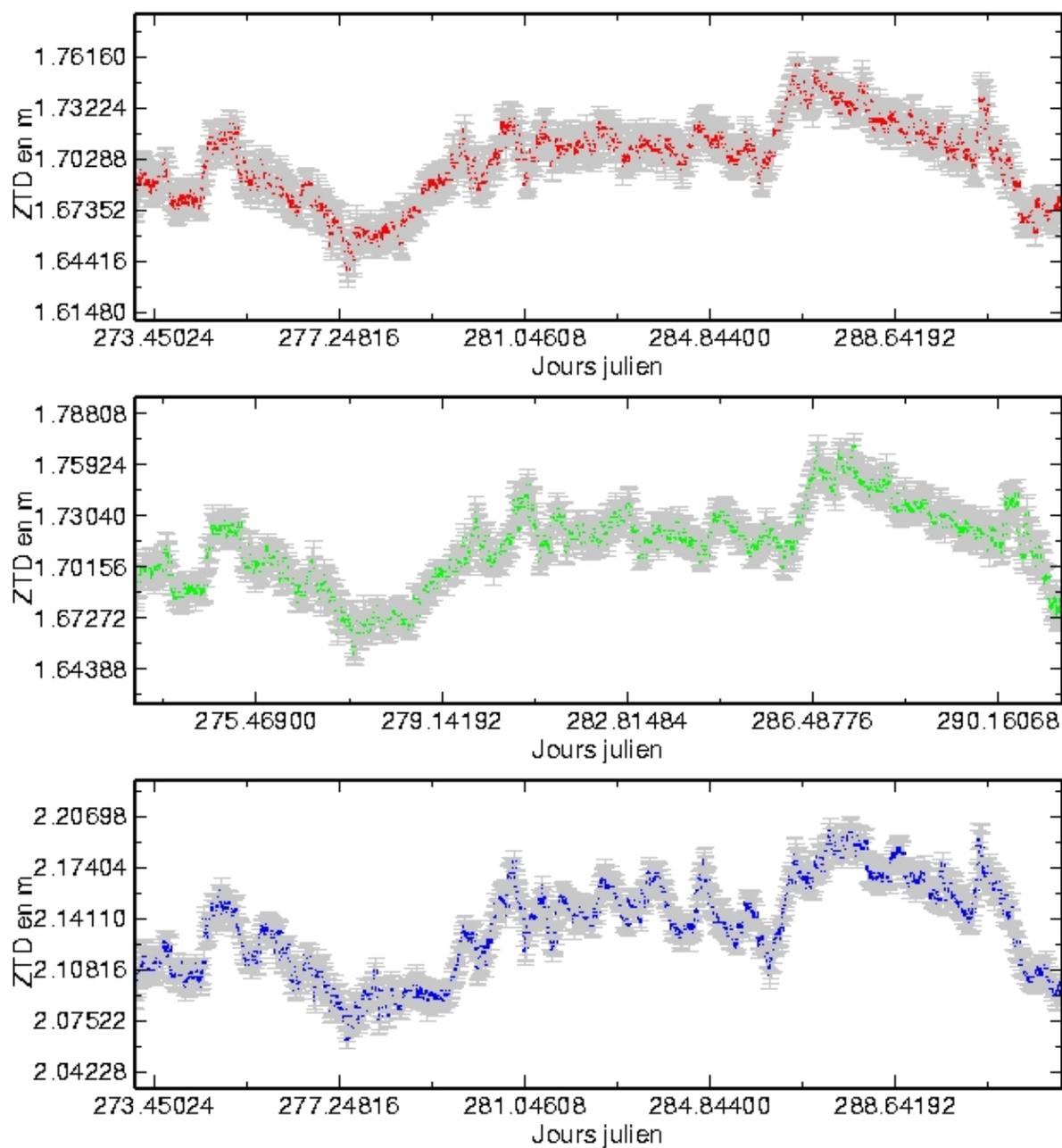


FIGURE 28 : Délais zénithaux troposphériques, entre le jour 273 et 299 de 2008 pour les stations ARGR (en haut), ARGG (au milieu), et CHMX (en bas)

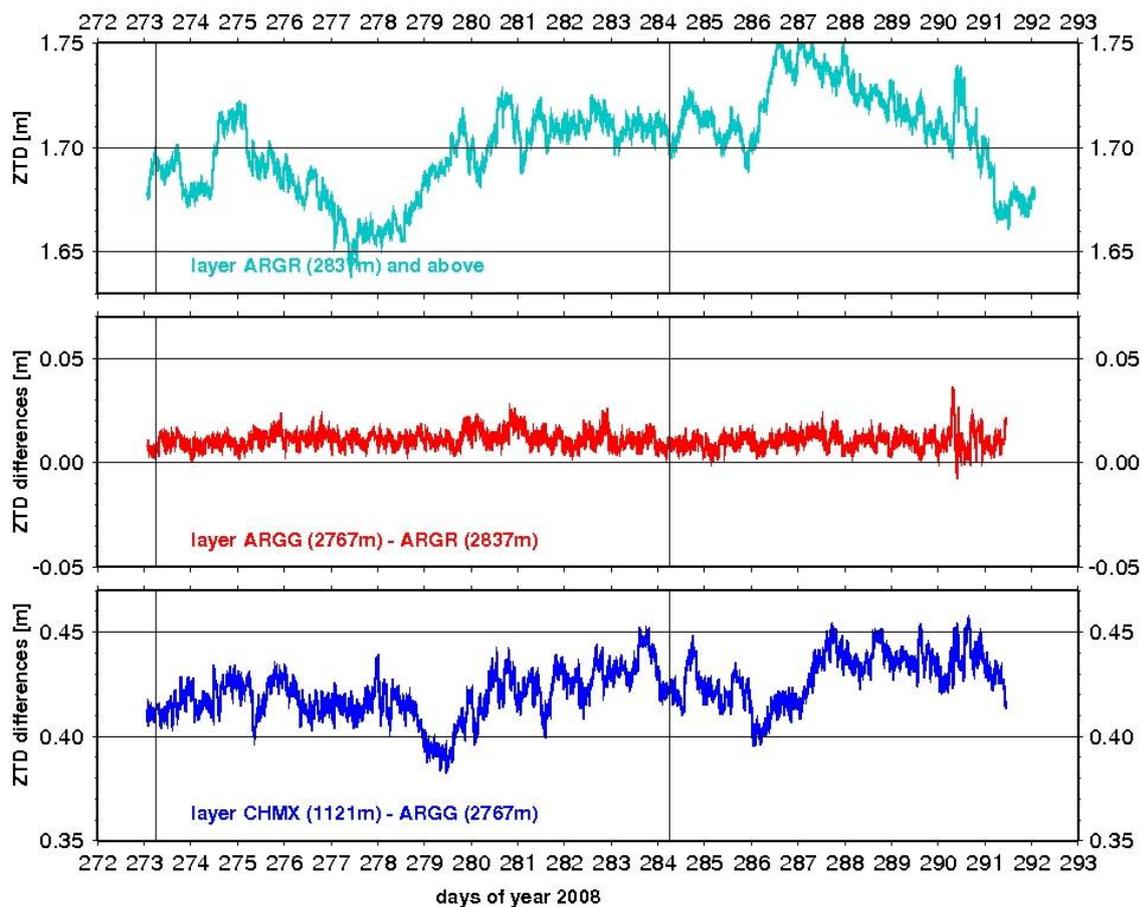


FIGURE 29 : Délais zénithaux troposphériques différentiels, entre le jour 273 et 299 de 2008 pour les stations ARGR (en haut), ARGG (au milieu), et CHMX (en bas)

A.3 Etude de comparaison entre le modèle ERA40 et l'analyse GPS.

Correlation2008

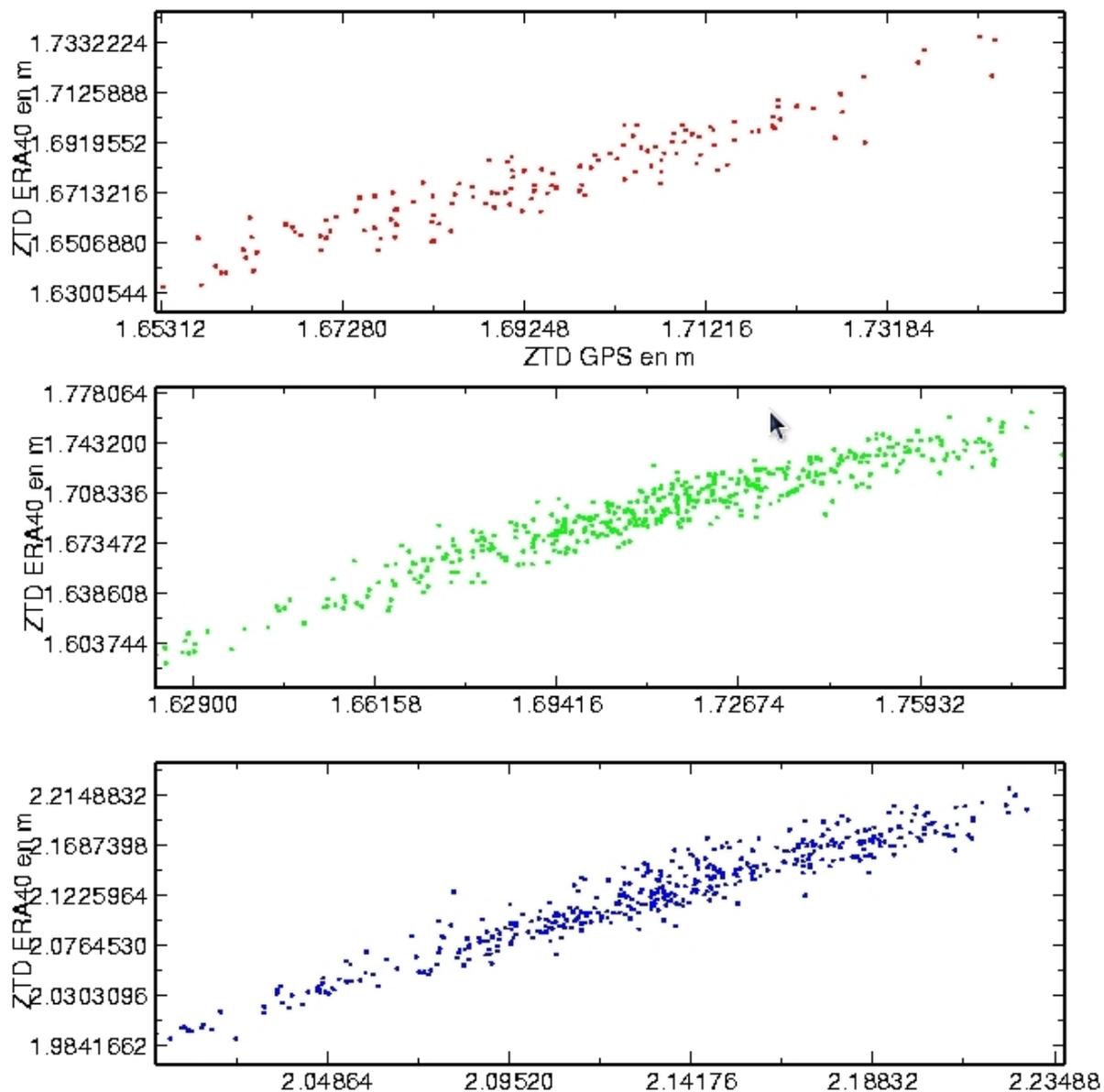


FIGURE 30 : Correlation entre les ZTD mesurés par la méthode GPS (en abscisses) et calculé par ERA40 (en ordonnées), pour 2008 pour les stations ARGR (en haut), ARGG (au milieu), et CHMX (en bas)

Correlation2007

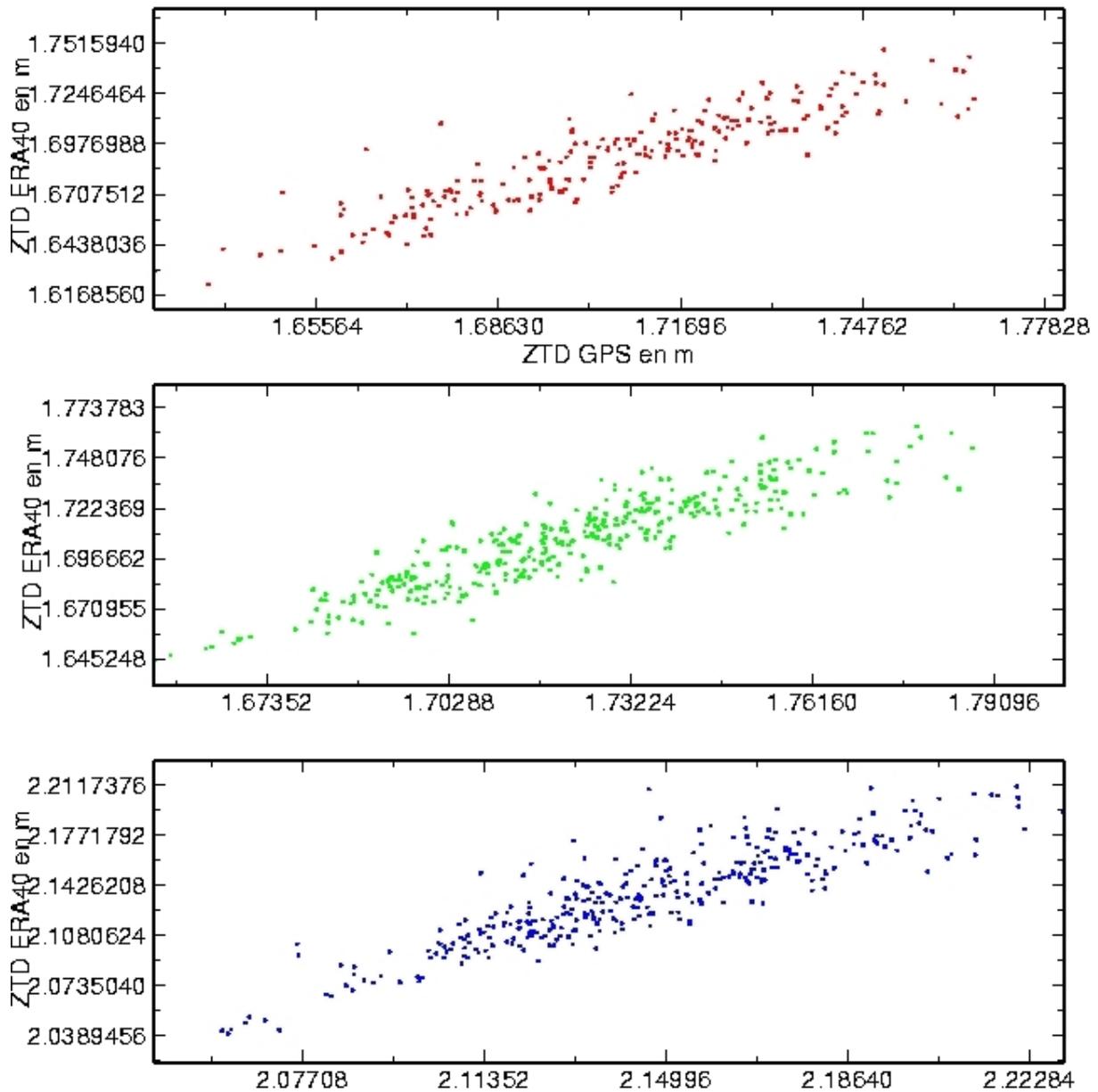


FIGURE 31 : Correlation entre les ZTD mesurés par la méthode GPS (en abscisses) et calculé par ERA40 (en ordonnées), pour 2007 pour les stations ARGR (en haut), ARGG (au milieu), et CHMX (en bas)

Variation2008

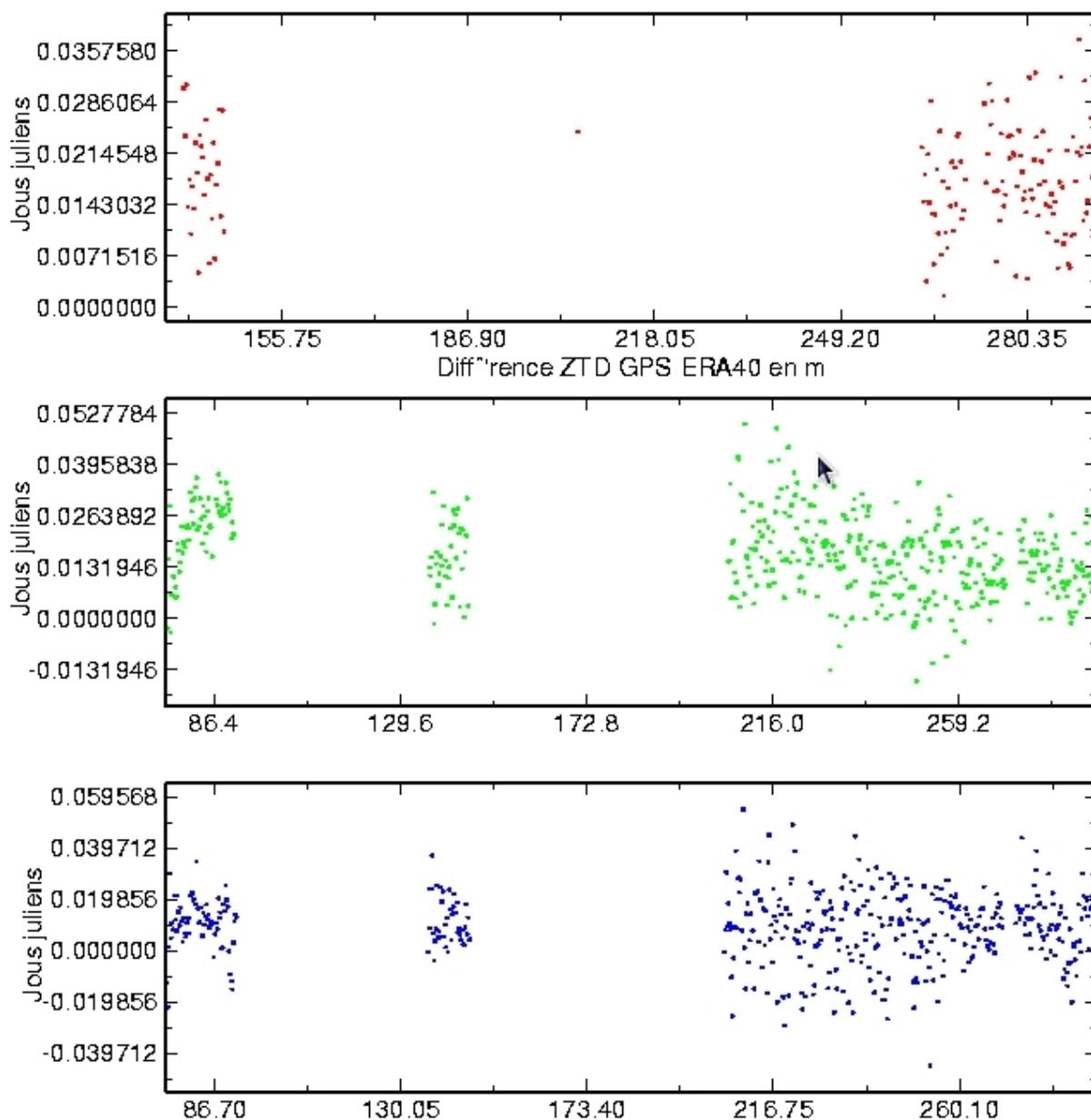


FIGURE 32 : Différence entre les ZTD mesurés par la méthode GPS et calculés par ERA40, pour 2008 pour les stations ARGR (en haut), ARGG (au milieu), et CHMX (en bas)

Variation2007

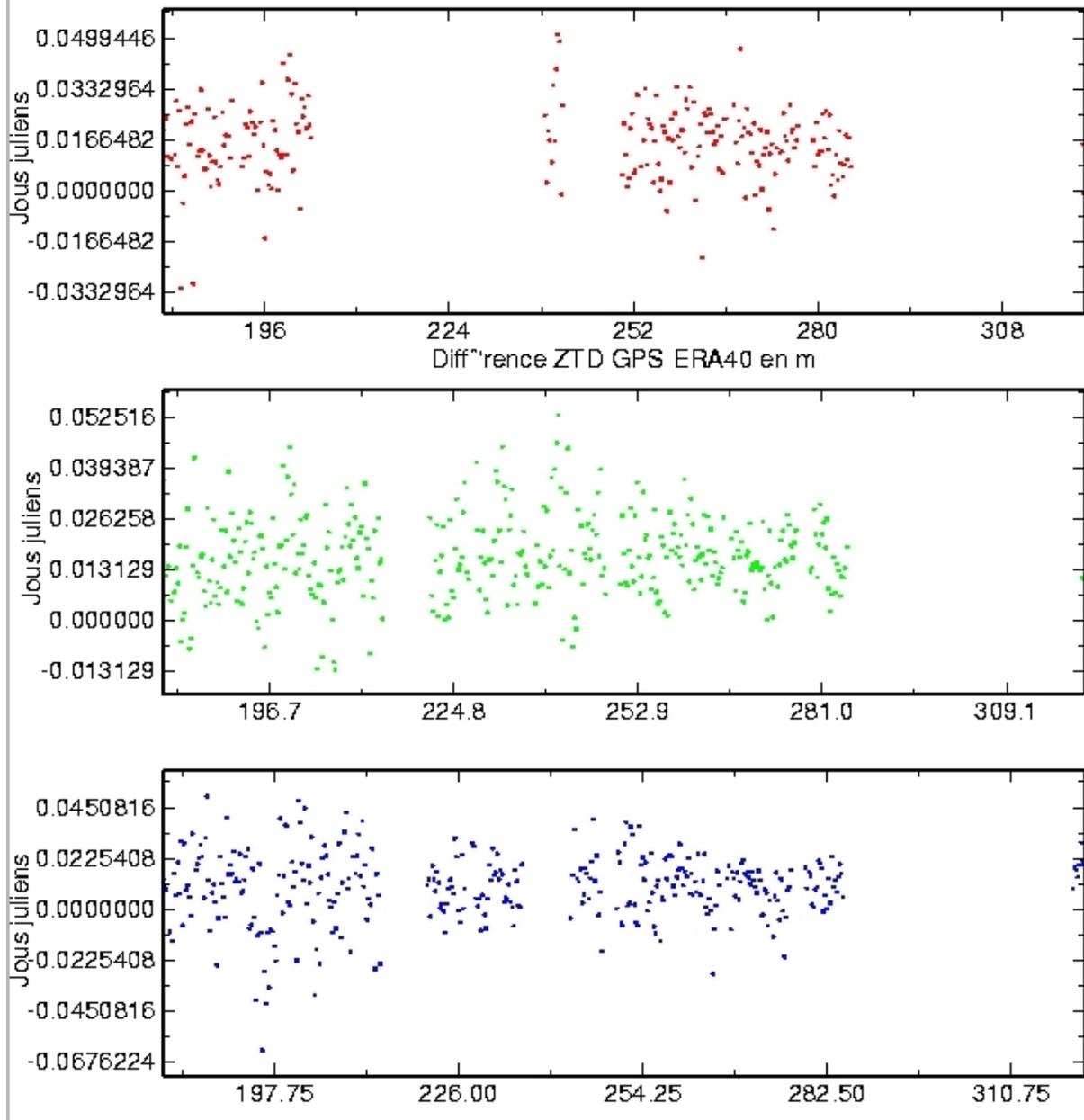


FIGURE 33 : Différence entre les ZTD mesurés par la méthode GPS et calculés par ERA40, pour 2007 pour les stations ARGR (en haut), ARGG (au milieu), et CHMX (en bas)

A.4 Organigramme des logiciels utilisés GAMIT/GLOBK

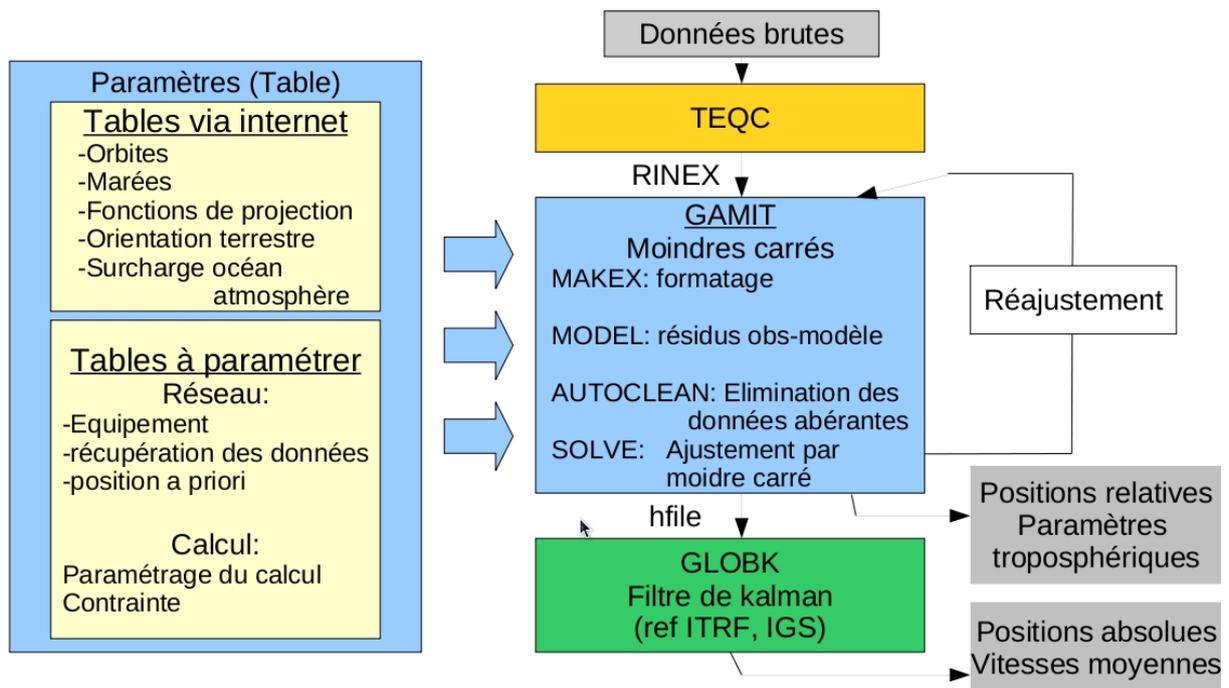


FIGURE 34 : Organigramme des logiciels utilisés pour l'analyse GPS

Références

- [1] Z. Altamimi, X. Collilieux, J. Legrand, B. Garayt, and C. Boucher. ITRF2005 : A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 112(B9) :B09401, 2007.
- [2] H. BABY, P. Gole, and J. Lavergnat. A model for the tropospheric excess path length of radio waves from surface meteorological measurements. *Radio Science*, 23(6) :1023–1038, 1988.
- [3] L. Bousquet, M. Gay, B. LEGRESY, G. VASILE, and E. Trouvé. Velocities field of mountain glacier obtained by Synthetic Aperture Radar Interferometry. Comparison of InSAR and surveyed velocities. 2004.
- [4] TA Herring, RW King, and SC McClusky. Introduction to GAMIT/GLOBK 10.30, 2006.
- [5] J. Van Baelen and G. Penide. Study of water vapor vertical variability and possible cloud formation with a small network of GPS stations. *Geophysical Research Letters*, 36(2) :L02804, 2009.
- [6] C. Vincent, A. Soruco, D. Six, and E. Le Meur. Glacier thickening and decay analysis from 50 years of glaciological observations performed on Glacier d’Argentiere, Mont Blanc area, France. *Annals of Glaciology*, 50(1) :73–79, 2009.